Metodika detekce nezákonného ovlivňování signálu GNSS prostřednictvím využití systému ADS-B

CK01000183-V1

Název projektu: Výzkum vlivu rušení GNSS signálu v oblasti letectví

Číslo projektu: CK01000183

Hlavní řešitel projektu: České vysoké učení technické v Praze

Druhý řešitel projektu: GNSS CENTRE OF EXCELLENCE, zájmové sdružení právnických osob

Autorským tým:

Ing. Stanislav Pleninger, Ph.D.
doc. Ing. Jakub Hospodka, Ph.D.
doc. Ing. Jakub Kraus, Ph.D.
doc. Ing. Ivan Nagy, CSc.
Ing. Jakub Steiner
Ing. Tereza Topková
Ing. Petr Lukeš
Ing. Terézia Pilmannová, MBA

Metodika detekce nezákonného ovlivňování signálu GNSS prostřednictvím využití systému ADS-B

Autorský tým:

Ing. Stanislav Pleninger, Ph.D.

doc. Ing. Jakub Hospodka, Ph.D.

doc. Ing. Jakub Kraus, Ph.D.

doc. Ing. Ivan Nagy, CSc.

Ing. Jakub Steiner

Ing. Tereza Topková

Ing. Petr Lukeš

Ing. Terézia Pilmannová, MBA

Tato metodika detekce nezákonného ovlivňování signálu GNSS prostřednictvím využití systému ADS-B byla vytvořena se státní podporou Technologické agentury ČR v rámci Programu DOPRAVA 2020+

Obsah

Seznam zkratek 4
Úvod 6
1 Cíl metodiky a očekávaní uživatelé 7
2 Definování základního rámce metodiky 8
3 Metodika detekce rušení typu jamming na základě parametrů obsažených v ADS-B zprávách 11
3.1 Předpoklady kladené na vstupní data 11
3.1.1 Vytvoření seznamu nekompatibilních letadel („Black list“) 11
3.1.2 Kontrola parametru SIL_{SUPP} 11
3.1.3 Filtr na vzlétající letadla 12
3.1.4 Filtr na letadla mající náklon 12
3.2 Metoda porovnávání teoreticky modelované hodnoty NAC_P s aktuálně vysílanou 12
3.2.1 Základní teoretické vztahy pro odhad parametru NAC_P 13
3.2.2 Algoritmus detekce rušení 14
3.3 Metoda kombinací 19
3.3.1 Definice kombinací parametrů 19
3.3.2 Stanovení kombinací v prostředí bez GNSS rušení 19
3.3.3 Kombinace s výskytem GNSS rušení 19
3.3.4 Konstrukce diskrétního matematického modelu 19
3.3.5 Použití modelu pro detekci rušení 21
4 Vyhodnocení úspěšnosti metodiky 22
4.1 Metoda užitá k vyhodnocení 22
4.2 Vyhodnocení metod a jejich kombinovaného užití 23
5 Zhodnocení novosti postupu a ekonomické aspekty využití metodiky 25
Použité zdroje 26
Příloha 1 – Problematika letadel těsně po zahájení letu 27
Příloha 2 – Výpočet náklonu letadla z dat obsazených ve zprávách ADS-B 1090 ES 28
Příloha 3 - Postup výpočtu HDOP s využitím dat z Almanach 29
Příloha 4 – Tabulka kombinací (matice V) vytvořená v rámci Metody kombinací 31

Seznam zkratek

1090ES	1090 MHz Extended Squitter
ADS-B	Automatic Dependent Surveillance – Broadcast (Automatický závislý přehledový systém – vysílání)
ASTERIX	All-purpose Structured EUROCONTROL Surveillance Information Exchange
ATM	Air Traffic Management (uspořádání letového provozu)
ATS	Air Traffic Service (letové provozní služby)
BDS	B-Comm Data Selector
ČTÚ	Český telekomunikační úřad
DEM	Digital Elevation Model (digitální model terénu)
DF	Downlink Format (formát sestupného spoje)
DME	Distance Measuring Equipment (UKV měřič vzdálenosti)
ECEF	Earth-Centred, Earth-Fixed
EDAS	EGNOS Data Access Service
EHS	Enhanced Surveillance
EPU	Estimated Position Uncertainty
EUROCONTROL	European Organisation for the Safety of Air Navigation
FAA	Federal Aviation Administration
FN	False Negatives (falešně negativní)
FP	False Positives (falešně pozitivní)
GNSS	Global Navigation Satellite System (globální navigační satelitní systémy)
GPS	Global Positioning System (globální polohový systém)
GVA	Geometric Vertical Accuracy
HAE	Height Above Ellipsoid (výška nad elipsoidem)
HFOM	Horizontal Figure of Merit
HIL	Horizontal Integrity Limit
HPL	Horizontal Protection Level
IAS	Indicated airspeed (indikovaná vzdušná rychlost)
ICAO	International Civil Aviation Organization
IRU	Inertial Reference Unit (inerční referenční jednotka)
LOC	Localizer (kurzový maják systému ILS)
MLAT	Multilateration (multilaterace)
MOPS	Minimum Operational Performance Standards (standardy minimální provozní výkonnosti)

NAC	Navigation Accuracy Category
NAC_P	Navigation Accuracy Category - position
NAC_V	Navigation Accuracy Category - velocity
NaN	Not a Number
NAT-list	North Atlantic - list
NIC	Navigation Integrity Category
NM	Network Manager (správce sítě /manažer struktury vzdušného prostoru)
NPAL	Non-Performance ADS-B Aircraft List
NSAL	No Services Aircraft List (FAA)
PRN	Pseudorandom noise
Rc	Containment Radius
RFI	Radio Frequency Interference (radiofrekvenční interference)
RNP APCH	Required Navigation Performance Approach (specifikace přiblížení s požadovanou navigační výkonností)
SA	Selective Availability
SBAS	Satellite-Based Augmentation System
SDA	System Design Assurance
SF SPS	Single Frequency Standard Positioning Service
SIL	Source Integrity Level
SIL_{SUPP}	Source Integrity Level Supplement
SIS	Signal-in-Space
SSR	Secondary Surveillance Radar (sekundární přehledový radar)
TAS	True Airspeed (pravá vzdušná rychlost)
TDOA	Time Difference of Arrival (časový rozdíl příchodu signálu)
TN	True Negatives (skutečně negativní)
TP	True Positives (skutečně pozitivní)
UDREi	User Differential Range Error
UERE	User Equivalent Range Error
ÚZPLN	Ústav pro odborné zjišťování příčin leteckých nehod
VFOM	Vertical Figure of Merit
WGS-84	World Geodetic System from 1984 (Světový geodetický systém 1984)

Úvod

Tento dokument obsahuje popis metodiky určené pro detekce nezákonného ovlivňování signálu GNSS prostřednictvím využití systému ADS-B. Tato metodika byla vytvořena v rámci projektu Výzkum vlivu rušení GNSS signálu v oblasti letectví (CK01000183), se státní podporou Technologické agentury České republiky v rámci Programu DOPRAVA 2020+.

Metodika jako vstupní data využívá informace obsažené v přijatých zprávách vysílaných letadly prostřednictvím technologie Automatic Dependent Surveillance – Broadcast 1090 MHz Extended Squitter (ADS-B 1090 ES). Nezákonným ovlivňováním signálu GNSS se v kontextu této metodiky předpokládá rušení GNSS signálu typu „Jamming“.

1 Cíl metodiky a očekávaní uživatelé

Cílem metodiky je poskytnout postup jak z dat vysílaných z letadla prostřednictvím technologie Automatic Dependent Surveillance – Broadcast 1090 MHz Extended Squitter (ADS-B 1090 ES) určit, zda signál GNSS, přijímaný letadlovým přijímačem, je v daném místě zasažen úmyslným rušícím signálem typu „Jamming“. Metodika využívá data, která jsou volně dostupná všem subjektům, kteří jsou schopni přijímat a zpracovávat zprávy vysílané letadly prostřednictvím ADS-B 1090 ES, dle specifikace uvedené v ICAO Annex 10 Volume IV, Surveillance Radar and Collision Avoidance Systems [4] (resp. v Leteckém předpisu o civilní letecké telekomunikační službě svazek 1 L10/IV), a MOPS for 1090 MHz Extended Squitter Automatic Dependent Surveillance Broadcast (ADS-B) [6, 7].

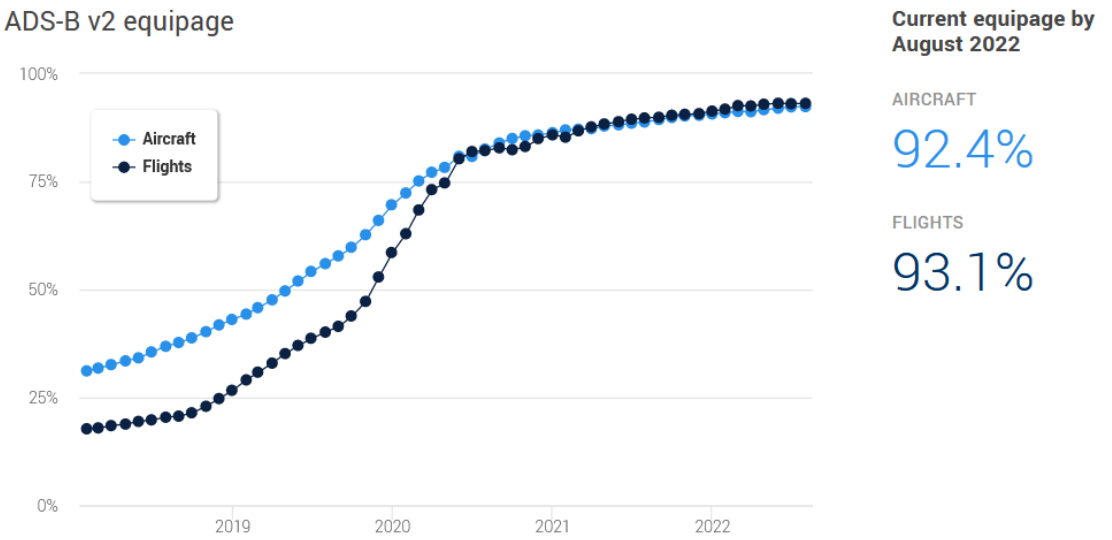
Metodika by se měla uplatnit v oblasti letectví, kde cílem je rozšířit možnosti detekce rušení pro tuto specifickou oblast. Předpokládanými uživateli metodiky jsou především poskytovatelé letových navigačních služeb, kterým v reálném čase může poskytnout informaci o potenciální příčině degradace systémů, jež využívají signálu GNSS, a mohou tak lépe identifikovat dopad do provozních postupů. Následně tak mohou být lépe a včas informováni i uživatelé vzdušného prostoru pro něž GNSS dnes představuje jeden z dominantních zdrojů polohové a navigační informace. Poskytnutá informace, která může posádky letadel s předstihem připravit na možnou degradaci nebo nedostupnost GNSS signálu má výrazný dopad na bezpečnost letectví.

Na úrovni státní správy můžeme spatřovat jako jednoho z možných uživatelů Ministerstvo dopravy (MD ČR), stejně tak jako orgány dohledu, jako jsou Český telekomunikační úřad (ČTÚ) nebo Národní úřad pro kybernetickou a informační bezpečnost (NÚKIB), či Ústav pro odborné zjišťování příčin leteckých nehod (ÚZPLN), pro případné šetření a objasňování nestandardních událostí majících co dočinění s využitím signálu GNSS.

2 Definování základního rámce metodiky

Metodika cílí na problematiku jak z dat vysílaných technologií ADS-B poznat, že přijímaný signál GNSS, na základě kterého je tvořena vysílaná polohová informace, je ovlivněn rušivým signálem (je pod vlivem RFI). Metodika uvažuje s technologií 1090 ES (1090 MHz Extended Squitter), která se stala celosvětově uznávanou a podporovanou technologií ADS-B. Současně je v rámci této technologii uvažováno se standardem označovaným jako ICAO ADS-B verze 2, pro kterou je stanovena povinnost na vzdušný segment v Evropském regionu dle prováděcí nařízení komise (EU) č. 1028/2014, rozšiřující nařízení č 1207/2011. Toto nařízení říká, že všechna letadla jejichž maximální vzletová hmotnost přesahuje 5700 kg nebo mající maximální cestovní rychlost přesahující 250 uzlů musí být vybavena technologií ADS-B OUT.

Z tohoto důvodu metodika nepostihuje technologie 1090 ES ADS-B ICAO verze 0 a 1. Stejně tak jako metodika nepostihuje funkcionality a dostupné parametry specifikované v ICAO verze 3. Nelze totiž předpokládat, že by v dohledné době byla jakákoliv povinnost verze 3 aplikována do evropské legislativy, nebo že by došlo k masovější implementaci v rámci existujícího letového parku provozovaného v Evropě. Současnou míru vybavení letadel technologií ADS-B verze 2 v Evropském regionu ilustruje obrázek 1.



Obrázek 1.: Graf popisuje míru vybavení ADS-B verze 2 letadel a letů operujících v oblasti NM (Network Manager). Míra vybavení letadla je procento letadel vybavených ADS-B v2 vzhledem k celkovému letadlovému parku. Míra vybavení letů je procento letů provedených letadly vybavenými ADS-B v2 vzhledem k celkovému počtu letů [11].

Postupy odhalování rušení mohou být cíleny na charakter rušení z pohledu jeho trvání:

- Metodika postavená na odhalování přítomnosti rušení, které je v daném místě časově krátkodobé.
- Metodika postavená na odhalování přítomnosti rušení, které je v daném místě časově dlouhodobé (sledování výskytů rušení z delšího časového pohledu) [1].

Tato metodika je zaměřena na odhalování krátkodobého rušení, jelikož jeho detekce je náročnější.

Z hlediska typu úmyslného rušení můžeme k rušivému signálu přistupovat z pohledu:

- Jamming – záměrné vysílání signálu (energie) v pásmech odpovídajících frekvenčním pásmům GNSS způsobující interferenci, kdy přijímač není schopen správně nebo vůbec zpracovat a vyhodnotit GNSS signál.
- Spoofing – vysílání falešných signálů GNSS za účelem manipulace s informací o poloze nebo přesném čase. („Meaconing“ je z pohledu této metodiky považován za speciální případ spoofingu.)

Tato metodika je určena pro odhalování rušení typu Jamming.

Z pohledu Jamming lze výsledný dopad do technologie ADS-B pozorovat jako:

- Nejsou vysílány žádné polohové informace ve zprávách ADS-B (resp. nejsou vysílány polohové zprávy) – Případ 1.
- Jsou vysílány polohové informace, ale obsažená polohová informace je znehodnocena. (vykazuje příznaky degradace) – Případ 2.

Případ 1. je možné identifikovat, pokud je cíl kontinuálně sledován přehledovou technologií nezávislou na GNSS, kdy je možné i po ztrátě ADS-B zpráv stále sledovat přítomnost (existenci) cíle, přestože od něj nejsou přijímána ADS-B data. Může jít např. o technologii multilaterace (MLAT), která jako nezávislý kooperativní přehledový systém počítá polohu na základě principu TDOA (rozdílu času příchodu signálu). Pokud existuje více takto zasažených cílů, je možné přikročit k odhadu pozice rušičky, a to ze znalosti místa ztráty vysílání polohové informace a ze znalosti místa obnovení vysílání polohové informace. Možný přístup viz [12].

Případ 2. je identifikovatelný na základě zkoumání změny parametrů, které v reálném čase popisují kvalitu polohové informace vysílané v ADS-B zprávách. Na základě degradace těchto parametrů je možné indikovat rušení ještě před úplnou ztrátou vysílání polohové informace. V rámci tohoto případu dochází i k fluktuaci vysílané polohy (souřadnic zeměpisné délky a zeměpisné šířky), která nicméně nemusí být nikterak význačná, aby se dala použít jako kritérium pro identifikování jammingu, obzvláště pokud předpokládáme pohybující se letadlo za přítomnosti neurčitosti jeho budoucí polohy. Navržená metodika se zabývá odhalováním rušení, které je založeno na změně parametrů vysílaných v ADS-B zprávách (Případ 2).

Pro zkoumání rušení na základě změn parametrů kvality V ADS-B ICAO verzi 2 byly identifikovány následující parametry jež je možné využít: NAC (NAC_P, NAC_V), NIC, SIL, SIL_{SUPP}, SDA, GVA.

SIL (Source Integrity Level) – je užit k definování pravděpodobnosti, že oznamovaná horizontální polohová informace přesahuje integrity kontejnment (kružnici definovanou poloměrem Rc) definovaný parametrem NIC, bez vydání varovné informace, za předpokladu, že nenastala chyba avioniky. Tj. SIL se vztahuje k Signal-in-Space (SIS).

NIC (Navigation Integrity Category) – nese informaci o hodnotě Rc (poloměr integrity kontejnmentu). Tato hodnota je odvozena z HPL (Horizontal Protection Level), resp. z HIL (Horizontal Integrity Limit).

SIL_{SUPP} (Source Integrity Level Supplement). – definuje, zda je hlášená pravděpodobnost SIL založena na pravděpodobnosti za hodinu nebo pravděpodobnosti na vzorek. Pravděpodobnost překročení integrity kontejnmentu pro GNSS polohový zdroj je založena na pravděpodobnosti za hodinu, protože NIC bude odvozeno z HPL, který je založen na pravděpodobnosti $1x10^{7}$ za hodinu. Pravděpodobnost překročení integrity kontejnmentu pro zdroje polohy IRU, DME/DME a DME/DME/LOC může být založena na pravděpodobnosti na vzorek.

SDA (System Design Assurance) – udává pravděpodobnost, s jakou může dojít k vyslání chybné informace, jež by byla způsobena chybou ADS-B systému. (ADS-B systém, v tomto kontextu, zahrnuje:

přenosové zařízení ADS-B, zařízení pro zpracování ADS-B, zdroj polohové informace a jakékoli další zařízení, které zpracovává údaje o poloze přenášené systémem ADS-B.)

NAC (Navigation Accuracy Category) – existují dvě varianty tohoto parametru: NAC_P pro polohovou informaci, a NAC_V pro rychlost. NAC_P poskytuje indikaci přesnosti vysílané polohové informaci založené na parametru Estimated Position Uncertainty (EPU). EPU je definována jako poloměr kruhu, se středem v oznamované pozici tak, že pravděpodobnost, že skutečná poloha letadla leží mimo tento kruh je 0,05 [6, 7]. V případě že je polohová informace generována GPS resp. GNSS systémem, EPU je běžně nazýváno také jako HFOM (Horizontal Figure of Merit)[1].

GVA (Geometric Vertical Accuracy) – poskytuje indikaci přesnosti oznamované geometrické výšky. GVA je odvozen z parametru VFOM (Vertical Figure of Merit), který je poskytován GNSS zdrojem polohové informace. Geometrická výška poskytovaná v rámci ADS-B zprávy je definovaná jako vertikální vzdálenost letadla nad plochou elipsoidu WGS-84 (normála k elipsoidu). Tato výška je také známá jako výška nad elipsoidem – Height Above Ellipsoid (HAE).

[1] Horizontal Figure of Merit (HFOM) je poloměr kruhu v horizontální rovině (lokální rovina tečná k elipsoidu WGS-84), se středem ve skutečné pozici, který popisuje oblast, ve které je zaručeno alespoň s 95% pravděpodobností, že v době platnosti, bude obsahovat indikovanou horizontální polohu za bezporuchových podmínek [10].

3 Metodika detekce rušení typu jamming na základě parametrů obsažených v ADS-B zprávách

Tato metodika je zaměřena na odhalování krátkodobého rušení typu jamming pomocí parametrů kvality obsažených v ADS-B 1090ES zprávách, což představuje pokročilejší řešení oproti přístupu založeného pouze na vyhodnocování přítomnosti nebo nepřítomnosti vysílaných ADS-B dat.

Z hlediska metodiky jsou navrženy dvě metody, které je doporučeno využívat paralelně (současně), kde svými výsledky se mohou vzájemně doplňovat. Pokud z hlediska užití metodiky je požadována co největší jistota ohledně deklarace přítomnosti rušení, pak by tento stav měl být prohlášen pouze tehdy pokud obě metody indikují rušení. Pokud naopak z hlediska užití metodiky je potřeba z hlediska bezpečnosti co nejvčasnější indikace, kdy je důležité pracovat/signalizovat již jakékoliv podezření na rušení, pak je možné využít přístupu, kdy alespoň jedna z metod indikuje rušení.

3.1 Předpoklady kladené na vstupní data

V této části jsou popsány kroky, které souvisí s vyloučením letadel, jejichž data není možné použít ve vlastní metodice. Jde o určitý soubor předpokladů o vstupních datech, které by měly být splněny, aby mohla být informace od daného letadla použita v rámci metodiky.

3.1.1 Vytvoření seznamu nekompatibilních letadel („Black list“)

Jedním z předpokladů úspěšného fungování metodiky je využívat signálů (zpráv) od letadel, která neposkytují ve vysílaných zprávách systematicky chybná data. Proto by měl být uživatelem udržován seznam 24 bitových ICAO letadlových adres, do kterého by měla být zařazována letadla, jejichž data nebudou nikdy vstupními daty pro vyhodnocení dle metodiky. Existují a stále bude existovat jisté procento ADS-B instalací, které systematicky vysílají chybné informace. Takovýto seznam potenciálně nekompatibilních letadel by si měl uživatel vytvářet v rámci dlouhodobějšího časového horizontu. Měl by využít i aktivitu EUROCONTROL, kde existuje Non-Performance ADS-B Aircraft List (NPAL), který je koordinován s NAT-list, NSAL (FAA)[2].

Pro účely níže popsané metodiky by do tohoto seznamu měla být především zařazena všechna letadla, která dlouhodobě vysílají hodnotu NACp nebo NIC menší než 7.

3.1.2 Kontrola parametru SIL_{SUPP}

Dalším ze základních předpokladů je zjistit, zda polohové informace vysílané v ADS-B zprávách jsou založeny na informacích z GNSS senzorů, protože standardy [6, 7] připouští, že zdrojem mohou být i jiné navigační senzory (IRU, DME/DME and DME/DME/LOC). K tomu lze použít parametr SIL_{SUPP}. SIL_{SUPP} se nachází ve zprávě Aircraft Operation Status Message nebo ve zprávě Target State and Status Message.

Pokud je polohová informace vysílaná v ADS-B zprávě založena na GNSS senzoru musí být parametr $SIL_{SUPP}=0$.

[2] NSAL (No Services Aircraft List) je seznam letadel u nichž zpracování ADS-B dat v automatizovaných ATC systémech představuje riziko. (Tj. letadla jejichž avionický systém vysílá nesprávná ADS-B data).

3.1.3 Filtr na vzlétající letadla

V chování parametrů NIC a NAC_P bylo vypozorováno, že navzdory absenci GNSS rušení, v prvních okamžicích po přechodu z vysílání Surface Position Message na Airborne Position Message může docházet k vysílání nulových hodnot parametru NAC_P. Tento jev by při vyhodnocování ADS-B dat pro výskyt GNSS rušení mohl způsobovat falešná hlášení o výskytu rušení. Jev byl pozorován převážně u vrtulníků a letadel všeobecného letectví. Data vysílána těmito letadly není žádoucí z metodiky vyřadit, a tedy je žádoucí tento jev ošetřit, aby nedocházelo k falešným hlášením o rušení. Příklady grafů zobrazující průběh parametru NAC_P při tomto jevu je možné najít v příloze 1.

Pokud první přijatá zpráva od letadla obsahuje NAC_P rovno nule, pak zprávy přijaté v časovém úseku T nejsou předmětem vyhodnocování. Doporučený časový úsek T je 20 s, viz příloha 1. Po uplynutí tohoto časového úseku při absenci výskytu GNSS rušení dle provedených pozorování již nedohází k vysílání nulových hodnot parametru NAC_P, a tedy data mohou být zpracována dle běžných kroků metodiky. (Pokud první přijatá ADS-B zpráva neobsahuje hodnotu NAC_P rovnu nule, tak jsou předmětem vyhodnocení všechny přijaté zprávy z daného letadla.) Toto pravidlo umožňuje zpracovávat ADS-B data i při pojíždění letadel po odbavovací ploše a zároveň minimalizuje riziko chybových hlášení o výskytu rušení v důsledku jevu popsaném v předcházejícím odstavci.

3.1.4 Filtr na letadla mající náklon

Na základě analýzy reálných dat bylo zjištěno, že u letadel, která mají v daném okamžiku příčný náklon může docházet k dočasné fluktuaci oznamovaných parametrů. Patrně v důsledku zakrytí části viditelného 360 stupňového horizontu, nebo v důsledku výrazného pootočení (změny) vyzařovací charakteristiky GNSS anténního systému vůči standardnímu horizontu.

Úhel příčného náklonu (Roll angle) je standardně vyslýchán Mód S radary v rámci dotazu na BDS registr 50_{hex}, který by měl letadlový odpovídač podporovat v rámci „Enhanced Surveillance (EHS) EUROCONTROL Mode S mandate“ v Evropském regionu. Bohužel úhel náklonu není dostupný parametr v rámci zpráv 1090 ES. Pokud má uživatel přístup k datům poskytovaných SSR, například prostřednictvím ASTERIX Cat. 48, je mu tato informace dostupná v rámci datové položky I048/250. Pokud je uživatel schopen pasivního příjmu i ostatních zpráv na frekvenci 1090 MHz, může využít dekódování zpráv DF 20/21, kde k identifikování příslušného BDS registru 50_{hex} je možné využít postupu uvedeného v [2], [3]. Pokud uživatel nemá ani jednu z výše uvedených možností a pracuje čistě jenom s ADS-B 1090 ES daty, je možné k přibližnému odhadu příčného náklonu využít postupu uvedeného v Příloze 2.

3.2 Metoda porovnávání teoreticky modelované hodnoty NAC_P s aktuálně vysílanou

Metoda je založena na určování maximální možné aktuální změny oznamované chyby polohové informace vysílané prostřednictvím parametru NAC_P v rámci časové posloupnosti změny tohoto parametru. Odhaduje se, zda k možnému poklesu tohoto parametru mohlo dojít vlivem standardních vlivů a podmínek, nebo zda není možné tento pokles již takto vysvětlit. Díky tomuto přístupu je možné identifikovat znehodnocení polohové informace vlivem rušení dříve, než dojde ke kompletní ztrátě vysílání polohové informace ve zprávách ADS-B.

3.2.1 Základní teoretické vztahy pro odhad parametru NAC_P

Parametr NAC_P je odvozen v odpovídači sekundárního radaru z parametru HFOM (Horizontal Figure of Merit)[3], který je vypočítáván a zasílán spolu s vlastními polohovými daty z GNSS přijímače. Vztah mezi parametrem NAC_P a parametrem HFOM je uveden v Tabulce 1. HFOM representuje horizontální navigační přesnost na 95 % hladině pravděpodobnosti. Dle dokumentu [10], HFOM je poloměr kružnice v horizontální rovině (lokální rovině tečné k elipsoidu WGS-84), jejíž střed je ve skutečné pozici (letadla), která ohraničuje oblast, ve které se bude nacházet indikovaná pozice s alespoň 95 % pravděpodobností za předpokladu bezporuchového stavu v době použitelnosti.

Tabulka 1.: Vztah mezi HFOM (= EPU) a NAC_P dle DO 260B a ED 102A [6, 7]

NAC_p	EPU
0	≥ 18,52 km (nebo neznámá přesnost)
1	< 18,52 km
2	< 7,408 km
3	< 3,704 km
4	< 1852 m
5	< 926 m
6	< 555,6 m
7	< 185,2 m
8	< 92,6 m
9	< 30 m
10	< 10 m
11	< 3 m
12	Rezervováno
13	Rezervováno
14	Rezervováno
15	Rezervováno

Výpočet parametru HFOM se může lišit pro každý GNSS přijímač v závislosti na jeho typu (ICAO standard [4] ani dokumenty [6, 7, 10] nespecifikují jeho výpočet). Nicméně obecně jeho výpočet závisí na dvou základních proměnných: HDOP (Horizontal Dilution of Precision) a sigma, jež jsou při zjednodušeném popisu svázány dle vzorce 1.

$$HFOM = 2 \cdot \sqrt{\sigma_x{}^2 + \sigma_y{}^2} = 2 \cdot \frac{1}{\sigma}\sqrt{\sigma_x{}^2 + \sigma_y{}^2} \cdot \sigma = 2 \cdot \sqrt{d_{11} + d_{22}} \cdot \sigma = 2 \cdot HDOP \cdot \sigma \qquad (1)$$

Kde:

HDOP – Horizontal Dilution of Precision

$\sigma_x{}^2$, $\sigma_y{}^2$ - prvky na diagonále kovarianční matice vektoru chyb polohového vektoru $(x, y)^T$

[3] Některé přijímače GPS, zejména ty, které vyhovují RTCA/DO-236B, vydávají parametr nazvaný Estimated Position Uncertainty (EPU) [9].

σ - sigma je zde teoretická střední chyba měřené pseudovdálenosti na hladině pravděpodobnosti 1σ=68 %[4], přes všechny satelity. Pro určení sigma, můžeme přistupovat k letadlovým GNSS přijímačům z pohledu třech možných verzí:

1) SA-on (takovéto přijímače se stále mohou vyskytovat)
2) SA aware (nebo SA-off)
3) SBAS augmented GPS (hodnota sigma může být podstatně nižší a mění se díky přijímání korekčních dat z SBAS)

Jakou verzi GNSS přijímače letadlo využívá nelze z dat poskytovaných letadlem přímo určit, nicméně dá se s určitou mírou neurčitosti odhadnout. HDOP lze vypočítat ze znalosti polohy přijímače (letadla) a ze znalosti polohy satelitů, které jsou k výpočtu polohy použity. Metodika předpokládá, že letadlový GNSS přijímač využívá k určení své polohy vždy (minimálně) systém GPS. Polohy satelitů je možné pro daný časový okamžik spočítat s využitím dat z Almanach[5]. (Postup viz příloha 3). Nicméně které satelity (a to hlavně satelity nacházející se nízko nad horizontem) daný přijímač ve výpočtu skutečně užívá, nelze jednoznačně stanovit (například s ohledem na individuálně užívanou „Elevation Mask“[6] u konkrétního GNSS přijímače). Proto je v daném odhadu HDOP nutno připustit určitou nejistotu vycházející z předpokladu, že odhadovaný počet satelitů využívaný daným GNSS přijímačem se liší od reálné skutečnosti, a tedy je odhadována určitá nejpesimističtější možná konfigurace.

U nízkoletících letadel např. v blízkosti hornatého terénu, je potřeba realisticky odhadnout možnou viditelnost satelitů z pohledu přijímače, aby byly na minimum omezeno množství falešných výstrah v důsledku reálné nedostupnosti viditelnost satelitů. Za tímto účelem by měl být do modelu odhadu parametru HDOP implementován DEM (Digital Elevation Model).

3.2.2 Algoritmus detekce rušení

Metoda předpokládá, že na začátku (tj. v prvním kroku algoritmu) není letadlo pod vlivem rušení.

V každém kroku algoritmu (v následujícím textu označovaném jako *t*) jsou k dispozici následující vstupní hodnoty získané z ADS-B zprávy/zpráv:

- Lat (zeměpisná šířka)
- Lon (zeměpisná délka)
- Výška (v ideálním případě geometrická výška nad elipsoidem WGS 84, nebo barometrická výška)
- NAC_P

Základní kroky algoritmu, schematicky naznačené na obrázku 3, jsou následující:

[4] Pro SF SPS (Single Frequency Standard Positioning Service) přijímač, lze předpokládat, že UERE (user equivalent range error) je řádově 16,3 m 95 % (při průměrném stavu ionosféry). Tomu odpovídající hodnota 1-sigma UERE 8,3 m [8].

[5] Almanach (Almanac) data je z hlediska přesnosti redukovaný set parametrů hodin a efemerid aktivních satelitů na oběžné dráze. Almanach data umožňují vypočítat hrubý odhad souřadnic družic, který je potřebný pro získání signálu přijímačem.

[6] Elevation Maska definuje uživatelsky v přijímači GNSS elevační úhel, kdy satelity nacházející se pod tímto úhlem vůči přijímači již nejsou zahrnuty do výpočtu.

V každém kroku se ze vstupních hodnot spočte:

1) Dle oznamovaného NAC_P se spočte $HFOM_{max}$, dle tabulky 1.

2) Z Lat, Lon, a výšky letadla se vypočte HDOP. Jde o teoretický odhad nejlepšího, tj. nejmenší možné hodnoty HDOP. HDOP vychází z modelu pozic satelitů pro daný čas a letadlo. Pokud je odhad HDOP založen na datech Almanach (postup viz příloha 3), je nutno mít v reálném čase informaci o stavu, zda v dané konstelaci satelitů nevznikla na nějakém satelitu porucha. Pro tento případ je potřeba mít v reálném čase vstup ze systému EDAS. (Aktuální nekonsistenci v datech vysílaných satelitem (alarm situation) lze detekovat například z SBAS Message type 6. V Message type 6 je vysílán parametr UDREi pro každý satelit dle PRN čísla. Hodnota 15 u parametru UDREi znamená že satelit je v alarm situation. Hodnota 14 u parametru UDREi znamená že daný satelit není systémem monitorován. „Time-out time" pro Message type 6 je 12 sekund.)

3) Spočte se nejpesimističtější odhad hodnoty sigma. Tj. odhad největší možné hodnoty jaké může sigma nabýt - σ_{max}. V daný čas se předpokládá, že letadlo není zasaženo žádným rušícím signálem.

   A) Pokud u daného letadla jsou všechny doposud zachycené hodnoty $NACp \leq 9$. U GNSS přijímačů verze 1 a 2, by se hodnota σ, kterou přijímač používá k výpočtu HFOM neměla v krátkodobém časovém horizontu měnit. Variabilitu vztahující se k možné změně σ vyplývající z aplikací ionosférických korekcí dle Klobucharova modelu není potřeba brát v úvahu. (Klobucharův model nepředstavuje obraz ionosféry v reálném čase a není přímo založen na žádné aktuální informaci o stavu ionosféry. Parametry alfa a beta jsou vysílány v podrámci 3 navigační zprávy a mění se maximálně jednou za den a minimálně jednou za 6 dní.) Přijímače typu 1 a 2 by za standardních podmínek měly vysílat NAC_P=8, resp. NAC_P=9. Pokud zavedeme předpoklad, že odhad chyby měřené pseudovzdálenosti má v čase neměnnou směrodatnou odchylku sigma[7], maximální hodnota parametru sigma se dá zpřesnit s využitím měnící se hodnoty HDOP v delším časovém horizontu (tj. v časovém úseku, kdy se daný let nachází ve sledování daného systému). V časovém intervalu se určí $\hat{\sigma}_{\max}$ jako minimální hodnota ze všech hodnot σ_{max} na intervalu $\langle t2\,, t1\rangle$.

   B) Pokud u daného letadla je alespoň jednou zachycena hodnota NAC>9. Uvažujeme tento GNSS přijímač jako přijímač typu 3, který využívá příjmu korekčních dat ze systému SBAS, a který by za standardních podmínek měl vysílat NAC_P>9. Zde se spočte σ_{max} jen z aktuálního kroku (tj. nevyužije se odhad na základě odhadu σ_{max} a σ_{min} z více předchozích kroků).

Testování oznamovaného parametru NAC_P vůči odhadu založeném na sigma z předchozích kroků v případě, kdy $NAC_P(t) \leq NAC_P(t-1)$:

4) Spočte se největší (nejhorší) odhad možné hodnoty HFOM, tj. $HFOM_{max}$, resp. $\widehat{\mathrm{HFOM}}_{max}$. Kde $HFOM_{max}(t) = 2 * HDOP_{max}(t) * \sigma_{max}(t-n)$, resp. $\widehat{\mathrm{HFOM}}_{max}(t) = 2 * HDOP_{max}(t) * \hat{\sigma}_{\max}(t-n)$.

   Kde $\sigma_{max}(t-n)$ je poslední odhadnutá hodnota σ_{max} v čase, kdy byl let (příjem GNSS) identifikován jako nerušený dle metodiky. Resp. $\hat{\sigma}_{\max}(t-n)$ je minimální hodnota ze všech σ_{max} v čase, kdy byl let (příjem GNSS) identifikován jako nerušený dle metodiky.

   $HDOP_{max}(t)$ je určeno na základě dostupných dat v daném kroku dle stejného postupu jako v bodu 2, nicméně je nutné v tomto kroku brát pesimistický odhad tohoto parametru, tj. připustit, že

[7] Jediná možná variabilita pochází z korekcí na ionosférickou chybu dle Klobucharova modelu. Parametry Alfa a Beta v rámci Klobucharova modelu se mění maximálně jednou za den a minimálně jednou za 6 dní. Všechny satelity používají stejné parametry a většinou zůstávají stejné několik týdnů.

letadlo nevyužívá všechny teoreticky dosažitelné satelity, ale např. z důvodu aplikace „Elevation Mask“ bude parametr HDOP nabývat horších (větších) hodnot.

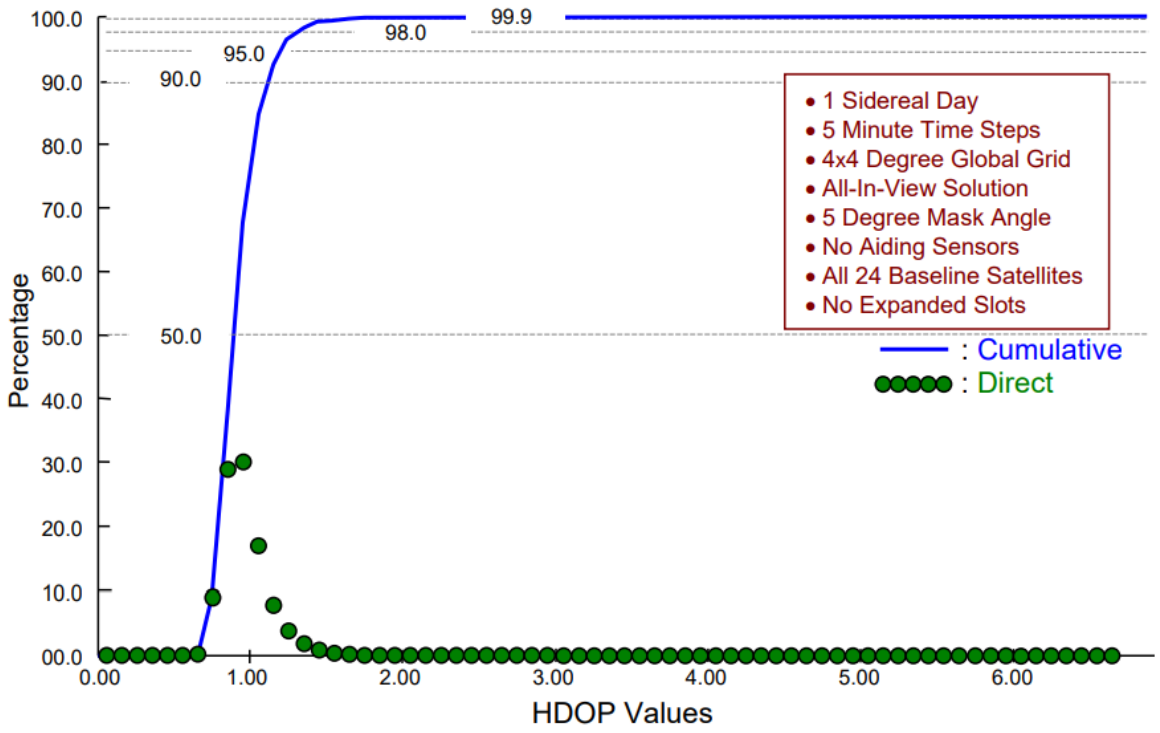
Jako vhodný nejpesimističtější odhad hodnoty $HDOP_{max}(t)$ může být použito $\mathrm{HDOP}_{max}(\mathrm{t}) = \max\{\mathrm{HDOP}(\mathrm{t}), 1{,}25\}$. Kde hodnota 1,25 vychází z dokumentu [8], jež uvádí, že pro GPS konstelaci by s 95 % pravděpodobností měla být hodnota HDOP vždy větší než 1,25 (viz obr. 2).

Lze předpokládat, že v případě existence rušení dochází k znehodnocení i polohové informace (tedy hodnot Lat, Lon, Výška), které již neodpovídají reálné pozici letadla, a tedy odhad HDOP je touto chybou zatížen. Nicméně z provedených experimentů rušení se ukázalo, že vysílaná polohová informace nedegraduje do té míry, aby chybná poloha měla nějaký výrazný dopad do odhadu hodnoty HDOP. Pokud bychom chtěli vliv tohoto jevu omezit na minimum, může uživatel pro výpočet polohy, a následného HDOP, v kroku testování využít odhadnutou polohu za pomoci trackeru.

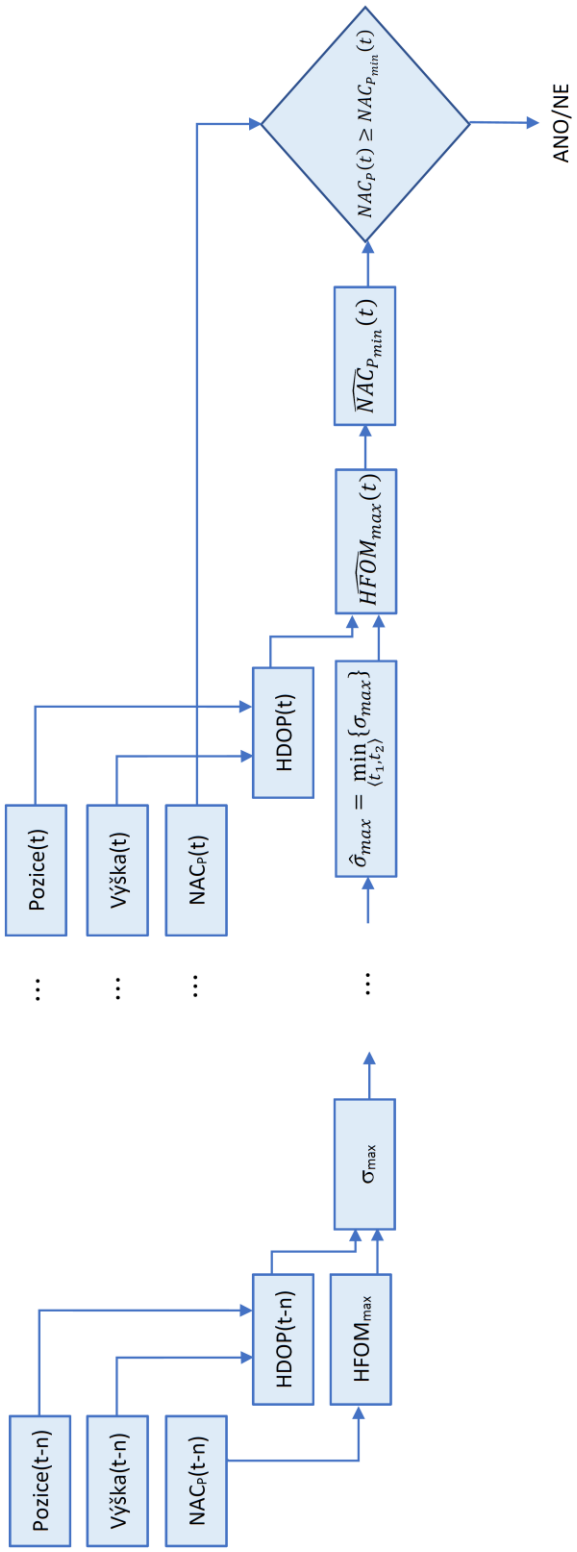
5) $HFOM_{max}$ se převede dle Tabulky 1. na NAC_{Pmin}. (Resp $\widehat{\mathrm{HFOM}}_{max}$ na $\widehat{\mathrm{NACp}}_{min}$.)
6) Provede se test, zda aktuální oznamovaná hodnota $NAC_P \geq NAC_{Pmin}$, resp $NAC_P \geq \widehat{\mathrm{NAC}}_{Pmin}$. Pokud je výsledek testu negativní (podmínka není splněna), je detekováno rušení.

Test indikující konec rušení jestliže NACP(t) > NACP(t-1):

Jestliže je letadlo v kroku t-1 ve stavu „rušeno“, a v kroku t dojde k nárůstu parametru NAC_P, tj. $NAC_P(t) > NAC_P(t\text{-}1)$, je potřeba určit úroveň tohoto parametru při které má dojít k indikci konce rušení. Aplikuje se postup dle kroku 4, 5 a 6, kde v kroku 4 se se použije nejpesimističtější odhad σ_{max} kterou by standardně mělo být zatíženo měření pseudovzdálenosti k jednotlivým satelitům. Tímto odhadem může být hodnota σ_{max}=15,6 m jako nejpesimističtější odhad UERE (User Equivalent Range Error) k GPS satelitu bez využití SBAS dle dokumentu [13]. Je třeba poznamenat, že regenerace letadlového GNSS přijímače trvá poměrně dlouho po ukončení rušení/vystoupení letadla z oblasti rušení [12], a tedy indikaci konce rušení je potřeba chápat v tomto kontextu.



Obrázek 2.: HDOP Distribuce pro systém GPS [8]



Obrázek 3.: Metoda založená na porovnávání teoreticky modelované hodnoty NACp s aktuálně vysílanou (pro letadlo kde NACp≤9)

3.3 Metoda kombinací

Metoda kombinací je založena na výskytu různých kombinací ADS-B parametrů kvality v ADS-B zprávách vysílaných letadlem, které je ovlivněno GNSS rušením oproti letadlu, které pod vlivem GNSS rušení není. Metoda kombinací využívá k detekci GNSS rušení diskrétní matematický model. První dva kroky metody popisují způsob získání vhodného vzorku tzv. učících dat, které slouží ke vhodnému nastavení modelu. Dále v kapitole je popsáno sestavení modelu, jeho nastavení a využití.

3.3.1 Definice kombinací parametrů

Kombinace ADS-B parametrů kvality jsou definovány jako kombinace jednotlivých hodnot parametrů kvality. V této metodě jsou pro tvorbu kombinací využity parametry NAC_P, NIC a SIL. Určitá kombinace je tedy trojce konkrétních hodnot těchto tří parametrů. Například kombinace [10, 9, 3] je definována hodnotami NAC_P=10, NIC=9 a SIL=3. Metoda, respektive diskrétní model však může být upraven pro využití libovolného množství dvou a více parametrů kvality.

3.3.2 Stanovení kombinací v prostředí bez GNSS rušení

Prvním krokem metody je stanovení množiny kombinací, které jsou vysílány letadly v prostoru bez výskytu GNSS rušení. Příkladem takovéhoto prostoru může být oblast nad oceány s dostatečným odstupem od pevniny, kde se nepředpokládá výskyt jakéhokoliv zdroje úmyslného GNSS rušení. Navzdory tomuto předpokladu by vybraná oblast měla být prověřena z hlediska výskytu vojenských cvičení, která mohou využívat silné GNSS rušení s dosahem desítky kilometrů. Výstupem tohoto kroku je určitá množina kombinací, které svou četností v daném vzorku dat dominují. Tyto kombinace reprezentující běžné neporuchové stavy normálního letu.

3.3.3 Kombinace s výskytem GNSS rušení

Druhým krokem metody je získání ADS-B dat z letadel, která prokazatelně byla pod vlivem GNSS rušení. V takovýchto datech je zapotřebí vyznačit časové úseky, kdy bylo letadlo pod vlivem GNSS rušení, ideálně prostřednictvím záznamu dat z palubních přístrojů. Dle předpokladu by se ve vyznačených úsecích měly vyskytovat nové kombinace, které v prvním kroku metody nebyly zaznamenány.

V projektu byl vzorek ADS-B dat pod vlivem GNSS rušení získán z několika měření, během kterých bylo využito více typů GNSS rušiček a letounů. Data z projektových měření byla dále doplněna o data z experimentů realizovaných jinými subjekty, u kterých bylo rovněž možné jednoznačně určit časový interval, kdy bylo letadlo pod vlivem rušení.

Při sběru těchto dvou datových se sad je potřeba brát na zřetel jejich početní vyváženost. Množství dat v jedné sadě by nemělo řádově převýšit množství dat v sadě druhé. Srovnatelné množství dat s a bez GNSS rušení zaručí, že anomální kombinace vyskytující se v datech bez vlivu GNSS rušení svou četností nepřevýší totožné kombinace indikující vliv GNSS rušení v druhé datové sadě.

3.3.4 Konstrukce diskrétního matematického modelu

Třetím krokem metody je sestavení diskrétního matematického modelu pro detekci kombinací, které jsou příznaky GNSS rušení, respektive identifikují stav, kdy je letadlo pod vlivem GNSS rušení.

Definice veličin vstupujících do modelu:

Vstupem do modelu jsou ADS-B data z prvních dvou kroků, tedy data, která obsahující zvolené parametry kvality (NAC_P, NIC a SIL) a informaci, jestli bylo letadlo v čase vysílání vystaveno GNSS rušení. Informace o vystavení letadla GNSS rušení je do dat zanesena jakožto diskrétní hodnota y která může nabývat dvou hodnot, a to 1 nebo 2. Hodnota 1 značí, že letadlo není pod vlivem GNSS rušení, zatímco hodnota 2 značí, že letadlo je pod vlivem GNSS rušení. Pro jednoduchost matematického zápisu budou veličiny NAC_P, NIC a SIL označovány jako x_1, x_2 a x_3. Rozsah hodnot, které tyto veličiny mohou nabývat je dán předpisem RTCA DO-260B / EUROCAE ED-102A [6, 7]. Nad rámec tohoto rozsahu hodnot je definována jedna dodatečná hodnota NaN (Not a Number), pro případy, kdy v daném časovém okamžiku není parametr dostupný.

y (GNSS rušení): 1, 2

x_1 (NACp): 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, NaN

x_2 (NIC): 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, NaN

x_3 (SIL): 0, 1, 2, 3, NaN

Tvar modelu:

Model pro detekci GNSS rušení má následující tvar:

$$f(y|x_1, x_2, x_3, \theta)$$

Kde veličina y vyjadřuje informaci o vystavení letadla GNSS rušení v době vyslání ADS-B zprávy. Veličina θ, představuje počet záznamů dané kombinace. Model je možné vyjádřit v tabulkovém zápisu, jak je naznačeno v Tabulce 2.

Tabulka 2 - Model metody kombinací v tabulkovém zápisu

x_1, x_2, x_3	y = 1	y = 2
0,0,0	$\theta_{1\|0,0,0}$	$\theta_{2\|0,0,0}$
0,0,1	$\theta_{1\|0,0,1}$	$\theta_{2\|0,0,1}$
…	…	…
11,11,3	$\theta_{1\|11,11,3}$	$\theta_{2\|11,11,3}$

Celkové rozměry tabulky jsou 845x3, kde počet řádků je dán počtem možných kombinací zvolených parametrů kvality. Tuto tabulku označíme jako matici V. První sloupec matice V identifikuje kombinaci, druhý sloupec udává kolikrát byla tato kombinace vyslána v datech neovlivněných GNSS rušením a třetí sloupec udává kolikrát byla daná kombinace vyslána v datech ovlivněných GNSS.

Nastavení modelu:

K nastavení modelu slouží ADS-B data popsána v prvních dvou krocích. Tato data označujeme jako „učící data“. Nastavení modelu probíhá dle následujícího postupu:

1) Do matici V postupně načítáme učící data ($[y, x_1, x_2, x_3]$) z prvních dvou kroků. Při načítání učících dat je nutné dbát na to, aby hodnoty NaN byly považovány za sobě rovné.
2) Dle hodnot x_1, x_2 a x_3 je určen příslušný řádek matice V.
3) Hodnota y určí sloupec ve vybraném řádku matice V, který je inkrementován o jedna.

4) Po načtení všech učících dat, získáme finální model tak, že druhé a třetí sloupce matice V vydělíme jejich součty, tedy druhé a třetí sloupce matici V normujeme na součet jedna.

Výsledná matice V tedy reprezentuje pravděpodobnost toho, že jednotlivé kombinace jsou příznakem vlivu GNSS rušení na letadlo.

Při načítání učících dat do matice V nejspíše nedojde k výskytu všech možných kombinací vybraných parametrů kvality. Řádky jejichž příslušná kombinace se v učících datech nebude vyskytovat, tak zůstanou prázdné. K prázdným řádům lze přistupovat několika způsoby:

- Prázdné řádky jsou vždy považovány za normální stav. Tedy hodnota ve sloupci $y = 1$ je rovna jedné.
- Prázdné řádky jsou vyplněny na základě expertního odhadu vycházejícího z hodnot, které nabývají podobné kombinace.
- V případě, že se při určování stavu model setká s kombinací, které odpovídá prázdný řádek, je výsledek pro danou kombinaci roven předcházející hodnotě určení stavu rušeno/nerušeno.

K vytvoření matice V, bylo zvoleno řešení kombinující první dva body. Na základě expertního odhadu vycházejícího z hodnot y, které nabývají podobné kombinace bylo stanoveno, že pokud v kombinaci parametr NAC_P a zároveň parametr NIC nedosahují hodnoty vyšší než 6, je tato kombinace považována za příznak rušení. U kombinací, kde alespoň jeden z parametrů NAC_P a NIC nabývá hodnoty vyšší než 6, nelze s dostatečnou jistotou expertně určit, zdali tato kombinace je příznakem rušení či nikoliv. Z tohoto důvodu bylo ke kombinacím obsahujících alespoň jednu hodnotu parametrů NAC_P a NIC vyšší než 6 přistupováno dle bodu 2. Výsledná matice V, je uvedena jako příloha 4.

3.3.5 Použití modelu pro detekci rušení

Pro použití modelu pro detekci rušení jsou vstupem do modelu aktuálně vysílané hodnoty parametrů kvality daným letadlem:

x_1 = NAC_P

x_2 = NIC

x_3 = SIL

Hodnoty parametrů definují kombinaci, která určí řádek normované matice V pro další výpočet.

Hodnota y, vyjadřující informaci o vystavení letadla GNSS rušení je určena za základě vyšší pravděpodobnosti polí odpovídajících $y = 1$; $y = 2$; v řádku matice V.

Tento krok lze různým způsobem upravovat v závislosti na požadované citlivosti modelu. V případě potřeby snížení citlivosti lze aplikovat podmínku, že predikovaná hodnota y bude rovna 2 pouze pokud je sloupec $y = 2$ alespoň o 0,2 (20 %) vyšší než sloupec $y = 1$. V případě potřeby dalšího snížení citlivost lze požadovaný rozdíl dále zvyšovat.

V rámci vyhodnocení metody kombinací prezentované v kapitole 4 nebyl vyžadován žádný minimální rozdíl mezi sloupci $y = 1$ a $y = 2$.

Pro použití modelu se předpokládá kontinuální tok dat obsahující vybrané parametry kvality od jednotlivých letadel. Kombinace vybraných parametrů kvality jsou modelem vyhodnocovány a v případě, že jeho výsledkem je hodnota vypovídající o přítomnosti GNSS rušení, lze v místě aktuálního výskytu letadla předpokládat přítomnost rušícího signálu GNSS.

4 Vyhodnocení úspěšnosti metodiky

4.1 Metoda užitá k vyhodnocení

Úspěšnost detekce GNSS rušení vyvinutých metod je vyhodnocena prostřednictvím kontingenční matice (matice záměn) a jí definovaných metrik. Tyto metriky jsou definovány následovně:

True positives (TP) – skutečně pozitivní: počet případů kdy metodika úspěšně detekovala rušení za jeho přítomnosti.

True negatives (TN) - skutečné negativní: počet případů kdy metodika určila, že není přítomno rušení, ale ve skutečnosti nebylo rušení přítomno.

False positives (FP) - falešně pozitivní: počet případů kdy metodika určila rušení, ale ve skutečnosti nebylo rušení přítomno. (Také známo jako "Type I error.")

False negatives (FN)- falešně negativní: počet případů kdy metodika určila, že není rušení, ale ve skutečnosti bylo rušení přítomno. (Také známo jako "Type II error.")

Formální zápis těchto 4 metrik do matice záměn (confusion matrix) je zobrazen v tabulce 3.

Tabulka 3: Matice záměn

	Skutečně ANO	Skutečně NE
Klasifikováno ANO	TP	FP
Klasifikováno NE	FN	TN

Ze čtyř základních metrik tvořících matici změn lze vypočítat následující pokročilé metriky popisující úspěšnost detekce GNSS rušení:

True Positive Rate (Senzitivita): když skutečně je přítomno rušení, jak často je vydán výsledek ANO.

$$\text{True Positive Rate} = TP/(TP+FN)$$

False Positive Rate (Falešně pozitivní poměr): když ve skutečnosti není rušení, jak často je vydán výsledek ANO.

$$\text{False Positive Rate} = FP/(FP+TN)$$

Precision (Přesnost): Když je vydáno ANO, jak často je to správný výsledek.

$$\text{Precision} = TP/(TP+FP)$$

Accuracy (Celková správnost): celkově, jak často je vydaný výsledek správný.

$$\text{Accuracy} = (TP+TN)/(TP+FN+FP+TN)$$

Misclassification Rate (Chyba): celkově, jak často je vydaný výsledek nepravdivý. (ekvivalentní 1-Accuracy, také známo jako "Error Rate")

$$\text{Misclassification Rate} = (FP+FN)/(TP+FN+FP+TN)$$

4.2 Vyhodnocení metod a jejich kombinovaného užití

Pro účely vyhodnocení metod byla použita část ADS-B data získaných během experimentům organizovaných v průběhu projektu. Informace o skutečném ovlivnění palubní avioniky GNSS rušením byla stanovena na základě informací o poloze a výkonu rušičky a s pomocí kamerových záznamů výstupů palubní avioniky.

Vyhodnocení Metoda porovnávání teoreticky modelované hodnoty NAC_P s aktuálně vysílanou:

Tabulka 4: Matice záměn pro Metodu porovnávání teoreticky modelované hodnoty NACp s aktuálně vysílanou

	Skutečně ANO	Skutečně NE
Klasifikováno ANO	4793	890
Klasifikováno NE	143	58754

True Positive Rate = 97,10%
False Positive Rate = 1,49%
Precision = 84,34%
Accuracy = 98,40%
Misclassification Rate = 1,60%

Vyhodnocení Metody kombinací:

Tabulka 5: Matice záměn pro Metodu kombinací

	Skutečně ANO	Skutečně NE
Klasifikováno ANO	4918	433
Klasifikováno NE	18	59211

True Positive Rate = 99,64%
False Positive Rate = 0,73%
Precision = 91,91%
Accuracy = 99,30%
Misclassification Rate = 0,70%

Obě vyvinuté metody lze aplikovat současně (paralelně). Při takové aplikaci si může uživatel zvolit, zdali bude GNSS rušení detekováno, pokud obě metody současně detekují rušení u daného letadle (konfigurace „AND“), viz Tabulka 6, nebo pokud alespoň jedna z metod bude detekovat rušení (konfigurace „OR“), viz Tabulka 7.

Vyhodnocení v konfiguraci „AND“:

Tabulka 6: Matice záměn pro použití obou metod v konfiguraci „AND“

	Skutečně ANO	Skutečně NE
Klasifikováno ANO	4776	433
Klasifikováno NE	160	59211

True Positive Rate = 96,76%
False Positive Rate = 0,73%
Precision = 91,69%
Accuracy = 99,08%
Misclassification Rate = 0,92%

Vyhodnocení v konfiguraci „OR“:

Tabulka 7: Matice záměn pro použití obou metod v konfiguraci „OR“

	Skutečně ANO	Skutečně NE
Klasifikováno ANO	4935	890
Klasifikováno NE	1	58754

True Positive Rate = 99,98%
False Positive Rate = 1,49%
Precision = 84,72%
Accuracy = 98,62%
Misclassification Rate = 1,38%

5 Zhodnocení novosti postupu a ekonomické aspekty využití metodiky

K prokázání existence rušení typu jamming slouží speciálně navržené sofistikované detektory, jejichž vývoji se věnuje celá řada firem. Nicméně standardní užití těchto detektorů předpokládá statické umístění na povrchu země, což je z pohledu letectví nedostačující, kdy předmětem zájmu je oblast vzdálená povrchu země a co do rozsahu lze jen obtížně vykrýt sítí klasických detektorů. Inovativní přístup lze spatřovat v tom, že s využitím navržené metodiky je možné každé letadlo považovat za určitý elementární senzor rušení, kdy s výhodou je využito automatického vysílání informací v otevřeném formátu z avionických systémů, prostřednictvím technologie ADS-B.

Protože touto technologií je vybavena většina letadel provozovaných v evropském regionu, umožňuje to bez jakýchkoliv dodatečných nákladů získat zdroj informace využitelný v kombinaci s metodikou k odhadu přítomnosti rušícího signálu. Z hlediska ekonomických aspektů, tedy metodika vyžaduje pouze softwarovou realizaci ve smyslu vytvoření aplikace, která na vstupu bude přijímat datový tok obsahující standardní parametry vysílané ve zprávách ADS-B. Tento datový tok je běžně dostupný prostřednictvím formátu ASTERIX v rámci přehledové architektury poskytovatelů letových navigačních služeb (ANSP), či prostřednictvím jakýchkoliv jiných datových formátu standardně specifikovaných výrobci ADS-B přijímačů. Pozemní síť ADS-B přijímačů patří v současnosti mezi základní přehledovou infrastrukturu ANSP v Evropě. Z výše uvedeného, implementaci této metodiky by neměly bránit žádné významné dodatečné finanční náklady do existující infrastruktury.

Na rozdíl od přístupu, kdy pro detekci rušení za pomoci technologie ADS-B se využije pouze přítomnosti nebo nepřítomnosti polohové informace v datech ADS-B, novost postupu této metodiky spočívá ve využití dalších parametrů, dostupných v ADS-B zprávách, které nějakým způsobem mají vztah ke kvalitě polohové informace. To umožňuje určit přítomnost rušivého signálu dříve, než dojde ke kompletní ztrátě polohové informace, a tedy rozšiřuje možnosti užití této technologie ve smyslu lepších detekčních možností. To sebou přináší možnosti lepšího určení např. oblasti rušení, či zdroje rušícího signálu, kdy i letadla jež neztratila kompletní schopnost určení polohové informace, mohou přispět k detekci. Autoři si nejsou vědomi existence stejné či podobné metodiky. Proto považují metodiku za novou.

V posledním desetiletí se letectví stalo velmi závislé na využívání informací o poloze nebo času odvozené ze systémů GNSS. Příkladem tohoto trendu může být například prováděcí nařízení Komise (EU) 2018/1048, které dokonce přikazuje poskytovatelům ATM/ANS aby na všech přístrojových dráhách prováděly postupy přiblížení v souladu s RNP APRCH, tj. nevyužívali konvenčních navigačních systémů s výjimkou systémů, které umožňují přiblížení CAT 2/3.

Z důvodu narůstající závislosti na GNSS a současně se zvyšujícím se množství výskytů ztráty příjmu signálu v důsledku škodlivých interferencí (jamming) se dá předpokládat i narůstající ekonomické dopady pro všechny subjekty v letectví. Proto monitorování těchto interferencí nabývá na významu. Včasná identifikace umožňující lepší určení a potvrzení povahy nedostupnosti GNSS služby má pozitivní dopad ohledně možnosti lepšího a včasného rozhodování jak posádek letadel ohledně zvolených postupů (kdy nenadálá ztráta polohové informace v rámci RNP přiblížení může vést k jeho přerušení a ekonomickým ztrátám), tak na straně poskytovatelů letových navigačních služeb a v neposlední řadě v přístupu při odhalování a identifikaci zdrojů tohoto rušení.

Použité zdroje

[1] Lukeš, P.; Topková, T.; Vlček, T.; Pleninger, S.; Recognition of GNSS Jamming Patterns in ADS-B Data In: 2020 New Trends in Civil Aviation. Praha: IEEE Czechoslovakia Section, 2020. p. 9-15. ISSN 2694-7854. ISBN 978-80-01-06726-0.

[2] Topková, T.; Pleninger, S.: Identification of BDS Registers, In: MATEC Web of Conferences. Les Ulis Cedex A: EDP Sciences - Web of Conferences, 2018. vol. 234. ISSN 2261-236X.

[3] SUN, J.; VU H.; ELLERBROEK J; HOEKSTRA J.M.; PyModeS: Decoding Mode-S Surveillance Data for Open Air Transportation Research. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 1-10. DOI: 10.1109/TITS.2019.2914770. ISSN 1524-9050. Dostupné z: https://ieeexplore.ieee.org/document/8718517/

[4] ICAO Annex 10 to the Convention on International Civil Aviation (Aeronautical Telecommunications), Volume IV, Surveillance Radar and Collision Avoidance Systems.

[6] Radio Technical Commission for Aeronautics (RTCA). Minimum Operational Performance Standards for 1090 MHz Extended Squitter Automatic Dependent Surveillance Broadcast (ADS-B) and Traffic Information Services Broadcast (TIS-B). Tech. Rep. DO-260B, RTCA 2009

[7] The European Organisation for Civil Aviation Equipment (EUROCAE). Minimum Operational Performance Specification for 1090 MHZ AUTOMATIC DEPENDENT SURVEILLANCE - BROADCAST (ADS-B), Tech. Rep. ED-102A, EUROCAE

[8] Department of Defense U.S.; Global Positioning System Standard Positioning Service Performance Standard, 5th Edition, 2020

[9] RTCA/DO-236B Minimum Aviation System Performance Standards: Required Navigation Performance for Area Navigation Change 1

[10] Radio Technical Commission for Aeronautics (RTCA). Minimum Operational Performance Standards (MOPS) for Global Positioning System/Satellite-Based Augmentation System Airborne Equipment. RTCA, Inc., Washington, DC, Tech. Rep. DO-229, June 2020.

[11] EUROCONTROL: Automatic dependent surveillance – broadcast airborne equipage monitoring, online, dostupné z: https://www.eurocontrol.int/service/adsb-equipage

[12] Jonáš, P.; Vitan, V. Detection and localization of GNSS radio interference using ADS-B data. In: Proceedings of 2019 International Conference on Military Technologies (ICMT). Brno: Univerzita Obrany, 2019. ISBN 978-1-7281-4593-8.

[13] European Global Navigation Statellite Systems Agency: EGNOS Safety of Life (SoL) Service Definition Document, Issue 3.3, 2019

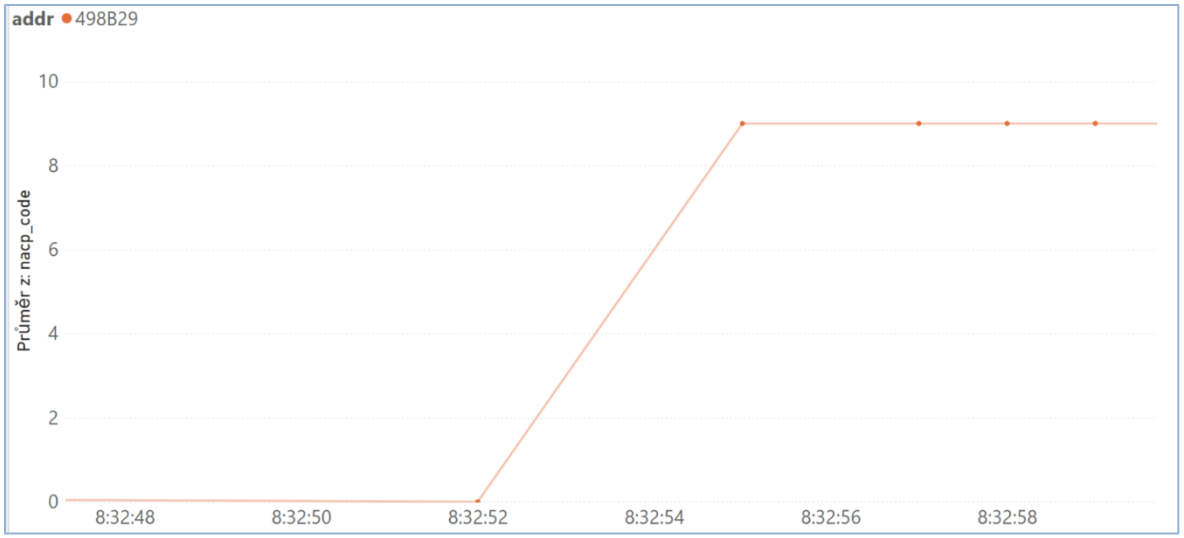
Příloha 1 – Problematika letadel těsně po zahájení letu

Grafické znázornění jevu, při kterém v prvních okamžicích po vzletu může docházet k vysílání parametru NAC_P=0 navzdory absenci GNSS rušení nebo jiných vlivů, které by mohly nulovou hodnotu parametru objasnit.

Vysílání NAC_P=0 po vzletu bylo celkem pozorováno v přibližně pěti procentech případů. Průměrná doba vysílání NAC_P=0 byla 9,71 sekund s průměrnou odchylkou 4,9 sekund a směrodatnou odchylkou 6,5 sekund.

Následující obrázky P1.1 a P1.2 zobrazují průběh parametru NAC_P v prvních okamžicích po vzletu u dvou odlišných modelů letadel.

Obrázek P1.1.: Průběh parametru NAC_P v prvních okamžicích po vzletu; Naměřeno během experimentů v Brně 12.11.2020



Obrázek P1.2.: Průběh parametru NAC_P v prvních okamžicích po vzletu; Naměřeno během experimentů v Praze 28.08.2020

Příloha 2 – Výpočet náklonu letadla z dat obsazených ve zprávách ADS-B 1090 ES

Rovnice pro výpočet příčného náklonu (Bank Angle) letadla α:

$$\alpha = arctg\left(\frac{\omega \cdot v}{g}\right) \quad (1)$$

Kde:

α – úhel příčného náklonu (Bank Angle) letadla [rad]
ω – rychlost zatáčení (Rate of Turn) letadla [rad/s]
v – rychlost letu [m/s]
g – gravitační zrychlení [m/s^2]

Pokud rovnici 1 převedeme na veličiny a jednotky používané v letectví dostáváme:

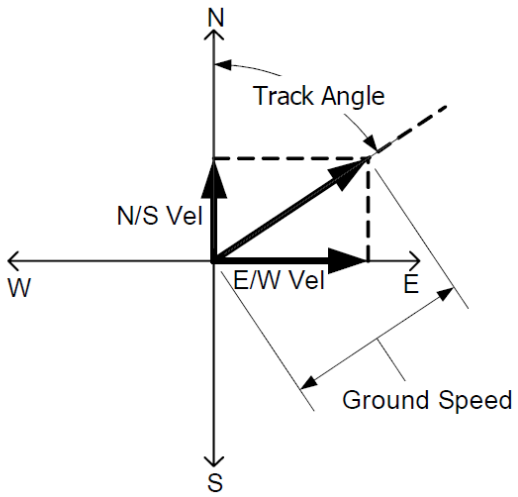
$$\alpha = arctg\left(\frac{RoT\left(\frac{\pi}{180}\right) \cdot TAS\left(\frac{463}{900}\right)}{g}\right) \cdot \left(\frac{180}{\pi}\right) \quad (2)$$

Kde:

α - úhel příčného náklonu (Bank Angle) letadla [°]
RoT - rychlost zatáčení (Rate of Turn) letadla [°/s]
TAS – pravá vzdušná rychlost (True Airspeed) letadla [knots]
g – gravitační zrychlení [m/s^2]

TAS je určena z ADS-B zprávy TC19 (Airborne Velocity Message). Ve většině případů je nutné využít namísto hodnoty TAS hodnotu rychlost vůči zemi (Ground Speed) která se vypočte ze složek rychlosti N/S velocity a E/W velocity obsažených ve zprávě Airborne Velocity Message, protože k vysílaní TAS nebo IAS (Indicated Airspeed – indikovaná rychlost) dochází jen pokud letadlo nemá k dispozici Ground Speed [6], [7].

RoT se určí jako rychlost změny traťového úhlu (Track Angle Rate), tj. z rozdílu traťového úhlu (Track Angle) vysílaného v poslední a předposlední zprávě TC19 (Airborne Velocity Message) děleného rozdílem času mezi příchodem těchto zpráv. Opět v ideální případě by bylo lepší ve výpočtu použít kurz (Heading) a ne traťový úhel, ale kurz stejně jako TAS je vysílán pouze v případě, že letadlo nemá k dispozici informaci o rychlosti vůči zemi [6], [7].



Obrázek P2.1.: Track Angle and Ground Speed určení dle EUROCAE ED129.

Příloha 3 - Postup výpočtu HDOP s využitím dat z Almanach

Tabulka P3.1 - Parametry YUMA almanachu GPS

Název proměnné [jednotky]	Parametr	Význam
ID	ID	ID Pseudonáhodné číslo (PRN) čísla kosmického vozidla (SV)
$health$	Zdraví	Indikace stavu družice
e	Excentricita	Excentricita oběžné dráhy
$t_{oa}\ [s]$	Doba použitelnosti	Počet sekund na oběžné dráze, kdy byl almanach vytvořen
$i\ [rad]$	Sklon dráhy	Sklon oběžné dráhy
$\dot{\Omega}\ [rad/s]$	Rychlost stoupání doprava	Rychlost změny měření úhlu pravé ascendence podle definice v mnemotechnice pravé ascendence
$\sqrt{a}\ [m^{1/2}]$	Odmocnina a	Je definována jako měření od středu dráhy k bodu apogea nebo perigea
$\Omega_0\ [rad]$	Pravá ascendence v týdnu	Pravá ascendence je úhlové měření od jarní rovnodennosti
$\omega\ [rad]$	Argument perigea	Úhlová míra podél oběžné dráhy měřená od vzestupného uzlu k bodu perigea, měřeno ve směru pohybu SV
$M_0\ [rad]$	Střední anomálie v referenční epoše	Úhel uražený za délkou vzestupného uzlu
$a_{f0}\ [s]$	Af0(s)	Zkreslení hodin SV v sekundách
$a_{f1}[s/s]$	Af1(s/s)	Posun hodin SV v sekundách za sekundu
$week$	Týden	Týden GPS (0000-1023), každých 7 dní od 22. srpna 1999

Tabulka P1.2 - Výpočet pozice satelitu v ECEF souřadnicovém systému

Vzorec	Význam vypočítané hodnoty
$a = \left(\sqrt{a}\right)^2$	Poloměrná osa oběžné dráhy
$n = \sqrt{\frac{\mu}{a^3}}$	Střední pohyb, gravitační konstanta Země $\mu = 398600{,}5 \cdot 10^8\ [m^3 s^{-2}]$
$t_k = t - t_{oa} + (week_{curr} - week) \cdot 604800$	Týdenní čas od almanachové epochy, $week_{curr}$ a t je současný čas vyjádřený ve formě GPS týdne a sekund
$M_k = M_0 + n \cdot t_k$	Střední anomálie
$M_k = E_k - e \cdot sinE_k$	Excentrická anomálie (řešeno iteračně pro E_k)
$v_k = tan^{-1}\frac{\left(\sqrt{1-e^2}\right)sinE_k}{(cosE_k - e)}$	Skutečná anomálie
$\Phi_k = v_k + \omega$	Argument zeměpisné šířky
$r_k = a(1 - e \cdot cosE_k)$	Poloměr oběžné dráhy
$x_p = r_k \cdot cos\Phi_k$ $y_p = r_k \cdot sin\Phi_k$	Souřadnice x a y v orbitální rovině
$\Omega_k = \Omega_0 + \left(\dot{\Omega} - \dot{\Omega}_e\right) \cdot t_k - \dot{\Omega}_e \cdot t_{oa}$	Opravená zeměpisná délka, rychlost otáčení Země $\dot{\Omega}_e = 7{,}2921151467 \cdot 10^{-5}\ [rad\ s^{-1}]$
$x_k = x_p \cdot cos\Omega_k + y_p \cdot cos(i) \cdot sin\Omega_k$ $y_k = x_p \cdot sin\Omega_k + y_p \cdot cos(i) \cdot cos\Omega_k$ $z_k = y_p \cdot sin(i)$	Souřadnice x, y a z v ECEF

Výpočet HDOP (Horizontal Dilution of Precision):

$$HDOP = \sqrt{d_{11} + d_{22}} = \frac{1}{\sigma}\sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2}$$

Kovarianční matice Q:

$$Q = \begin{pmatrix} \sigma_x^2 & \sigma_{xy} & \sigma_{xz} & \sigma_{xt} \\ \sigma_{yx} & \sigma_y^2 & \sigma_{yz} & \sigma_{yt} \\ \sigma_{zx} & \sigma_{zy} & \sigma_z^2 & \sigma_{zt} \\ \sigma_t & \sigma_t & \sigma_t & \sigma_t^2 \end{pmatrix} = (G^T G)^{-1} \cdot \sigma^2 = \begin{pmatrix} d_{11} & d_{12} & d_{13} & d_{14} \\ d_{21} & d_{21} & d_{22} & d_{23} \\ d_{31} & d_{32} & d_{33} & d_{34} \\ d_{41} & d_{42} & d_{43} & d_{44} \end{pmatrix} \cdot \sigma^2$$

Kde:

$$G = \begin{pmatrix} -\cos(e_1)\cos(a_1) & -\cos(e_1)\sin(a_1) & -\sin(e_1) & -1 \\ -\cos(e_2)\cos(a_2) & -\cos(e_2)\sin(a_2) & -\sin(e_2) & -1 \\ -\cos(e_3)\cos(a_3) & -\cos(e_3)\sin(a_3) & -\sin(e_3) & -1 \\ -\cos(e_4)\cos(a_4) & -\cos(e_4)\sin(a_4) & -\sin(e_4) & -1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -\frac{x-x_1}{r_1} & -\frac{y-y_1}{r_1} & -\frac{z-z_1}{r_1} & -1 \\ -\frac{x-x_2}{r_2} & -\frac{y-y_2}{r_2} & -\frac{z-z_2}{r_2} & -1 \\ -\frac{x-x_3}{r_3} & -\frac{y-y_3}{r_3} & -\frac{z-z_3}{r_3} & -1 \\ -\frac{x-x_4}{r_4} & -\frac{y-y_4}{r_4} & -\frac{z-z_4}{r_4} & -1 \end{pmatrix}$$

σ – chyba měřené pseudovzdálenosti (UERE – User Equivalent Range Error)

e_n – elevační úhel k danému satelitu

a_n – azimut k danému satelitu

$x, y, z,$ – souřadnice letadla (v ECEF)

$x_n, y_n, z_n,$ – souřadnice satelitu (v ECEF)

r_n – vzdálenost mezi letadlem a daným satelitem

Příloha 4 – Tabulka kombinací (matice V) vytvořená v rámci Metody kombinací

Viz přiložený soubor v elektronické podobě.

Matice_V.xlsx