



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta dopravní
Katedra letecké dopravy

Dopady GNSS rušení na provoz na LKPR
Impact of GNSS Interference on Operations at LKPR

Diplomová práce

Studijní program: Technika a technologie v dopravě a spojích

Studijní obor: Provoz a řízení letecké dopravy

Vedoucí práce: Ing. Jakub Steiner

Ing. Stanislav Pleninger, Ph.D.

Bc. Marek Chaloupecký

Praha 2024



K621.....Ústav letecké dopravy

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

Jméno a příjmení studenta (včetně titulů):

Bc. Marek Chaloupecký

Studijní program (obor/specializace) studenta:

navazující magisterský – PL – Provoz a řízení letecké dopravy

Název tématu (česky): **Dopady GNSS rušení na provoz na LKPR**

Název tématu (anglicky): Impact of GNSS Interference on Operations at LKPR

Zásady pro vypracování

Při zpracování diplomové práce se řiďte následujícími pokyny:

- Cílem práce je prověření dopadů GNSS rušení na provoz na letišti Václava Havla v Praze za pomoci výstupů z detektoru GNSS rušení instalovaného na LKPR a technologie ADS-B mapující provoz na letišti.
- Objasnění problematiky GNSS rušení.
- Popis využitých technologií - detektoru GNSS rušení, GNSS rušiček a dalších.
- Úloha reverse engineering - stanovení převodu bezrozměrného výstupu detektoru "MaxPower" na intenzitu rušícího signálu na základě praktických experimentů.
- Porovnávání výstupů z detektoru GNSS rušení a ADS-B a metodika nalezení potvrzených případů GNSS rušení s vlivem na ADS-B.
- Statistické zpracování (kvantifikace) případů GNSS rušení s vlivem na provoz na LKPR.



- 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: ADS-B IMPLEMENTATION AND OPERATIONS GUIDANCE DOCUMENT
Jamming of GNSS Receiver on B737 MAX Aircraft and Its Impact on ADS-B Technology
STRIKE3 project

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 vyplývajícího ze standardní doby studia)

Datum odevzdání diplomové práce: **15. května 2024**
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. Marek Chaloupecký
jméno a podpis studenta

V Praze dne..... 1. prosince 2023



Abstrakt

GNSS rušení je v okolí Letiště Václava Havla v Praze detekováno téměř každý den, ale jeho dopad na letecký provoz nebyl doposud dopodrobna zmapován. V případě ovlivnění palubní avioniky GNSS rušením, může dojít ke ztrátě navigační výkonnosti letadla, což může mít v kritických částech letu dopad na bezpečnost a plynulost provozu. Cílem práce je prověření dopadů GNSS rušení na provoz na letišti Václava Havla v Praze za pomoci výstupů z detektoru GNSS rušení instalovaného na LKPR a technologie ADS-B mapující provoz na letišti. Pro dosažení stanoveného cíle byla provedena kalibrace odezvy GNSS rušení na detektoru a z té byla sestavena převodní tabulka přiřazující bezrozměrné výstupy detektoru k intervalům přibližných hodnot intenzity rušení v místě detektoru. Metodika analýzy vlivu GNSS rušení na letecký provoz spočívá v aplikaci matematického diskrétního modelu pro detekci GNSS rušení pomocí parametrů kvality obsažených v ADS-B na data, získaná z oblasti odpovídající přibližné rozloze řízeného okrsku za duben 2021 až březen 2022. Součástí metodiky je následné porovnání dat s výstupy z detektoru umístěném na LKPR za pomoci analytického nástroje Power BI. Výsledkem práce je statistika počtu letadel vystavených GNSS rušení a analýza toho, jak silná intenzita rušení v okolí letiště je zapotřebí k ovlivnění palubní avioniky u konkrétních typů letadel.

Klíčová slova: ADS-B, GNSS, Jamming, Rušení



Abstract

GNSS interference is detected in the vicinity of Václav Havel Airport in Prague almost every day, but its impact on air traffic has not yet been mapped in detail. In the event of GNSS interference affecting on-board avionics, aircraft navigation performance may be lost, which may have an impact on the safety and continuity of operations during critical phases of the flight. The aim of this thesis is to investigate the impact of GNSS interference on operations at Václav Havel Airport in Prague using outputs from the GNSS interference detector installed at LKPR and ADS-B technology mapping the airport traffic. In order to achieve the stated objective, the GNSS interference response of the detector was calibrated and a conversion table was constructed from this, matching the dimensionless detector outputs to intervals of approximate interference intensity values at the detector location. The methodology for the analysis of the impact of GNSS interference on air traffic consists in the application of a mathematical discrete model for the detection of GNSS interference using the quality parameters contained in ADS-B to data obtained from an area corresponding to the approximate area of the controlled zone for the period April 2021 to March 2022. The methodology includes a subsequent comparison of the data with the outputs from the detector located at LKPR using the Power BI analysis tool. The result of the work is a statistic of the number of aircraft exposed to GNSS interference and an analysis of how much interference in the vicinity of the airport is required to affect on-board avionics for specific aircraft types.

Keywords: ADS-B, GNSS, Interference, Jamming



Poděkování

Rád bych tímto poděkoval panu Ing. Jakobovi Steinerovi a panu Ing. Stanislavu Pleningerovi, Ph.D. za odborné konzultace, rady, vedení a poskytnuté materiály v průběhu zpracování této diplomové práce. Dále bych rád poděkoval celé své rodině za podporu při mém studiu.



Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem předloženou práci vypracoval samostatně a uvedl veškeré použité informační zdroje v souladu s Metodickým pokynem o dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací a Rámcovými pravidly používání umělé inteligence na ČVUT pro studijní a pedagogické účely v navazujícím magisterském studiu.

Nemám závažný důvod proti užívání tohoto školního díla ve smyslu § 60 Zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon).

V Praze dne 15. května 2024



Podpis



Obsah

Úvod	14
1 Globální družicové navigační systémy	15
1.1 Radiové spektrum GNSS systémů	17
1.2 Rušení GNSS	18
1.2.1 Jamming	19
1.2.2 Spoofing	20
1.2.3 Meaconing	20
1.3 Možnosti detekce GNSS rušení	20
1.3.1 Detektor na Letišti Praha	21
2 Detekce GNSS rušení za pomoci ADS-B	25
2.1 Automatic Dependent Surveillance – Broadcast	26
2.1.1 Princip činnosti a složení zprávy	28
2.1.2 Parametry kvality	31
2.1.3 Zprávy obsahující parametry kvality	35
2.1.4 Současné metody detekce RFI z ADS-B	38
3 Úloha kalibrace odezvy na detektoru GNSS rušení	41
3.1 Metodika měření	41
3.1.1 Experimentální měření D1	43
3.1.2 Experimentální měření LKPR	45
3.2 Zpracování a vyhodnocení výsledků	46
3.3 Výsledky a diskuze	48
4 Analýza vlivu GNSS rušení na provoz na LKPR	51
4.1 Metodika	51
4.2 Výsledky	56
4.2.1 Popis reportů jednotlivých případů s detekovaným rušením GNSS ...	57
4.2.2 Oblasti s nejčastějším výskytem detekovaného rušení GNSS	61
4.2.3 Letadla vysílající chybné parametry kvality ADS-B	62
5 Diskuze	64
6 Závěr	67
Seznam použité literatury	69
Přílohy	74



Seznam obrázků

Obrázek 1 - Rozdělení segmentů GNSS [2]	16
Obrázek 2 - Frekvenční pásma jednotlivých GNSS konstelací [6].....	18
Obrázek 3 - Rušička signálu GPS [9].....	19
Obrázek 4 - Výseč oblasti, ve které se nachází detektor GNSS rušení GSS100D na LKPR.....	22
Obrázek 5 - Schéma systému GSS100D [15].....	23
Obrázek 6 - Výstupní data GSS100D v uživatelském rozhraní výrobce [15].....	24
Obrázek 7 - Grafický výstup zaznamenané události rušení detektorem GSS100D...24	
Obrázek 8 - Vývoj vybavenosti ADS-B v2 v rámci evropského vzdušného prostoru (Network Manager Area) v letech 2018 - 2024 [21]	27
Obrázek 9 - Evropský vzdušný prostor (Network Manager Area) pod správou EUROCONTROL [22]	28
Obrázek 10 - Popis činnosti 1090 MHz ADS-B [19].....	30
Obrázek 11 - Rušička TG5CA používaná v rámci experimentálního měření [33].....	42
Obrázek 12 - Výseč oblasti ve které se nachází detektor GNSS rušení na D1	45
Obrázek 13 - Grafické zpracování překryvu hodnot z Tabulky 15	49
Obrázek 14 - Předem definovaná oblast, ze které byla stahována ADS-B data.....	52
Obrázek 15 - Falešně detekované zprávy rušení GNSS	55
Obrázek 16 - Počet letů, u kterých bylo detekováno GNSS rušení v jednotlivých měsících sledovaného období od 04/2021 do 03/2021	57



Obrázek 17 -Trajektorie letu Bombardier Global 6000 s vyznačeným úsekem rušení	59
Obrázek 18 - průběhu hodnot parametrů kvality v čase přiletu letounu Bombardier Global 6000 na letiště Praha kdy došlo dopadu GNSS rušení na parametry kvality .	60
Obrázek 19 - PSD diagram a waterfall diagram signálu zaznamenaného detektorem v čase letu Bombardier Global 6000	61
Obrázek 20 - Oblasti s výskytem detekovaného GNSS rušení.....	62
Obrázek 21 - Trajektorie letu vrtulníku Policie ČR, který byl označen za rušený.....	63
Obrázek 22 - Průběh hodnot parametrů kvality v čase letu vrtulníku Policie ČR, který byl označen jako rušený.....	63



Seznam tabulek

Tabulka 1 - Struktura ADS-B zprávy DF17	30
Tabulka 2 - Typy ADS-B zpráv s příslušným Type Code a odkazy na paragrafy předpisu DO- 260B [19]	31
Tabulka 3 - Rozsah hodnot EPU, kterým odpovídají jednotlivé hodnoty NACp [25]..	32
Tabulka 4 - Hodnoty NACv a k nim odpovídající rozsah horizontální chyby [25].....	33
Tabulka 5 - Rozsah hodnot Rc, kterým odpovídají jednotlivé hodnoty NIC [19]	34
Tabulka 6 - Odpovídající hodnoty SIL pro dané intervaly pravděpodobnosti překročení Rc definovanou parametrem NIC bez výstrahy [19]	35
Tabulka 7 - Hodnoty SDA odpovídající intervalu pravděpodobnosti poruchy systému [25]	35
Tabulka 8 - Struktura ADS-B zprávy Airborne Position Message [19]	36
Tabulka 9 - Struktura ADS-B Airborne Velocity Message pro subtypes = 1, 2, 3, a 4 [19]	37
Tabulka 10 - Struktura ADS-B Aircraft Operational Status Message [19].....	38
Tabulka 11 - Hodnoty výstupního výkonu rušičky TG5CA.....	43
Tabulka 12 - Poloha a vzdálenost bodů pro experimentální měření D1	44
Tabulka 13 - Body pro experimentální měření LKPR.....	46
Tabulka 14 - Ukázka výsledků výpočtu pro jednotlivé případy rušení	48
Tabulka 15 - Rozsah hodnot MAX POWER a jemu odpovídající rozsah hodnot P ...	49
Tabulka 16 - Celkový počet pohybů v CTR Letiště Praha v letech 2019-2024.....	56



Seznam symbolů a zkratk

ABAS	Aircraft-Based Augmentation System	Augmentační systém GNSS
ACAS	Airborne collision avoidance system	Palubní protisrážkový systém
ADS-B	Automatic Dependant Surveillance- Broadcast	Automatický závislý přehledová systém
AGC	Automatic Gain Control	Automatické řízení citlivosti
A-SGMCS	Advanced Surface Movement Guidance and Control System	Zdokonalený systém pro řízení pohybů na pohybové ploše
BDS	BeiDou Navigation Satellite System	Navigační satelitní systém BeiDou
CA	Capability	
CDMA	Code Division Multiple Access	Kódový multiplex
C/No	Carrier to Noise Ratio	Poměr intenzity nosné vlny a šumu
CNS	Comunication Navigation Surveillance systems	Komunikační, navigační a přehledové technologie
CPR	Compact Position Reporting	
CTR	Control Zone	Řízený okrsek
ČTU		Český telekomunikační úřad
DF	Downlink Format	
DRCC	Dual-Receiver Cross-Correlator	Křížová korelace dvou přijímačů
EPU	Estimated Position Uncertainty	Očekávaná nepřesnost polohy
ESA	European Space Agency	Evropská vesmírná agentura
EU	European Union	Evropská unie
FDMA	Frequency Division Multiple Access	Frekvenční multiplex
GA	General Aviation	Všeobecné letectví
GBAS	Ground-Based Augmentation System	Augmentační systém GNSS



GCE	GNSS Centre of Excellence	
GLONASS	Globalnaja navigacionnaja sputnikovaja systema	
GNSS	Global Navigation Satellite System	Globální družicové navigační systémy
GPS	Global Positioning System	Globální polohovací systém
GSM	Groupe Spécial Mobile	Globální systém pro mobilní komunikaci
HFOM	Horizontal Figure of Merit	
HIL	Horizontal Integrity Limit	Horizontální limit integrity
HPL	Horizontal Protection Level	Horizontální úroveň ochrany
LKPR	Prague Airport	Letiště Praha
ME	Message Extended Squitter	
MMP		Mobilní mechanizační prostředek
MTOW	Maximum Take-Off Weight	Maximální vzletová hmotnost
NACv	Navigation Accuracy Category for Velocity	Parametr ADS-B zprávy
NACp	Navigation Accuracy Category for Position	Parametr ADS-B zprávy
NIC	Navigation Integrity Category	Parametr ADS-B zprávy
PRN	Pseudo-Random Noise	
PSD	Power Spectral Density	
Rc	Radius of Containment	
RFI	Radio Frequency Interference	Vysokofrekvenční rušení
RLAN	Radio Local Area Network	
RNSS	Radionavigation Satellite Service	
ŘLP		Řízení letového provozu
SBAS	Satellite-Based Augmentation System	Augmentační systém GNSS



SDA	System Design Assurance	Parametr ADS-B zprávy
SIL	Source Integrity Level	Parametr ADS-B zprávy
SiS	Signal in Space	
SQM	Signal Quality Monitoring	Měření kvality signálu
TC	Type Code	
UMTS	Universal Mobile Telecommunication System	
UTC	Universal Time Coordinated	Koordinovaný světový čas



Úvod

Globální navigační družicové systémy (GNSS) jsou v dnešní době již nedílnou součástí našeho běžného každodenního fungování. Díky celosvětovému pokrytí a snadné dostupnosti umožňují jakémukoliv uživateli snadný přístup k určení jeho přesné polohy nebo přesného času. Dostupnost a přesnost GNSS však postupně vedla k využívání těchto systémů i v rámci kritické infrastruktury států, kam se řadí i letecká doprava.

V současné době jsou GNSS systémy v letectví využívány například k přesnému určení času v rámci komunikačních a přehledových systémů, u většiny letů jsou pak GNSS využívány jako primární zdroj traťové navigace. Vzhledem k dostupnosti těchto systémů přibývá i letišť využívajících GNSS jako primární zdroj navigace pro provoz provádějící sestup a finální přiblížení na vzletovou a přistávací dráhu. Velké pokrytí, snadná dostupnost a využívání GNSS v rámci kritické infrastruktury vedlo ke vzniku celé řady případů rušení, ať už záměrných s cílem ovlivnit letecký provoz, nebo nezáměrných s cílem chránit své soukromí. Přítomnost takového rušení v blízkosti kritické infrastruktury, jakou je letiště, může mít výrazný dopad na bezpečnost, plynulost a efektivitu leteckého provozu.

Cílem této práce je prověření dopadů GNSS rušení na provoz na letišti Václava Havla v Praze za pomoci výstupů z detektoru GNSS rušení instalovaného na LKPR a technologie ADS-B (Automatic Dependant Surveillance – Broadcast) mapující provoz na letišti. K dosažení tohoto cíle byla sestavena metodika, zahrnující úlohu kalibrace odezvy na detektoru GNSS rušení umožňující určit, jaká intenzita rušivého signálu je v okolí letiště zapotřebí k ovlivnění provozu. Dalším podstatným výstupem této práce je statistika letů, u kterých bylo v daném časovém období zaznamenáno GNSS rušení a statistika letů, u kterých bylo rušení zaznamenáno zároveň detektorem umístěným na LKPR.



1 Globální družicové navigační systémy

Globální družicové navigační systémy (Global Navigation Satellite Systems - GNSS) představují moderní navigační technologie, jenž jsou založeny na výsledcích kosmických výzkumných programů a vývoje po celém světě. V současné době existují čtyři páteřní konstelace: [1]

- GPS (Global Positioning System)
- GLONASS (GLObalnaja NAvigacionnaja Sputnikovaja Sistema)
- GALILEO
- BDS (BeiDou Navigation Satellite System)

GNSS systémy se vyznačují jejich celosvětovým pokrytím, vysokou přesností určení polohy uživatele a nepřetržitou dostupností. Všechny tyto faktory vedly a vedou k využívání těchto systémů téměř v každém odvětví, ať už jde o hospodářství, dopravu, nouzové služby (pátrání a záchrana), geodézii, energetiku, bankovní služby nebo soukromé využití prostřednictvím například aplikací v mobilních zařízeních.

Na GNSS systémy jsou kladeny vysoké požadavky a výkonnost těchto systémů je hodnocena prostřednictvím čtyř základních výkonnostních parametrů, kterými jsou:

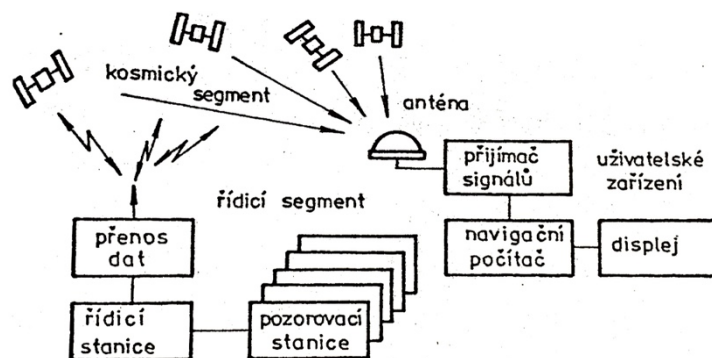
- **Přesnost**, definována jako rozdíl mezi skutečnou polohou uživatelského zařízení a polohou určenou GNSS systémem.
- **Dostupnost**, procento času, po který je systém provozuschopný a je schopen plnit všechny své funkce.
- **Integrita**, schopnost systému reagovat a včas upozornit uživatele na potenciální problém nebo chybu systému překračující předem stanovenou hodnotu odchylky sledovaného parametru.
- **Kontinuita**, pravděpodobnost, že systém při poskytování služeb neselže a bude po určitý čas, bez přerušení, ještě schopen fungovat.

Páteřní konstelace GNSS systémů však v některých odvětvích s vysokými požadavky na výkonnost nedosahují potřebné úrovně výkonnosti a nejsou tak zcela akceptovány jako primární zdroje navigačních informací. Například v letectví jsou GNSS systémy kvůli udržení vysoké úrovně bezpečnosti využívány v kombinaci s konvenčními komunikačními, navigačními a přehledovými systémy (Communication Navigation

Surveillance) technologiemi. Výkonnost GNSS systémů lze na kontinentální, případně regionální úrovni podstatně zvýšit prostřednictvím augmentačních systémů, jejichž využití následně umožňuje považovat takto získaná navigační data jako primární zdroj navigace. Augmentační systémy GNSS jsou:

- Aircraft-Based Augmentation System (ABAS)
- Ground-Based Augmentation System (GBAS)
- Satellite-Based Augmentation System (SBAS)

GNSS systémy sestávají ze tří segmentů vyobrazených na Obrázku 1. Jedná se o kosmický segment, řídicí segment a uživatelský segment.



Obrázek 1 - Rozdělení segmentů GNSS [2]

Kosmický segment sestává z několika satelitů, které jsou rozmístěny na jednotlivých oběžných drahách a obíhají kolem země ve výšce kolem 20 000 km. Tyto satelity vysílají signály, které je možné po zachycení vhodným zařízením schopného příjmu GNSS signálu na zemi vyhodnotit a určit díky nim polohu a čas.

Řídicí segment sestává z řady pozemních stanic a výpočetních a komunikačních zařízení. Úkolem řídicího segmentu je monitorování, měření a řízení prvků segmentu kosmického, sledování parametrů drah družic (efemerid), kontrolování hodin, sledování stavu celého systému a správnosti vysílaného signálu.

Uživatelský segment je potom množina všech koncových zařízení (uživatelských zařízení). Uživatelské zařízení na základě přijatého signálu poskytuje uživateli informaci o jeho poloze v trojrozměrném prostoru a přesném čase. V letectví se antény pro přijímání GNSS signálů umísťují na horní stranu trupu letounu, v blízkosti jeho



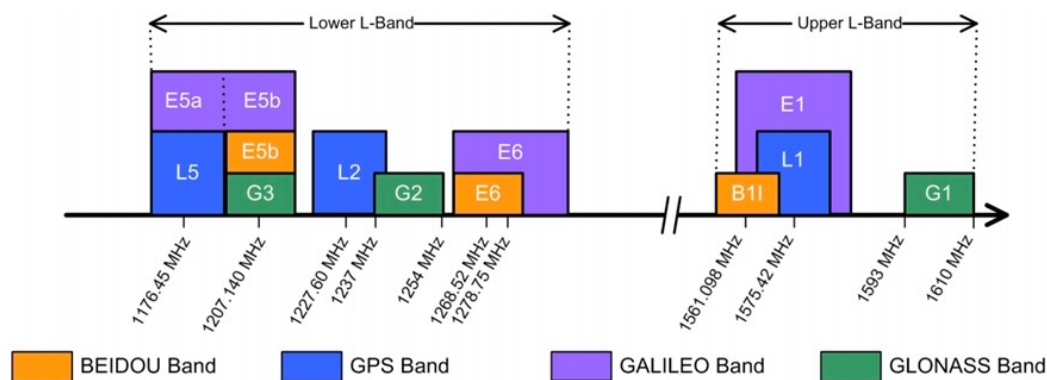
těžiště. Takto zvolené umístění nejlépe zabraňuje případnému zastínění antény během manévrování letounu. [2]

1.1 Radiové spektrum GNSS systémů

Páteřní konstelace GNSS se od sebe liší různými parametry jako je výška orbit, počet oběžných drah, počet satelitů, nebo frekvencí, na kterých vysílají své signály. Díky rozdílné frekvenci a rozdílnému vysílanému pseudonáhodnému kódu je pak na zemi možné určit o který signál se jedná a které konstelaci a družici náleží. Na přelomu tisíciletí uměla uživatelská zařízení sledovat převážně signály z jednoho navigačního družicového systému, zatímco v současné době (2024) už celá řada uživatelských zařízení umožňuje pracovat hned s několika systémy najednou, což zvyšuje především pokrytí, přesnost určení polohy a kontinuitu. [1, 3]

Jednotlivé systémy vysílají na různých nosných frekvencích, které jsou vizualizovány v radiofrekvenčním spektru na Obrázku 2. Rozlišování signálů z jednotlivých satelitů nám umožňuje takzvaná multiplexace signálu. Většina konstelací používá tzv. kódový multiplex CDMA (Code Division Multiple Access), tyto satelity vysílají na stejné frekvenci, ale každý satelit vysílá odlišný PRN (Pseudo-Random Noise) kód. Satelit je tedy identifikován na základě střídání jednotlivých impulsů v PRN kódu, jejichž databáze je nahrána v uživatelském zařízení. Na tomto principu fungují systémy GPS, Galileo a BeiDou. Systém GLONASS využívá u svých satelitů frekvenční multiplex FDMA (Frequency Division Multiple Access), kdy je rozpoznání jednotlivých satelitů řešeno tím, že každý satelit vysílá na jiné nosné frekvenci v dané šířce pásma. Uživatelské zařízení má v tomto případě nahranou databázi těchto frekvencí, ke kterým jsou přiřazeny jednotlivé satelity. [4]

V současné době dochází k nahrazování stávajících satelitů systému GLONASS vysílajících pouze na principu FDMA modernějšími satelity umožňujícími paralelní využití FDMA a CDMA. První modernizovaný satelit byl na oběžnou dráhu vypuštěn v roce 2021 a do roku 2030 by mělo dojít k postupnému nahrazení všech satelitů a trvalému přechodu na CDMA, se zpětnou kompatibilitou FDMA. [5]



Obrázek 2 - Frekvenční pásma jednotlivých GNSS konstelací [6]

1.2 Rušení GNSS

Satelity GNSS obíhají kolem země po oběžných drahách nacházejících se na střední oběžné dráze země, což odpovídá přibližně výšce 20 000 km [1]. Tento fakt má za následek, že signál, který se dostane k povrchu země, je velice slabý a tedy i náchylný k různým typům rádiového rušení (Radio Frequency Interference - RFI), což může mít za následek zhoršenou přesnost, nebo úplnou ztrátu dostupnosti polohové a časové informace. Pokud bychom zanedbali atmosférické vlivy působící na tento signál, dosahovala by jeho teoretická hodnota přibližně - 120 dBm. Reálný rozsah intenzity GNSS signálu u země je pak v rozmezí - 165 až - 150 dBW. [7]

Vzhledem k nízké intenzitě GNSS signálu na Zemi, může při vysílání z pozemního zdroje v důsledku výkyvu vysílací frekvence docházet k rušení signálu GNSS. Tento typ rušení je nazýván jako Out-Band, signál GNSS je v tomto případě rušen signály vyskytujícími se blízko jeho rezervovaného frekvenčního pásma a lze se s ním setkat vzácně, jedná se o neúmyslné rušení. Druhým případem je In-Band rušení, kdy rušení probíhá přímo v rezervované šířce pásma RNSS (Radionavigation Satellite Service). Dalšími podstatnými vlivy způsobující rušení GNSS signálu, či chyby v měření systému, mohou být například chyby způsobené atmosférickým počasím a ionosférickými vlivy, efemeridické chyby, chyby hodin satelitů, nebo chyby způsobené vícecestným šířením (odrazy signálu od budov a překážek). [2, 3]

Největší dopad na bezpečnost pro leteckou dopravu má záměrné rušení GNSS signálu pomocí k tomu určených rušiček. Na současném trhu je dostupné značné množství těchto přístrojů ve všech cenových kategoriích. Letecká doprava a bezpečnost

provozu je tímto typem ovlivňována ať už přímo a záměrně, kdy je útok rušičkou cílen přímo na omezení navigační výkonnosti daného letadla, nebo nepřímo, kdy některé z rušících zařízení používá třetí osoba v blízkosti letiště a nezáměrně tím ovlivňuje provoz letecké dopravy. V každém z těchto případů je použití takového zařízení nelegální a představuje hrozbu pro bezpečnost letecké dopravy. Toto záměrné rušení signálu můžeme dělit na jamming, spoofing a meaconing [3].

1.2.1 Jamming

Jedná se o nejsnadnější a nejdostupnější způsob rušení signálu GNSS. rušičky využívající tento typ rušivého signálu jsou běžně dostupné na internetu a jsou označovány jako zařízení pro osobní ochranu soukromí. Jedna z možných podob takového zařízení je vyobrazena na Obrázku 3. Cena těchto rušiček se odvíjí především od jejich výkonu, množství frekvencí, na kterých vysílají a technologické složitosti zařízení. Různé modely rušiček mohou být napájeny buď bateriově nebo ze sítě.



Obrázek 3 - Rušička signálu GPS [9]

Princip rušení spočívá ve vysílání signálů frekvenčně blízkým GNSS systémům (out-band rušení), nebo vysílání přímo v části spektra rezervovaného pro GNSS (in-band rušení) což má za následek zahlcení přijímače šumem a přijímač tak přestane GNSS signál sledovat. Na trhu se objevují rušičky schopné úzkopásmového rušení, tedy vysílající přímo na nosné frekvenci GNSS systémů a na jejím blízkém okolí, nebo rušičky širokopásmové zasahující do opravdu značné části spektra (přibližně 20MHz až 36MHz) [3]. Těmito rušičkami mohou být ovlivňovány přímo



jednotlivá frekvenční pásma GNSS systémů. V praxi jsou tato zařízení využívána jako obrana před drony, odposlechy a sledováním. Čím dál častěji se také vyskytuje jejich využívání řidiči nákladních vozů, a to jako prostředek k rušení zařízení pro výběr mýta. [8]

1.2.2 Spoofing

Specifičtější a složitější způsobem rušení je tzv. spoofing. Zařízení generující spoofingový signál napodobují autentický signál satelitů GNSS a vysílají jej s vyšší intenzitou, než je signál autentický. Vzhledem k vyšší intenzitě spoofingového GNSS signálu přijímač začne sledovat signál vysílaný rušičkou (tzv. spooferem), což může vést k převzetí kontroly útočníkem nad polohou a časem indikovanou přijímačem. V praxi lze tímto útokem přijímač zmást natolik že vyhodnotí svou polohu chybně i stovky kilometrů od své reálné polohy. Čas přijímače pak může být ovlivněn i o několik dní, případně měsíců. S ohledem na technickou vyspělost těchto rušiček je tento útok složitější detekovat, neboť ne vždy dochází k výpadku signálu, či poklesu kvality. Detekce spoofingu je možná například prostřednictvím sledování náhlých odchylek a zvýšení intenzity signálu, změny času nebo propojením několika polohových navigačních systémů a sledování odchylky polohy jednotlivých systémů. [3]

1.2.3 Meaconing

Tento typ rušení funguje na principu „zpoždění a převysílání“ GNSS signálů. Signál je rušičkou přijat, v zařízení dojde k jeho zpoždění a následně je vysílán o vyšší intenzitě zpět k cílovému zařízení. Zařízení pak, jako u spoofingu, pracuje s falešným signálem, což vede k chybnému určení polohy a času. Z výše uvedených příkladů rušení se tento typ objevuje nejméně. [10]

1.3 Možnosti detekce GNSS rušení

V závislosti na způsobu detekce jsou technologie děleny na přímé a nepřímé. Přímé technologie jsou přímo určené k detekci rušení signálu GNSS. Můžeme sem zařadit například detektory, nebo jiná zařízení pracující na principu přímého měření kvality signálu - SQM (Signal Quality Monitoring). [3]

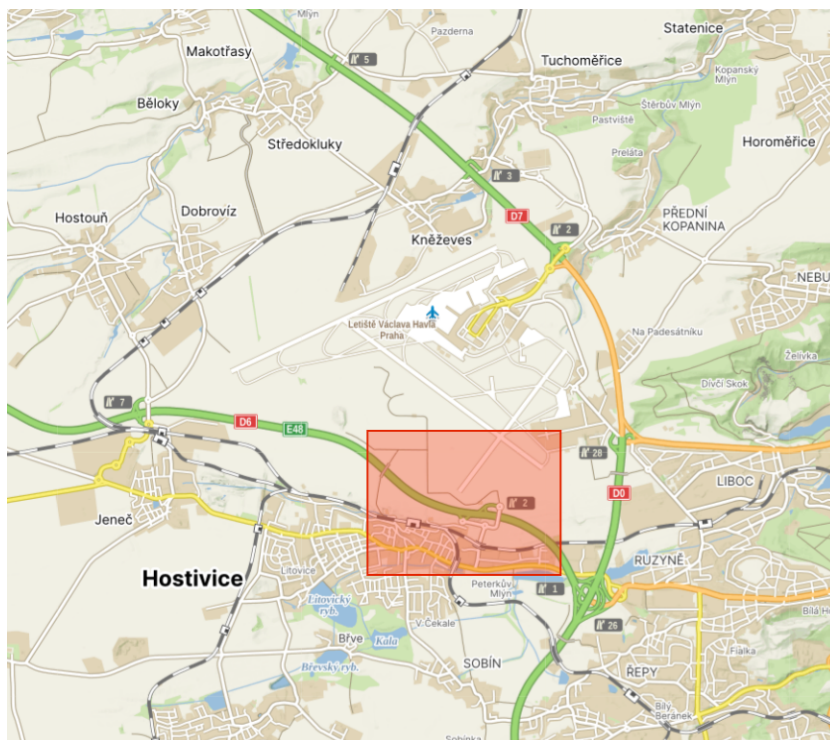


Zařízení pro detekci rušení GNSS existuje celá řada, od amatérských přístrojů měřící pouze intenzitu přijímaného signálu, až po ty profesionální, sofistikované. Profesionální detektory GNSS rušení jsou schopny přímo analyzovat přijímaný GNSS signál a výstup této analýzy je uživateli poskytován většinou prostřednictvím uživatelského rozhraní. K analýze signálu je potom ve většině případů používáno celé řady algoritmů, například vyhodnocování hodnot C/No (Carrier to Noise ratio) a AGC (Automatic Gain Control), nebo technologicky náročnější, křížová korelace signálu dvou přijímačů – DRCC (Dual-receiver Cross-correlation). [11, 12, 13]

Nepřímé technologie naopak nejsou primárně určeny k detekci rušení GNSS, z jejich výstupů jsme ale schopni rušení detekovat. Mezi tyto technologie bychom mohli zařadit například systém ADS-B (Automatic Dependent Surveillance–Broadcast). Nápomocny zde mohou být i porovnávání polohových informací multilateračních navigačních systémů s výstupy z ADS-B [18]. Data jsou následně analyzována dle jednotlivých relevantních parametrů, například u ADS-B se jedná o tzv. parametry kvality vypovídajících o integritě a přesnosti polohové informace. [14]

1.3.1 Detektor na Letišti Praha

Pro potřeby této práce bylo využito výstupů z detektoru GMV NSL nesoucího označení GSS100D. Tento detektor byl na letišti v Praze (LKPR) instalován v období od 02.11.2020 do 28.02.2021 a následně od 29.04.2021 do 12.04.2022. Instalace byla provedena společností GNSS Centre of Excellence (GCE), v rámci projektu „GNSS vulnerability & mitigation in Czech Republic“, financovaného Evropskou kosmickou agenturou – ESA (European Space Agency), v rámci programu „NAVISP Element III“ [15]. Uveřejnění přesného místa umístění detektoru není, vzhledem k dalším možným měřením GNSS rušení, možné a nebylo společností GCE povoleno. Přibližná poloha umístění detektoru je vyobrazena na Obrázku 4, kdy se detektor nachází v oblasti červené výseče, v blízkosti západního prahu nepoužívané přistávací a vzletové dráhy, která od jejího uzavření slouží primárně k parkování letadel. Toto umístění bylo zvoleno především pro jeho relativní blízkost dálnici D6.



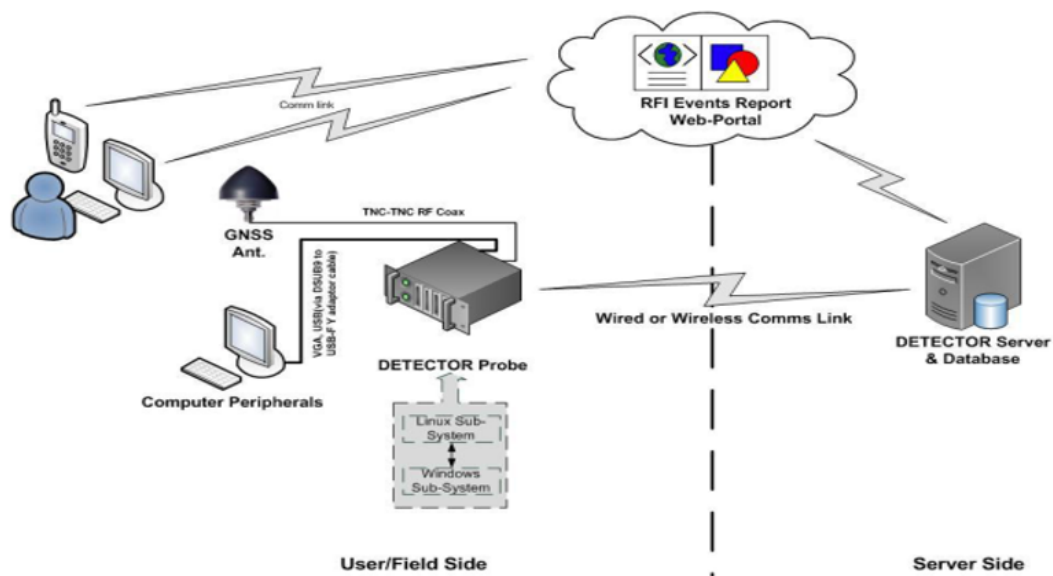
Obrázek 4 - Výšeč oblasti, ve které se nachází detektor GNSS rušení GSS100D na LKPR

System GSS100D vyvinutý společností GMV NSL je určen pro monitorování rušení signálu GNSS typu jamming na frekvenci 1575,42MHz a jeho charakterizaci. Veškeré údaje o jednotlivých událostech rušení GNSS jsou v reálném čase nahrávány do databáze na vzdálené servery GMV NSL, kde jsou uživateli dostupné pro následnou analýzu.

System tvoří několik zařízení, které jsou nezbytné k jeho funkci jakožto celku. Hlavní částí systému je samotná vyhodnocovací jednotka, tzv. „DETECTOR Probe“. Toto zařízení ke své činnosti využívá dvou subsystémů. První subsystém, běžící na platformě Linux (LinSS), zpracovává a vyhodnocuje veškerá data ohledně rušení. Druhý subsystém pracuje na platformě Windows a zprostředkovává komunikaci se serverem GMV NSL, kde jsou data ukládána. Tento subsystém je také zodpovědný za funkci uživatelského rozhraní systému. [15]

Další velice podstatnou částí je samotná anténa pro přijímání signálu. Pro potřeby této práce byl systém používán s anténou Tallysman TW3040 [15]. Proto, aby mohl detektor komunikovat se serverem a ukládat data je třeba, aby na místě instalace bylo

k dispozici internetové připojení. Schéma celého systému je znázorněno na Obrázku 5.



Obrázek 5 - Schéma systému GSS100D [15]

Výstupy z detektoru jsou dostupné prostřednictvím webového portálu výrobce. Webový portál nabízí uživatelské rozhraní, ve kterém je možné jednotlivá data (zaznamenané události) prohlížet ve formě tzv. „eventů“. Data jsou v rámci uživatelského rozhraní zobrazena v tabulkovém formátu, který zahrnuje veškeré atributy, jež systém k jednotlivým událostem zaznamenává. Na Obrázku 6 je ukázka zobrazení dat v rámci webového rozhraní, včetně všech atributů, kterými jsou: [15]

- Priority (bezrozměrná veličina závisí na klasifikaci a intenzitě rušení nabývající hodnot Very Low, Low, Medium, High)
- Event ID
- Device ID
- Datum a čas začátku události (UTC)
- Délka trvání události (s)
- Event type
- Class type (klasifikace typu rušivého signálu)
- MAX POWER (bezrozměrná veličina nabývající 1 až 9)

NSL **DETECTOR Monitoring Centre**

The list below shows the interference events as picked up by the DETECTOR probe(s).

<< first < prev 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 next > last >>

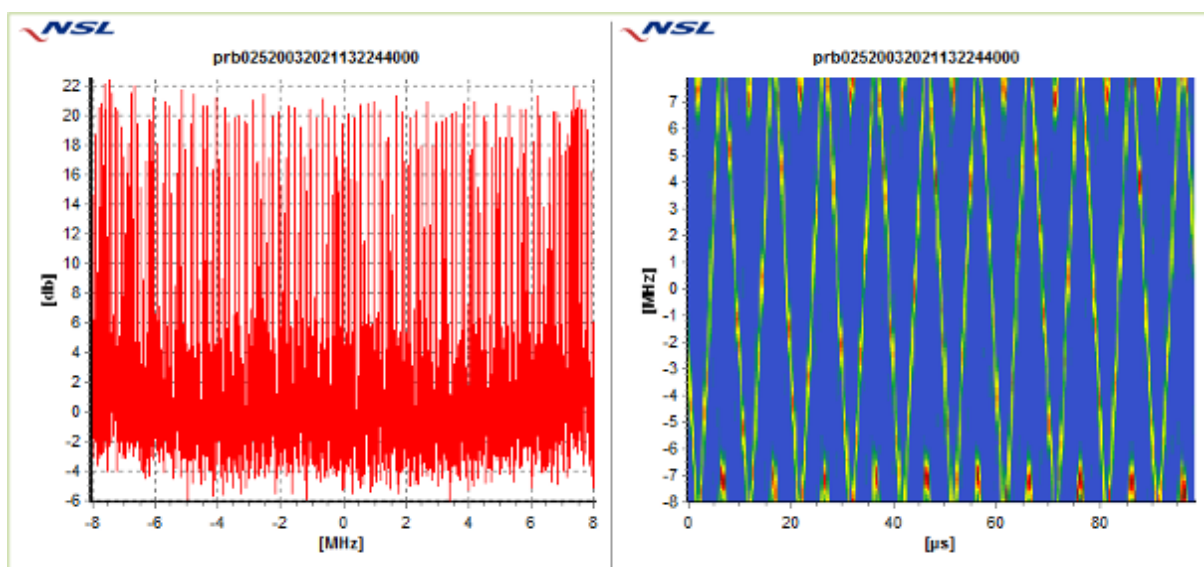
Priority	Event ID	Device ID	Start Time (UTC)	Duration (sec)	Event Type	Class Type	Max Power
Very Low	prb00515062015092854000	prb005	15/06/2015 09:28:54	25	Automatic_Detection	WHITE_OR_WB	1.5863
Very Low	prb00515062015091233000	prb005	15/06/2015 09:12:33	25	Automatic_Detection	NB	1.5647
Very Low	prb00615062015080343000	prb006	15/06/2015 08:03:43	24	Automatic_Detection	WHITE_OR_WB	1.0843
Very Low	prb00515062015072448000	prb005	15/06/2015 07:24:48	25	Automatic_Detection	ST_OR_NB_OR_BPSK	1.7170
Low	prb00515062015064627000	prb005	15/06/2015 06:46:27	65	Automatic_Detection	VNB	2.5923
Very Low	prb00515062015063756000	prb005	15/06/2015 06:37:56	25	Automatic_Detection	VNB	1.9612
Very Low	prb00415062015062714000	prb004	15/06/2015 06:27:14	20	Automatic_Detection	WHITE_OR_WB	1.7131
Very Low	prb00415062015062549000	prb004	15/06/2015 06:25:49	20	Automatic_Detection	NB	1.8443
Very Low	prb00615062015062608000	prb006	15/06/2015 06:26:08	15	Automatic_Detection	WHITE_OR_WB	1.1489
Very Low	prb00615062015014413000	prb006	15/06/2015 01:44:13	21	Automatic_Detection	WHITE_OR_WB	1.1336
Very Low	prb00514062015192600000	prb005	14/06/2015 19:26:00	25	Automatic_Detection	WHITE_OR_WB	1.5134
Very Low	prb00514062015161845000	prb005	14/06/2015 16:18:45	25	Automatic_Detection	WHITE_OR_WB	1.4820
Very Low	prb00414062015112149000	prb004	14/06/2015 11:21:49	20	Automatic_Detection	ST_OR_NB_OR_BPSK	1.6777
High	prb00514062015092242000	prb005	14/06/2015 09:22:42	30	Automatic_Detection	CHIRPTRIANGULAR	7.7362
Very Low	prb00614062015090217000	prb006	14/06/2015 09:02:17	18	Automatic_Detection	WHITE_OR_WB	1.0731

<< first < prev 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 next > last >>

Filter Events Export Events

Obrázek 6 - Výstupní data GSS100D v uživatelském rozhraní výrobce [15]

Po kliknutí na požadovanou událost detektor uživateli poskytne i grafický výstup, v podobě PSD (Power Spectral Density) diagramu a waterfall diagramu, který je vyobrazen na Obrázku 7. Jednotlivé události je v rámci webového rozhraní také možné filtrovat pomocí atributů „Priority“ a času začátku události (UTC). Pro pokročilejší práci s daty umožňuje rozhraní uživateli export dat ve formátu csv., dle specifického data a času. [15]



Obrázek 7 - Grafický výstup zaznamenané události rušení detektorem GSS100D



2 Detekce GNSS rušení za pomoci ADS-B

S postupným zaváděním GNSS systémů v různých odvětvích šel ruku v ruce i vývoj osobních rušících zařízení a s tím spojený nárůst zaznamenaných záměrných rušení GNSS. To vedlo ke vzniku celé řady projektů a systémů, zaměřených na detekci nezákonného GNSS rušení. Drtivá většina systémů pro detekci rušení využívá ke své funkci řadu přijímačů, detektorů, rozmístěných po zemském povrchu. Tyto přijímače nejčastěji pracují na principu SQM, vyhodnocování hodnot C/No a AGC, nebo DRCC (viz. Kapitola 1.3). Mezi systémy fungující na tomto principu patří například Gaardian, Protector, nebo JLOC (Jamming Localization and Detection. Nevýhodou těchto systémů je jejich náročné technické řešení a potřeba instalace složitých antén a vybavení na území které má být chráněno detekcí rušení. [17, 18]

Pro analýzu dopadu GNSS rušení na letecký provoz v rámci této práce, byla zvolena nepřímá technologie detekce, prostřednictvím ADS-B. Vliv GNSS rušení na ADS-B je prokázán a navíc se jedná se o snadno dostupnou technologii. Není zde zapotřebí složité pozemní infrastruktury detektorů, jako je tomu u přímých způsobů detekce. ADS-B je snadno dostupná technologie a signál lze přijímat prostřednictvím jednoduché dipólové antény. Po celém světě existuje řada neziskových, nebo dobrovolnických organizací, sdružující jednotlivé letecké nadšence, výzkumné organizace a ústavy, které mohou prostřednictvím svých přijímačů přispívat k tvoření rozsáhlých databází dat získaných prostřednictvím ADS-B. Tato data jsou pak nejčastěji využívána širokou veřejností pro sledování letového provozu, nebo výzkumnými organizacemi a institucemi pro výzkumy v oblasti bezpečnosti a efektivity využití vzdušného prostoru. Mezi tyto neziskové organizace patří například OpenSky Network [35], s jejíž daty bylo v této práci pracováno, FlightRadar24 [36], nebo ADS- B Exchange [37].

V této kapitole se nachází popis technologie ADS-B, princip činnosti a složení ADS-B zpráv. Dále jsou zde popsány parametry kvality a zprávy v nichž jsou tyto parametry obsaženy. Závěrem této kapitoly jsou popsány současné metody detekce GNSS rušení prostřednictvím technologie ADS-B, včetně metody která byla využívána k detekci letadel vystaveným GNSS rušení v rámci této práce.



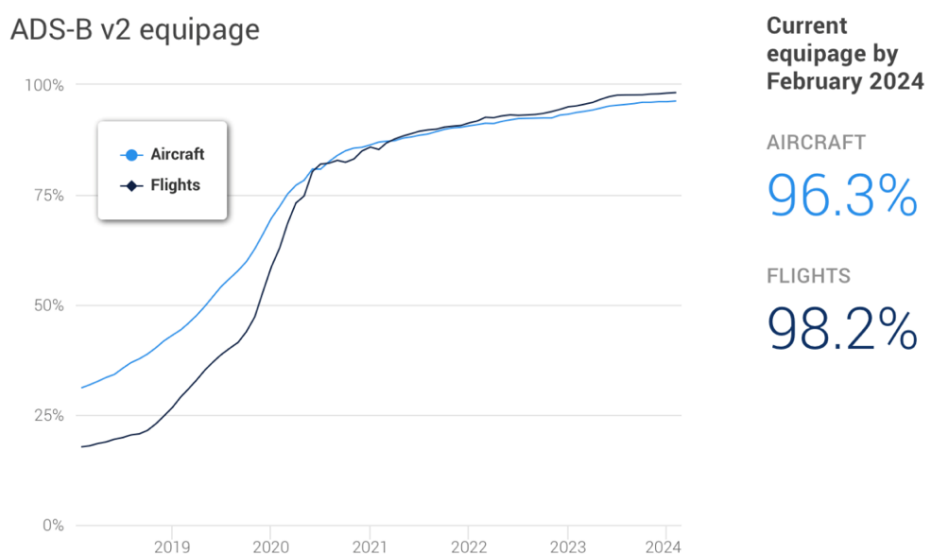
2.1 Automatic Dependent Surveillance – Broadcast

Automatic Dependent Surveillance – Broadcast je technologie umožňující letadlům nacházejícím se ve vzduchu, případně na zemi, a na pohybových plochách letiště, vysílat aktuální stavový vektor obsahující informace o identifikaci, poloze, rychlosti a mnoho dalších parametrů. Systémem ADS-B mohou být vybaveny i mobilní mechanizační prostředky (MMP), pohybující se po letištních provozních plochách. Systém je automatický, protože pro svou funkci a vysílání informací nevyžaduje žádné externí podněty, dotazy dotazovače a podobně. Dále je tento systém závislý, protože pro určení polohové informace je odkázán na palubní vybavení letadla, případně MMP. Uživatelem ADS-B může být, jak ten kdo vysílá, tak ten kdo přijímá. Jedná se o datový tok informací, který letadlo, případně MMP automaticky vysílá bez potřeby jakéhokoliv podnětu od externího systému. Příjemcem ADS-B dat může tedy být kdokoliv v dosahu signálu daného vysílání, disponující potřebným vybavením pro přijetí. [19]

Smyslem automatického závislého sledování za pomoci ADS-B je poskytování aktuálních přehledových informací o provozu v reálném čase. Tyto přehledové informace jsou využívány například provozními odděleními jednotlivých leteckých společností, středisky letového provozu, nebo jinými uživateli. Informace a data šířená prostřednictvím ADS-B jsou využívána pro zvýšení přehlednosti provozu, zefektivnění využití vzdušného provozu, nebo například jako náhrada radarového sledování v oblastech s nízkou hustotou provozu a radarového pokrytí. Vzhledem k tomu že se jedná o závislý systém, kvalita informací obsažených v datovém toku závisí vždy na úrovni palubního vybavení daného uživatele (letadla, MMP).

V roce 2024, existují čtyři verze ADS-B, z nichž každá je definována příslušným standardem. Verze 0 (DO-260/ED-102), verze 1 (DO-260A), verze 2 (DO-260B/ED-102A) a verze 3 (DO-260C). Jednotlivé verze se liší především skladbou a množstvím informací obsažených ve zprávách. Verze se liší i ve vysílání parametrů kvality, které jsou pro kontext této práce podstatné [20]. Parametry kvality jsou popsány v Kapitole 2.1.2. Nejvyužívanější verzí je aktuálně ADS-B verze 2 (dále jako ADS-B v2), kterou dle nařízení evropské komise (EU) 1207/2011 (SPI IR) a jejích pozdějších dodatků musí být vybavena všechna letadla účastníci se komerční letecké dopravy, těžší 5700 kg MTOW, nebo letouny dosahující maximální cestovní rychlosti vyšší než 250 kt. [21].

Podle statistických dat organizace EUROCONTROL, bylo v roce 2024 v rámci evropského vzdušného prostoru (Network Manager Area) ADS-B v2 vybaveno 96,3% letadel. Trend vývoje je znázorněn na Obrázku 8. Poměr vybavenosti letadel je procentuálně vyjádřen z celkového množství registrovaných letadel. Procentuální vyjádření letů provedených letadly vybavenými ADS-B v2 (98,2%) je množina z celkového vzorku všech letů provedených na území pod správou EUROCONTROL, který zastává funkci Network Managera (obrázek 9). [21]



Obrázek 8 - Vývoj vybavenosti ADS-B v2 v rámci evropského vzdušného prostoru (Network Manager Area) v letech 2018 - 2024 [21]



Obrázek 9 - Evropský vzdušný prostor (Network Manager Area) pod správou EUROCONTROL [22]

ADS-B verze 3 (dále jen ADS-B v3), je nejmodernějším standardem, umožňující fungování i v operačním rozmezí supersonických a hypersonických letů a letů ve vysokých hladinách (až 1M ft). Dosud byla ADS-B v2 limitována horizontální rychlostí 1000 kt a výškou 130 000 ft. ADS-B v3 s sebou přinese pokrok v oblasti managementu letů, využití vzdušného prostoru, funkcí zamezení srážky letadel ve vzdušném prostoru dle standardu ACAS X (Airborne Collision Avoidance System) a možnost šíření zpráv o význačném počasí ostatním uživatelům. ADS-B v3 není v současné době nikde aplikována jako povinné vybavení. [23]

2.1.1 Princip činnosti a složení zprávy

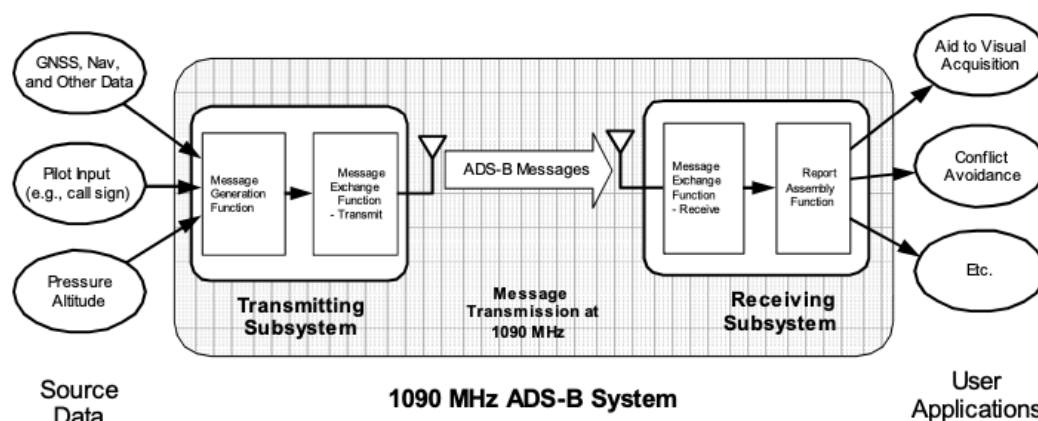
ADS-B zprávy, jsou uživatelem vysílány na frekvenci 1090 MHz, u letadel vybavených odpovídači Multi-Mode Reciever je samotná ADS-B zpráva vysílána tímto odpovídačem. Tento způsob vysílání ADS-B zpráv je označován jako Extended Squitter [24]. Letadla, která jsou vybavena odpovídači v módu A, případně C (primárně



letadla kategorie General Aviation - GA) mohou využívat externích jednotek pro vysílání ADS-B zpráv. [19]

Vzhledem k tomu, že letadla těžší 5700 kg MTOW s maximální cestovní rychlostí převyšující 250 kt, nebo letadla provozována v komerční letecké dopravě, musejí v rámci evropského vzdušného prostoru být vybavena odpovídající moduly schopných vysílat ADS-B zprávy odpovídající specifikacím ADS-B v2 dle nařízení evropské komise (EU) 1207/2011 (SPI IR) a jejich pozdějších dodatků, bude zbytek práce vztažen právě k této verzi ADS-B. [21, 24]

Princip činnosti ADS-B systému a jeho hlavní komponenty jsou znázorněny na Obrázku 10. Palubní část ADS-B systému se skládá z jednotky pro generování a vysílání zpráv, a antény, kterou jsou zprávy šířeny do okolí. Systém je přímo závislý na externích vstupech („Source Data“ v Obrázku 10). Jinými slovy, se jedná o rozhraní s dalšími systémy letadla, které poskytují data pro ADS-B zprávy a nejsou přímou součástí ADS-B systému. Na straně příjemce se systém skládá z jednotky pro přijetí a dekódování zpráv, případně může být doplněn o vizualizaci a nahrávání dat. Tyto informace pak mohou být využívány dalšími systémy, kterými je příjemce vybaven („User Applications“ v Obrázku 10). Na straně letadla to mohou být například systémy pro zabránění srážce (ACAS), na straně Řízení letového provozu (ŘLP) systémy pro zvýšení situačního povědomí a přehledové situace, kterými je například systém A-SMGCS (Advanced Surface Movement Guidance & Control System). Data získaná prostřednictvím ADS-B jsou také využívána jako jeden ze vstupů do „multitrackeru“, který data následně fúzuje ADS-B data s dalšími přehledovými systémy.



Obrázek 10 - Popis činnosti 1090 MHz ADS-B [19]

Systém ADS-B mode S Extended Squitter vysílá zprávy v sestupném formátu (Downlink Format) 17, dále jako DF17. ADS-B zpráva tohoto formátu, kterou vysílá Multi-Mode Receiver, má celkem 112 bitů z nichž 56 bitů tvoří samotné ME (Message, extended squitter) field, ve kterém jsou obsaženy konkrétní informace týkající se daného letadla [19]. Struktura zprávy je znázorněna v Tabulce 1.

Tabulka 1 - Struktura ADS-B zprávy DF17

DF	CA	MODE S ADDRESS	ME field	PARITY
(5 bits)	(3 bits)	(24 bits)	(56 bits)	(24 bits)

Prvních 5 bitů datové zprávy určuje o jaký downlink formát z celkových 25 formátů se jedná, v našem případě DF17. Další 3 bity datové zprávy, označené jako „Capability“ (CA) obsahují informaci o úrovni komunikační kapacity odpovídače. Následujících 24 bitů obsahuje jedinečnou ICAO adresu letadla. Dále následuje 56 bitů ve kterých je obsaženo samotné ME field. Posledních 24 bitů je vyhrazeno pro ověření správnosti zprávy. [19]

ME field ADS-B zprávy je samo o sobě tvořeno 56 bity. Jednotlivé typy ADS-B ME field zpráv jsou od sebe rozlišeny úvodními pěti bity. Těchto prvních 5 bitů ME field zprávy se nazývá Type Code (TC). Všechny typy ADS-B zpráv jsou uvedeny v Tabulce 2, která je převzata z dokumentu RTCA DO-260B [Q]. V závorkách za každým typem



zprávy ve sloupci „ADS-B Message Type“ jsou uvedeny odkazy na příslušné podkapitoly dokumentu DO-260B, vztahující se k jednotlivým typům zpráv. [19]

Tabulka 2 - Typy ADS-B zpráv s příslušným Type Code a odkazy na paragrafy předpisu DO- 260B [19]

TYPE Code ("ME" bits 1-5)	Subtype Code ("ME" bits 6-8)	ADS-B Message Type
0	Not Present	Airborne Position Message (§2.2.3.2.3), Surface Position Message (§2.2.3.2.4)
1 – 4	Not Present	Aircraft Identification and Category Message (§2.2.3.2.5)
5 – 8	Not Present	Surface Position Message (§2.2.3.2.4)
9 - 18	Not Present	Airborne Position Message (§2.2.3.2.3)
19	0	Reserved
	1 – 4	Airborne Velocity Message (§2.2.3.2.6)
	5 – 7	Reserved
20 - 22	Not Present	Airborne Position Message (§2.2.3.2.3)
23	0	Test Message (§2.2.3.2.7.3)
	1 – 7	Reserved
24	0	Reserved
	1	Surface System Status (§2.2.3.2.7.4) (Allocated for National use)
	2 – 7	Reserved
25 – 26		Reserved
27		Reserved for Trajectory Change Message (§2.2.3.2.7.7)
28	0	Reserved
	1	Extended Squitter Aircraft Status Message (Emergency/Priority Status & Mode A Code) (§2.2.3.2.7.8.1)
	2	Extended Squitter Aircraft Status Message (1090ES TCAS RA Message) (§2.2.3.2.7.8.2)
	3 – 7	Reserved
29	0	Target State and Status defined in DO-260A, ADS-B Version=1
	1	Target State and Status (§2.2.3.2.7.1)
	2 – 3	Reserved
30	0 – 7	Reserved
31	0 – 1	Aircraft Operational Status (§2.2.3.2.7.2)
	2 – 7	Reserved

Z typů ADS-B zpráv uvedených v Tabulce 2 jsou pro tuto diplomovou práci z hlediska analýzy vlivu GNSS rušení na provoz relevantní zprávy Airborne Position, Airborne Velocity a Aircraft Operational Status message.

2.1.2 Parametry kvality

Pro zvýšení integrity systémů ADS-B a umožnění monitorování navigační výkonnosti jsou v rámci jednotlivých ADS-B zpráv vysílány tzv. parametry kvality. Tyto parametry určují míru přesnosti a pravděpodobnost chyby ve vysílaných informacích (integritu). Pro potřeby této práce bylo pracováno s parametry NACp (Navigation Accuracy



Category position), NIC (Navigation Integrity Category) a SIL (Source Integrity Level), se kterými operuje diskretní matematický model pro detekci GNSS rušení, využívaný při zpracování dat v rámci Kapitoly 4 této práce. Popis metody detekce s využitím matematického diskretního modelu je popsán v Kapitole 2.1.4. S parametrem SIL úzce souvisí i parametr SDA (System Design Assurance). Parametr NACv (Navigation Accuracy Category for Velocity) není v rámci této práce používán a je veden pouze pro úplnost.

Parametr NACp poskytuje určení přesnosti polohy na základě parametru EPU (Estimated Position Uncertainty). EPU je definován jako poloměr kruhu v horizontální rovině se středem ve skutečné pozici letadlem vysílané přes ADS-B. Pravděpodobnost, že skutečná poloha letadla se nachází mimo tento kruh je 0,05. V případě že jsou polohové informace založeny na GNSS, EPU je někdy nazýváno HFOM (Horizontal Figure of Merit). Parametr NACp nabývá hodnot 0-11, v Tabulce 3 je pro každou z těchto hodnot znázorněna příslušná škála hodnot EPU. V případě, že subsystémem letadla nebyla v uplynulých dvou sekundách obdržena aktualizace, nabývá parametr NACp hodnoty nula - neznámá přesnost. [25]

Tabulka 3 - Rozsah hodnot EPU, kterým odpovídají jednotlivé hodnoty NACp [25]

Coding		95% Horizontal Accuracy Bounds (EPU)	Comment	Notes
(Binary)	(Decimal)			
0000	0	$EPU \geq 18.52 \text{ km } (\geq 10 \text{ NM})$	Unknown accuracy	1
0001	1	$EPU < 18.52 \text{ km } (10 \text{ NM})$	RNP-10 accuracy	1, 3
0010	2	$EPU < 7.408 \text{ km } (4 \text{ NM})$	RNP-4 accuracy	1, 3
0011	3	$EPU < 3.704 \text{ km } (2 \text{ NM})$	RNP-2 accuracy	1, 3
0100	4	$EPU < 1852 \text{ m } (1 \text{ NM})$	RNP-1 accuracy	1, 3
0101	5	$EPU < 926 \text{ m } (0.5 \text{ NM})$	RNP-0.5 accuracy	1, 3
0110	6	$EPU < 555.6 \text{ m } (0.3 \text{ NM})$	RNP-0.3 accuracy	1, 3
0111	7	$EPU < 185.2 \text{ m } (0.1 \text{ NM})$	RNP-0.1 accuracy	1, 3
1000	8	$EPU < 92.6 \text{ m } (0.05 \text{ NM})$	e.g., GPS (with SA on)	1
1001	9	$EPU < 30 \text{ m}$	e.g., GPS (SA off)	1, 2, 4
1010	10	$EPU < 10 \text{ m}$	e.g., WAAS	1, 2, 4
1011	11	$EPU < 3 \text{ m}$	e.g., LAAS	1, 2, 4
1100	12	Reserved		
1101	13	Reserved		
1110	14	Reserved		
1111	15	Reserved		



Parametr NACv (Navigation Accuracy Category for Velocity) je založen na přesnosti dat, poskytovaných výrobcem konkrétního navigačního vstupu, nejčastěji se jedná o indikátor horizontální rychlosti. Parametr NACv nabývá hodnot 0-4, v závislosti na velikosti horizontální chyby. Hodnota parametru NACv, může být výrobcem určena pevně, letadlo tedy vysílá po celou dobu stejnou hodnotu, případně dynamicky, hodnota se v čase mění v závislosti na přesnosti přístroje. Hodnoty horizontální chyby, odpovídající konkrétním hodnotám NACv jsou uvedeny v Tabulce 4. [25]

Tabulka 4 - Hodnoty NACv a k nim odpovídající rozsah horizontální chyby [25]

Navigation Accuracy Category for Velocity		
Coding		Horizontal Velocity Error
(Binary)	(Decimal)	
000	0	≥ 10 m/s
001	1	< 10 m/s
010	2	< 3 m/s
011	3	< 1 m/s
100	4	< 0.3 m/s

Parametr NIC určuje hodnotu poloměru integrity (R_c). Tento poloměr je odvozen z veličin HPL (Horizontal Protection Limit), nebo HIL (Horizontal Integrity Limit). Parametr NIC je dekódován prostřednictvím hodnoty „NIC Supplement-A“ obsažené ve zprávách Aircraft Operational Status, hodnoty „Type subfield“ obsažené ve zprávách Airborne Position Message a hodnoty „NIC Supplement-B“ obsažené ve zprávách Airborne Position Message. Dekódování probíhá dle logiky vyobrazené v Tabulce 5. V případě že se letadlo pohybuje po zemi, nabývá parametr NIC hodnot {0, 6, 7, 8, 9, 10, 11}. V případě že se letadlo pohybuje ve vzduchu, nabývá parametr NIC hodnot 0-11. [19]



Tabulka 5 - Rozsah hodnot R_C , kterým odpovídají jednotlivé hodnoty NIC [19]

NIC Value	Radius of Containment (R_C)	Airborne			Surface		
		Airborne Position TYPE Code	NIC Supplement Codes		Surface Position TYPE Code	NIC Supplement Codes	
			A	B		A	C
0	R_C unknown	0, 18 or 22	0	0	0, 8	0	0
1	$R_C < 20$ NM (37.04 km)	17	0	0	N/A	N/A	N/A
2	$R_C < 8$ NM (14.816 km)	16	0	0	N/A	N/A	N/A
3	$R_C < 4$ NM (7.408 km)	16	1	1	N/A	N/A	N/A
4	$R_C < 2$ NM (3.704 km)	15	0	0	N/A	N/A	N/A
5	$R_C < 1$ NM (1852 m)	14	0	0	N/A	N/A	N/A
6	$R_C < 0.6$ NM (1111.2 m)	13	1	1	8	0	1
	$R_C < 0.5$ NM (926 m)	13	0	0	N/A	N/A	N/A
	$R_C < 0.3$ NM (555.6 m)	13	0	1	8	1	0
7	$R_C < 0.2$ NM (370.4 m)	12	0	0	8	1	1
8	$R_C < 0.1$ NM (185.2 m)	11	0	0	7	0	0
9	$R_C < 75$ m	11	1	1	7	1	0
10	$R_C < 25$ m	10 or 21	0	0	6	0	0
11	$R_C < 7.5$ m	9 or 20	0	0	5	0	0
12	Reserved						
13	Reserved						
14	Reserved						
15	Reserved						

Parametr SIL určuje pravděpodobnost, že horizontální poloha vysílaná letadlem překročí R_C definovanou parametrem NIC bez výstrahy, za předpokladu, že nedošlo k poruše avioniky a veškeré informace získané subsystémy jsou pravdivé. Parametr SIL se zabývá především chybami, které nejsou způsobeny vlivem chyby vybavení letadla. Mezi tyto chyby patří například integrita Signal in Space (SiS), tedy integrita GNSS signálu který letadlo přijímá. SIL nabývá hodnot 0-3. V případě, že je zdrojem polohové informace systém GNSS, jsou hodnoty HIL/HPL poskytovány s pravděpodobností $1 * 10^{-7}$, což je rovno hodnotě SIL=3. Příslušné pravděpodobnosti pro další hodnoty parametru SIL jsou zobrazeny v Tabulce 6. V případě, že subsystémem letadla nebyla v uplynulých dvou sekundách obdržena aktualizace, nabývá SIL hodnoty nula - neznámá integrita. [25]



Tabulka 6 - Odpovídající hodnoty SIL pro dané intervaly pravděpodobnosti překročení R_c definovanou parametrem NIC bez výstrahy [19]

SIL Coding		Probability of Exceeding the NIC Containment Radius (R_c)
(Binary)	(Decimal)	
00	0	Unknown or $> 1 \times 10^{-3}$ per flight hour or per sample
01	1	$\leq 1 \times 10^{-3}$ per flight hour or per sample
10	2	$\leq 1 \times 10^{-5}$ per flight hour or per sample
11	3	$\leq 1 \times 10^{-7}$ per flight hour or per sample

Parametr SDA definuje pravděpodobnost poruchy systému ADS-B způsobující vysílání nesprávných, falešných, nebo zavádějících informací. Jako systém ADS-B je zde chápáno vysílající zařízení do kterého vstupují informace prostřednictvím jednotlivých zdrojů. Do pravděpodobnosti jsou zahrnuty i zdroje, ze kterých systém ADS-B získává polohové informace. Indikátor SDA nabývá hodnot 0-3. Hodnoty SDA odpovídající intervalu pravděpodobnosti poruchy systému jsou uvedeny v Tabulce 7. [25]

Tabulka 7 - Hodnoty SDA odpovídající intervalu pravděpodobnosti poruchy systému [25]

SDA Value		Supported Failure Condition ^{Note 2}	Probability of Undetected Fault causing transmission of False or Misleading Information ^{Note 3,4}	Software & Hardware Design Assurance Level ^{Note 1,3}
(decimal)	(binary)			
0	00	Unknown/ No safety effect	$> 1 \times 10^{-3}$ per flight hour or Unknown	N/A
1	01	Minor	$\leq 1 \times 10^{-3}$ per flight hour	D
2	10	Major	$\leq 1 \times 10^{-5}$ per flight hour	C
3	11	Hazardous	$\leq 1 \times 10^{-7}$ per flight hour	B

2.1.3 Zprávy obsahující parametry kvality

Parametry kvality obsažené v ADS-B verze 2, jsou vysílány ve zprávách typu Airborne position, Airborne Velocity a Aircraft Operational Status. Jednotlivé zprávy, včetně intervalů, ve kterých jsou vysílány a popisu jejich obsahu jsou uvedeny níže.

Zprávy typu Airborne Position jsou vysílány v intervalu 0,5 sec, v případě, že se letadlo nachází ve vzduchu. V případě, že je letadlo na zemi, jsou vysílány



zprávy typu Surface Position Message. Struktura zprávy je znázorněna v Tabulce 8, kde hodnota „Msg Bit #“ znázorňuje pozici dané informace v rámci celé zprávy, „ME Bit #“ poté pozici dané informace v rámci ME field. V hranatých závorkách je uvedena délka jednotlivých informací v bitech.

Tabulka 8 - Struktura ADS-B zprávy Airborne Position Message [19]

Airborne Position Message "ME" Field								
Msg Bit #	33 -37	38 ----- 39	40	41 ---- 52	53	54	55 ---- 71	72 ---- 88
"ME" Bit #	1 - 5	6 ----- 7	8	9 ---- 20	21	22	23 --- 39	40 --- 56
Field Name	TYPE Code [5]	Surveillance Status [2]	NIC Supplement-B [1]	Altitude [12]	Time (T) [1]	CPR Format (F) [1]	CPR Encoded Latitude [17]	CPR Encoded Longitude [17]
	MSB LSB	MSB LSB		MSB LSB			MSB LSB	MSB LSB

Zpráva typu Airborne Position obsahuje v prvních 5 bitech tzv. Type Code, což je informace o tom, že se jedná právě o zprávu Airborne Position. V úvodních pěti bitech může být také zakódováno jaká výška je následně ve zprávě reportována (barometrická, nebo geometrická). Hodnota Type Code z Airborne Position Message je následně používána společně s hodnotou NIC Supplement-A, NIC Supplement-B k vypočtení hodnoty NIC. Po „Type Code“ následují dva bity, nesoucí informaci o nastavení odpovídače a jeden bit určující hodnotu „NIC Supplement-B“. Dále zpráva obsahuje údaje o výšce získané z konkrétního subsystému letadla a informaci o tom, jaký typ času je využíván při výpočtu horizontálních polohových dat. Informace „CPR Format“ (Compact Position Reporting) určuje jakým způsobem mají být dekódovány polohové informace. Horizontální poloha letadla je uvedena v posledních dvou polích ME field, formou latitude a longitude souřadnic. [19]

Zprávy typu Airborne Velocity jsou vysílány v intervalu 0,5 sec v případě, že se letadlo nachází ve vzduchu. V případě, že se letadlo nachází na zemi, nejsou zprávy Airborne Velocity Message vysílány. Struktura zpráv je znázorněna v Tabulce 9, kde hodnota „Msg Bit #“ znázorňuje pozici dané informace v rámci celé zprávy, „ME Bit #“ poté pozici dané informace v rámci ME field, tedy Airborne Velocity Message. V hranatých závorkách je uvedena délka jednotlivých informací v bitech.



Tabulka 9 - Struktura ADS-B Airborne Velocity Message pro subtypes = 1, 2, 3, a 4
[19]

Airborne Velocity Message Subtype=1 and "2" "ME" Field															
MSG BIT #	33 - 37	38 - 40	41	42	43 - 45	46	47 - 56	57	58 - 67	68	69	70 - 78	79 - 80	81	82 - 88
"ME" BIT #	1 - 5	6 - 8	9	10	11 - 13	14	15 - 24	25	26 - 35	36	37	38 - 46	47 - 48	49	50 - 56
FIELD NAME	TYPE [5]	Subtype [3]	Intent Change Flag [1]	Reserved-A [1]	NAC _V [3]	E/W Direction Bit [1]	E/W Velocity [10]	N/S Direction Bit [1]	N/S Velocity [10]	Vert Rate Source [1]	Vert Rate Sign [1]	Vert Rate [9]	Reserved-B [2]	Diff from Baro Alt Sign [1]	Diff from Baro Alt [7]
	MSB LSB	MSB LSB			MSB LSB		MSB LSB		MSB LSB			MSB LSB	MSB LSB		MSB LSB

Airborne Velocity Message Subtype=3 and "4" "ME" Field															
MSG BIT #	33 - 37	38 - 40	41	42	43 - 45	46	47 - 56	57	58 - 67	68	69	70 - 78	79 - 80	81	82 - 88
"ME" BIT #	1 - 5	6 - 8	9	10	11 - 13	14	15 - 24	25	26 - 35	36	37	38 - 46	47 - 48	49	50 - 56
FIELD NAME	TYPE [5]	Subtype [3]	Intent Change Flag [1]	Reserved-A [1]	NAC _V [3]	Heading Status Bit [1]	Heading [10]	Airspeed Type [1]	Airspeed [10]	Vert Rate Source [1]	Vert Rate Sign [1]	Vert Rate [9]	Reserved-B [2]	Diff from Baro Alt Sign [1]	Diff from Baro Alt [7]
	MSB LSB	MSB LSB			MSB LSB		MSB LSB		MSB LSB			MSB LSB	MSB LSB		MSB LSB

Z důvodu, že existuje více druhů Airborne Velocity Message, jsou od sebe rozlišeny hodnotou v poli „Subtype.“ Všechny typy zpráv Airborne Velocity obsahují dynamické veličiny, jako jsou rychlost (horizontální/vertikální), kurz kterým směřuje podélná osa letadla, a další. Dále je ve zprávě obsažen parametr kvality NAC_V (Navigation Accuracy Category for Velocity). Parametr NAC_V reportuje navigační přesnost informací, které jsou poskytovány jednotlivými subsystemy letadla. V případě, že přesnost klesne pod 95%, hodnota NAC_V je rovna nule. [19]

Zprávy typu Aircraft Operational Status jsou vysílány v intervalu 0,7 až 0,9 sec v případě, že se letadlo nachází ve vzduchu i na zemi. Struktura těchto zpráv je znázorněna v Tabulce 10, kde hodnota „Msg Bit #“ znázorňuje pozici dané informace v rámci celé zprávy, „Me Bit #“ poté pozici dané informace v rámci ME field. V hranatých závorkách je uvedena délka jednotlivých informací v bitech.



Tabulka 10 - Struktura ADS-B Aircraft Operational Status Message [19]

Aircraft Operational Status ADS-B Message "ME" Field Format														
MSG BIT #	33 - 37	38 - 40	41 - 52	53 - 56	57 - 72	73 - 75	76	77 - 80	81 - 82	83 - 84	85	86	87	88
"ME" BIT #	1 - 5	6 - 8	9 - 20	21 - 24	25 - 40	41 - 43	44	45 - 48	49 - 50	51 - 52	53	54	55	56
FIELD NAME	TYPE=31 [5]	Subtype=0 [3]	Airborne Capability Class (CC) Codes [16]		Airborne Operational Mode (OM) Codes [16]	MOPS Version Number [3]	NIC Supplement-A [1]	NAC _p [4]	GVA [2]	Source Integrity Level (SIL) [2]	NIC _{ratio} [1]	HRD [1]	SIL Supp [1]	Reserved [1]
		Subtype=1 [3]	Surface CC Codes [12]	L/W Codes [4]	Surface Operational Mode (OM) Codes [16]				Reserved [2]		TRK/HDG [1]			
	MSB LSB	MSB LSB	MSB LSB	MSB LSB	MSB LSB	MSB LSB		MSB LSB	MSB LSB	MSB LSB				

Zpráva Aircraft Operational Status obsahuje celou řadu provozně podstatných informací o daném letadle. Vzhledem ke skutečnosti, že tato práce je zaměřena pouze na zprávy, které vysílá letadlo za letu, bude dále pracováno pouze s variantou zprávy „Subtype=0“. V případě, že se letadlo pohybuje po zemi, je letadlem vysílána varianta zprávy „Subtype=1“.

Pro tuto práci je relevantní především parametr „MOPS Version Number“ udávající informaci o jakou verzi ADS-B se jedná. Nejrozšířenější verzí je v současné době (2024) ADS-B v2. Parametr „NIC Supplement-A je společně s „Type subfield“ (Airborne Position Message) a „NIC Supplement-B“ (Airborne Position Message) využíván k výpočtu parametru NIC. Parametr NAC_p, určující přesnost horizontální polohy, vysílané ve zprávě „Airborne Position.“ Parametr SIL, určuje pravděpodobnost překročení polohové chyby definované parametrem NIC, která není způsobena chybou avioniky. Jednotlivé relevantní parametry kvality jsou detailněji popsány v Kapitole 2.1.2. [19]

2.1.4 Současné metody detekce RFI z ADS-B

V současné době existuje celá řada přístupů a metod k detekci RFI z ADS-B. Výzkum v této oblasti je prováděn jak v rámci organizace EUROCONTROL, tak v rámci několika univerzit, mezi které patří například Stanford University v Kalifornii, nebo České vysoké učení technické v Praze (ČVUT). Všechny metody detekce, publikované v rámci těchto výzkumů, jsou využitelné pouze k detekci záměrného rušení formou Jammingu.



V rámci Stanford University, vzniklo hned několik studií, týkajících se detekce RFI za pomoci ADS-B. Tyto studie se věnují především charakteristice ADS-B vysílajícího letadlem, vystavenému GNSS rušení a detekci GNSS rušení za účelem lokalizace zdroje rušení. V souvislosti s těmito studii provedla univerzita ve Stanfordu sérii experimentů ve spolupráci s leteckými organizacemi a leteckými školami. Jejich studie se zaměřují konkrétně na využití matematických modelů a algoritmů fungujících na principu strojového učení. Tyto studie jsou zaměřeny primárně na analýze a výpočtech založených na parametru kvality NIC. [26, 27, 28, 29]

Katedra letecké dopravy na univerzitě ČVUT se věnuje ve své podstatě detekci rušení GNSS jako takového. V rámci publikovaných studií je ve většině případů pracováno s více parametry kvality a jejich možnými kombinacemi. Detekce GNSS rušení je možná prostřednictvím korelace mezi parametry kvality NACp a NIC, tato metoda vyžaduje k detekci malé množství času a je tak vhodná k detekci v reálném čase. Další metodou je porovnávání vypočtených hodnot HDOP, v závislosti na množství a rozestavení satelitů, které jsou v daný moment k dispozici pro výpočet polohy letadla v daném místě a parametru kvality NACp, což následně umožňuje detekci ADS-B zpráv, u kterých bylo letadlo vystaveno GNSS rušení. [30, 31]

V rámci této práce byla využívána metoda založená na využití diskrétního matematického modelu pro detekci GNSS rušení za pomoci parametrů kvality obsažených v ADS-B. Tato metoda má svůj původ také na ČVUT v Praze. Metoda spočívá ve využití diskrétního matematického modelu, pracujícím s kombinacemi parametrů kvality NIC, NACp a SIL. Diskrétní model pracuje se sadou učících dat, která byla nasbírána v rámci experimentálních měření. Tato sada učících dat obsahuje všechny možné kombinace parametrů kvality, které byly zaznamenány v rámci statických i dynamických experimentálních měření, kdy bylo několik typů letounů vystavováno záměrnému rušení. Použití této metody spočívá v aplikaci diskrétního matematického modelu, spolu s učícími daty na sadu dat (ADS-B zpráv), u kterých má být detekováno rušení. Diskrétní matematický model porovná data uživatele s učícími daty a u každého případu určí, zda se jedná o zprávu rušenou, či nikoliv. Metoda byla testována na datech získaných z oblasti nad atlantickým oceánem, kde není očekáván žádný zdroj záměrného rušení. Přesnost detekce v rámci testu na datech z prostoru nad atlantickým oceánem byla 99,19%. Dále byl model ověřován



na části ADS-B data zaznamenaná v rámci experimentů GNSS rušení, kdy přesnost detekce dosáhla 99,30%. Tento model je díky své přesnosti využíván v rámci detekce GNSS rušení pomocí ADS-B i v této práci. [32]



3 Úloha kalibrace odezvy na detektoru GNSS rušení

K dosažení cíle této práce, kterým je prověření dopadu GNSS rušení na provoz na LKPR, bylo nutné pracovat s výstupy detektoru rušení GNSS, konkrétně s modelem GSS100D umístěným na LKPR. V případě přítomnosti rušení GNSS v blízkosti umístění detektoru a jeho následné detekce systémem, detektor zaznamená danou událost, které je následně přiděleno unikátní „Event ID“. Ke každé této události je přiřazena mimo jiné bezrozměrná veličina MAX POWER (viz. Kapitola 1.3.1), která symbolizuje detekovanou intenzitu signálu na frekvenci 1575,42 MHz s šířkou pásma 16 MHz. MAX POWER nabývá hodnot od 1 do 9 na bezrozměrné stupnici. Pro bližší analýzu ovlivnění provozu na LKPR a představu o tom, jak silné rušení je třeba k ovlivnění provozu, bylo nutné experimentálním měřením zjistit, jaké intenzitě rušivého signálu přibližně odpovídají jednotlivé hodnoty MaxPower. Výstupy z experimentálních měření jsou tedy nezbytné k sestavení převodní tabulky, na základě které bude možné určit, jaká přibližná intenzita rušivého signálu byla v místě antény detektoru v době detekce rušení.

3.1 Metodika měření

Metodika měření, spočívala v záměrném rušení s různým, předem známým výkonem, na různé dané vzdálenosti od detektoru. Experimenty probíhaly ve dvou lokalitách, ve dnech 25.02.2022 v lokalitě D1 a 11.04.2022 v lokalitě LKPR. V lokalitě D1, byl umístěn totožný detektor rušení GNSS model GSS100D od společnosti GMV NSL, jako na lokalitě LKPR. Oba detektory byly instalovány společností GCE, v rámci projektu „GNSS vulnerability & mitigation in Czech Republic“, financovaného Evropskou kosmickou agenturou - ESA, v rámci programu „NAVISP Element III“ [15]. Podrobný popis detektoru se nachází v Kapitole 1.3.1.

V rámci plánování experimentálních měření bylo bráno v úvahu počasí a přímá viditelnost z bodů měření k anténě detektoru. Přímá viditelnost z místa rušení na místo umístění detektoru je podstatná pro možnost využití, matematického výpočtu pro dopočet intenzity rušení v místě antény detektoru, při známém vysílacím výkonu, pomocí rovnice útlumu signálu ve volném prostředí [16].

Pro rušení signálu GNSS v pásmu L1 byla využívána při experimentu rušička TG5CA zobrazena na Obrázku 11, zapůjčená Řízením letového provozu ČR. Rušička TG5CA nabízí 5 nezávislých anténních vysílačů pro 5 různých pásem radiofrekvenčního signálu. Díky tomu lze rušit v jednom okamžiku až 5 různých sítí – GPS L1 (1575,42 MHz), GSM – Groupe Spécial Mobile (900 + 1800 MHz), UMTS – Universal Mobile Telecommunication System (2,1 GHz) a RLAN – Radio Local Area Network (2,4 GHz). V případě rušení signálu systému GPS je rušen signál L1 prakticky v celém pásmu, tedy +10MHz až -10MHz od GPS L1 nosné frekvence. [33]



Obrázek 11 - Rušička TG5CA používaná v rámci experimentálního měření [33]

Rušička TG5CA, umožňuje uživateli nastavovat výstupní výkon v devíti kalibrovaných „krocích“, které byly definovány měřením Českým telekomunikačním úřadem (ČTU), kdy ke každému z těchto kroků byl přiřazen odpovídající naměřený výstupní výkon na svorkách zařízení, který je uveden ve zprávě ČTU [33]. Hodnoty výstupního výkonu na konektoru rušičky, vztažené k jednotlivým hodnotám nastavení, jsou uvedeny v Tabulce 11.



Tabulka 11 - Hodnoty výstupního výkonu rušičky TG5CA

Krok	Intenzita signálu [mW]	Intenzita signálu [dBm]
1.	1	0
2.	20	13
3.	500	27
4.	1	30
5.	1,5	31,8
6.	2	33
7.	2,5	34
8.	3	34,8
9.	3	34,8

Samotné měření v každé z lokací vyžadovalo přibližně 20 minut, kdy byla rušička postupně aktivována, a to vždy minimálně dvakrát pro každý z požadovaných výkonů. Jednotlivý interval rušení byl dlouhý přibližně 40-60 sec, po kterých následovala až minutová pauza potřebná k snazšímu vyhodnocení a orientaci ve výstupních datech detektorů. Každý tento interval byl zaznamenán do připraveného záznamového archu. Tyto údaje a hodnoty následně tvořili nezbytný vstup pro výpočty a vyhodnocení experimentálního měření. Všechny experimentální měření byly prováděny po předchozí koordinaci s ČTU, jakožto správcem radiového spektra v ČR.

3.1.1 Experimentální měření D1

První experimentální měření proběhlo na lokaci D1, dne 25.02.2022. Pro toto měření bylo vybráno celkem šest vhodných bodů měření jejichž souřadnice a přímá vzdálenost od antény detektoru jsou uvedeny v Tabulce 12. Hodnoty vzdálenosti v Tabulce 12 jsou zaokrouhleny na celé stovky, aby nemohlo dojít k přesnému, ale jen přibližnému dopočtení polohy detektoru. K tomuto zaokrouhlení bylo přistoupeno za základě požadavku GCE. Body, u kterých se na místě podařilo ověřit přímou

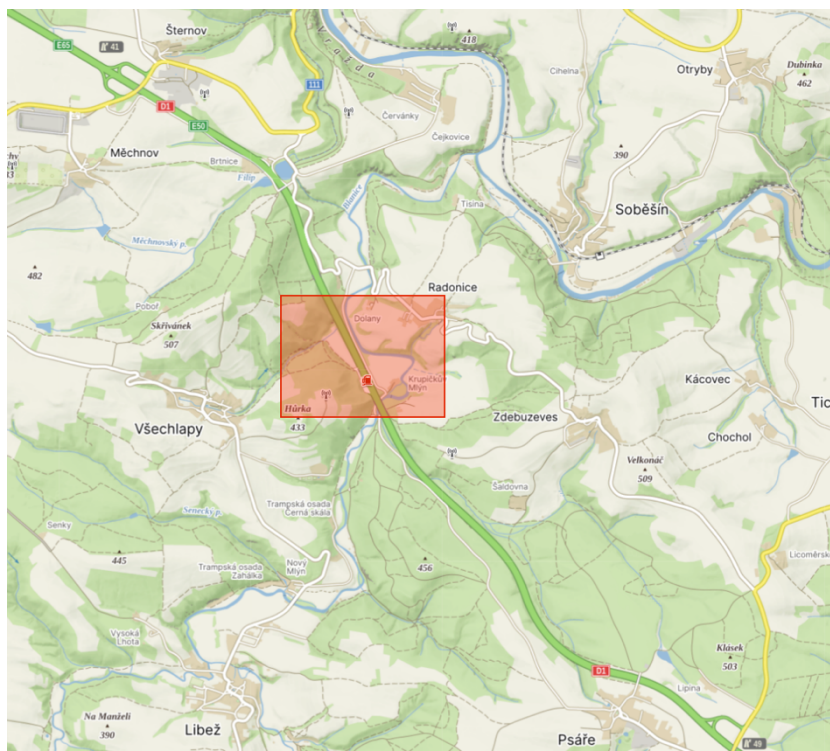


dohlednost a byly shledány jako vhodné pro použití při následných výpočtech a vyhodnocení, jsou v Tabulce 12 vyznačeny zeleně. Zbylé body neposkytovaly přímou viditelnost k místu umístění detektoru, a proto nebyly do následných výpočtů zahrnuty.

Tabulka 12 - Poloha a vzdálenost bodů pro experimentální měření D1

Bod	Souřadnice	Vzdálenost [m]
1	49°47'41.378"N, 14°55'24.080"E	1 300
2	49°46'26.260"N, 14°57'52.441"E	2 700
3	49°45'10.557"N, 14°58'29.050"E	4 600
4	49°45'29.821"N, 14°57'50.117"E	3 700
5	49°46'21.014"N, 14°56'24.816"E	1 400
6	49°46'35.738"N, 14°57'10.372"E	1 900

Uveřejnění přesného místa umístění detektoru, vzhledem k dalším možným měřením GNSS rušení není možné. Přibližná poloha umístění detektoru je vyobrazena na Obrázku 12, detektor se nachází v oblasti červené výseče.



Obrázek 12 - Výšeč oblasti ve které se nachází detektor GNSS rušení na D1

3.1.2 Experimentální měření LKPR

Druhé experimentální měření proběhlo na pražském mezinárodním letišti Václava Havla, dne 11.04.2022. Pro toto měření bylo naplánováno celkem sedm vhodných bodů měření, viz Tabulka 13. Hodnoty vzdálenosti v Tabulce 13 jsou zaokrouhleny na celé stovky, aby nemohlo dojít k přesnému, ale jen přibližnému dopočtení polohy detektoru. K tomuto zaokrouhlení bylo přistoupeno za základě požadavku GCE. Body, u kterých se na místě podařilo ověřit přímou dohlednost a byly shledány jako vhodné pro použití při následných výpočtech a vyhodnocení, jsou v Tabulce 13 vyznačeny zeleně. Zbylé body neposkytovaly přímou viditelnost k místu umístění detektoru, a proto byly z experimentu vyloučeny. Komplikací při experimentálním měření byla především hustá zástavba v okolí letiště, která v mnoha případech znemožnila použití naměřených hodnot z daného bodu z důvodu možného zkreslení výpočtu intenzity rušení na anténě detektoru pomocí rovnice útlumu. Znepřesněná poloha umístění detektoru na LKPR je popsána v Kapitole 1.3.1, na Obrázku 4.



Tabulka 13 - Body pro experimentální měření LKPR

Bod	Souřadnice	Vzdálenost [m]
1	50°5'46.846"N, 14°14'44.468"E	1 500
2	50°6'11.651"N, 14°15'0.484"E	1 900
3	50°5'33.516"N, 14°17'25.220"E	2 000
4	50°6'13.108"N, 14°17'18.229"E	2 400
5	50°4'6.116"N, 14°17'0.288"E	2 600
6	50°6'37.731"N, 14°14'46.167"E	2 700
7	50°3'25.311"N, 14°14'43.348"E	3 800

3.2 Zpracování a vyhodnocení výsledků

Po dokončení experimentů, byla z detektorů prostřednictvím uživatelského rozhraní stažena data a zpracována v analytickém programu Power BI. Vizualizace dat umožnila snazší navázání jednotlivých eventů zaznamenaných detektorem s jednotlivými sekvencemi rušení rušičkou při experimentu. Na základě tohoto propojení byl vytvořen soubor, ve kterém bylo ke každému z eventů zaznamenaných detektorem přiřazena vzdálenost mezi rušičkou a detektorem, stupeň nastavení rušičky a čas po který bylo rušení zaznamenáno.

Pro další výpočty bylo nutné přiřadit k jednotlivým stupňům nastavení rušičky její ekvivalentní izotropní vyzářený výkon (e.i.r.p.). Výstupní výkony na konektoru rušičky TG5CA používané při výpočtech jsou uvedeny v Tabulce 11. Na základě hodnot z Tabulky 11, byla dle Rovnice 1 pro každý event dopočítána intenzita elektrického pole v místě antény detektoru (E):

$$E = e.i.r.p. - 20 \log_{10} d + 44,8 \quad (1)$$



Kde:

E [dB μ V/m] = intenzita elektrického pole v místě antény detektoru

e.i.r.p. [dBm] = ekvivalentní izotropní vyzářený výkon rušičky

d [km] = vzdálenost mezi anténami detektoru a rušičky

Hodnota *E* byla následně použita k výpočtu intenzity rušivého signálu (*P*), dle Rovnice 2:

$$P = E - 141,2 + G - b \quad (2)$$

Kde:

P [dBm] = intenzita rušivého signálu v místě umístění detektoru

E [dB μ V/m] = intenzita elektrického pole v místě antény detektoru

G [dBm] = zisk antény

b [dB] = útlum na vedení

Tento dopočet hodnot byl proveden celkem u 56 relevantních událostí zaznamenaných detektorem. Výsledné hodnoty intenzity rušivého signálu (*P*) byly následně porovnány s hodnotou MAX POWER pro každý jednotlivý event tak, aby mohlo dojít ke zpracování převodní tabulky. Náhled jednotlivých vypočtených hodnot pro část eventů je znázorněn v Tabulce 14.

Tabulka 14 - Ukázka výsledků výpočtu pro jednotlivé případy rušení

stupeň nastavení	vzdálenost	e.i.r.p.	E=	P=	Max Power	Priority	Duration	Event ID
9	1,36	32	74,129	-62,071	8,31	High	57,00	prb02525022022075342000
8	1,36	32	74,129	-62,071	8,31	High	32,00	prb02525022022075642000
4	1,36	24	66,129	-70,071	7,82	High	69,00	prb02525022022075853000
2	1,36	0	42,129	-94,071				
2	1,36	0	42,129	-94,071	1,83	Very Low	23,00	prb02525022022080452000
3	1,36	10	52,129	-84,071	3,39	Medium	44,00	prb02525022022080710000
5	1,36	28	70,129	-66,071	8,19	High	77,00	prb02525022022081011000
3,5	1,36	N/A	N/A	N/A	6,34	High	67,00	prb02525022022081249000
9	2,684	32	68,224	-67,976	6,14	High	73,00	prb02525022022085725000
9	2,684	32	68,224	-67,976	5,55	High	34,00	prb02525022022085844000
8	2,684	32	68,224	-67,976	5,97	High	46,00	prb02525022022090003000
5	2,684	28	64,224	-71,976	4,45	High	62,00	prb02525022022090148000
3,5	2,684	N/A	N/A	N/A	2,17	Low	93,00	prb02525022022090335000

Měření odhalilo drobné překrývání jednotlivých hodnot P u daných stupňů nastavení (kroků) rušičky, což bylo očekáváno. Ve výsledné převodní tabulce je tedy tento fakt zohledněn drobným překrytím jednotlivých hodnot P.

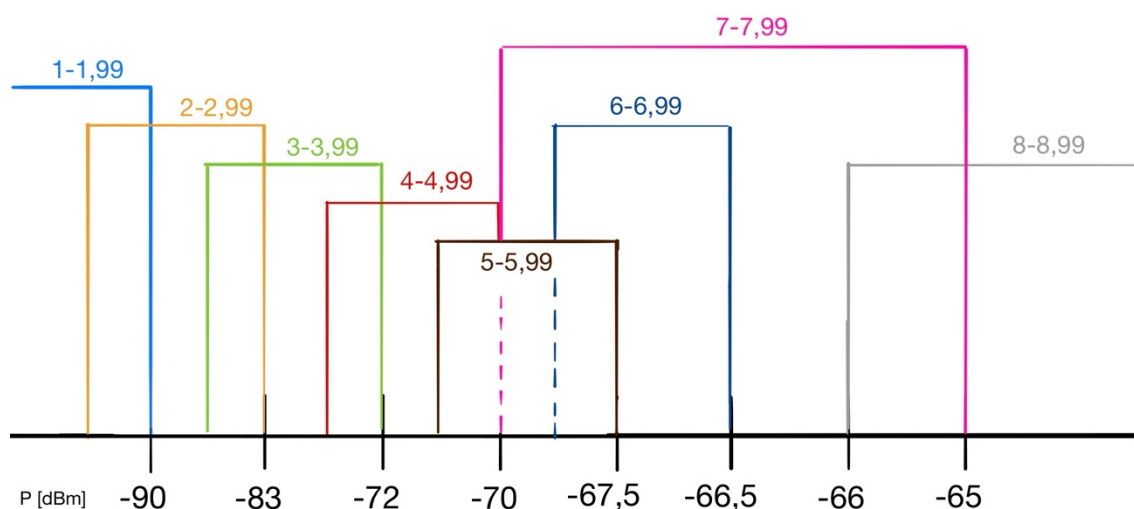
3.3 Výsledky a diskuze

Výsledkem experimentálního měření na dvou lokacích je převodní Tabulka 15, na základě které je možné zjistit, jaká intenzita rušivého signálu byla přítomna v místě detektoru v čase, kdy zaznamenal daný event, jemuž byla přiřazena konkrétní hodnota MaxPower. Vzhledem k možným nuancím v rámci měření a blízkých hodnot, které jednotlivé výpočty nabývaly, byla tabulka sestavena tak, aby poskytovala dostatečný přesah jednotlivých hodnot MaxPower a intenzity rušení odpovídající reálně naměřeným hodnotám. Tabulka tedy slouží primárně jako orientační nástroj.

V případě potřeby zpřesnění výsledků by bylo nezbytné provést celou řadu dalších měření tak, aby bylo možné vycházet z širšího vzorku vstupních dat. V převodní tabulce 15 jsou v levém sloupci uvedeny jednotlivé bezrozměrné hodnoty MAX POWER, k nimž je v pravém sloupci přiřazena míra intenzity rušení v daném místě. Pro lepší přehlednost rozdělení hodnot, se na Obrázku 13 nachází grafické zpracování Tabulky 15, kde je lépe zřetelný překryv jednotlivých hodnot.

Tabulka 15 - Rozsah hodnot MAX POWER a jemu odpovídající rozsah hodnot P

MAX POWER	P [dBm]
1 – 1,99	-90 a méně
2 – 2,99	-92 až -83
3 – 3,99	-85 až -72
4 – 4,99	-73 až -70
5 – 5,99	-71 až -67,5
6 – 6,99	-68 až -66,5
7 – 7,99	-70 až -65
8 – 8,99	-66 a více



Obrázek 13 - Grafické zpracování překryvu hodnot z Tabulky 15

V rámci grafického zpracování převodní tabulky na Obrázku 13, je vyobrazen překryv jednotlivých hodnot z Tabulky 15. Vzhledem k tomu, že hodnota MAX POWER není výrobcem nějak blíže definována a je možné, že se do ní promítají i jiné veličiny mimo intenzity signálu. U vyšších intenzit rušení je znatelný značný překryv hodnot, způsobující jistou nepřesnost převodní tabulky. Měření intenzity signálu v místě detektoru za pomoci rovnice útlumu signálu ve volném prostředí má v tomto ohledu určitou nejistotu. Přesnějších výstupů by bylo možné docílit prováděním měření



v ideálních podmínkách, například v uzavřené komoře, nebo za pomoci fyzického měření intenzity signálu přímo v místě antény detektoru. Pro přibližný odhad intenzity signálu, kterou představuje odpovídající hodnota MAX POWER, jsou však výsledky dostatečné. Grafické zpracování Tabulky 15, včetně samotné tabulky, se nachází v Příloze 1.



4 Analýza vlivu GNSS rušení na provoz na LKPR

Pro ověření dopadu GNSS rušení na provoz na LKPR, byla sestavena metodika, kterou byly porovnávány výstupy z detektoru umístěného na Letišti Praha a výstupy z ADS-B mapující provoz v oblasti odpovídající přibližné rozloze řízeného okrsku (Control Zone - CTR) LKPR. Na sadu ADS-B dat byla aplikována metoda spočívající v použití diskrétního matematického modelu pro detekci GNSS rušení pomocí kombinací parametrů kvality obsažených v ADS-B [32]. Výstupy z detektoru a ADS-B byly následně porovnávány s cílem zjistit, zda došlo k ovlivnění provozu a jaká intenzita rušivého signálu je k tomuto ovlivnění zapotřebí. Dopad GNSS rušení byl prověřován v rámci dvanácti po sobě jdoucích měsíců, počínaje dubnem 2021.

Výsledkem této analýzy je statistika letů u nichž bylo detekováno GNSS rušení za pomoci ADS-B, včetně popisu jednotlivých zaznamenaných případů. U případů, kdy bylo rušení zaznamenáno jak prostřednictvím dat z ADS-B, tak detektorem, je uvedeno grafické znázornění charakteristiky rušivého signálu a přibližná intenzita rušivého signálu v místě detektoru, odvozená z úlohy kalibrace detektoru (viz. Kapitola 3.3), která měla za následek projev na parametrech kvality ADS-B konkrétního letu. Dále byly v rámci této analýzy vyznačeny oblasti, kde nejčastěji k rušení GNSS docházelo a u kterých typů letadel se rušení nejčastěji projevilo. V poslední řadě se v této kapitole nachází popis případů, kdy docházelo pravděpodobně k falešné detekci GNSS rušení a výčet letadel, která musela být z analýzy vyloučena pro nespolehlivost a nepřesnost vysílaných údajů.

4.1 Metodika

Data potřebná pro propojení případů rušných letadel a událostí rušení zaznamenaných detektorem a analýzu dopadů GNSS rušení na letecký provoz na LKPR, byla získána prostřednictvím dvou zdrojů. Prvním zdrojem byl server OpenSky Network [35], prostřednictvím kterého byla získána potřebná ADS-B data. OpenSky network, je nezisková organizace sídlící ve Švýcarsku, zaměřující se na sběr a archivaci ADS-B dat prostřednictvím bohaté sítě ADS-B přijímačů, patřících dobrovolníkům, jiným organizacím, nebo univerzitám po celém světě. Tato data jsou organizací archivována a poskytována jednotlivcům, případně výzkumným organizacím k výzkumným a vědeckým účelům. Druhým zdrojem byla výstupní data samotného detektoru

GSS100D instalovaného na letišti v Praze. Popis detektoru a jeho výstupů je uveden v Kapitole 1.3.1.

Pro potřeby analýzy byla stažena ADS-B data za období po sobě jdoucích dvanácti měsíců, od dubna 2021 do března 2022. Takto zvolený časový úsek byl zvolen především z důvodu časového překrytí s dobou umístění detektoru na LKPR. Pro vyšší efektivitu nebyly stahovány ze serveru OpenSky všechny typy ADS-B zprávy, ale jen zprávy potřebné pro detekci GNSS rušení, tedy obsahující potřebné parametry kvality, popsané v Kapitole 2.1.2 a Kapitole 2.1.3. Těmito zprávami jsou Airborne Position Message, Airborne Velocity Message a Aircraft Status Message. Zprávy byly staženy z předem definované oblasti, pokrývající přibližně plochu CTR Letiště Praha. Tato oblast byla vydefinována za pomoci intervalů GPS souřadnic, kdy interval zeměpisné šířky byl stanoven od $50,02^{\circ}\text{N}$ do $50,16^{\circ}\text{N}$ a interval zeměpisné délky od $14,14^{\circ}\text{E}$ do $14,35^{\circ}\text{E}$. Oblast, ze které byla stahována ADS-B data, je znázorněna na Obrázku 14.



Obrázek 14 - Předem definovaná oblast, ze které byla stahována ADS-B data

Získaná ADS-B data byla rozdělena do dvanácti jednotlivých souborů, po příslušných měsících, pro snazší orientaci a efektivitu práce. Velikost jednoho souboru



se pohybovala v rozsahu vyšších stovek MB, a to v závislosti na konkrétním měsíci. Raw ADS-B data byla následně dekodována pomocí dekodovacího Python skriptu [34], který byl pro tuto potřebu poskytnut Katedrou letecké dopravy Fakulty dopravní ČVUT. Výsledkem bylo 12 souborů, přičemž v každém z nich byly dekodovány následující parametry potřebné pro analýzu:

- Čas v UNIX formátu
- 24 bitová ICAO adresa letadla (ADDR)
- Hodnota Type Code
- Označení verze ADS-B (MOPS)
- Zeměpisná šířka a zeměpisná délka
- Výška založená na tlakovém výškoměru
- Výška založená na GNSS
- Parametr kvality NIC včetně s ním souvisejících hodnot
- Parametr kvality NACp včetně s ním souvisejících hodnot
- Parametr kvality SIL včetně s ním souvisejících hodnot

Následná filtrace dat probíhala na základě hodnoty MOPS a SIL supplement. Hodnota MOPS obsažená v dané ADS-B zprávě příjemci udává, o kterou verzi ADS-B se jedná. V roce 2024 je nejvyužívanější ADS-B v2, která na rozdíl od předešlých verzí obsahuje parametry kvality NIC a NACp, a tím umožňuje využití metod detekce GNSS rušení z ADS-B. ADS-B verze 0 a verze 1, jsou v letecké dopravě v současné době využívány minimálně. Filtrací na základě hodnoty SIL supplement, byly odfiltrovány ADS-B zprávy v nichž není zdrojem polohové informace GNSS a nejsou tedy pro následnou analýzu v rámci této práce relevantní.

Pro detekci ADS-B zpráv, které byly předmětem rušení GNSS, byla uplatněna metoda spočívající ve využití matematického diskrétního modelu pro detekci GNSS rušení za pomoci parametrů kvality obsažených v ADS-B [32]. Tato metoda je podrobněji popsána v Kapitole 2.1.4. Následně byla data nahrána do analytického programu Power BI, kde byla provedena finální vizualizace dat, což umožnilo propojení mezi lety, u kterých bylo detekováno GNSS rušení s případy rušení, zaznamenanými detektorem na LKPR.



Z důvodu potřeby přiřadit jednotlivé ADS-B zprávy ke konkrétním letům a vykreslení trajektorií letů, bylo s daty ve finální fázi pracováno v analytickém nástroji pro zpracování dat. Vizualizace dat umožnila pokročilejší filtraci dat o případy, kdy došlo k chybnému určení dané ADS-B zprávy jako rušené. Z důvodu stahování dat z předem definované oblasti a ve striktně definovaném čase, došlo k tomu, že data v blízkosti hranice definovaného prostoru nebyla kompletní, respektive došlo k absenci stažení některých typů ADS-B zpráv. K tomuto dochází v důsledku rozdílné frekvence vysílání jednotlivých typů zpráv ADS-B. To vedlo k nemožnosti dopočítání některých parametrů kvality a zprávy tak byly diskretním matematickým modelem označeny za rušené.

Grafické znázornění tohoto jevu je vyobrazeno na Obrázku 14, kde se nachází předem definovaná oblast, ze které byly ADS-B zprávy stahovány. Červené body na Obrázku 15 znázorňují zprávu, která byla definována jako rušená. Tento fenomén se v některých případech objevoval i u ADS-B zpráv vyslaných krátce (přibližně 2-5 sekund) po vzletu, nebo přistání, což bylo následkem práce s daty obsaženými pouze v Airborne Position Message, Airborne Velocity Message a Aircraft Status Message. V momentě, kdy se letadlo pohybovalo po zemi (část vzletu, přistání), nebylo kvůli absenci Surface Position Message, které jsou vysílány v případě, že se letadlo pohybuje po zemi možné dopočítat parametry kvality a zpráva mohla být chybně označena jako rušená, což je známou limitací použité metody diskretního modelu.



Obrázek 15 - Falešně detekované zprávy rušení GNSS

Pro přesnější výstup a ucelenou statistiku případů, ve kterých docházelo k reálnému rušení GNSS, byla vizualizovaná data procházena po jednotlivých hodinách konkrétního kalendářního dne. Tento postup umožnil odfiltrování všech falešně detekovaných případů a jednoznačnou detekci letů, při kterých docházelo v některé z části letu k rušení GNSS a vykreslení trajektorie takového letu, včetně úseku kdy docházelo k rušení GNSS. V rámci tohoto postupu byl pro každý z detekovaných případů vytvořen samostatný „report“ dané události, obsahující trajektorii daného letu, na mapovém podkladu a průběh hodnot parametrů kvality v čase letu.

Zaznamenané případy rušení (reporty) byly následně porovnány s výstupy detektoru umístěného na LKPR. Vzhledem k umístění detektoru (viz. Kapitola 1.3.1) a předpokladu, že zdrojem rušení jsou osobní zařízení pro rušení GNSS umístěné v automobilech pohybujících se po okolní infrastruktuře dálnic v blízkosti letiště, byly zaznamenané reporty spojovány s případy detekovanými detektorem v časovém rozmezí ± 20 min, což odpovídá přibližnému času potřebnému k cestě z jedné strany letiště na druhou, za pomoci okolní dopravní infrastruktury. V případě úspěšné korelace, tedy detekce rušení a přítomnosti letu, u kterého bylo za pomoci ADS-B



detekováno rušení v rámci stanoveného časového intervalu, byl příslušný report doplněn o grafický výstup popisu rušivého signálu z detektoru.

4.2 Výsledky

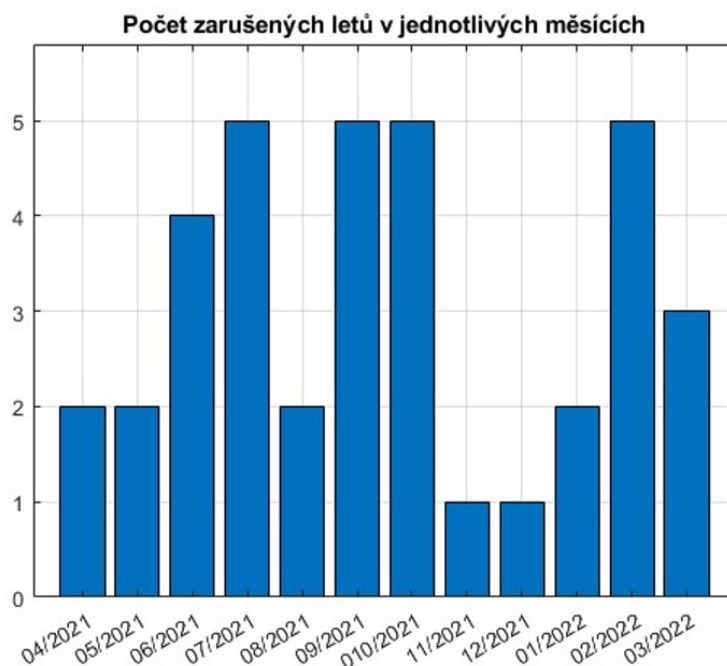
Na základě dat poskytnutých ŘLP, bylo v období duben 2021 až březen 2022, odbaveno v rámci CTR LKPR celkem 71 417 pohybů. Počty pohybů v rámci CTR pro jednotlivé měsíce, jsou uvedeny v Tabulce 16.

Tabulka 16 - Celkový počet pohybů v CTR Letiště Praha v letech 2019-2024

Celkový počet pohybů

	Leden	Únor	Březen	Duben	Květen	Červen	Červenec	Srpen	Září	Říjen	Listopad	Prosinec
2019	10128	9423	11417	12208	13426	15113	15491	15676	15351	13593	11271	11388
2021	2316	2115	2438	2630	3237	5044	7003	7650	7741	7263	6788	6890
srovnání s 2019	-77,13 %	-77,66 %	-78,66 %	-78,46 %	-75,89 %	-66,62 %	-54,79 %	-51,84 %	-49,57 %	-46,57 %	-39,77 %	-39,5 %
2022	5441	5316	6514	7655	8888	10196	10737	10549	10236	8966	7217	7390
srovnání s 2019	-46,28 %	-43,58 %	-42,94 %	-37,3 %	-33,8 %	-32,53 %	-30,69 %	-32,71 %	-33,32 %	-34,04 %	-35,97 %	-35,11 %
2023	6505	6394	7985	9067	9964	11750	12177	12066	11968	10816	8842	9122
srovnání s 2019	-35,77 %	-32,14 %	-30,06 %	-25,73 %	-25,86 %	-22,25 %	-21,39 %	-23,03 %	-22,04 %	-20,43 %	-21,55 %	-19,9 %
2024	7941	8093	9673	---	---	---	---	---	---	---	---	---
srovnání s 2019	-21,59 %	-14,11 %	-15,28 %	---	---	---	---	---	---	---	---	---

Za dané období se dle popsané metodiky podařilo detekovat celkem 37 případů rušení GNSS za pomoci detekce prostřednictvím ADS-B. Z těchto 37 případů, se celkem u 11 případů podařilo dohledat korelaci se zaznamenaným rušením GNSS detektorem. Rozložení jednotlivých zaznamenaných případů v rámci konkrétních měsíců, znázorňuje graf na Obrázku 16.



Obrázek 16 - Počet letů, u kterých bylo detekováno GNSS rušení v jednotlivých měsících sledovaného období od 04/2021 do 03/2021

4.2.1 Popis reportů jednotlivých případů s detekovaným rušením GNSS

Pro každý případ rušení GNSS detekovaného pomocí ADS-B byl vytvořen přehledný report. Reporty ke všem dohledaným případům jsou obsaženy v rámci Příloh č. 3 až 39. Popis k jednotlivým reportům a celkový soupis zaznamenaných případů se nachází v tabulce v Příloze 2. Tabulka v Příloze č.2 je rozdělena do tří základních částí, kterými jsou sloupce týkající se samotných ADS-B zpráv, výstupů z detektoru a údajů o daném letu. Pro každý ze zaznamenaných případů (reportů) jsou v tabulce následující informace:

- Datum letu
- Přesný čas definující interval rušení detekovaný prostřednictvím ADS-B
- Unikátní 24 bitová ICAO adresa odpovídače daného letadla (ADDR)
- Výčet nejčastěji zaznamenaných hodnot jednotlivých parametrů kvality v průběhu rušení
- Odkaz na číslo přílohy v rámci této práce

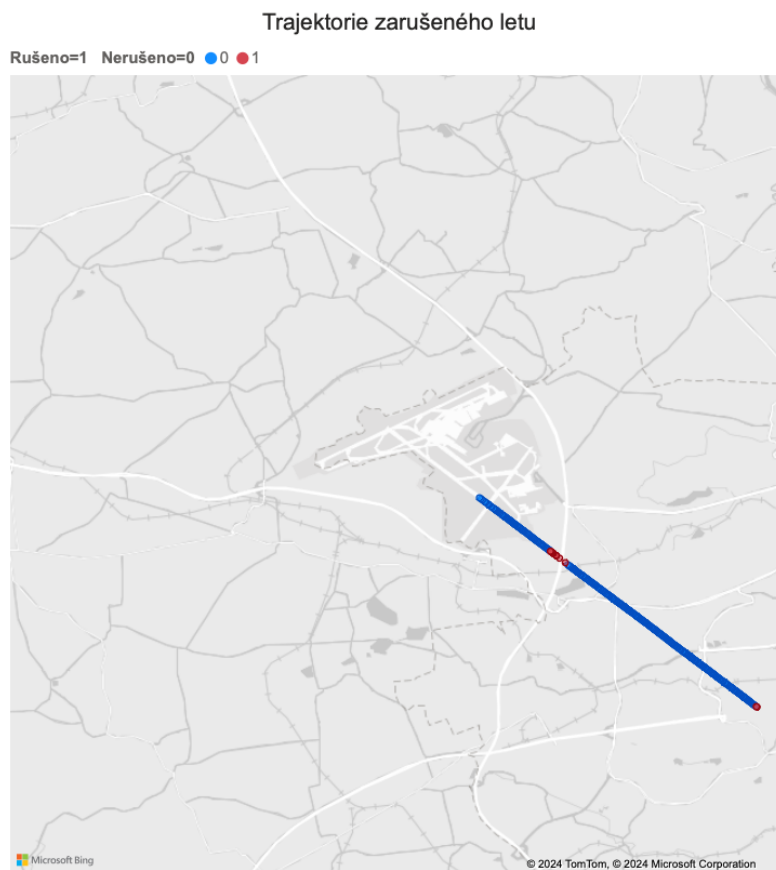


V případě, že byla k detekci rušení prostřednictvím ADS-B dohledána detekce rušení detektorem umístěným na letišti je dále v Tabulce v Příloze č.2 ke každému takovému případu uvedeno:

- Stupeň priority přiřazený detektorem
- Přesný čas, ve kterém bylo detektorem detekováno rušení
- Event ID konkrétního případu zaznamenaného detektorem
- Bezrozměrná veličina MAX POWER přiřazená detektorem

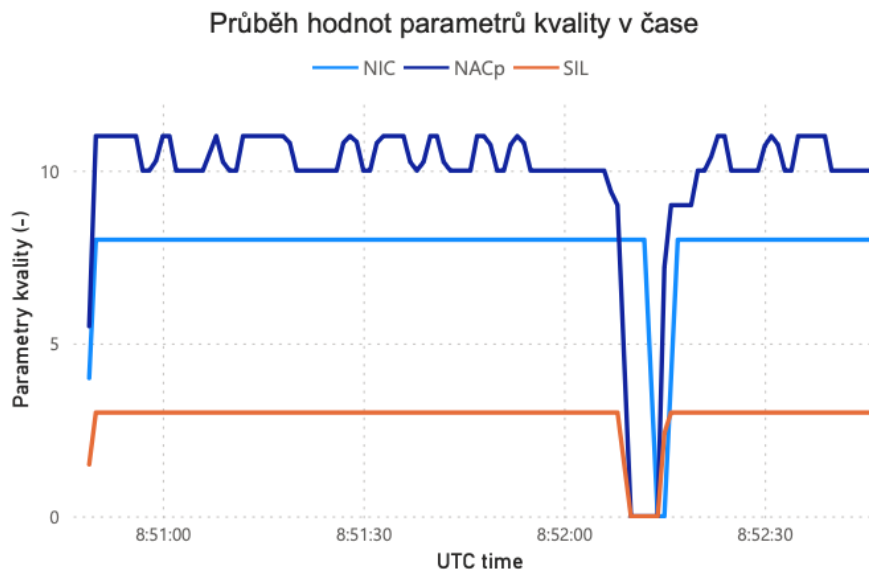
Ke každému z případů rušení, které bylo zaznamenáno detektorem, je dále uvedena odpovídající přibližná intenzita rušivého signálu P, přiřazená na základě hodnot z Tabulky 15. V poslední části Tabulky v Příloze č.2 se nacházejí informace o daném letu, o jakou fázi letu a jaký typ letadla se jednalo. V případě, že se v tabulce v Příloze 2 nenacházejí informace o detekci detektorem a v rámci reportu konkrétní události není přiložen PSD diagram a waterfall diagram, nebylo dané rušení detekováno detektorem.

Každý z reportů obsahuje vyznačení trajektorie daného letu s barevně zvýrazněnou částí, kde byl let vystaven rušení GNSS. Trajektorie letu je znázorněna modře, každý modrý bod představuje konkrétní ADS-B zprávu vyslanou letadlem. Červené body znázorňují ADS-B zprávy, které byly na základě parametrů kvality vyhodnoceny jako rušené. Na Obrázku 17 se nachází znázornění trajektorie letu letounu Bombardier Global 6000 (GLEX), který byl při příletu na LKPR dne 18.5.2021 vystaven GNSS rušení v úrovni dálnice D0. Tento příklad je zpracován v rámci Přílohy č. 6 této práce a byl vybrán pro názornou ukázkou popisu jednotlivých reportů.



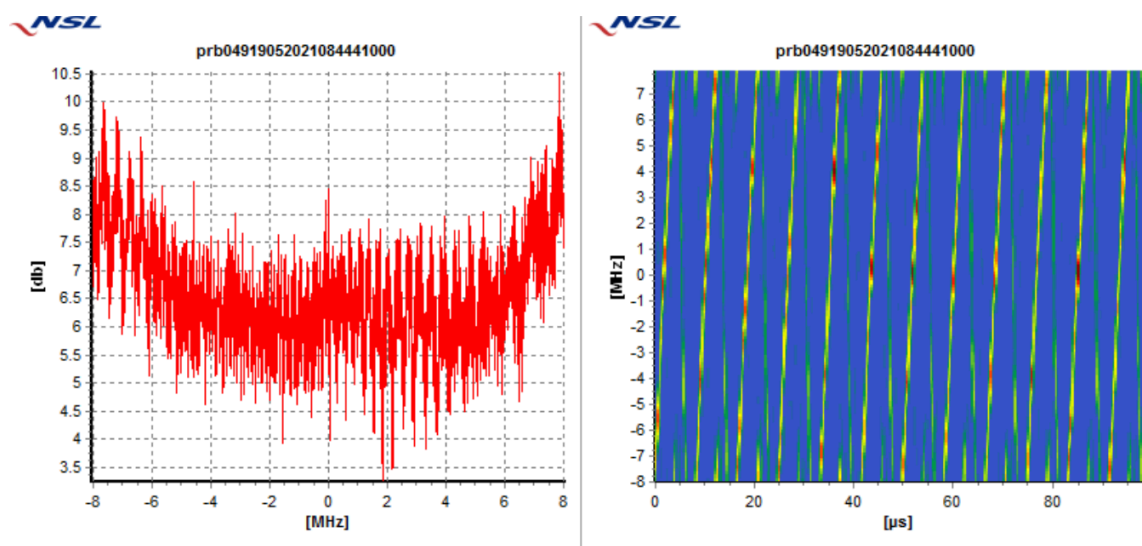
Obrázek 17 -Trajektorie letu Bombardier Global 6000 s vyznačeným úsekem rušení

Obrázek 18 popisuje průběh parametrů kvality NACp, NIC a SIL v čase daného letu v definované oblasti zájmu. Let byl na základě ADS-B rušen v časovém intervalu od 08:52:06 do 08:52:21, přičemž hodnota všech sledovaných parametrů kvality poklesla na nulu. Pokles parametrů kvality v počáteční části grafu, je způsoben chybou výpočtu parametrů kvality v důsledku chybějících částí počátečních zpráv na hranici definované oblasti zájmu (bližší popis těchto chyb je popsán v Kapitole 4.1).



Obrázek 18 - průběhu hodnot parametrů kvality v čase přiletu letounu Bombardier Global 6000 na letiště Praha kdy došlo dopadu GNSS rušení na parametry kvality

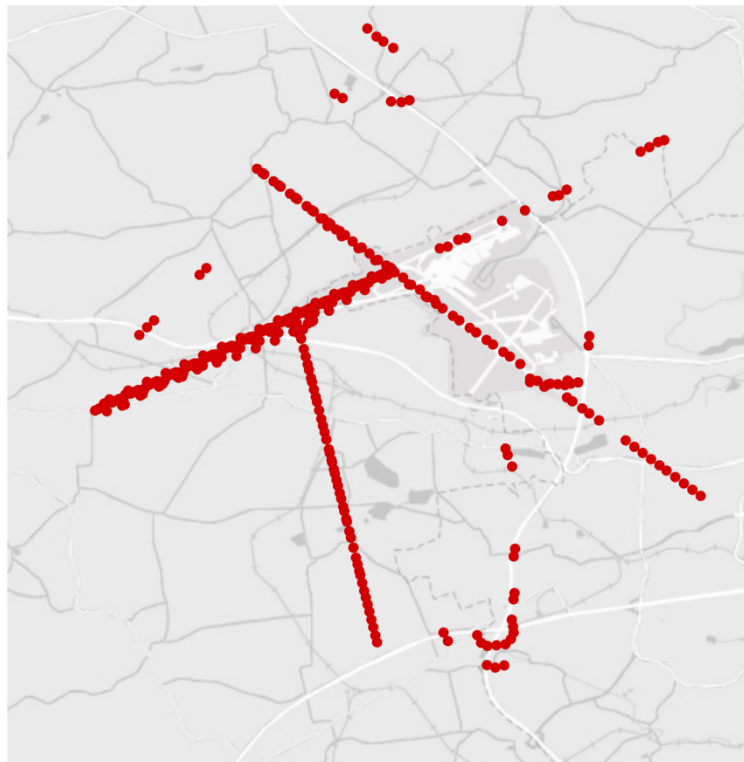
Detektorem GNSS rušení GS100D bylo zaznamenáno rušení v čase 08:44:41, které trvalo 32 sekund. Rušení byla přiřazena priorita „High“, Event ID prb04919052021084441000 a bezrozměrná hodnota MAX POWER 6,21 odpovídající intenzitě rušivého signálu v místě umístění detektoru -68 až -66,5 dBm. Grafický výstup z detektoru k tomuto případu rušení v podobě PSD diagramu a waterfall diagramu je znázorněn na Obrázku 19.



Obrázek 19 - PSD diagram a waterfall diagram signálu zaznamenaného detektorem
v čase letu Bombardier Global 6000

4.2.2 Oblasti s nejčastějším výskytem detekovaného rušení GNSS

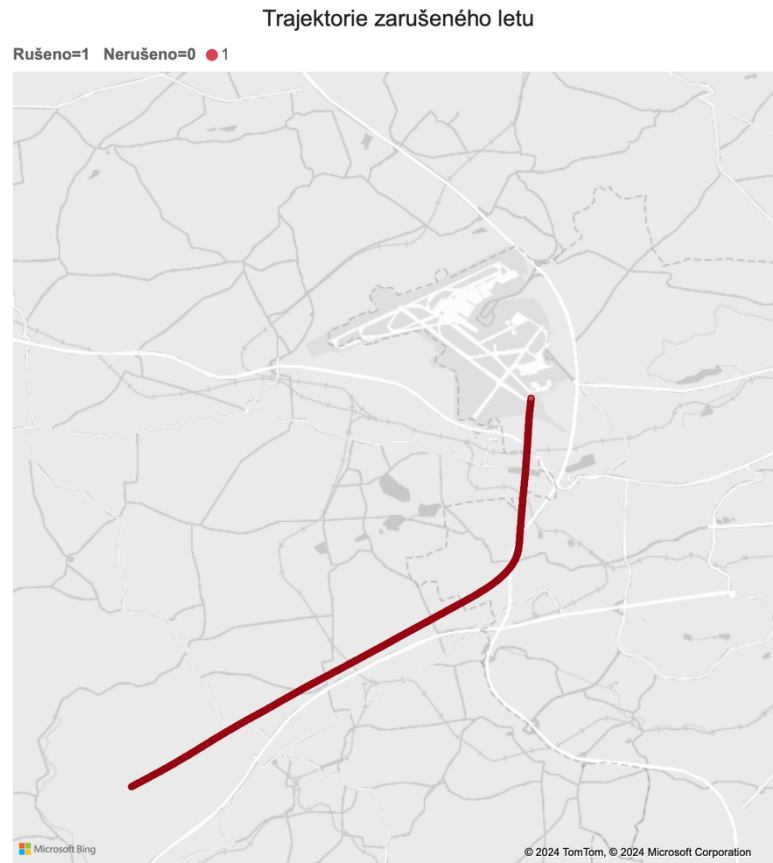
Vzhledem k provozní povaze LKPR, kde převládající provoz tvoří především lety prováděné za pravidel pro let IFR a předem definované oblasti, ze které byla ADS-B data analyzována, je zřejmé, že většina případů rušení probíhala v prodloužených osách jednotlivých drah. Rušení se projevilo primárně nad místy, kde prodloužené osy drah kříží dálnice D6 a D0. Ojedinele se objevovali případy rušení detekovaného pomocí ADS-B v blízkosti průmyslových areálů, skladů a odpočívadel, nebo parkovišť nákladních automobilů. Jednotlivé oblasti, kde docházelo k rušení ADS-B, jsou znázorněny na Obrázku 20.



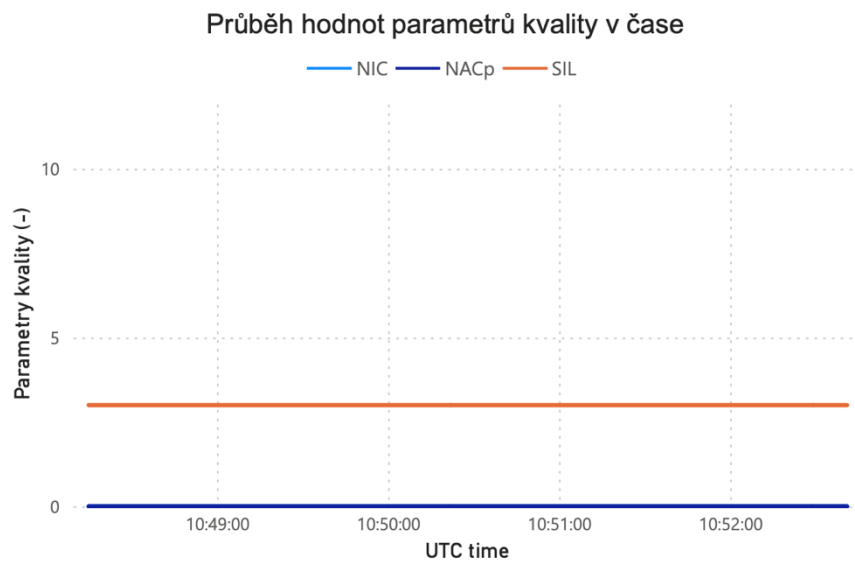
Obrázek 20 - Oblasti s výskytem detekovaného GNSS rušení

4.2.3 Letadla vysílající chybné parametry kvality ADS-B

V průběhu zpracování, analýzy a vizualizace dat bylo zjištěno, že určitá skupina lehkých letadel z oblasti GA a řada vrtulníků, vysílá v rámci ADS-B chybné parametry kvality které v důsledku chybného vysílání nelze dopočítat, nebo jsou po celou dobu letu rovny hodnotě nula. Důvodem může být zastaralá avionika, vada odpovídače, nebo chyba v rámci dekódování zpráv. Ve většině případů se jednalo o vrtulníky provozované Policíí ČR, nebo malá sportovní letadla provozovaná aerokluby. Všechny tyto případy byly ze statistiky vyjmuty a nebyly do práce zahrnuty. Příklad trajektorie letu vrtulníku Policie ČR se nachází na Obrázku 21, kde je patrné, že po celý průběh letu byly ADS-B zprávy vrtulníku vyhodnoceny jako rušené. Průběh parametrů kvality v čase letu, na základě kterých byl let vyhodnocen jako rušený, je znázorněn na Obrázku 22. Zde je názorně vidět, že vrtulník po celou dobu letu vysílal parametry kvality NIC a NACp rovny 0, parametr SIL byl po celou dobu letu roven hodnotě 3.



Obrázek 21 - Trajektorie letu vrtulníku Policie ČR, který byl označen za rušený



Obrázek 22 - Průběh hodnot parametrů kvality v čase letu vrtulníku Policie ČR, který byl označen jako rušený



5 Diskuze

V průběhu zpracování a analýzy dat týkajících se letů, u kterých bylo detekováno rušení GNSS, bylo čeleno hned několika výzvám. V první řadě je třeba zmínit, že v rámci rešerše nebyla dohledána podobná studie, nebo práce, zaměřující se na prověření dopadu GNSS rušení na provoz na Letišti Václava Havla v Praze za pomoci výstupů z detektoru GNSS rušení a technologie ADS-B. Výsledky této práce tedy není možné efektivně porovnat s předešlými studiemi, nicméně to samo o sobě tvoří tuto práci unikátní a přínosnou.

Analýzou dat za pomoci metodiky stanovené v Kapitole 4.1 bylo detekováno v průběhu dvanácti kalendářních měsíců (duben 2021 až březen 2022) celkem 11 případů letů, které byly vystaveny GNSS rušení, s tím že toto rušení bylo zároveň zaznamenáno detektorem GNSS rušení umístěným na LKPR. Celkový počet letů, které byly v průběhu analyzovaných dvanácti měsíců vystaveny GNSS rušení, byl 37. Důvodem proč rušení bylo dohledáno i na detektoru jen v 11 případech, může být samotné umístění detektoru na LKPR. Letiště Václava Havla v Praze je svou rozlohou poměrně rozsáhlé a je sevřeno poměrně hustou a frekventovanou dopravní infrastrukturou. Vzhledem k tomu, že v časovém úseku, ve kterém probíhala analýza dat, byl na letišti umístěn pouze jeden detektor, konkrétně na jihozápadní straně letiště, v blízkosti dálnice D6, dařilo se v průběhu umístění detektoru detekovat ve většině případů pouze rušení, kterým byl ovlivněn provoz pohybující se v osách dráhy 30 a 06. U provozu pohybujícímu se v ose dráhy 24, která je nejvyužívanější, tedy docházelo pouze k detekci rušení za pomoci ADS-B, nikoliv za pomoci detektoru, který byl od místa kde je křížena osa dráhy 24 s frekventovanou dálnicí vzdálen téměř 3,5 km.

Pro přesnější analýzu dopadu GNSS rušení na provoz by v budoucnu bylo vhodné provést měření za pomoci více detektorů, které by byly strategicky rozmístěny v blízkosti jednotlivých prodloužených os drah a frekventovaných silničních cest, což by umožnilo spojení více případů letadel vystavených GNSS rušení se zaznamenaným rušením na detektorech.

Drobnou nuancí, která může mít vliv na množství případů rušených letů, které se dařilo propojit se zaznamenanými případy rušení na detektoru, může být výpadek detektoru v období 28.02.2021 až 29.4.2021. Tento výpadek způsobil, že v prvních 29 dnech,



z celkových dvanácti měsíců, nebylo kvůli absenci dat z detektoru možné propojit případy rušení GNSS detekovaného prostřednictvím ADS-B s případy zaznamenanými detektorem. Tento výpadek má však na celkový výsledek práce minimální vliv, protože pomocí ADS-B byly v rámci měsíce dubna detekovány pouze dva případy letů, vystavených rušení. Z tohoto důvodu byla data v analytické části ponechána.

Výsledná statistika letů, které byly vystaveny ve stanoveném časovém úseku GNSS rušení prokázala, že GNSS rušení v okolí LKPR se jeví jako potencionální hrozba pro bezpečnost a plynulost provozu. V této souvislosti je ale nutné poznamenat, že v rámci vizualizace a analýzy dat, nebylo u žádného z uvedených 37 případů rušení zaznamenáno provedení postupu pro nezdařené přiblížení. Tato skutečnost nicméně neznamena, že GNSS rušení v oblasti Letiště Praha nemá na provoz žádný vliv. Řada letů byla rušena ve fázi vzletu, nebo průletu CTR, kdy není možné pomocí výstupů z ADS-B dat odvodit, zda mělo rušení dopad na průběh konkrétního letu. Za poznámku také stojí zmínka, že na LKPR jsou publikovány i konvenční postupy pro přiblížení a finální sestup, nicméně existují letiště, kde jsou publikovány postupy založené pouze na GNSS, kde by ztráta navigační výkonnosti letadla měla podstatně horší následky.

Velice zajímavým poznatkem v průběhu zpracování dat se ukázala spojitost mezi jednotlivými typy letadel, které podléhají rušení a mají vůči GNSS rušení pravděpodobně nižší odolnost. V drtivé většině případů bylo pomocí dat z ADS-B detekováno rušení u malých sportovních letounů a proudových letounů krátkého až středního doletu z oblasti business aviation. Pouze ojediněle bylo detekováno rušení u letounů A320, nebo B737. Výčet letadel, u kterých bylo zaznamenáno GNSS rušení prostřednictvím ADS-B, je uveden v Tabulce v Příloze 2.

Kromě opakujících se typů letadel, které byly ovlivněny GNSS rušením se po hlubší analýze nepodařilo dohledat žádný jiný společný faktor mezi jednotlivými případy rušení. Neexistuje tedy žádná spojitost jako špičkové dny, nebo časy, ve kterých bylo rušení nejčastější. Z grafu na Obrázku 16, v Kapitole 4.2 je přesto zřetelné že v letních měsících, kdy je odbavováno více pohybů, je počet rušených letů podstatně vyšší než v zimních měsících.



Vzhledem k tomu, že data pro analýzu byla shromážděna za období duben 2021 až březen 2022, může být statistika letů, u kterých bylo detekováno rušení GNSS, zkusena postupným nárůstem počtu pohybů po útlumu provozu mezi lety 2019 až 2021. Obecně lze tedy říci, že v současné době (2024), kdy je v rámci CTR LKPR odbavováno přibližně 4x více pohybů, než tomu bylo v průběhu roku 2019, se dá předpokládat i nárůst v množství letů na které má GNSS rušení dopad. Trend vývoje počtu pohybů v posledních 5 letech, v rámci CTR LKPR, na kterém je zřetelné období útlumu, se nachází v Grafu v Příloze 40.

Jako problém, který vyvstal při strojovém zpracování dat se ukázala celá řada letadel, která po celou dobu letu vysílá nečitelné parametry kvality, které v důsledku chybného vysílání nelze dopočítat, nebo jsou po celou dobu letu rovny hodnotě nula. Toto zjištění, ve spojitosti s množstvím falešně označených ADS-B zpráv jako rušených, nacházejících se v okolí hranice zájmu, ze které byla data stahována, vedlo k rozhodnutí, že veškerá data bude zapotřebí analyzovat ručně, za pomoci vizualizací jednotlivých případů. Tento postup, který je popsán v rámci metodiky práce, umožnil vyloučení všech falešně detekovaných zpráv a chybně vysílajících letadel z celé statistiky, což dělá výsledek této práce a analýzy přesným a přínosným.



6 Závěr

Cílem této práce bylo prověření dopadů GNSS rušení na provoz na letišti Václava Havla v Praze za pomoci výstupů z detektoru GNSS rušení instalovaného na LKPR a technologie ADS-B mapující provoz na letišti. Dílčím cílem bylo určit, jaká intenzita rušení v okolí letiště je za potřebí pro ovlivnění provozu a vytvoření statistiky případů letů, které byly GNSS rušení vystaveny.

V úvodní části této práce se nachází základní popis GNSS, popis jednotlivých páteřních konstelací a princip jejich fungování a rozsahu radiového spektra, v rámci kterého tyto systémy operují. V rámci části popisující GNSS jsou také uvedeny jednotlivé typy rušení GNSS, včetně jejich popisu a možnosti detekce. Následně se práce věnuje popisu možností detekce GNSS rušení za pomoci ADS-B. V této části se nachází popis ADS-B jako takového, principu fungování a složení ADS-B zprávy. Větší pozornost je zde věnována popisu jednotlivých parametrů kvality a zpráv, ve kterých jsou parametry kvality obsaženy, což je nezbytné pro kontext této práce a aplikaci následné metody detekce. Práce představuje současné nejúspěšnější metody detekce rušení GNSS za pomoci výstupu z ADS-B, z nichž největší pozornost je věnována popisu metody spočívající v aplikaci diskrétního matematického modelu pro detekci GNSS rušení za pomoci parametrů kvality, obsažených v ADS-B. V rámci naplnění jednoho z cílů byla sestavena metodika pro kalibraci odezvy na detektoru GNSS rušení, na základě které vznikla převodní tabulka bezrozměrných hodnot přiřazených detektorem k jednotlivým případům rušení, přiřazeným k odpovídající intenzitě signálu v místě detektoru. Za pomoci analýzy vlivu GNSS rušení na provoz na LKPR byla následně vytvořena přehledná statistika letů, které byly v období duben 2021 až březen 2022 vystaveny rušení s vyznačením odpovídající intenzity rušivého signálu potřebnému k takovému ovlivnění provozu.

Přínosem této práce je důkaz, že GNSS rušení v okolí LKPR může představovat hrozbu pro bezpečnost, plynulost a efektivitu provozu. Výsledky práce identifikují poměrně úzkou skupinu typů letadel, která může být GNSS rušením ovlivněna a není vůči GNSS rušení dostatečně odolná. Limitací této práce může být období útlumu letového provozu, ve kterém byla analýza prováděna, vedoucí k možnému zkreslení výsledku. Na základě tohoto faktu ale lze konstatovat, že za vyšší hustoty provozu, by byl počet letů vystavených GNSS rušení výrazně vyšší. Další podstatnou limitací práce je poměrně vysoká nepřesnost v určení intenzity, která je zapotřebí k ovlivnění



provozu v okolí letiště. Tuto limitaci by bylo v následném zkoumání možné eliminovat použitím více detektorů rozmístěných v okolí letiště a jejich podrobnější kalibrací, za pomoci citlivých nástrojů pro měření intenzity signálu v daném místě, případně kalibrace detektorů v laboratorních podmínkách.



Seznam použité literatury

- [1] *RADIO NAVIGATION*. CAE Oxford Aviation Academy, 2016. ISBN 9781906202743.
- [2] VOSECKÝ, Slavomír. *Radionavigace (062 00 00 00): učební texty pro teoretickou přípravu dopravních pilotů dle předpisu JAR-FCL 1*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2011. ISBN 978-80-7204-764-2.
- [3] DOVIS, Fabio, ed. *GNSS Interference, Threats, and Countermeasures*. Norwood, MA, USA: Artech House, 2015. ISBN 978-1608078103.
- [4] GMV, ed. *CDMA FDMA Techniques*. ESA Navipedia [online]. [cit. 2024-05-01]. Dostupné z: https://gssc.esa.int/navipedia/index.php/CDMA_FDMA_Techniques
- [5] *INSIDE GNSS. GLONASS to Launch First New-Generation K2 Satellite Late This Year*. Online. Insidegnss.com. 2021. Dostupné z: <https://insidegnss.com/glonass-to-launch-first-new-generation-k2-satellite-late-this-year/>. [cit. 2024-05-01].
- [6] RIVERO DÍEZ, Víctor. *Spoofing and jamming over GNSS*. Online. Incibe.es. 2020. Dostupné z: <https://www.incibe.es/en/incibe-cert/blog/spoofing-and-jamming-over-gnss>. [cit. 2024-05-01]
- [7] *RTCA SC-159 DO-235B: Assessment of Radio Frequency Interference Relevant to the GNSS L1 FREQUENCY BAND*. RTCA, 2008.
- [8] *Satellite-derived Time and Position: A Study of Critical Dependencies*. Online. Gov.uk. 2018. Dostupné z: <https://assets.publishing.service.gov.uk/media/5a82c84ced915d74e34038ab/satellite-derived-time-and-position-blackett-review.pdf>. [cit. 2024-05-01].
- [9] *Obrázek rušičky*. Online. Mobilizujeme.cz. 2017. Dostupné z: <https://mobilizujeme.cz/clanky/do-rukou-se-nam-dostala-rusicka-signalu-jak-vlastne-funguje>. [cit. 2024-05-01].



- [10] MARNACH, Daniel, Sjouke MAUW a Miguel MARTINS. Detecting Meaconing Attacks by Analysing the Clock Bias of GNSS Receivers [online]. [cit. 2021-05-11]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/265008517_Detecting_Meaconing_Attacks_by_Analysing_the_Clock_Bias_of_Gnss_Receivers
- [11] BARTL, Sascha, Philipp BERGLEZ a Bernhard HOFMANN-WELLENHOF. GNSS interference detection, classification and localization using Software-Defined Radio. 2017 European Navigation Conference (ENC) [online]. IEEE, 2017, 2017, [cit. 2024-05-01]. DOI: 10.1109/EURONAV.2017.7954205. ISBN 978-1-5090-5922-5. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/7954205/>
- [12] CALCAGNO, R., S. FAZIO, S. SAVASTA a F. DOVIS. An interference detection algorithm for COTS GNSS receivers. 2010 5th ESA Workshop on Satellite Navigation Technologies and European Workshop on GNSS Signals and Signal Processing (NAVITEC) [online]. IEEE, 2010, 2010, [cit. 2024-05-01]. DOI:7910.1109/NAVITEC.2010.5708008. ISBN 978-1-4244-8740-0. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/5708008/>
- [13] DAI, Xinzhi, Junwei NIE, Baiyu LI, Zukun LU a Gang OU. Performance of GNSS receivers with AGC in noise pulse interference. In: 2016 5th International Conference on Computer Science and Network Technology (ICCSNT) [online]. IEEE, 2016, 2016, [cit. 2024-05-01]. DOI: 10.1109/ICCSNT.2016.8070255. ISBN 978-1-5090-2129-1. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/8070255/>
- [14] Jonas, P. and Vitan, V. (2019). Detection and localization of GNSS radio interference using ADS-B data. In 2019 International Conference on Military Technologies (ICMT). IEEE.
- [15] GNSS Vulnerability and Mitigation in Czech Republic. Online. Jamming.gnss-centre.cz. 2021. Dostupné z: <https://jamming.gnss-centre.cz/informace-o-projektu/>. [cit. 2024-05-01].
- [15] PATTINSON, Michael. GSS100D Web Portal Description. NSL, 2020.



- [16] Výpočty. Online. Český telekomunikační úřad. 2020. Dostupné z: <https://spektrum.ctu.gov.cz/vypocty/vzorce>. [cit. 2024-05-14].
- [17] PROCTOR, Andy G., Charles W.T. CURRY a kol. GAARDIAN: A system to detect GNSS jamming and Interference. In: Coordinates. [online]. 2012 [cit. 2024-05-01]. Dostupné z: <https://mycoordinates.org/gaardian-a-system-to-detect-gnss-jamming-and-interference/>
- [18] K. Jansen, M. Schäfer, D. Moser, V. Lenders, C. Pöpper and J. Schmitt, "Crowd-GPS-Sec: Leveraging Crowdsourcing to Detect and Localize GPS Spoofing Attacks," 2018 IEEE Symposium on Security and Privacy (SP), San Francisco, CA, USA, 2018, pp. 1018-1031, doi: 10.1109/SP.2018.00012.
- [19] RTCA (2009). Minimum Operational Performance Standards for 1090 MHz Extended Squitter Automatic Dependent Surveillance Broadcast (ADS-B) and Traffic Information Services Broadcast (TIS-B). RTCA.
- [20] RODRIGUEZ, Alejandr. Differences of ADS-B Version 0, 1, and 2. Online. Icao.int. 2018. Dostupné z: <https://www.icao.int/NACC/Documents/Meetings/2018/ADSB/P01-FAA-Agendaltem3.pdf>. [cit. 2024-05-01].
- [21] Automatic dependent surveillance - broadcast airborne equipage monitoring. Online. Eurocontrol.int. 2024. Dostupné z: <https://www.eurocontrol.int/service/adsb-equipage>. [cit. 2024-05-01].
- [22] NM Area. Online. In: Nm.eurocontrol.int. 2024. Dostupné z: https://www.nm.eurocontrol.int/STATIC/NM_AREA/imports/ATFM_AREAS.JPG. [cit. 2024-05-01].
- [23] ARBUCKLE, Doug. Future ADS-B Applications. Online. Icao.int. 2021. Dostupné z: <https://www.icao.int/NACC/Documents/Meetings/2021/ADSB/P05-FutureADS-B-ENG.pdf>. [cit. 2024-05-01].
- [24] LETECKÝ PŘEDPIS O CIVILNÍ LETECKÉ TELEKOMUNIKAČNÍ SLUŽBĚ SVAZEK III - KOMUNIKAČNÍ SYSTÉMY: L 10/III. In: . 2003.



- [25] PARAMETERS TO MONITOR THE PERFORMANCE OF ADS-B SYSTEMS. Online. INTERNATIONAL CIVIL AVIATION ORGANIZATION. 2022. Dostupné z:
<https://www.icao.int/NACC/Documents/Meetings/2023/ECARNTG12/ECARRD10-03.pdf>. [cit. 2024-05-13].
- [26] Liu, Z., Lo, S., Walter, T., and Blanch, J. (2022b). Real-time detection and localization of GNSS interference source. In ION GNSS, The International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation. Institute of Navigation.
- [27] Liu, Z., Lo, S., and Walter, T. (2022a). GNSS interference source localization using ADS-b data. In The International Technical Meeting of the The Institute of Navigation. Institute of Navigation.
- [28] Liu, Z., Lo, S., and Walter, T. (2020). Characterization of ADS-b performance under GNSS interference. In Proceedings of the 33rd International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation (ION GNSS 2020). Institute of Navigation.
- [29] Liu, Z., Lo, S., and Walter, T. (2021). GNSS interference detection using machine learning algorithms on ADS-b data. In Proceedings of the 34th International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation (ION GNSS 2021). Institute of Navigation.
- [30] Matejovie, M., Hospodka, J., Pleninger, S., Lukes, P., and Pilmannova, T. (2022). Utilization of correlation between NACp and NIC parameters for GNSS jamming detection. In 2022 New Trends in Civil Aviation (NTCA). IEEE.
- [31] PLENINGER, S; TOPKOVA, T a STEINER, J. GNSS RFI Detection Using Comparison of Calculated HDOP Value With ADS-B NACp Indicator. The Aeronautical Journal. (preprint)
- [32] STEINER, J a NAGY, I. Discrete mathematical model for GNSS interference detection using ADS-B quality parameters. Czech Technical University in Prague, 2023.



- [33] *Měření vybraných technických parametrů VRZ – rušiče signálů GPS, GSM, IMTS a RLAN - typ TG5CA: Zpráva ČTU č. 1304-394-00*, květen 2013.
- [34] LUKEŠ, Petr. *ADS-B Decoding*. Online. Gitlab. 2019. Dostupné z: https://gitlab.com/plukes/adsb_decoding. [cit. 2024-05-14].
- [35] Opensky Network. Online. 2024. Dostupné z: <https://opensky-network.org>. [cit. 2024-05-14].
- [36] FlightRadar24. Online. 2024. Dostupné z: <https://www.flightradar24.com>. [cit. 2024-05-14].
- [37] ADS-B Exchange. Online. 2024. Dostupné z: <https://adsbexchange.com>. [cit. 2024-05-14].



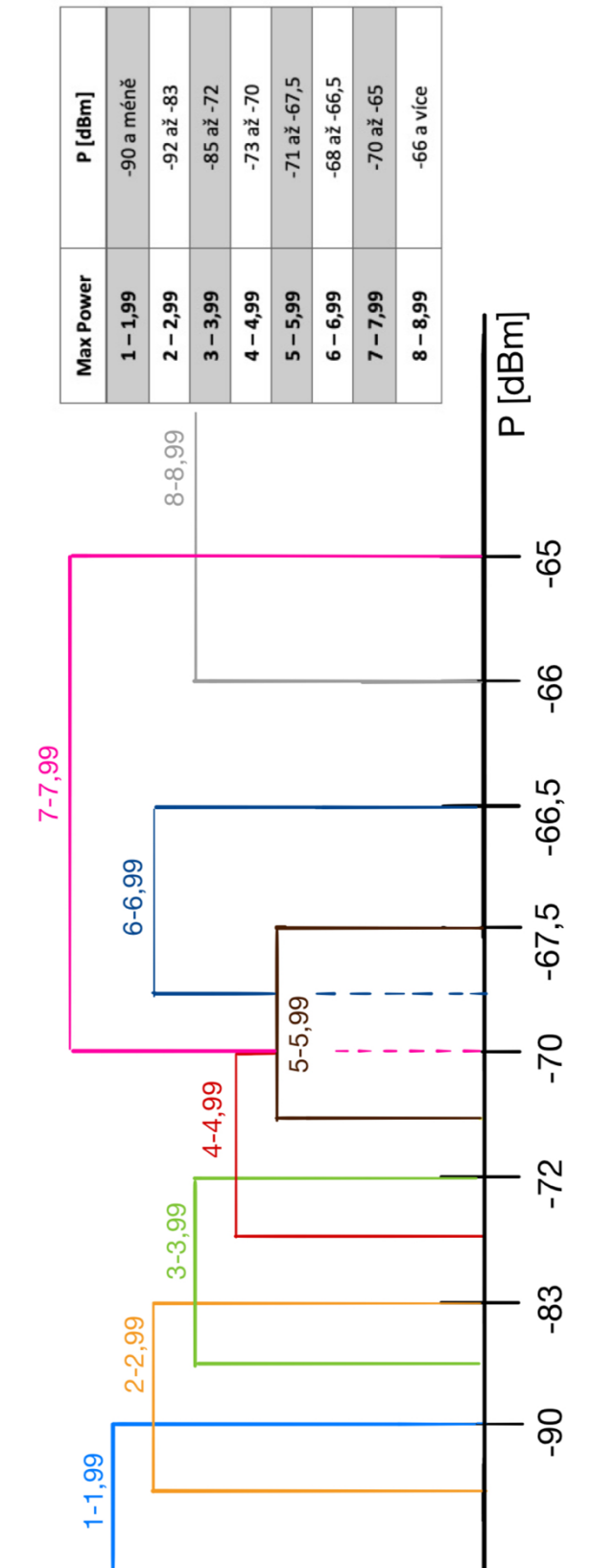
Přílohy

Příloha 1 – Grafické zpracování převodní tabulky z Kapitoly 3.3.....	76
Příloha 2 – Tabulka reportů zaznamenaných případů rušení	77
Příloha 3 – Report zaznamenané události 10/04/2021	78
Příloha 4 – Report zaznamenané události 14/04/2021	79
Příloha 5 – Report zaznamenané události 07/05/2021	80
Příloha 6 – Report zaznamenané události 18/05/2021	81
Příloha 7 – Report zaznamenané události 09/06/2021	83
Příloha 8 – Report zaznamenané události 11/06/2021	84
Příloha 9 – Report zaznamenané události 12/06/2021	85
Příloha 10 – Report zaznamenané události 16/06/2021	87
Příloha 11 – Report zaznamenané události 06/07/2021	88
Příloha 12 – Report zaznamenané události 15/07/2021 (a).....	89
Příloha 13 – Report zaznamenané události 15/07/2021 (b).....	90
Příloha 14 – Report zaznamenané události 18/07/2021	91
Příloha 15– Report zaznamenané události 26/07/2021	92
Příloha 16 – Report zaznamenané události 12/08/2021	94
Příloha 17 – Report zaznamenané události 28/08/2021	95
Příloha 18 – Report zaznamenané události 09/09/2021	98
Příloha 19 – Report zaznamenané události 17/09/2021	100
Příloha 20 – Report zaznamenané události 18/09/2021	101
Příloha 21 – Report zaznamenané události 21/09/2021	102
Příloha 22 – Report zaznamenané události 29/09/2021	103
Příloha 23 – Report zaznamenané události 02/10/2021	104
Příloha 24 – Report zaznamenané události 07/10/2021	105
Příloha 25 – Report zaznamenané události 15/10/2021	107
Příloha 26 – Report zaznamenané události 19/10/2021 (a).....	108
Příloha 27 – Report zaznamenané události 19/10/2021 (b).....	109
Příloha 28 – Report zaznamenané události 12/11/2021	110
Příloha 29 – Report zaznamenané události 12/12/2021	112
Příloha 30 – Report zaznamenané události 05/01/2022	113



Příloha 31 – Report zaznamenané události 15/01/2022	115
Příloha 32 – Report zaznamenané události 02/02/2022	117
Příloha 33 – Report zaznamenané události 07/02/2022 (a).....	119
Příloha 34 – Report zaznamenané události 07/02/2022 (b).....	120
Příloha 35 – Report zaznamenané události 08/02/2022	121
Příloha 36 – Report zaznamenané události 13/02/2022	122
Příloha 37 – Report zaznamenané události 07/03/2022	123
Příloha 38 – Report zaznamenané události 08/03/2022	125
Příloha 39 – Report zaznamenané události 20/03/2022	126
Příloha 40 – Trend vývoje počtu pohybů v rámci CTR LKPR v letech 2019 – 2024	127

Příloha 1 – Grafické zpracování převodní tabulky z Kapitoly 3.3



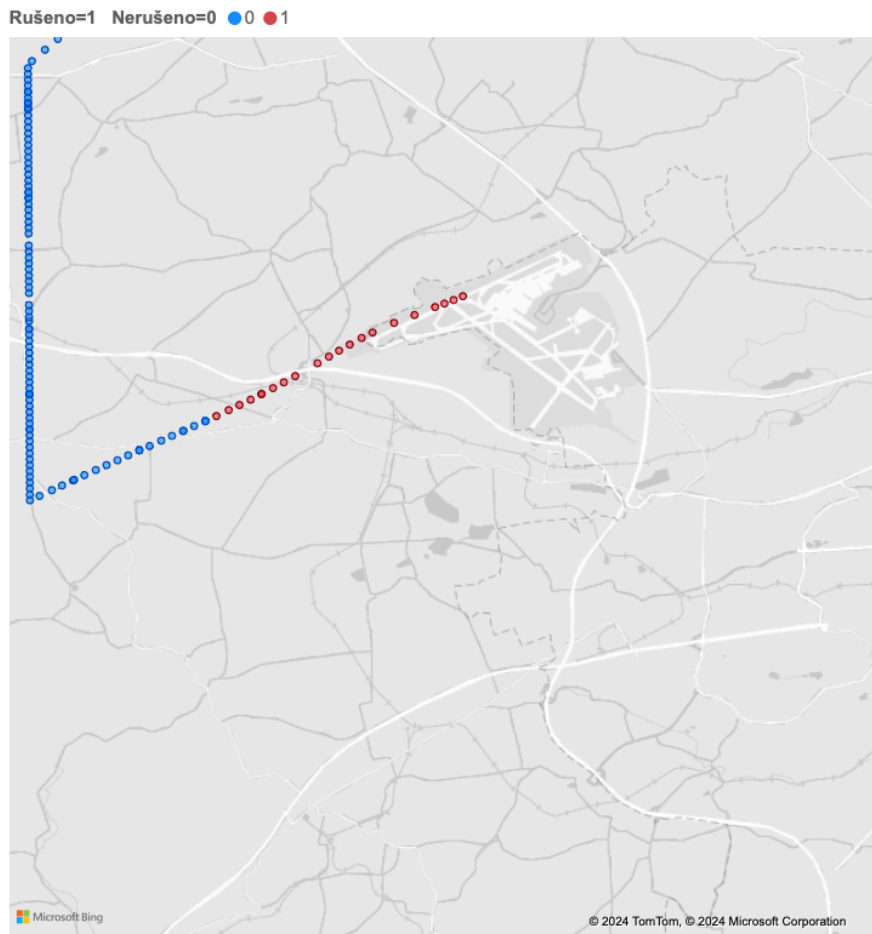


Příloha 2 – Tabulka reportů zaznamenaných případů rušení

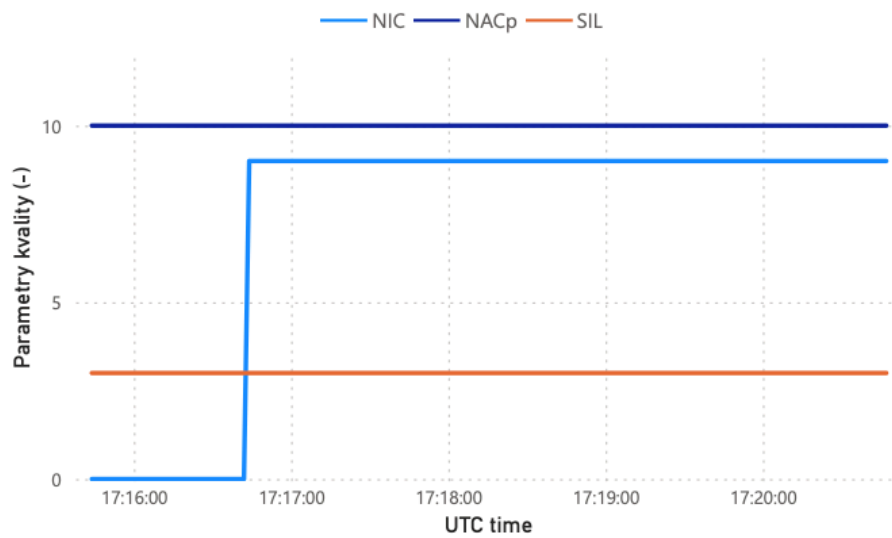
Výstupy z ADS-B dat										Výstupy z detektoru			Údaje o letu			
Datum	Rušeno od	Rušeno do	ADDR	NIC	NACP	SIL	Příloha č.	Priority	Rušeno od	Trvání (sec.)	Event ID	Max Power (L)	Intenzita P (dBm)	Fáze letu	Typ	Letadlo
10.04.2021	17:15:44	17:16:44	ad0aff		0	10	3	Příloha 3						Odlet	RV4	Van's RV-4
14.04.2021	18:49:29	18:50:25	642389		0	10	3	Příloha 4						Odlet	N/A	N/A
07.05.2021	15:12:13	15:13:03	44c178		0	10	3	Příloha 5	HIGH	8:44:41	32	prb04919052021084441000	6,21	-68 až -66,5	C750	Cesna 750 Citation X
18.05.2021	8:52:06	8:52:21	491885		0	0	0	Příloha 6						Přilét	GLEX	Bombardier Global 6000
09.06.2021	10:48:15	10:49:33	498b21		4	8	3	Příloha 7						Odlet	EC35	Airbus Helicopters EC135/635
11.06.2021	12:13:27	12:13:38	49d371		8	0	0	Příloha 8						Odlet	BE40	Hawker Beechcraft 400XP
12.06.2021	15:19:31	15:22:37	48a00b		0	10	3	Příloha 9	HIGH	15:29:33	44	prb049120620211152933000	3,91	-85 až -72	E755	Embraer E175LR
16.06.2021	11:27:49	11:29:07	498b30		0	10	3	Příloha 10						Odlet	B412	Bell 412EP
06.07.2021	12:54:29	12:54:42	49c1b2		0	0	0	Příloha 11						Přilét	NG5	BRM Aero Bristol NG-5 Speed Wing
15.07.2021	17:30:13	17:30:23	49d492		1	3	0	Příloha 12						Přilét	C152	Cesna 152
15.07.2021	15:09:20	15:09:34	3e4d65		6	0	0	Příloha 13						Přilét	CR19	Mitsubishi CRJ-900LR
18.07.2021	13:46:30	13:46:56	49d371		8	0	0	Příloha 14						Přilét	BE40	Hawker Beechcraft 400XP
26.07.2021	15:11:37	15:13:47	3e4d48		7	0	0	Příloha 15	HIGH	15:47:11	10	prb04926072021154711000	2,09	-92 až -83	CR19	Mitsubishi CRJ-900LR
12.08.2021	13:33:19	13:36:31	49c1b2		0	0	0	Příloha 16						Holding 2000ft	NG5	BRM Aero Bristol NG-5 Speed Wing
28.08.2021	14:55:57	15:00:22	48978a		0	10	3	Příloha 17	Very Low	15:17:43	10	prb04928082021151743000	1,93	-90 a méně	E170	Embraer E170STD
09.09.2021	6:07:23	6:14:59	3e4d66		0	9	3	Příloha 18	Low	6:07:36	10	prb04909092021060736000	2,04	-92 až -83	CR19	Mitsubishi CRJ-900LR
17.09.2021	11:32:15	11:32:39	3e4d41		7	3	0	Příloha 19						Odlet	CR19	Mitsubishi CRJ-900LR
18.09.2021	11:28:34	11:32:00	3e4d4c		8	0	0	Příloha 20						Odlet	CR19	Mitsubishi CRJ-900LR
21.09.2021	8:56:11	8:56:31	4892c1		0	0	0	Příloha 21						Přilét	B38M	Boeing 737 MAX 8
29.09.2021	6:48:27	6:48:43	3e4d4c		8	0	0	Příloha 22						Přilét	CR19	Mitsubishi CRJ-900LR
02.10.2021	16:17:58	16:18:03	49c1b2		0	0	0	Příloha 23						Přilét	CR19	Mitsubishi CRJ-900LR
07.10.2021	7:46:06	7:46:32	49d10f		0	0	3	Příloha 24	Low	7:25:18	12	prb04907102021072518000	2,27	-92 až -83	NG5	BRM Aero Bristol NG-5 Speed Wing
15.10.2021	6:12:43	6:13:50	49d313		0	10	3	Příloha 25						Odlet	C510	Cesna 510 Citation Mustang
19.10.2021	9:09:06	9:10:26	49d313		0	10	3	Příloha 26						Odlet	C510	Cesna 510 Citation Mustang
19.10.2021	7:51:10	7:51:19	3e4d48		8	0	0	Příloha 27						Odlet	CR19	Mitsubishi CRJ-900LR
12.11.2021	16:32:48	16:33:45	49d10f		0	10	3	Příloha 28	HIGH	16:37:59	20	prb04912112021163759000	3,9	-85 až -72	C510	Cesna 510 Citation Mustang
12.12.2021	19:54:13	19:54:35	440195		0	0	0	Příloha 29						Odlet	A320	Airbus A320-214
05.01.2022	12:51:12	12:52:35	4c0739		0	10	3	Příloha 30	Low	12:33:51	16	prb04905012021212351000	2,33	-92 až -83	C558	Cesna 550 Citation Bravo
15.01.2022	11:52:49	11:53:49	49d38f		0	10	3	Příloha 31	Very Low	12:22:53	12	prb0491501202122235000	1,74	-90 a méně	E50P	Embraer Phenom 100
02.02.2022	14:03:50	14:05:45	49d0c3		0	8	2	Příloha 32	Very Low	14:26:59	10	prb0490202202142659000	1,82	-90 a méně	BC53	Airbus A220-300
07.02.2022	17:46:06	17:46:39	4b17fc		8	0	0	Příloha 33						Přilét	CR19	Mitsubishi CRJ-900LR
07.02.2022	5:57:12	5:57:30	3e4d69		8	0	0	Příloha 34						Odlet	SR22	Cirrus SR22
08.02.2022	10:30:38	10:32:42	49d367		0	10	3	Příloha 35						Odlet	A320	Airbus A320-232
13.02.2022	11:26:27	11:26:31	06a089		8	0	3	Příloha 36						Přilét	H60	Sikorsky UH-60M Black Hawk
07.03.2022	11:21:06	11:23:22	ae5d33		0	0	3	Příloha 37	High	11:42:07	44	prb0490703202114207000	3,95	-85 až -72	A320	Airbus A320-232
08.03.2022	8:59:14	8:59:18	405457		6	6	3	Příloha 38						Přilét	A320	Airbus A320-232
20.03.2022	17:29:52	17:29:56	440418		8	7	3	Příloha 39						Odlet	A319	Airbus A319-132

Příloha 3 – Report zaznamenané události 10/04/2021

Trajektorie zarušeného letu



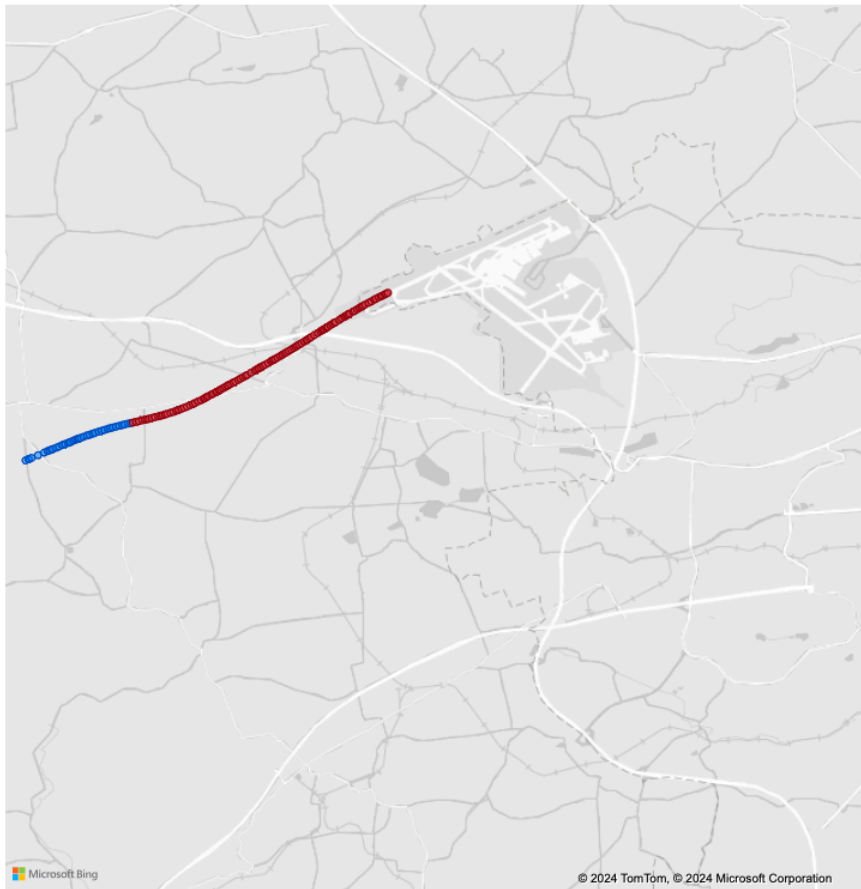
Průběh hodnot parametrů kvality v čase



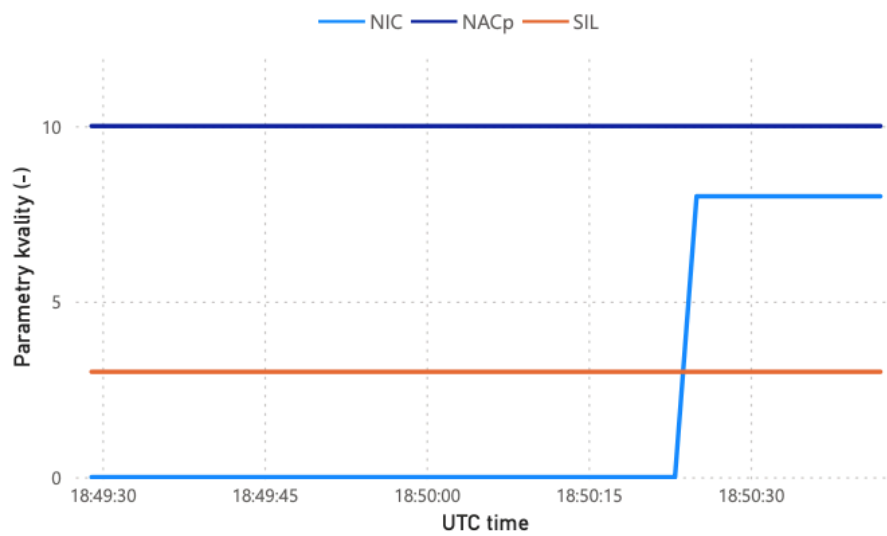
Příloha 4 – Report zaznamenané události 14/04/2021

Trajektorie zarušeného letu

Rušeno=1 Nerušeno=0 ● 0 ● 1



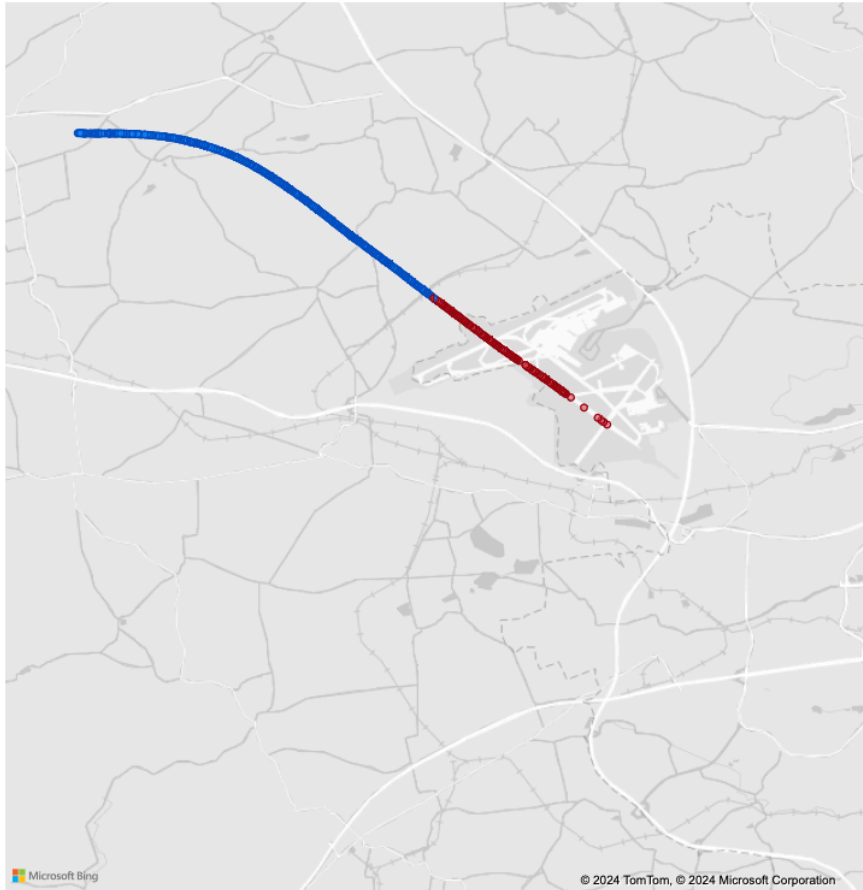
Průběh hodnot parametrů kvality v čase



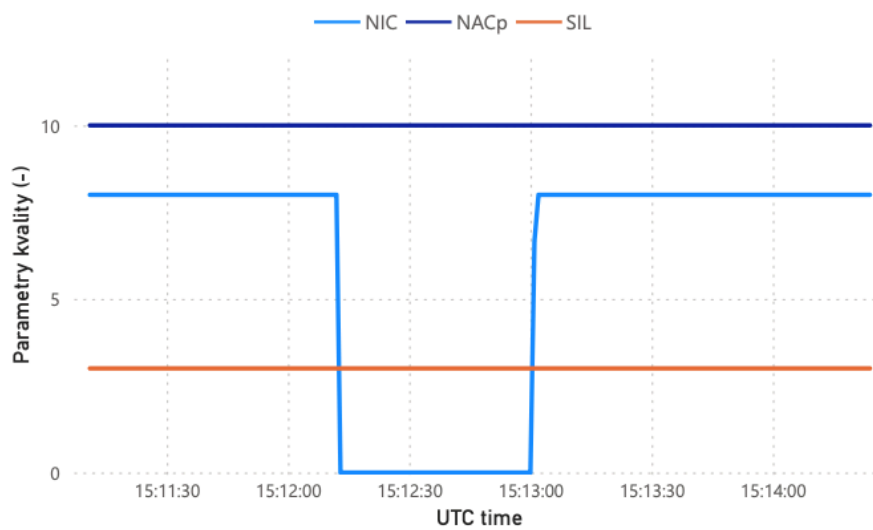
Příloha 5 – Report zaznamenané události 07/05/2021

Trajektorie zarušeného letu

Rušeno=1 Nerušeno=0 ● 0 ● 1



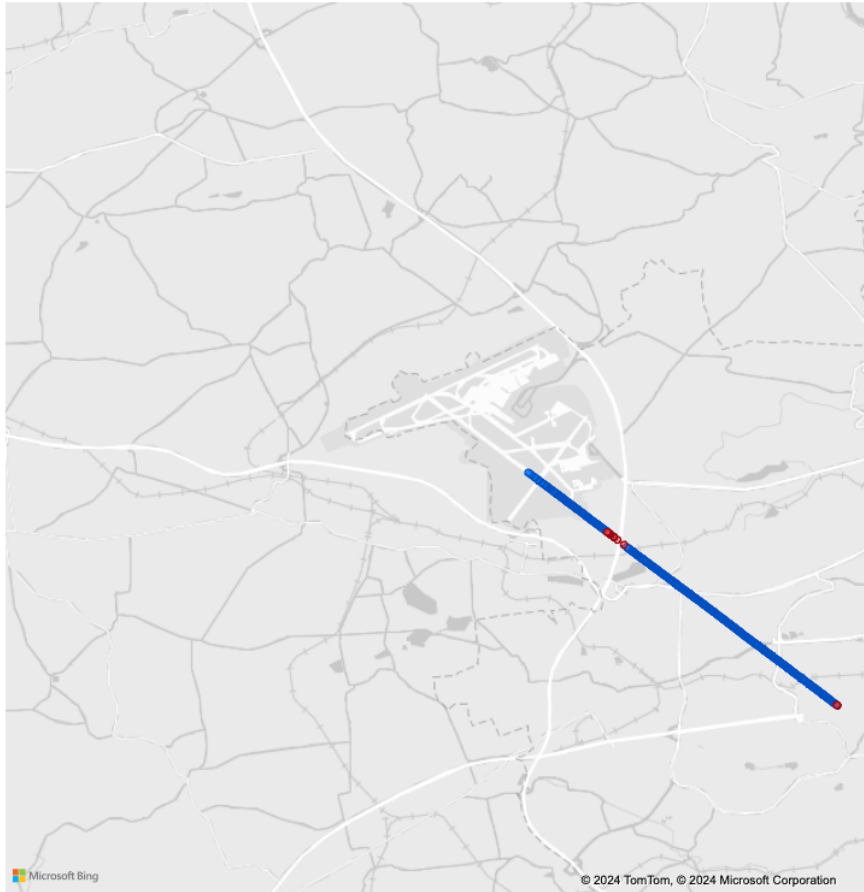
Průběh hodnot parametrů kvality v čase



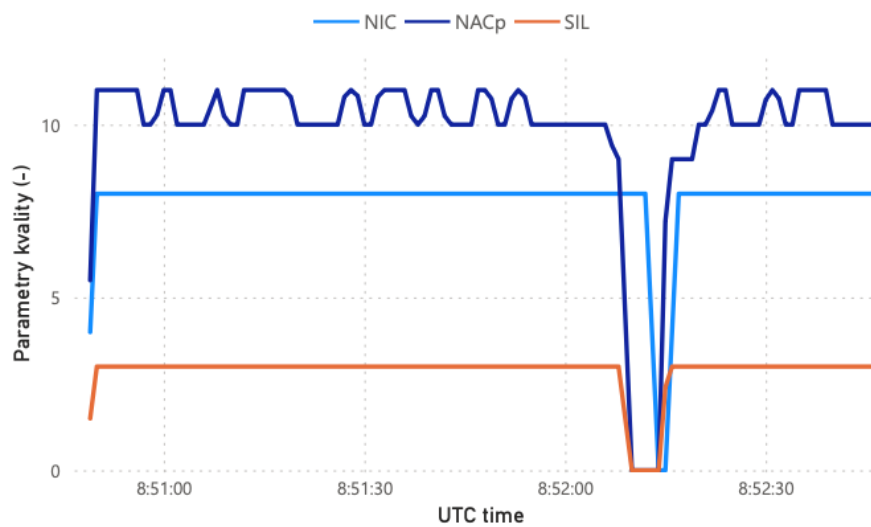
Příloha 6 – Report zaznamenané události 18/05/2021

Trajektorie zarušeného letu

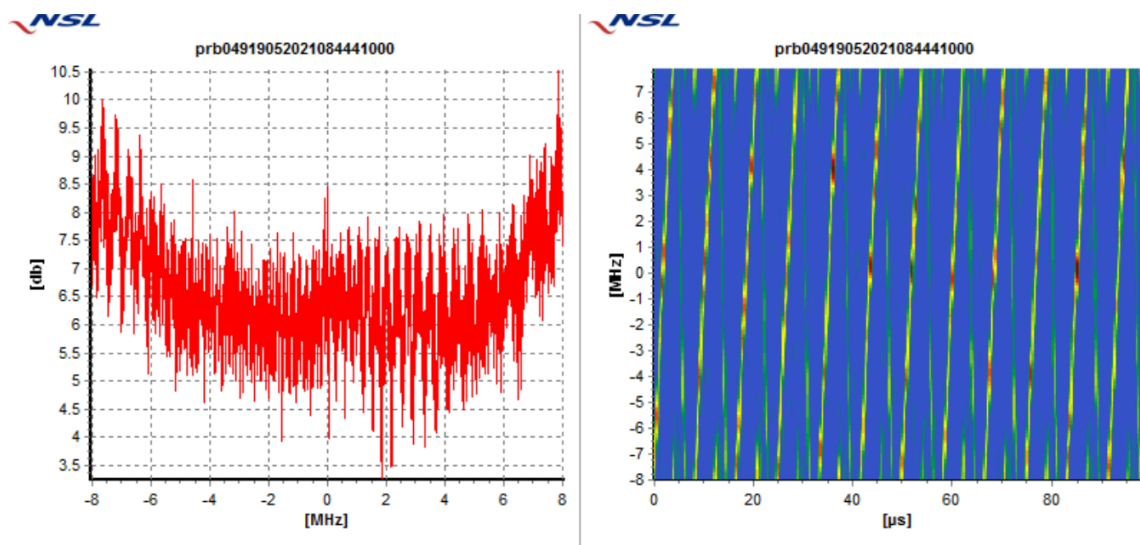
Rušeno=1 Nerušeno=0 ● 0 ● 1



Průběh hodnot parametrů kvality v čase



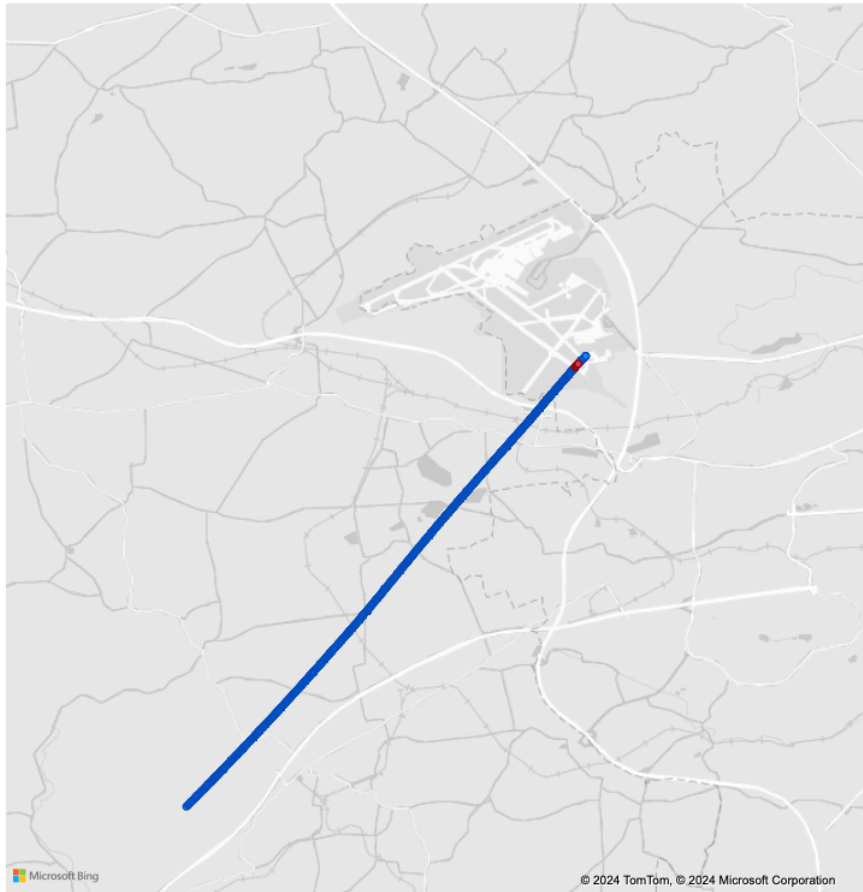
Grafický výstup z detektoru NSL GSS100D korespondující události GNSS rušení
(18/05/2021)



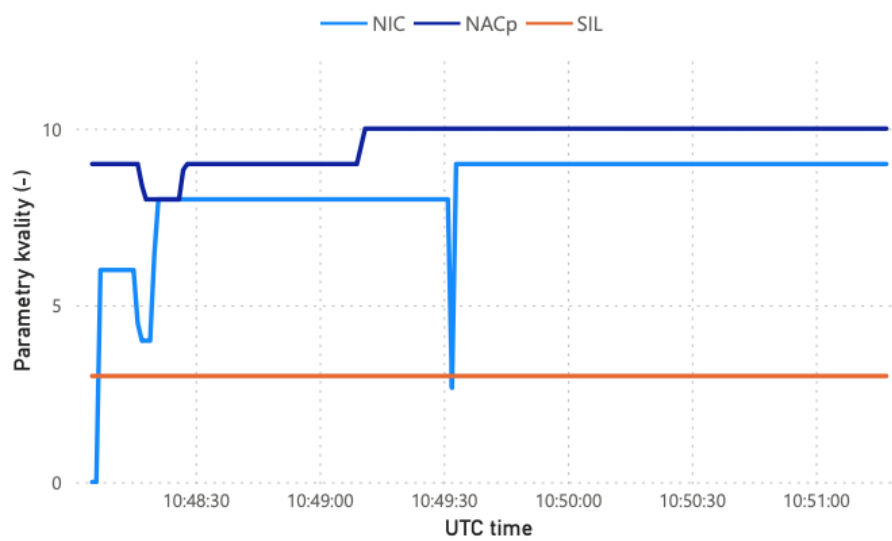
Příloha 7 – Report zaznamenané události 09/06/2021

Trajektorie zarušeného letu

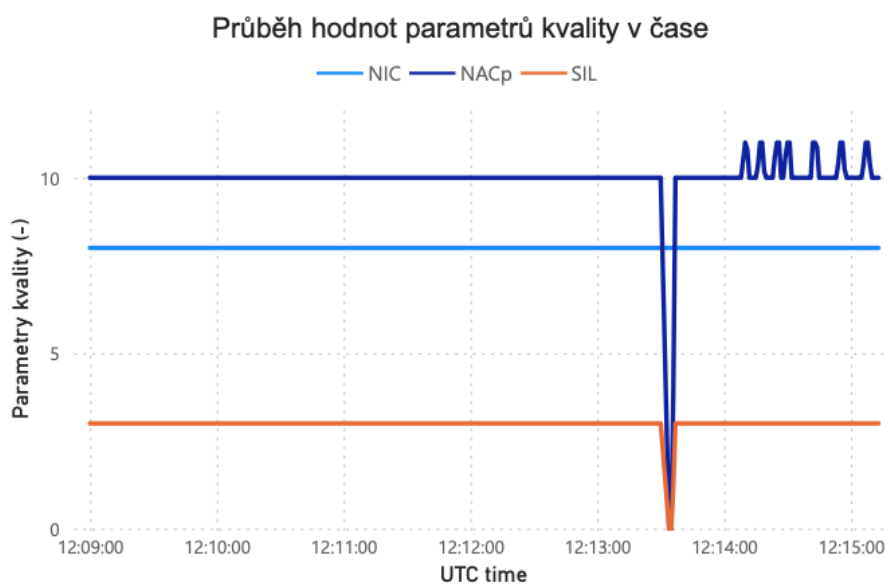
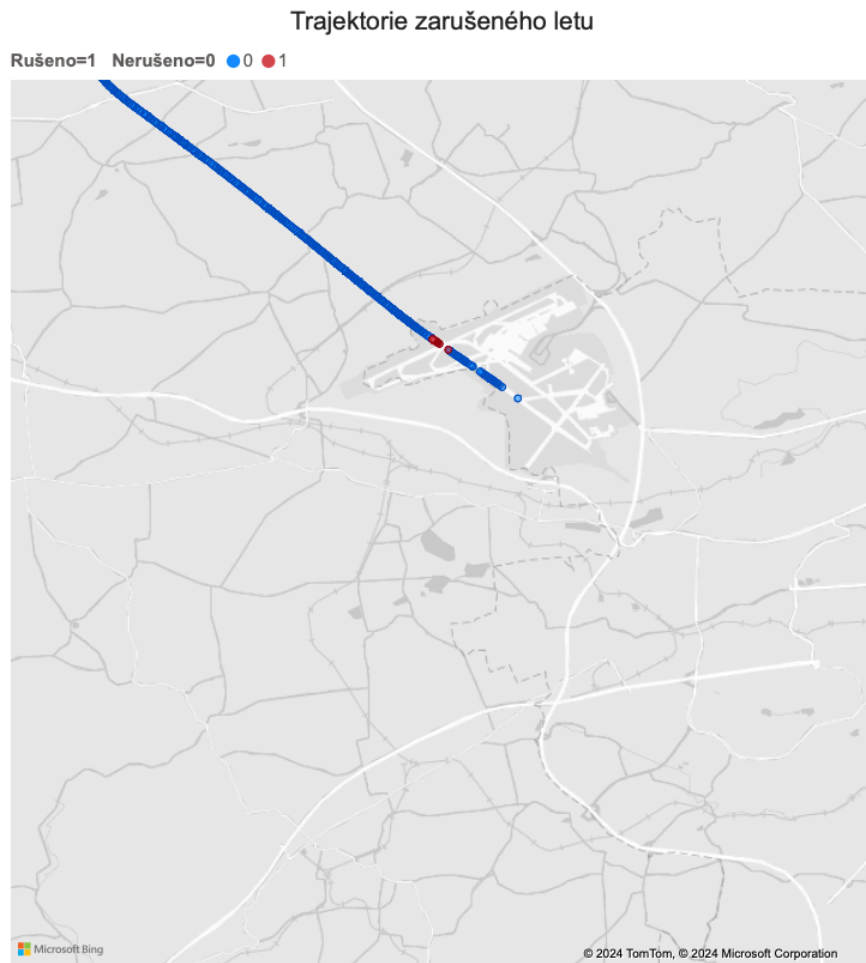
Rušeno=1 Nerušeno=0 ● 0 ● 1



Průběh hodnot parametrů kvality v čase



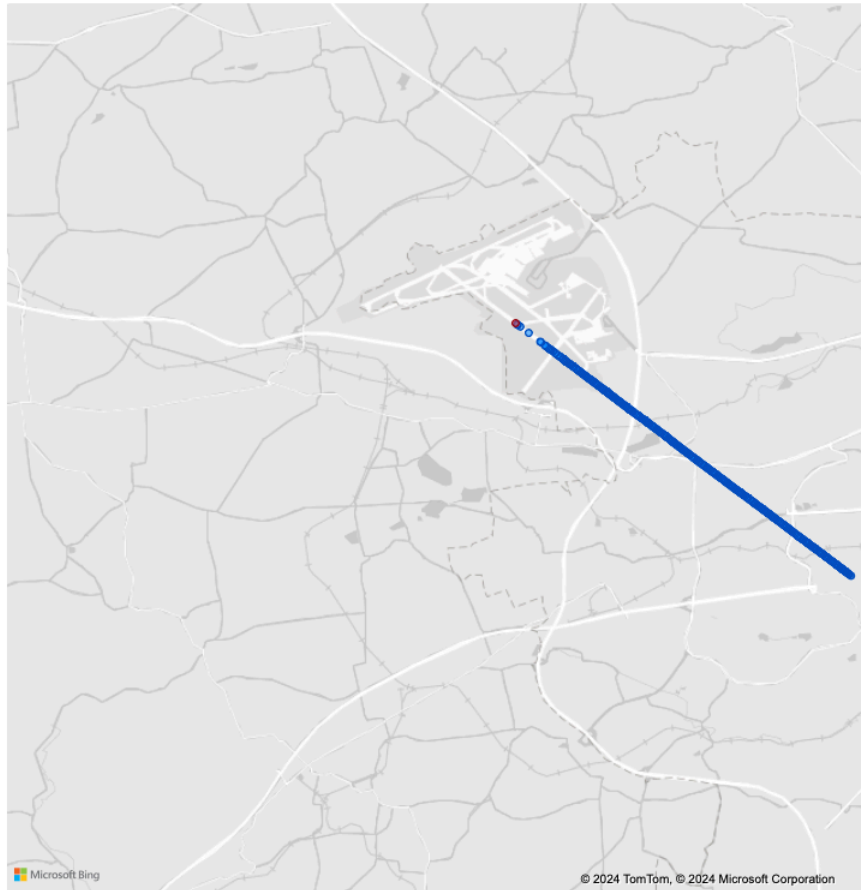
Příloha 8 – Report zaznamenané události 11/06/2021



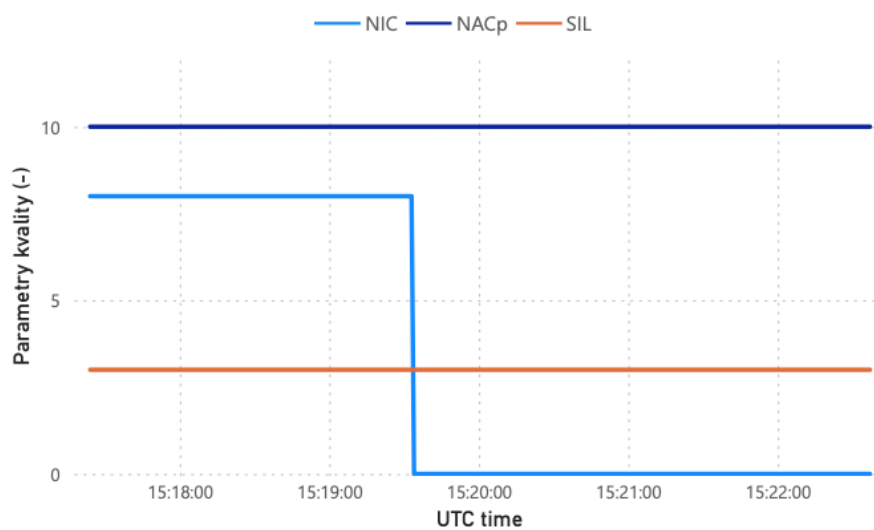
Příloha 9 – Report zaznamenané události 12/06/2021

Trajektorie zarušeného letu

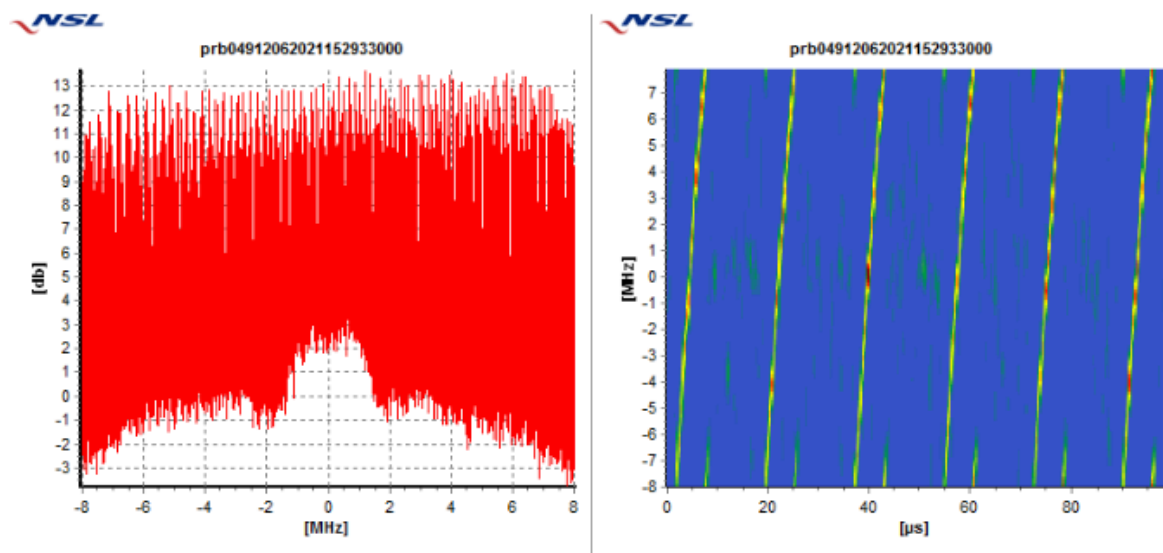
Rušeno=1 Nerušeno=0 ● 0 ● 1



Průběh hodnot parametrů kvality v čase



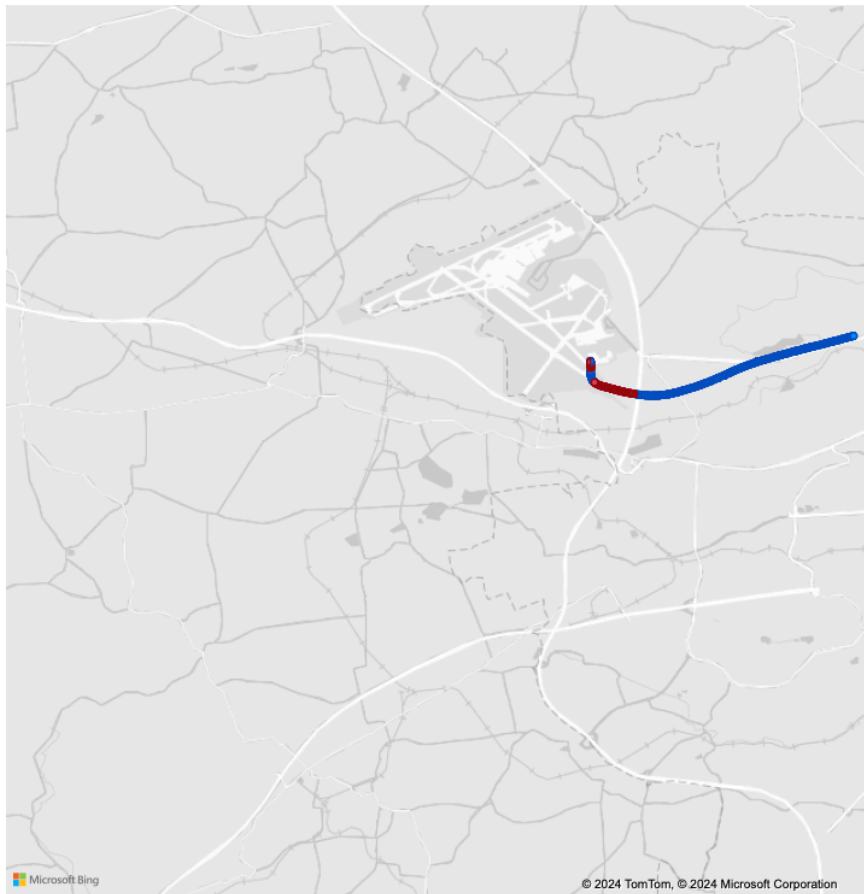
Grafický výstup z detektoru NSL GSS100D korespondující události GNSS rušení
(12/06/2021)



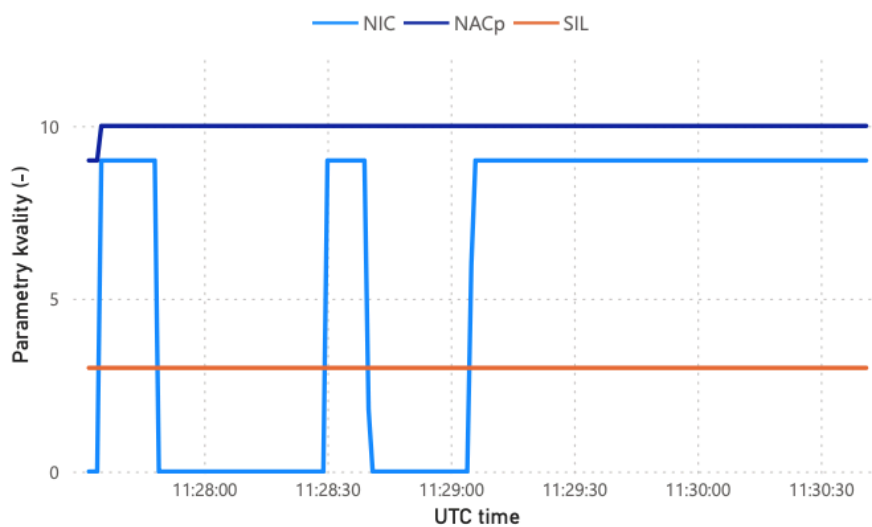
Příloha 10 – Report zaznamenané události 16/06/2021

Trajektorie zarušeného letu

Rušeno=1 Nerušeno=0 ● 0 ● 1

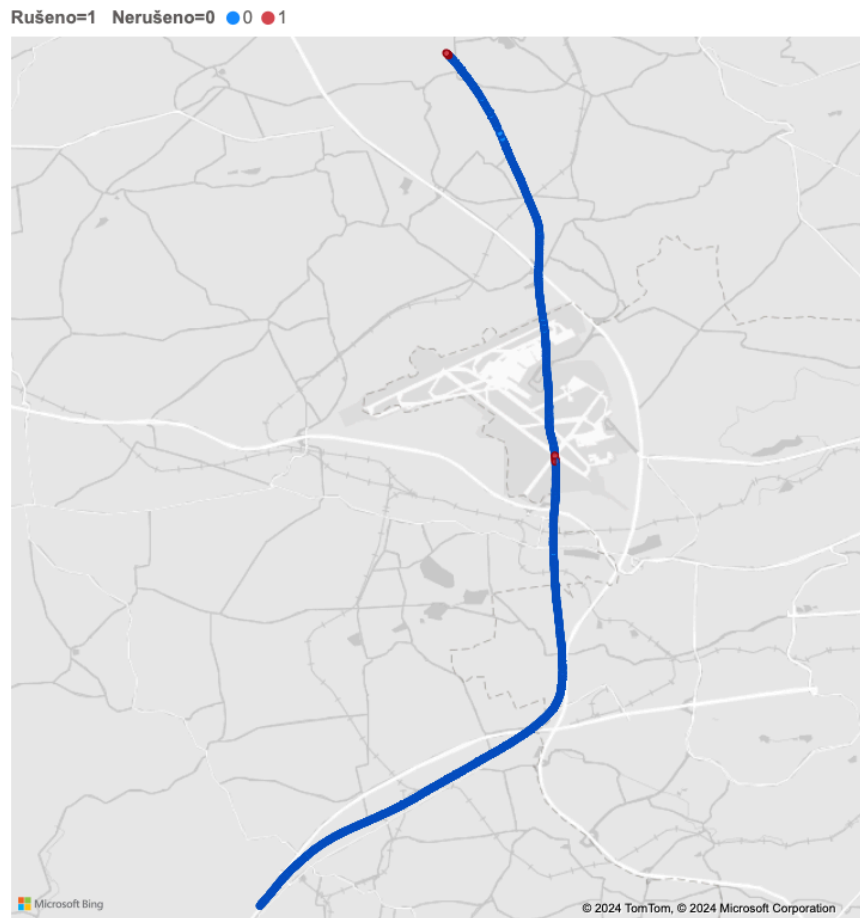


Průběh hodnot parametrů kvality v čase

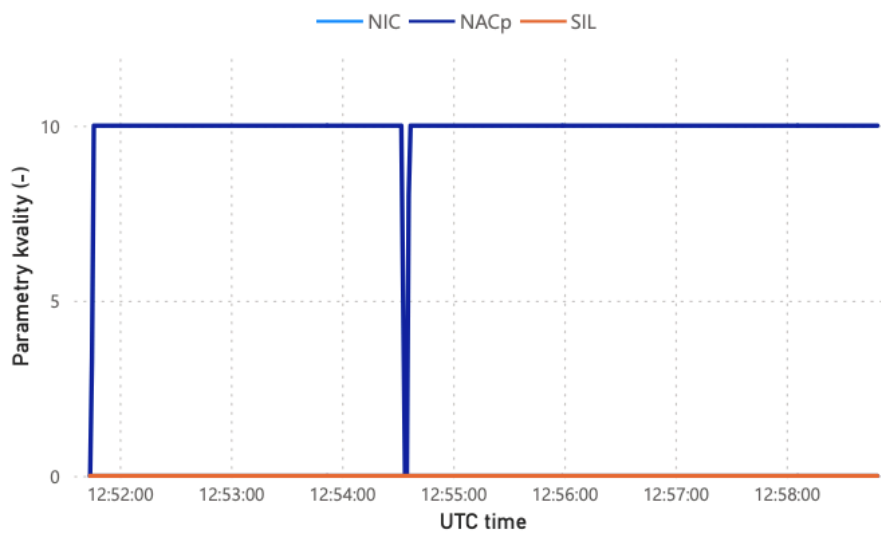


Příloha 11 – Report zaznamenané události 06/07/2021

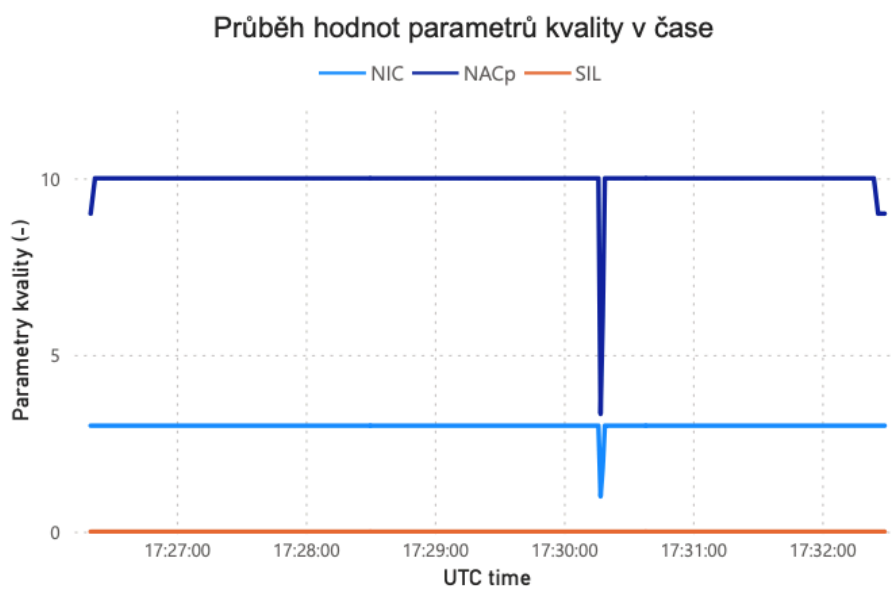
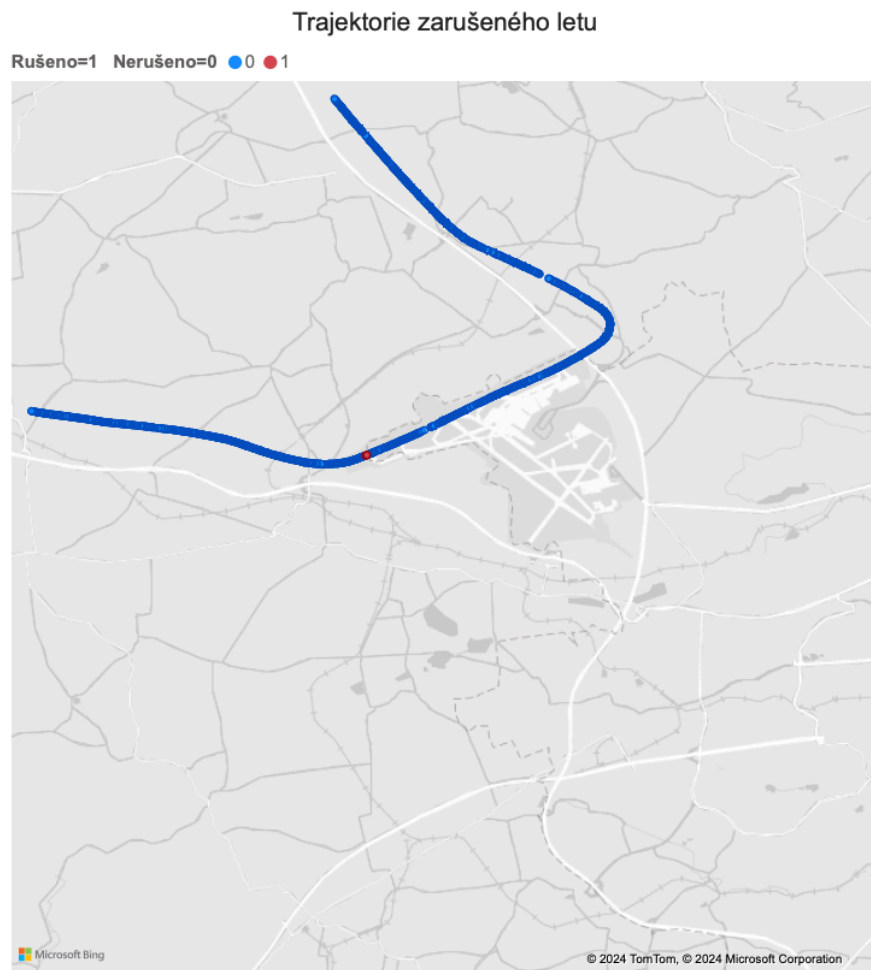
Trajektorie zarušeného letu



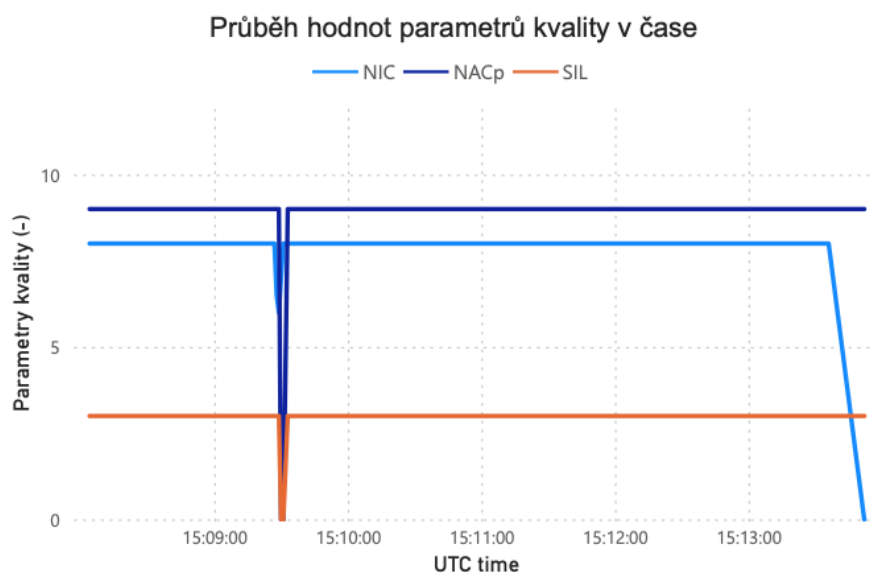
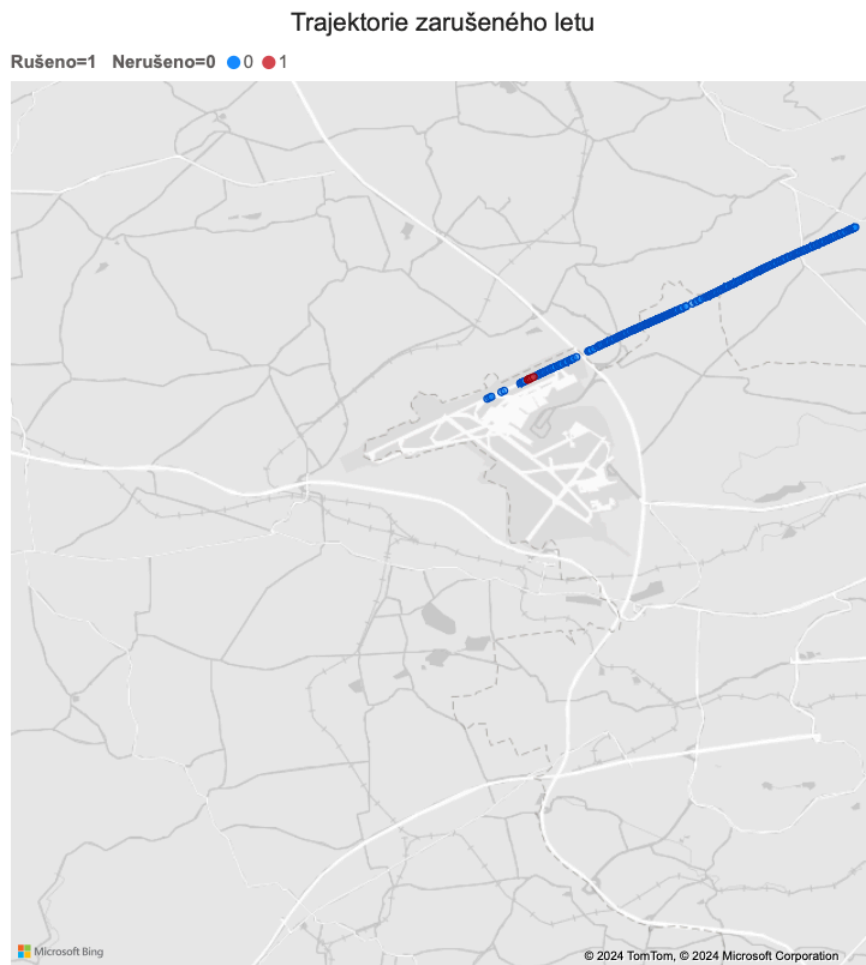
Průběh hodnot parametrů kvality v čase



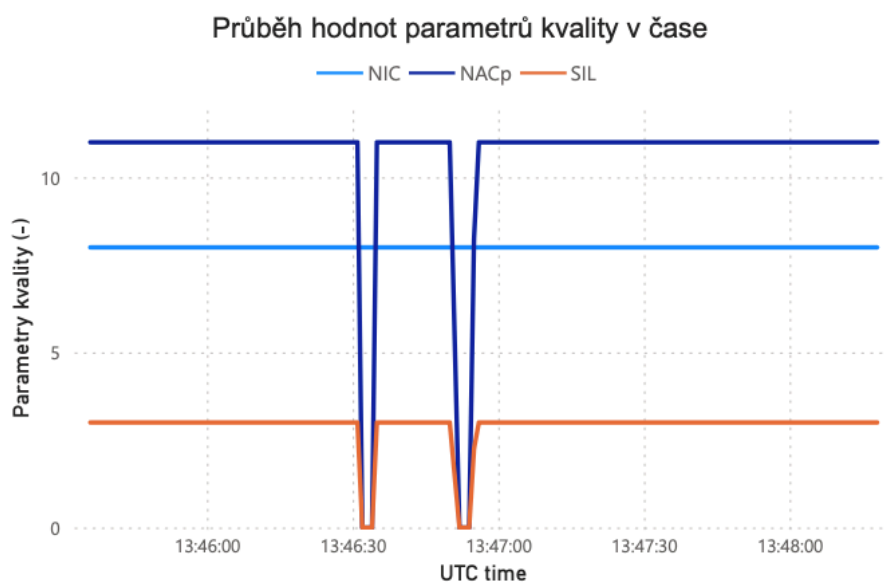
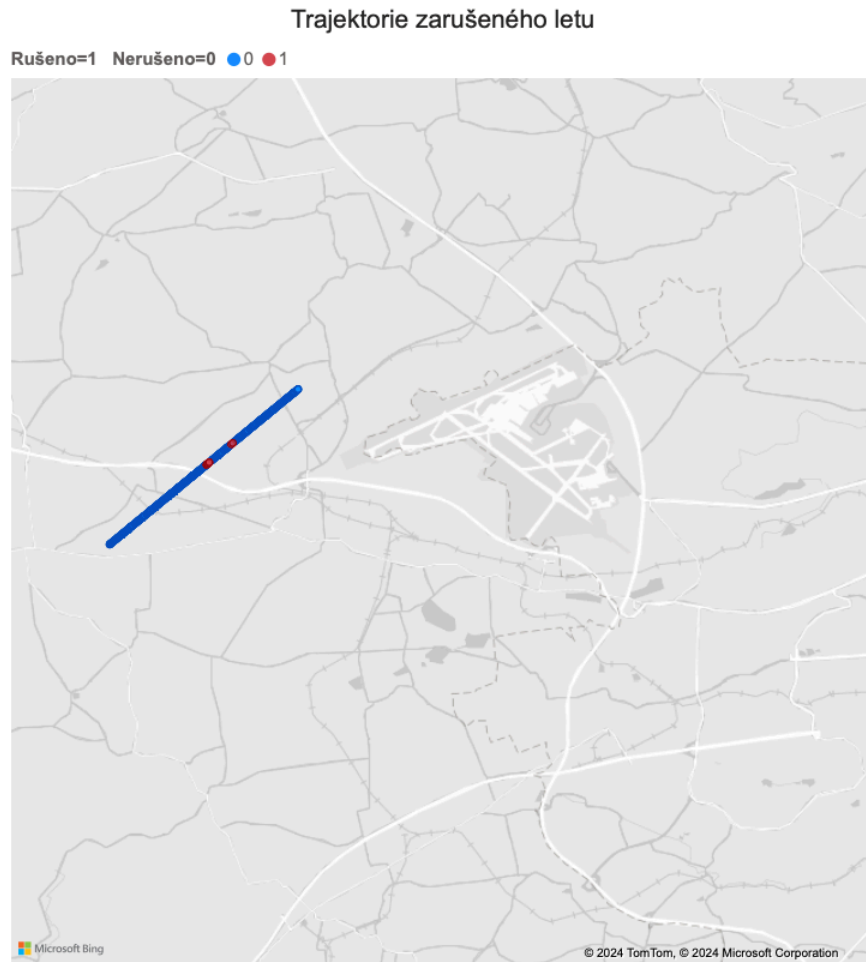
Příloha 12 – Report zaznamenané události 15/07/2021 (a)



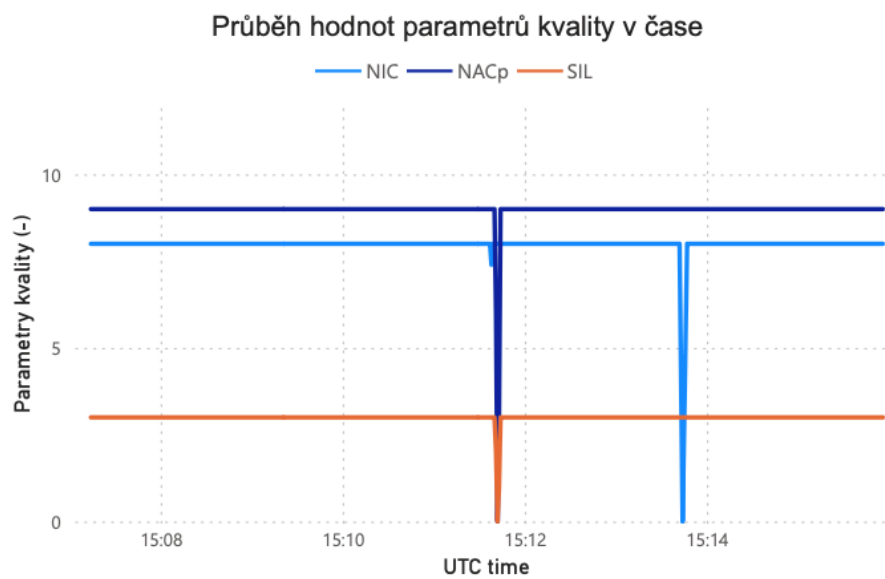
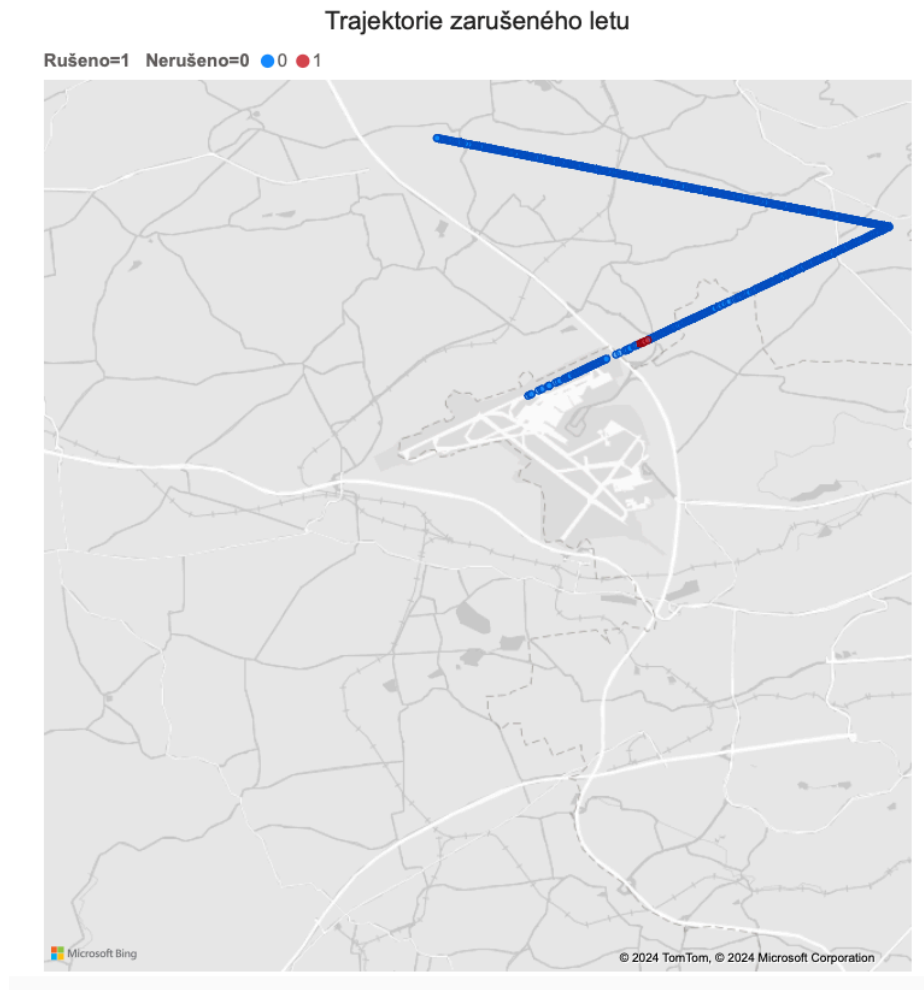
Příloha 13 – Report zaznamenané události 15/07/2021 (b)



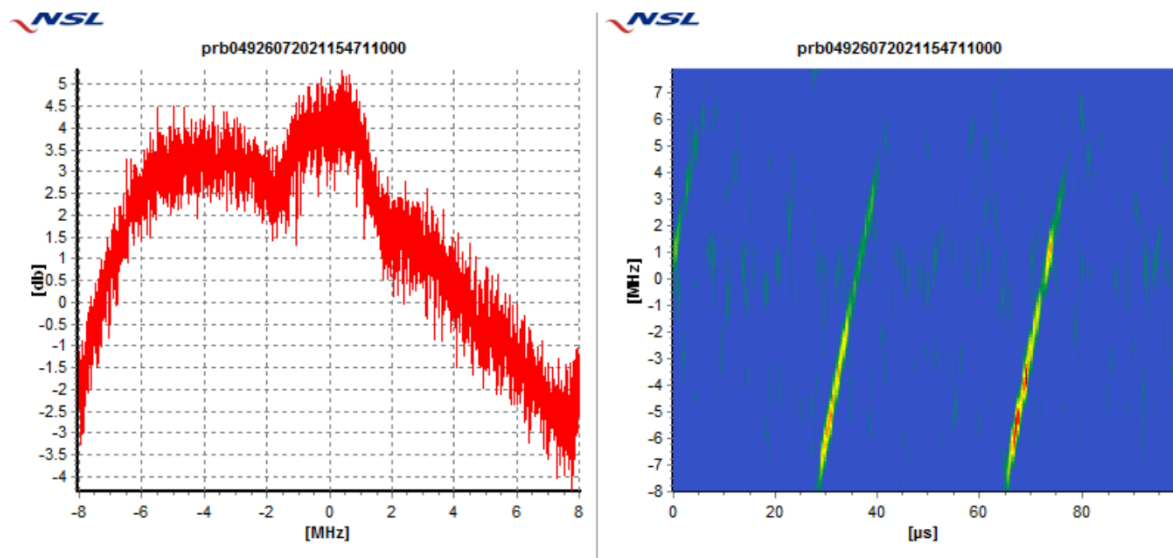
Příloha 14 – Report zaznamenané události 18/07/2021



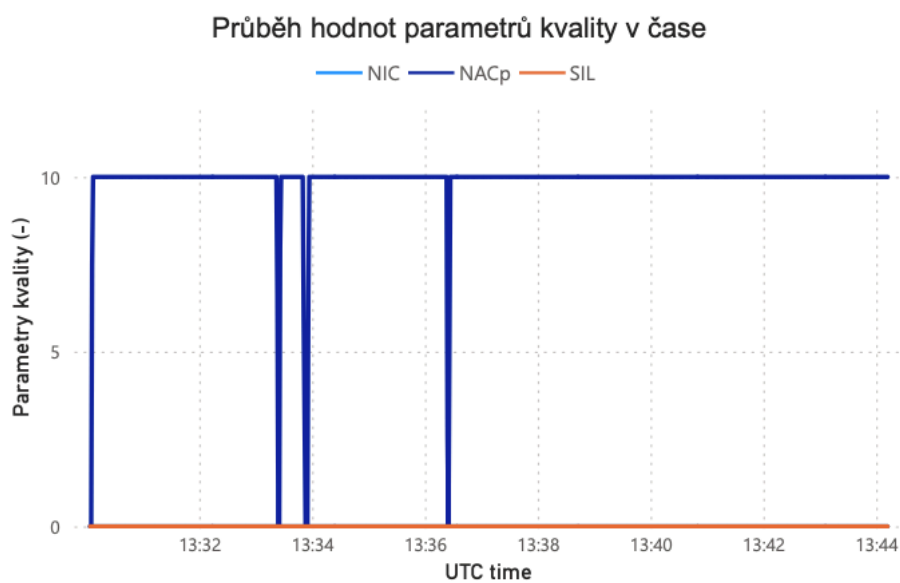
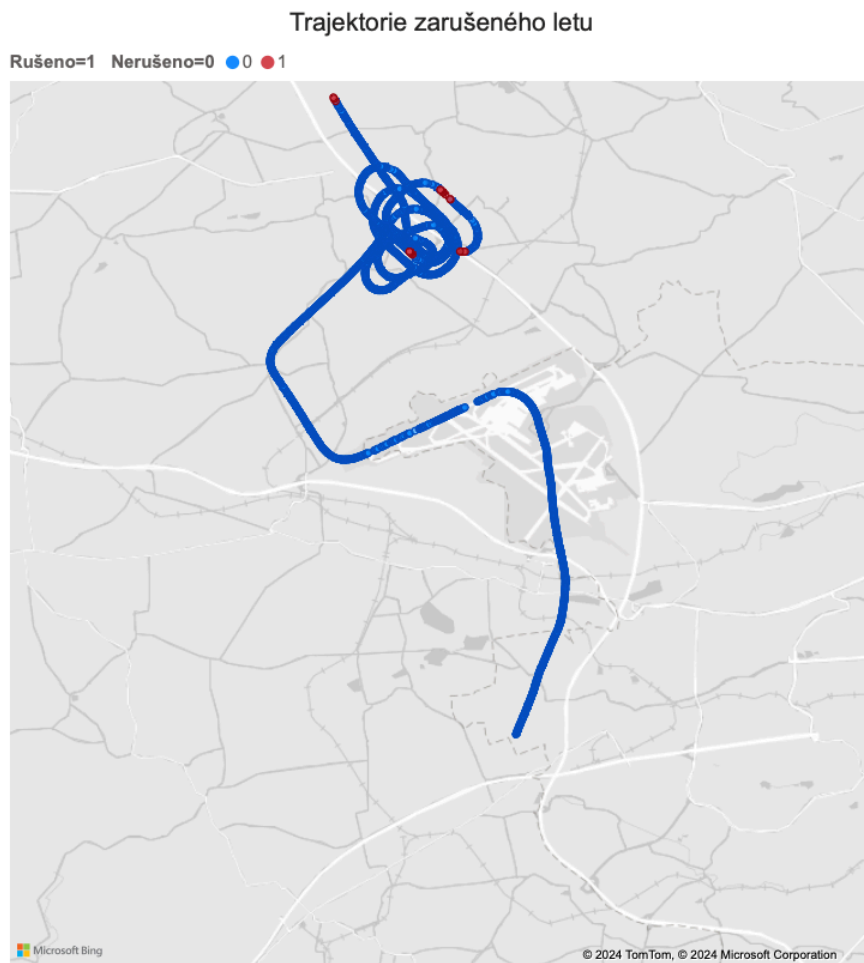
Příloha 15– Report zaznamenané události 26/07/2021



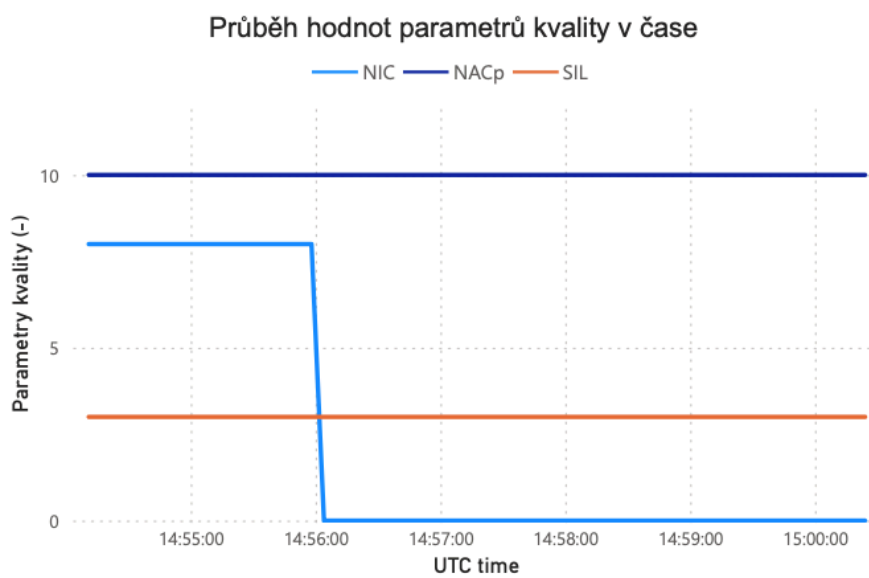
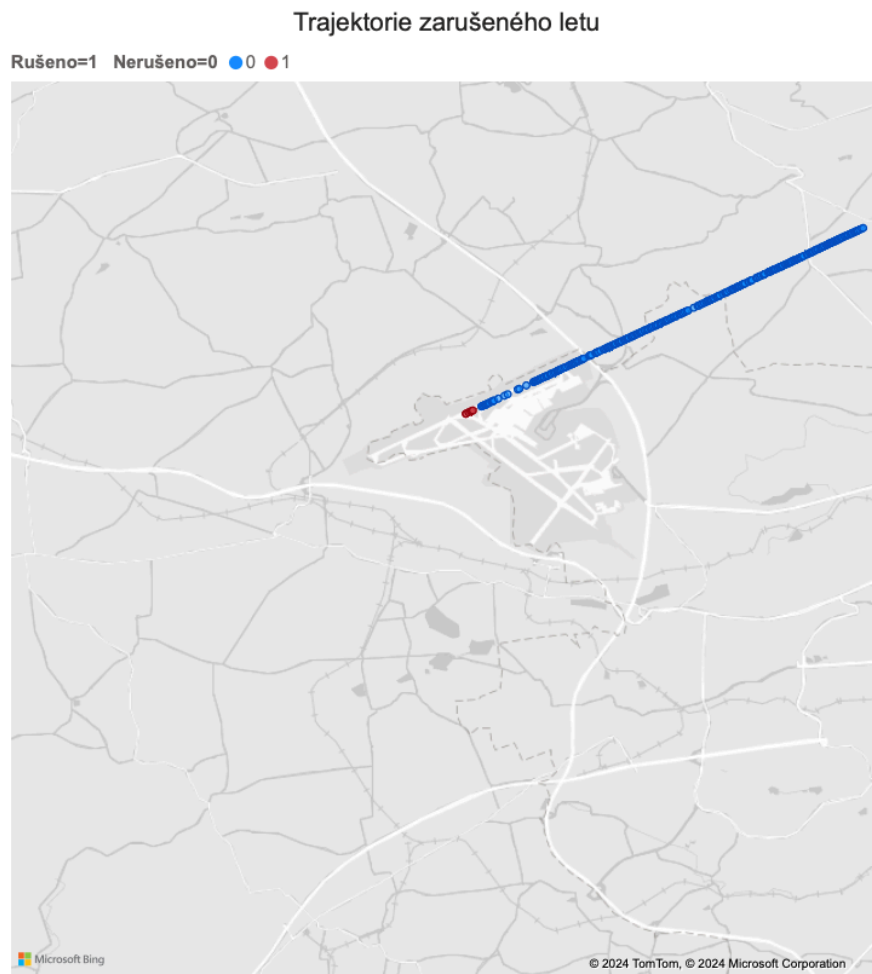
Grafický výstup z detektoru NSL GSS100D korespondující události GNSS rušení
(26/07/2021)



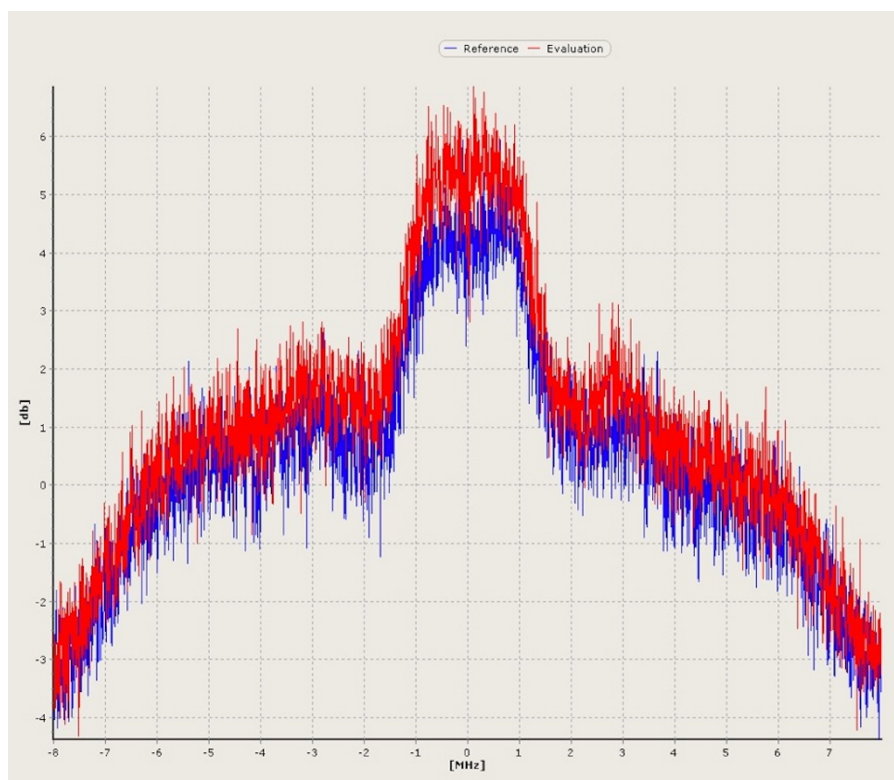
Příloha 16 – Report zaznamenané události 12/08/2021

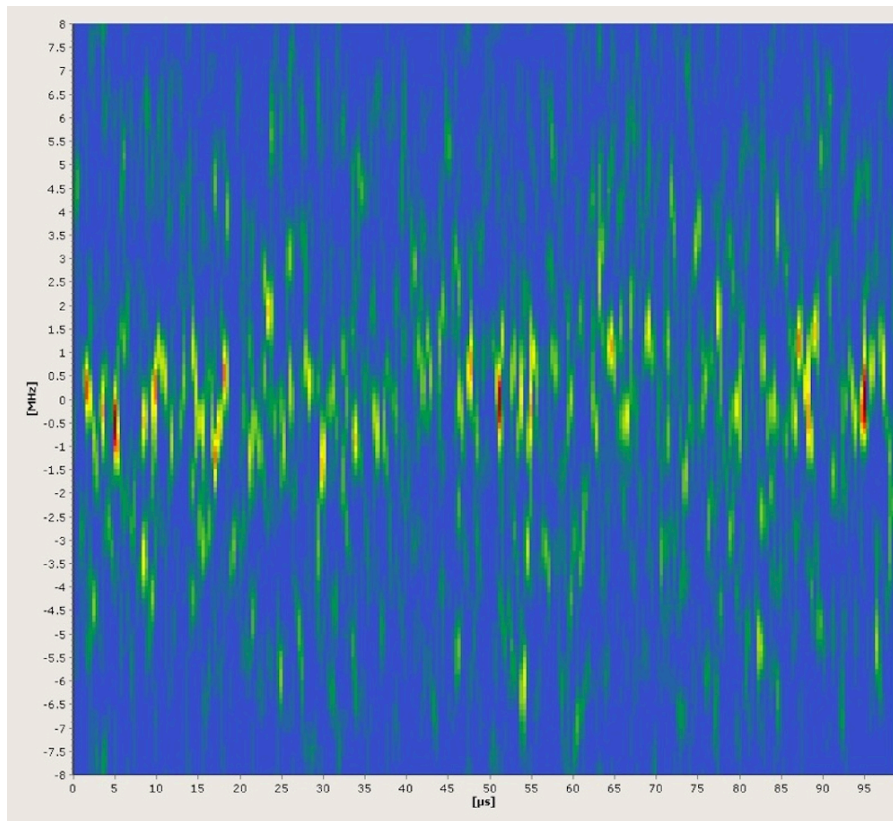


Příloha 17 – Report zaznamenané události 28/08/2021

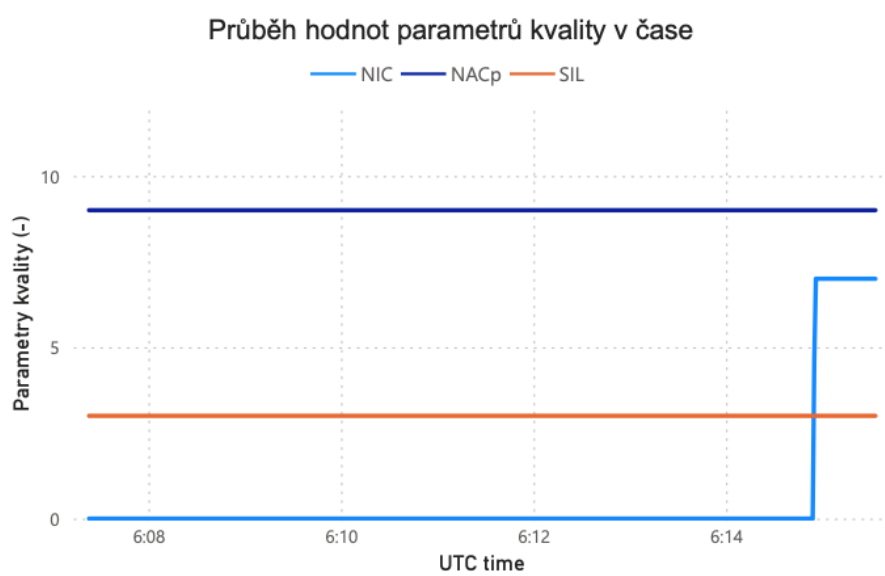
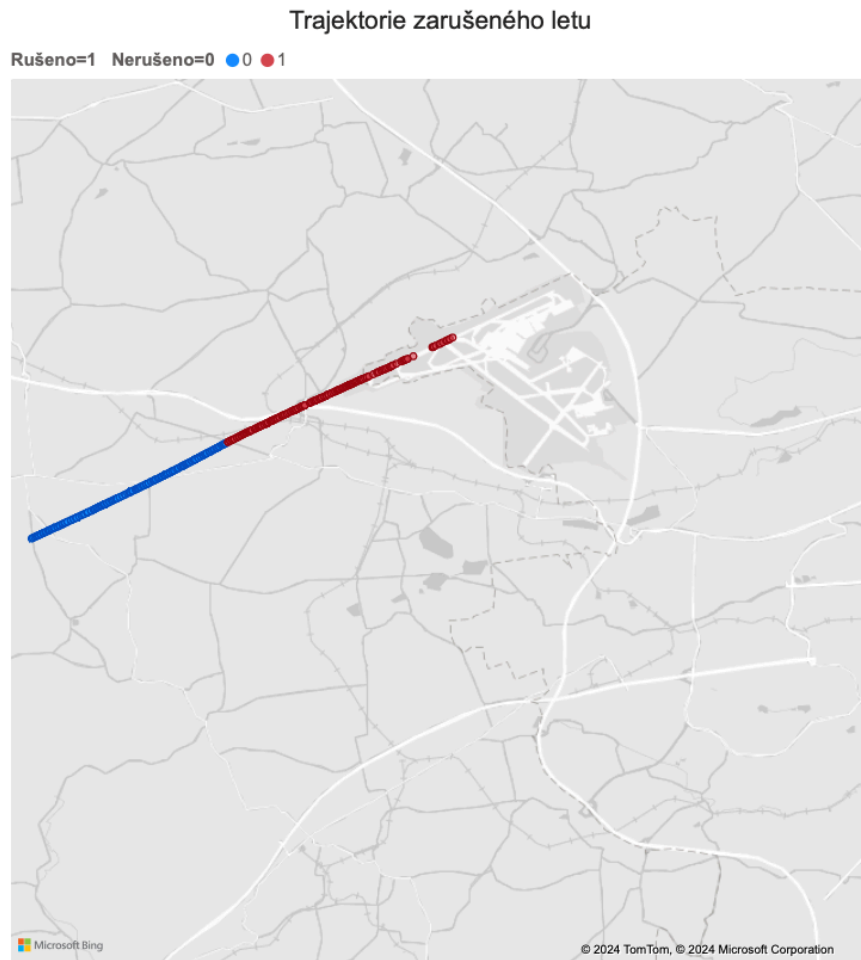


Grafický výstup z detektoru NSL GSS100D korespondující události GNSS rušení
(28/08/2021)

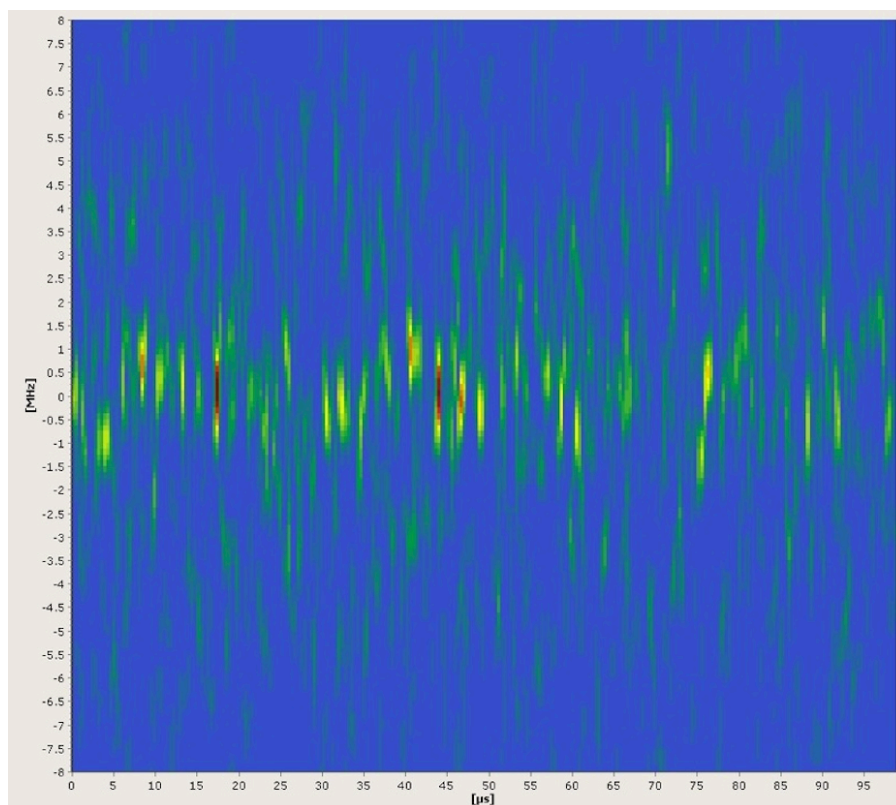
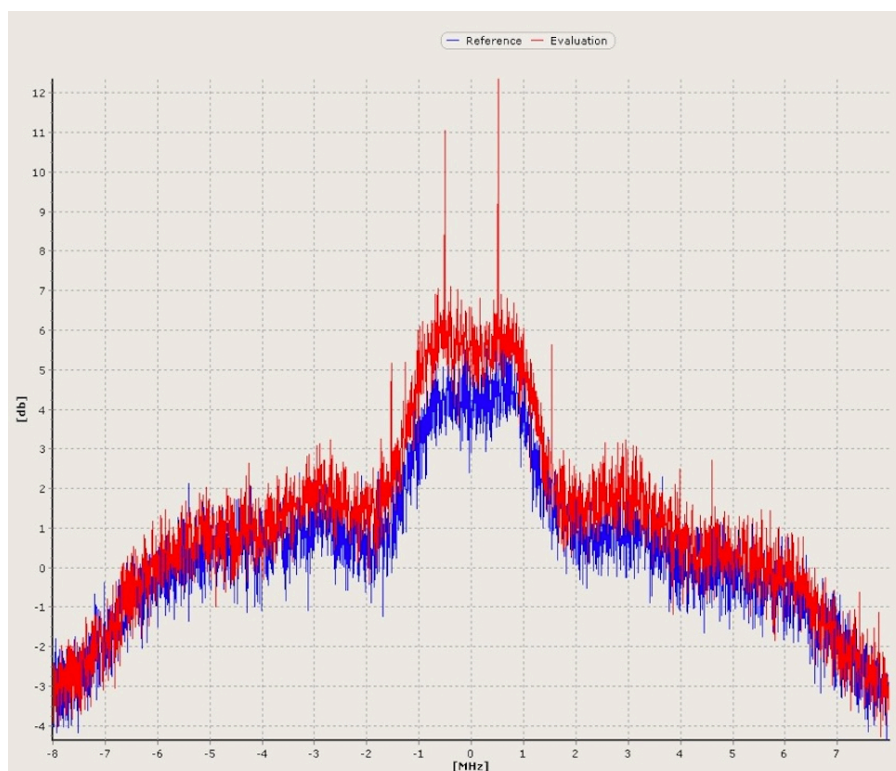




Příloha 18 – Report zaznamenané události 09/09/2021



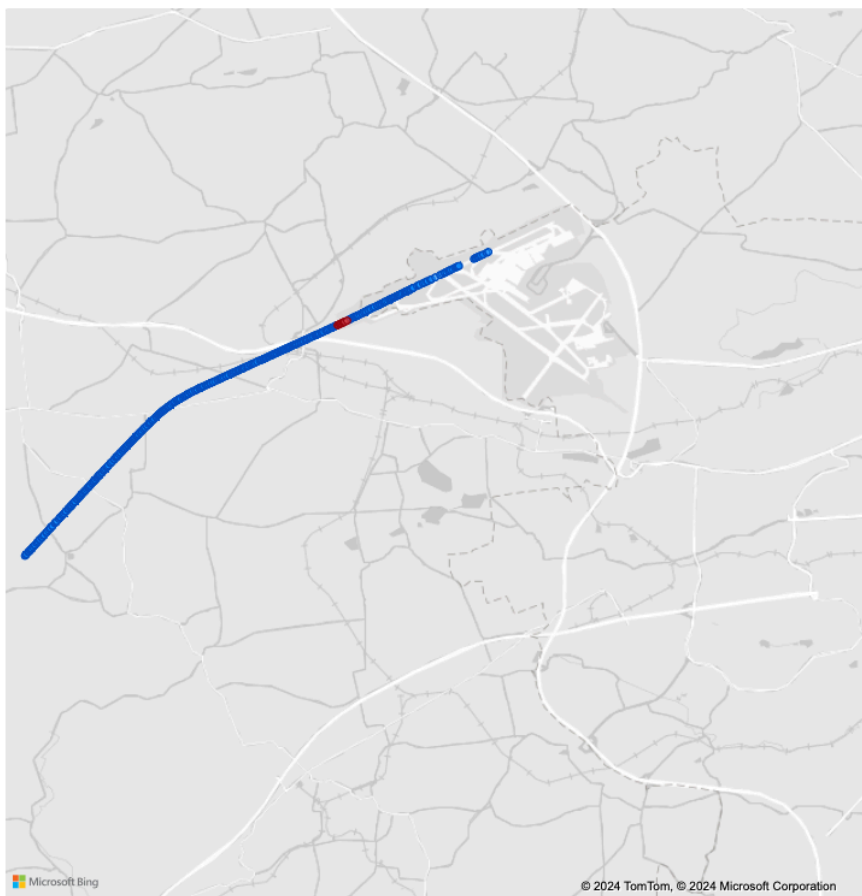
Grafický výstup z detektoru NSL GSS100D korespondující události GNSS rušení
(09/09/2021)



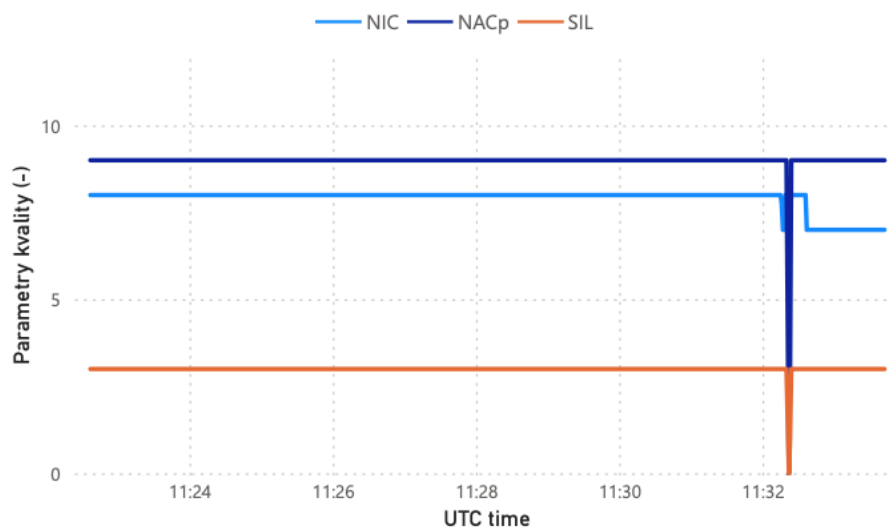
Příloha 19 – Report zaznamenané události 17/09/2021

Trajektorie zarušeného letu

Rušeno=1 Nerušeno=0 ● 0 ● 1



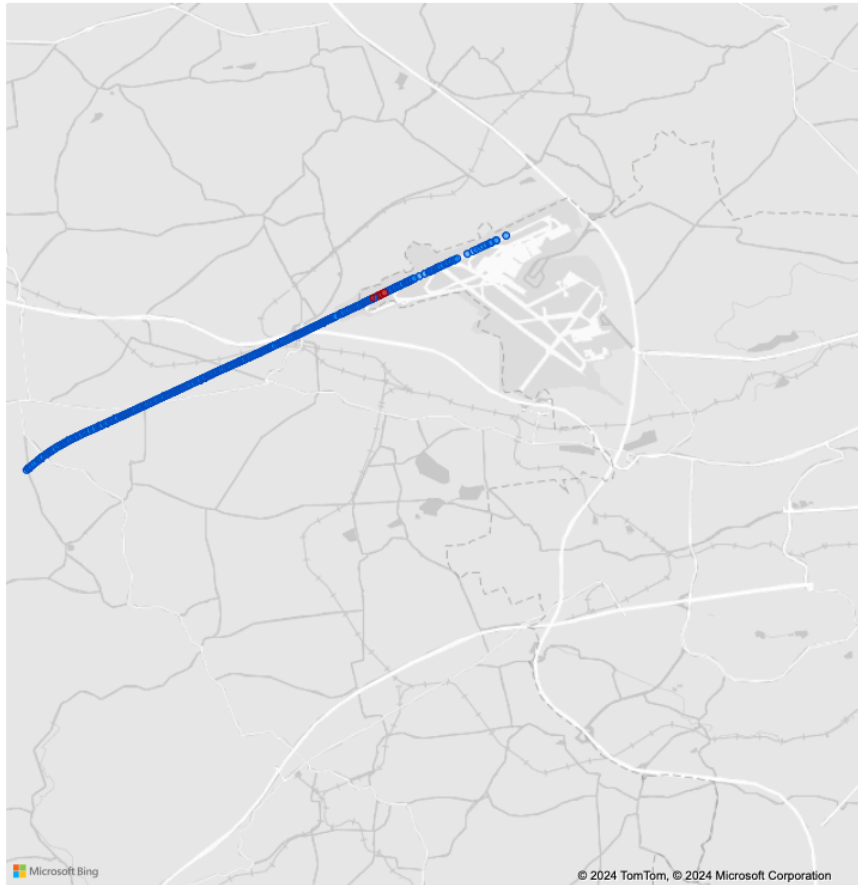
Průběh hodnot parametrů kvality v čase



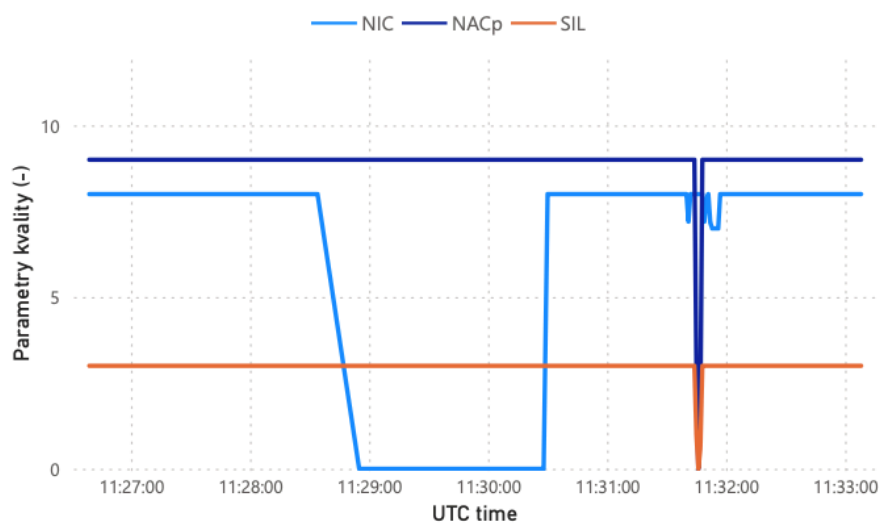
Příloha 20 – Report zaznamenané události 18/09/2021

Trajektorie zarušeného letu

Rušeno=1 Nerušeno=0 ● 0 ● 1

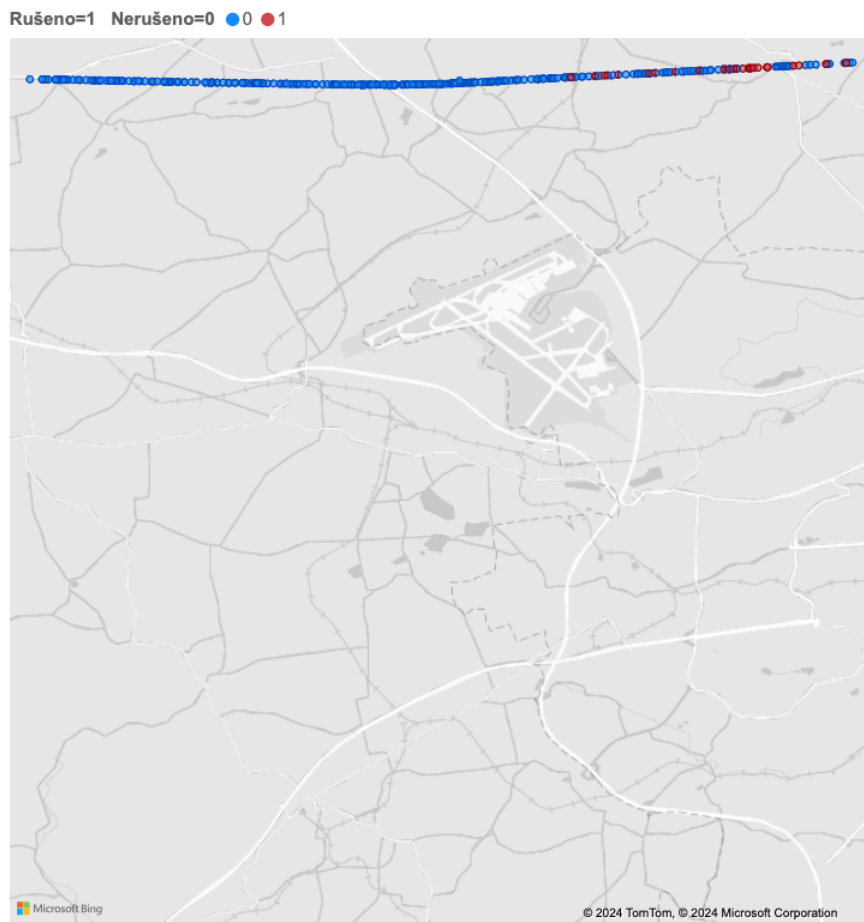


Průběh hodnot parametrů kvality v čase

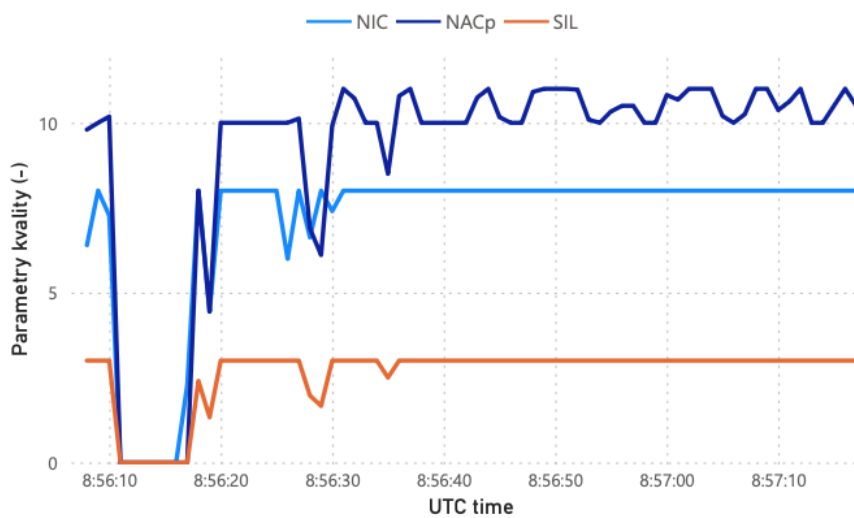


Příloha 21 – Report zaznamenané události 21/09/2021

Trajektorie zarušeného letu

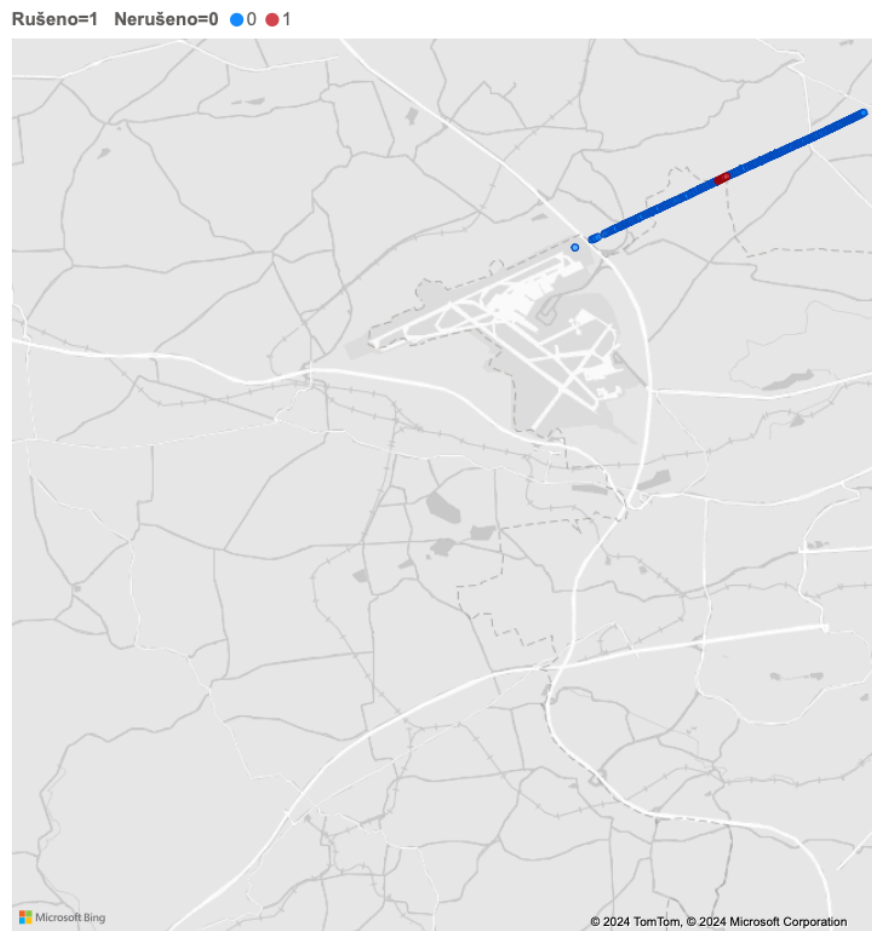


Průběh hodnot parametrů kvality v čase

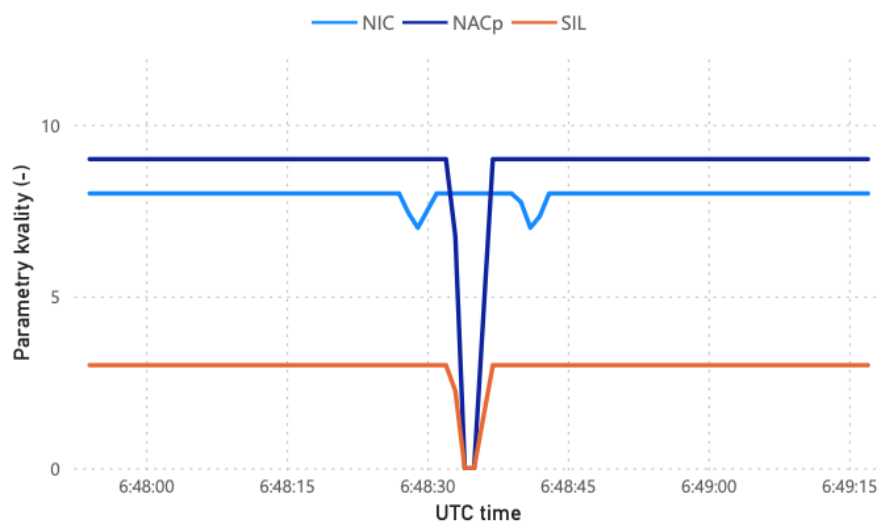


Příloha 22 – Report zaznamenané události 29/09/2021

Trajektorie zarušeného letu



Průběh hodnot parametrů kvality v čase

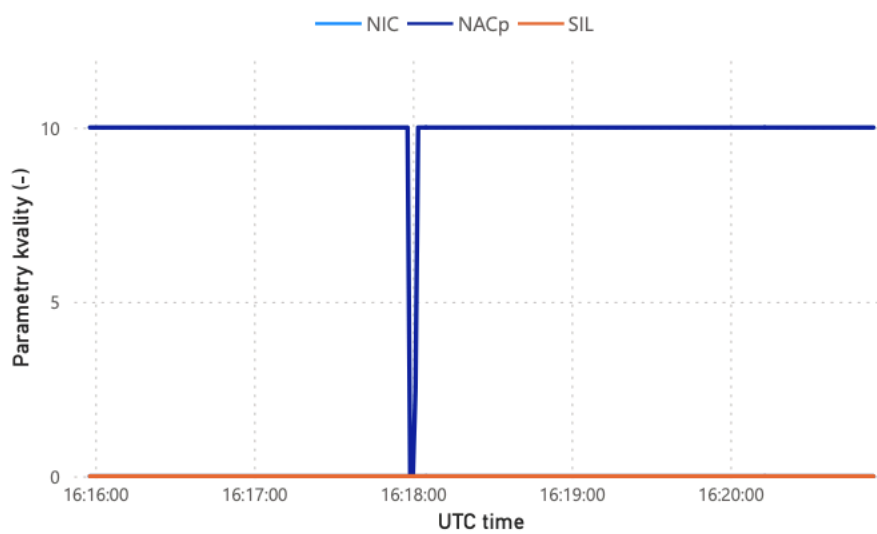


Příloha 23 – Report zaznamenané události 02/10/2021

Trajektorie zarušeného letu



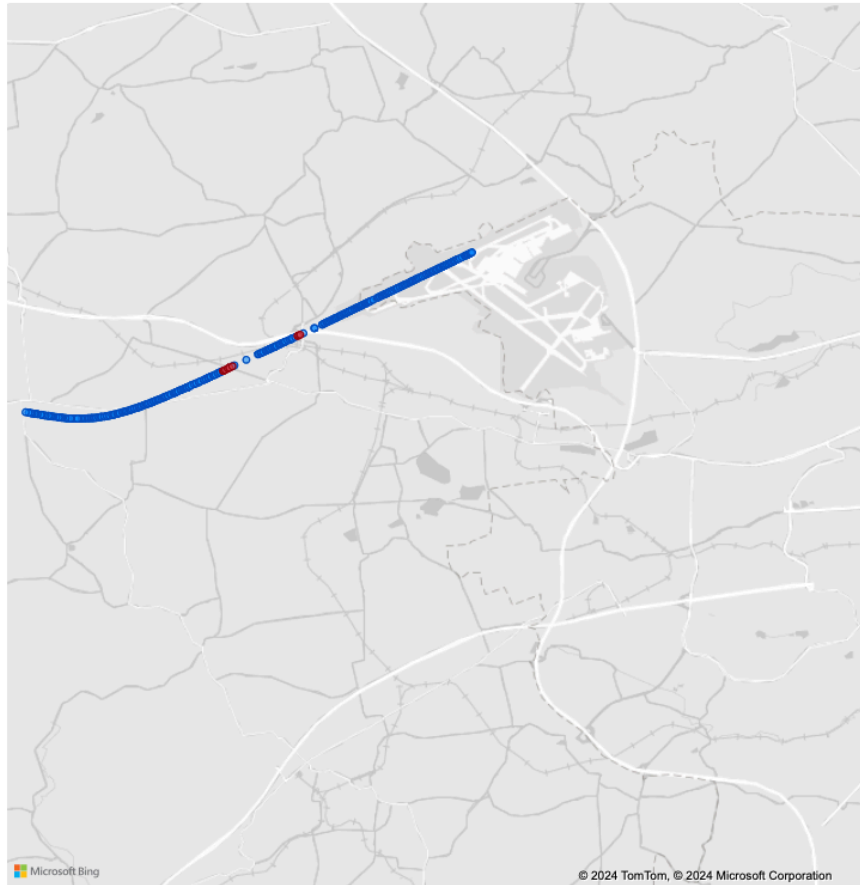
Průběh hodnot parametrů kvality v čase



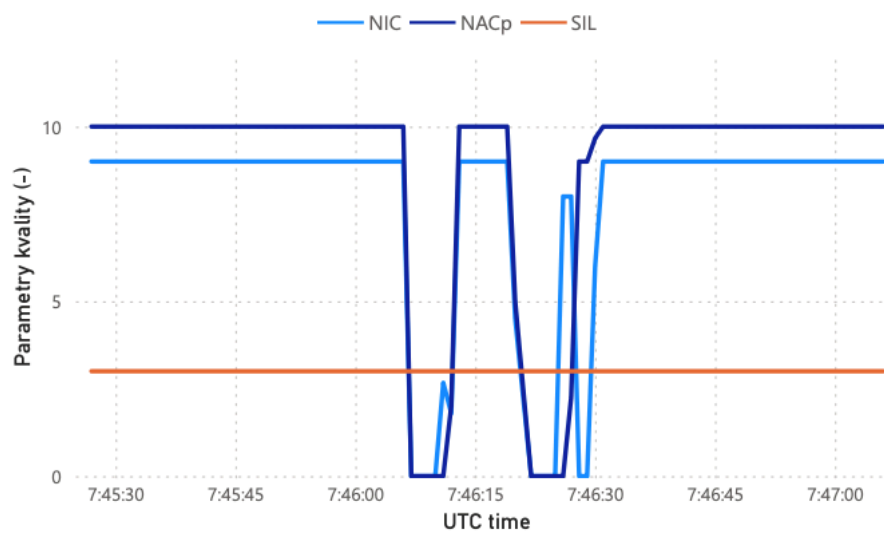
Příloha 24 – Report zaznamenané události 07/10/2021

Trajektorie zarušeného letu

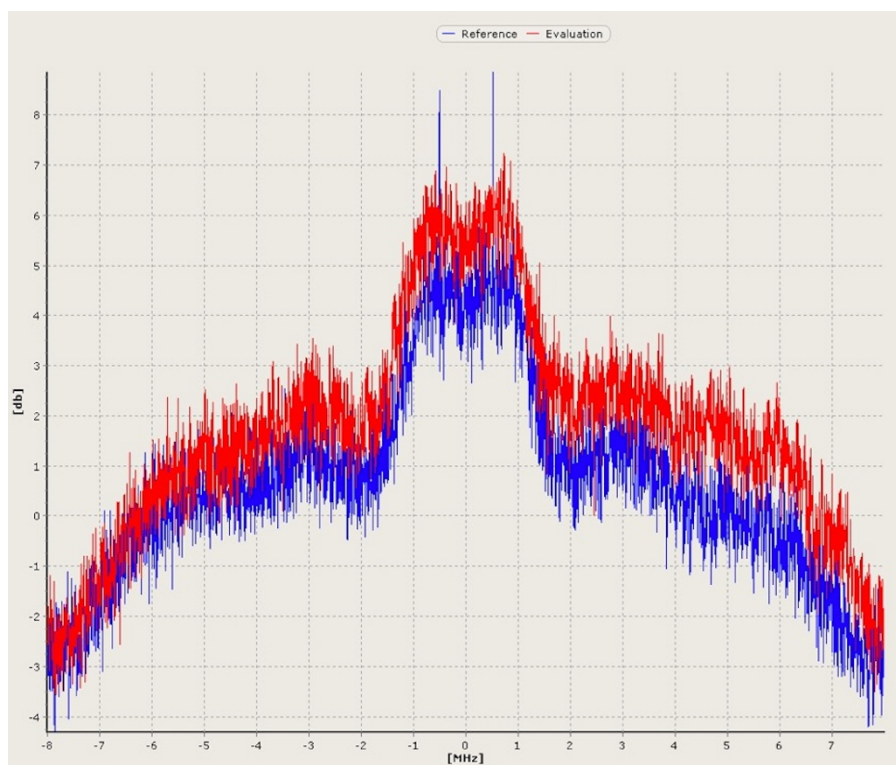
Rušeno=1 Nerušeno=0 ● 0 ● 1



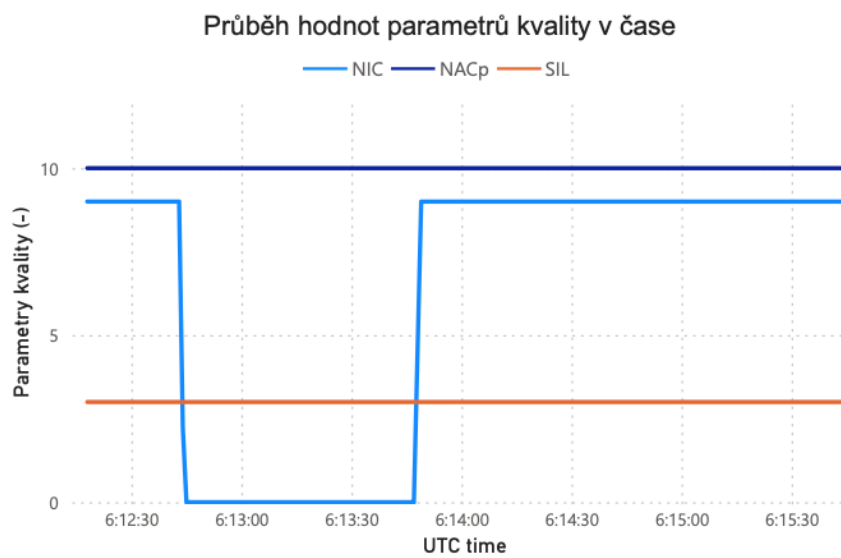
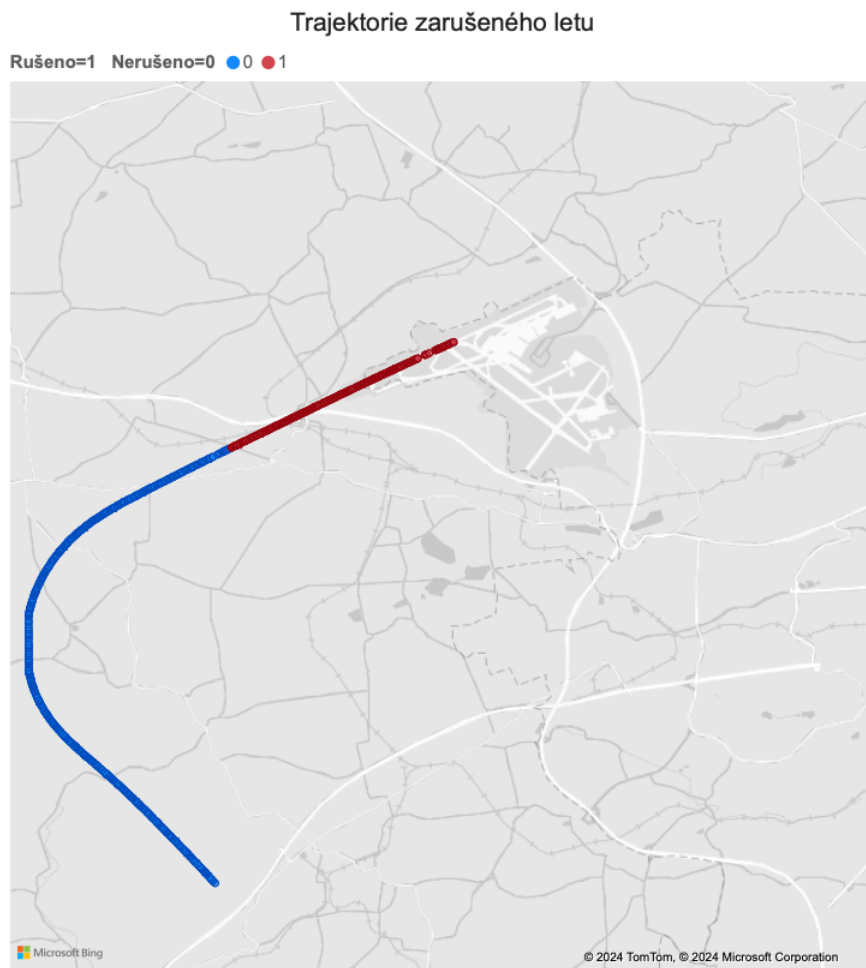
Průběh hodnot parametrů kvality v čase



Grafický výstup z detektoru NSL GSS100D korespondující události GNSS rušení
(07/10/2021)



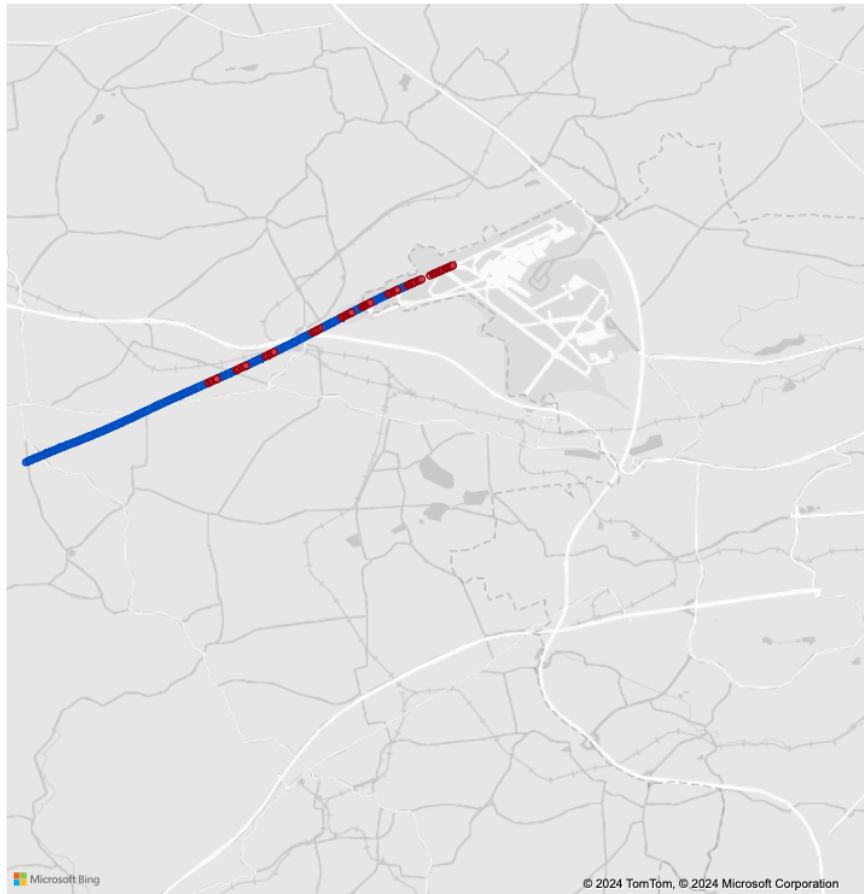
Příloha 25 – Report zaznamenané události 15/10/2021



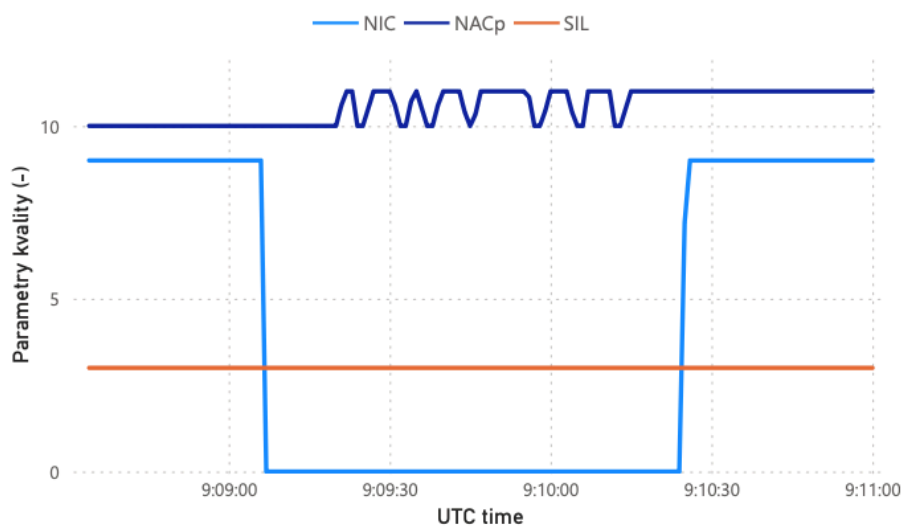
Příloha 26 – Report zaznamenané události 19/10/2021 (a)

Trajektorie zarušeného letu

Rušeno=1 Nerušeno=0 ● 0 ● 1



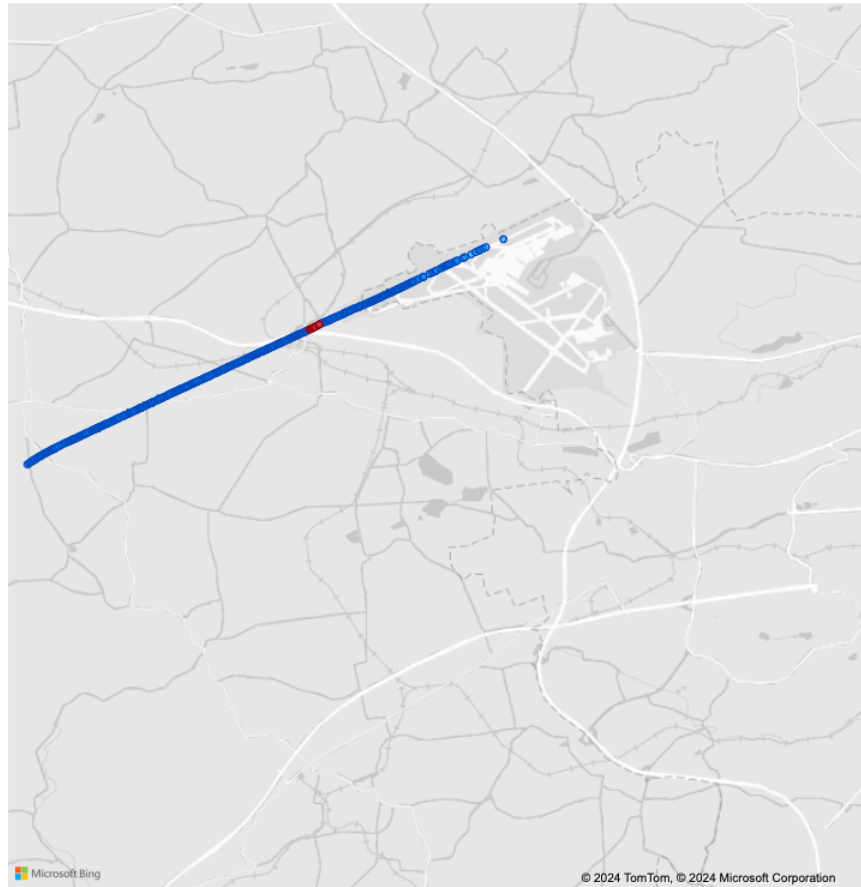
Průběh hodnot parametrů kvality v čase



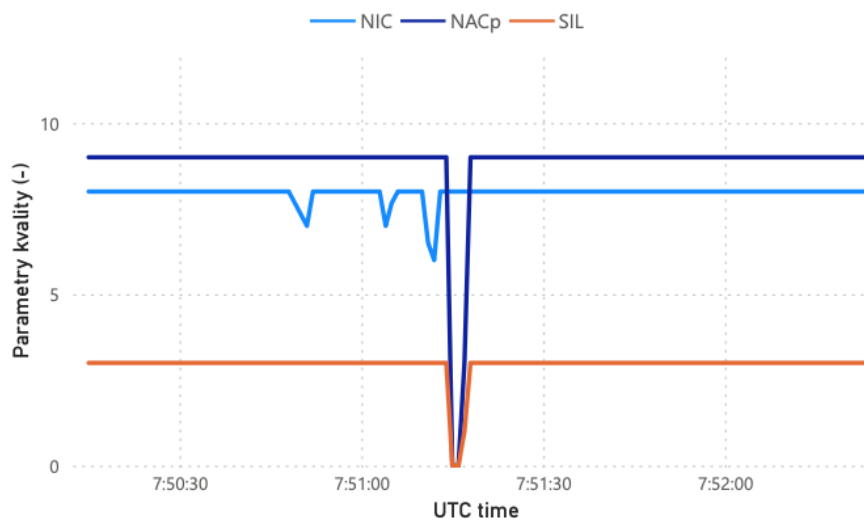
Příloha 27 – Report zaznamenané události 19/10/2021 (b)

Trajektorie zarušeného letu

Rušeno=1 Nerušeno=0 ● 0 ● 1



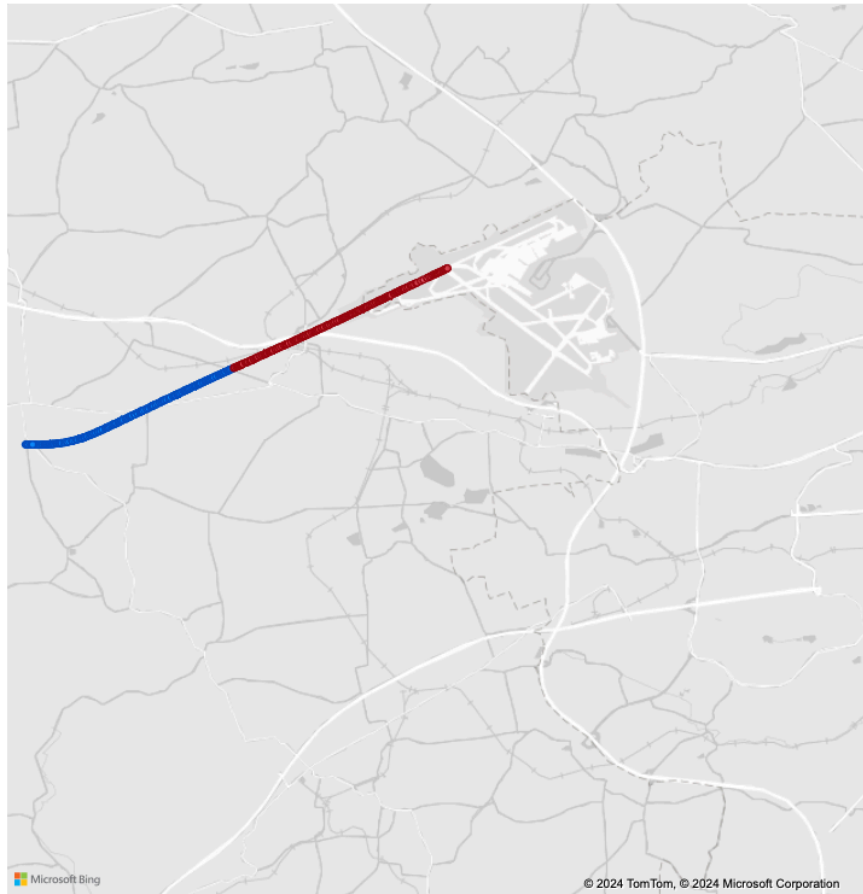
Průběh hodnot parametrů kvality v čase



Příloha 28 – Report zaznamenané události 12/11/2021

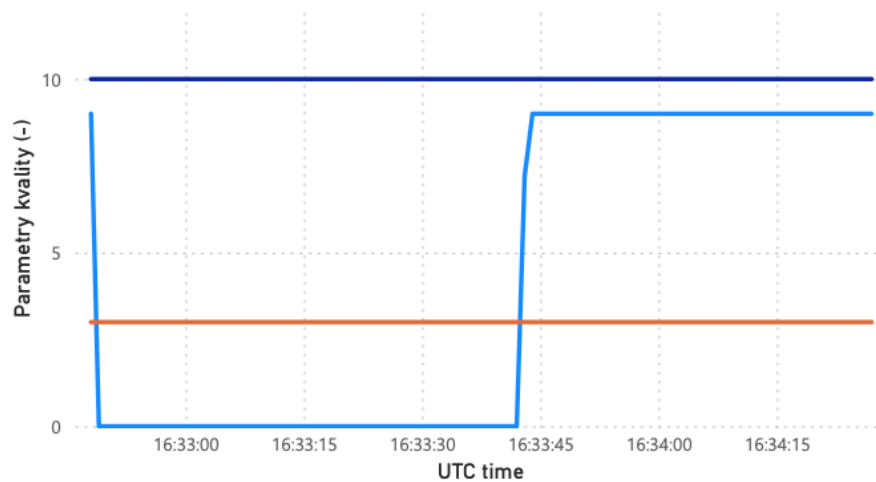
Trajektorie zarušeného letu

Rušeno=1 Nerušeno=0 ● 0 ● 1

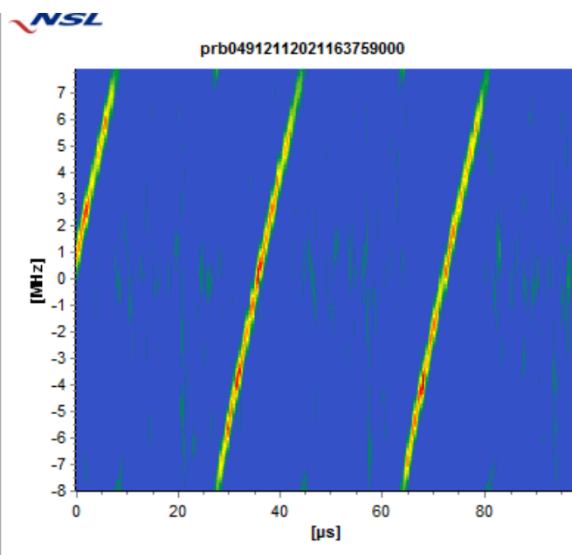
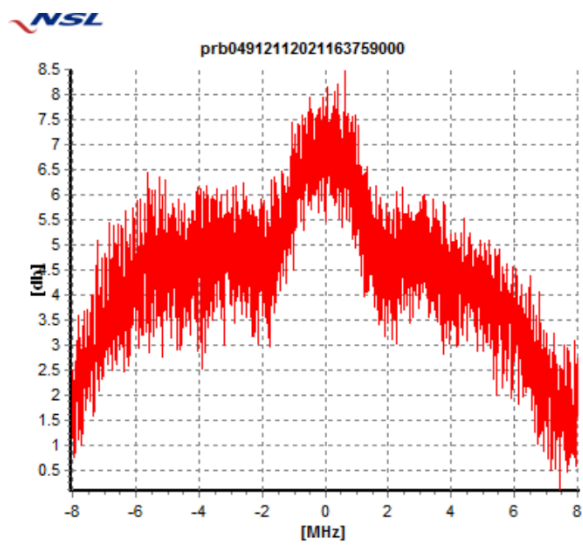


Průběh hodnot parametrů kvality v čase

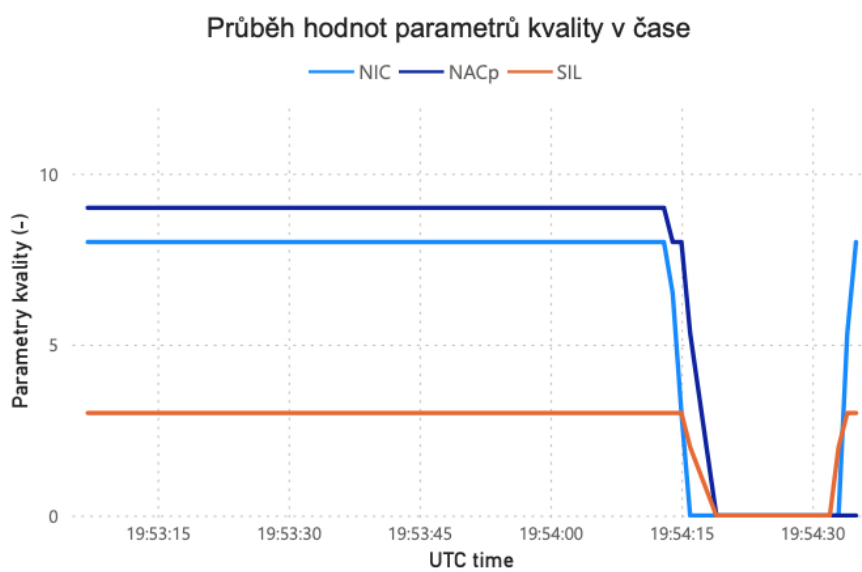
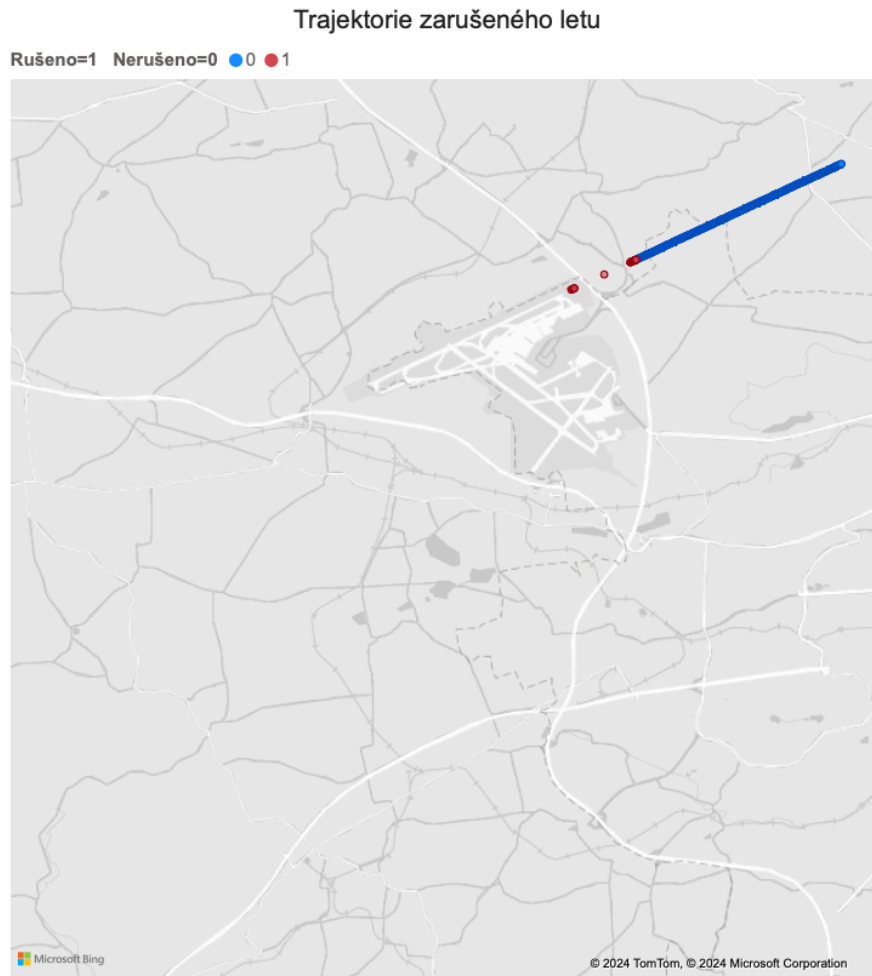
— NIC — NACp — SIL



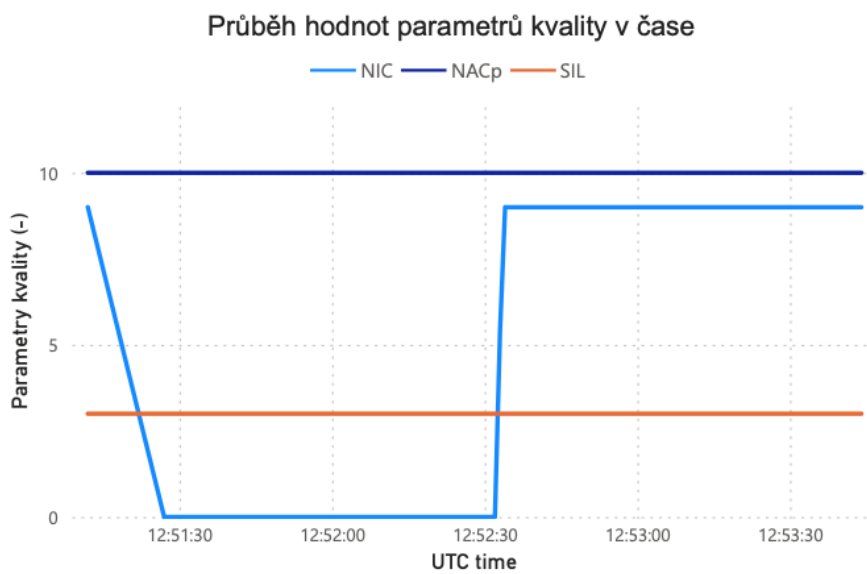
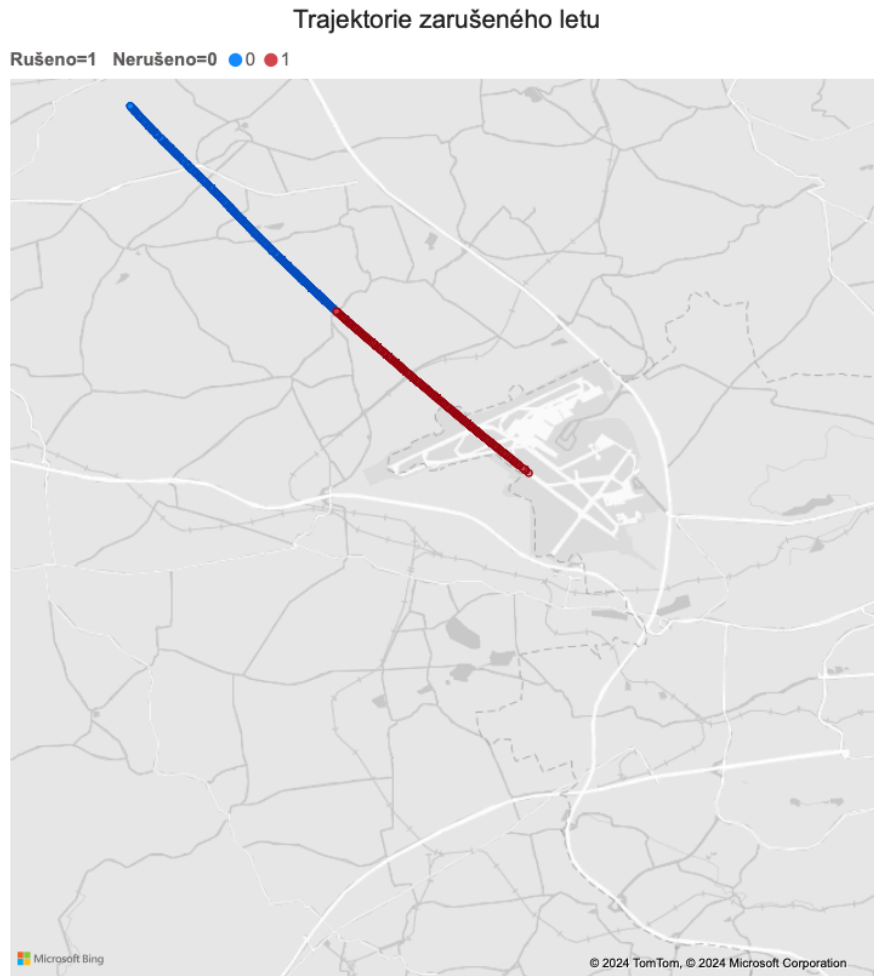
Grafický výstup z detektoru NSL GSS100D korespondující události GNSS rušení
(12/11/2021)



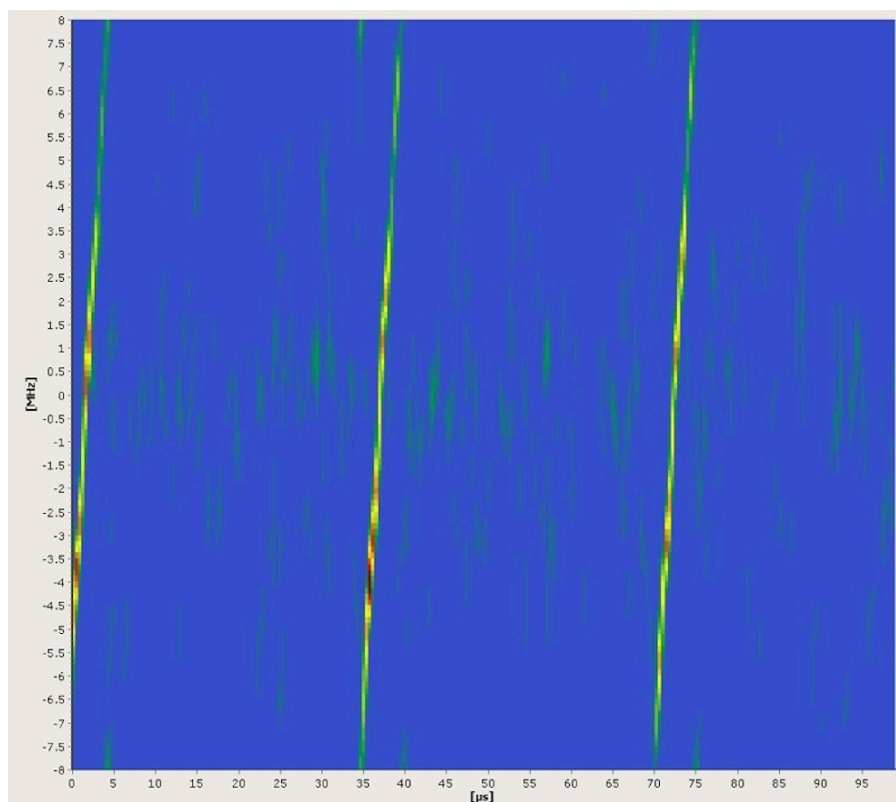
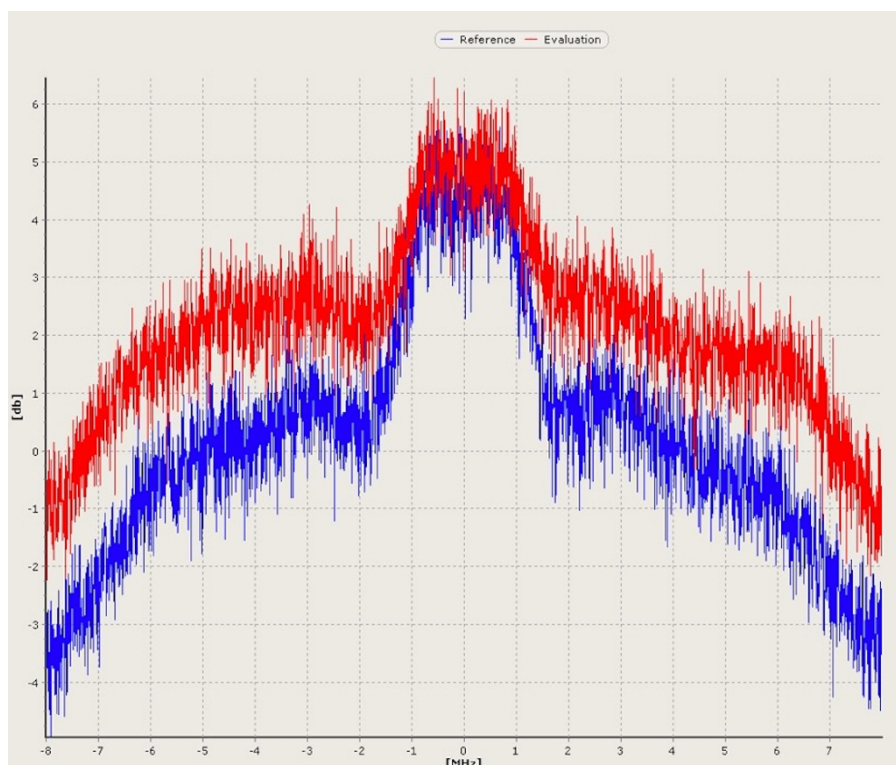
Příloha 29 – Report zaznamenané události 12/12/2021



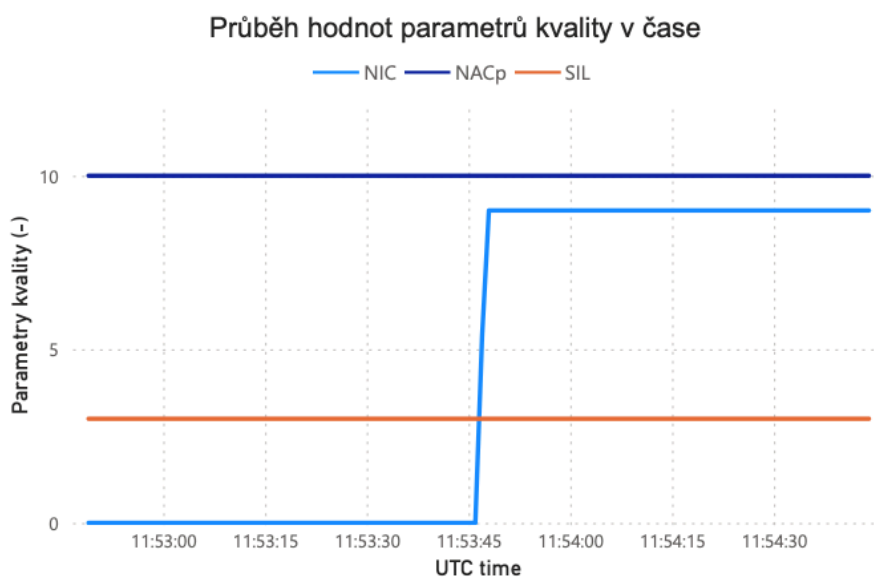
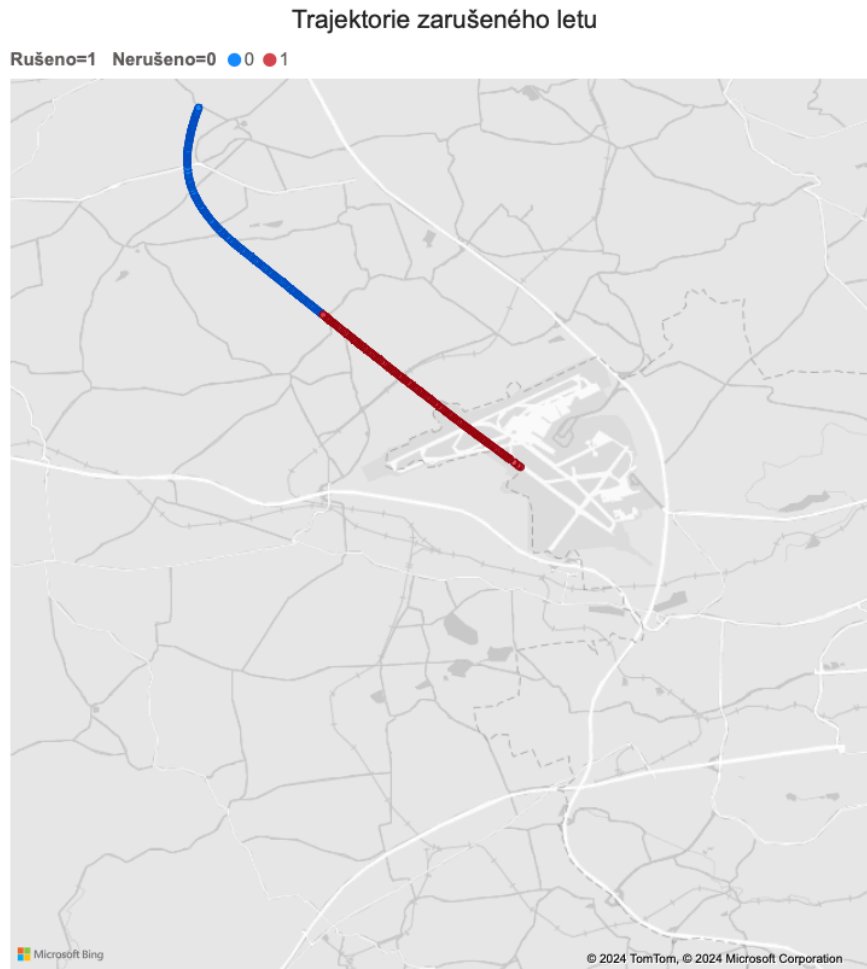
Příloha 30 – Report zaznamenané události 05/01/2022



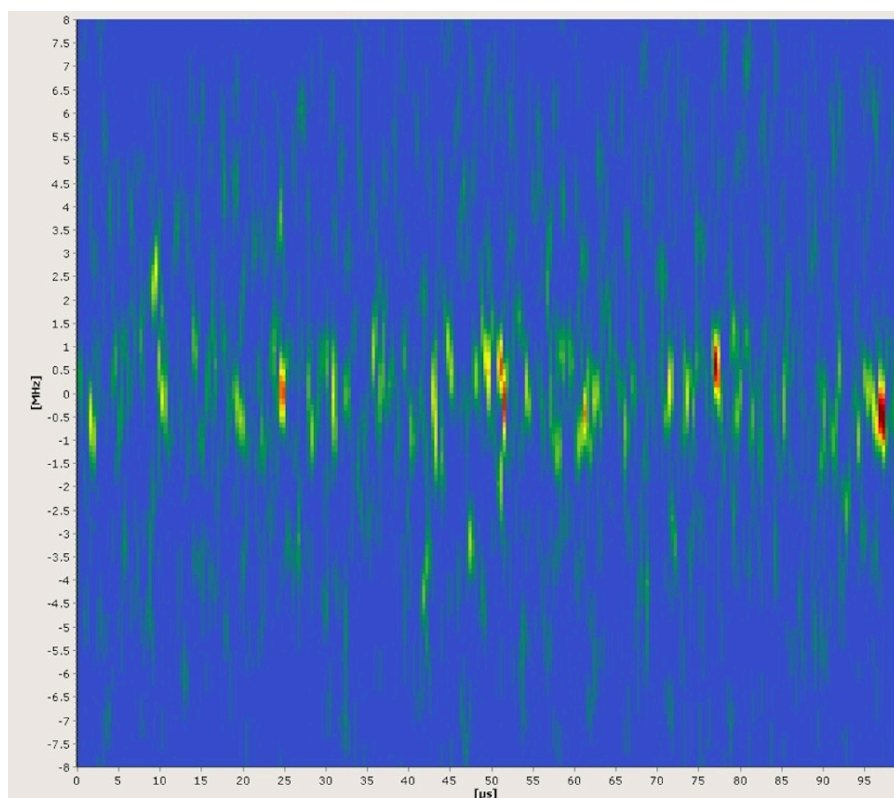
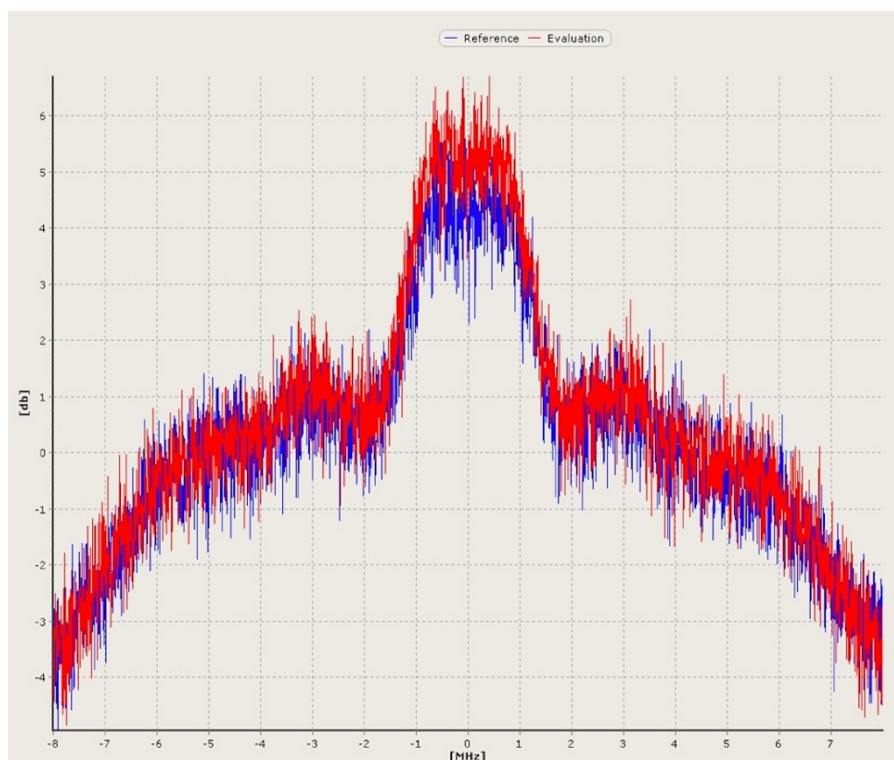
Grafický výstup z detektoru NSL GSS100D korespondující události GNSS rušení
(05/01/2022)



Příloha 31 – Report zaznamenané události 15/01/2022



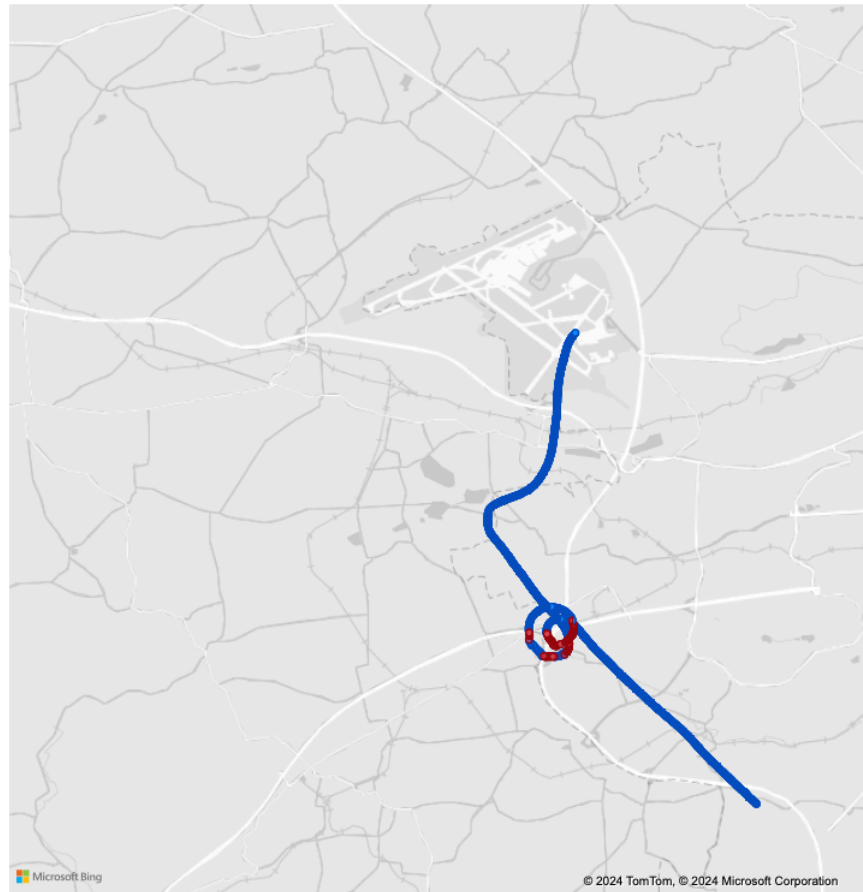
Grafický výstup z detektoru NSL GSS100D korespondující události GNSS rušení
(15/01/2022)



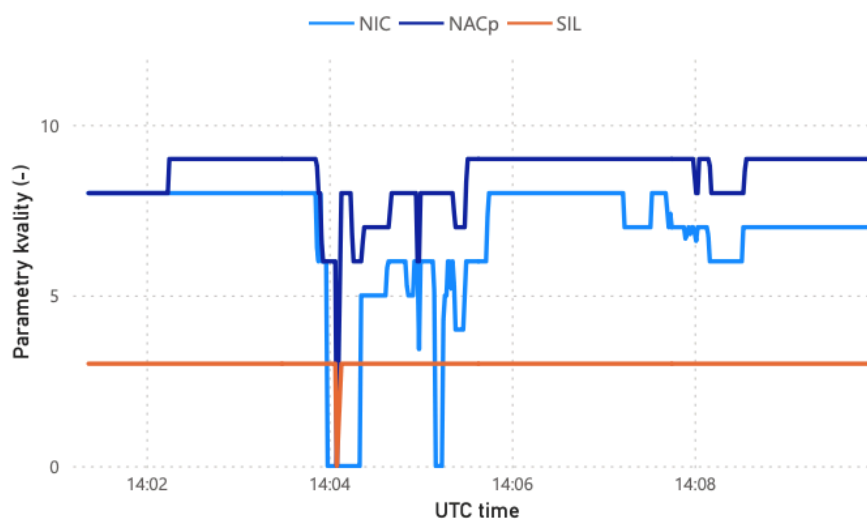
Příloha 32 – Report zaznamenané události 02/02/2022

Trajektorie zarušeného letu

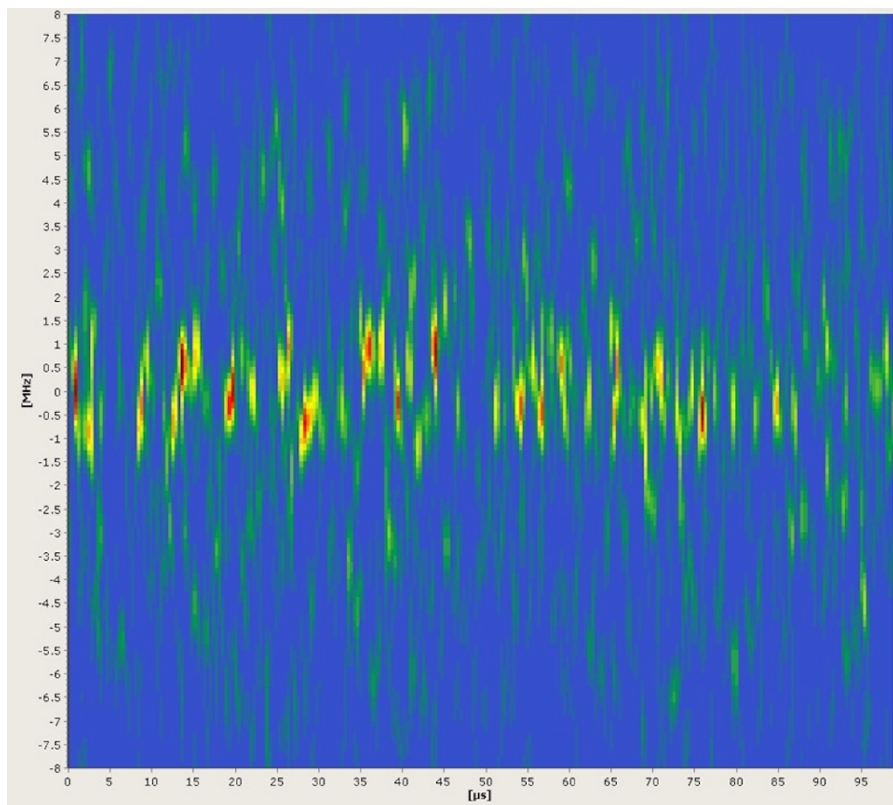
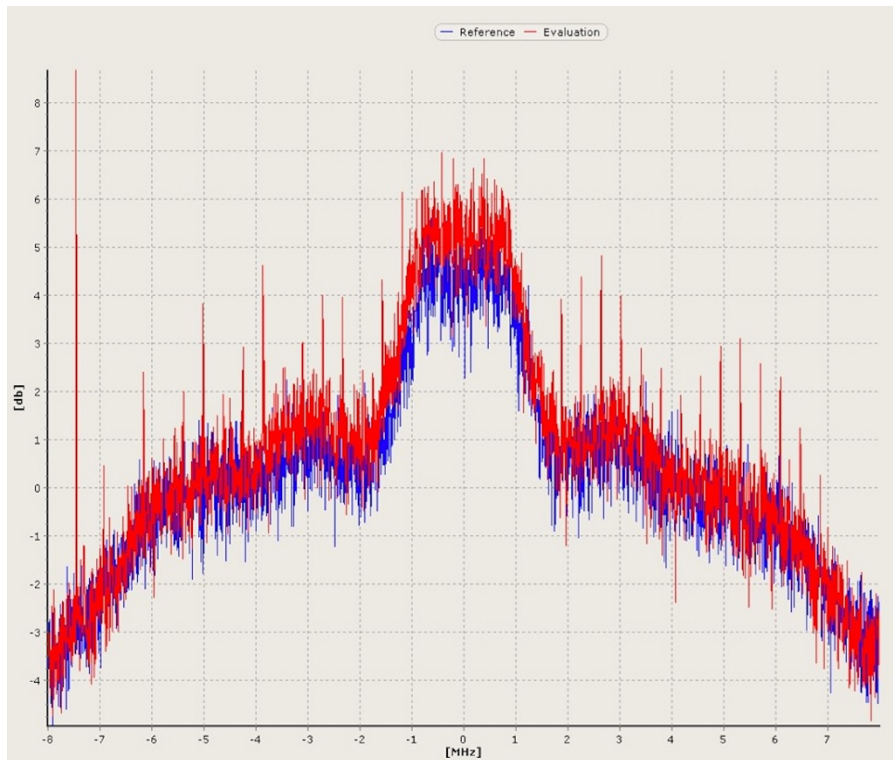
Rušeno=1 Nerušeno=0 ● 0 ● 1



Průběh hodnot parametrů kvality v čase



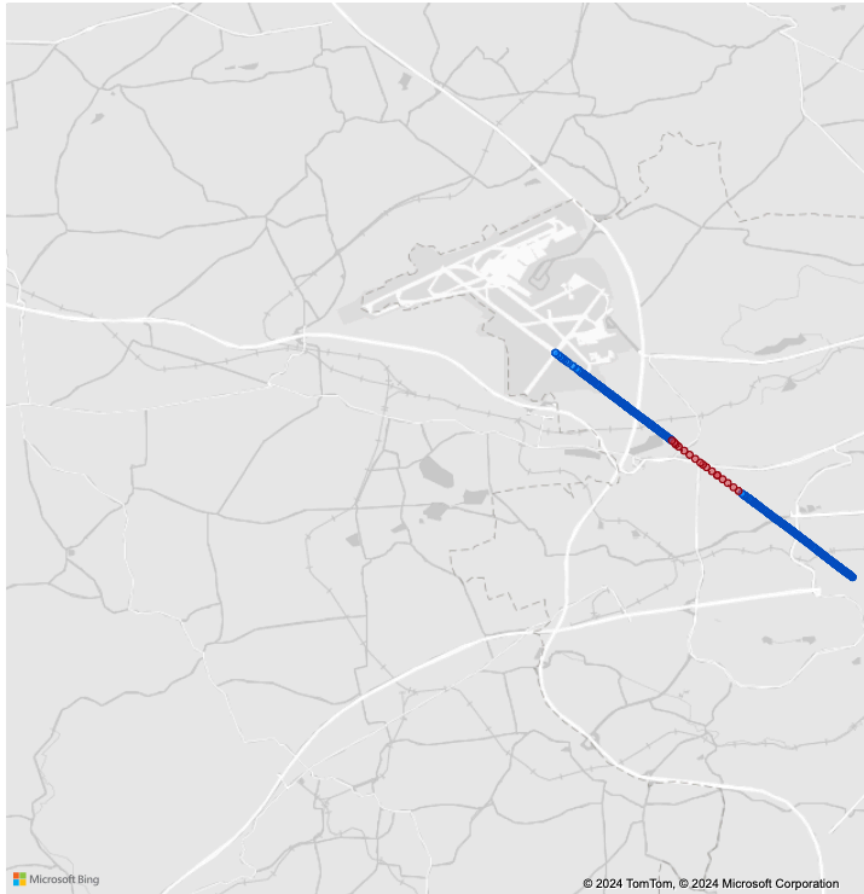
Grafický výstup z detektoru NSL GSS100D korespondující události GNSS rušení
(02/02/2022)



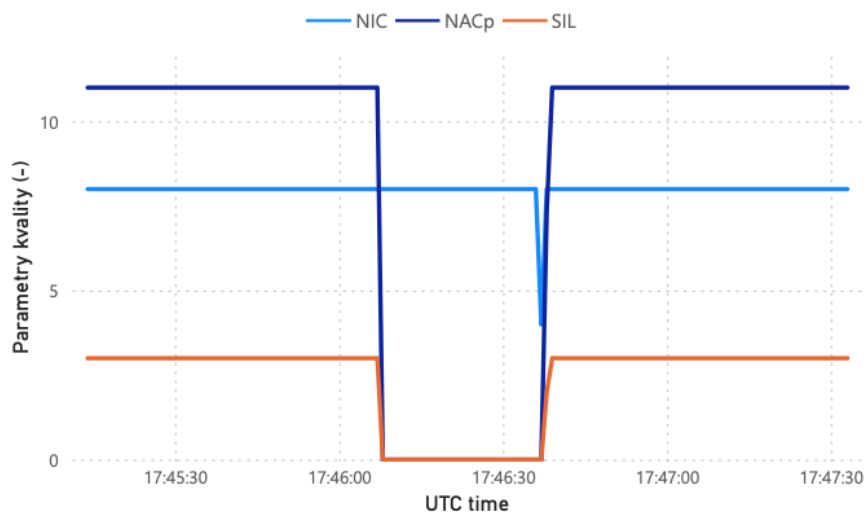
Příloha 33 – Report zaznamenané události 07/02/2022 (a)

Trajektorie zarušeného letu

Rušeno=1 Nerušeno=0 ● 0 ● 1



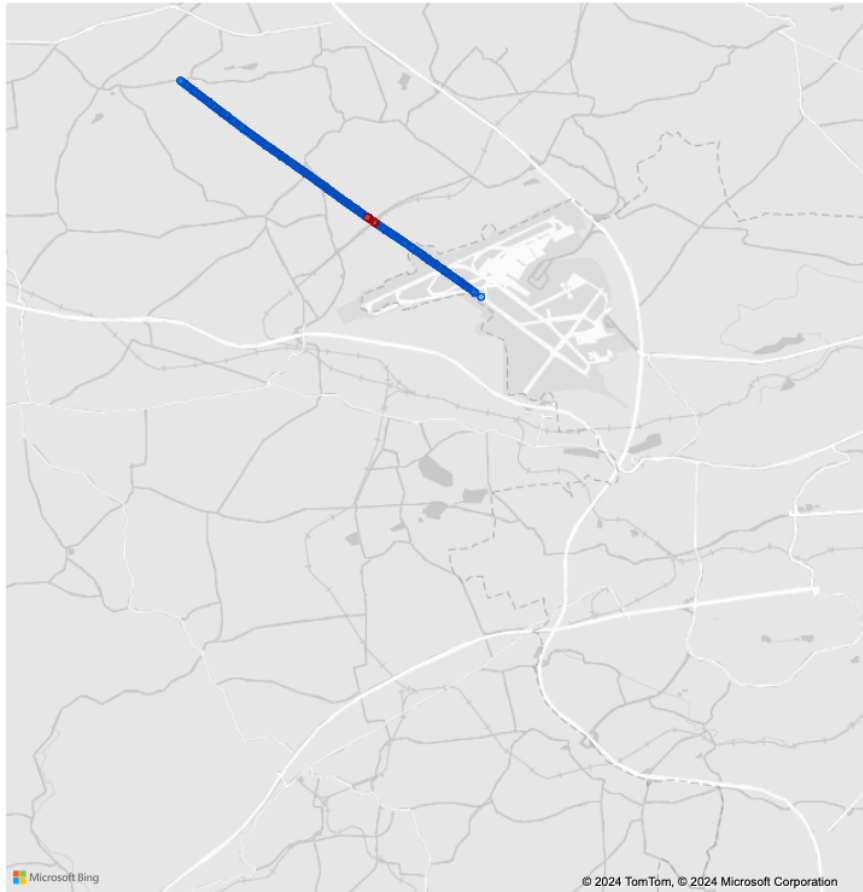
Průběh hodnot parametrů kvality v čase



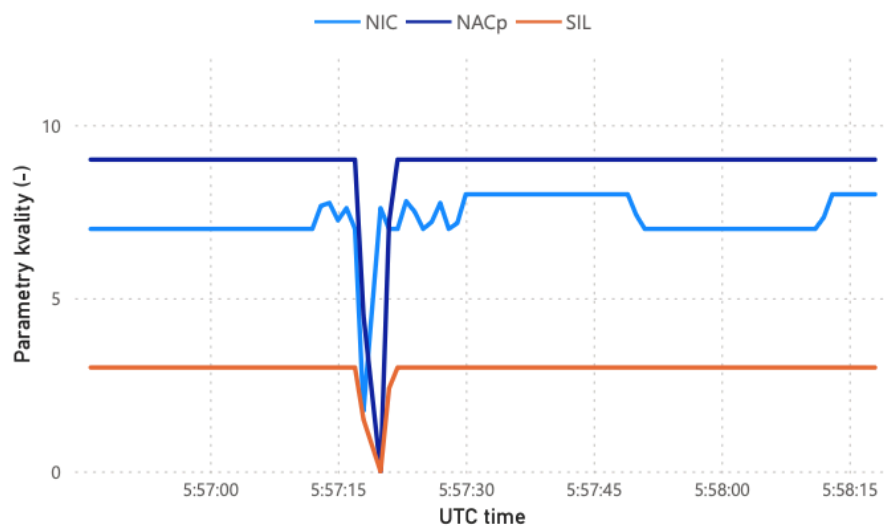
Příloha 34 – Report zaznamenané události 07/02/2022 (b)

Trajektorie zarušeného letu

Rušeno=1 Nerušeno=0 ● 0 ● 1



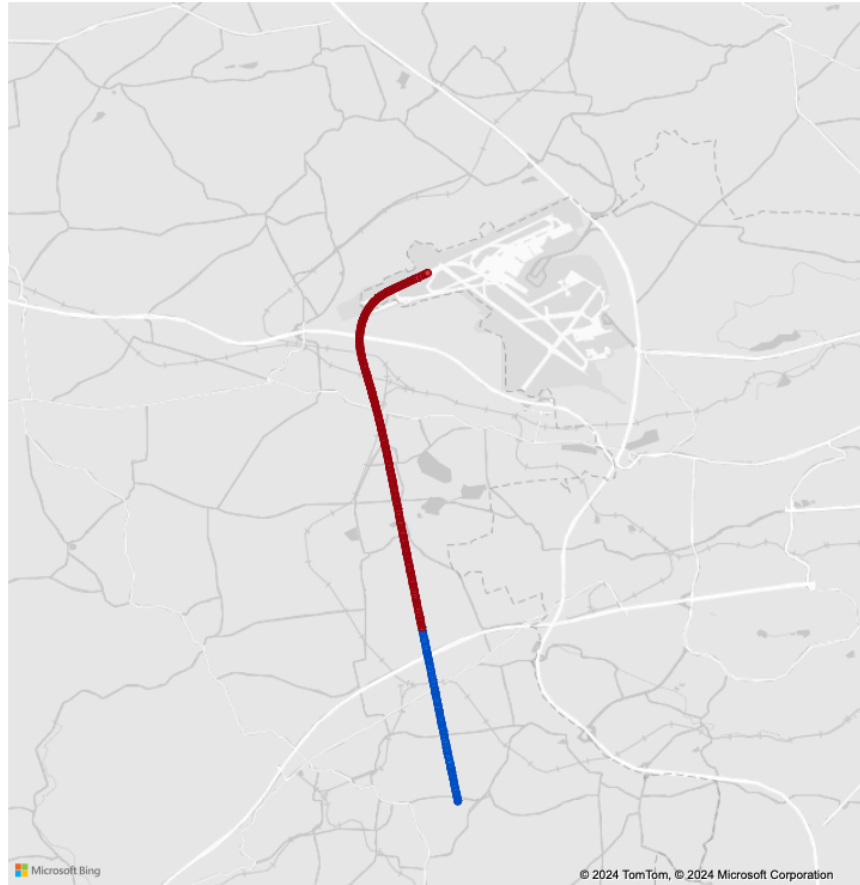
Průběh hodnot parametrů kvality v čase



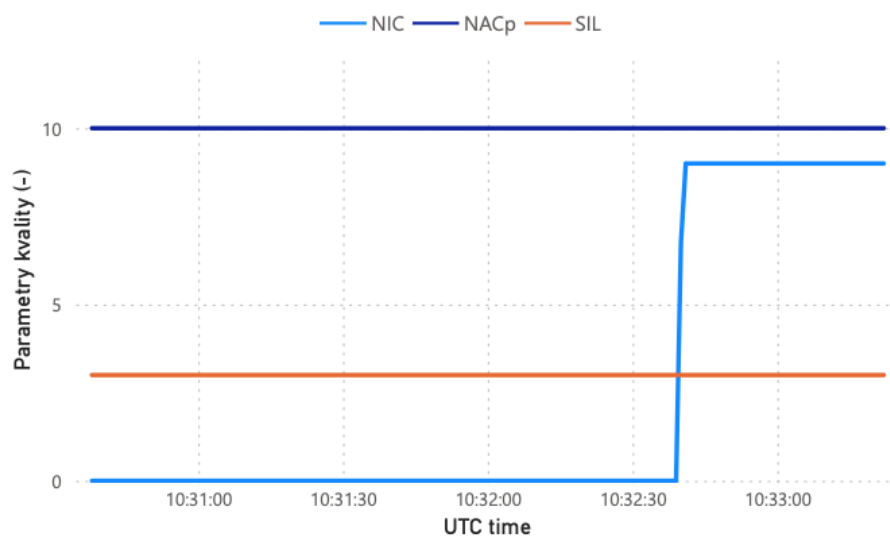
Příloha 35 – Report zaznamenané události 08/02/2022

Trajektorie zarušeného letu

Rušeno=1 Nerušeno=0 ● 0 ● 1



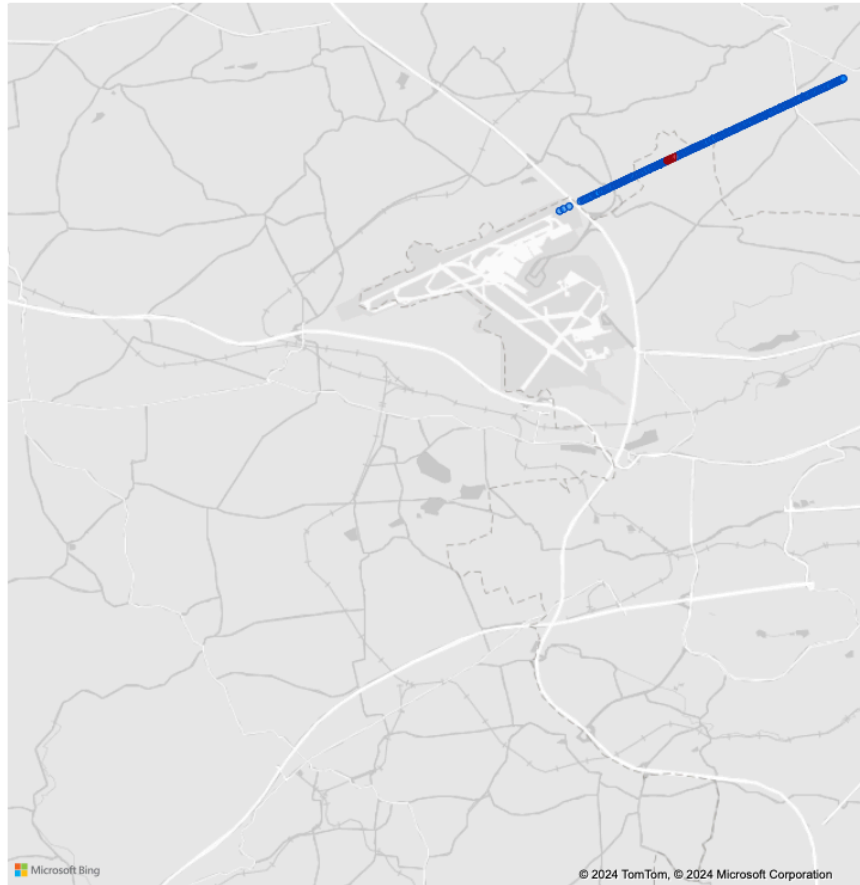
Průběh hodnot parametrů kvality v čase



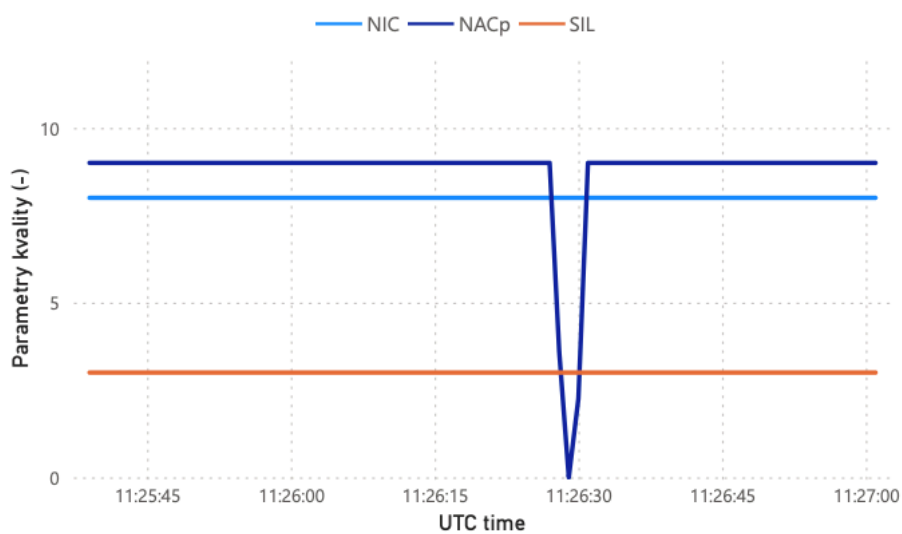
Příloha 36 – Report zaznamenané události 13/02/2022

Trajektorie zarušeného letu

Rušeno=1 Nerušeno=0 ● 0 ● 1



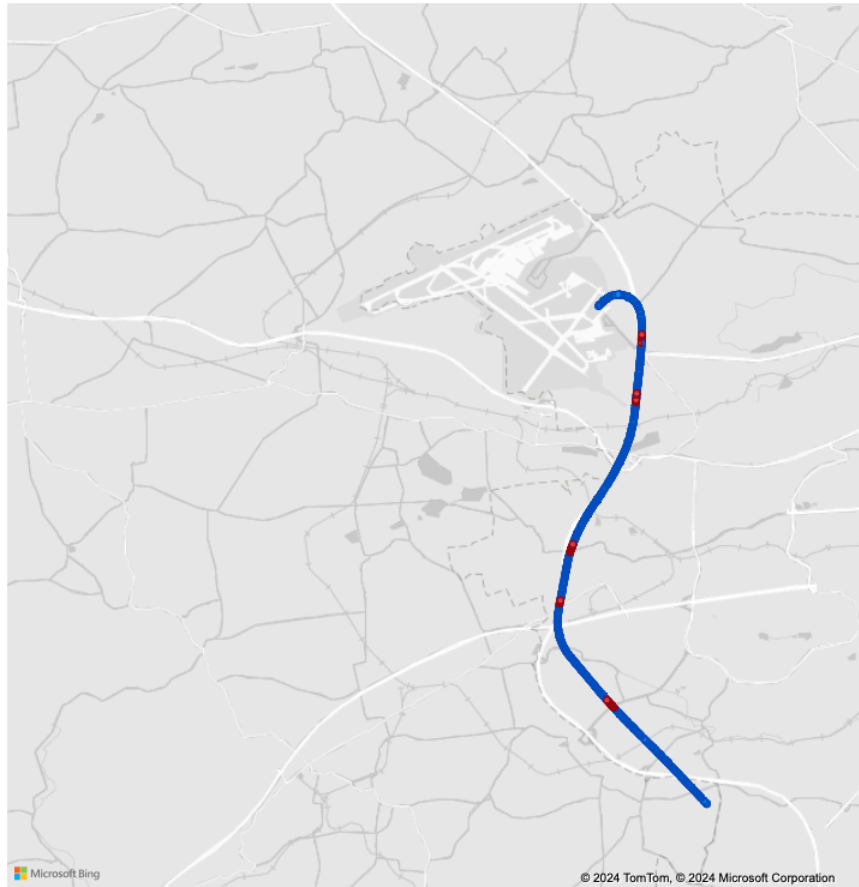
Průběh hodnot parametrů kvality v čase



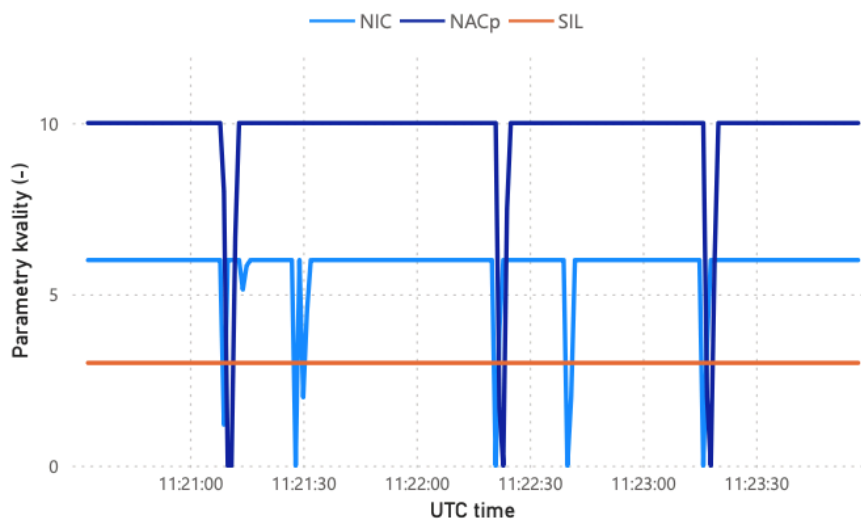
Příloha 37 – Report zaznamenané události 07/03/2022

Trajektorie zarušeného letu

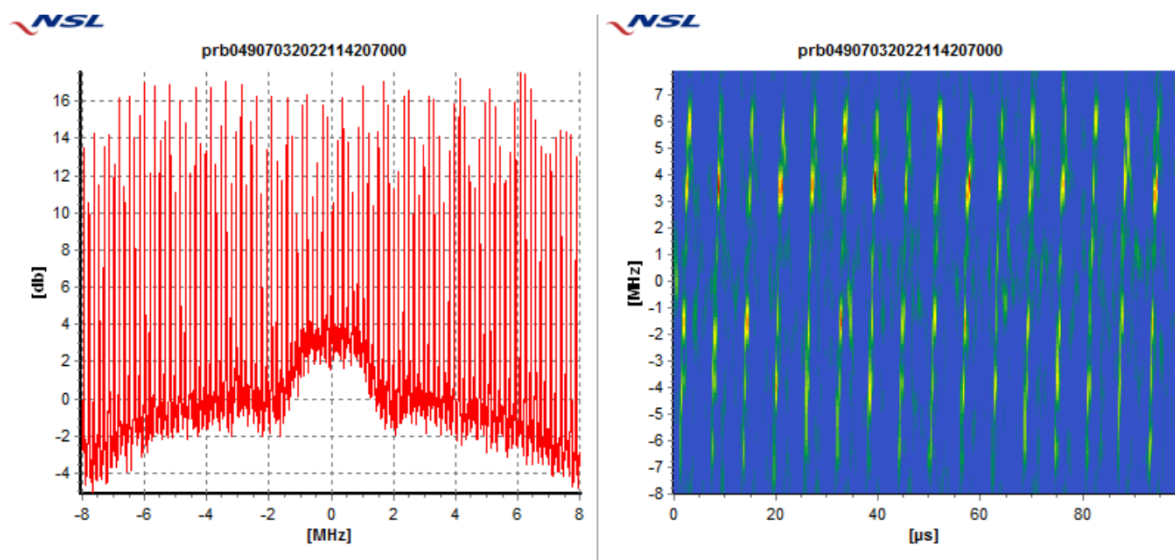
Rušeno=1 Nerušeno=0 ● 0 ● 1



Průběh hodnot parametrů kvality v čase



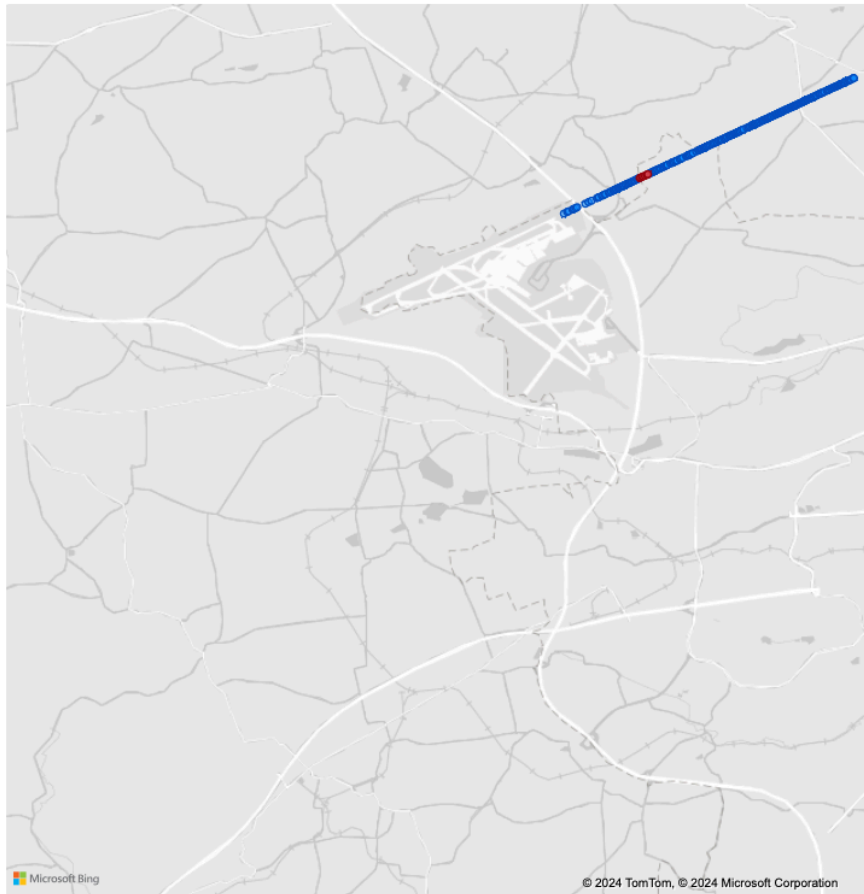
Grafický výstup z detektoru NSL GSS100D korespondující události GNSS rušení
(07/03/2022)



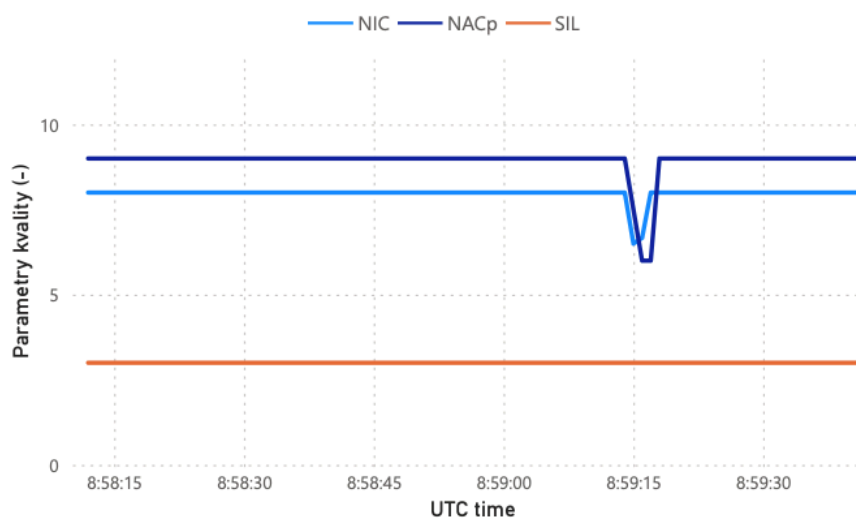
Příloha 38 – Report zaznamenané události 08/03/2022

Trajektorie zarušeného letu

Rušeno=1 Nerušeno=0 ● 0 ● 1



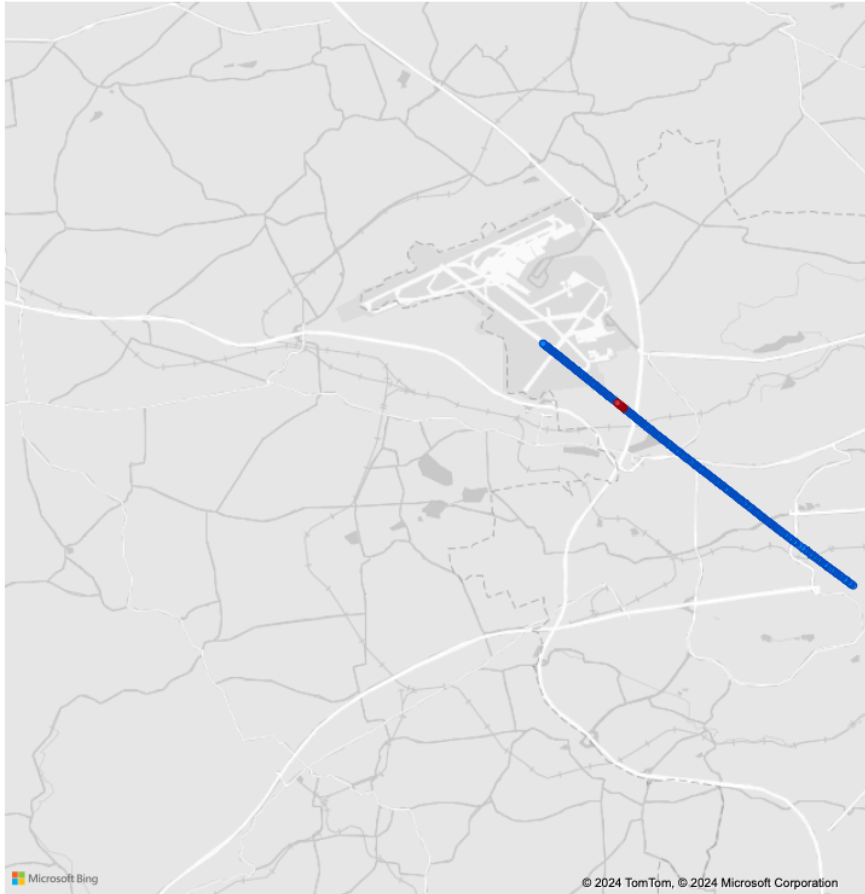
Průběh hodnot parametrů kvality v čase



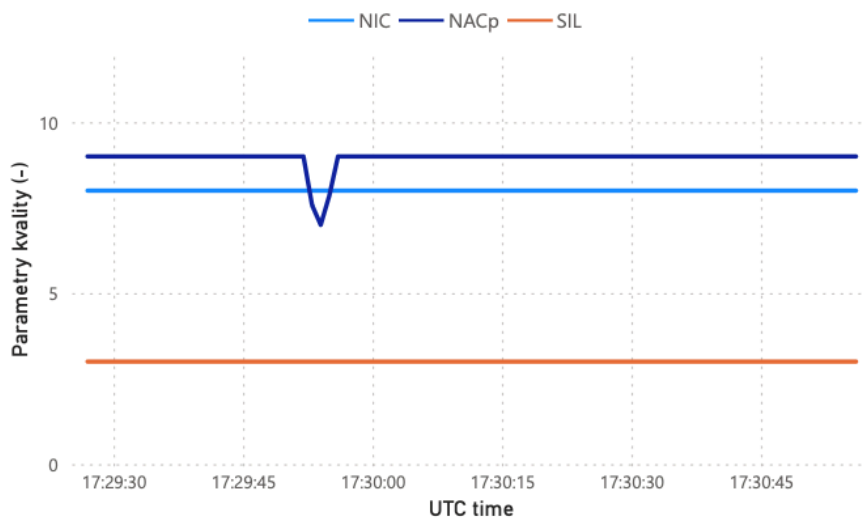
Příloha 39 – Report zaznamenané události 20/03/2022

Trajektorie zarušeného letu

Rušeno=1 Nerušeno=0 ● 0 ● 1



Průběh hodnot parametrů kvality v čase



Příloha 40 – Trend vývoje počtu pohybů v rámci CTR LKPR v letech 2019 – 2024

