

**Univerzita Pardubice
Fakulta elektrotechniky a informatiky**

Disertační práce

**Detekce horizontální chyby polohy GNSS s využitím
3D-mapy tratě**

**Autor: Ing. Marek Jonáš
Školitel: doc. Ing. Aleš Filip, CSc.**

Pardubice 2019

Prohlašuji:

Tuto práci jsem vypracoval samostatně. Veškeré literární prameny a informace, které jsem v práci využil, jsou uvedeny v seznamu použité literatury.

Byla jsem seznámen s tím, že se na moji práci vztahují práva a povinnosti vyplývající ze zákona č. 121/2000 Sb., autorský zákon, zejména se skutečností, že Univerzita Pardubice má právo na uzavření licenční smlouvy o užití této práce jako školního díla podle § 60 odst. 1 autorského zákona, a s tím, že pokud dojde k užití této práce mnou nebo bude poskytnuta licence o užití jinému subjektu, je Univerzita Pardubice oprávněna ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které na vytvoření díla vynaložila, a to podle okolností až do jejich skutečné výše.

Souhlasím s prezenčním zpřístupněním své práce v Univerzitní knihovně.

V Pardubicích dne 1. 7. 2019

Ing. Marek Jonáš

Poděkování

Na tomto místě bych rád poděloval vedoucímu práce doc. Ing. Aleši Filipovi, CSc., za cenné rady, připomínky a podněty k této práci. Dále pak bych rád poděkoval Ing. Hynkovi Mockovi za jeho věcné postřehy a připomínky k této práci.

Anotace

Disertační práce se věnuje zkoumání možností zvýšení integrity určení polohy vozidel pomocí GNSS pro potřeby železniční dopravy. V teoretické části jsou popsány základy určování polohy pomocí GNSS, železničních zabezpečovacích systémů a teorie spolehlivosti a bezpečnosti. Praktická část obsahuje měření s EGNOS přijímačem PolaRx3. Na základě naměřených dat jsou následně prováděny simulace chyb GNSS. Jsou simulovány chyby GNSS vzniklé vlivem vícecestného šíření. Pomocí simulací jsou prozkoumány vztahy mezi chybami určené polohy v horizontální rovině a vertikálním směru. Na základě analýzy vztahů pro výpočet polohy pomocí GNSS je vybrán vhodný matematický model. Provedené simulace jsou následně ověřeny tímto matematickým modelem. Jádrem práce je navržená nová metoda pro detekci chyby určení polohy v horizontální rovině na základě známé polohy ve vertikálním směru a její aktuální chyby. Je vypracován algoritmus detekce a nakonec jsou zkoumány a zhodnoceny vlastnosti navrženého detektoru.

Klíčová slova

satelitní navigace, železnice, GNSS, chyby GNSS, SBAS, GPS

Annotation

This thesis deals with the investigation of the possibilities of increasing integrity of the GNSS position determination for the railway transportation needs. The theoretical part deals with the theoretical foundations of positioning using GNSS, railway signalling systems and the theory of reliability and safety. The practical part contains measurements with EGNOS receiver PolaRx3. Simulations of GNSS errors are performed using measured datasets. GNSS errors due to multipath propagation are simulated. The relationships between errors in the horizontal plane and the vertical direction are explored by these simulations. An appropriate mathematical model is selected based on analysis of mathematical equations for GNSS position calculation. Simulation results are verified by a mathematical model. The core of this work is a new method for detection of a horizontal position error by means of a known vertical position and its current error. Detection algorithm is developed and properties of designed detector are investigated and evaluated at the end.

Keywords

satellite navigation, railways, GNSS, GNSS errors, SBAS, GPS

1. Úvod	9
1.1. Účel disertační práce	9
1.2. Cíle disertační práce	9
1.3. Struktura disertační práce	10
2. Popis současného stavu problematiky	12
2.1. Shrnutí historie satelitních navigačních systémů	12
2.2. GPS	13
2.3. Galileo	16
2.4. Evropský SBAS systém EGNOS	17
2.5. Železniční a letecké bezpečnostní normy	20
2.6. Problematika lokalizace vlaků v železniční dopravě	20
2.7. ERTMS/ETCS systém	21
2.8. Projekty zabývající se problematikou použití GNSS na železnici	23
2.8.1 Ukončené projekty	23
2.8.2 Probíhající projekty	29
3. Teoretické základy použitých metod	31
3.1. Teoretické vztahy pro určování polohy pomocí GNSS	31
3.2. Činitel zhoršení přesnosti vlivem geometrie (DOP)	32
3.3. Výpočet chyb naměřených hodnot	34
3.4. Matematická statistika	35
3.5. Pravděpodobnost a rozdělení pravděpodobnosti	35
3.6. Testování hypotéz	38
3.7. Teorie spolehlivosti a bezpečnosti	40
4. Integrita GNSS	42
4.1. Integrita polohy určené pomocí GNSS	42
4.2. Mechanismus monitorování integrity systému EGNOS	42
4.3. Integrita polohy určené pomocí GNSS z pohledu železnice	44
4.4. Budoucí vývoj v oblasti integrity GNSS	46
4.5. Aktuální metody potlačení lokálních vlivů	46
5. Vymezení disertační práce	50
6. Metodika řešení	53
6.1. Sběr dat	53
6.2. Simulace chyb v pseudovzdálenostech	57
6.2.1 Program Pegasus	58

6.2.2	Simulace chyby v jednom časovém bodě	58
6.2.3	Simulace délky trvajících chyb	66
6.3.	Matematický model	71
6.4.	Ověření pomocí matematického modelu	74
6.5.	Popis navržené metody	80
6.6.	Určení detekční meze	81
6.7.	Zhodnocení výkonnosti detektoru	83
6.7.1	Normální rozdělení	90
6.7.2	Generalizované Paretovo rozdělení	92
7.	Závěr	94
8.	Reference	96
9.	Seznam výstupů VaV činnosti	99

Seznam zkratek

ALX	Automatic Level Crossing
ARAIM	Advanced Receiver Autonomous Integrity Monitoring
DGPS	Differential GPS
DOP	Dilution Of Precision
EC	European Commission
EC	European Commission
EDAS	EGNOS Data Access Service
EGNOS	European Geostationary Navigation Overlay Service
EGNSS	European GNSS
ERA	European Union Agency for Railways
ERTMS	European Rail Traffic Management System
ESA	European Space Agency
ESTB	Egnos System Test Bed
ETCS	European Train Control System
EU	European Union
FA	False Alarm
FAA	Federal Aviation Administration
FD	Fault Detection
FDE	Fault Detection and Exclusion
GDOP	Geometric Dilution Of Precision
GIS	Geographic Information System
GNSS	Global Navigation Satellite System
GPS	Global Positioning System
GSA	Global Navigation Satellite Systems Agency
GSM-R	Global System for Mobile Communications - Railway
HAL	Horizontal Alert Limit
HDOP	Horizontal Dilution Of Precision
HMI	Hazardous Misleading Information
HPE	Horizontal Position Error
HPL	Horizontal Protection Level
HR	Hazard Rate
ICAO	International Civil Aviation Organization
IMU	Inertial Measurement Unit
LDS	Location Determination System
LPV	Localiser Performance with Vertical Guidance
LS	Least Squares
LSR	Least Squares Residuals
MCC	Master Control Centre
MD	Missed Detection
NASA	National Aeronautics and Space Administration
NAVSTAR	Navigation Signal Timing and Ranging Global Positioning System
NOAA	National Oceanic and Atmospheric Administration
NSTB	National Satellite Test Bed
OBU	On-Board Unit
PDOP	Position Dilution Of Precision
PRN	Pseudorange
RAIM	Receiver Autonomous Integrity Monitoring
RIMS	Reference and Integrity Monitoring Stations
RNP	Required Navigation Performance
SARPs	Standard and Recommended Practices
SBAS	Satellite Based Augmentation System
SBAS-R	Satellite Based Augmentation System Interface for Railway

SDD	Service Definition Document
SGMP	Stanford GPS/GNSS Matlab Platform
SIL	Safety Integrity Level
SIS	Signal In Space
SoL	Safety of Life Service
SPS	Standard Positioning Service
SVN	Space Vehicle Number
THR	Tolerable Hazard Rate
USERE	User Equivalent Range Error
US	United States
VDOP	Vertical Dillution Of Precision
VPL	Vertical Protection Level
WAAS	Wide Area AugmentationSystem
WAD	Wide Area Differential
WLS	Weighted Least Squares
WLSE	Weighted Least Squares Estimator
WLSR	Weighted Least Squares Residuals
WSSE	Weighted Sum of Squared Errors

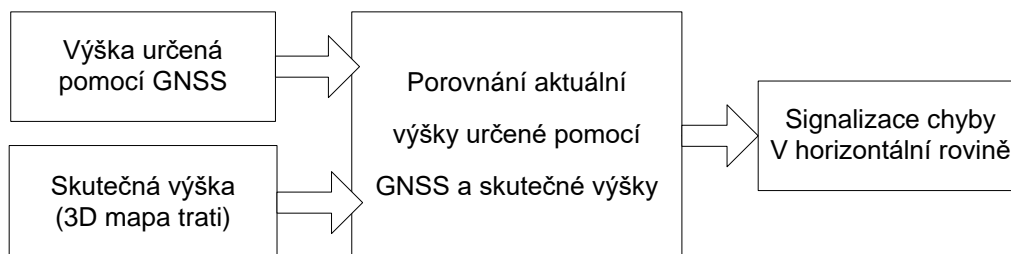
1. Úvod

1.1. Účel disertační práce

Satelitní navigační systémy procházejí v posledních desetiletích velmi rychlým rozvojem. Poskytují dnes již standardní službu určení polohy dostupnou na kterémkoliv místě na Zemi. Problematická je však spolehlivost služby. Klasický samostatný GNSS přijímač negarantuje správné určení polohy. Dochází tedy k omezení možnosti využití tohoto přijímače v bezpečnostně relevantních systémech. To jsou takové systémy, jejichž porucha nebo nesprávná funkce může způsobit zranění nebo usmrcení osob a velké materiální škody. Disertační práce se zabývá zkoumáním možností použití GNSS při určování polohy vozidla pro potřeby železničních zabezpečovacích systémů. V práci jsou identifikovány a popsány hlavní problémy možné integrace GNSS do železničních zabezpečovacích systémů. K tomu je využita především analýza současného stavu a možností GNSS v celosvětovém kontextu. Dále jsou analyzovány parametry a bezpečnostní požadavky železničních zabezpečovacích systémů. Praktickou částí je měření s EGNOS přijímačem PolaRx3. Jádrem disertace je navržená nová metoda pro detekci chyby vlivem lokálních efektů. Metoda vychází z výsledků provedených měření a simulací. Hlavním účelem navrhované metody je přispět ke zvýšení integrity určení polohy pomocí GNSS na železnici. A tím přispět ke splnění náročných požadavků železničních bezpečnostních norem.

1.2. Cíle disertační práce

V teoretické části bude popsán současný stav problematiky a vypracován přehled projektů zabývajících se problematikou využití GNSS v železničních zabezpečovacích systémech. Dále pak přehled teoretických základů metod používaných v této práci. Hlavním cílem je vypracování metody nezávislé detekce chyb GNSS v horizontální rovině způsobených lokálními efekty. Tato detekce bude nezávislá z pohledu teorie bezpečnosti, tzn. nezávislá na ostatních metodách využitelných při detekci lokálních efektů (IMU, odometrie). Z teorie vyplývá, že chyby určení polohy pomocí GNSS v horizontální rovině a ve vertikálním směru jsou spolu korelované [1], [2], [3]. Došlo i k ověření pomocí simulací [B3], [B4]. Na základě provedených simulací bylo navrženo použít údaj o výšce udávaný GNSS přijímačem k detekci chyby GNSS v horizontální rovině. Z provedených simulací také vyplývá, že metoda je citlivá na chyby v délkách pseudovzdáleností. Může tedy detekovat chyby způsobené lokálními podmínkami v místě přijímače (vícecestné šíření).



Obr. 1. Blokové znázornění očekávané funkce navržené metody

Výsledek práce je schematicky znázorněn na Obr. 1. Bude navržena metoda detekce chyby v horizontální rovině s využitím údaje o výšce poskytované GNSS přijímačem. Na základě použitého matematického modelu mohou být využity ještě další údaje systému GNSS, např. údaje z kovarianční matice odhadu polohy nebo činitele zhoršení přesnosti výpočtu vlivem konstelace satelitů (DOP), atp.

Bude také definována kvalita navržené metody, např. prostřednictvím četnosti poruch HR, nebo pravděpodobnostmi selhání detekce a falešného alarmu (P_{MD} , P_{FA}). Skutečná výška je prozatím, pro potřeby této disertační práce, uvažována jako konstantní hodnota. Do budoucna je zamýšleno získávání hodnot výšky z 3D mapy železniční tratě.

Hlavní cíle práce:

- posouzení závislostí mezi chybami polohy GNSS ve vertikální a horizontální rovině pomocí simulací chyb v pseudovzdálenostech na základě reálných naměřených GNSS dat
- analýza teoretických vztahů používaných pro výpočet polohy pomocí GNSS a vztahů popisujících chyby GNSS. Analýza bude provedena za účelem výběru nejvhodnějšího matematického modelu
- vypracování matematického / pravděpodobnostního modelu chování detektoru chyby polohy v horizontální rovině na základě teoretických i experimentálních výsledků
- stanovení kvality této detekční metody, např. pomocí určení četnosti poruch HR, nebo pravděpodobností selhání detekce a falešného alarmu (P_{MD} , P_{FA}), atp.

1.3. Struktura disertační práce

Disertační práce začíná stručným popisem účelu a cílů práce, následuje analýza současného stavu problematiky. Popsán je vývoj a současný stav obou hlavních oblastí, kterými se práce zabývá, tedy železničních zabezpečovacích systémů a satelitních navigačních systémů (GNSS). Definovány jsou funkce železničního zabezpečovacího systému ERTMS/ETCS, satelitního navigačního systému GPS a EGNOS. Práce zmiňuje současné i minulé projekty, zabývající se možnostmi použití GNSS v železničních zabezpečovacích systémech.

Následují teoretické okruhy, kterých se tato práce týká. Jádrem části jsou rovnice pro určení polohy pomocí GNSS metodou váhovaných nejmenších čtverců. Dále jsou popsány matematické vztahy pro výpočet chyb GNSS, matematický aparát týkající se pravděpodobnosti a rozdělení pravděpodobnosti a také je zmíněna teorie spolehlivosti a bezpečnosti.

Práce pokračuje popisem integrity určení polohy pomocí GNSS. V této části je uveden matematický aparát popisující integritu polohy určené pomocí evropského systému EGNOS. Dále jsou uvedeny problémy integrity polohy určené pomocí GNSS z hlediska železnice. Závěr této části zmiňuje metodu RAIM, která se používá pro detekci chyb způsobených vlivem lokálních jevů v okolí přijímače (vícecestné šíření).

Dále následuje vymezení disertační práce pomocí bezpečnostních požadavků železnice na polohu určenou pro potřeby železničních zabezpečovacích systémů. Tyto požadavky jsou porovnány s aktuálními bezpečnostními parametry stávajících satelitních navigačních systémů. Na základě tohoto porovnání jsou stanoveny cíle práce a formulována metodika k jejich dosažení. Další část zahrnuje měření, která byla v rámci práce prováděna. Jednalo se o měření s EGNOS přijímačem. Na základě naměřených dat byly prováděny simulace chyb GNSS způsobených vícecestným šířením.

Následuje matematický model, který byl vybrán pro popis závislostí zjištěných dle analýzy výsledků provedených simulací. Došlo k odvození matematických vztahů pokrývajících závislosti mezi chybami v pseudovzdálenostech a výslednými chybami určené polohy v horizontální rovině a ve vertikálním směru. Práce pokračuje ověřením výsledků provedených simulací pomocí matematického modelu.

V další části je detailní popis navržené metody, podrobný popis algoritmu detekce chyb, nastavení detekční meze a ukázka detekce na reálných datech. Dále jsou zmíněny parametry udávající

výkonnost metody v reálném čase a poté zhodnocení vlastností metody při použití normálního a generalizovaného Paretova rozdělní pravděpodobností.

Závěrem jsou shrnuty všechny skutečnosti a poznatky zjištěné v průběhu práce a zhodnocení dosažených výsledků.

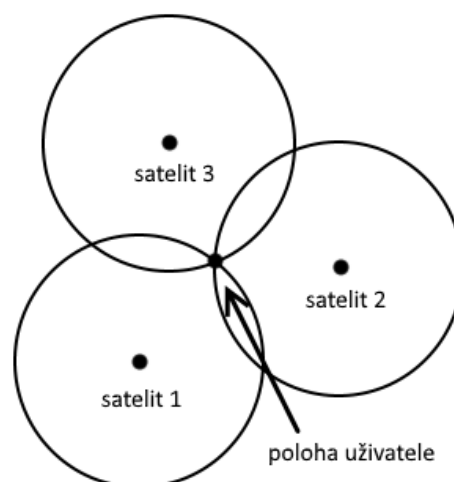
2. Popis současného stavu problematiky

Tato část obsahuje shrnutí stavu problematiky oblastí satelitních navigačních systémů a železničních zabezpečovacích systémů. Také je zmíněna teorie bezpečnosti a spolehlivosti.

2.1. **Shrnutí historie satelitních navigačních systémů**

Vůbec první družicový navigační systém se nazýval TRANSIT (NAVSAT), byl uveden do provozu Spojenými státy americkými roku 1964 pro potřeby vojenského námořnictva. Od roku 1967 byly služby tohoto systému uvolněny i pro civilní použití. Systém tvořilo šest družic, které obíhaly po polární oběžné dráze ve výšce 1075 km. Jeho součástí byly i tři pozorovací stanice umístěné na území USA. Přesnost lokalizace uživatele se postupně zvyšovala (z původních 800 metrů na pozdějších 5 metrů). Nedostatkem systému bylo, že získané souřadnice byly pouze dvourozměrné. To vylučovalo nasazení pro leteckou navigaci. Zásadní nevýhodou byla pouze občasná dostupnost signálu. Tento systém je od roku 1996 považován za ukončený.

Na obdobném principu vznikl v bývalém Sovětském svazu koncem šedesátých let Dopplerovský navigační systém nazvaný CYKLON. Následníci tohoto systému byly vojenský šestidružicový PARUS a civilní čtyřdružicový CIKADA. Ty jsou dnes již dožívající převážně kvůli stejným nevýhodám, které měl i jejich americký konkurent TRANSIT. Satelitní navigační systémy využívají pro určení polohy uživatele metodu trilaterace (Obr. 2).

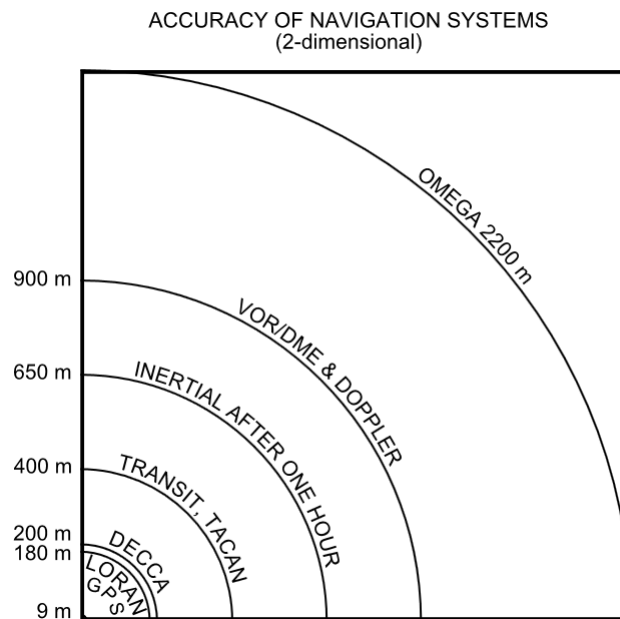


Obr. 2. Schematické znázornění principu trilaterace; zdroj vlastní

Existovala řada dalších zamýšlených systémů. Většina z nich ale skončila pouze u myšlenek, nebo v částečném vývoji. Mezi ně patřil například GEOSTAR. Ve Francii firma LOCSTAR specifikovala podobný systém jako GEOSTAR, ale kvůli totožným nedostatkům byl tento projekt v roce 1991 zastaven. V Německu vyvíjeli GRANAS (Global Radio Navigation Satellite), který nebyl nikdy realizován. Dále přišla Evropská kosmická agentura ESA s návrhem systému NAVSAT, jenž měl být nezávislý na vojenských GPS a GLONASS [4].

V roce 1972 byl vytvořen zcela nový systém, který byl pojmenován TIMOTION. Vysílal přesný časový signál. Zkušenosti získané během prací na tomto systému byly plně využity při vývoji a specifikaci připravovaného satelitního navigačního systému GPS.

Prvním globálním satelitním navigačním systémem byl GPS, jehož počátky sahají do roku 1978, spuštěn v roce 1993. Roku 1996 uvedli Rusové do provozu GLONASS. Porovnání přesnosti historických satelitních navigačních systémů je na Obr. 3.



Obr. 3. 2D přesnost historických satelitních navigačních systémů; zdroj: [5]

Rozvíjeli se také zpřesňující satelitní navigační systémy (SBAS), které pro určitou oblast rozšiřují GNSS o další doplňkové služby. První byl spuštěn americký WAAS, zpřesňující signál GPS pro území USA. V současnosti je již také plně funkční evropský systém EGNOS, zpřesňující určení polohy pomocí GPS pro území Evropy. Budují se nové globální navigační systémy, např. evropský Galileo a čínský BeiDou. Jednotlivé satelitní navigační systémy jsou kompatibilní a je možné jich využívat více najednou. To přináší mnoho benefitů, uživatel má k dispozici více satelitů, tudíž určení polohy je přesnější. Využití tzv. multikonstelace poskytuje i výhody pro bezpečnostně relevantní aplikace, kde více nezávislých navigačních systémů znamená vyšší úroveň integrity bezpečnosti určené polohy. V následujících částech jsou stručně shrnuty základní vlastnosti historicky nejvýznamnějšího GNSS systému, kterým je GPS a také nejnovějšího systému Galileo [6].

2.2. GPS

Global Positioning System (GPS), česky Globální polohový systém, je původně vojenský globální družicový polohový systém provozovaný ministerstvem obrany Spojených států amerických. S jeho pomocí je možno určit geografickou polohu přijímače nacházejícího se kdekoli na Zemi nebo nad Zemí s přesností jednotek metrů a také čas s přesností na jednotky nanosekund.

Projekt navazuje na předchozí GNSS Transit (1964 – 1996) a rozšiřuje ho především kvalitou, dostupností, přesností a novými službami. Původní název systému je NAVSTAR GPS, který nesou také jeho družice [7].

Celý systém GPS lze rozdělit do 3 segmentů:

- kosmický
- řídicí
- uživatelský

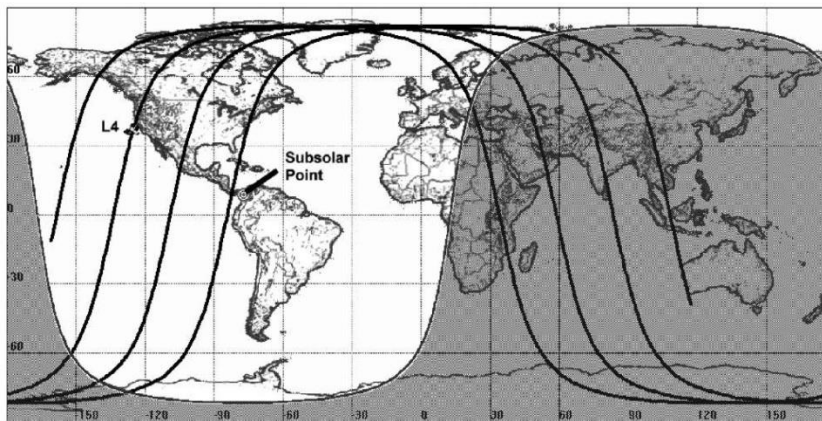
Kosmický segment

Kosmický segment byl původně projektován na 24 družic. Nyní je využíván až na mezní počet 32. GPS družice je zobrazena na Obr. 4.



Obr. 4. Satelit GPS; zdroj NASA

Družice obíhají ve výšce 20 350 km nad povrchem Země na 6 kruhových drahách se sklonem 55° . Dráhy jsou vzájemně posunuty o 60° (Obr. 5). Družice váží přibližně 1,8 tuny a na střední oběžné dráze (MEO, Medium Earth Orbit) se pohybuje rychlostí 3,8 km/s, s dobou oběhu kolem Země 11h 58min (polovina siderického dne). Družice jsou několikrát do roka, obvykle plánovaně, odstaveny pro údržbu atomových hodin a korekci dráhy družice. Údržba trvá přibližně 12 - 24 hodin. Průměrná životnost družice je asi 10 let, obměna kosmického segmentu trvá přibližně 20 let.



Obr. 5. Dráhy GPS satelitů; zdroj NOAA

Mezi nejdůležitější součásti družic systému GPS patří:

- 3 až 4 velmi přesné (10^{-13} s) atomové hodiny s rubidiovým, dříve také s cesiovým oscilátorem
- 12 antén RHCP pro vysílání rádiových kódů v pásmu L (2000–1000 MHz)
- antény pro komunikaci s pozemními kontrolními stanicemi v pásmu S (2204,4 MHz)
- antény pro vzájemnou komunikaci družic v pásmu UHF (česky označováno UKV)
- optické, rentgenové a pulzní-elektromagnetické detektory, senzory pro detekci startů balistických raket a jaderných výbuchů

- solární panely a baterie jako zdroj energie

Řídící a kontrolní segment

Řídící a kontrolní segment monitoruje kosmický segment, zasílá povely družicím, provádí jejich manévry a údržbu atomových hodin. Výsledek jejich monitoringu je zveřejňován v navigační zprávě každé družice a jejich platnost je řádově několik hodin. Tato navigační zpráva obsahuje:

- data pro model ionosférické refrakce
- predikce dráhy družice, tzv. efemerid
- korekce atomových hodin
- přibližné pozice ostatních družic a jejich zdravotní stav

Řídící segment obsahuje následující části:

- **velitelství** – Navstar Headquarters na letecké základně Los Angeles v Kalifornii v USA
- **řídící středisko** (MSC, Master Control Station), na Schrieverově letecké základně USAF v Colorado Springs, 2nd Space Operations Sq. Záložní řídící středisko (BMCS, Backup Master Control Station) umístěné v Gaithersburg (Maryland, USA) přebírá cvičně 4× do roka řízení systému, v nouzi je připravena do 24 hodin
- 3 **povelové stanice** (Ground Antenna), které jsou umístěny na základnách USAF: Kwajalein, Diego Garcia, Ascension Island případně i Cape Canaveral
- 18 **monitorovacích stanic** (Monitor Stations) umístěných na základnách USAF Havaj, Colorado Springs, Cape Canaveral, Ascension Island, Diego Garcia, Kwajalein a dále stanice spravující NGA: Fairbanks (Aljaška), Papeete (Tahiti), Washington DC (USA), Quitto (Ekvádor), Buenos Aires (Argentina), Hermitage (Anglie), Pretoria (Jižní Afrika), Manama (Bahrain), Osan (Jižní Korea), Adelaide (Austrálie) a Wellington (Nový Zéland)

Uživatelský segment

Uživatel pomocí GPS přijímače přijímají signály z jednotlivých družic, které jsou v danou chvíli viditelné nad obzorem. Na základě přijatých dat (časových značek z jednotlivých družic a znalosti jejich polohy) a předem definovaných parametrů přijímač vypočítá polohu antény, nadmořskou výšku a zobrazí přesné datum a čas. Komunikace probíhá pouze od družic k uživateli. GPS přijímač je tedy pasivní.

Přijímače GPS je možné rozdělit podle přijímaných kanálů na jednokanálové a vícekanálové. Vícekanálové přijímače podporují paralelní zpracování signálů ze satelitů a určení polohy je tak na základě jejich použití výrazně rychlejší než s jednokanálovými přístroji. Z pohledu přijímaných frekvencí je možné přijímače rozdělit na jednofrekvenční, dvoufrekvenční a vícefrekvenční. Jednofrekvenční přijímače jsou zpravidla přijímače určené pro standardní civilní použití. Oproti tomu dvoufrekvenční přijímače dokážou přijímat jak civilní signál, tak kódovaný signál na jiné frekvenci. Vícefrekvenční přijímač umožňuje příjem informací na frekvenci v pásmu L5.

Protože systém GPS byl prvním globálním satelitním navigačním systémem v plné operační dostupnosti, je většina zařízení umožňujících satelitní navigaci vybavena právě přijímačem GPS. S postupným rozšiřováním a zprovoznováním ostatních satelitních systémů jsou zařízení vybavována kombinovanými přijímači schopnými detekovat signály více satelitních navigačních systémů [6,7].

2.3. Galileo

Navigační systém Galileo je evropský autonomní globální družicový polohový systém (GNSS), který je nezávislou a civilní obdobou původně vojenských systémů, amerického GPS a ruského GLONASS.

Jeho výstavbu zajišťují státy Evropské unie prostřednictvím Evropské kosmické agentury (ESA) a dalších institucí. Dne 15. prosince 2016 byla vyhlášena počáteční dostupnost otevřených služeb (Initial Open service), a prvních 10 družic nastaveno v navigační zprávě na použitelné (Usable).

Dva v současné době funkční systémy dostupné na území Evropy GPS a GLONASS jsou vojenské a ani jeden z provozovatelů nedává záruku, že ve výjimečných situacích budou systémy plně funkční pro civilní využití. Pokud by na jejich využívání byla založena některá z dopravních bezpečnostních služeb, mělo by dočasné zhoršení výkonu systému nebezpečné důsledky pro její uživatele [8]. Evropský systém Galileo je naopak primárně navržen jako projekt řízený a spravovaný civilní správou.

Systém Galileo má největší potenciál především v dopravě (letecké, silniční, železniční, námořní a říční, městské, atd.), přesto však nabízí široké využití i v dalších oblastech, kde zvýší bezpečnost, přesnost a komfort (energetický průmysl, bankovníctví, zemědělství, civilní ochrana, životní prostředí, stavebnictví atd.) [9].

Kosmický segment

Plný systém Galileo má být tvořen 30 operačními družicemi (27+3), obíhajícími ve výšce přibližně 23 222 km nad povrchem Země po drahách se sklonem 56° k zemskému rovníku ve třech rovinách, vzájemně vůči sobě posunutých o 120° . To umožní využívat navigační systém bez potíží až do míst ležících na 75° zeměpisné šířky. Každá dráha bude mít 9 pozic pro družice a 1 pozici jako zálohu, aby systém mohl být při selhání družice rychle doplněn na plný počet. Velký počet družic, z nichž tři budou záložní, zajistí spolehlivou funkci systému, i když některá družice přestane správně pracovat. Galileo umožní každému držiteli přijímače signálu určit jeho aktuální polohu s přesností lepší než jeden metr.

Pozemní centra

V roce 2004 bylo založeno administrativní centrum Galileo Supervising Authority (GSA) v Bruselu a technologické centrum Galileo Control Centre (GCC) v Oberpfaffenhofenu u německého Mnichova. Pro vývoj technologií bylo využito centra European Space Research and Technology Centre (ESTEC) ESA v holandském Noordwijk.

V roce 2010 bylo rozhodnuto, že administrativní sídlo GSA bude přesunuto z Bruselu do Prahy. Nové sídlo v Holešovicích na předpolí Hlávkova mostu bylo uvedeno do provozu v roce 2012.

Evropský civilní družicový navigační systém GALILEO bude poskytovat celkem 4 druhy služeb [10]:

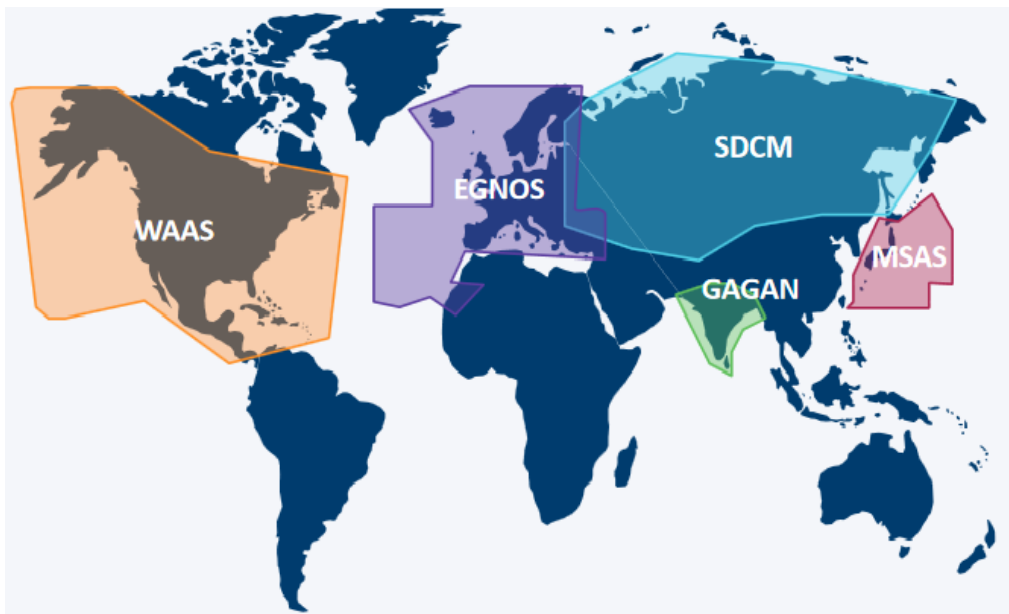
- **základní služba (Open Service - OS)** – základní signál, poskytovaný zdarma
- **komerční služba (Commercial Service - CS)** – na rozdíl od služby základní využívá další dva signály, tyto signály jsou chráněny komerčním kódováním, které bude řízeno poskytovateli služeb a budoucím Galileo operátorem, přístup je kontrolován na úrovni přijímače, kde se využívá přístupového klíče

- **veřejně regulovaná služba (Public Regulated Service - PRS)** – dva šifrované signály s kontrolovaným přístupem a dlouhodobou podporou, určené pro státem vybrané uživatele, především pro bezpečnostní složky státu
- **vyhledávací a záchranná služba (Search And Rescue service - SAR)** – služba nouzové lokalizace v rámci celosvětové družicové záchranné služby COSPAS-SARSAT s možností oboustranné komunikace

2.4. Evropský SBAS systém EGNOS

Původní satelitní navigační systémy neposkytovaly žádné informace o integritě určení polohy. Informace o integritě určení polohy v reálném čase dostupné pro uživatele přinesly až SBAS systémy. Jako první vznikl americký WAAS (Wide Area Augmentation System). V současné době je dostupný evropský systém EGNOS a v Japonsku družicový zesilovací systém MSAS.

Zavedení obdobných systémů se plánuje i v jiných oblastech světa (např. Aided GPS GEO Augmented Navigation - GAGAN v Indii a systému diferenciální korekce a monitorování - SDCM v Rusku). Stávající a plánované systémy SBAS jsou přehledně zobrazeny na Obr. 6.

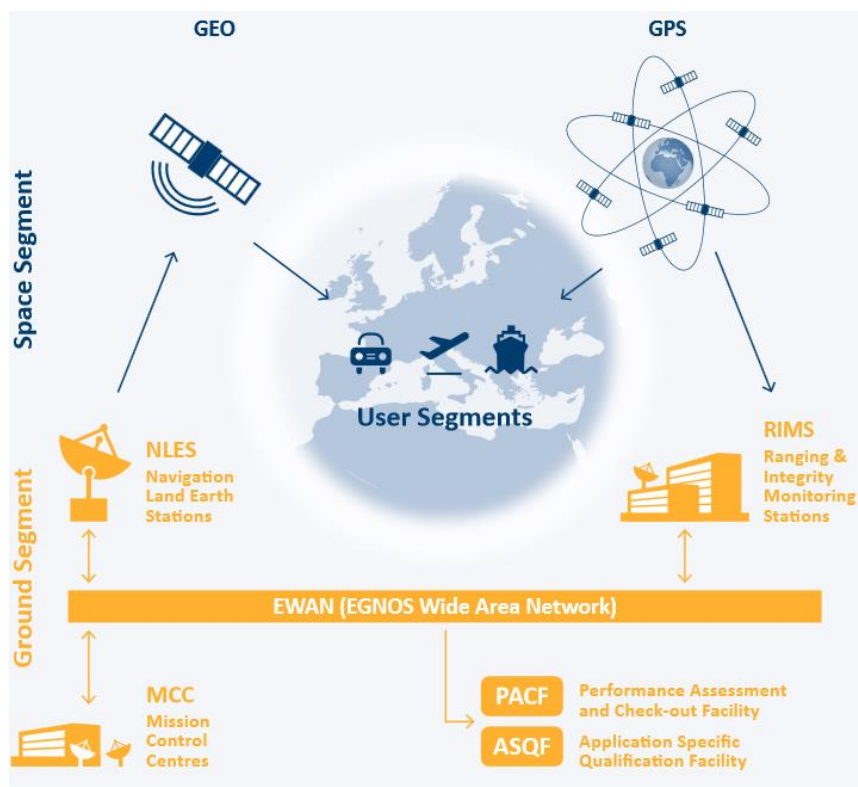


Obr. 6. Funkční a plánované světové SBAS systémy; zdroj [11]

Systém EGNOS je evropský zpřesňující systém, který zvyšuje přesnost GPS na území Evropy. Systém EGNOS rovněž poskytuje on-line informace o integritě určení polohy. ESTB (EGNOS System Test Bed) začal vysílat testovací signály od února roku 2000. Do operačního módu se systém EGNOS dostal v roce 2004. Přinesl zvýšení přesnosti, integrity a dostupnosti GPS zejména na evropském kontinentu. Provozován je rovněž systém SISNeT prostřednictvím kterého jsou dostupné signály systému EGNOS on-line na internetu. Takto je možné zajistit příjem GNSS dat v komplikovaných prostředích, jako je hustá městská zástavba, kde bývá špatná kvalita příjmu signálu ze satelitů (omezená viditelnost na oblohu). Systém obsahuje 34 referenčních a monitorujících stanic (RIMS) rozmístěných po evropském kontinentu, jež monitorují systém GPS a přenášejí signály GPS do čtyř monitorujících center (MCC). V těchto kontrolních centrech se generují data s informací o aktuální integritě systému a diferenciální korekce systému GPS pro oblast Evropy (WAD). Korekce obsahují údaje pro korekci chyby hodin každého satelitu, chyb efemeridů a chyb signálu při průchodu

ionosférou. Díky tomu může systém EGNOS zaručovat minimální přesnost určení polohy s přesností 3 metry (v 95 % času) kdekoli na území Evropy nezávisle na vzdálenosti od nejbližší referenční stanice [12].

EGNOS používá pro vysílání zpráv stejnou frekvenci jako GPS (L1 1575,42 MHz), ale má odlišný formát datové zprávy. Systém poskytuje záruku včasného varování. V případě aktuálního zhoršení integrity systému musí uživatel obdržet varování do šesti sekund. Informace o integritě jsou poskytovány na dvou úrovních. Obecnější úroveň ve formě signalizace, zda daný satelit může nebo nemůže být použit pro určování polohy (pro všechny aktuálně viditelné satelity). Konkrétnější úroveň ve formě odhadů chyb satelitů a chyb signálu při průchodu atmosférou po aplikaci WAD korekcí. Tyto parametry jsou poté použity pro výpočet ochranných limitů ve vertikálním a horizontálním směru. Zjednodušená architektura systému EGNOS je zachycena na Obr. 7.



Obr. 7. Schéma funkce systému EGNOS; zdroj [11]

Zpracování korekcí v přijímači

Přijímač odhaduje korekce pro hodiny satelitu a chyby efemeridů. Používá k tomu pomalé i rychlé korekce (rychlé korekce pro rychle se měnící chyby, např. hodiny satelitů a pomalé pro pomalu se měnící chyby jako např. dlouhodobý drift hodin satelitů, chyby efemeridů). Systém poskytuje přijímači parametry, které představují odhady jednotlivých druhů chyb. Z těchto odhadnutých chyb přijímač následně na základě definovaných vztahů odhadne korekce, které následně aplikuje na vypočtenou polohu. Předpokládaná zpoždění signálu při průchodu ionosférou jsou udávána rastrově v předem definovaných bodech. Přijímač následně odhaduje zpoždění pro jednotlivé body ve třech krocích.

- nejprve odhaduje, kde bude signál na cestě mezi satelitem a přijímačem procházet ionosférou (poblíž kterého bodu ionsferického gridu)

- vertikální zpoždění na daném bodě je potom získáno interpolací hodnot z okolních bodů
- potom je toto aplikováno na měření vzdálenosti mezi uživatelem a satelitem

Služby poskytované systémem EGNOS

EGNOS poskytuje tři služby:

- Open Service (OS), základní služba, volně dostupná pro všechny uživatele
- Safety of Life (SoL) Služba, která poskytuje online informace o integritě systému
- EGNOS Access Data Service (EDAS) šíří data EGNOS v reálném čase prostřednictvím internetu a rozšiřuje tak možnosti šíření signálu EGNOS

Z hlediska bezpečnostně-relevantních aplikací, jež jsou předmětem této práce, je nejdůležitější služba SoL, proto zde bude dále popisována už jen tato služba.

Charakteristika služby SoL

Služba EGNOS SoL byla od počátku vyvíjena podle leteckých požadavků, je kompatibilní s ICAO SARPs. Navigační operace na základě služby SoL mohou vyžadovat zvláštní povolení vydané příslušným zodpovědným orgánem, případně může být předpisem stanoveno, že není potřeba takové povolení.

Služba SoL je založena na údajích o aktuální integritě systému GNSS poskytovaných prostřednictvím satelitních signálů vysílaných systémem EGNOS. Hlavním cílem služby bylo už od počátku jejího vývoje podporovat operace v civilním letectví (LPV). Nicméně snahou je využívat službu SoL i v široké řadě dalších oblastí, jako jsou aplikace v námořní, železniční a silniční dopravě. EGNOS SoL poskytuje augmentační signály k standardní polohovací službě systému GPS (standard Positioning Service - SPS). Parametry (výkonnost, omezení, atd.) jsou formulovány v dokumentu definujícím tuto službu (EGNOS SoL Service Dokument - SDD) [13]. V něm jsou uvedeny pouze minimální výkonnostní charakteristiky služby. Uživatelé však obvykle mohou očekávat lepší výkon. Tyto charakteristiky jsou vyjádřeny ve statistických hodnotách. Obecně platí, že služba SoL by mohla najít uplatnění pro dopravní aplikace v různých oblastech, kde by mohlo vzniknout nebezpečí pro uživatele, jestliže výkon navigace je degradován pod specifický limit bez varování v určeném časovém intervalu. Dokument SDD obsahuje také ustanovení o odpovědnosti provozovatele vzhledem k uživatelům služby EGNOS SoL.

Spuštění a životnost služby SoL

Služba SoL je k dispozici od 2. března 2011. V prvním vydání dokumentu SDD v1.0 v březnu 2011 byly deklarovány dvě úrovně služeb NPA a APV-I. Služba SoL je určena k poskytování nejméně po dobu 20 let od svého spuštění, a je deklarován předstih 6 let oznámení v případě významné změny poskytovaných služeb [13].

Použití systému EGNOS v železniční zabezpečovací technice

O využití systému EGNOS k určování polohy pro potřeby železničních zabezpečovacích systémů se uvažuje cca od roku 2000. Proběhlo a probíhá množství výzkumných projektů, které se touto problematikou zabývají. Přehled těchto projektů je uveden v části 2.8. Snahy o zakomponování systému EGNOS do železničního zabezpečovacího systému ERTMS-ETCS vrcholí právě v dnešní době, kdy ERA spolu s ESA a GSA podnikají společné aktivity na podporu tohoto záměru.

2.5. Železniční a letecké bezpečnostní normy

Zařízení, u kterých je zamýšleno jejich budoucí využití v železniční zabezpečovací technice, musí být vyvíjena v souladu s přísnými evropskými normami, které sjednocují přístup k této problematice ve všech zemích EU. Jedná se zejména o normy ČSN EN 50126, ČSN EN 50129 a ČSN EN 50128. Tyto normy zavádějí pojmy jako např. riziko a úroveň integrity bezpečnosti (SIL). Koncepce rizika je kombinací dvou faktorů:

- pravděpodobnosti výskytu události nebo kombinace několika událostí vyvolávajících nebezpečí
- následků těchto nebezpečí.

U tohoto přístupu je potřeba kvantifikace pravděpodobnosti hazardních stavů (kvantifikace rizika), aby bylo možné určit, zda zařízení splňuje danou úroveň bezpečnosti. V případě, že riziko nesplňuje požadavky na úroveň bezpečnosti, je nutné ho zmenšit. Ovšem úplnému odstranění rizika klasicky brání technické a ekonomické aspekty vývoje a výroby zařízení.

Na koncepci rizika navazují úrovně integrity bezpečnosti, tzv. SIL (Safety Integrity Levels), neboli různě přísné úrovně požadavků na integritu bezpečnosti. To by mělo umožnit, aby pro méně kritické aplikace byly navrhovány jednodušší a tudíž levnější zařízení. Je možné takto zohlednit odůvodněním příslušné hodnoty úrovně integrity bezpečnosti různé frekvence výskytu hazardních stavů a různý stupeň závažnosti jejich následků.

Zpřesňující satelitní navigační systémy (SBAS) byly od začátku vyvíjeny na základě avionických požadavků (ICAO normy). Organizace ICAO vydala sadu pokynů a doporučení SARPs (GNSS Standards And Recommended Practices – standardní a doporučené praktiky pro užívání satelitních navigačních systémů) pro zajištění bezpečnosti a interoperability při použití GNSS v leteckých aplikacích. Organizace ICAO vydala manuál pro používání GNSS v leteckých aplikacích [14]. Četnosti poruch systémů SBAS byly nastaveny podle leteckých požadavků. Systémy SBAS byly také testovány podle leteckých norem, které obsahují požadované hodnoty četností chyb pro jednotlivé fáze letu (let v konstantní letové hladině, přiblížení k letišti, přistání). Požadavky na úroveň bezpečnosti v avionice byly stanoveny na základě historických statistických dat o leteckých nehodách, kde nejdůležitější parametr byl počet ztrát trupů letadel. Tento počet byl dán do poměru s celkovým počtem uskutečněných letů. Na základě tohoto poměru byly poté odvozeny požadavky na cílovou úroveň bezpečnosti v avionice (TLS - Target Level of Safety) [15].

2.6. Problematika lokalizace vlaků v železniční dopravě

V raných dobách železniční dopravy byly informace o poloze jednotlivých kolejových vozidel získávány pouze pomocí lidského pozorování a byly předávány mezilidskou komunikací. To znamená, že výpravčí mohl prostřednictvím nějakého komunikačního zařízení předávat informaci, jestli vlak již odjel, nebo neodjel ze stanice, atp. Poté začaly být pro signalizaci využívány elektrické obvody. Železniční zabezpečovací systémy byly během celé své historie vždy založeny na množství zařízení a prvků umístěných v kolejišti nebo podél tratí. Jde o zabezpečovací systémy mechanické, elektromechanické, kolejové obvody. Od počátků železniční dopravy rychlosti vlaků i hustota železničního provozu několikanásobně narostly. Současným nejmodernějším zabezpečovacím systémem v Evropě je zabezpečovací systém ERTMS/ETCS (European Railway Traffic Management System/European Train Control System), který pro lokalizaci vlaku a další funkce využívá bodové prvky v kolejišti zvané balízy. Všechny tyto systémy však mají v důsledku potřeby instalace rozsáhlé traťové infrastruktury společného jmenovatele, a tím je vysoká pořizovací cena, velké náklady na provoz i údržbu. Za účelem snížení těchto nákladů se nabízí možnost použití GNSS pro určení polohy

vlaků. V současnosti probíhající snahy o využití GNSS pro lokalizaci vlaků pro potřeby železničních zabezpečovacích systémů jsou novým historickým milníkem pro železniční dopravu.

Evropským geografickým aspektem železničních zabezpečovacích systémů je to, že při vývoji a zavádění těchto systémů spolu evropské státy od počátků nespolupracovaly. V důsledku toho vzniklo velké množství rozdílných, nekompatibilních železničních zabezpečovacích systémů. S postupující spoluprací evropských železničních dopravců začaly sílit snahy o sjednocení železničních zabezpečovacích systémů v rámci evropského území.

Evropská unie ve svojí direktivě už v roce 1991 definuje budoucí ERTMS/ETCS systém. Tento systém vyjadřuje snahu o harmonizaci železničních zabezpečovacích systémů napříč Evropou. Tedy snahu o zjednodušení průjezdu mezinárodních spojů napříč různými evropskými státy.

2.7. ERTMS/ETCS systém

Úvod

Evropské železniční sítě, způsoby návěštění a zabezpečení jízdy vlaku měly až do nedávné doby ryze národní charakter. To bylo dáno jednak historickým vývojem, kdy teprve postupem času docházelo k propojování původně samostatných železničních sítí do sítě celoevropské, jednak strategickými důvody, kdy nebyla žádoucí snadná možnost pohybu cizích vozidel po národní železniční síti. Teprve ohromný nárůst automobilové dopravy v 80. a zejména 90. letech 20. století vedl evropské země ke změně pohledu na železniční dopravu. V současné Evropě existuje zjevná snaha o umožnění jízdy vlaků bez omezení po celé evropské železniční síti. Roku 1990 iniciovala Mezinárodní železniční unie (UIC) vytvoření pracovních skupin, jejichž cílem byl vývoj jednotného evropského systému zabezpečení jízdy vlaků – ETCS. Existence cca 20 typů vlakového zabezpečovacího zařízení na evropských železnicích je v současnosti největší překážkou volného pohybu hnacích vozidel. V roce 1995 definovala Evropská komise směr dalšího vývoje ERTMS. Roku 2000 dochází k podepsání konečné specifikace a bylo možné zahájit uskutečňování komerčních projektů [16].

Hlavním původním účelem systému ERTMS/ETCS je sjednocení vlakových zabezpečovacích systémů na území Evropy. Tak aby bylo možné plynulé vedení vlaků po celém území Evropy bez nutnosti výměny hnacích vozidel na hranicích. Je určen především na vysokorychlostní vícekolejné tratě a tranzitní koridory.

Popis systému

Architektura systému vychází z požadavků uvedených v dokumentu UNISIG Subset – 026, System Requirement Specification. Základním prvkem systému je tzv. Balíza. To je zařízení, které se montuje na železniční svršek a slouží pro komunikaci s právě projíždějícím kolejovým vozidlem. Balízy pracují na principu pasivního transpondéru. Pro komunikaci je využíván systém GSM-R, což je mezinárodní standard bezdrátové komunikace určený pro železniční aplikace.

Aplikační úrovně systému ETCS

Systém ETCS se skládá ze tří základních aplikačních úrovní:

Úroveň L1

Aplikační úroveň L1 je do určité míry doplněním klasického infrastrukturního zabezpečovacího zařízení. Zjišťování volnosti/obsazenosti kolejových úseků je stále úkolem technologií, které spolupracují se staničním, traťovým resp. přejezdovým zabezpečovacím zařízením (kolejové obvody, počítače náprav, v zahraničí vozidlové detektory apod.). Na trati jsou osazeny

proměnné (přepínatelné) balízy (balízové skupiny), jež mají funkci referenčního bodu a zároveň předávají hnacímu vozidlu informace o návěstním znaku proměnného návěstidla, k němuž vlak přijíždí.

Úroveň L2

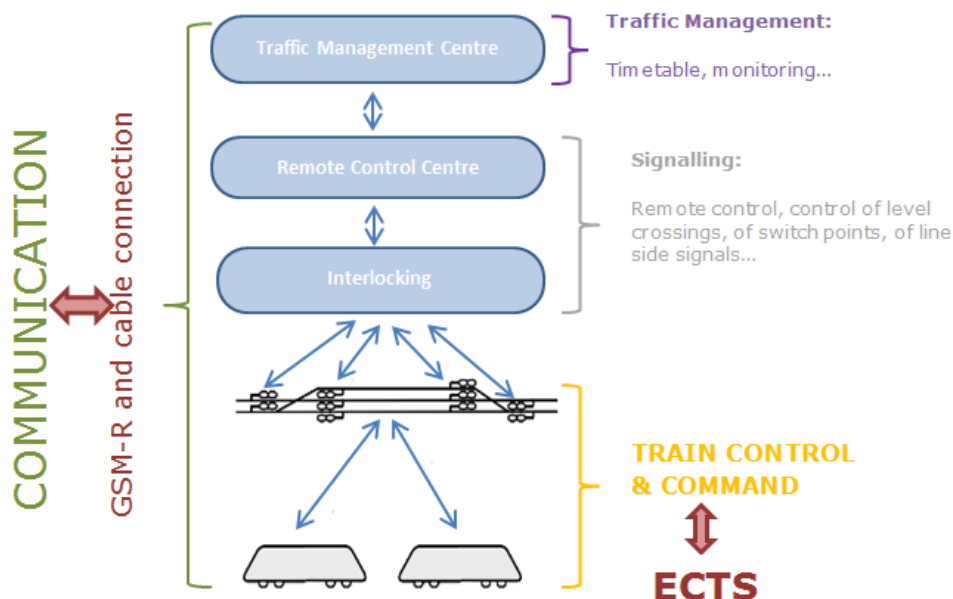
Úroveň L2 systému ETCS je určena pro využití na tratích, které jsou vybaveny klasickým infrastrukturním zabezpečovacím zařízením, tedy staničním zabezpečovacím zařízením ve stanicích a traťovým zabezpečovacím zařízením na širé trati. Tato zařízení vykonávají nadále svoji činnost v oblasti zjišťování přítomnosti a celistvosti vlaku, tak jako tomu bylo před implementací systému ETCS. Aplikační úroveň L2 vyžaduje vybudování komunikačního prostředí, GSM-R. Informace v čase proměnné (předem stanovené) musí infrastrukturní zabezpečovací zařízení předávat radioblokové ústředně RBC, která z nich vychází a následně uděluje povolení k jízdě kolejovému vozidlu. Přenos informace o povolení k jízdě probíhá prostřednictvím GSM-R. Dalším prvkem v rámci ETCS L2 pro komunikaci mezi kolejovým vozidlem a infrastrukturou jsou balízy.

Úroveň L3

Vybudování systému ETCS úrovně L3 znamená rozšíření aplikační úrovně L2, kdy je třeba doplnit do systému další nezbytné funkce. Funkce detekce integrity vlaku se stává úkolem vlastního palubního zařízení na vozidle. Na základě toho infrastrukturní část systému (RBC) nakládá s vlakem jakožto souvislou jednotkou, která jí předává informaci o své poloze na trati. Existují úvahy o změně koncepce provozování železniční dopravy od stávajících „pevně stanovených“ oddílů – fixed block k tzv. pohyblivým oddílům - moving block.

Princip určení polohy vlaku v systému ERTMS/ETCS

Palubní jednotka vždy určuje polohu vlaku relativně vůči poslední projeté balízové skupině, která je nazývána Last Relevant Balise Group (LRBG). Data přenášená balízou musí být vždy doplněna identifikací balízy a balízové skupiny, do níž tato balíza patří. Určování aktuální polohy vlaku neprobíhá striktně bodově, ale jedná se o úsekovou záležitost. Při určování úseku, v němž se nachází vlak, je třeba brát v úvahu nejistoty v měření odometru a v určení polohy balízové skupiny - LRBG. Úsek, v němž se nachází vlak, není omezen přesně čelem a koncem vlaku, ale je rozšířen o určitou rezervu – tzv. konfidenční interval. Zpráva o poloze, kterou zasílá palubní zařízení do RBC v případě použité aplikační úrovně L2 nebo L3 musí obsahovat údaj o vzdálenosti mezi LRBG a čelem vlaku (odhadnutým podle stanovených zásad), konfidenční interval, v němž se nachází vlak, identifikaci LRBG, k níž je měření vztahováno, polohu čela vlaku, orientaci vlaku vzhledem k orientaci LRBG, směr jízdy vlaku vzhledem k orientaci LRBG, rychlost vlaku a v případě L3 také údaj o celistvosti [17, 18].



Obr. 8. Schéma funkce železničního zabezpečovacího systému ERTMS/ETCS ; zdroj [17]

2.8. Projekty zabývající se problematikou použití GNSS na železnici

Již od spuštění prvního GNSS se začaly provádět výzkumy zabývající se problematikou využití těchto systémů v různých druzích dopravy. V letectví už jsou SBAS systémy aktivně používány (WAAS v USA a EGNOS v Evropě). Jejich užití v bezpečnostně relevantních železničních aplikacích je z výše zmíněných důvodů (rozdílů letecké a železniční filozofie bezpečnosti) komplikovanější.

Konkrétně v rámci Evropy, rychlý rozvoj systému EGNOS a budování kompletního nového GNSS systému Galileo způsobuje zvýšený tlak na vývoj nových aplikací využívajících lokalizaci pomocí těchto systémů. Evropské instituce ESA a EC dlouhodobě podporují projekty zabývající se výzkumem integrace GNSS do železničních bezpečnostně relevantních systémů, primárně do systému ERTMS/ETCS.

2.8.1 Ukončené projekty

APOLO – The Advanced Position Locator

Projekt započal v roce 1999 a byl vůbec první, jenž se zabýval problematikou využití GNSS v železničních bezpečnostně-relevantních aplikacích. Projekt probíhal v letech 1999 až 2001, účastnily se ho i České dráhy (LIS – Laboratoř Inteligentních Systémů – Pardubice). Výstupem projektu byl vlakový lokátor na principu GNSS-1 (GPS+ESTB) a INS. Vlakový lokátor byl nainstalován na dvou lokomotivách Českých drah a úspěšně vyzkoušen na tratích v okolí Pardubic a Hradce Králové. Kosmický segment pro tyto zkoušky připravili pracovníci francouzského kosmického národního centra CNES v Toulouse. ČD byly spolu s RENFE prvními železničními společnostmi v Evropě, kde byl ESTB zkoušen. Předmětem zkoušek bylo zejména ověřit přesnost vlakového lokátoru v různých režimech, konkrétně:

- standardní GPS
- diferenční mód s korekcemi EGNOS šířenými z geostacionární družice AOR-E

- diferenční mód s lokálními korekcemi šířenými digitální rádiovou sítí 150 MHz/19,2 kb/s z referenční stanice GPS/GLONASS v Pardubicích

Výsledky projektu ukazují, že přesnost (v 95 % času) ve standardním módu GPS je 3 až 4 m, v diferenčním módu s korekcemi ESTB WAD je 1,0 až 1,5 m a v diferenčním módu s lokálními diferenčními korekcemi RTCM-104 obvykle lepší než 1 m. Krátké výpadky SIS v důsledku průjezdu vozidel pod mosty nebo způsobené objekty umístěnými podél tratě neměly na přesnost lokátoru v podstatě žádný vliv [19].

ECORAIL – The EGNOS Controlled RAILway equipment

Projekt byl koordinovaný společností Technicatome (Francie). Jeho cílem bylo demonstrovat bezpečné využití systému EGNOS na železničních přejezdech. To mělo snížit náklady železničních provozovatelů na traťovou infrastrukturu a zlepšit průjezdnost železničních přejezdů pro silniční dopravu, díky zkrácení čekacích intervalů. Následkem toho by došlo ke snížení emisí výfukových plynů.

V rámci projektu měla být vyvinuta palubní jednotka (OBU) zajišťující určení polohy na trati s dostatečnou přesností a spolehlivostí pro použití v železničních aplikacích. Pro výpočet polohy byla kombinována data systému EGNOS s daty ze senzorů umístěných na kolejovém vozidle a také s daty z GIS obsahujícími mapu železniční tratě.

Během demonstrace byl prezentován automatický železniční přejezd (ALX) využívající GNSS. V případě klasického železničního přejezdu, kolejové obvody umístěné na trati detekují příjezd vlaku. Následně je spuštěna výstražná signalizace pro silniční dopravu a poté jsou spuštěny bariéry (závory) znemožňující vjezd silniční dopravu na přejezd. Vzdálenost senzorů od přejezdu je stanovena na základě nejvyšší rychlosti průjezdu vlaků na daném úseku trati. ALX musí být schopen plně zabezpečit přejezd, než příjezd vlaku překoná vzdálenost od místa detekce příjezdu až k místu křížení s pozemní komunikací. Za normálních okolností potom pomaleji jedoucí vlaky způsobí zbytečně dřívější spuštění závor na přejezdu a tudíž delší čekací interval pro pozemní dopravu. To následně způsobí i větší množství výfukových plynů znečišťujících ovzduší během čekání silničních vozidel. Cílem projektu byla eliminace těchto negativních vlastností klasických přejezdů použitím detekce příjezdů vlaků pomocí GNSS.

Projekt byl zahájen v září 2001. Předběžný návrh systému byl dokončen v červnu 2003 a demonstrace se konaly v červnu 2005 v Linci v Rakousku. Projekt byl ukončen v lednu 2006 [20].

LOCOPROL – Low Cost satellite based train location system for signalling and train Protection for Low density traffic railway lines

Tento projekt se zabýval možnostmi integrace GNSS do železničních zabezpečovacích systémů. Přednostně pro použití na vedlejších tratích s malou hustotou provozu. Bylo to zamýšleno jako rozšíření systému ERTMS. Projekt LOCOPROL byl financován v rámci 5. rámcového programu EU. Projekt byl koordinovaný firmou Alstom (Belgie). Partnerské firmy projektu LOCOPROL byly Honeywell Regelsysteme GmbH (Germany), INRETS (France), Alstom Transport (Italy), Trasys (Belgium), Alstom Transport (France), BPV (Germany), Septentrio (Belgium), Réseau Ferré de France (France), Société Nationale des Chemins de fer Belges (Belgium), Northern Jiaotong University (China), European Road Transport Telematics Implementation Coordination Organisation S.C.R.L. (Belgium).

Projekt oficiálně skončil v roce 2005. Výsledky poskytly základ pro řadu navazujících projektů. LOCOPROL cílil na mezeru mezi nízkonákladovým tradičním řešením železniční signalizace pro vedlejší tratě s nízkou intenzitou provozu s velmi nízkou úrovní funkcionality

a bezpečnosti a vysoce sofistikovaným řešením pro hlavní koridorové tratě v podobě systému ERTMS/ETCS. Projekt měl dokázat, že použití GNSS v železničních zabezpečovacích systémech na tratích s nízkou hustotou provozu je bezpečné [21].

LOCOLOC – Locomotive Location

Záměrem projektu bylo vyvinout, demonstrovat a validovat inovativní, bezpečný a z hlediska nákladů efektivní systém pro lokalizaci vlaků založený primárně na GNSS. Projektový tým byl vedený firmou Alstom (Belgie). Cílem bylo tak dokázat že použití GNSS v železničních zabezpečovacích systémech na tratích s nízkou hustotou provozu je bezpečné. Projekt startoval v březnu roku 2002 a k ukončení došlo v září 2004. Úspěšná demonstrace navrženého řešení proběhla v Gembloux v Belgii v dubnu 2004 [22].

INTEGRAIL – The EGNOS controlled railway equipment

Tento projekt započal v září 2001 a byl zakončen v červnu 2004. Úspěšné zkoušky byly prováděny od února 2003 do prosince 2003 na rakouských a belgických tratích. Projekt INTEGRAIL řídila firma Kayser Threde (Německo). Cílem bylo vylepšení možností využití systému EGNOS na vedlejších železničních tratích s nízkou intenzitou provozu. Výsledné řešení mělo být kompatibilní se systémem ERTMS. Projekt stavěl na výsledcích projektů předchozích. Tým řešitelů vyvinul čtyři typy integrovaných systémů založených na fúzi dat systému EGNOS a dat z inerciálních senzorů. Systémy byly osazeny na dva vlaky a poskytovaly informace jak strojvedoucím, tak řídicímu středisku, informace odesílaly.

Výhody systému zahrnují opět redukcí nákladů na traťovou infrastrukturu a náklady ušetřené traťovým operátorům z důvodu kompatibility se systémem ERTMS (harmonizace standardů). Tato harmonizace obecně přináší odstranění zbytečných zdržení vlaků na státních hranicích, kde je nutné změnit lokomotivu z důvodu nekompatibility stávajících národních vlakových zabezpečovacích systémů [23].

RUNE – Railway User Navigation Equipment

Tento projekt financovala ESA. Projektový tým vedla firma Laben (Itálie). Projekt měl za cíl vyvinout řešení přispívající ke zlepšení situačního povědomí strojvedoucího, který ve stávajících systémech nedostával včasné varování o aktuálním stavu a např. omezeních rychlosti a jiných pokynů, která bývají často umístěna jen na značkách situovaných podél trati. Řešení vyvinuté v rámci projektu RUNE, integrovalo systémy EGNOS/GPS spolu s daty z inerciálních senzorů umístěných na kolejovém vozidle. Do řešení byly včleněny i informace z řídicího centra, např. o omezení rychlosti. To by mělo významně zvýšit bezpečnost jako výsledek zlepšení povědomí strojvedoucího z hlediska aktuální situace v úseku tratě, na kterém se právě nachází. Předpokládáno je také zkrácení doby potřebné pro zaškolení strojvedoucího na novou trať [24].

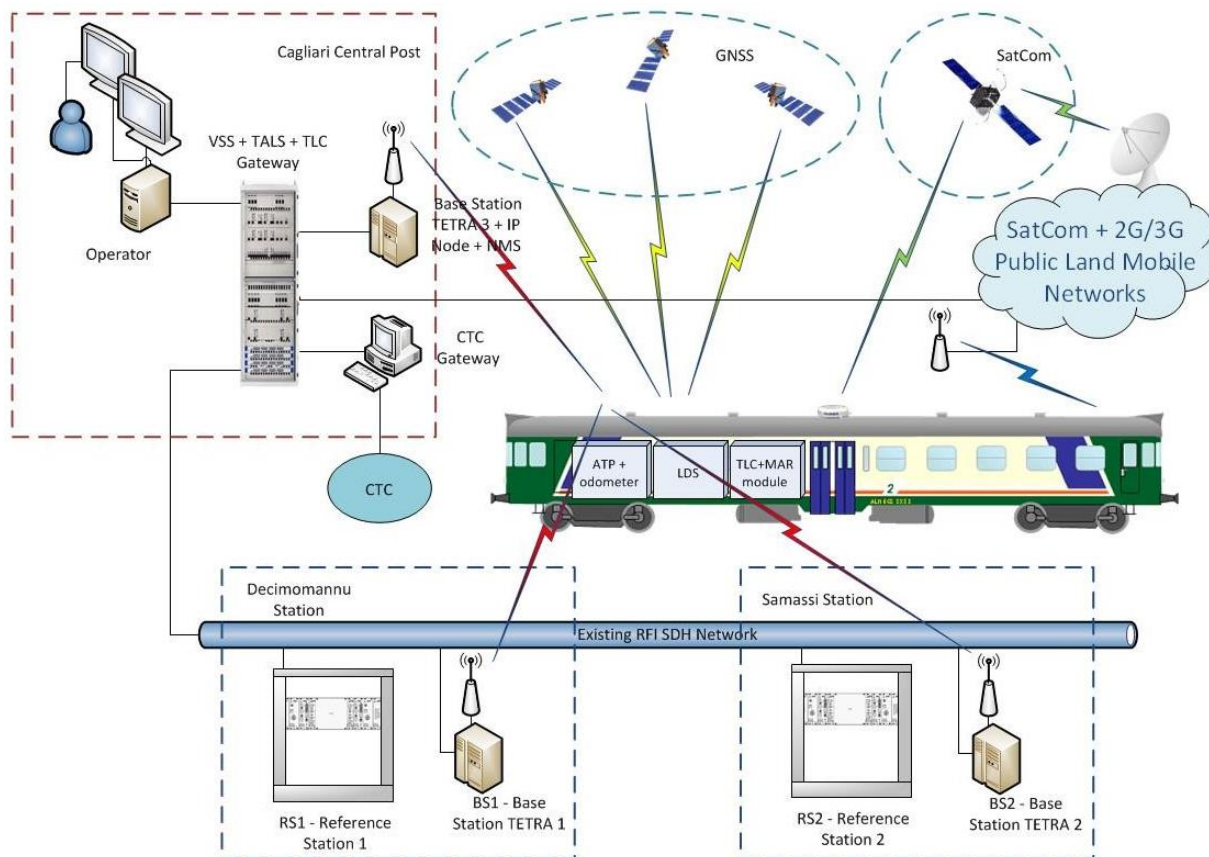
SATLOC – Satellite-based Operation and Management of Local Low Traffic Lines

Projekt zaměřený opět na vývoj a demonstraci inovativního použití GNSS v železničních aplikacích a to konkrétně na tratích s nízkou hustotou provozu. SATLOC se snažil přispět k využívání GNSS pro lokalizaci vlaků a určování jejich rychlosti v bezpečnostně kritických operacích. V rámci projektu bylo vyvinuto konkrétní řešení včetně hardwaru i softwaru kompatibilní se soudobými železničními signalizačními systémy a normami [25].

3INSAT – Train Integrated Safety Satellite System

Projekt měl za cíl vyvinout a ověřit řešení založené na satelitní navigaci integrované do ERTMS systému (Obr. 9), které by splňovalo přísné požadavky na integritu, konkrétně SIL 4.

Projekt byl spolufinancovaný v rámci programu Evropské kosmické agentury ARTES 20. Hlavním koordinátorem projektu se stala italská firma Ansaldo STS. V rámci projektu byla úspěšně provedena testovací fáze za účelem verifikace integrace satelitního určování polohy do železniční zabezpečovací techniky.



Obr. 9. Schéma řešení navrženého v rámci projektu 3INSAT; zdroj [26]

Během testů v podmínkách reálné železniční tratě na Sardinii ve spolupráci s firmou Radiolabs byla nejprve úspěšně ověřena datová komunikace mezi vlakem a kontrolním centrem. Jednalo se o jednokolejnou regionální 20 km dlouhou železniční trať [26].

Firma Telespazio spolupracovala s Ansaldo STS od roku 2012 na vypracování a verifikaci tohoto nového modelu satelitní komunikace v železničním prostředí [27].

Základní principy použité pro nový vlakový lokalizační systém:

- bezpečné digitální mapy tratí
- bezporuchové určení polohy na dané trajektorii
- určování polohy krok za krokem na relevantní trajektorii

STARS – Satellite Technology for Advanced Railway Signalling

Byl částečně financovaný Evropskou unií v rámci projektů H2020 project (GALILEO-1-2014-2015: EGNSS apps) Projekt byl zahájen v únoru 2016, doba trvání byla 24 měsíců.

Cíle projektu byly následující:

- předpovědět vývoj v železničním prostředí ve vztahu k zavádění nových technologií (GNSS)
- dosáhnout kompatibility mezi řešeními různých dodavatelů
- docílit zahrnutí GNSS do ERTMS

Hlavním koordinátorem projektu byla společnost UNIFE (Evropská asociace železničního průmyslu)

Mezi partnerské firmy projektu patří:

- 1) Firmy ze železničního průmyslu: ANSALDO STS, BOMBARDIER Transp., AŽD Praha, ALSTOM, THALES Transportation
- 2) Firmy činné ve vesmírném průmyslu: THALES ALENIA Space TELESPAZIO
- 3) Výzkumná centra: BOCCONI University, TU Braunschweig, CAF I+D, IFSTTAR, Západočeská univerzita
- 4) Další: D'Appolonia, RADIOLABS, INECO

Instituce zabývající se administrací projektu, vývojem v oblasti radiokomunikací a expertízami v oblasti GNSS.

Oblast železničních aplikací využívajících GNSS neustále narůstá, do této kategorie spadají například:

- informační systémy pro cestující
- logistické systémy nákladní dopravy
- infrastruktura pro sběr dat

V leteckých aplikacích se GNSS už mnoho let prakticky využívá, železniční prostředí se z hlediska příjmu GNSS signálu významně odlišuje [28].

ERSAT-EAV - ERTMS on SATELLITE - Enabling Application Validation

Návrh projektu ERSAT EAV se týká programu na využívání vesmírné infrastruktury. Období řešení bylo od února 2015 do ledna 2017.

Hlavním cílem je ověřit vhodnost EGNSS (včetně EGNOS a Galileo služeb které, jsou již v provozu) pro bezpečnostní železniční aplikace. Zejména pro regionální tratě. Pro tyto tratě bude lokalizace založená na GNSS definovaná a rozvíjená jako cesta k harmonizaci s evropskou normou ERTMS implementací řešení na pilotní lince. Tato implementace bude sloužit jako reference.

Cíle projektu budou dosaženy následujícím způsobem. V první fázi budou měřeny a vyhodnocovány nedostatky řešení, které mají být ze zadání naplněny. Z technického hlediska a vztahu k železnici je nejkritičtější požadavek na provádění měření v reálných podmínkách železniční trati. Vytváření modelů a analýz a ve finální fázi definování a vytvoření systémového řešení, implementace, testování a validace na pilotní lince, sloužící jako referenční bod pro budoucí standardizaci a certifikační procesy. Návrh projektu ERSAT EAV se týká pracovního programu na využívání vesmírné infrastruktury prioritně pro využití EGNSS pro železniční dopravu.

Evropské železnice spolu s hlavními aktéry projektu mají společný zájem na budování systému kompatibilního s ERTMS. Ten bude konkurenceschopný a bude těžit z velké příležitosti, která se skýtá v evropských regionálních tratích tvořících 50 procent ze všech evropských tratí.

Železniční signalizační systém založený na EGNSS-ERTMS přináší výhody pro dopravce zejména v nižších nákladech na pořízení i provoz oproti aktuálně používaným řešením. Projekt započal v únoru 2015 a byl ukončen v lednu 2017 [29].

RHINOS – Railway High Integrity Navigation Overlay System

Doba trvání projektu byla leden 2016 – říjen 2017. RHINOS si klade za cíl zvýšit využívání GNSS v železničních bezpečnostně-relevantních lokalizačních funkcích, a to v zájmu podpory využití těchto systémů na regionálních tratích. Projekt plánoval využít přidané hodnoty E-GNSS využitím výsledků z minulých nebo stávajících projektů zabývajících se využitím GNSS v železniční zabezpečovací technice. A rozvíjí Railway High Integrity Navigation Overlay System, který je zamýšlen pro použití železniční komunitou. Pilířem RHINOS má být infrastruktura systému GNSS vybudovaná pro letecké aplikace, do ní mají být přidány další vrstvy, ty zajistí splnění požadavků železniční dopravy. Projekt obsahuje mezinárodní spolupráci s kalifornskou Stanfordskou univerzitou, jež byla zapojena ve vývoji aviatických aplikací využívajících GNSS, již od spuštění systému GPS, v roce 1994 a disponuj nezpochybnitelnými znalostmi o vlastnostech GPS i o vývoji aplikací s vysokou integritou.

Projekt RHINOS má tři hlavní cíle:

- 1) Definovat architekturu vlakového LDS a související podpůrnou infrastrukturu s následujícími vlastnostmi
 - společné využití systémů GPS a GALILEO, využití zpřesňujících sítí jako WAAS v severní Americe a EGNOS v Evropě
 - standardní rozhraní SBAS-R, pro poskytování služeb SoL pro železnice prostřednictvím SBAS, regionální augmentace, nebo hybridního systému SBAS/GBAS
 - shoda s evropskými i americkými železničními požadavky a normami
 - využívání co nejvíce z již hotové funkční podpůrné (zpřesňující) infrastruktury a zpracování signálu na palubě vlaku včetně nových metod jako např. ARAIM
- 2) Možnost posouzení výkonnosti definované architektury pomocí:
 - virtualizované testovací verze systému, rozsáhlého souboru dat získaných v reálných podmínkách železničního prostředí
 - historická dlouhodobá data obsahující raritní chyby GPS SIS způsobených chybami satelitů i anomáliemi v atmosféře (např. bouře v ionosféře), simulované chyby konstelace vznikajícího systému GALILEO
 - vhodných analytických metod pro ověřování a bezpečnostních důkazů definované architektury dle příslušných železničních norem (např. CENELEC EN 50129, atd.)

Cílem projektu je udělat další krok v proniknutí platformy GNSS do železničních aplikací a to zejména na regionálních tratích, které představují v tomto směru velký potenciál. Upřednostňováno je globálně aplikovatelné řešení, pro poskytnutí potenciačních výhod pro E-GNSS na globálním trhu železničních zabezpečovacích systémů. Pracovní program projektu RHINOS zahrnuje zkoumání možných konceptů, pomocí kterých by bylo možné dosáhnout vysoké integrity výsledného řešení, potřebné k dostatečně spolehlivému určení polohy vlaku, tak jak to vyžadují železniční zabezpečovací systémy. EGNSS (Galileo a EGNOS) a GPS a WAAS představují k tomuto účelu referenční infrastrukturu, jež je k dispozici po celém světě. Navíc lokální zpřesňující prvky, ARAIM techniky a další čidla na vlaku tvoří specifické prostředky budoucího systému pro zmírnění rizik způsobených prostředím v okolí tratě (lokální efekty), které jsou největším problémem při použití GNSS železničních aplikacích [30].

Dalším cílem RHINOS je přispět k definici standardu Railway High Integrity Navigation Overlay System, který by měl přispět také k americko-evropské dohodě o spolupráci a sjednocení v oblasti technik ARAIM (EU-U.S. Cooperation on Satellite Navigation, Working Group C - ARAIM Technical Subgroup). Plán projektu RHINOS obsahuje tři specifické workshopy se zástupci železniční a satelitní navigační komunity, a to na Stanfordské univerzitě pro americké komunity, v Římě pro západoevropské komunity a v Praze pro východoevropské komunity [30].

Minulé i současné a budoucí aktivity jsou přehledně zachyceny ve vizualizaci E-GNSS in rail signalling roadmap evropské kosmické agentury.

2.8.2 Probíhající projekty

Po výčtu ukončených projektů, následující část zmiňuje projekty, které v této oblasti v současnosti aktuálně probíhají.

CAPRESE

Tento projekt byl zahájen 5. listopadu 2018. Předpokládaná doba trvání je 18 měsíců. Cílem je studium technik určení polohy pomocí GNSS prostřednictvím fázového měření (RTK) a analýza jejich možného využití v bezpečnostních železničních aplikacích. Zejména možnost využití v rámci ERTMS, pro detekci virtuální balízy pomocí GNSS. Tato technika může dosáhnout podstatně lepších výsledků než klasické kódové měření. Neexistují dosud žádné certifikované koncepty integrity, využívající tento způsob určování polohy. Očekává se, že použití RTK může přinést výrazné zvýšení přesnosti, což podpoří využívání polohy určené pomocí GNSS v ERTMS. V současnosti je plán zakomponovat do ERTMS koncept virtuální balízy, jejíž poloha bude určována pomocí GNSS [31]. Na tom spolupracují evropské organizace ERA, ESA A GSA, které společně vyvinuli plán postupu činností pro dosažení využití GNSS pro určování polohy v železničních zabezpečovacích systémech (gnss rail roadmap)

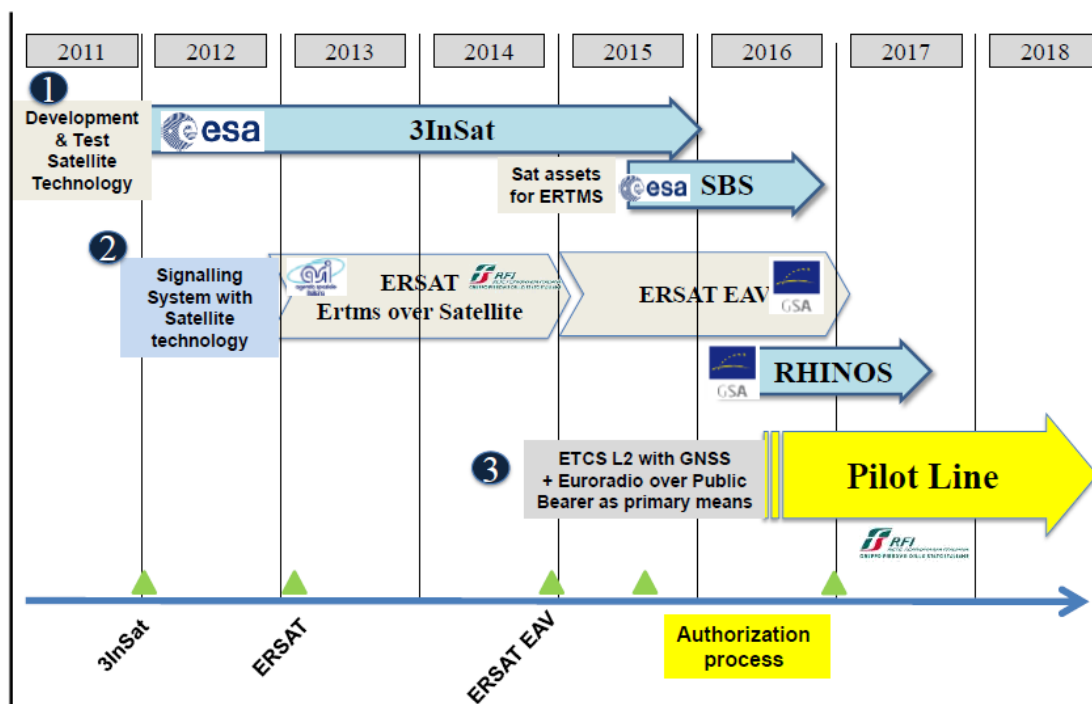
- hlavní řešitel: NSL Nottingham Scientific Ltd, Velká Británie
- spoluřešitelé: GMV Innovation Solutions S.R.L Rumunsko, AŽD Praha, ČR

STEMS

Projekt je systémovou studií vhodnosti použití polohy určené pomocí GNSS v ERTMS. Datum zahájení projektu je 9 dubna 2018. Projekt se zabývá nahrazením klasického určování polohy pomocí fyzických balíz v kolejišti, orometrie, atd. virtuálními balízami. Virtuální balízy a detekování pomocí GNSS přinesou snížení nákladů na infrastrukturu, kdy odpadne potřeba instalovat fyzické balízy na trať. Současně to přináší také zvýšení bezpečnosti ve smyslu snížení expozice traťové infrastruktury vůči krádežím a vandalismu. Použití této technologie je plánováno na regionálních tratích s nižší hustotou provozu [32].

- hlavní řešitel: NSL Nottingham Scientific Ltd, Velká Británie
- spoluřešitelé: GMV Innovation Solutions S.R.L, Rumunsko, Telespazio, Velká Británie, TUV Rheinland, Velká Británie, Univerzita Pardubice, ČR

Na následujícím obrázku (Obr. 10) je zachyceno shrnutí zmíněných projektů na časové ose.



Obr. 10. Časová osa projektů zabývajících se použitím GNSS v železničních bezpečnostních aplikacích; zdroj: [33]

Podrobná vizualizace minulých, současných a budoucích plánovaných aktivit je přehledně zpracována ve formě mapy projektů v čase (E-GNSS in rail signalling roadmap). Obsahuje i stručný popis jednotlivých projektů, je dostupná v [33].

ERSAT-GGC

Další z řady projektů ERSAT, navazující na předešlý ERSAT – EAV.

Inovační ERSAT GGC představuje další příspěvek k plánu ERTMS pro přijetí družicové technologie E-GNSS, která již byla dříve identifikována jako jedna z technologií pro změnu vývoje ERTMS. Zvláštní pozornost je zde věnována certifikaci nové družicové technologie, používané k detekci virtuálních balíz tak, aby byla zachována plná kompatibilita s klasickým ERTMS. ERSAT GGC staví na výsledcích předchozích projektů ERSAT EAV, RHINOS a STARS a je spolufinancován GSA a EC. Mezi hlavní cíle projektu patří Validace EGNSS a příslušného certifikačního procesu kompatibilního se standardy ERTMS. Definice a certifikace procesu, metodiky a související sady nástrojů pro klasifikaci trasových oblastí jako „Vhodné“ nebo „Nevhodné“ pro použití lokalizace pomocí virtuálních balíz. Konsolidace a certifikace funkční architektury ERTMS integrované se systémem určování polohy pomocí EGNSS (LDS) [34].

- hlavní řešitel: RFI (Rete Ferroviaria Italiana), provozovatel italské železniční infrastruktury
- spoluřešitelé: Ansaldo STS, Itálie, DLR, Německo, Radiolabs, Itálie, Unife, Belgie, SNCF, Francie, Ifsttar, Francie, Trenitalia, Itálie, Adif, Španělsko, Cedex, Španělsko, Ineco, Španělsko

3. Teoretické základy použitých metod

3.1. Teoretické vztahy pro určování polohy pomocí GNSS

Matematické základy určení polohy pomocí GNSS

Určování polohy pomocí GNSS je založeno na měření vzdáleností mezi přijímačem a viditelnými satelity na obloze. Používá se metoda TDOA (Time Difference of Arrival - „rozdíl času příchodu“). Vzdálenost mezi přijímačem a satelitem se určí pomocí rozdílu mezi časem vyslání signálu satelitem a časem přijetí signálu přijímačem. Po vynásobení tohoto rozdílu rychlostí šíření světla dostaneme tzv. pseudovzdálenost

$$P_i = (t_p - t_v) \cdot c, \quad [35] \quad (1)$$

kde t_p je čas přijetí signálu přijímačem, t_v je čas vyslání signálu satelitem, c je rychlost světla (299792458 m/s), P_i je pseudovzdálenost i -tého satelitu. Během cesty signálu od vysílače k přijímači na něj působí mnoho rušivých vlivů. Signál může být např. zpožděn při průchodu ionosférou, troposférou, atd., nebo může nastat vícecestné šíření vlivem odrazu signálu od překážek v okolí přijímače. Následkem vícecestného šíření může dojít ke změně délky pseudovzdálenosti. Pseudovzdálenost vypočítaná pomocí vztahu (1) tedy nikdy nebude shodná se skutečnou vzdáleností mezi vysílačem a přijímačem. Pokud souřadnice satelitu označíme x_s, y_s, z_s a souřadnice přijímače jako x_p, y_p a z_p , pak skutečnou vzdálenost mezi satelitem a přijímačem (X_i) lze vyjádřit vztahem

$$X_i = \sqrt{(x_s - x_p)^2 + (y_s - y_p)^2 + (z_s - z_p)^2}. \quad [35] \quad (2)$$

Tato vzdálenost je pro běžného uživatele neznámá. Polohu satelitů GNSS přijímač získává z efemeridů (parametry drah satelitů), které jsou vysílány v navigačních zprávách [32].

Určení polohy pomocí pseudovzdáleností metodou nejmenších čtverců (LS - Least Squares)

Nejprve se provede linearizace a poté se rovnice řeší metodou nejmenších čtverců. Předpokládejme, že můžeme vyjádřit skutečnou pozorovanou pseudovzdálenost jako součet modelované části a chyby

$$P_{\text{pozorovaná}} = P_{\text{modelovaná}} + \text{chyba} = P(x, y, z, \tau) + v. \quad [36] \quad (3)$$

Poté se aplikuje Taylorův teorém, zanedbají se členy druhého a vyšších řádů a model je rozšířen o výpočet pseudovzdálenosti v počátečních hodnotách x_0, y_0, z_0 a τ_0

$$\begin{aligned} P(x, y, z, \tau) &\cong P(x_0, y_0, z_0, \tau_0) + (x - x_0) \frac{\partial P}{\partial x} + (y - y_0) \frac{\partial P}{\partial y} + (z - z_0) \frac{\partial P}{\partial z} + (\tau - \tau_0) \frac{\partial P}{\partial \tau} \\ &= P_{\text{vypočítaná}} + \frac{\partial P}{\partial x} \Delta x + \frac{\partial P}{\partial y} \Delta y + \frac{\partial P}{\partial z} \Delta z + \frac{\partial P}{\partial \tau} \Delta \tau. \end{aligned} \quad [36] \quad (4)$$

Reziduum pozorování je definováno jako rozdíl mezi aktuální pozorovanou pseudovzdáleností a pseudovzdáleností spočítanou pomocí počátečních hodnot

$$\Delta P = P_{\text{pozorovaná}} - P_{\text{spočítaná}} = \frac{\partial P}{\partial x} \Delta x + \frac{\partial P}{\partial y} \Delta y + \frac{\partial P}{\partial z} \Delta z + \frac{\partial P}{\partial \tau} \Delta \tau + v. \quad [36] \quad (5)$$

V maticové formě dostaneme následující rovnici pro každý satelit

$$\Delta P = \begin{pmatrix} \frac{\partial P}{\partial x} & \frac{\partial P}{\partial y} & \frac{\partial P}{\partial z} & \frac{\partial P}{\partial \tau} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \Delta x \\ \Delta y \\ \Delta z \\ \Delta \tau \end{pmatrix} + v. \quad [36] \quad (6)$$

Při určování polohy přijímače potřebujeme určit 4 neznámé x_P, y_P, z_P a chybu hodin přijímače τ_P . Jsou tedy vyžadovány nejméně 4 pseudovzdálenosti (nejméně 4 viditelné satelity). Většinou je k dispozici více viditelných satelitů. Poloha se potom počítá podle rovnice

$$\begin{pmatrix} \Delta P_1 \\ \Delta P_2 \\ \Delta P_3 \\ \vdots \\ \Delta P_n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{\partial P_1}{\partial x} & \frac{\partial P_1}{\partial y} & \frac{\partial P_1}{\partial z} & \frac{\partial P_1}{\partial \tau} \\ \frac{\partial P_2}{\partial x} & \frac{\partial P_2}{\partial y} & \frac{\partial P_2}{\partial z} & \frac{\partial P_2}{\partial \tau} \\ \frac{\partial P_3}{\partial x} & \frac{\partial P_3}{\partial y} & \frac{\partial P_3}{\partial z} & \frac{\partial P_3}{\partial \tau} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \frac{\partial P_n}{\partial x} & \frac{\partial P_n}{\partial y} & \frac{\partial P_n}{\partial z} & \frac{\partial P_n}{\partial \tau} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \Delta x_P \\ \Delta y_P \\ \Delta z_P \\ \Delta \tau_P \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} e_1 \\ e_2 \\ e_3 \\ \vdots \\ e_n \end{pmatrix}. \quad [36] \quad (7)$$

V maticové formě

$$\Delta \mathbf{P} = \mathbf{A} \cdot \Delta \mathbf{x} + \mathbf{e}, \quad [36] \quad (8)$$

kde \mathbf{P} je vektor pseudovzdáleností, \mathbf{A} je tzv. "Jacobiho matice" ("design matrix") – to je matice, která obsahuje parciální derivace jednotlivých pseudovzdáleností podle jednotlivých parametrů x_P, y_P, z_P a τ_P . Vektor \mathbf{e} je vektor neznámých chyb. V případě přeureného systému rovnic, kdy jsou k dispozici více než 4 satelity, se soustava řeší pomocí metody nejmenších čtverců.

Výpočet polohy metodou váhovaných nejmenších čtverců (WLS – Least Squares)

Poloha přijímače metodou váhovaných nejmenších čtverců se vypočítá podle následujícího vztahu ([32, 33])

$$\Delta \mathbf{x} = (\mathbf{A}^T \mathbf{A})^{-1} \mathbf{A}^T \Delta \mathbf{P}, \quad [36] \quad (9)$$

kde \mathbf{W} je váhovací matice, která je uvedena zde

$$\begin{pmatrix} \frac{1}{\sigma_1^2} & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \frac{1}{\sigma_2^2} & & \vdots \\ \vdots & & \ddots & 0 \\ 0 & \dots & 0 & \frac{1}{\sigma_n^2} \end{pmatrix}. \quad [36] \quad (10)$$

Nepřesnost měření času příchodu signálu od jednotlivých satelitů způsobí chybu při určení délky pseudovzdálenosti podle rovnice (1). Vlivem chybné délky pseudovzdálenosti následuje chybné určení polohy přijímače. V případě přeureného systému lze vyjádřit chybu určení polohy pomocí předcházející rovnice jako [32,33]

$$\mathbf{e}_{polohy} = (\mathbf{A}^T \mathbf{W} \mathbf{A})^{-1} \mathbf{A}^T \mathbf{W} \Delta \mathbf{P}, \quad [36] \quad (11)$$

kde \mathbf{e}_{polohy} je chyba určení polohy přijímače a $\Delta \mathbf{p}$ je chyba určení délky pseudovzdálenosti. Za předpokladu Gaussovského rozložení chyby s nulovou střední hodnotou, můžeme určit kovarianci chyby určení polohy přijímače [32, 33]

$$\text{cov}(\Delta \mathbf{x}) = E[\Delta \mathbf{x} \cdot \Delta \mathbf{x}^T] = (\mathbf{A}^T \mathbf{W} \mathbf{A})^{-1} \mathbf{A}^T \mathbf{W} \text{cov}(\Delta \mathbf{P}) (\mathbf{A}^T \mathbf{W} \mathbf{A})^{-1} \mathbf{A}^T \mathbf{W}. \quad [36] \quad (12)$$

3.2. Činitelé zhoršení přesnosti vlivem geometrie (DOP)

Vliv aktuální geometrie na přesnost výsledné polohy lze vyjádřit tzv. činitelů zhoršení přesnosti vlivem geometrie (DOP - Dilution of Precision). Kovarianční matice je

$$\text{cov}(\Delta \mathbf{x}) = (\mathbf{A}^T \mathbf{A})^{-1} \sigma_t^2 = \mathbf{D} \sigma_t^2, \quad [37] \quad (13)$$

matice \mathbf{D} je rozepsána zde

$$\mathbf{D} = \begin{pmatrix} \sigma_e^2 & \sigma_{ne} & \sigma_{nu} & \sigma_{nt} \\ \sigma_{en} & \sigma_n^2 & \sigma_{eu} & \sigma_{et} \\ \sigma_{eu} & \sigma_{ue} & \sigma_u^2 & \sigma_{ut} \\ \sigma_{et} & \sigma_{ut} & \sigma_{ut} & \sigma_t^2 \end{pmatrix}. \quad [37] \quad (14)$$

Matice \mathbf{D} uvažovaná v souřadnicovém systému ENU má na hlavní diagonále rozptyly chyb určení jednotlivých souřadnic ve směrech jednotlivých os. Směrodatné odchylky ve směrech os jsou σ_e , σ_n a σ_u , a rozptyl chyby určení času σ_t . Ostatní prvky matice jsou kovariance, které vyjadřují míru korelace mezi jednotlivými rozptyly chyb určení souřadnic.

Měřítka celkové kvality určení polohy pomocí metody nejmenších čtverců, může být stanoveno pomocí rozptylů z kovarianční matice podle následujícího vztahu

$$\sigma_g = \sqrt{\sigma_e^2 + \sigma_n^2 + \sigma_u^2 + \sigma_t^2}. \quad [37] \quad (15)$$

Vliv geometrie na jednotlivé složky celkové polohy můžeme vyjádřit pomocí směrodatných odchylek následovně:

$$\sigma_P = \sqrt{\sigma_E^2 + \sigma_N^2 + \sigma_U^2}, \quad [37] \quad (16)$$

$$\sigma_H = \sqrt{\sigma_E^2 + \sigma_N^2}, \quad [37] \quad (17)$$

$$\sigma_U = \sqrt{\sigma_U^2}, \quad [34] \quad (18)$$

$$\sigma_T = \sqrt{\sigma_T^2}, \quad [37] \quad (19)$$

kde σ_P je celková směrodatná odchylka polohy, σ_H je směrodatná odchylka v horizontální rovině, σ_U je směrodatná odchylka ve vertikálním směru a σ_T je směrodatná odchylka času. Parametry σ_E^2 , σ_N^2 a σ_U^2 jsou rozptyly východní, severní a výškové složky polohy určené GNSS přijímačem. Parametr σ_T^2 je rozptyl času. Prvky matice \mathbf{D} jsou funkcí aktuální vzájemné geometrie rozmístění přijímače a satelitů použitých pro výpočet polohy. Jednotlivé DOP parametry se spočítají následovně, polohový DOP

$$PDOP = \sqrt{\sigma_e^2 + \sigma_n^2 + \sigma_u^2}, \quad [37] \quad (20)$$

horizontální DOP

$$HDOP = \sqrt{\sigma_e^2 + \sigma_n^2}, \quad [37] \quad (21)$$

vertikální DOP

$$VDOP = \sigma_u, \quad [37] \quad (22)$$

časový DOP

$$TDOP = \sigma_t, \quad [37] \quad (23)$$

celkový geometrický DOP

$$GDOP = \sqrt{\sigma_e^2 + \sigma_n^2 + \sigma_u^2 + \sigma_t^2}, \quad [37] \quad (24)$$

parametr GDOP vyjadřuje vliv aktuální geometrie přijímače a satelitů na výsledné celkové určení polohy. Pro celkovou přesnost určení polohy platí

$$PDOP^2 = HDOP^2 + VDOP^2. \quad [37] \quad (25)$$

Parametry DOP závisí pouze na aktuální vzájemné geometrii uživatele a satelitů (nezávisí na aktuálních pseudovzdálenostech). Jejich hodnota pro konkrétní místo na zemi tedy může být odhadnuta dopředu, podle drah satelitů. Dráhy satelitů jsou obsaženy v almanachu. Pokud by byly satelity s přijímačem v jedné rovině, nebylo by možné vypočítat polohu pomocí metody nejmenších čtverců, protože matice $A^T A$ by byla singulární. Nejlepší geometrie satelitů pro určení polohy pomocí GNSS je pokud jsou satelity rozprostřeny po obloze přibližně rovnoměrně. V takovém případě bývají hodnoty DOP nejnižší a také nepřesnost určení polohy vlivem aktuální geometrie rozmístění satelitů je nejmenší. Hodnoty DOP bývají typicky mezi 1 a 2. VDOP jsou větší než HDOP, protože vertikální chyby GNSS jsou větší než horizontální. To proto, že všechny satelity, ze kterých se přijímá signál, jsou nad přijímačem. V horizontální rovině to neplatí, protože přijímač přijímá signály ze všech směrů [33].

Střední kvadratickou odchylku horizontální polohy přijímače lze vyjádřit jako

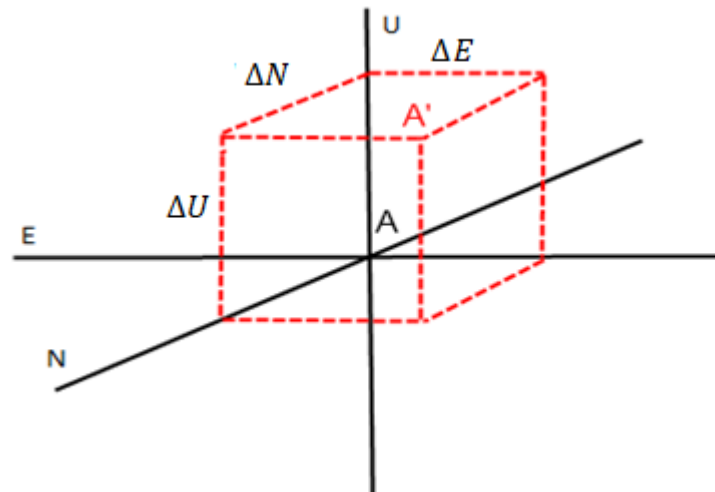
$$\sigma_H = HDOP \cdot \sigma_t, \quad [36] \quad (26)$$

střední kvadratickou odchylku vertikální polohy přijímače lze vyjádřit jako

$$\sigma_V = VDOP \cdot \sigma_t. \quad [36] \quad (27)$$

3.3. Výpočet chyb naměřených hodnot

Základní vztahy pro výpočet chyb na základě naměřených dat jsou následující. V horizontální rovině je Δ_E chyba ve směru osy E, Δ_N chyba ve směru osy N a chyba ve vertikálním směru je Δ_U (chyba ve směru osy U). To je znázorněno na Obr. 11, kde A je skutečná poloha bodu a A' je naměřená poloha.



Obr. 11. Znázornění chyb v osách souřadnicového systému ENU; zdroj: vlastní

Základní veličiny pro vyhodnocení chyb ve směrech jednotlivých souřadnicových os jsou střední kvadratické chyby RMS (Root Mean Squared). Ve směru osy E je to RMS_E , ve směru osy N RMS_N a ve směru osy U RMS_U

$$RMS_E = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \Delta E_i^2}{n}}, \quad (28)$$

$$RMS_N = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \Delta N_i^2}{n}}, \quad (29)$$

$$RMS_U = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \Delta U_i^2}{n}}. \quad (30)$$

Základní veličina pro popis chyby v horizontální rovině je střední kvadratická chyba určení polohy v horizontální rovině (distance Root Mean Square – dRMS)

$$dRMS = \sqrt{RMS_E + RMS_N}. \quad (31)$$

Pro popis celkové přesnosti 3D určení polohy je možné použít veličinu „střední radiální sférická chyba“ (Mean Radial Spherical Error – MRSE)

$$MRSE = \sqrt{RMS_E + RMS_N + RMS_U}. \quad (32)$$

3.4. Matematická statistika

Matematická statistika je vědecká disciplína na pomezí popisné statistiky a aplikované matematiky. Zabývá se teoretickým rozbohem a návrhem metod získávání a analýzy empirických dat obsahujících prvek nahodilosti.

3.5. Pravděpodobnost a rozdělení pravděpodobnosti

Úvod

Pravděpodobnost je míra nebo odhad toho, jak pravděpodobné je, že nějaký „náhodný“ jev bude mít určitý výsledek. Hodnoty pravděpodobnosti jsou udávány jako hodnoty mezi 0 (nulová šance) a 1 (100 - procentní šance). Vyšší hodnota pravděpodobnosti znamená, že je pravděpodobnější, že událost nastane. Při větším počtu pozorování nastane jev tím častěji, čím větší je jeho pravděpodobnost.

Náhodná veličina je libovolná veličina, měřitelná v různých místech nebo v různých časech. Její naměřené hodnoty se zpracovávají metodami teorie pravděpodobnosti nebo matematické statistiky.

Rozdělení náhodné veličiny

Rozdělení pravděpodobnosti nebo rozložení pravděpodobnosti (někdy také distribuce pravděpodobnosti) náhodné veličiny je pravidlo, kterým každému jevu popisovanému touto veličinou přiřazujeme určitou pravděpodobnost. Rozdělení pravděpodobnosti náhodné veličiny tedy získáme, pokud každé hodnotě diskrétní náhodné veličiny, popř. intervalu hodnot spojitě náhodné veličiny, přiřadíme pravděpodobnost.

Rozdělení pravděpodobnosti lze také chápat jako zobrazení, které každému elementárnímu jevu přiřazuje určité reálné číslo, jež charakterizuje pravděpodobnost tohoto jevu.

Cílem statistického zkoumání je poznání vlastností určitého souboru dat (náhodného výběru). Vlastnosti konkrétního výběru, který máme k dispozici, pak určujeme výpočtem jeho statistických charakteristik jako je například výběrové rozdělení pravděpodobnosti [38].

Pravděpodobnostní funkce

Pravděpodobnostní funkce (Probability Mass Function, PMF) udává pravděpodobnost, že diskrétní náhodná veličina se přesně rovná nějaké hodnotě. Pravděpodobnostní funkce je často základní prostředek pro definování diskrétního pravděpodobnostního rozdělení. Taková funkce

existuje jak pro skalární, tak pro vícerozměrnou náhodnou veličinu, jejíž definiční obor je diskrétní [36].

Distribuční funkce

Distribuční funkce, funkce rozdělení pravděpodobnosti (zleva kumulovaná pravděpodobnost) (Cumulative Distribution Function, CDF) udává pravděpodobnost, že hodnota náhodné proměnné je menší než zadaná hodnota. Tato funkce jednoznačně určuje rozdělení pravděpodobnosti a ve spojitém případě je úzce spjatá s funkcí hustoty pravděpodobnosti.

Rozdělení pravděpodobnosti diskrétní náhodné veličiny

Mezi důležitá diskrétní rozdělení pravděpodobnosti patří například: alternativní, binomické, Poissonovo, negativní binomické, Pascalovo, geometrické, hypergeometrické a logaritmické.

Rozdělení pravděpodobnosti spojitě náhodné veličiny

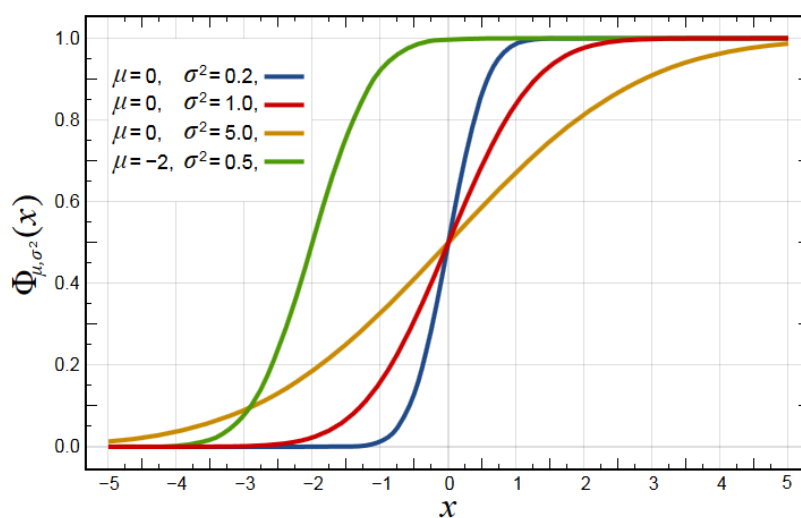
Spojité náhodná veličina má spojitou distribuční funkci. Rozdělení spojitě náhodné veličiny nelze popsat pravděpodobnostní funkcí v určitém bodě.

Mezi důležitá spojitá rozdělení pravděpodobnosti patří například: rovnoměrné, exponenciální, normální, Raileighovo, normované normální, logaritmicko-normální, Cauchyho, gamma, Laplaceovo, logistické, Pareto, generalizované Pareto, Maxwellovo-Boltzmannovo, Fisher-Snedecorovo, chí kvadrát, Weibullovo, Pearsonovo a Studentovo.

Za nejdůležitější můžeme označit rozdělení normální, též obecné normální rozdělení či Gaussovo rozdělení (v anglicky psané literatuře nazývané rozdělení zvonovitého tvaru - bell curve). Je velmi důležité, neboť:

- nejčastěji se vyskytuje
- mnoho jiných rozdělení se mu blíží
- řada jiných rozdělení se jím dá nahradit

Na následujícím grafu Obr. 12 jsou zobrazeny distribuční funkce několika normálních rozdělení pravděpodobností s různými charakteristikami. Červenou čarou je vyznačeno normované normální rozdělení, kde μ je střední hodnota a σ^2 rozptyl náhodné veličiny [38].

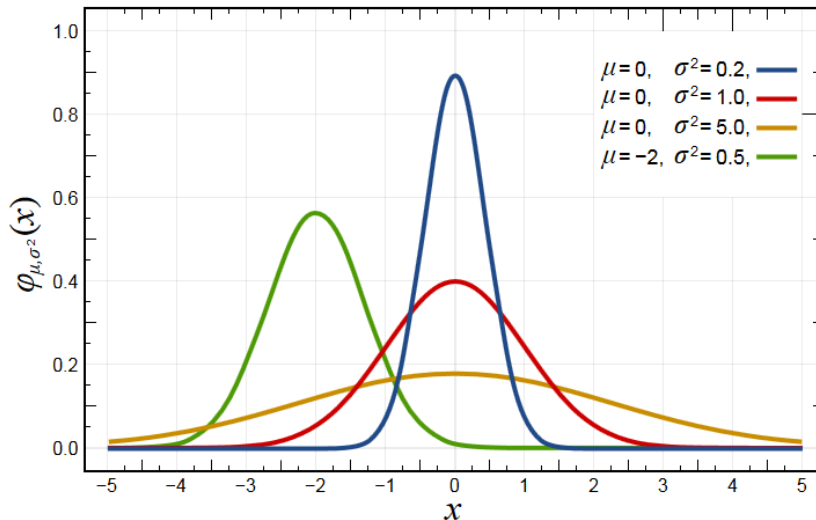


Obr. 12. Distribuční funkce normálních rozdělení; zdroj: [39]

Hustota pravděpodobnosti

Rozdělení pravděpodobnosti spojitě náhodné veličiny se určuje prostřednictvím funkce, kterou označujeme jako hustota rozdělení pravděpodobnosti (Probability Density Function, PDF). Pro spojitou náhodnou veličinu obecně neplatí, že také hustota pravděpodobnosti je spojitá.

V následujícím grafu na Obr. 13 jsou zobrazeny hustoty pravděpodobnosti několika normálních rozdělení pravděpodobnosti s různými charakteristikami.



Obr. 13. Hustoty pravděpodobnosti několika normálních rozdělení; zdroj: [39]

Grafické znázornění výběrového rozdělení poskytují např. polygon četností, histogram četností a kruhové diagramy. Histogram je sloupcový diagram, kde na ose x jsou znázorněny intervaly představující třídy, do kterých jsme rozdělili zjištěná data a na ose y odpovídající absolutní četnosti. Nad každou třídou je sestrojený obdélník, jehož výška odpovídá četnosti této třídy.

Výběrové charakteristiky

Charakteristiky náhodného výběru nelze zjistit na první pohled. Vizuální zhodnocení poskytují např. pravděpodobnostní a distribuční funkce rozdělení pravděpodobnosti a histogram. Další možností popisu náhodného výběru je výpočet výběrových číselných charakteristik. Tyto charakteristiky popisují vlastnosti daného konkrétního výběru [38].

Statistický popis se zaměřuje především na dvě hlavní vlastnosti každého rozdělení a to na:

- polohu
- variabilitu

Poloha a variabilita výběru se vyjadřuje pomocí číselných veličin, tzv. charakteristik polohy a variability. Tyto charakteristiky jsou založeny na výběrových momentech. Mezi výběrové charakteristiky polohy patří např. aritmetický průměr, medián a modus, mezi výběrové charakteristiky variability disperze (rozptyl), absolutní odchylka, variační koeficient, variační rozpětí.

Výběrové charakteristiky polohy

Aritmetický průměr je vyjádřen následujícím vztahem

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \cdot (x_1 + x_2 + \dots + x_n) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i. \quad [38] \quad (33)$$

Medián se značí \tilde{x} . Je to hodnota, jež dělí řadu vzestupně seřazených výsledků na dvě stejně početné poloviny. Ve statistice patří mezi míry centrální tendence. Platí, že nejméně 50 % hodnot je menších nebo rovných a nejméně 50 % hodnot je větších nebo rovných mediánu.

Modus se značí \hat{x} . Představuje hodnotu, která se v daném statistickém souboru vyskytuje nejčastěji (je to hodnota znaku s největší relativní četností). Představuje jakousi typickou hodnotu sledovaného souboru a jeho určení předpokládá rozřídění souboru podle obměn znaku.

Výběrové charakteristiky variability

Výběrová disperze (rozptyl) je definovaný jako součet druhých mocnin odchylek všech hodnot náhodného výběru od aritmetického průměru, který je dělený rozsahem výběru

$$S^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2. \quad [38] \quad (34)$$

Směrodatná odchylka je v teorii pravděpodobnosti a statistice často používanou mírou statistické disperze. Jedná se o kvadratický průměr odchylek hodnot znaku od jejich aritmetického průměru. Výhodou směrodatné odchylky je, že charakterizuje variabilitu náhodné veličiny ve stejných jednotkách, v jakých jsou zadány její hodnoty

$$S = \sqrt{S^2}, \quad [38] \quad (35)$$

obecně vypovídá o tom, jak moc se od sebe navzájem liší typické případy v souboru zkoumaných čísel. Je-li malá, jsou si prvky souboru většinou navzájem podobné. Naopak velká směrodatná odchylka signalizuje velké vzájemné odlišnosti.

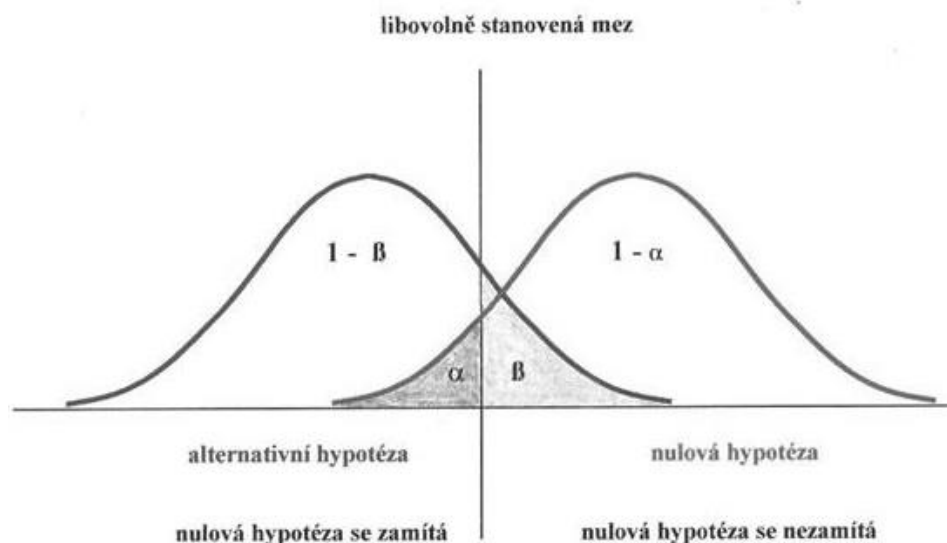
Jinou možností, jak charakterizovat variabilitu výběru, je použít místo druhých mocnin odchylek jejich absolutní hodnotu. Tak vznikne výběrová absolutní odchylka A , vypočítá se podle následujícího vztahu

$$A = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |x_i - \bar{x}|. \quad [38] \quad (36)$$

3.6. Testování hypotéz

Testování statistických hypotéz patří mezi základní metody statistické indukce a nachází široké uplatnění v mnoha vědních oborech. Statistická hypotéza je tvrzení o vlastnostech základního souboru, o jehož pravdivosti se chceme přesvědčit. Vztahuje se většinou buď ke tvaru, nebo k parametrům rozdělení pravděpodobnosti zkoumaného souboru. Statistickou hypotézou může být například tvrzení, že střední hodnota zkoumaného souboru je rovna určité hodnotě, nebo že soubor pochází ze základního souboru s určitým rozdělením apod. Hypotézu, jejíž platnost ověřujeme, nazýváme nulovou hypotézou H_0 . Alternativní hypotéza, která bude platit v případě zamítnutí H_0 , se značí H_1 . Úkolem testování hypotéz je ověřit příslušné tvrzení. Postup, kterým tvrzení ověřujeme, nazýváme testování hypotéz. Rozhodnutí, zda se hypotéza zamítne, nebo ne, se provádí na základě realizace náhodného výběru statistickým testem, kde statistický test je jednoznačně dané pravidlo [35]. Testovací kritérium je funkce náhodného výběru, jejíž tvar je závislý na testované hypotéze a rozdělení pravděpodobností testovaného souboru. Před provedením testu se kromě testovacího kritéria stanoví tzv. kritická oblast. Kritická oblast je podmnožina množiny hodnot testovacího kritéria, jejíž pravděpodobnost α je při platnosti hypotézy H_0 tak malá, že to že hodnota testovacího

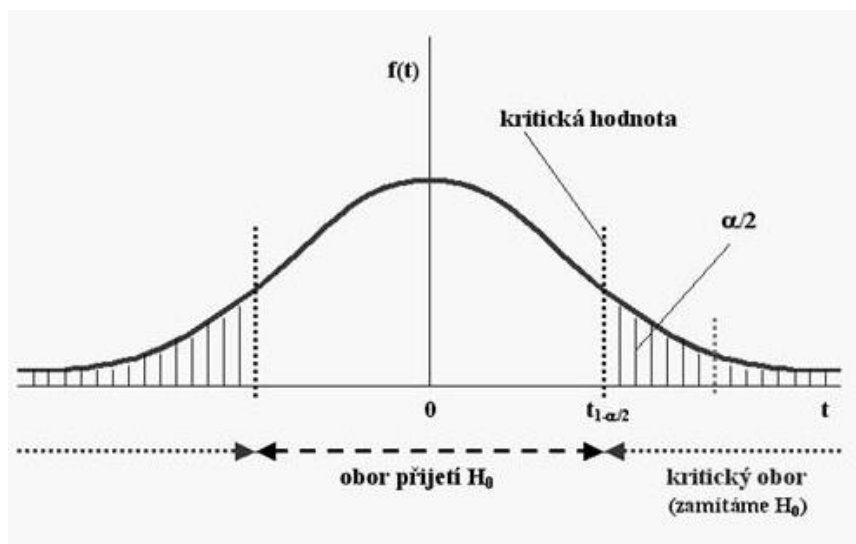
kritéria padne do této oblasti, pokládáme za jev nemožný. Před testem se zvolí hladina významnosti, většinou se volí $\alpha = 0,05$, nebo $\alpha = 0,01$.



Obr. 14. Vzájemný vztah mezi chybou 1. a 2. druhu; zdroj: [38]

V případě když hodnota testovacího kritéria padne do oblasti přípustných hodnot $1 - \alpha$, hypotéza H_0 se přijímá, pokud hodnota testovacího kritéria padne do kritické oblasti α , H_0 se zamítá a platí alternativní hypotéza H_1 . Přijetí hypotézy H_0 , znamená, že na základě dané realizace náhodného výběru není důvod k jejímu zamítnutí.

Pokud při platnosti H_0 padne hodnota testovacího kritéria do kritické oblasti a hypotézu zamítneme, dopustíme se chyby 1. druhu (zamítnutí platné hypotézy). Pravděpodobnost chyby prvního druhu se nazývá hladina významnosti. Vzájemný vztah mezi chybami 1. a 2. druhu je zachycen na Obr. 14. Zmenšit pravděpodobnost chyby 1. druhu lze zmenšením kritické oblasti. Tím se zároveň zvětší oblast přípustných hodnot a následně se zvětší pravděpodobnost chyby 2. druhu (přijetí neplatné hypotézy). Pravděpodobnost padnutí testovacího kritéria do kritické oblasti když hypotéza H_0 neplatí je $1 - \beta$ a nazývá se síla testu: [38]. Obor hodnot pro testovací kritérium je zobrazen na Obr. 15.



Obr. 15. Obor hodnot pro testovací kritérium t ; zdroj:[38]

Parametrické testování dat se používá pro testování, zda-li se dva výběry shodují ve svém průměru (tj. zda pocházejí z populace s toutéž střední hodnotou), nebo zda-li sledovaný výběr má určitou konkrétní hodnotu průměru (tj. zda pochází z populace s touto konkrétní střední hodnotou). Další otázkou kladenou při parametrickém testování mohou být hypotézy, týkající se rozdílu rozptylů mezi dvěma populacemi při hodnocení vlivu pokusných zásahů na variabilitu sledované veličiny.

Pro použití parametrických testů je nutno splnit předpoklad normality dat sledovaných veličin. Mezi parametrické testy se řadí především Studentův t -test pro testování rozdílu dvou středních hodnot a F -test pro testování rozdílu dvou rozptylů.

3.7. Teorie spolehlivosti a bezpečnosti

Teorie spolehlivosti je matematická disciplína, jež se zabývá mírou selhávání prostředků nebo systémů, od kterých se očekává určitá funkčnost nebo odolnost vůči vnějším vlivům, a rychlostí zotavení z jejich poruchových stavů. V hierarchii matematických odvětví patří pod aplikovanou statistiku. Teorie spolehlivosti se zabývá technickými a matematickými otázkami.

Hlavními nástroji jsou zde teorie pravděpodobnosti a matematická statistika. Slouží např. ke stanovení charakteristik spolehlivosti, jako jsou zaručená doba života, střední doba bezporuchového provozu, střední doba mezi poruchami, průměrné náklady na údržbu a opravy aj. Matematická statistika a teorie pravděpodobnosti nám umožňují popis jevů, jejichž podstatu dokonale neznáme, ale jejichž zákonitosti vzniku jsou pro stanovení spolehlivosti velmi důležité. Teorie spolehlivosti a bezpečnosti zahrnuje veličiny popisující počet poruch systému za daný časový interval jako např. pojmy četnost poruch, frekvence poruchy, hustota pravděpodobnosti poruchy, intenzita poruchy, atd.

Bezporuchovost v diskrétním tvaru se vypočítá podle vztahu

$$R(t) = \frac{N_s(t)}{N_0}, \quad [39] \quad (37)$$

kde N_s je počet přeživších jednotek do času t a N_0 je původní počet jednotek bez poruchy na začátku testu. Poruchovost v diskrétním tvaru je vyjádřena vztahem

$$F(t) = \frac{N_f(t)}{N_0}, \quad [39] \quad (38)$$

kde N_0 je původní počet jednotek bez poruchy na začátku testu a kde N_f je počet jednotek s poruchou do času t . Základní vztah pro výpočet bezporuchovosti je

$$R = e^{-\lambda t}, \quad [39] \quad (39)$$

kde λ je četnost poruch. Vztah mezi poruchovostí a bezporuchovostí má následující tvar

$$F = 1 - R. \quad [39] \quad (40)$$

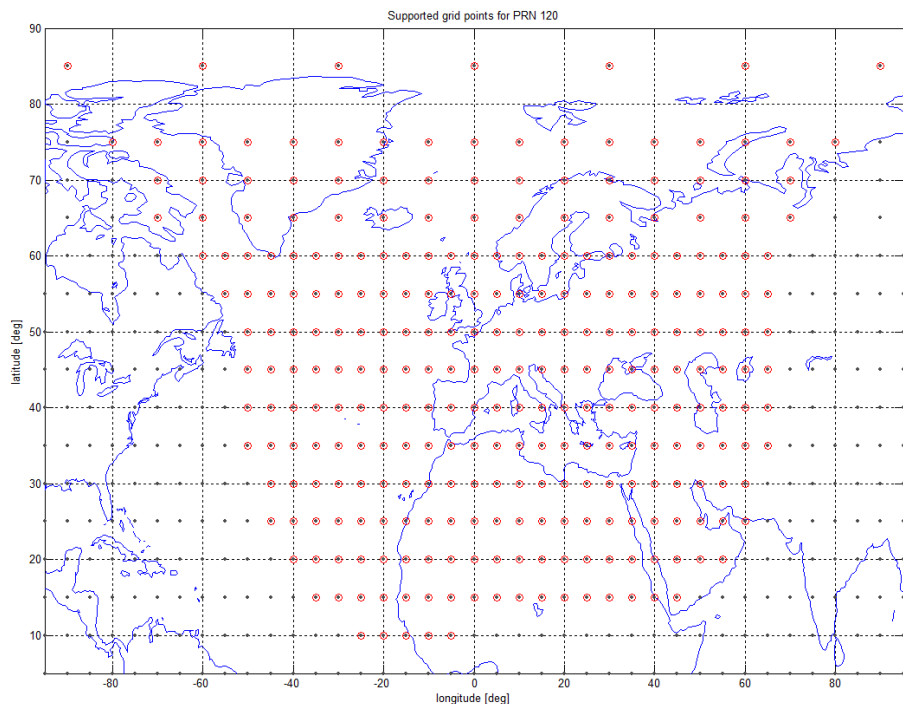
4. Integrita GNSS

4.1. Integrita polohy určené pomocí GNSS

Původní systém GPS sám o sobě neposkytuje žádné informace o integritě určené polohy. V současné době jsou k dispozici zpřesňující SBAS systémy, které jsou založené na principu DGPS. Evropský systém EGNOS byl popsán v části 2.4. Zpřesňující systémy již poskytují informaci o aktuální úrovni integrity vypočítané polohy pomocí úrovní ochrany v horizontální rovině a ve vertikálním směru (HPL, VPL) [40]. Tyto úrovně udávají v reálném čase velikost oblasti, ve které se nachází aktuální poloha s garantovanou četností poruch. Tento systém sledování integrity dokáže indikovat snížení integrity způsobené chybami v kosmickém segmentu (chyby hodin satelitů, chyby drah satelitů) a dále chyby vzniklé během šíření signálu atmosférou (ionosféra, troposféra, atd.). Systém ochranných úrovní však nedokáže zachytit chyby, které vznikají vlivem tzv. lokálních efektů (vícecestné šíření signálu v okolí přijímače). Navíc, jak bylo zmíněno, systém ochranných úrovní byl navržen podle aviaických požadavků (ICAO normy). Není ho tedy možné přímo použít v železničních aplikacích.

4.2. Mechanismus monitorování integrity systému EGNOS

Způsob sledování integrity systému EGNOS je popsán standardem DO-229D [40]. EGNOS využívá tři geostacionární satelity, jež vysílají informace o integritě do přijímačů uživatelů na zemském povrchu. Signál systému EGNOS je dostupný na celém území Evropy a částečně i na asijském a africkém kontinentu jak je vidět na Obr. 16, kde oblast označená červenými kroužky značí oblast kde je signál EGNOS dostupný. Graf je vygenerovaný v programu Pegasus. To je program pro zpracování a validaci dat systému EGNOS, obsahuje různé nástroje pro přehlednou vizualizaci naměřených dat. Program je vyvíjen firmou Eurocontrol (ICAO) především pro testování a validaci systémů EGNOS a Galileo.



Obr. 16. Graf zobrazující dostupnost signálu EGNOS; zdroj: vygenerováno pomocí softwaru PEGASUS

EGNOS SoL je volně dostupná služba poskytovaná zdarma. Určena je pro bezpečnostně-relevantní dopravní aplikace. Především pro leteckou dopravu, jak již bylo zmíněno v části 2.4. Každý uživatel, který vlastní certifikovaný EGNOS přijímač a nachází se v místě pokrytém signálem, může službu použít. V této části je uveden matematický popis monitorování integrity v rámci této služby:

Systém má dva základní módy, z nichž každý má svoji četnost nebezpečné nedetekované chyby. V módu *bez závady* (fault free) jsou hodnoty požadované v aviatických aplikacích následující:

- Přesné přiblížení (Precision Approach - PA): $\lambda_{PA} = 1 \cdot 10^{-7} / 150 \text{ s}$ [40] (41)

- Nepřesné přiblížení (Non-Precision Approach - NPA): $\lambda_{NPA} = 1 \cdot 10^{-7} / h$ [40] (42)

V obou těchto módech EGNOS přijímač počítá z přijatých dat současně polohu i horizontální a vertikální ochranné limity (HPL, VPL). Pro tento výpočet jsou použity pouze data ze satelitů, které jsou momentálně ve stavu *bez závady* (faulty free). Aktuální hodnota HPL udává oblast (HPL si lze představit jako poloměr kružnice kolem aktuálně určené polohy), ve které je zaručeno splnění výše zmíněných pravděpodobností výskytu chyb. Z pohledu železniční dopravy je významný parametr HPL, protože pro železnici je důležitá integrita polohy v horizontální rovině. Následně jsou uvedeny vztahy, podle kterých se ochranné limity počítají.

Základní vstupní hodnoty do algoritmu výpočtu ochranných limitů, počítaných přijímačem, jsou údaje vztahující se k aktuální vzájemné geometrii polohy satelitů a přijímače (elevace El_i a azimut Az_i i^{th} satelitu), chyby pseudovzdáleností (rozptyl $\sigma_{i,flt}^2$), ionosférická vertikální chyba (rozptyl $\sigma_{i,UIRE}^2$), troposferická chyba (rozptyl $\sigma_{i,tropo}^2$), chyba přijímače (variance $\sigma_{i,air}^2$).

HPL se určí následovně

$$HPL = \begin{cases} K_{H,NPA} \cdot d_{major} \\ K_{H,PA} \cdot d_{major} \end{cases}, \quad [40] \quad (43)$$

d_{major} je hlavní poloosa chybové elipsy a spočítá se následovně

$$d_{major} = \sqrt{\frac{d_{east}^2 + d_{north}^2}{2} + \sqrt{\left(\frac{d_{east}^2 - d_{north}^2}{2}\right)^2 + d_{EN}^2}}, \quad [40] \quad (44)$$

z kovarianční matice C

$$C = \begin{bmatrix} d_{east}^2 & d_{EN} & d_{EU} & d_{ET} \\ d_{EN} & d_{north}^2 & d_{NU} & d_{NT} \\ d_{EU} & d_{NU} & d_U^2 & d_{UT} \\ d_{ET} & d_{NT} & d_{UT} & d_T^2 \end{bmatrix} = (G^T \cdot W \cdot G)^{-1}, \quad [40] \quad (45)$$

kde:

$$d_{east}^2 = \sum_{i=1}^N s_{east,i}^2 \sigma_i^2 = \text{rozptyl, který ohraničuje skutečnou chybu ve směru osy east,}$$

$d_{north}^2 = \sum_{i=1}^N s_{north,i}^2 \sigma_i^2 =$ rozptyl, který ohraničuje skutečnou chybu ve směru osy north,

$d_{EN} = \sum_{i=1}^N s_{east,i} s_{north,i} \sigma_i^2 =$ kovariance mezi směry east a north,

$d_U^2 = \sum_{i=1}^N s_{u,i}^2 \sigma_i^2 =$ rozptyl, jenž ohraničuje skutečnou chybu ve vertikálním směru,

a i^{th} řádek tzv. "Jacobiho matice" G je definovaný následovně

$$G_i = [-\cos El_i \cdot \sin Az_i \quad -\cos El_i \cdot \cos Az_i \quad -\sin El_i \quad 1], \quad [40] \quad (46)$$

kde El je elevace a Az azimut i -tého satelitu. Detailní matematický popis ukazatelů integrity je přímo v dokumentu DO-229D [40].

Klíčové je odvození konstanty $K_{H,NPA}$, která se váže k pravděpodobnosti selhání detekce P_{MD} . P_{MD} je pravděpodobnost, že nastane zavádějící informace MI (Misleading Information). MI znamená, že chyba v horizontální rovině (HPE) je větší než ochranný limit HPL. P_{MD} může být vyjádřeno následujícím vzorcem

$$P_{MD\ HPL} = \frac{10^{-x}}{n}, \quad [40] \quad (47)$$

kde 10^{-x} je požadavek integrity pro danou operaci a n je počet nezávislých vzorků během trvání operace. Počet nezávislých vzorků za jednotku času pro systém EGNOS se váže ke korekcím ionosféry. Perioda 360 s byla určena jako rozumný předpoklad k zajištění nezávislosti [40]. Použitím této hodnoty můžeme spočítat požadovanou pravděpodobnost selhání detekce vztahující se k HPL. Pro NPA mód je požadavek na integritu $0,5 \cdot 10^{-7}$ za hodinu ve fault-free stavu, takže můžeme počítat

$$P_{MD\ HPL} = 0,5 \cdot 10^{-7} \cdot \frac{360}{3600} \approx 5 \cdot 10^{-9} \text{ na vzorek.} \quad [40] \quad (48)$$

Tedy můžeme spočítat K faktor, který škáluje rozptyl na úroveň odpovídající požadavkům na integritu. V případě HPL, kde ochrana je dvoudimenzionální, je K určeno pomocí Rayleighova rozdělení pravděpodobnosti.

Takže K faktor spočítaný z kumulativní distribuční funkce

$$K_{H\ NPA} = \text{Rayleigh cdf}^{-1}(1 - 5 \cdot 10^{-9}) = 6,18 \quad [40] \quad (49)$$

Tedy konstanta $K_{H,NPA}$ byla nastavena na 6,18.

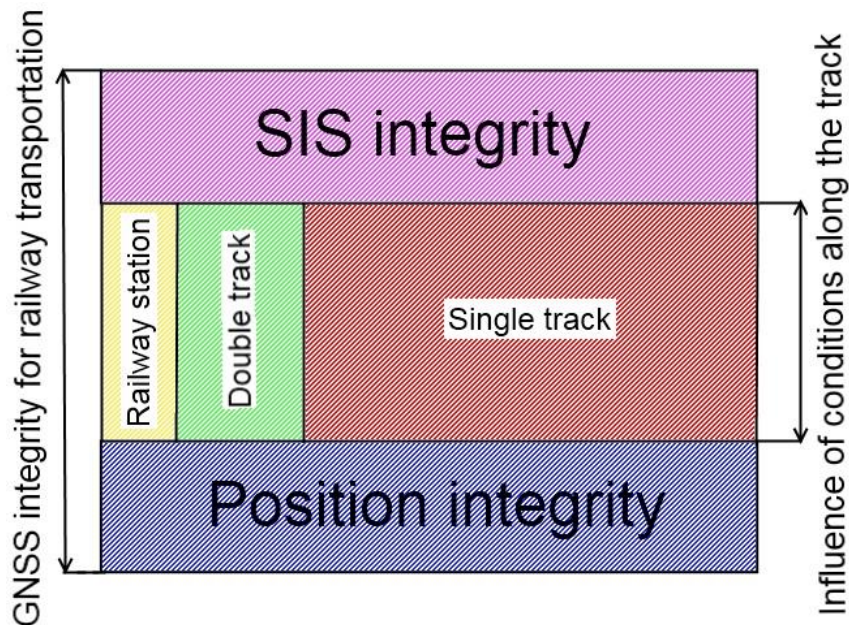
4.3. Integrita polohy určené pomocí GNSS z pohledu železnice

Požadavky na integritu určené polohy v železničním prostředí jsou odlišné od aviatických požadavků, podle kterých byly současné satelitní systémy vyvíjeny. V aviatice je většinou (během letu ve větších výškách) nejdůležitější integrita SIS. Z pohledu železnice je důležitá celková integrita signálu od okamžiku jeho vyslání z družice až do přijetí přijímačem na drážním vozidle na zemském povrchu. Z tohoto důvodu hrají zásadní roli právě výše zmíněné lokální vlivy. Celkovou integritu polohy na železnici můžeme rozdělit na tři oddělené části:

- integrita SIS

- integrita GNSS signálu v různých podmínkách kolem železniční tratě
- integrita polohy (na úrovni přijímače)

Graficky je toto rozdělení znázorněno na následujícím Obr. 17.



Obr. 17. Rozdělení integrity na jednotlivé části z pohledu železnice; zdroj: vlastní

SIS Integrita

Tato část znamená integritu signálu vyslaného družicí během jeho šíření k uživateli. Systém EGNOS je certifikovaný pro použití v bezpečnostně kritických aplikacích v letectví od roku 2011. Používá se pro přesné určení polohy letadel během letu i během startu a přistání. Bezpečnostní parametry tohoto systému jsou tedy známé. Existující způsob monitorování integrity systému EGNOS (popsaný v části 4.2) bude dále vylepšován podle nových požadavků a potřeb.

Integrita GNSS signálu v různých podmínkách podle okolí železniční tratě

Do této části můžeme zahrnout vliv různých podmínek v okolí železniční tratě - například dočasnou nedostupnost GNSS signálu při průjezdu vlaku pod mostem, nebo stínění budovami, stromy a lesy v okolí tratě. Dle druhu železničního prostředí dochází k dělení na tři základní části:

- jednokolejná trať
- dvou, nebo vícekolejná trať
- železniční stanice

V každém z těchto případů můžeme očekávat odlišné podmínky pro příjem GNSS signálu. Jednokolejná trať má z hlediska určení polohy vlaku pomocí GNSS výhodu, že teoreticky postačuje určení polohy v 1D na dané zaměřené trati. To může vést k použití jednodušších algoritmů pro verifikaci polohy. Ovšem na druhou stranu může mít jednokolejná trať nevýhodu horší kvality příjmu GNSS signálu. Její menší šířka oproti dvoukolejným a vícekolejným úsekům způsobí horší výhled na oblohu v případě různých větších objektů rozmístěných podél trati (budovy, stromy, lesy, atd.). Dvou a vícekolejné úseky mají výhodu lepšího výhledu na oblohu, ale jejich nevýhodou je potřeba určení 2D polohy (je třeba rozlišit, na které ze dvou nebo více kolejí se vlak nachází). V případě větší

železniční stanice, kde se obvykle nachází více paralelních kolejí, jsou většinou nejlepší podmínky pro příjem GNSS signálu. To je vyváжено nevýhodou vyšší obtížnosti určení, na které z mnoha paralelních kolejí se vlak právě nachází [A2].

Integrita polohy (na úrovni přijímače)

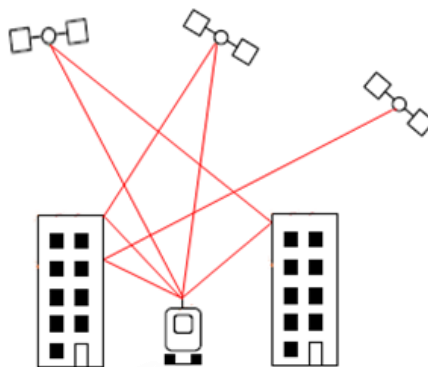
Výhodou při určování polohy na železnici je, že poloha železniční tratě je jasně daná, je tedy možnost využít mapu tratě ke kontrole integrity polohy. Zvláště na jednokolejně trati. Proto je výhodné mít trať přesně zaměřenou. Využití 3D mapy tratě je plánováno pro navrženou metodu. Je zamýšleno získávat z 3D mapy údaj o skutečné výšce.

4.4. Budoucí vývoj v oblasti integrity GNSS

V rámci systému Galileo byla původně plánována implementace úplně nového systému monitorování integrity polohy. Každý ze satelitů systému měl vysílat informace o integritě, tudíž měly být tyto informace dostupné na jakémkoliv místě na planetě. Od tohoto záměru bylo nakonec upuštěno, kvůli velké složitosti a obtížnosti garance splnění bezpečnostních parametrů služby na libovolném místě na zemi. V současnosti se počítá pro bezpečnostní aplikace s využitím stávajícího systému EGNOS. Informace o integritě budou tedy i nadále vysílány pouze ze satelitů tohoto systému a dostupné budou jen v místech pokrytých tímto signálem.

4.5. Aktuální metody potlačení lokálních vlivů

Pro potlačení lokálních efektů se používají různé metody, které většinou využívají redundantní data pro kontrolu integrity určení polohy (odometrie, inerciální měření (IMU)). Schematické zobrazení vícecestného šíření signálu je na Obr. 18.



Obr. 18. Vícecestné šíření signálu GNSS vlivem lokálních podmínek v okolí přijímače (lokální efekty, vícecestné šíření); zdroj:vlastní

RAIM

Nejpoužívanější k těmto účelům jsou různé metody RAIM, ty využívají nadbytečné pseudovzdálenosti k online kontrole integrity určení polohy. Základní myšlenka metody RAIM je taková, že nadbytečné (redundantní) pseudovzdálenosti můžeme použít pro detekci vícecestného šíření. RAIM je tedy možné použít, pokud máme k dispozici 5 a více pseudovzdáleností.

Jedna z možných implementací této metody rozdělí aktuálně dostupné pseudovzdálenosti do všech možných kombinací a následně kontroluje konzistenci výpočtů polohy ze všech těchto kombinací. Klasické původní metody RAIM chybu pouze detekují (FD), zatímco novější algoritmy dokáží chybu detekovat i vyloučit chybné měření pseudovzdálenosti (FDE), což umožňuje počítat polohu i v případě chyby v některé aktuální pseudovzdálenosti [41].

Tradiční techniky RAIM [38] lze rozložit do následujících hlavních částí:

- FDE (Fault Detection and Exclusion), tj. detekce a vyloučení chyb, které lze dále rozložit na:
 - Detekci chyb: proces odpovědný za kontrolu konzistence měření. Obvykle se provádí pomocí statistického testu hypotéz o reziduích odhadů polohy metodou nejmenších čtverců. Nulová hypotéza znamená, že neexistují žádná chybná měření. Pokud test selže (ve smyslu, že je nulová hypotéza odmítnuta), pak je detekována chyba
 - Vyloučení chybného měření: tato funkce je volána pouze v případě, že je v předchozím bodě detekována chyba. Jejím účelem je rozhodnout, které měření nebo skupina měření je nejpravděpodobněji odpovědná za chybu zjištěnou v předchozím kroku a vyloučit toto/tato měření z navigačního řešení. V některých případech iterativních řešení je pak znovu zavolána detekce chyb
- PL (Protection Limit), tj. výpočet úrovně ochrany pozice (spolu s konzistentní úrovní ochrany) se přepočítává pomocí měření, která úspěšně prošla testem FDE. Uvedená úroveň ochrany může být vypočítána různými způsoby v závislosti na předpokladech, na kterých je založena

Příklad typického algoritmu metody RAIM:

- předběžný krok: výpočet polohy
- krok 1: detekce chyb
- krok 2: stanovení chybných satelitů
- krok 3: výpočet ochranných limitů

Parametry metody RAIM

Základní metodou je LSR RAIM (Least Squares Residuals RAIM), tedy metoda RAIM využívající rezidua výpočtu polohy metodou nejmenších čtverců. Tato metoda předpokládá jednotlivé chyby v pseudovzdálenostech jako nezávislé s nulovou střední hodnotou a s normálním (Gaussovým) rozdělením a se stejným rozptylem v neváhované verzi. Obecnější váhovaná verze (WLSR – Weighted Least Squares Residuals) má rozptyly různé a berou v úvahu faktory např. elevace satelitu. Z hlediska chyb v pseudovzdálenostech jsou uvažovány dva stavy, *bez závady* (fault-free) a *se závadou* (faulty). Ve stavu *bez závady* jsou pseudovzdálenosti považovány za bezchybné, obsahující pouze šum, který má normální (Gaussovo) rozdělení s nulovou střední hodnotou. Ve stavu *se závadou* je uvažována jedna chybná pseudovzdálenost. Výpočet polohy metodou nejmenších čtverců

$$\Delta \mathbf{P} = \mathbf{A} \cdot \Delta \mathbf{x} + \mathbf{E}, \quad [42] \quad (50)$$

kde vektor chyb \mathbf{E} se dá vyjádřit jako

$$\mathbf{E} = \boldsymbol{\varepsilon} + \mathbf{B}, \quad [42] \quad (51)$$

$\boldsymbol{\varepsilon}$ je šum a \mathbf{B} je vektor chyb

$$\mathbf{B} = [0, \dots, b_i, 0, \dots, 0]^T, \quad [42] \quad (52)$$

ve stavu *bez závady* $b_i = 0$ a ve stavu *se závadou* $b_i > 0$.

WLSR RAIM monitoruje integritu polohy, počítanou váhovanou metodou nejmenších čtverců (WLSE). Tedy poloha je určována podle vztahu (50). Účelem metody RAIM je při splnění

deklarovaných pravděpodobností nedetekované chyby P_{MD} a falešného alarmu P_{FA} detekovat chyby, které překročí HAL. WLSR využívá rezidua váhované metody nejmenších čtverců, kde jako měřitelná skalární testační statistika je používána váhovaná suma kvadratických chyb (WSSE)

$$t = WSSE = \mathbf{R}^T \mathbf{W} \mathbf{R} = \Delta \mathbf{P}^T \mathbf{W} (\mathbf{I} - \mathbf{B}) \Delta \mathbf{P}. \quad [42] \quad (53)$$

Testační statistika (53) má chí-kvadrát rozdělení s nulovou střední hodnotou ve stavu *bez závady* a chí-kvadrát rozdělení s nenulovou střední hodnotou ve stavu *se závadou*. Počet stupňů volnosti k , je roven počtu redundantních pseudovzdáleností

$$t \sim \begin{cases} \chi_k^2 & \text{když } \mathbf{E} \sim N(0, \sigma) \text{ bez závady (fault free)} \\ \chi_{k, \alpha}^2 & \text{když } \mathbf{E} \sim N(\mathbf{B}, \sigma) \text{ se závadou (faulty)}. \end{cases} \quad [42] \quad (54)$$

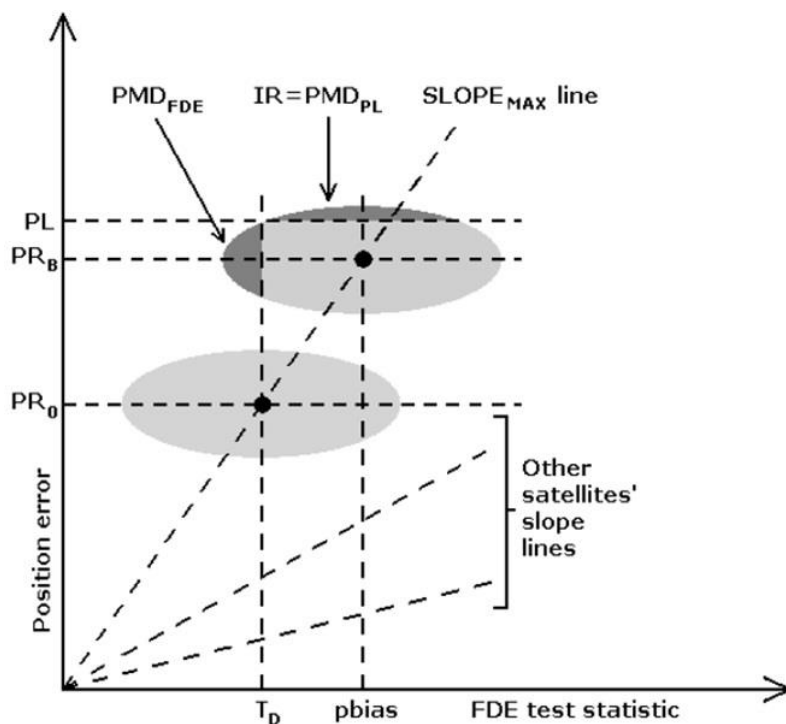
Střední hodnota chí-kvadrát rozdělení α v případě stavu *se závadou* se dá určit podle následujícího vztahu

$$\alpha = (\mathbf{I} - \mathbf{B})_{ii} \cdot b_i^2 / \sigma_i^2. \quad [42] \quad (55)$$

Ve stavu *se závadou* platí lineární vztah mezi projekcemi chyby pseudovzdálenosti v horizontální rovině a v testační statistice (WSSE)

$$|b_H| = slope_i \cdot \sqrt{\alpha}. \quad [42] \quad (56)$$

Vztah (56) závisí na parametru *slope*. Parametr *slope*, je různý pro každý jednotlivý satelit. Tedy i -tému satelitu náleží parametr $slope_i$. Parametr $slope_i$ chrakterizuje poměr, v jakém se chyba pseudovzdálenosti i -tého satelitu b_i rozdělí mezi testační statistiku a polohu. Tento parametr je vlastně směrnici převodní přímky mezi chybami v testační statistice a chybami v poloze, bude proto dále nazývaný *převodní směrnice chyb* zkráceně *směrnice* (tak bude nazýván dále). Tato přímka udává vztah mezi efektem (velikostí) chyby v testační statistice a v poloze. Graficky je to zobrazeno na Obr. 19. Na tomto obrázku je graficky znázorněný vztah mezi chybou v poloze, testační statistikou, *směrnici* a detekční mezí T_D . Obrázek schematicky ukazuje, jak jsou počítány ochranné limity metody RAIM (PL – Protection Levels) Na horizontální ose je testační statistika ($WSSE$). Úroveň ochrany je vypočtena tak, aby pokryla situaci s největším dopadem na chybu polohy, tj. situaci, kdy chybné měření je takové, které odpovídá satelitu s *maximální směrnici* (největší parametr *slope*, tedy $slope_{MAX}$) [42].



Obr. 19. Určení pravděpodobnosti nedetekované chyby metody RAIM; zdroj: ESA Navipedia

Další používané techniky pro eliminaci chyb způsobených lokálními efekty

Další metody používané k detekci chyb způsobených lokálními efekty jsou např. odometrie, kdy je údaj o ujeté vzdálenosti poskytovaný odometrií porovnáván s ujetou vzdáleností, určenou pomocí GNSS a je vyhodnocována jejich odchylka. Případně je možné použít inerciální měřicí jednotky (IMU).

5. Vymezení disertační práce

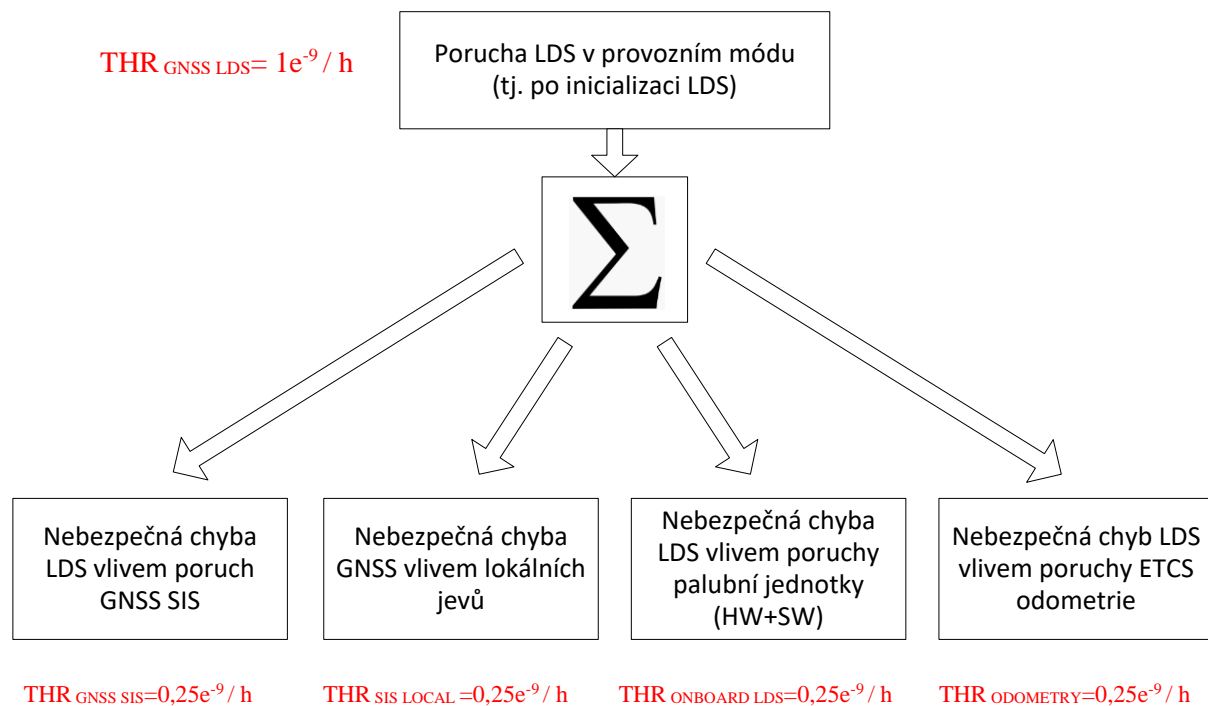
Požadavky na cílovou bezpečnost pro systém určení polohy vlaku LDS (Location Determination System) na principu GNSS byly specifikovány na základě analýzy nebezpečí a hodnocení rizika pro zamýšlené použití LDS v evropském vlakovém zabezpečovacím systému ETCS úroveň 2 (Level 2 - ERTMS/ETCS systém byl popsán v části 2.7). Tato analýza byla provedena v rámci řešení projektu Evropské kosmické agentury s názvem 3InSat (podrobnosti projektu byly zmíněny v části 2.8). Analýza nebezpečí vychází z předpokladu náhrady existujících balíz (resp. skupin balíz) umístěných v kolejišti pomocí lokalizace vlaku na principu GNSS pro typickou (modelovou) infrastrukturu tratě [43].

Na základě výše uvedené analýzy byly stanoveny tyto dva základní požadavky bezpečnosti pro LDS [40]:

- THR GNSS LDS, inicializace = $1,4 \cdot 10^{-11}$ nebezpečných poruch / h [43] (57)
- THR GNSS LDS, provoz = $1 \cdot 10^{-9}$ nebezpečných poruch / h [43] (58)

Pro splnění prvního požadavku byla navržena speciální metoda inicializace LDS, při které se ověřují alespoň dvě nezávislé polohy LDS v módu provozu zvaném „odpovědnost strojvedoucího“ (Staff Responsible) se shora omezenou rychlostí (např. do 30 km/ hod.) [40]. Druhý požadavek bezpečnosti na LDS ($1 \cdot 10^{-9}/h$) se již týká provozu LDS po jeho inicializaci. Prerozdělení toho požadavku v rámci systému je níže využito pro vymezení zaměření a specifikace cílů této práce.

Z Obr. 20 je zřejmé, že cílová THR LDS v módu „provoz“ = $1 \cdot 10^{-9}/h$ je rovnoměrně rozdělena mezi nebezpečné poruchy satelitního signálu (SIS), poruchy SIS vlivem lokálních efektů, poruchy vlivem HW a SW vlastního palubního LDS a konečně poruchy stávajícího odometrického systému ETCS, který je využit v koncepci dle 3InSat pro zvýšení pohotovosti lokalizace vlaku při zachování celkové úrovně integrity bezpečnosti lokalizace dle SIL 4.



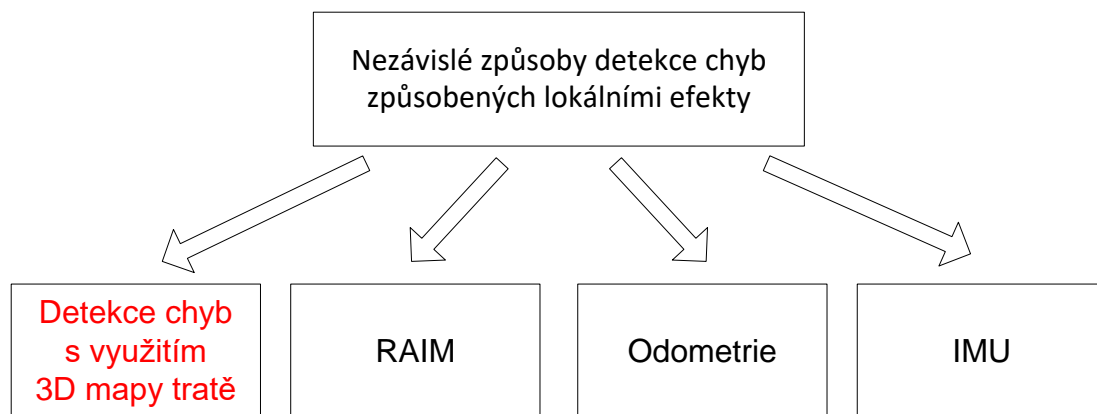
Obr. 20. Alokační cílové hodnoty THR v rámci systému určení polohy vlaku (LDS) na principu GNSS [6].

Ochrana proti poruchám poskytovaného GNSS SIS při požadavku $HR_{SIS} = 0,25 \cdot 10^{-9}/h$ je zajištěna pomocí navrženého konceptu bezpečnosti s využitím lokální či regionální augmentace GNSS

SIS [44, 45]. Ochrana proti poruchám HW a SW palubního LDS při požadavku $HR_{ONBOARD} = 0,25 \cdot 10^{-9}/h$ je zajištěna pomocí redundance a bezpečné konstrukce dle příslušných norem (EN 50126, EN 50129, atd.) [44, 45]. Rovněž klasická odometrie ETCS od renomovaných výrobců, která je použita v koncepci 3InSat pro řetězení (diagnostiku) virtuálních balíz a poskytování rychlosti vlaku, požadavky na bezpečnost splňuje.

Nejnovější aktualizované přerozdělení bezpečnostních úrovní obsahuje požadovanou hodnotu pro bezpečnou detekci virtuální balízy THR GNSS LDS, provoz = $0,5 \cdot 10^{-9}/H$ nebezpečných poruch jak je uvedeno v [46]. Tato analýza byla provedena jako součást práce na současných projektech zmíněných v části 2.8.2. Jsou zde také analyzovány parametry systému EGNOS pro použití v železniční zabezpečovací technice. Ukazuje se, že EGNOS v současném stavu splňuje hodnotu THR $7.5e-6/h$ Pro jeho použití je tedy potřeba tuto hodnotu ponížít, přidáním další nezávislé diagnostiky s velikostí P_{MD} řádově 10^{-4} .

Je zřejmé, že ani speciálně navržená síť lokálních stanic pro monitorování kvality GNSS SIS není sama o sobě schopna detekovat možné poruchy vlivem lokálních jevů na vozidle. Proto je třeba použít kombinaci několika speciálních detekčních technik na vozidle, aby byl náročný požadavek $HR_{SIS \text{ lokální efekty}} = 0,25 \cdot 10^{-9}/h$ splněn. Pro detekci nadměrných chyb polohy LDS na palubě vozidla je v současné době možné použít metody RAIM, odometrii, inerciální měřicí jednotky (IMU). Další možná metoda pro detekci chyb způsobených lokálními podmínkami je obsahem této práce. Práce se zabývá návrhem detekce chyb GNSS v horizontální rovině s využitím 3D mapy tratě.



Obr. 21. Detekce chyb s využitím 3D mapy železniční tratě je další možností nezávislé detekce chyb způsobených lokálními účinky (nezávislost detekce je důležitá z pohledu teorie bezpečnosti).

V případě chyb způsobených lokálními podmínkami (vícecestné šíření) může dojít k prodloužení pseudovzdálenosti vlivem odrazu od překážky v okolí přijímače, např. budovy, což může způsobit chybu v určení polohy v řádu jednotek až desítek metrů. Tato chyba se projeví v 2D horizontální rovině i 1D vertikálním směru.

Detekce chyb v horizontální rovině pomocí 3D mapy tratě může pomoci detekovat nadměrné chyby určení polohy LDS vlivem lokálních jevů. Metoda je založena na znalosti nadmořské výšky mapy tratě. Konkrétně jde o detekci chyby v horizontální rovině na základě známé chyby ve vertikálním směru. Tato metoda může být další nezávislou detekcí chyb citlivou na vícecestné šíření signálu a zvýšit tak integritu určení polohy pomocí GNSS (Obr. 21). Metoda tedy může pomoci splnit bezpečnostní požadavky na LDS.

Zatímco v letecké dopravě je údaj o výšce klíčový, v pozemní dopravě, zejména v bezpečnostně relevantních systémech určených k jejímu řízení, je naopak klíčový údaj o poloze

v horizontální rovině. Údaj o výšce však může být využit ke kontrole integrity určení polohy na vozidle, tj. k detekci chyby v horizontální rovině. Údaj o výšce je udáván GNSS přijímačem v reálném čase, tudíž také detekce chyby v horizontální rovině založená na tomto údaji může probíhat v reálném čase.

6. Metodika řešení

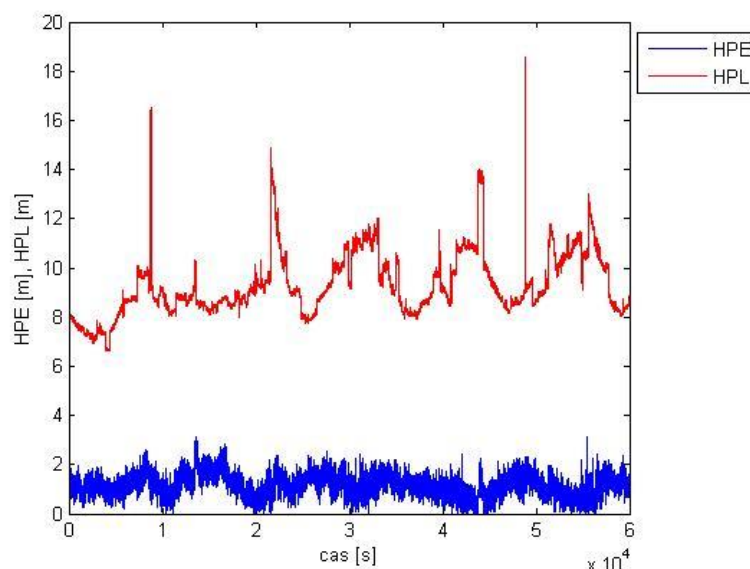
Metodika řešení je rozdělena na šest částí:

- první je sběr dat, náplní této části je měření dat s EGNOS přijímačem
- následují simulace chyb v pseudovzdálenostech na základě reálných naměřených dat, simulace jsou prováděny za účelem prozkoumání vztahu mezi chybami GNSS (chybami v pseudovzdálenostech v horizontální rovině a ve vertikálním směru)
- další je výběr nejvhodnějšího matematického modelu určení polohy pomocí GNSS, případně pro popis chyb GNSS
- náplní další části je odvození vztahu mezi horizontální a vertikální chybou určené polohy na základě stanoveného matematického modelu
- na základě výsledků provedených simulací a pomocí matematického modelu je proveden návrh algoritmu pro detekci nadměrné chyby GNSS přijímače v horizontální rovině
- závěr řešení je zaměřen na analýzu a popis kvality metody, např. pomocí experimentů a simulací prováděných s matematickým modelem

6.1. Sběr dat

Sběr dat probíhal průběžně pomocí EGNOS přijímače Septentrio PolaRx3 v Pardubicích. Jednalo se o statické měření s přesně zaměřenou polohou antény. Vyhodnocování chyb polohy stanovené prostřednictvím GNSS probíhalo porovnáním se známou polohou antény. Hlavní ukazatel chyby polohy v horizontální rovině je HPE (Horizontal Position Error), což je průběh rozdílů mezi skutečnou a naměřenou polohou v čase (udávaný v metrech). Byla prováděna krátká i dlouhodobější měření (až 14-ti denní). Poloha byla během těchto měření určována s frekvencí jednou za sekundu. Byly také vyhodnocovány údaje o aktuální integritě GNSS poskytované systémem EGNOS (HPL). Vztahy, podle kterých je počítán horizontální ochranný limit HPL, byly uvedeny v sekci 4.2.

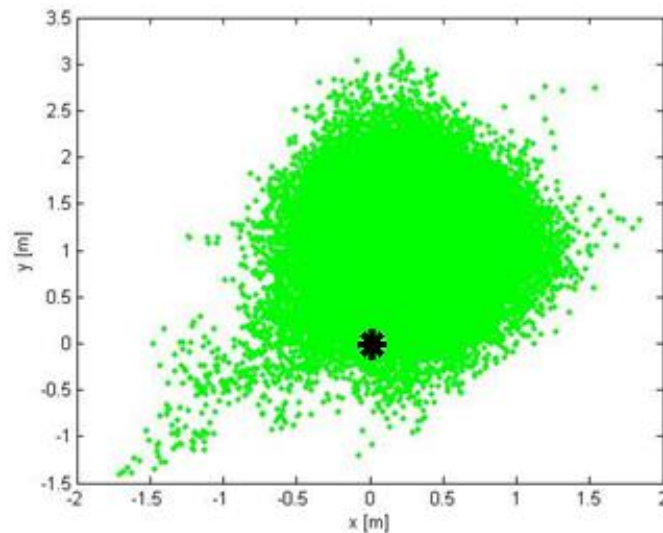
Jednodenní měření



Obr. 22. Horizontální chyba polohy HPE a horizontální ochranný limit HPL

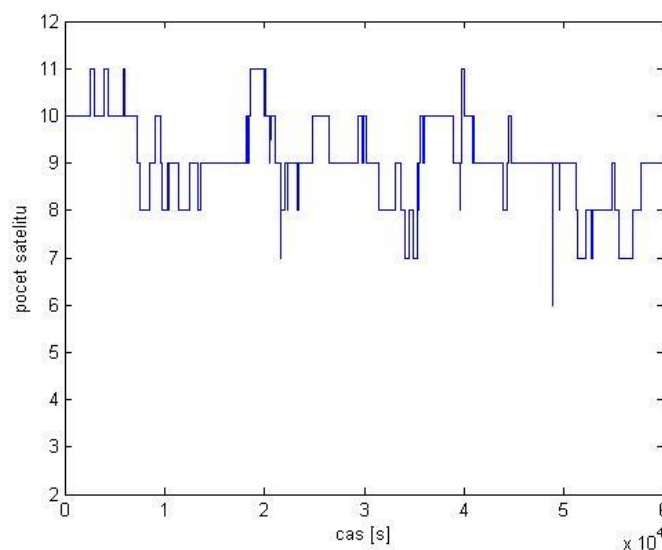
Součástí praktických experimentů bylo měření a vyhodnocování dat systému EGNOS. Přijímač Septentrio PolaRx3 je schopný kromě výpočtu polohy, také zpracovávat informace o integritě vysílané systémem EGNOS. Na následujících grafech jsou ukázány výsledky měření.

V grafu na Obr. 22 můžeme porovnat časové řady naměřených hodnot HPE a HPL. Hodnotu HPL počítá přijímač podle vzorců uvedených v sekci 4.2. Délka tohoto měření byla skoro celý den, 23,5 hodiny. V grafu můžeme vidět, že průběh hodnoty HPL kolísá přibližně kolem hodnoty 9 metrů a obsahuje několik skoků (zvýšených hodnot).



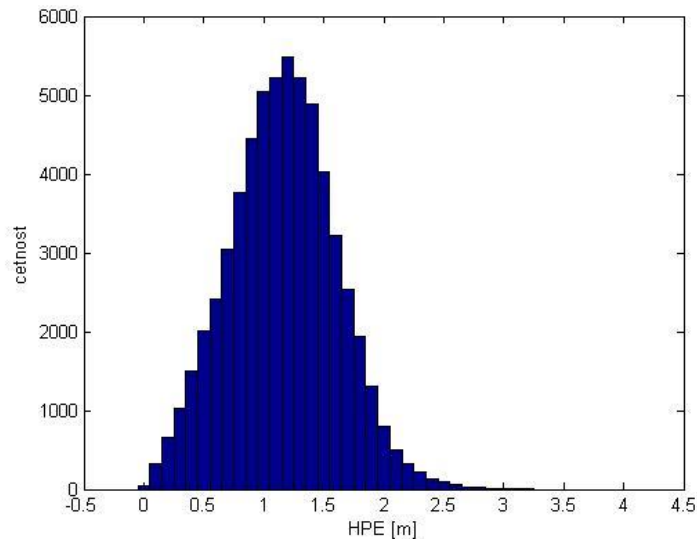
Obr. 23. Body polohy určené během měření, černá hvězdička ukazuje skutečnou polohu

Reálná naměřená GNSS data ukazující určenou polohu v horizontální rovině, jsou v grafu na obr 23. Graf zobrazuje body vypočítané polohy v porovnání se skutečnou polohou antény. Polohové body jsou zobrazeny zeleně a skutečná poloha antény je vyznačena černým křížkem. Z grafu je vidět, že rozptyl bodů je přibližně stejný ve směru osy x i y a to přibližně 3 metry.



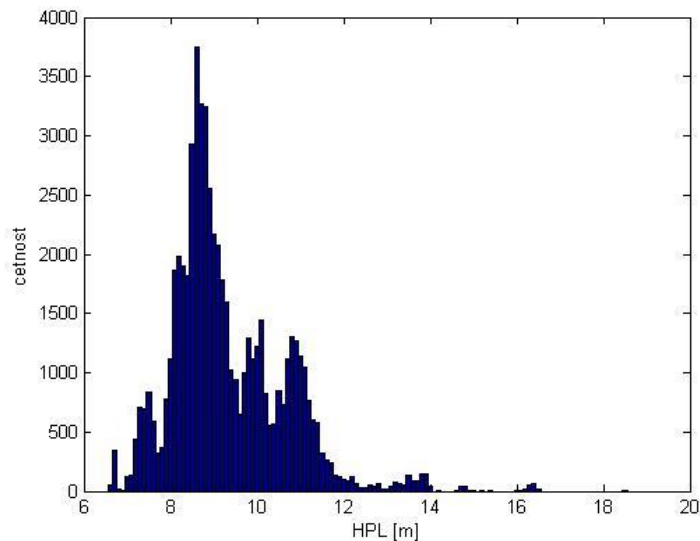
Obr. 24. Počet GPS satelitů použitých k výpočtu polohy během měření

Na Obr. 24 je zobrazen průběh počtu GPS satelitů, které přijímač používá pro výpočet polohy, během měření. V případě statického měření se průběh počtu satelitů periodicky opakuje po přibližně 24 hodinách. Na Obr. 25 je histogram HPE. Je zřejmé, že průběh rozdělení je spojité a má tvar přibližně Rayleighova rozdělení pravděpodobnosti. Nejvyšší výskyt mají chyby velikosti přibližně okolo 1,2 metru.



Obr. 25. Histogram HPE

Naproti tomu histogram HPL má vlivem výskytu občasných vyšších hodnot nespojitý tvar. Nejvyšší výskyt mají hodnoty kolem 8,8 metru (Obr. 26).

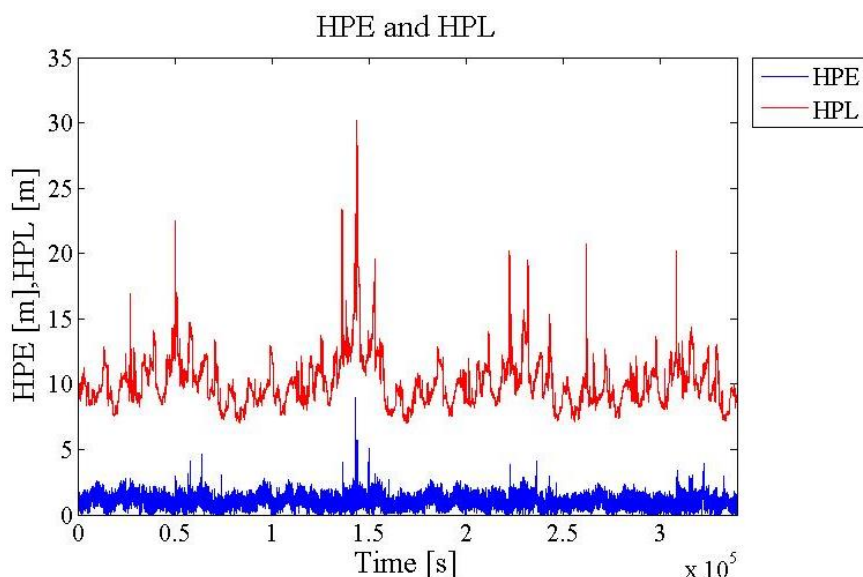


Obr. 26. Histogram HPL

Měření dat EGNOS přijímačem bylo prováděno za účelem analýzy parametrů systému a zejména chyb a zkoumání jejich možného způsobu využití k bezpečnému určování polohy v železničním prostředí.

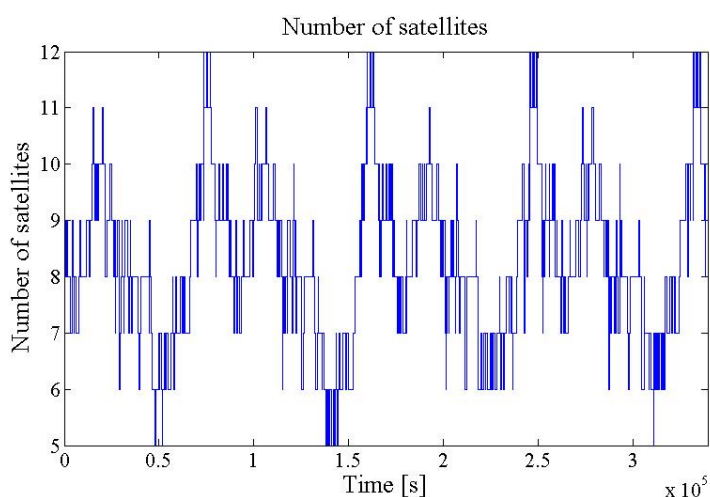
Vícedenní měření

V dalších grafech jsou zobrazena data z delšího měření. Toto konkrétní měření trvalo 3 dny. Obr. 27. ukazuje průběh HPE a HPL během měření. V grafu je vidět, že hodnota HPE se pohybuje kolem hodnoty 1 metru a má přibližně konstantní rozptyl o velikosti 1 metr. Průběh HPL se pohybuje v okolí hodnoty přibližně 10 metrů. V grafu jsou vidět kratší úseky, ve kterých se hodnoty HPE i HPL krátkodobě zvýší, u hodnoty HPL až o desítky metrů. V těchto úsecích je tedy integrita GNSS polohy zhoršena.



Obr. 27. Průběh HPE a HPL během vícedenního měření

Průběh počtu satelitů GPS použitých pro výpočet polohy během měření je na Obr. 28. Jejich počet kolísá mezi hodnotami 5 až 12.



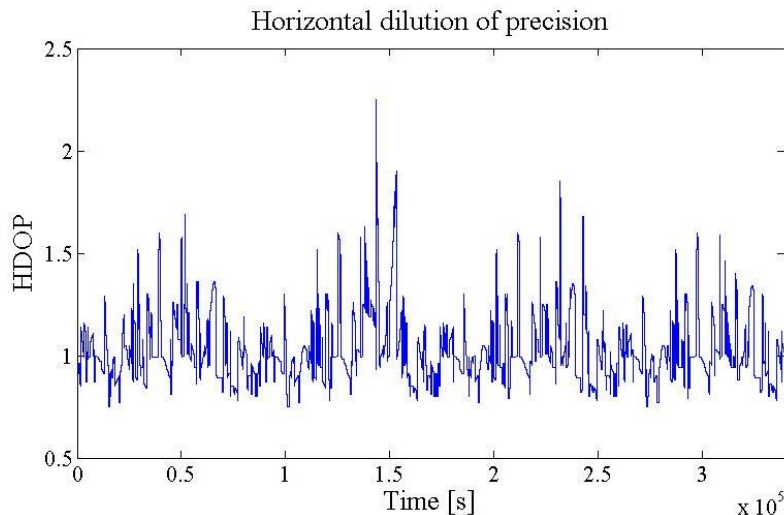
Obr. 28. Počet satelitů použitých při výpočtu polohy během vícedenního měření

Příčiny zvýšených hodnot HPE a HPL

Ze statistického hlediska můžeme zvýšené hodnoty nazývat odlehlými hodnotami. V případě statického měření (pozice GNSS antény je konstantní) je můžeme rozdělit podle jejich příčin na deterministické a náhodné.

Deterministické chyby

Příčina této části chyb je v případě statického měření pravidelné opakování geometrie satelitů vůči uživateli po přibližně jednom dni. Deterministická je tedy ta část chyb, které se opakují po přibližně stejných intervalech. Perioda výskytu těchto chyb je přibližně 24 hodin. Na Obr. 29 se tento interval opakuje čtyřikrát.



Obr. 29. Hodnoty HDOP během vícedenního měření

Graf na Obr. 29 zobrazuje velikost parametru HDOP v průběhu měření. HDOP popisuje aktuální úroveň degradace přesnosti určení polohy v horizontálním směru. Vypočítá se podle vztahu (21). Graf ukazuje podobné shluky chyb v přibližně stejných intervalech (24 hodin) jako u průběhů HPE a HPL. Ty jsou způsobeny opakováním geometrie satelitů vůči přijímači s periodou 24 hodin. Tyto chyby opakovaně vznikají v okamžicích kdy je hodnota parametru HDOP zvýšená a tudíž v těchto okamžicích vzájemná geometrie satelitů vzhledem k uživateli není optimální pro přesné určení polohy.

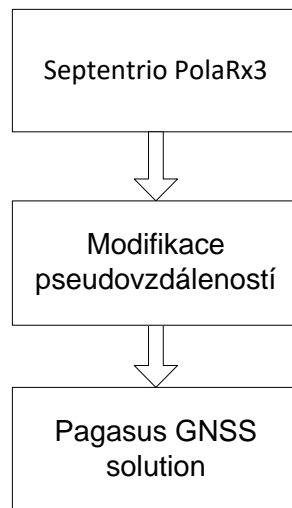
Náhodné chyby

Kromě výše popsaných deterministických chyb, vznikají také chyby náhodné (odlehle body – outliers). Ty jsou patrné v průběhu HPE a HPL na Obr. 27. také. Mohou být způsobeny např. poruchami v ionosféře, což může ovlivnit hodnotu HPL prostřednictvím parametru parameter Grid Ionospheric Vertical Indicator (GIVEI), který je vysílán v EGNOS zprávě 26. Tento parametr představuje aktuální odhad zpoždění signálu při průchodu ionosférou.

Korekce zpoždění signálu v ionosféře jsou vysílány jako odhady zpoždění signálu v určitých bodech v ionosféře tzv. ionospheric grid points (IGPs). To je síť bodů rovnoměrně rozmístěných napříč ionosférou. Vzdálenost mezi body je většinou 5 stupňů zeměpisné šířky.

6.2. Simulace chyb v pseudovzdálenostech

Za účelem simulace chyby signálu vlivem lokálních efektů byla záměrně modifikována délka původních pseudovzdáleností naměřených GNSS přijímačem. Následně byla počítána poloha modulem GNSS solution programu Pegasus [47], jak je blokově zobrazeno na Obr. 30.



Obr. 30. Blokové schéma metodiky prováděných simulací

6.2.1 Program Pegasus

Při vyhodnocování naměřených dat byl používán program Pegasus [47] vyvíjený firmou Eurocontrol. Konkrétně jeho modul GNSS Solution, který umožňuje počítat polohu pomocí reálných dat naměřených přijímačem PolaRx3. Program Pegasus, umožňuje nadefinovat, pojmenovat a uložit vlastní simulační scénář. Je zde možné zadat také popis k aktuálnímu scénáři. Další možností je načtení již v minulosti uloženého scénáře. Dále obsahuje množství dalších různých modulů.

Pegasus je sada nástrojů, která umožňuje analýzu dat GNSS shromážděných z různých systémů SBAS a GBAS, moduly programu také implementují algoritmy vydané v dokumentech MOPS. Tato sada nástrojů je navržena tak, aby pomohla poskytovatelům letových navigačních služeb a uživatelům při vyhodnocování výkonu signálů GNSS. Pegasus poskytuje množství funkcí, např. pro výpočet polohy simulující přijímače kompatibilní s MOPS a stanovení atributů GNSS, jako je přesnost, integrita, výpočet chyb trajektorie, predikce kontinuity a dostupnosti. Obsahuje také nástroje pro simulaci algoritmů zpracování dat pozemními stanicemi GBAS.

Druhy chyb v horizontální rovině

Na základě provedených měření a simulací lze identifikovat dva základní druhy chyby polohy určené pomocí GNSS v horizontální rovině. Tyto druhy se v průběhu HPE projevují jako:

1. náhlý skok - může být způsoben například vícecestným šířením (neprojeví se v ochranných úrovních SBAS přijímače), nebo náhlým skokem v počtu použitých satelitů (projeví se v ochranných úrovních SBAS přijímače)
2. postupný nárůst - může být způsoben například postupně se zhoršující geometrií použitých satelitů, nebo jejich postupně se snižujícím počtem

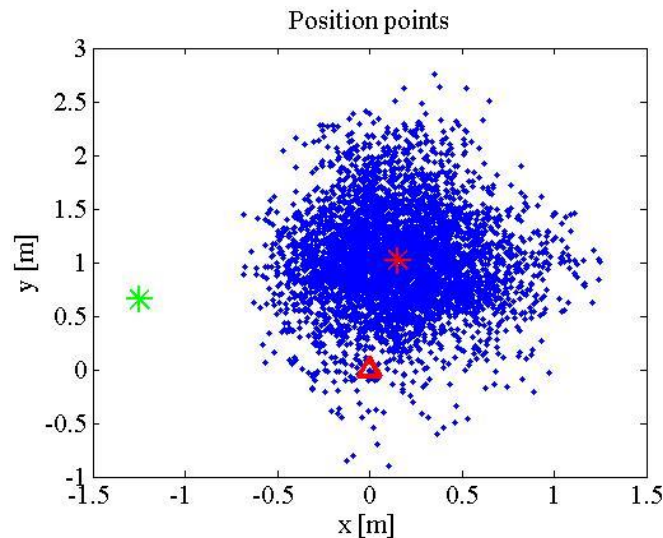
6.2.2 Simulace chyby v jednom časovém bodě

Simulace se nejprve zaměřují na náhlý skokový nárůst chyby v horizontální rovině (zvýšení HPE). V tomto prvním případě je simulována chyba pseudovzdálenosti pouze v jednom časovém bodě, tedy při jedné konkrétní hodnotě elevace, která se pohybuje okolo 50 stupňů. Původní GNSS data byla naměřena 26 července 2012 v Pardubicích. Záměrná chyba byla zanesena do pseudovzdálenosti satelitu SVN 12 v čase 1000 s od začátku měření. Elevace satelitu SVN 12 byla v tomto okamžiku přibližně 50°. Počet satelitů použitých pro výpočet polohy v tomto čase byl 8.

Chyba byla vyhodnocována v případě prodloužení i zkrácení původní pseudovzdálenosti [B3]. Výsledky pro oba tyto případy jsou shrnuty v závěru.

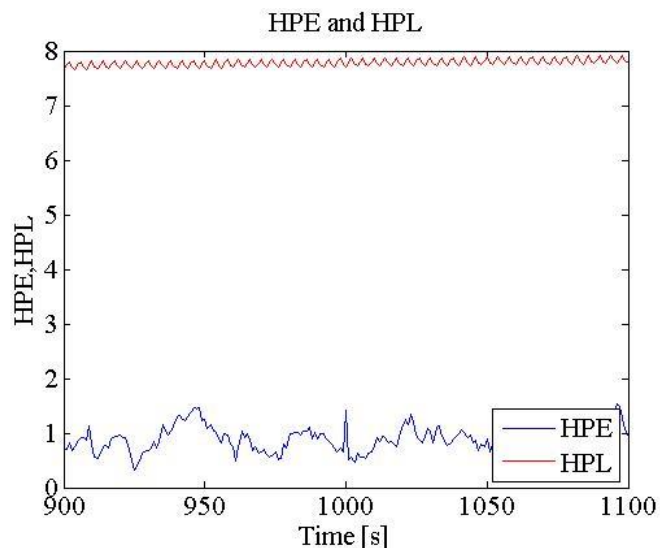
Simulace chyby satelitu SVN 12 +3 metry

Následující grafy ukazují případ, kdy je simulována chyba satelitu SVN 12 + 3 metry. Graf na Obr. 31 ukazuje vypočítané body polohy. Chyba je simulována v čase 1000 s od začátku měření. Bod v tomto čase je označen zelenou hvězdičkou. V grafu je vidět že je polohový bod v tomto čase posunut asi o 1 metr doleva.



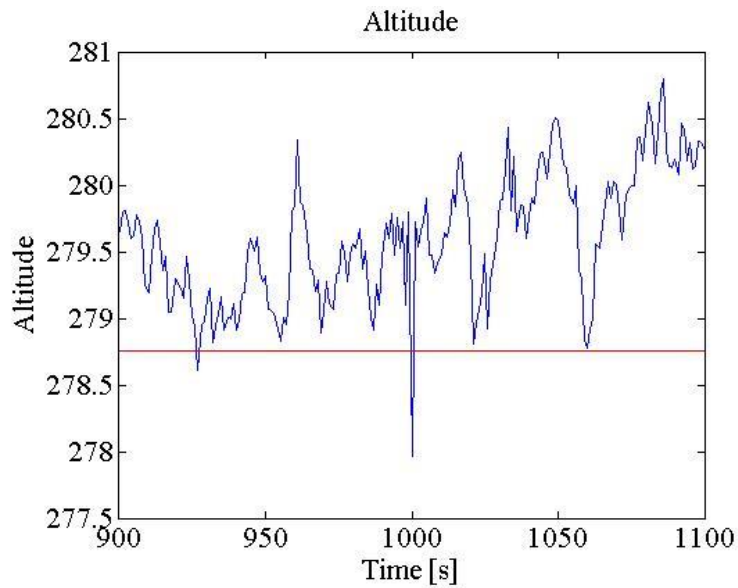
Obr. 31. Chyba v horizontální rovině v případě prodloužení pseudovzdálenosti SVN 12 o 3 metry

Graf na Obr. 32 zobrazuje průběhy HPE a HPL. Bod v čase 1000 s, ve kterém je simulována chyba, je uprostřed horizontální osy. V grafu je patrná skokově zvýšená hodnota HPE v tomto bodě.



Obr. 32. Průběh HPE a HPL v případě prodloužení pseudovzdálenosti SVN 12 o 3 metry

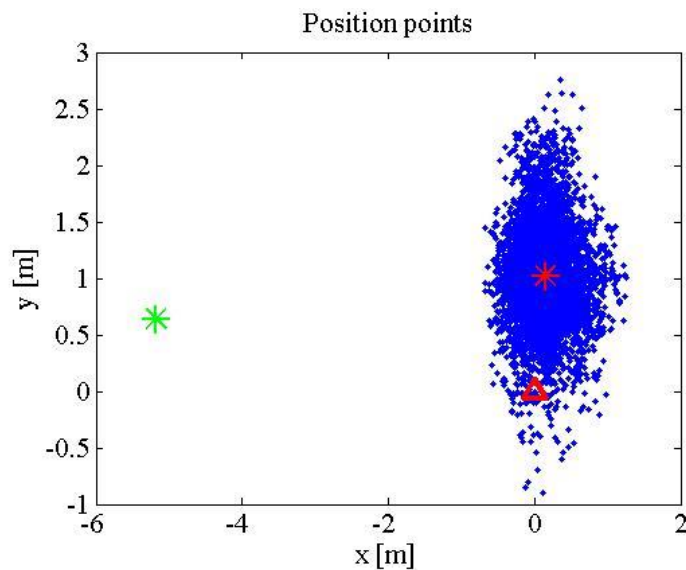
V grafu na Obr. 33 je vidět minimum výšky v bodě kdy je simulována chyba. Velikost minima je přibližně 1 metr.



Obr. 33. Průběh výšky v případě prodloužení pseudovzdálenosti SVN 12 o 3 metrů

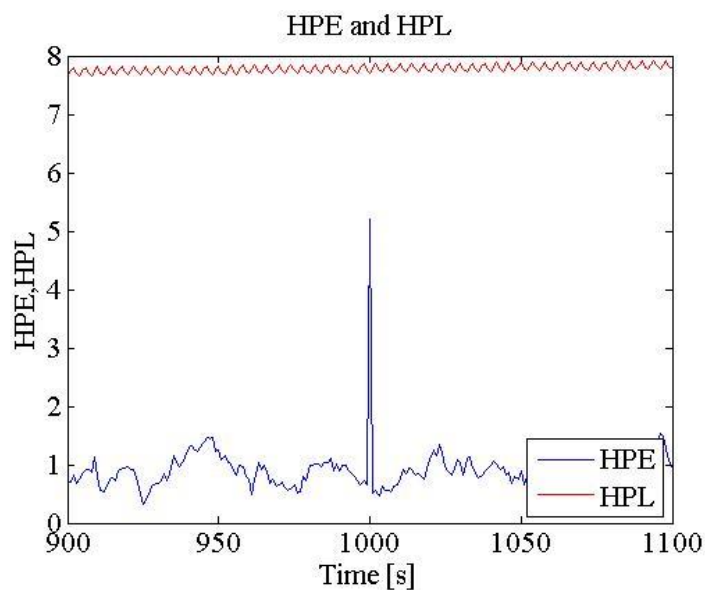
Simulace chyby satelitu SVN 12 +12 metrů

Graf na Obr. 34 ukazuje body určené polohy. Polohový bod v čase, kdy je simulována chyba, je posunutý přibližně o 4 metry doleva.



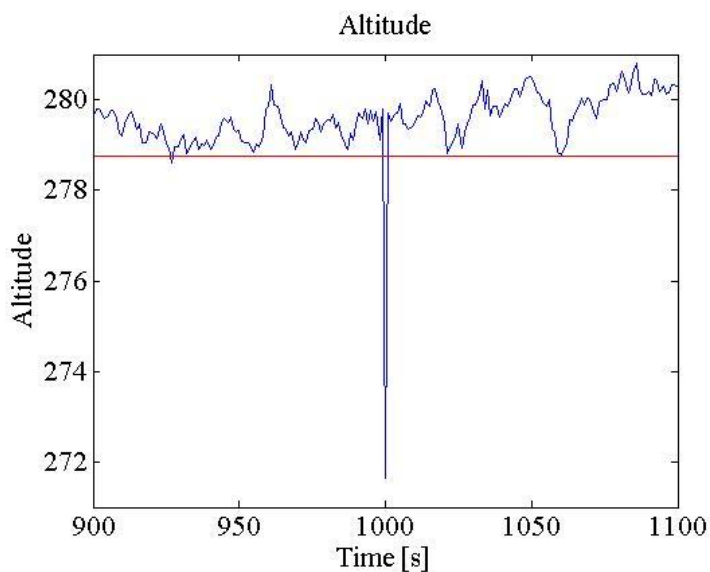
Obr. 34. Chyba v horizontální rovině v případě prodloužení pseudovzdálenosti SVN 12 o 12 metrů

Na Obr. 35 jsou odpovídající průběhy HPE a HPL, maximum HPE je v tomto případě přibližně 5 metrů.



Obr. 35. Průběh HPE a HPL v případě prodloužení pseudovzdálenosti SVN 12 o 12 metrů

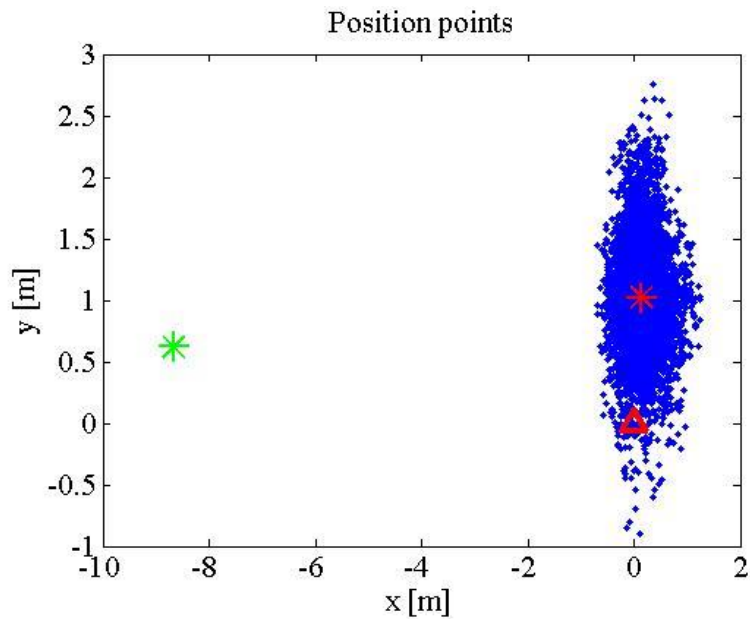
V grafu na Obr. 36 je zachycen průběh určené výšky. V bodě, ve kterém je simulována chyba, (uprostřed horizontální osy) je vidět velké minimum o velikosti přibližně 7 metrů.



Obr. 36. Průběh výšky v případě prodloužení pseudovzdálenosti SVN 12 o 12 metrů

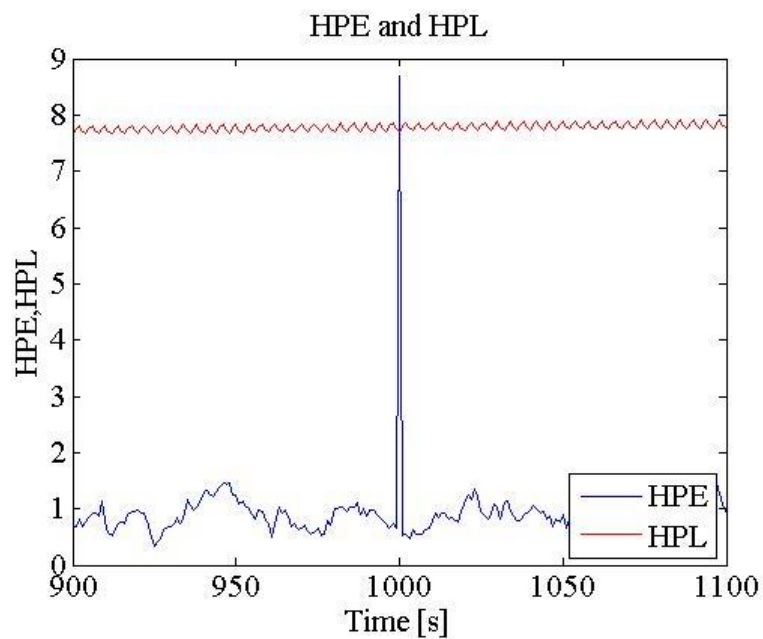
Simulace chyby satelitu SVN 12 +20 metrů

Na následujících grafech je uveden případ, kdy je pseudovzdálenost záměrně prodloužena o 20 metrů. Graf na Obr. 37 ukazuje vypočítané body polohy. Červený trojúhelník je skutečná poloha antény. Bod v čase, kdy je simulována chyba, je posunut přibližně o 8 metrů doleva.



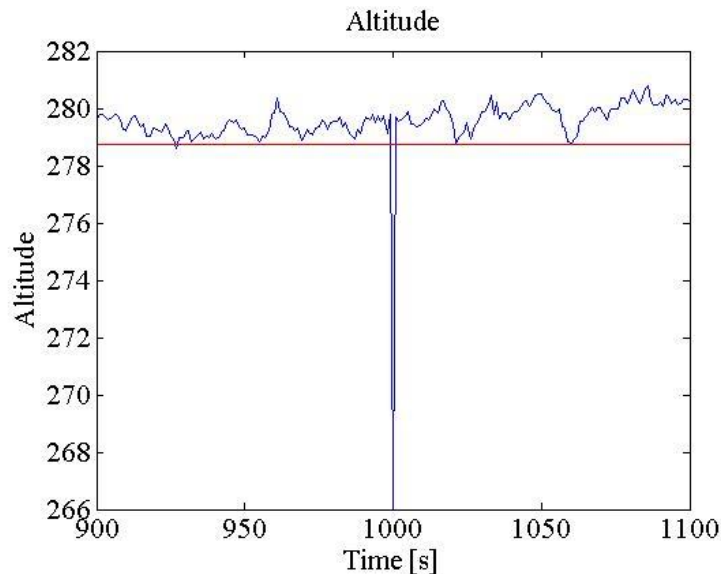
Obr. 37. Chyba v horizontální rovině v případě prodloužení pseudovzdálenosti SVN 12 o 20 metrů

Na Obr. 38 jsou odpovídající průběhy HPE a HPL. Maximum HPE překračuje hodnotu HPL a vzniká tak nebezpečná, SBAS systémem nedetekovatelná chyba.



Obr. 38. Průběh HPE a HPL v případě prodloužení pseudovzdálenosti SVN 12 o 20 metrů

Z grafu na Obr. 39 je vidět, že tato chyba se dá v tomto případě detekovat pomocí velkého minima v průběhu výšky (přibližně 13 metrů).



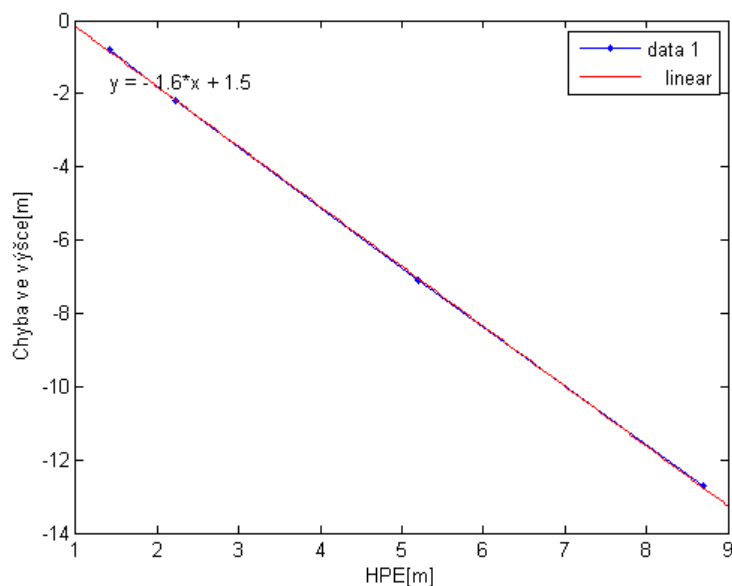
Obr. 39. Průběh výšky v případě prodloužení pseudovzdálenosti SVN 12 o 20 metrů

Z porovnání uvedených grafů je zřejmé, že závislost mezi velikostí chyby v pseudovzdálenosti a velikostí výsledné chyby polohy je lineární. To je potvrzeno následným shrnutím výsledků v tabulce a vnesením do grafu. Výsledky simulace jsou shrnuty v tabulkách Tab. 1 a Tab. 2. Obě tabulky udávají v prvním sloupci velikost chyby zavedené do pseudovzdálenosti, ve druhém výslednou velikost HPE a ve třetím rozdíl skutečné a vypočítané výšky. V posledním sloupci tabulek je rozdíl průměrné výšky vypočítané z celého datového souboru a aktuální hodnoty výšky. Tabulka 1 udává výsledné hodnoty v případě prodloužení původní pseudovzdálenosti (ty byly ukázány také v předcházejících grafech) a Tab. 2 udává výsledky v případě zkrácení pseudovzdálenosti.

Tab. 1. Výsledky simulací pro prodlouženou pseudovzdálenost

Chyba pseudovzdálenosti [m]	HPE [m]	Absolutní hodnota chyby ve výšce [m]	Chyba ve výšce vzhledem k průměrné hodnotě výšky [m]
+3	1,41	0,80	2,5
+5	2,22	2,21	2,2
+12	5,21	7,12	8,3
+20	8,69	12,73	13,6

Údaje z Tab. 1 jsou vyneseny v grafu na Obr. 40. Graf ukazuje průběh závislosti mezi chybou v horizontální rovině (HPE) a chybou ve výšce v případě prodloužené pseudovzdálenosti. Z grafu vyplývá, že závislost je lineární. Chyba ve výšce se dá podle lineárního proložení vyjádřit následujícím vzorcem $VPE = -1,6 \cdot HPE$

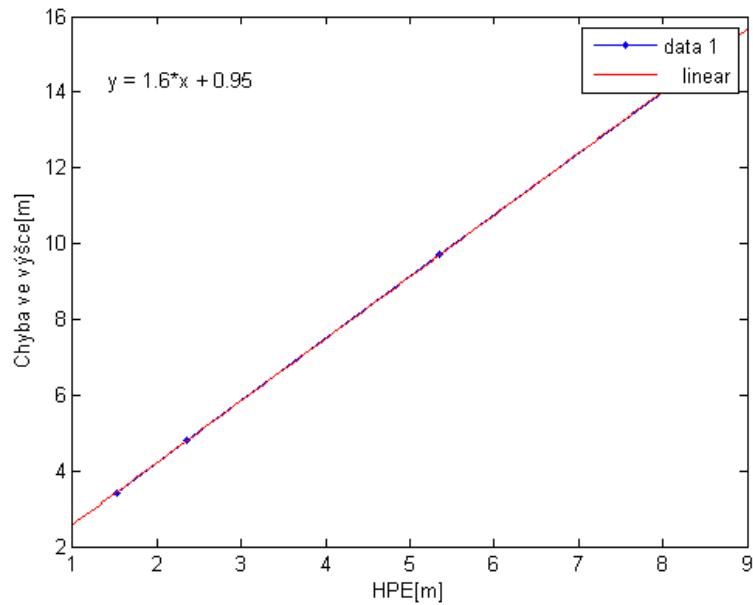


Obr. 40. Závislost mezi chybou v horizontální rovině HPE a chybou ve vertikálním směru VPE v případě zkrácené pseudovzdálenosti

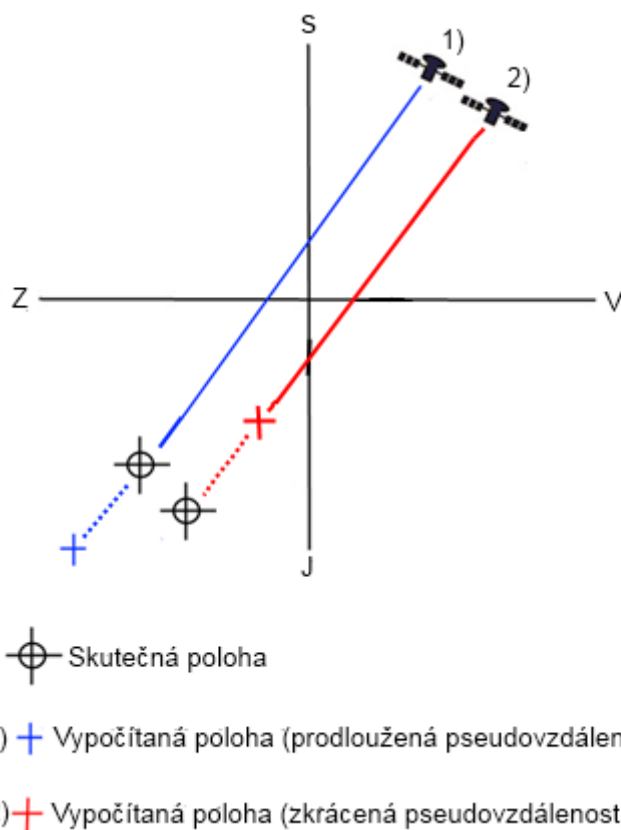
Tab. 2. Výsledky simulací pro zkrácenou pseudovzdálenost

Chyba pseudovzdálenosti [m]	HPE [m]	Absolutní hodnota chyby ve výšce [m]	Chyba ve výšce vzhledem k průměrné hodnotě výšky [m]
-3	1,53	3,41	2,6
-5	2,35	4,81	3,9
-12	5,35	9,72	9,1
-20	8,82	15,34	14,3

Údaje z Tab. 2 jsou vyneseny v grafu na Obr. 41. Graf ukazuje průběh závislosti mezi chybou v horizontální rovině (HPE) a chybou ve výšce v případě zkrácené pseudovzdálenosti. Graf zobrazuje lineární závislost, stejně jako v předchozím případě. Data byly proloženy přímkou. Chyba ve výšce se zde dá vypočítat jako $VPE = 1,6 \cdot HPE$. Provedené simulace tedy ukazují na lineární závislost mezi velikostmi chyb v horizontální rovině a ve vertikálním směru v jednom časovém bodě. Simulace chyby v jednom časovém bodě byly publikovány v [B3].



Obr. 41. Závislost mezi chybou v horizontální rovině HPE a chybou ve vertikálním směru VPE v případě prodloužené pseudovzdálenosti



Obr. 42. Schematické znázornění chování chyb ve vertikální rovině při simulaci chyby v pseudovzdálenosti

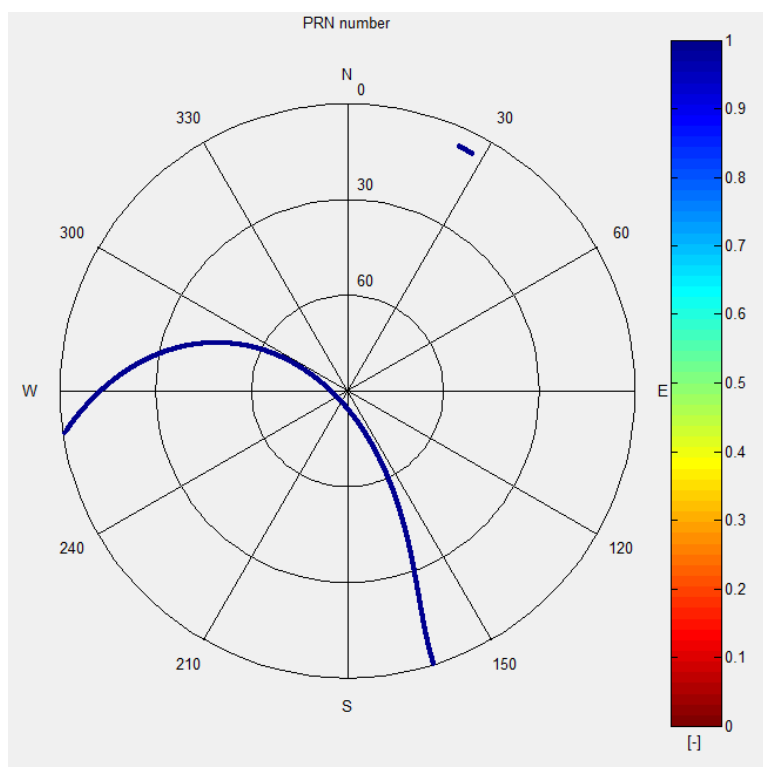
Z výsledků simulací vyplývá, že i chyba pouze jedné z osmi měřených pseudovzdáleností způsobí významnou chybu ve vypočtené poloze. Na Obr. 42 je schematicky vystiženo chování chyb v horizontální rovině a ve vertikálním směru, které vzešlo ze simulace. Určená poloha se v případě záměrného zavedení chyby do pseudovzdáleností posouvá přibližně po přímce, která při pohledu na

vertikální rovinu shora spojuje pozici satelitu (do jehož pseudovzdálenosti je zavedena chyba) s pozicí uživatele. Jak vyplývá z tohoto obrázku, v případě delší pseudovzdálenosti (případ 1) se určená poloha posune po této přímce dále za skutečnou polohu směrem od satelitu (a způsobí minimum ve výšce). Naopak v případě kratší pseudovzdálenosti (případ 2)) se posune blíže směrem k satelitu (a způsobí maximum ve výšce). Výsledky platí pro jeden konkrétní použitý datový soubor.

Simulace ukázala důsledky chyby v jedné pseudovzdálenosti na výsledné určení polohy pomocí GNSS a vztah mezi chybami v horizontální rovině a vertikálním směru při této konkrétní elevaci satelitu. Z výsledků je patrné, že chyby v pseudovzdálenosti větší než 3 metry způsobí znatelné zhoršení přesnosti výsledné polohy. Chyba se při této konkrétní pozici satelitu projeví vždy více ve vertikálním směru (ve výšce), než v horizontální rovině. Při známé hodnotě výšky GNSS antény kolejového vozidla by tedy v tomto konkrétním případě bylo možné hodnotu výšky naměřenou GNSS přijímačem použít k detekci chyb v horizontální rovině.

6.2.3 Simulace déle trvajících chyb

Byla vyhodnocována data ze 14-ti denního měření postupně po jednotlivých dnech. Byly provedeny simulace déle trvající chyby v pseudovzdálenostech různých satelitů. Zejména pro vyšetření vlivu elevace satelitu na poměr v jakém se projeví výsledné chyby polohy ve vertikální rovině a horizontálním směru. Při simulacích byly záměrně zavedeny chyby pseudovzdálenosti jednoho konkrétního satelitu po celou dobu měření, které trvalo 24 hodin. Za tímto účelem byl vytvořen skript v jazyce Perl, který v souboru s délkami pseudovzdáleností změnil délky pseudovzdáleností vybraného satelitu na vybraném úseku dat.

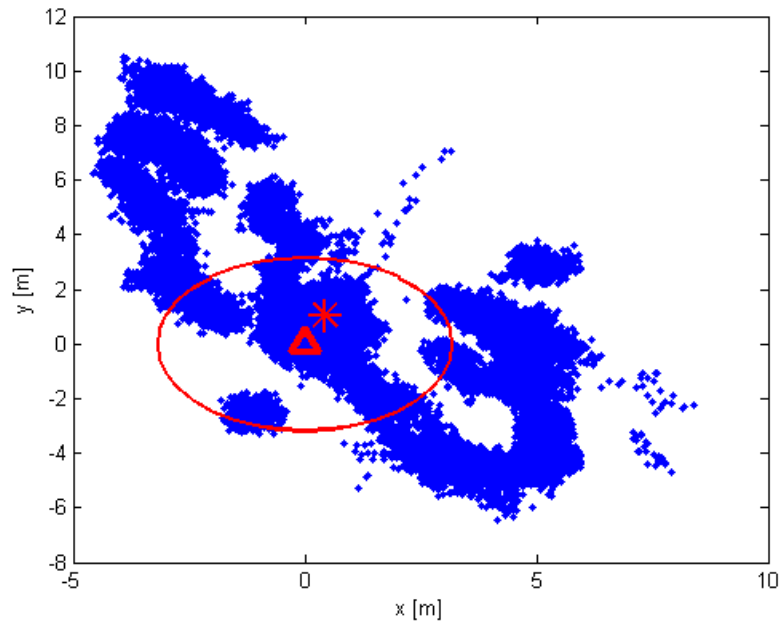


Obr. 43. Průběh elevace satelitu SVN 1 během jednodenního měření; zdroj: vygenerováno pomocí programu Pegasus

Následně byla spočítána poloha v modulu GNSS solution programu Pegasus, za použití tohoto změněného souboru pseudovzdáleností. Dále je uvedena jedna vybraná ukázka simulace, která

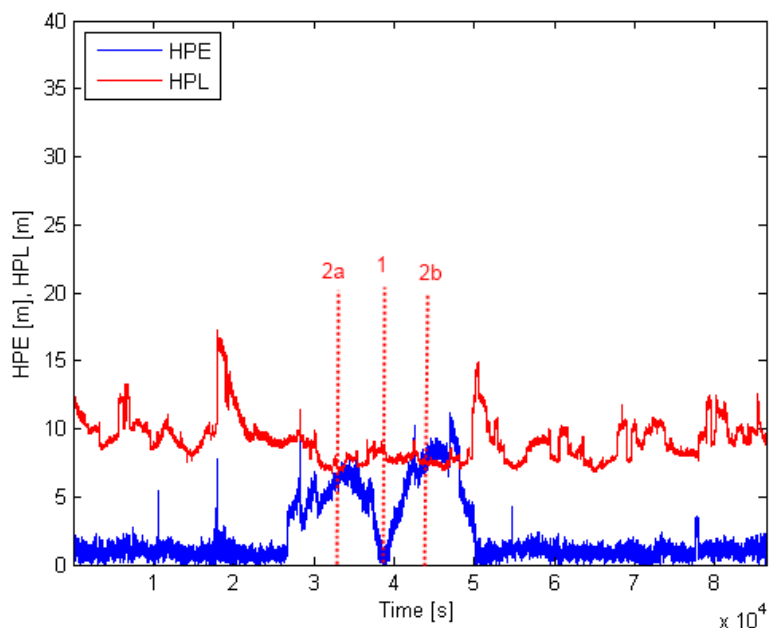
byla prováděna na základě dat, která byla naměřena 24. 6. 2013. Pseudovzdálenost satelitu SVN 1 byla prodloužena o 20 metrů. Satelit SVN 1 byl zvolen kvůli jeho dráze, protože prochází postupně téměř celým spektrem elevací, jak je vidět na Obr. 43.

Výsledné naměřené body polohy jsou na Obr. 44. Červený trojúhelník označuje skutečnou polohu antény a červená hvězdička střední hodnotu vypočítanou ze všech naměřených bodů. Červený kruh má poloměr o velikosti chyby dRMS, počítané podle vztahu (32), která je v tomto případě 3,1879 metrů. dRMS v případě bez záměrně zavedené chyby pseudovzdálenosti je 1,0074.



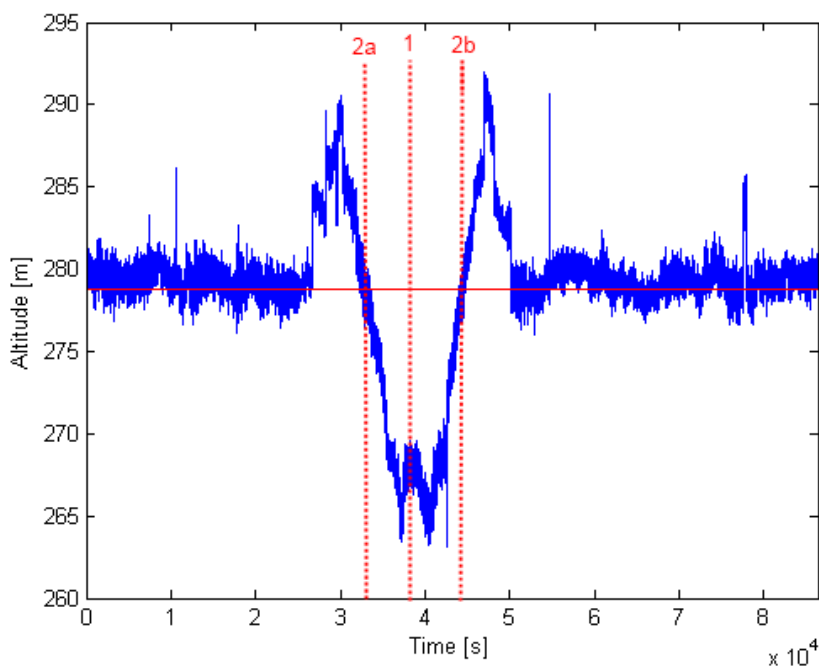
Obr. 44. Polohové body v případě simulace chyby pseudovzdálenosti satelitu SVN 1 po celou dobu jednodenního měření; zdroj: vlastní

Na Obr. 45 je průběh chyby polohy v horizontální rovině (HPE) v porovnání s úrovní ochrany v horizontální rovině (HPL). Z obrázku je vidět, že HPL na chybu nereaguje. V některých úsecích je HPE větší než HPL, nastává tedy nebezpečná chyba.

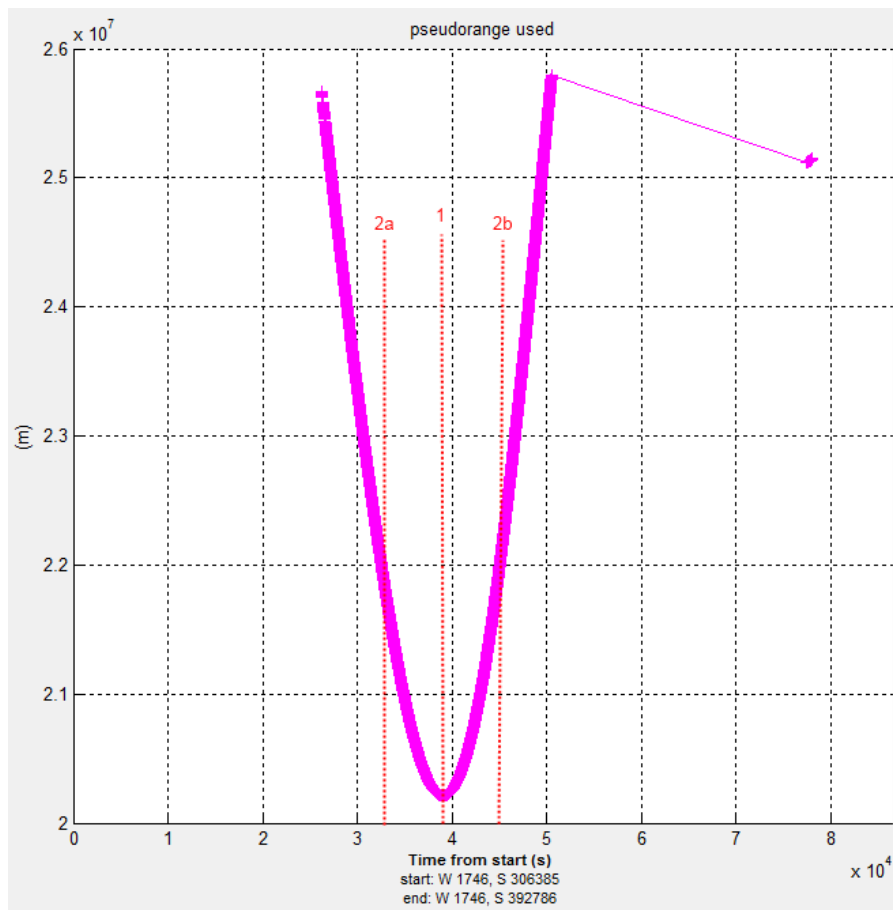


Obr. 45. Průběh HPE a HPL při chybě pseudovzdálenosti satelitu SVN 1 po celou dobu jednodenního měření; zdroj: vlastní

Na Obr. 46 je vidět odpovídající průběh výšky antény GNSS udávané přijímačem. Z porovnání Obr. 45. a Obr. 46 je zřejmé, že v úsecích se zvýšenou hodnotou HPE, dochází k fluktuacím ve výšce udávané GNSS přijímačem. V těchto úsecích je do výpočtu polohy zahrnuta pseudovzdálenost satelitu se zavedenou chybou. RMS_z je v tomto případě 3,7892 metrů a v případě bez zavedené záměrné chyby v pseudovzdálenosti $RMS_z=0,9208$ metrů.



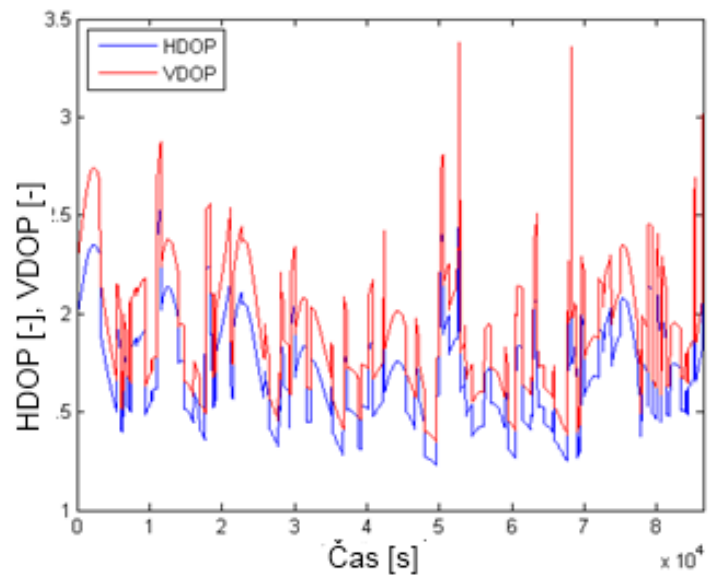
Obr. 46. Průběh výšky při chybě pseudovzdálenosti satelitu SVN 1 po celou dobu jednodenního měření; zdroj: vlastní



Obr. 47. Průběh délky pseudovzdálenosti satelitu SVN 1 během měření; zdroj: vygenerováno pomocí programu Pegasus

Na Obr. 47 je průběh délky pseudovzdálenosti satelitu SVN 1 během měření. Při porovnání grafů na Obr. 46. a 47. je zřejmé, že k fluktuacím ve výšce dochází po celou dobu kdy je k výpočtu polohy použita pseudovzdálenost satelitu SVN 1. V grafech jsou vyznačeny 3 body v čase 1, 2a a 2b. Bod 1 je bodem, ve kterém délka pseudovzdálenosti SVN 1 je minimální (SVN 1 se nachází kolmo nad uživatelem). Z grafu na Obr. 39 je vidět, že v tomto čase chyba v horizontální rovině klesá k nule. V průběhu výšky na Obr. 40 je však v tomto čase minimum. Tedy v tomto časovém bodě nastává z pohledu navrhované metody falešný alarm (odchylka ve výšce a zároveň nulová chyba v horizontální rovině). Přímky 2a a 2b vyznačují body na časové ose, ve kterých průběh výšky na Obr. 40 prochází skutečnou hodnotou výšky, zatímco chyba v horizontální rovině je zvýšená (Obr. 39). Z pohledu navrhované metody to znamená selhání detekce (nulová výchylka výšky a zároveň zvýšená chyba v horizontální rovině). Porovnáním s grafem na Obr. 41 je vidět, že selhání detekce nastává v tomto konkrétním případě kolem bodu kdy se délka pseudovzdálenosti SVN 1 rovná 22000 km. Na obrázku 42 jsou hodnoty činitele zhoršení přesnosti vlivem aktuální geometrie HDOP (21) a VDOP (22). Simulace déle trvajících chyb byly publikovány v [B6].

Z provedených simulací delších chyb v čase vyplývá, že to, jak se chyba pseudovzdálenosti projeví v horizontální rovině a ve vertikálním směru, závisí na aktuální geometrii. V uvedeném příkladu je tento vliv reprezentován zmíněným vlivem délky pseudovzdálenosti satelitu SVN 1 na výsledné chyby v horizontální rovině a ve vertikálním směru. Pro detekci chyby založené na aktuální chybě výšky je tedy třeba podchytit vliv aktuální geometrie (bude rozebráno v části matematický model). Graf na Obr. 48. Zobrazuje průběhy HDOP a VDOP během měření.



Obr. 48. Průběh parametrů HDOP a VDOP v během měření měření; zdroj: vlastní

6.3. Matematický model

Za účelem volby vhodného matematického modelu, byla provedena analýza matematických vztahů pro výpočet polohy metodou váhovaných nejmenších čtverců.

Pro určenou polohu platí, že v závislosti na aktuální geometrii, může být odhad polohy citlivější na chyby v určitých pseudovzdálenostech. Chyba měření jednoho metru v daném satelitu může způsobit např. dvoumetrovou chybu polohy, zatímco stejná chyba měření u jiného satelitu může způsobit např. pouze poloviční chybu v poloze. Stejně tak se tyto závislosti mění v čase vzhledem k postupně se měnící geometrii.

Právě tyto vzájemné vazby popisuje projekční matice výpočtu polohy metodou nejmenších čtverců (59). Tato matice byla zvolena jako základ matematického modelu.

Konkrétní aktuální účinky chyb pseudovzdáleností v jednotlivých směrech Souřadnicového systému ENU, tedy ve směrech east, north a up se dají určit pomocí projekční matice, přepočítané do systému ENU (59). Matice se vypočítá následovně

$$S = \begin{bmatrix} S_{east,1} & S_{east,2} & \cdots & S_{east,N} \\ S_{north,1} & S_{north,2} & \cdots & S_{north,N} \\ S_{up,1} & S_{up,2} & \cdots & S_{up,N} \\ S_{time,1} & S_{time,2} & \cdots & S_{time,N} \end{bmatrix} = (G^T \cdot W \cdot G)^{-1} \cdot G^T \cdot W, \quad [40] \quad (59)$$

kde G je geometrická matice a W je váhovací matice.

Jak se projeví chyba určitého satelitu v poloze, udávají koeficienty v jednotlivých sloupcích, kdy každý sloupec patří jednomu konkrétnímu satelitu a parametry v něm určují, jaký efekt bude mít chyba v pseudovzdálenosti daného satelitu u výsledné polohy v osách east, north a up (Obr. 49). Například pokud u pseudovzdálenosti satelitu SVN 2 nastane chyba b_2 , způsobí ve výsledné poloze chybu $b_2 \cdot s_{east,2}$ v ose east, $b_2 \cdot s_{north,2}$ v ose north a $b_2 \cdot s_{up,2}$ ve výšce, atp.

$$S = \begin{array}{ccc} \text{Sat 1} & \text{Sat 2} & \text{Sat 3} \\ \begin{bmatrix} S_{east,1} \\ S_{north,1} \\ S_{up,1} \\ S_{time,1} \end{bmatrix} & \begin{bmatrix} S_{east,2} \\ S_{north,2} \\ S_{up,2} \\ S_{time,2} \end{bmatrix} & \cdots \begin{bmatrix} S_{east,N} \\ S_{north,N} \\ S_{up,N} \\ S_{time,N} \end{bmatrix} \end{array}$$

Obr. 49. Zvýraznění příslušnosti parametrů k jednotlivým satelitům v projekční matici S ; zdroj: vlastní

Následujícími matematickými vztahy byly popsány závislosti zjištěné pomocí předchozích simulací. V části 6.4 bude matematický model ověřen na reálných datech.

1) **V případě chyby v jedné pseudovzdálenosti má vektor chyb v pseudovzdálenostech následující tvar $B = [0, \dots, b_i, \dots, 0]$ potom platí:**

Koeficienty určující jaká bude velikost výsledné chyby v horizontální rovině a ve vertikálním směru se stanoví z projekční matice S a mají následující tvar. Koeficient udávající, jak se projeví chyba pseudovzdálenosti i -tého satelitu v horizontální rovině je $C_{H,i}$ a ve vertikálním směru $C_{V,i}$:

- Koeficient pro vertikální směr: $C_{H,i} = \sqrt{s_{east,i}^2 + s_{north,i}^2}$
- Koeficient pro horizontální rovinu: $C_{V,i} = s_{up,i}$

Chyba ve vertikálním směru způsobená chybou v pseudovzdáleností b_i je

$$e_{vertical} = b_i \cdot s_{up,i} \quad (b_i \cdot C_{V,i}). \quad (60)$$

Chyba v horizontální rovině směru způsobená chybou v pseudovzdálenosti b_i je

$$e_{horizontal} = b_i \cdot \sqrt{s_{east,i}^2 + s_{north,i}^2} \quad (b_i \cdot C_{H,i}) . \quad (61)$$

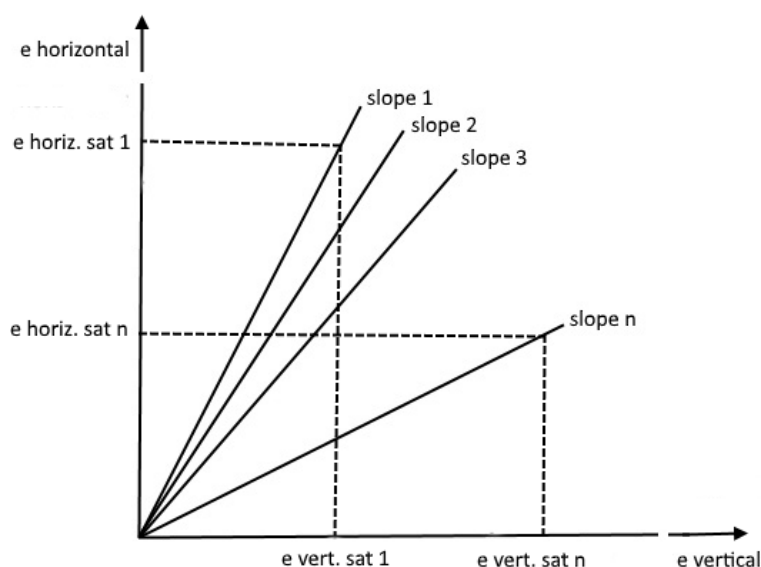
V případě, *se závadou* (faulty), v případě chyby pouze v jedné pseudovzdálenosti, platí lineární vztah mezi projekcí této chyby v horizontální rovině a v testační statistice. Tento vzorec udává vztah mezi chybou v horizontální rovině a testační statistikou, podobně jako vztah (55) v případě klasické metody RAIM

$$e_{horizontal} = slope_i \cdot e_{vertical} . \quad (62)$$

Tento vztah je charakterizovaný tzv. slope (tzv. *převodní směrnice chyb* zkráceně *směrnice*) i-tého satelitu, na kterém vznikne chyba b_i

$$slope_i = \frac{\sqrt{s_{east,i}^2 + s_{north,i}^2}}{s_{up,i}} \quad \left(\frac{C_{H,i}}{C_{V,i}} \right) , \quad (63)$$

$slope_i$ je vlastně směrnice převodní přímky, pomocí které se převádí chyby i-tého satelitu mezi horizontální rovinou a vertikálním směrem (testační statistikou), jak je schematicky zobrazeno na Obr. 44. Jak už bylo zmíněno v části 4.5 parametr *slope* lze nazvat *převodní směrnice chyb* zkráceně *směrnice*. Vztah (62) je ekvivalentní vztahu (56) klasické metody RAIM. Také udává vztah mezi chybou v poloze a testační statistikou. V případě navržené metody konkrétně vztah mezi chybou v horizontální rovině a absolutní hodnotou chyby ve výšce. Zároveň je $slope_i$ (*směrnice*) poměr horizontálního a vertikálního koeficientu (63).



Obr. 50. Schematické zobrazení vztahu mezi chybami v horizontální rovině a ve vertikálním směru; zdroj: vlastní

Definice pojmů z hlediska integrity

Požadovaná velikost chyby detekované v horizontální rovině:

- HAL – Horizontal Alert Limit (vstupní požadavek zvenčí - konstanta)

Chybové stavy:

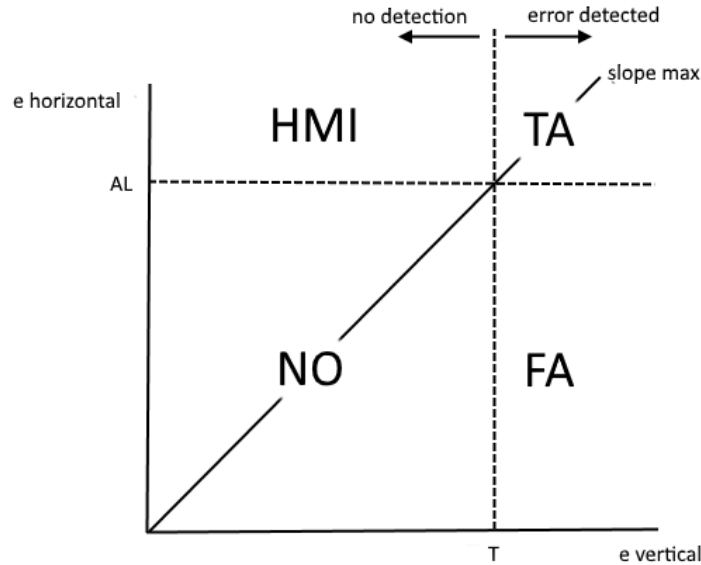
- NO – Normal Operation
- TA – True Alarm
- FA – False Alarm
- HMI – Hazardous Missleading Inforamtion

Mez detekce:

- T_h - hodnota chyby ve výšce (hranice) při jejíž překročení je detekována chyba

Chyba pseudovzdálenosti b_i bude mít největší efekt v horizontální rovině, pokud vznikne na satelitu s maximální *směrnicí* ($slope_{max}$).

Na následujícím obrázku je základní vztah mezi uvedenými veličinami. Detailní nastavení detekční meze bude popsáno v části v samostatné části 11.



Obr. 51. Schematické znázornění vztahu mezi chybovými stavy, detekční mezí a požadovanou velikostí detekované chyby (HAL); zdroj: vlastní

Pro jednotlivé chybové stavy platí:

$$\begin{aligned}
 NO &= (e_{vertical} < T \ \&\& \ e_{horizontal} < AL) \\
 TA &= (e_{vertical} > T \ \&\& \ e_{horizontal} > AL) \\
 FA &= (e_{vertical} > T \ \&\& \ e_{horizontal} < AL) \\
 HMI &= (e_{vertical} < T \ \&\& \ e_{horizontal} > AL)
 \end{aligned}$$

- 2) **V případě chyby ve více pseudovzdálenostech má vektor chyb v pseudovzdálenostech následující tvar:** $B = [0, \dots, b_i, b_{i+1}, \dots, b_M, \dots, 0]$ potom **platí:**

Počet chyb v pseudovzdálenostech je M . Chyba ve vertikálním směru je

$$e_{vertical} = \sum_{i=1}^N b_i \cdot s_{up,i} \quad (64)$$

Chyba ve směru east je

$$e_{east} = \sum_{i=1}^N b_i \cdot s_{east,i} \quad (65)$$

chyba ve směru north

$$e_{north} = \sum_{i=1}^N b_i \cdot s_{north,i} \quad (66)$$

a celková chyba v horizontálním směru

$$e_{horizontal} = \sqrt{e_{east}^2 + e_{north}^2} \quad (67)$$

6.4. Ověření pomocí matematického modelu

Matematický model byl ověřen s použitím nástroje SGMP (Stanford GPS/GNSS Matlab Platform) vytvořeného GPS laboratoří na kalifornské Stanford University. Tento nástroj je volně dostupný pro účely výzkumu. Je možné ho volně stáhnout [48]. Obsahuje implementaci výpočtu polohy metodou váhovaných nejmenších čtverců (LS – Least Squares) v prostředí Matlab.

Do tohoto nástroje byl dodělán matematický model uvedený v části 6.3. Byla tedy naprogramována projekční matice (59) a následně vztahy pro výsledné chyby určení polohy ve vertikálním směru (60) a v horizontální rovině (61).

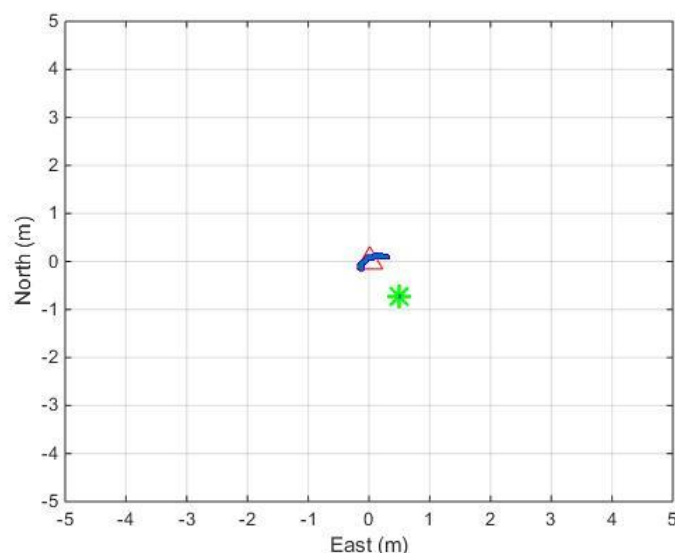
Následující simulace byly provedeny s použitím aktuálních reálných GNSS dat, které poskytuje NSTB (National Transportation Safety Board). To je Národní satelitní testovací úřad Federálního leteckého úřadu (FAA). NSTB se v současné době sestává z osmnácti testovacích referenčních stanic TRS (Test Reference Stations) v kontinentálních Spojených státech a třech referenčních stanic v Kanadě, z nichž všechny byly zprovozněny v letech 1995 - 1996. Každá referenční stanice je připojena k testovacímu zařízení pro integraci a testování (TBITF) v technickém centru FAA (FAATC) v Atlantic City, NJ.

V následující části jsou porovnány výsledky při simulaci chyb v pseudovzdálenostech v jednom časovém okamžiku, s vypočítanými hodnotami, které jsou počítány podle vztahů (60, 61) z aktuálních hodnot projekční matice.

Pro ověření simulací provedených v části 6.2 byly simulovány chyby v pseudovzdálenosti satelitu SVN 2. Postupně byly simulovány chyby o velikosti 3, 5, 12 a 20 metrů. Výsledky jsou ukázány v následujících grafech. Jsou použita data NSTB z 1. 4. 2019.

Grafy zobrazují simulování chyby 3 metry do pseudovzdálenosti satelitu SVN 2.

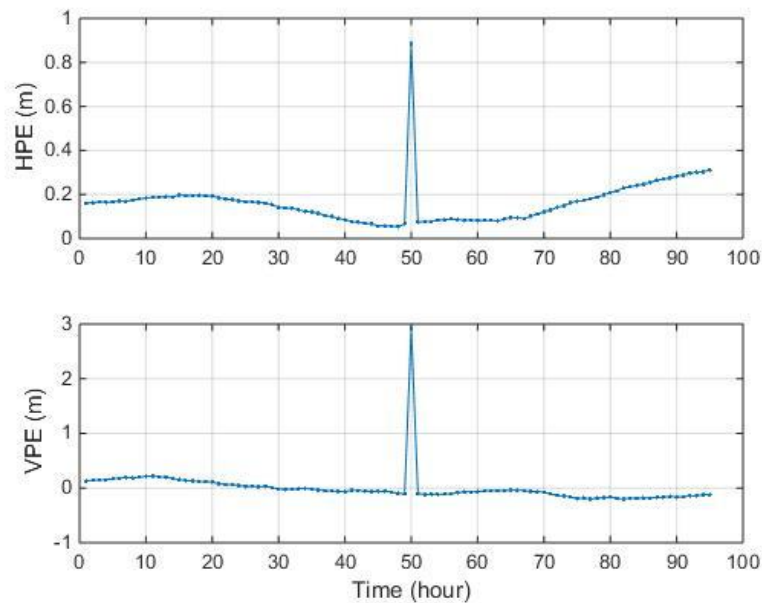
Chyba v pseudovzdálenosti + 3 m (SVN 2)



Obr. 52. Polohové body při simulaci chyby satelitu 2 o velikosti 3 m; zdroj: vlastní

Graf na Obr. 52 zobrazuje 100 polohových bodů v blízkosti skutečné polohy. Červený trojúhelník ukazuje skutečnou polohu, zelená hvězdička je určená poloha v čase, ve kterém byla

simulována chyba. Bod v tomto čase je vychýlen dolů a mírně vpravo. Graf na Obr. 53 ukazuje průběhy chyb v horizontální a vertikální rovině (HPE a VPE).



Obr. 53. Chyba v horizontální rovině HPE a ve vertikálním směru VPE při simulaci chyby satelitu 2 o velikosti 3 m; zdroj: vlastní

Skutečné hodnoty chyb v horizontální rovině a ve vertikálním směru v případě chyby pseudovzdálenosti 3 metry jsou následující:

$$VPE = 2,93 \text{ m}$$

$$HPE = 0,89 \text{ m}$$

Ověření pomocí matematického modelu:

Projekční matice (59) vychází v tomto případě následovně:

0.0282	0.1815	0.3088	0.2196	-0.2586	-0.1494	0.0831	-0.4131
0.3727	-0.2606	0.2265	-0.1787	-0.0339	0.3557	-0.0782	-0.4036
-0.4383	1.0103	-0.1974	-0.4851	-0.1442	0.6542	-1.1214	0.7218
-0.1804	0.7695	-0.0327	-0.1770	0.0508	0.5156	-0.5768	0.6310

Diagrammatic annotations: Red arrows point from labels $s_{east,2}$, $s_{north,2}$, and $s_{up,2}$ to the first three columns of the matrix. A red box highlights the first two rows and columns of the matrix, with the label "satelit 2" pointing to the first column.

Obr. 54. Aktuální hodnoty v projekční matici (56) se zvýrazněním hodnot $s_{east,2}$, $s_{north,2}$ a $s_{up,2}$ náležících k satelitu SVN 2; zdroj: vlastní

Dosazení do vztahů pro horizontální a vertikální chybu v případě chyby pseudovzdálenosti + 3m:

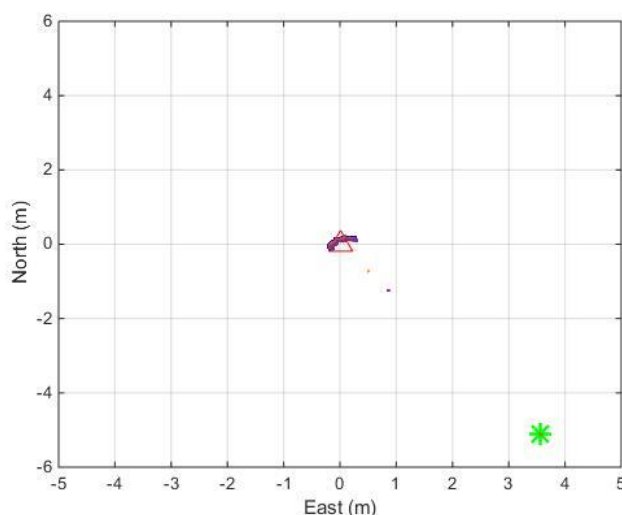
$$e_{vertical} = b_i \cdot s_{up,i} = 3 \cdot 1,01 = 3,03 \text{ m}$$

$$e_{horizontal} = b_i \cdot \sqrt{s_{east,i}^2 + s_{north,i}^2} = 3 \cdot \sqrt{0,1815^2 + (-0,2606)^2} = 0,95 \text{ m}$$

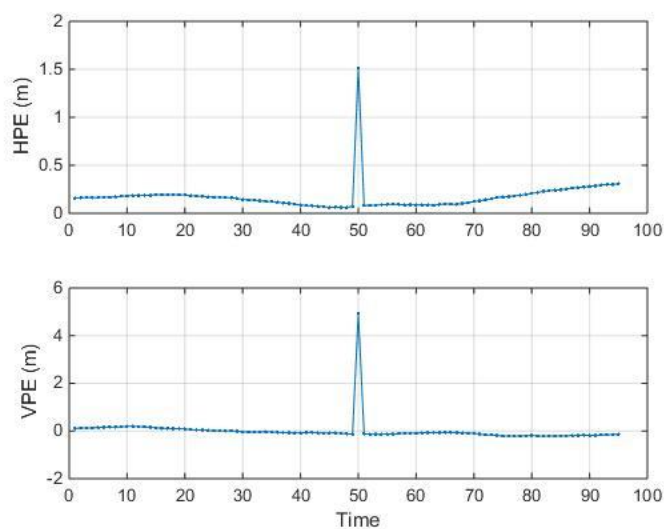
Skutečná hodnota HPE tedy v tomto případě vyšla 0,89 metrů, vypočítaná 0,95 metrů, tedy odchylka modelu v tomto případě pro chybu v horizontální rovině je 0,06 metru. Skutečná hodnota VPE je 2,93 metrů, vypočítaná 3,03 metrů, tedy odchylka modelu od skutečné vertikální chyby je 0,1 metru.

Chyba v pseudovzdálenosti + 5 m (SVN 2)

Následující graf ukazuje situaci v horizontální rovině pro chybu v pseudovzdálenosti satelitu SVN 2 o velikosti 5 metrů. V grafu na Obr. 55 je vidět, že určená poloha v čase, kdy je simulována chyba, je nyní dále od skutečné polohy než v předcházejícím případě.



Obr. 55. Polohové body při simulaci chyby satelitu 2 o velikosti 5 m; zdroj: vlastní



Obr. 56. Chyba v horizontální rovině HPE a ve vertikálním směru VPE při simulaci chyby satelitu 2 o velikosti 5 m; zdroj: vlastní

Skutečné hodnoty chyb v horizontální rovině a ve vertikálním směru v případě, kdy je simulována chyba v pseudovzdálenosti 5 metrů jsou následující:

$$VPE = 4,92 \text{ m}$$

$$HPE = 1,51 \text{ m}$$

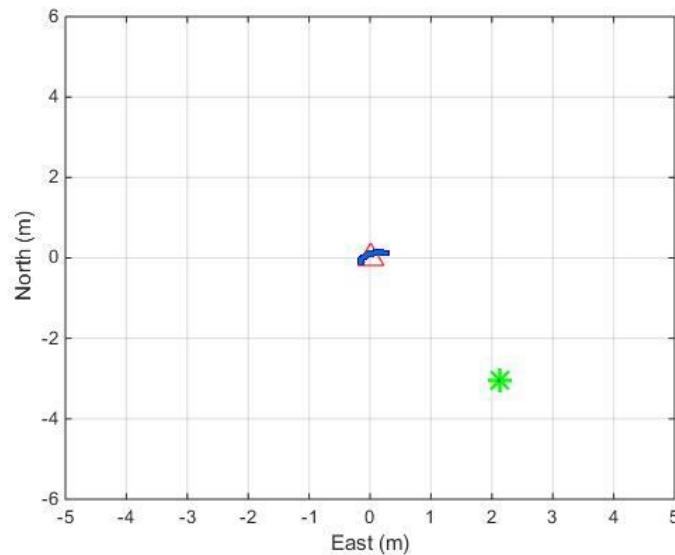
Dosazení do vztahů pro horizontální a vertikální chybu pro chybu pseudovzdálenosti + 5 m:

$$e_{vertical} = b_i \cdot s_{up,i} = 5 \cdot 1,01 = 5,05 \text{ m}$$

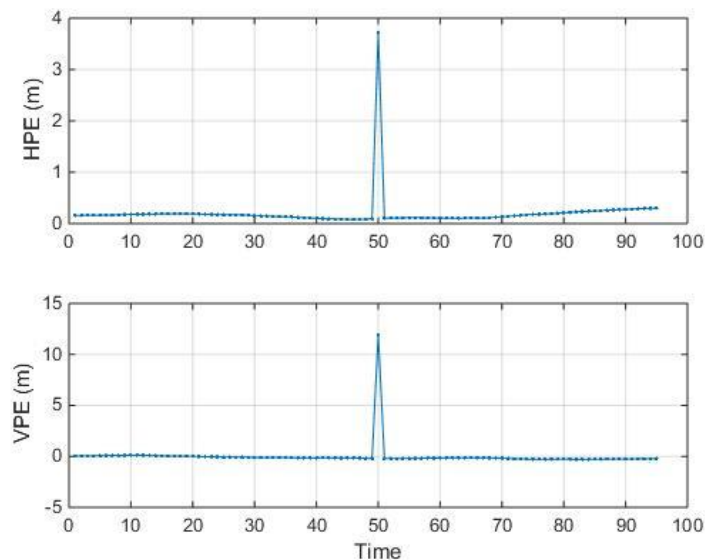
$$e_{horizontal} = b_i \cdot \sqrt{s_{east,i}^2 + s_{north,i}^2} = 5 \cdot \sqrt{0,1815^2 + (-0,2606)^2} = 1,58 \text{ m}$$

Skutečná hodnota HPE vyšla v tomto případě 1,51 metru, vypočítaná 1,58 metru, tedy odchylka modelu v tomto případě pro chybu v horizontální rovině je 0,07 metru. Skutečná hodnota VPE je 4,92 metru, vypočítaná 5,05 metru, tedy odchylka modelu od skutečné vertikální chyby je 0,13 metru.

Chyba v pseudovzdálenosti + 12 m (SVN 2)



Obr. 57. Polohové body při simulaci chyby satelitu 2 o velikosti 12 m; zdroj: vlastní



Obr. 58. Chyba v horizontální rovině HPE a ve vertikálním směru VPE při simulaci chyby satelitu 2 o velikosti 12 m; zdroj: vlastní

Skutečné hodnoty chyb v horizontální rovině a ve vertikálním směru v případě chyby pseudovzdálenosti 12 m jsou následující:

$$VPE = 11,92 \text{ m}$$

$$HPE = 3,72 \text{ m}$$

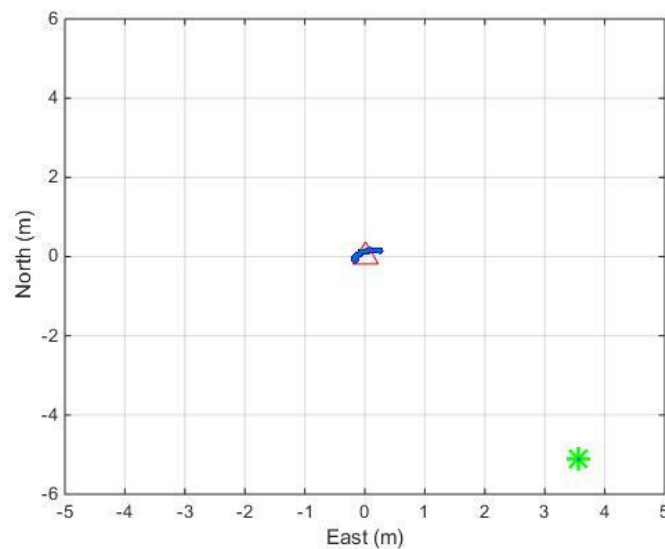
Dosažení do vztahů pro horizontální a vertikální chybu pro chybu pseudovzdálenosti + 12 m:

$$e_{vertical} = b_i \cdot s_{up,i} = 12 \cdot 1,01 = 12,12 \text{ m}$$

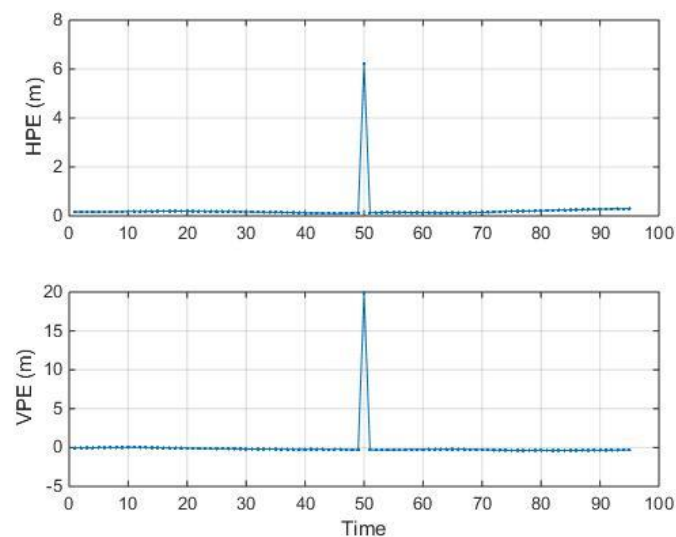
$$e_{horizontal} = b_i \cdot \sqrt{s_{east,i}^2 + s_{north,i}^2} = 12 \cdot \sqrt{0,1815^2 + (-0,2606)^2} = 3,81 \text{ m}$$

Skutečná hodnota HPE tedy v tomto případě vyšla 3,72 metru, vypočítaná 3,81 metru, tedy odchylka modelu v tomto případě pro chybu v horizontální rovině je 0,09 metru. Skutečná hodnota VPE je 11,92 metru, vypočítaná 12,12 metru, tedy odchylka modelu od skutečné vertikální chyby je 0,2 metru.

Chyba v pseudovzdálenosti + 20 m (SVN 2)



Obr. 59. Polohové body při simulaci chyby satelitu 2 o velikosti 20 m; zdroj: vlastní



Obr. 60. Chyba v horizontální rovině HPE a ve vertikálním směru VPE při simulaci chyby satelitu 2 o velikosti 20 m; zdroj: vlastní

Skutečné hodnoty chyb v horizontální rovině a ve vertikálním směru v případě chyby pseudovzdálenosti o velikosti 20 m jsou následující:

$$VPE = 19,91 \text{ m}$$

$$HPE = 6,23 \text{ m}$$

Dosazení do vztahů pro horizontální a vertikální chybu pro chybu pseudovzdálenosti + 20 m:

$$e_{vertical} = b_i \cdot s_{up,i} = 20 \cdot 1,01 = 20,2 \text{ m}$$

$$e_{horizontal} = b_i \cdot \sqrt{s_{east,i}^2 + s_{north,i}^2} = 20 \cdot \sqrt{0,1815^2 + (-0,2606)^2} = 6,35 \text{ m}$$

Skutečná hodnota HPE tedy v tomto případě vyšla 6,23 metrů, vypočítaná 6,35 metru, tedy odchylka modelu v tomto případě pro chybu v horizontální rovině je 0,12 metru. Skutečná hodnota VPE je 19,91 metrů, vypočítaná 20,2 metrů, tedy odchylka modelu od skutečné vertikální chyby je 0,29 metrů. Všechny výsledky jsou přehledně shrnuty v následujících tabulkách.

Tab. 3. Shrnutí výsledků ověření simulací pomocí matematického modelu pro chybu v horizontální rovině

Chyba pseudovzdálenosti [m]	HPE [m]	Horizontální chyba vypočítaná pomocí matematického modelu [m]	Odchylka modelu [m]
+3	0,89	0,95	0,06
+5	1,51	1,58	0,07
+12	3,72	3,81	0,09
+20	6,23	6,35	0,12

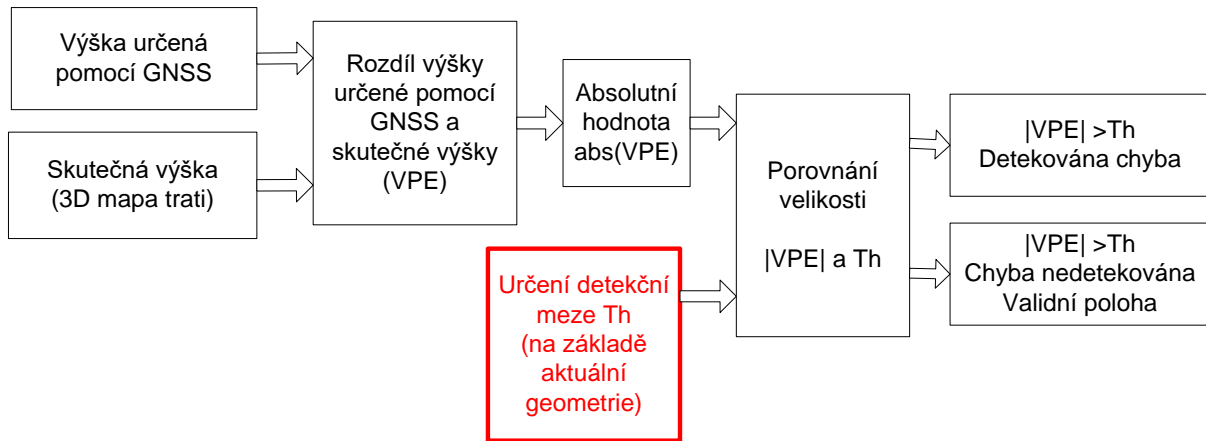
Tab. 4. Shrnutí výsledků ověření simulací pomocí matematického modelu pro chybu ve vertikálním směru

Chyba pseudovzdálenosti [m]	VPE [m]	Vertikální chyba vypočítaná pomocí matematického modelu [m]	Odchylka modelu [m]
+3	2,93	3,03	0,1
+5	4,92	5,05	0,13
+12	11,92	12,12	0,2
+20	19,91	20,2	0,29

Z výsledků vyplývá, že matematický model dobře pokrývá vztah mezi chybou v pseudovzdálenosti a výslednými chybami v poloze. Odchylka modelu lineárně stoupá s velikostí chyby, nejmenší odchylka byla při chybě 3 metry a největší při chybě 20 metrů.

6.5. Popis navržené metody

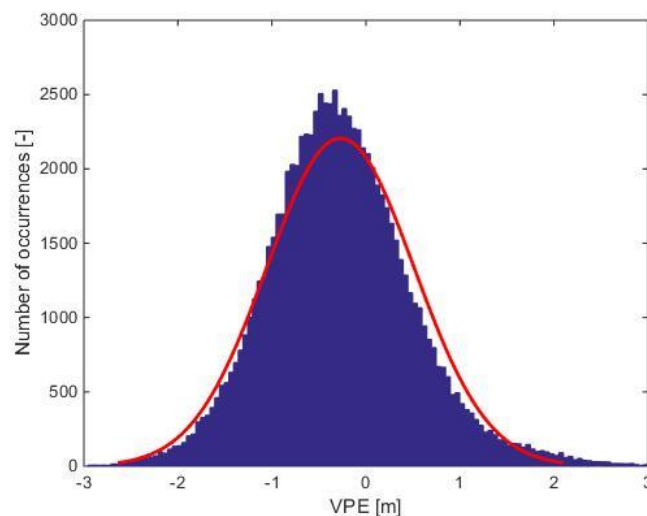
Navržená detekční metoda využívá vztahu mezi chybou určené polohy v horizontální rovině a vertikálním směru. Tento vztah byl nejprve zkoumán pomocí simulací chyb v pseudovzdálenostech. Potom byl odvozen matematický popis (matematický model). Pomocí určeného matematického modelu byly simulace ověřeny. Podrobné schéma navržené metody je na Obr. 61.



Obr. 61. Podrobné schéma navržené detekční metody; zdroj: vlastní

Jako testační statistika je použita absolutní hodnota chyby ve výšce $|VPE|$. Pro účely této disertační práce je uvažována výška jako známá konstantní hodnota, jak již bylo zmíněno. V části 6.3 bylo odvozeno, že chyba ve vertikální rovině (ve výšce), má v případě chyby v jedné pseudovzdálenosti (b_i) velikost $e_{vertical} = b_i \cdot s_{up,i}$ a v případě chyby ve více pseudovzdálenostech ($\sum_{i=1}^N b_i$) velikost $e_{vertical} = \sum_{i=1}^N b_i \cdot s_{up,i}$. Nejprve je porovnávána výška určená pomocí GNSS se skutečnou. Z chyby ve výšce je následně vytvořena absolutní hodnota, která je poté porovnávána s detekční mezí. Stěžejní částí metody, je určování detekční meze, to je popsáno v samostatné části 6.7. Detekční mez je určována na základě aktuální geometrie.

Statistické parametry



Obr. 62. Histogram výšky, vygenerovaný z reálných naměřených dat, proložený křivkou normálního (Gaussova) rozdělení; zdroj: vlastní

Rozdělení výšky je ve stavu *bez závady* (fault-free) normální, jak je vidět v grafu na Obr. 62. V tomto grafu je zobrazen histogram chyby ve výšce naměřené GNSS přijímačem PolaRx3. Histogram byl proložen Gaussovou křivkou.

Určitou nevýhodou metody založené na aktuální chybě ve výšce je situace, která by nastala v případě, že se objeví více chyb v pseudovzdálostech najednou a zároveň to budou zrovna takové chyby, jejichž účinky ve výšce se vzájemně odečtou. Tedy výsledná chyba ve výšce bude nulová. Pravděpodobnost takové situace je ale velmi malá.

Rozdělení pravděpodobností detekovaných chyb

Chyby mohou nastávat z různých příčin. Nejpravděpodobnější v železničním prostředí jsou chyby vzniklé v důsledku lokálních efektů v okolí přijímače (vícecestné šíření). Příčinou je pohyb přijímače po zemském povrch (na rozdíl od letectví), což je prostředí obsahující mnoho různých překážek. Šíření signálu může být v tomto prostředí ovlivněno budovami, stromy, atp. Rozdělení chyby způsobené lokálními efekty v současné době není přesně známé. Proto budou pro účely této práce použita dvě rozdělení pravděpodobností a výsledky budou porovnány. Bude použito normální rozdělení, tedy rozdělení chyby ve výšce (testační statistika) ve stavu *bez závady* (fault-free) a generalizované Paretovo rozdělení a výsledky budou porovnány. Generalizované Paretovo rozdělení bylo určeno experimentálně jako rozdělení dobře pokrývající chyby způsobené lokálními efekty v práci zabývající se analýzou statistických vlastností chyb způsobených vícecestným šířením (multipath) [49].

6.6. Určení detekční meze

Chyba ve vertikální rovině má ve stavu *bez závady* (fault-free) normální rozdělení s nulovou střední hodnotou, jak je vidět na Obr. 62. Zatímco ve stavu *se závadou* (faulty) má normální rozdělení s nenulovou střední hodnotou μ (non-centrality parametr μ).

Algoritmus detekce je navržen podle upravené verze metody RAIM. Klasický RAIM poskytuje HPL (Horizontal Protection Limit), který v rámci daných pravděpodobností $P_{MD} = \text{konst.}$ a $P_{FA} = \text{konst.}$ ohraničuje chybu v horizontální rovině. Upravená verze metody RAIM, pokládá $\text{HPL} = \text{HAL} = \text{konst.}$ P_{MD} je konstantní zvolená a další parametry se počítají v reálném čase [42]. Parametry Th , μ , P_{FA} jsou závislé na aktuální *směrnici* (tedy závisí na aktuální geometrii satelity – uživatel). Jako testační statistika je použita absolutní hodnota chyby ve výšce $|VPE|$.

Pro konkrétní použití je potřeba zvážit a zvolit kompromis mezi požadovanou hodnotou HAL a požadovanou velikostí P_{FA} , při zvolené P_{MD} , nebo naopak požadované P_{MD} , při zvolené P_{FA} .

Navržený detekční proces:

- 1) Nejprve je určen parametr slope_{MAX} (*maximální směrnice*) obdobně jako v případě metody RAIM, jak je zachyceno na Obr. 19 slope_{MAX} se počítá podle následujícího vzorce

$$\text{slope}_{MAX} = \max_{i=1 \dots N} \left(\frac{\sqrt{s_{east,i}^2 + s_{north,i}^2}}{s_{up,i}} \right), \quad (68)$$

kde N je počet satelitů. Satelit, kterému náleží *maximální směrnice* (slope_{MAX}), by v případě chyby pseudovzdálenosti způsobil největší chybu v horizontální rovině. Podle *maximální směrnice* a nastavené hodnoty HAL je určena mez detekce. Konkrétně je nejprve určena střední hodnota a potom mez detekce podle daného rozdělení.

- 2) Zjištění minimální detekovatelné chyby μ_{det} (minimum detectable non-centrality parametr) podle vztahu

$$\mu_{det} = \frac{HAL}{slope_{MAX}}, \quad (69)$$

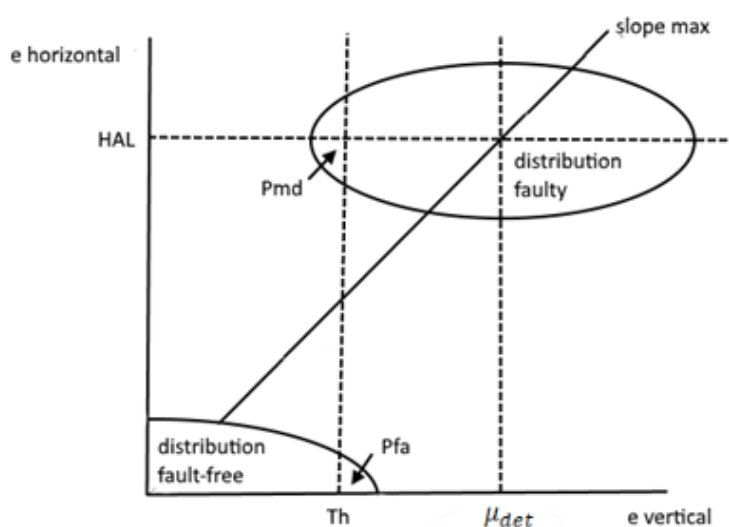
kde μ_{det} je střední hodnota rozdělení testační statistiky v případě *se závadou* (faulty).

- 3) Výpočet detekční meze: Th se spočítá na základě následujícího vztahu pro zvolenou P_{MD} (např. $P_{MD} = 10^{-3}$)

$$Th = CDF_{N, \mu_{det}}^{-1} \{P_{MD}\} \quad (70)$$

- 4) Detekční mez Th se porovná s aktuální hodnotou VPE:
- $VPE < Th$ - validní poloha, chyba nedetekována
 - $VPE > Th$ - detekována chyba

Vztah mezi P_{MD} , P_{FA} , μ_{det} a Th vyjádřený graficky:

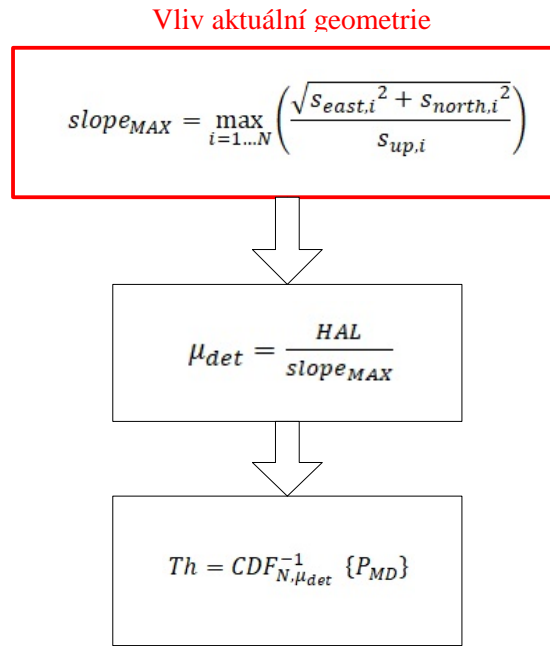


Obr. 63. Grafické znázornění parametrů metody; zdroj: vlastní

Elipsy v Obr. 63. Představují schematicky rozdělení pravděpodobnost. Elipsa se středem v počátku souřadnicového systému, představuje rozdělení v případě *bez závady* (fault-free) a elipsa se souřadnicemi středu $[\mu_{det}, HAL]$ představuje rozdělení v případě *se závadou* (faulty). Obě rozdělení rozdělují kolmice z bodu Th (detekční mez) na dvě poloviny. Plocha ohraničená elipsou rozdělení *se závadou* (faulty) nalevo od Th představuje oblast pravděpodobnosti selhání detekce P_{MD} . Oblast ohraničená elipsou *se závadou* (faulty) napravo od Th představuje oblast pravděpodobnosti falešného alarmu P_{FA} .

Vliv aktuální geometrie je vyjádřen aktuální *maximální směrnicí* ($slope_{MAX}$), počítané v reálném čase. Vlivem její změny se rozdělení v případě *se závadou* (faulty) posouvá ve směru osy vertikální chyby. Když je nastaveno konstantní P_{MD} posouvá se tím i detekční mez Th a mění se P_{FA} . Pokud je nastaveno konstantní P_{FA} , pak se s pohybem v případě *se závadou* (faulty), mění P_{MD} .

Určení detekční meze blokově:



Obr. 64. Blokové schéma postupu určení detekční meze; zdroj: vlastní

6.7. Zhodnocení výkonnosti detektoru

V této části jsou rozebrány možnosti vyhodnocování výkonnosti detektoru a uvádí matematické vztahy, ze kterých vycházejí pravděpodobnosti selhání detekce P_{MD} a falešného alarmu P_{FA} . Poté je zmíněna možnost jejich přepočtu do ukazatelů v čase za pomoci teorie bezporuchovosti.

Ukazatele kvality metody

Jako ukazatel výkonnosti detektoru slouží pravděpodobnost selhání detekce P_{MD} a pravděpodobnost falešného alarmu P_{FA} . Jeden z ukazatelů je nastaven na požadovanou hodnotu a je konstantní a druhý je určován v reálním čase. Buďto je tedy předem zvolená požadovaná P_{MD} a aktuální P_{FA} je určována v reálném čase, nebo naopak je předem určená P_{FA} a aktuální P_{MD} je dopočítávána v reálném čase. Dále je možné z P_{FA} počítat pravděpodobnost validní polohy ($P_{valid} = 1 - P_{FA}$). Pravděpodobnost P_{valid} se dá interpretovat jako pravděpodobnost toho, že určená poloha je v pořádku – tedy vlastně pravděpodobnost stavu NO (Normal Operation). Jsou tedy následující dvě možnosti:

- $P_{MD} = \text{konst.}$, aktuální $P_{FA}(P_{valid})$ je určována v reálném čase
- $P_{FA}(P_{valid}) = \text{konst.}$, aktuální P_{MD} je určována v reálném čase

P_{MD} a P_{FA} jsou popsány následujícími vztahy

$$P_{MD} = CDF_{N, \lambda_{det}} \{Th\}, \quad (71)$$

$$P_{FA} = 1 - CDF_N \{Th\}, \quad (72)$$

$$P_{valid} = 1 - P_{FA} = CDF_N \{Th\}. \quad (73)$$

Poruchovost (F) je ekvivalentní falešnému alarmu, tedy $F \cong P_{FA}$. Základní vztah pro výpočet bezporuchovosti (R) je:

$$R = e^{-\lambda t}, \quad (74)$$

kde, pokud se jedná o systémovou jednotku (tzn. systém se neskládá z více částí, z nichž každá má svoje vlastní poruchové charakteristiky), pak platí

$$\lambda = \frac{1}{MTTF}, \quad (75)$$

$$F = 1 - R = 1 - e^{-\lambda t}. \quad (76)$$

kde λ je četnost poruch

Pomocí uvedených rovnic je možné vypočítat MTTF. Dále jsou uvedeny příklady dosazení konkrétních hodnot do algoritmu detekce, počítané na reálných datech. Výpočty jsou provedeny pro normální (Gaussovo) a Paretovo rozdělení a následně jsou výsledky porovnány.

Příklad detekce na reálných GNSS datech

V této části budou uvedeny ukázky detekce na reálných datech. Chyba byla simulována v pseudovzdálenosti satelitu číslo 8. Velikost chyby byla nastavena nejprve 5, pak 10 a nakonec 15 metrů. Následně byly vypočítány detekční meze pro Normální (Gaussovo) a Paretovo rozdělení pravděpodobností. Výsledky jsou ukázány v následujících grafech. Jsou použita data NSTB z 1. 4. 2019.

Výpočet detekční meze

Požadovaná pravděpodobnost selhání P_{MD} byla nastavena na $P_{MD} = 10^{-3}$. Požadovaná velikost detekované chyby v horizontální rovině byla nastavena na $HAL = 20$ metrů. Hodnota *maximální směrnice* vychází pro použitá data následovně $slope_{MAX} = 1.9399$. Minimální detekovatelná chyba je potom:

$$\mu_{det} = \frac{HAL}{slope_{MAX}} = \frac{20}{1,9399} = 10,31$$

Směrodatná odchylka výšky z kovarianční matice $cov = (G^T \cdot W \cdot G)^{-1}$ vychází:

$$\sigma_{up} = \sqrt{cov(3,3)} = 1,8614$$

Normální (Gaussovo) rozdělení pravděpodobnosti

Detekční mez Th_N se spočítá za pomoci normálního rozdělení v případě *se závadou* (faulty) podle vztahu:

$$Th_N = norminv(P_{MD}, \mu_{det}, \sigma_{up})$$

Po dosazení dostaneme:

$$Th_N = norminv(0,001, 10.31, 1.8614) = 4,5574$$

Hodnotu pravděpodobnosti falešného alarmu P_{FA} je možné vypočítat za pomoci normálního rozdělení pravděpodobnosti v případě *bez závady* (fault-free) podle vztahu:

$$P_{FA} = normpdf(Th_N, 0, \sigma_{up})$$

Po dosazení číselných hodnot dostáváme:

$$P_{FA} = normpdf(4,557; 0; 1.8614) = 0,0107$$

Generalizované Paretovo rozdělení

Detekční mez Th_P se spočítá za pomoci generalizovaného Paretova rozdělení v případě *se závadou* (faulty) podle vztahu:

$$Th_P = gpinv(P_{MD}, 0, \mu_{det}, \sigma_{up})$$

Po dosazení dostáváme:

$$Th_P = gpinv(0,001,0, 10,31,1,8614) = 10,3115$$

Hodnotu pravděpodobnosti falešného alarmu P_{FA} je možné vyjádřit za pomoci generalizovaného Paretova rozdělení pravděpodobnosti v případě *bez závady* (fault-free) podle vztahu:

$$P_{FA} = gppdf(Th_P; 0; \sigma_{up}; 0)$$

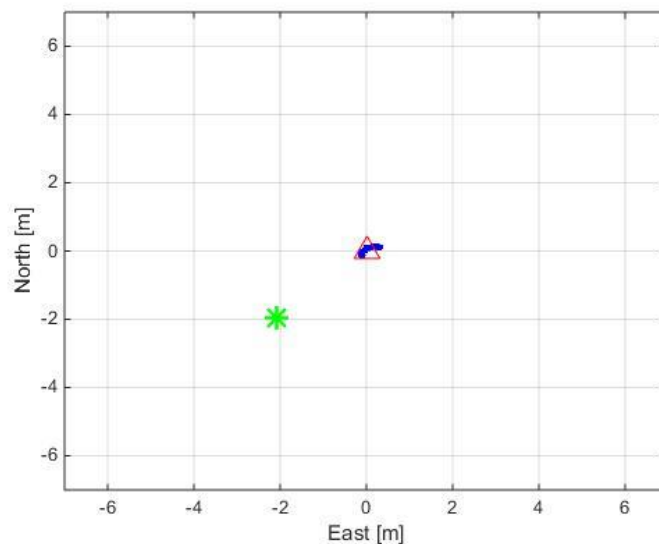
Po dosazení konkrétních číselných hodnot dostáváme:

$$P_{FA} = gppdf(10,3115; 0; 1,8614; 0) = 0,0021$$

Detekční meze tedy vycházejí při použití normálního rozdělení $Th_N = 4,5574$, případně hodnota pravděpodobnosti falešného alarmu vychází $P_{FA} = 0,0107$ a při použití generalizovaného Paretova rozdělení $Th_P = 10,3115$. Hodnota falešného alarmu $P_{FA} = 0,0021$. Z porovnání tedy vyplývá, že v tomto konkrétním případě vychází nižší hodnota meze pro normální (Gaussovo) rozdělení nižší než hodnota určená při uvažování generalizovaného Paretova rozdělení. Naproti tomu pravděpodobnost falešného alarmu vychází nižší v případě generalizovaného Paretova rozdělení. Následně jsou uvedeny grafy zobrazující použití určených detekčních mezí na reálných datech.

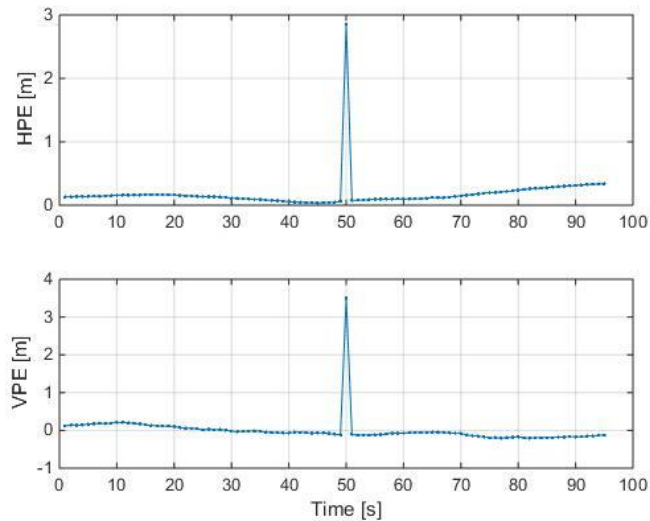
Chyba pseudovzdálenosti + 5 metrů (SVN 8)

Následující grafy ukazují případ simulace chyby 5 metrů v pseudovzdálenosti satelitu SVN 8. V grafu polohových bodů je vidět vychýlení polohy v čase, kdy byla injektována chyba. Tento bod je zvýrazněn zelenou hvězdičkou.

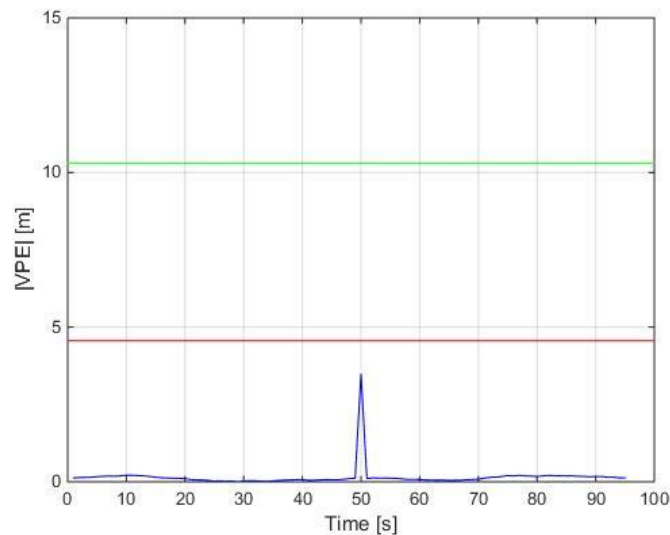


Obr. 65. Polohové body při simulaci chyby satelitu 8 o velikosti 5 metrů; zdroj: vlastní

Graf na Obr. 65 ukazuje pro porovnání velikosti chyb v horizontální rovině a ve vertikálním směru (HPE, VPE). HPE je v tomto případě 2,85 metrů, VPE je 3,50 metrů.



Obr. 66. Chyba v horizontální rovině HPE a ve vertikálním směru VPE při simulaci chyby satelitu SVN 8 o velikosti 5 metrů; zdroj: vlastní

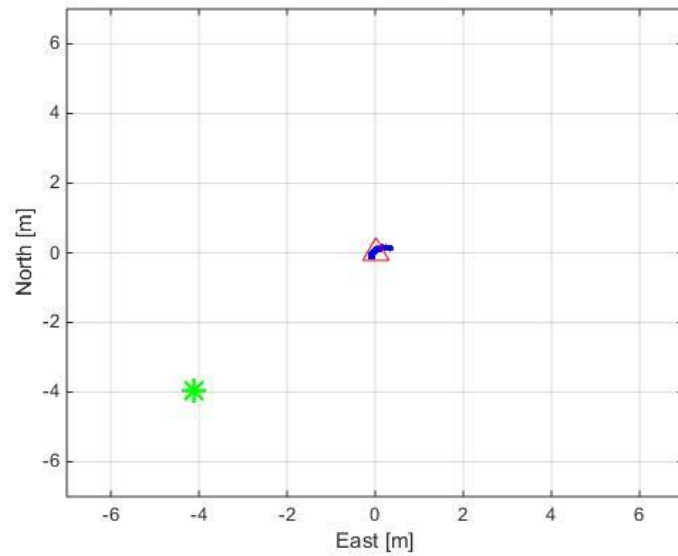


Obr. 67. Absolutní hodnota chyby ve vertikálním směru $|VPE|$, a detekční meze (červená – normální rozdělení, zelená – generalizované Pareto rozdělení) při simulaci chyby satelitu SVN 8 o velikosti 5 metrů; zdroj: vlastní

V grafu na Obr. 67 je absolutní chyba ve vertikální rovině $|VPE|$, tedy absolutní hodnota chyby ve výšce. $|VPE|$ je v navržené metodě použita jako testační statistika. V grafu jsou barevnými přímkami vyznačeny obě vypočítané detekční meze. Červenou barvou je označena mez vypočítaná při použití normálního rozdělení. Její velikost je 4,5574. Zelenou barvou je označena mez určená při použití generalizovaného Paretova rozdělení pravděpodobnosti. Její velikost je 10,3115. V grafu je vidět, že pro velikost chyby pseudovzdálenosti 5 metrů satelitu SVN 8 je velikost $|VPE|$ menší než obě meze. Tudíž by nedošlo k detekci ani v jednom případě a systém by byl ve stavu NO (Normal Operation)

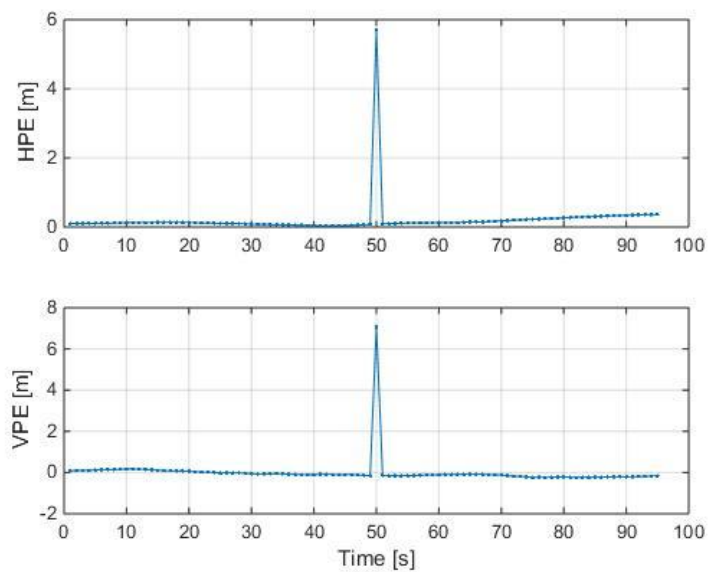
Chyba pseudovzdálenosti + 10 metrů (SVN 8)

Následně jsou uvedeny grafy pro případ simulace chyby 10 metrů v pseudovzdálenosti satelitu SVN 8. V grafu polohových bodů na Obr. 68 je vidět vychýlení polohy v čase, kdy byla simulována chyba (zelená hvězdička).

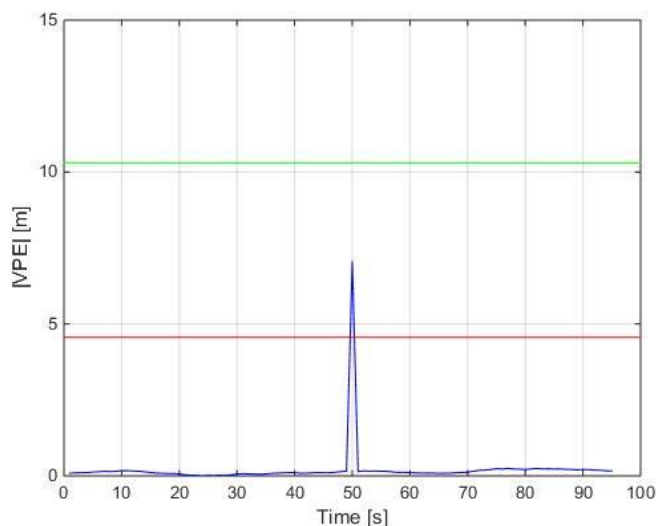


Obr. 68. Polohové body při simulaci chyby satelitu 8 o velikosti 10 m; zdroj: vlastní

Graf na obr 69 ukazuje pro porovnání velikosti chyb v horizontální rovině a ve vertikálním směru (HPE, VPE). HPE je v tomto případě 5, 71 metrů, VPE je 7,07 metrů.



Obr. 69. Chyba v horizontální rovině HPE a ve vertikálním směru VPE při simulaci chyby satelitu SVN 8 o velikosti 10 m; zdroj: vlastní

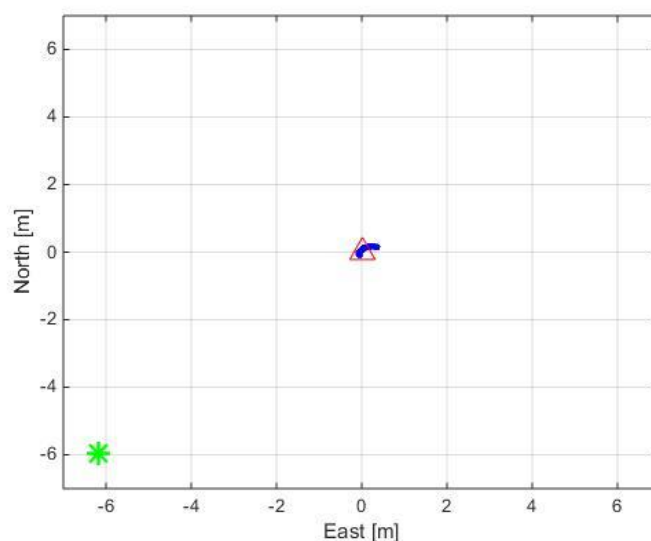


Obr. 70. Absolutní hodnota chyby ve vertikálním směru $|VPE|$, a detekční meze (červená – normální rozdělení, zelená – generalizované Pareto rozdělení) při simulaci chyby satelitu 8 o velikosti 10 m; zdroj: vlastní

Graf na Obr. 70 zobrazuje absolutní hodnotu chyby ve vertikální rovině $|VPE|$ (testační statistiku) a detekčními meze. Z grafu je zřejmé, že pro velikost chyby pseudovzdálenosti 10 metrů je velikost $|VPE|$ větší než mez uvažující normální rozdělení a menší než mez určená pomocí Paretova rozdělení. Tudíž v tomto případě by došlo k detekci při použití normálního rozdělení, naproti tomu v případě použití generalizovaného Paretova rozdělení by k detekci nedošlo. Tedy v případě použití normálního rozdělení by nastal stav NO (Normal Operation) a v případě Paretova rozdělení stav TA – True Alarm.

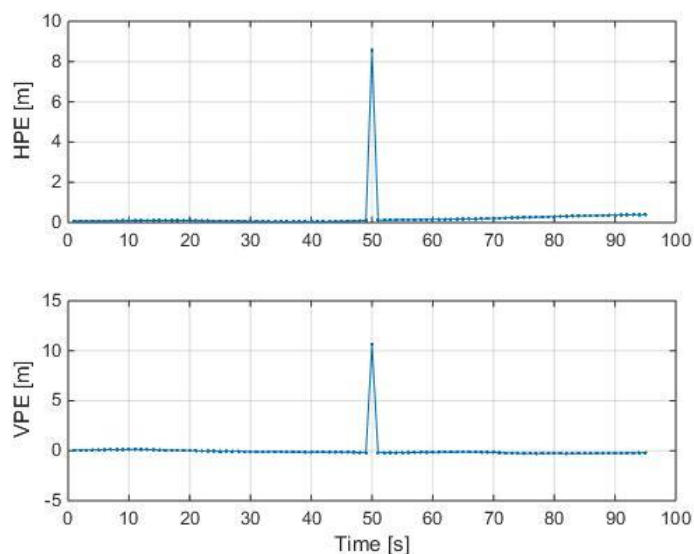
Chyba pseudovzdálenosti + 15 metrů (SVN 8)

Následně jsou uvedeny grafy pro chybu 15 metrů v pseudovzdálenosti satelitu SVN 8. V grafu polohových bodů na Obr. 71 je vidět vychýlení polohy v čase, kdy byla simulována chyba 15 metrů v pseudovzdálenosti satelitu SVN 8.



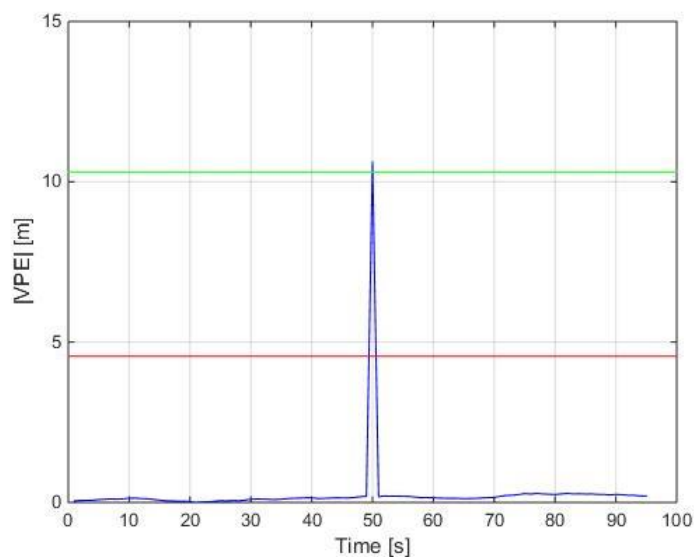
Obr. 71. Polohové body při simulaci chyby satelitu SVN 8 o velikosti 15 m; zdroj: vlastní

Graf na Obr. 72 ukazuje pro porovnání velikosti chyb v horizontální rovině (HPE) a ve vertikálním směru (VPE). HPE je v tomto případě 8,57 metrů, VPE je 10,64 metrů



Obr. 72. Chyba v horizontální rovině HPE a ve vertikálním směru VPE při simulaci chyby satelitu 8 o velikosti 15 m; zdroj: vlastní

Testační statistika $|VPE|$ spolu s určenými detekčními mezemi je v grafu na Obr. 73. Z grafu vyplývá, že pro velikost chyby pseudovzdálenosti 15 metrů je velikost $|VPE|$ větší než obě meze, tudíž by došlo k detekci v obou případech, při uvažování normálního i generalizovaného Paretova rozdělení. Tedy by nastal stav stav TA – True Alarm při použití obou rozdělení pravděpodobnosti.



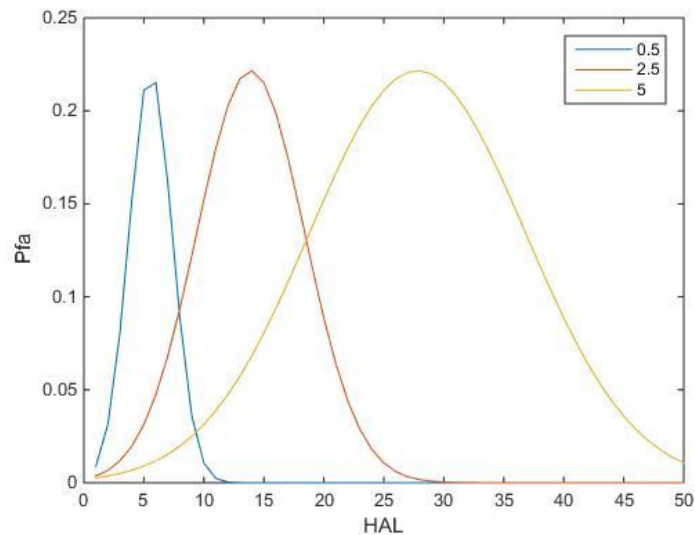
Obr. 73. Absolutní hodnota chyby ve vertikálním směru $|VPE|$, a detekční meze (červená – normální rozdělení, zelená – generalizované Pareto rozdělení) při simulaci chyby satelitu 8 o velikosti 15 m; zdroj: vlastní

Charakteristika vlastností metody

Tato část obsahuje zhodnocení vlastností metody v případě použití normálního a generalizovaného Paretova rozdělení. Jsou zkoumány závislosti mezi HAL a P_{FA} pro různé hodnoty *maximální směrnice* ($slope_{MAX}$). Aktuální hodnota *maximální směrnice* vyjadřuje vliv aktuální geometrie. Čím horší geometrie, tím vyšší hodnotu *maximální směrnice* má. Bylo použito nejprve normální rozdělení pravděpodobnosti a potom generalizované Pareto rozdělení, které se používá mj. k modelování extrémních hodnot. Dále byla vynesena závislost mezi *maximální směrnici* ($slope_{MAX}$) a P_{FA} pro různé hodnoty HAL.

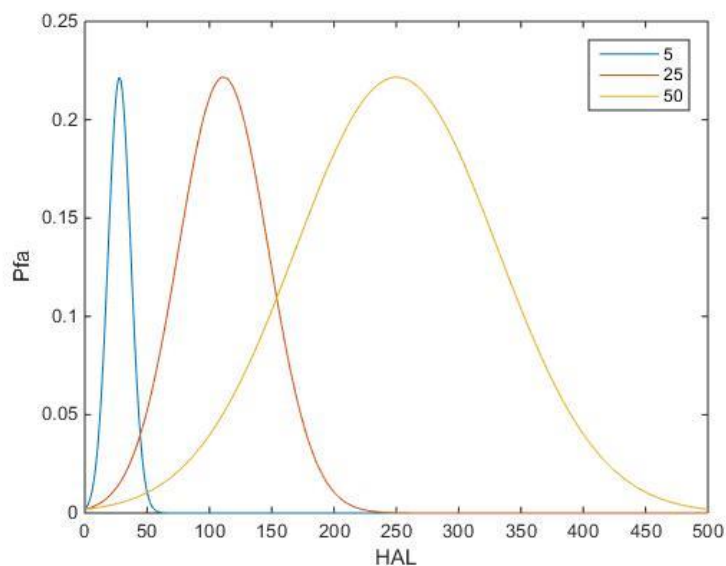
6.7.1 Normální rozdělení

V prvním grafu na Obr. 74 jsou vyneseny tři křivky pro hodnoty *maximální směrnice* 0,5, 2,5 a 5. V grafu je vidět, že průběhy mají tvar Gaussových křivek s různou šířkou. Čím vyšší hodnota *maximální směrnice*, tím širší Gaussova křivka.



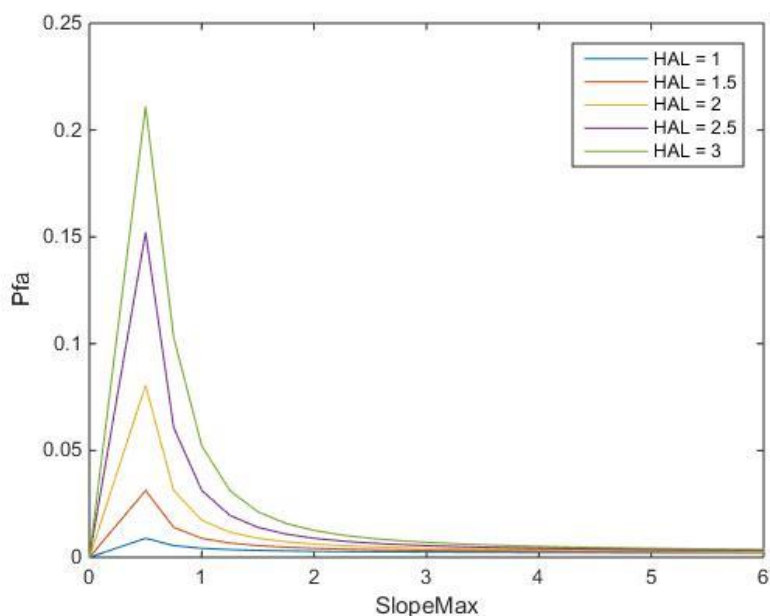
Obr. 74. Závislost pravděpodobnosti falešného alarmu na P_{FA} na HAL pro hodnoty *maximální směrnice* ($slope_{MAX}$) = 0,5;2,5 a 5 (normální rozdělení) zdroj: vlastní

V grafu na Obr. 75 jsou vyneseny další tři křivky, tentokrát pro hodnoty *maximální směrnice* 5, 25 a 50. Z grafu vyplývá, že průběh křivek je stejný jako v předcházejícím případě. Změnil se jen rozsah horizontální osy, pro větší hodnoty *maximální směrnice* se zvětšila šířka Gaussových křivek, např. pro hodnotu *maximální směrnice* = 50 se křivka vrací zpět k horizontální ose až pro HAL o velikosti cca 500.



Obr. 75. Závislost pravděpodobnosti falešného alarmu na P_{FA} na HAL pro hodnoty *maximální směrnice* ($slope_{MAX}$) = 5; 25 a 50 (normální rozdělení) zdroj: vlastní

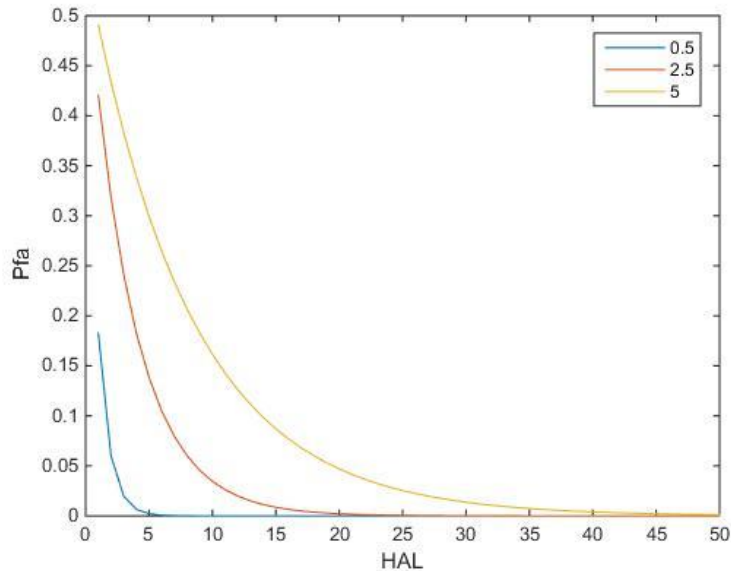
Z grafu je vidět, že čím je větší hodnota *maximální směrnice*, tím širší je Gaussova křivka. Tedy P_{FA} klesá zpět k nižším hodnotám až při výrazně vyšší hodnotě HAL, např. křivka pro HAL = 50 se vrací k nule až pro hodnoty kolem HAL = 500. Graf na Obr. 76. zobrazuje závislost mezi *maximální směrnici* a P_{FA} pro různé hodnoty HAL. V grafu je vidět, že křivky nejprve stoupají do maxima a následně se stoupající hodnotou *maximální směrnice* klesají zpět k horizontální ose.



Obr. 76. Závislost pravděpodobnosti falešného alarmu na *maximální směrnici* ($slope_{MAX}$) pro hodnoty HAL = 1 - 3 (normální rozdělení) zdroj: vlastní

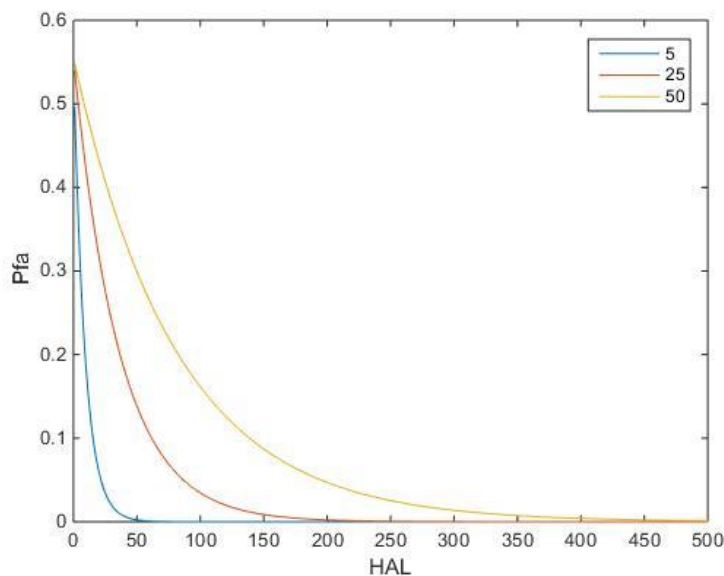
6.7.2 Generalizované Pareto rozdělení

V prvním grafu na Obr. 77 jsou vyneseny tři křivky pro hodnoty *maximální směrnice* 0.5, 2.5 a 5. V grafu je vidět, že hodnota P_{FA} vždy klesá k vyšším hodnotám HAL. Čím větší je *maximální směrnice*, tím je pokles pozvolnější.



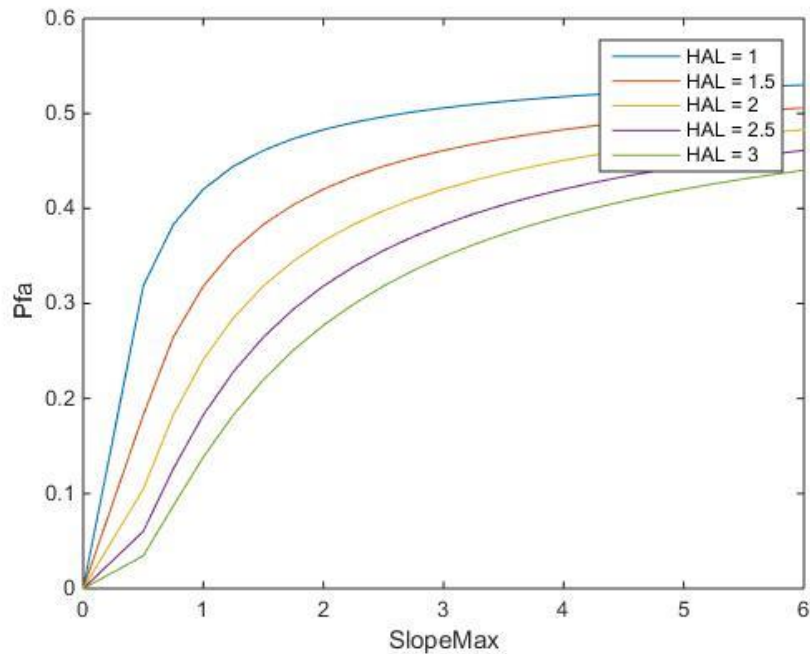
Obr. 77. Závislost pravděpodobnosti falešného alarmu na P_{FA} na HAL pro hodnoty *maximální směrnice* ($slope_{MAX}$) = 0,5;2,5 a 5 (generalizované Pareto rozdělení) zdroj: vlastní

V grafu na Obr. 78 jsou vyneseny další tři křivky, tentokrát pro hodnoty *maximální směrnice* 5, 25 a 50. V grafu je vidět, že průběh křivek je stejný jako v předchozím případě. Jen se zvětšil rozsah horizontální osy. Například křivka pro hodnotu *maximální směrnice* = 50 se blíží k horizontální ose až pro hodnoty cca HAL = 400.



Obr. 78. Závislost pravděpodobnosti falešného alarmu na P_{FA} na HAL pro hodnoty *maximální směrnice* ($slope_{MAX}$) = 0,5;25 a 50 (generalizované Pareto rozdělení) zdroj: vlastní

V grafu na Obr. 79. byla vynesena závislost mezi *maximální směrnici* ($slope_{MAX}$) a P_{FA} pro různé hodnoty HAL. V grafu je vidět že křivky se zvyšujícím se *maximální směrnici* ($slope_{MAX}$) plynule narůstají. Čím vyšší je hodnota HAL, tím pomalejší je nárůst.



Obr. 79. Závislost pravděpodobnosti falešného alarmu na *maximální směrnici* ($slope_{MAX}$) pro hodnoty HAL = 1 - 3 (generalizované Paretovo rozdělení) zdroj: vlastní

Zhodnocení vlastností metody

Porovnání výsledků pro normální a generalizované Paretovo rozdělení.

Z porovnání grafů na Obr. 76 a 79. vyplývá, že v případě normálního rozdělení (Obr. 76) vycházejí hodnoty P_{FA} vyšší v oblasti nižších hodnot *maximální směrnice* ($slope_{MAX}$). To indikují maxima křivek v levé části grafu. Dále křivky postupně klesají se zvyšující se hodnotou *maximální směrnice*. Proto v běžné situaci, v případě dobré geometrie (kdy bude hodnota *maximální směrnice* nižší) budou vycházet hodnoty P_{FA} vyšší. Naopak jestliže dojde ke zhoršení geometrie, tak následkem toho se zvýší *maximální směrnice*, a nižší budou hodnoty P_{FA} . Spolu se zvyšující se hodnotou HAL se zvyšuje i velikost maxima. Tedy čím vyšší HAL, tím vyšší vychází P_{FA} za předpokladu dobré geometrie satelity - uživatel. V případě generalizovaného Paretova rozdělení je situace zobrazena v grafu na Obr. 79. Vyplývá z něj, že hodnoty P_{FA} plynule narůstají s narůstající *maximální směrnici* ($slope_{MAX}$). Čím vyšší je hodnota HAL, tím pozvolnější je nárůst. Typické hodnoty HAL, které mohou být použity pro železniční aplikace se dají předpokládat přibližně kolem HAL = 20 metrů. Při takové velikosti HAL a dobré geometrii (nižší *maximální směrnice*) budou tedy hodnoty P_{FA} spíše nižší a se zvyšující se hodnotou *maximální směrnice* ($slope_{MAX}$) budou plynule narůstat.

Z porovnání normálního a generalizovaného Paretova rozdělení tedy vychází, že v běžné situaci (kdy je *maximální směrnice* ($slope_{MAX}$) nižší – dobrá geometrie) a pro typickou hodnotu HAL kolem cca 20 metrů, se jeví jako výhodnější použití generalizovaného Paretova rozdělení, pro

kteří bude v tomto případě P_{FA} nižší. P_{FA} bude průběžně narůstat se zhoršující se geometrií, tedy se zvyšujícím se *maximální směrnici* ($slope_{MAX}$).

7. Závěr

Disertační práce se zabývala zkoumáním možností využití GNSS pro potřeby železničních, bezpečnostně relevantních systémů. Práce se dotýká hlavně tří teoretických oblastí, kterými jsou teorie satelitních navigačních systémů, teorie železničních zabezpečovacích systémů, teorie bezpečnosti a spolehlivosti. Praktická část se věnovala měření GNSS dat s EGNOS přijímačem Septentrio PolaRx3 a následnému zpracování dat pomocí programů Pagasus a Matlab. Měření byla prováděna po dobu několika let v Laboratoři inteligentních systémů (LIS) v Pardubicích. Použit byl přijímač Septentrio PolaRx3. Tento přijímač byl připojen k anténě GNSS s přesně zaměřenou polohou (± 3 cm), která se nacházela na střeše budovy. Chyba určení polohy se následně vyhodnocovala porovnáním skutečné polohy antény s naměřenou.

V další části práce se prováděly simulace chyb GNSS. V reálných naměřených GNSS datech byly měněny délky pseudovzdáleností, za účelem simulování lokálních chyb GNSS (odrazy signálu přicházejícího z GNSS družice od objektů v okolí přijímače). Na základě změněných dat byla následně pomocí programu Pegasus spočítána poloha a výsledky se porovnávaly s původním naměřeným datasetem. Byly prováděny simulace s rozličnými velikostmi zavedených chyb do pseudovzdáleností různých satelitů a s rozmanitou dobou trvání chyby.

Dle analýzy výsledků měření a výsledků provedených simulací byla navržena nová metoda, která může přispět ke zvýšení integrity určování polohy vlaku pomocí GNSS. Konkrétně metoda pro detekci chyb způsobených odrazy v okolí přijímače (lokální efekty). Metoda využívá závislosti mezi chybami v pseudovzdálenostech a chybami určené polohy v horizontální rovině a vertikálním směru. Konkrétně bylo navrženo použití známé chyby ve výšce k detekci chyby v horizontální rovině (je předpokládána znalost skutečné výšky přijímače - z 3D mapy tratě)

Dále byl na základě analýzy vztahů pro výpočet polohy metodou váhovaných nejmenších čtverců určen matematický model. Pro určenou polohu platí, že v závislosti na aktuální geometrii (uživatel – satelity) může být odhad polohy více citlivější na chyby v některých pseudovzdálenostech než v jiných. Chyba měření jednoho metru v daném satelitu může způsobit např. dvoumetrovou chybu polohy, zatímco stejná chyba měření u jiného satelitu způsobí např. pouze poloviční chybu v poloze. Stejně tak se tyto závislosti postupně mění v čase vzhledem k postupně se měnící geometrii satelity – uživatel. Právě tyto vzájemné vazby, popisuje projekční matice výpočtu polohy metodou nejmenších čtverců. Matice byla zvolena jako základ matematického modelu. Z ní byly následně odvozeny vztahy pro popis závislosti mezi chybami v pseudovzdálenostech a chybami v určené poloze (zvláště pro vertikální směr a horizontální polohu). Pomocí tohoto určeného matematického modelu, byly následně ověřeny výsledky provedených simulací.

Poté došlo k navržení techniky detekce. Jako testační statistika se používá absolutní hodnota chyby ve výšce. Detekční algoritmus vychází z techniky používané ke sledování integrity metodou RAIM. Navržená technika bere v potaz měnící se geometrii, která je zohledněna skrze parametr tzv. *maximální převodní směrnice chyb* zkráceně *maximální směrnice* ($slope_{MAX}$), ten se počítá z projekční matice a má následně vliv na určování detekční meze.

Protože rozdělení pravděpodobnosti chyb způsobených lokálními efekty není v současné době přesně známo, byla uvažována dvě rozdělení jednak normální (Gaussovo) rozdělení a také Generalizované Paretovo rozdělení. Z následné analýzy se jeví jako výhodnější generalizované Paretovo rozdělení, které vykazuje nižší hodnoty pravděpodobnosti falešného alarmu P_{FA} při dobré

geometrii satelity – uživatel (v oblasti nižších hodnot *maximální směrnice* ($slope_{MAX}$)). generalizované Paretovo rozdělení se často používá k modelování extrémních hodnot v různých oborech. Pro hodnocení výkonnosti metody v reálném čase je možné použít buďto pravděpodobnost selhání detekce P_{MD} nebo pravděpodobnost falešného alarmu P_{FA} podle zvolené varianty. Případně je možné vyjádřit pomocí P_{FA} pravděpodobnost validní polohy $P_{valid} = 1 - P_{FA}$.

Podle současných analýz bezpečnostních železničních požadavků a bezpečnostních vlastností stávajících satelitních navigačních systémů, je nutné pro splnění železničních požadavků kombinovat několik nezávislých detekčních technik. Navržená metoda by mohla být použita jako jedna z nich, a tím by přispěla ke zvýšení integrity určení polohy vozidel pomocí GNSS na železnici. To by mohlo pomoci ke splnění náročných požadavků dle železničních bezpečnostních norem.

8. Reference

- [1] Hrdina, Z., Panek, P., Vejrazka, F., *Radionavigation (GPS SYSTEM)*, Czech Technical University, Prague.
- [2] Blewitt, G., *Basics of the GPS Technique: Observation Equations*, Department of Geomatics, University of Newcastle, 2003.
- [3] LANGLEY, Richard B. Dilution of Precision. GPS World [online]. 1999, 52-59 [cit. 2016-07-05]. Dostupné z: <https://pdfs.semanticscholar.org/c04c/d3dc971734ebe2ba1aa113e417e8b28b248c.pdf>
- [4] Kučera J. *Historie a vývoj satelitních navigačních systémů* [online]. 2003. [cit. 2018-05-03]. Dostupné z: <https://www.fi.muni.cz/usr/jkucera/pv109/2003/xbouma.htm>
- [5] Novák J.A., *DARPA chce navigaci bez GPS* [online]. 2016. [cit. 2017-10-09]. Dostupné z: <http://www.droneweb.cz/aktuality/item/99-navigace-inercialni-drony-gps>
- [6] Český kosmický portál, *Americký družicový navigační systém NAVSTAR GPS* [online]. 2017. [cit. 2018-06-07]. Dostupné z: <http://www.czechspaceportal.cz/3-sekce/gnss-systemy/gnss-mimo-evropu/americky-navstar-gps/>
- [7] Wikipedie, *Global Positioning System* [online]. 2013. [cit. 2019-05-03]. Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/wiki/Global_Positioning_System
- [8] ESA Navipedia, *Galileo General Introduction* [online]. 2011. [cit. 2019-02-01]. Dostupné z: https://gssc.esa.int/navipedia/index.php/Galileo_General_Introduction
- [9] GSA, *Galileo is the European global satellite-based navigation system* [online]. 2019. [cit. 2019-06-03]. Dostupné z: <https://www.gsa.europa.eu/european-gnss/galileo/galileo-european-global-satellite-based-navigation-system>
- [10] Český kosmický portál, *GALILEO – Evropský globální navigační družicový systém* [online]. 2017. [cit. 2018-12-10]. Dostupné z: <http://www.czechspaceportal.cz/3-sekce/gnss-systemy/galileo/>
- [11] GSA, *EGNOS Open Service (OS), Service Definition Document*, [online]. 2017. [cit. 2018-02-01]. dostupné z: https://www.gsa.europa.eu/sites/default/files/brochure_os_2017_v6.pdf
- [12] Český kosmický portál, *EGNOS-Evropská „podpůrná“ geostacionární služba*, [online]. 2017. [cit. 2018-02-01]. dostupné z: <http://www.czechspaceportal.cz/3-sekce/gnss-systemy/egnoss/>
- [13] GSA, *EGNOS Safety of Life (SoL), Service Definition Document*, [online]. 2017. [cit. 2018-22-01]. Dostupné z: https://egnoss-user-support.essp-sas.eu/new_egnoss_ops/documents/egnoss-dd/egnoss-safety-life-service-dd
- [14] ICAO, *Global Navigation Satellite System (GNSS) Manual* [online]. 2005. [cit. 2017-28-08]. Dostupné z: http://www.icao.int/Meetings/PBN-Symposium/Documents/9849_cons_en%5B1%5D.pdf
- [15] Roturier, B., E. Chatre, J. Ventura-Traveset. *The SBAS Integrity Concept Standardised by ICAO. Application to EGNOS-ESA, EGNOS for Professionals Publications*, GNSS Conference, May 2001.
- [16] Wikipedie. *European Rail Traffic Management System* [online]. 2017. [cit. 2018-15-04]. Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/wiki/European_Rail_Traffic_Management_System
- [17] European Commission, *ERTMS - What is ERTMS?* [online]. 2016. [cit. 2018-25-09]. Dostupné z: https://ec.europa.eu/transport/modes/rail/ertms/what-is-ertms_en
- [18] Konopáč. T., *Systém ERTMS/ETCS, Manual* [online]. 2005. [cit. 2018-21-10]. Dostupné z: http://vrt.fd.cvut.cz/data/seminarky/2010zs/konopac_etcs-text.pdf

- [19] Filip A., Maixner V., Taufer J., Mocek H., Bažant L., *Využití satelitního navigačního systému Galileo na železnici*. Časopis Automa [online]. 2002. [cit. 2016-08-11]. Dostupné z: http://automa.cz/cz/casopis-clanky/vyuziti-satelitniho-navigacniho-systemu-galileo-na-zeleznici-2002_10_28576_994/
- [20] ESA, *Ecorail succesfull demonstration of EGNOS for railway control applications*, [online]. 2005. [cit. 2015-03-02]. Dostupné z: http://www.esa.int/Our_Activities/Navigation/ECORAIL_-_successful_demonstration_of_EGNOS_for_railway_control_applications
- [21] Wikipedia, *LOCOPROL* [online]. 2006. [cit. 2017-07-15]. Dostupné z: <https://en.wikipedia.org/wiki/LOCOPROL>
- [22] ESA, *LOCOLOC* [online]. 2004. [cit. 2017-27-11]. Dostupné z: http://www.esa.int/Our_Activities/Navigation/LOCOLOC
- [23] ESA, *INTEGRAIL – GNSS-1 Rail User Navigation Equipment* [online]. 2004. [cit. 2017-27-11]. Dostupné z: http://www.esa.int/Our_Activities/Navigation/INTEGRAIL_-_GNSS-1_Rail_User_Navigation_Equipment
- [24] Albanesse A., Marradi L., The RUNE project: the integrity performances of GNSS-based railway user navigation equipment, *ASME/IEEE Joint Rail Conference, Pueblo, CO, USA* [online]. 2005, [cit. 2018-18-12]. DOI:10.1109/RRCON.2005.186082. ISSN: 1559-9531. dostupné z: <https://ieeexplore.ieee.org/document/1460846>
- [25] GSA, *SATLOC: Sattellite based operation and management of local low tradic lines* [online]. 2012. [cit. 2018-07-15]. Dostupné z: <https://www.gsc-europa.eu/markets/rd/fp7-3rd-call-projects/satloc-satellite-based-operation-and-management-of-local-low>
- [26] ESA, *Space4Rail - 3INSAT*, [online]. 2015. [cit. 2018-09-28]. Dostupné z: <http://space4rail.esa.int/projects/3insat>
- [27] ESA, *3INSAT – Train Integrated Safety Sattellite System*, [online]. 2014. [cit. 2018-09-23]. Dostupné z: <https://business.esa.int/projects/3insat>
- [28] GSA, *STARS – Satellite Technology for Advanced Railway Signalling* [online]. 2019. [cit. 2019-05-15]. Dostupné z: <https://www.gsa.europa.eu/satellite-technology-advanced-railway-signalling>
- [29] GSA, *ERSAT – EAV – ERTMS on SATELLITE – Enabling application validation* [online]. 2018. [cit. 2019-01-08]. Dostupné z: <http://www.gsa.europa.eu/ertms-satellite-%E2%80%93-enabling-application-validation>
- [30] GSA, *RHINOS – Railway High Integrity Navigation Overlay System* [online]. 2018. [cit. 2019-03-03]. Dostupné z: <https://www.gsa.europa.eu/railway-high-integrity-navigation-overlay-system>
- [31] ESA, *CAPRESE Techniques Supporting Resilience for High Integrity Train Control Applications* [online]. 2018. [cit. 2019-04-13]. Dostupné z: <https://navisp.esa.int/project/details/45/show>
- [32] ESA, *STEMS - System suitability study for Train Positioning using GNSS in ERTMS in 2020* [online]. 2018. [cit. 2019-04-17]. Dostupné z: <https://navisp.esa.int/project/details/40/show>
- [33] GSA, *EGNSS for rail road map* [online]. 2018. [cit. 2019-04-17]. Dostupné z: <https://www.gsa.europa.eu/sites/default/files/rail-roadmap2018.pdf>
- [34] GSA, *ERSAT GGC* [online]. 2017. [cit. 2019-04-22]. Dostupné z: <http://www.ersat-ggc.eu/>
- [35] Hrdina, Z., Panek, P., Vejrazka, F., *Radionavigation (GPS SYSTEM)*, Czech Technical University, Prague.

- [36] Blewitt, G., *Basics of the GPS Technique: Observation Equations*, Department of Geomatics, University of Newcastle, 2003.
- [37] LANGLEY, Richard B. Dilution of Precision. GPS World [online]. 1999, 52-59 [cit. 2016-07-05]. Dostupné z: <https://pdfs.semanticscholar.org/c04c/d3dc971734ebe2ba1aa113e417e8b28b248c.pdf>
- [38] KUBANOVÁ, J., *Statistické metody pro ekonomickou a technickou praxi*. 2. vyd. Bratislava: Statis, 2004. ISBN 80-85659-37-9. Učebnice vysokých škol.
- [39] Filip A., *Přednášky z předmětu Spolehlivost a bezpečnost elektronických systémů*, 2016. Univerzita Pardubice
- [40] RTCA DO-229D – Minimum operational performance standards for GPS WAAS Airborne Equipment. RTCA, Inc., Washington, D.C., 2006.
- [41] ESA Navipedia, *RAIM Fundamentals* [online]. 2018. [cit. 2019-04-17]. Dostupné z: https://gssc.esa.int/navipedia/index.php/RAIM_Fundamentals
- [42] Salos, D., Martineau, A., Macabiau, Ch., Bonhoure, B., Kubrak, D., Receiver Autonomous Monitoring of GNSS Signals for Electronic Toll Collection. In: IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems [online]. IEEE, 2014, s. 94 - 103 [cit. 2018-09-16]. DOI: 10.1109/TITS.2013.2273829. Dostupné z: <https://ieeexplore.ieee.org/document/6578581>
- [43] Filip, A., Rispoli, F.: Safety Concept of SIL 4 compliant GNSS Based Train Location System for ETCS Level 2. ENC-GNSS 2014 conference, Rotterdam 15-17 April 2014. Manuscript.
- [44] ETCS/ERTMS – Class 1, ETCS Application Levels 1 & 2 – Safety Analysis, Part 3 – THR Apportionment. SUBSET-088 Part 3, ISSUE : 2.3.0, DATE : 02-04-2008, 91 pages.
- [45] Rispoli, F., Filip, A., Castorina, M., Mambro, G., Neri, A. and Senesi, F., *Recent Progress in Application of GNSS and Advanced Communications for Railway Signalling*. 23rd International Conference Radioelektronika, MAREW 2013, University of Pardubice, Czech Republic, 16-18 April 2013, IEEE Catalog Number: CFP13858-CDR, ISBN: 978-1-4673-5518-6, pp. 13-22 (invited paper).
- [46] Wullems Ch., Sperandio F., Basso M., Sturaro S., Sabina S., A preliminary Apportionment of Safety Targets for Virtual Balise Detection using GNSS in Future Evolutions of ERTMS. In: 2018 16th International Conference on Intelligent Transportation Systems Telecommunications (ITST) [online]. IEEE, 2018 [cit. 2018-09-16]. DOI: 10.1109/ITST.2018.8566952 Dostupné z: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8566952>
- [47] Eurocontrol, *Pegasus Software* [online]. 2017. [cit. 2018-05-08]. Dostupné z <https://www.eurocontrol.int/tool/pegasus>
- [48] Stanford GPS Laboratory, *Stanford GPS/GNSS Matlab Platform* [online]. 2016. [cit. 2018-02-09]. Dostupné z: <https://gps.stanford.edu/sgmp>
- [49] Ahmad K. A. B., Sahnoudi M., Macabiau Ch., Characterization of GNSS Receiver Position Errors for User Integrity Monitoring in Urban Environments. In: ENC-GNSS 2014, European Navigation Conference [online]. 2014 [cit. 2018-18-22]. Dostupné z: <https://hal-enac.archives-ouvertes.fr/hal-01160130/document>

9. Seznam výstupů VaV činnosti

Články v recenzovaných časopisech

- [A1] Jonáš, M. Možnosti využití systémů EGNOS a Galileo v železniční zabezpečovací technice, Vědeckotechnický sborník ČD, 2011, vol. Neuveden, no. 31, s. 1-12. ISSN 1214-9047.
- [A2] Jonáš, M. GNSS integrity for railway transportation, Transactions on Transport Sciences, 2011, vol. 4, no. 4, s. 183-192, ISSN 1802-971X.

Příspěvky ve sbornících mezinárodních konferencí v anglickém jazyce

- [B1] Jonas, M., The Application of the Time Series Theory to Processing Data from the SBAS receiver in Safety Mode, In The Conference CD of the 2012 Joint Rail Conference (JRC2012). New York: American Society of Mechanical Engineers, 2012. s. 458-469 s. ISBN 978-0-7918-4465-6.
- [B2] Jonas, M., The Application of the Time Series Theory to Processing Data from the SBAS Receiver with Safety of Life Service. In 2012 IEEE/ION Position, Location and Navigation Symposium. New York: IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers), 2012. s. 1150-1161 s. ISBN 978-1-4673-0387-3.
- [B3] Jonas, M., Detection of GNSS Horizontal Position Error Using 3-D Track Map, In 2013 Joint Rail Conference, New York: American Society of Mechanical Engineers, 2013. s. 1-13 s. ISBN 978-0-7918-5530-0.
- [B4] Jonas, M., - Mandlik, M., Influence of the GNSS Satellite Elevation to the Position Error, In Proceedings of 23rd International Conference RADIOELEKTRONIKA 2013. Pardubice: Univerzita Pardubice, 2013.s. 119-124 s. ISBN 978-1-4673-5517-9.
- [B5] Jonas, M., Mathematical and Experimental Analysis of GNSS Horizontal and Vertical Errors. In 2014 24th International Conference Radioelektronika. New York: IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers), 2014. S. 287-290 s. ISBN 978-1-4799-3715-8.
- [B6] Jonas, M., Integrity Enhancement of the GNSS Position Solution for the Railway Applications. In Proceedings of IEEE/ION PLANS 2014, New York: IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers), 2014. S. 839-845 s. ISBN 978-1-4799-3320-4.
- [B7] Jonas, M., Detection of GNSS errors caused by local effects. In Proceedings of 25th International Conference Radioelektronika, RADIOELEKTRONIKA 2015. New York: IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers), 2015. s. 376-378 s. ISBN 978-1-4799-8117-5.
- [B8] Jonas, M. Integrity of GNSS Position Solution for Safety Related Applications. In *Proceedings of the 28th International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation (ION GNSS 2015)*. Tampa: The Institute of Navigation (ION), 2015. s. 1603 – 1607 s.

Seznam obrázků

Obr. 1.	Blokové znázornění očekávané funkce navržené metody	9
Obr. 2.	Schematické znázornění principu trilaterace; zdroj vlastní	12
Obr. 3.	2D přesnost historických satelitních navigačních systémů; zdroj: [2]	13
Obr. 4.	Satelit GPS; zdroj NASA	14
Obr. 5.	Dráhy GPS satelitů; zdroj NOAA	14
Obr. 6.	Funkční a plánované světové SBAS systémy; zdroj [8].....	17
Obr. 7.	Schéma funkce systému EGNOS; zdroj [8]	18
Obr. 8.	Schéma funkce železničního zabezpečovacího systému ERTMS/ETCS ; zdroj [14]	23
Obr. 9.	Schéma řešení navrženého v rámci projektu 3INSAT; zdroj [23].....	26
Obr. 10.	Časová osa projektů zabývajících se použitím GNSS v železničních bezpečnostních aplikacích; zdroj: [29]	30
Obr. 11.	Znázornění chyb v osách souřadnicového systému ENU; zdroj: vlastní.....	34
Obr. 12.	Distribuční funkce normálních rozdělení; zdroj: [36]	36
Obr. 13.	Hustoty pravděpodobnosti několika normálních rozdělení; zdroj: [36]	37
Obr. 14.	Vzájemný vztah mezi chybou 1. A 2. Druhu; zdroj: [35]	39
Obr. 15.	Obor hodnot pro testovací kritérium t; zdroj:[35]	40
Obr. 16.	Graf zobrazující dostupnost signálu EGNOS; zdroj: vygenerováno pomocí softwaru PEGASUS	42
Obr. 17.	Rozdělení integrity na jednotlivé části z pohledu železnice; zdroj: vlastní.....	45
Obr. 18.	Vícecestné šíření signálu GNSS vlivem lokálních podmínek v okolí přijímače; zdroj:vlastní	46
Obr. 19.	Určení pravděpodobnosti nedetekované chyby metody RAIM; zdroj: ESA Navipedia	49
Obr. 20.	Alokace cílové hodnoty THR v rámci systému určení polohy vlaku (LDS)na principu GNSS [6].....	50
Obr. 21.	Detekce chyb s využitím 3D mapy železniční tratě je další možností nezávislé detekce chyb způsobených lokálními účinky (nezávislost detekce je důležitá z pohledu teorie bezpečnosti).....	51
Obr. 22.	Horizontální chyba polohy HPE a horizontální ochranný limit HPL.....	53
Obr. 23.	Body polohy určené během měření, černá hvězdička ukazuje skutečnou polohu.	54
Obr. 24.	Počet satelitů použitých k výpočtu polohy během měření	54
Obr. 25.	Histogram HPE.....	55
Obr. 26.	Histogram HPL.....	55
Obr. 27.	Průběh HPE a HPL během vícedenního měření.....	56
Obr. 28.	Počet satelitů použitých při výpočtu polohy během vícedenního měření	56
Obr. 29.	Hodnoty HDOP během vícedenního měření	57
Obr. 30.	Blokové schéma metodiky prováděných simulací	58
Obr. 31.	Chyba v horizontální rovině v případě prodloužení pseudovzdálenosti SVN 12 o 3 metry	59
Obr. 32.	Průběh HPE a HPL v případě prodloužení pseudovzdálenosti SVN 12 o 3 metry	59
Obr. 33.	Průběh výšky v případě prodloužení pseudovzdálenosti SVN 12 o 3 metrů.....	60
Obr. 34.	Chyba v horizontální rovině v případě prodloužení pseudovzdálenosti SVN 12 o 12 metrů	60

Obr. 35.	Průběh HPE a HPL v případě prodloužení pseudovzdálenosti SVN 12 o 12 metrů .	61
Obr. 36.	Průběh výšky v případě prodloužení pseudovzdálenosti SVN 12 o 12 metrů.....	61
Obr. 37.	Chyba v horizontální rovině v případě prodloužení pseudovzdálenosti SVN 12 o 20 metrů	62
Obr. 38.	Průběh HPE a HPL v případě prodloužení pseudovzdálenosti SVN 12 o 20 metrů .	62
Obr. 39.	Průběh výšky v případě prodloužení pseudovzdálenosti SVN 12 o 20 metrů.....	63
Obr. 40.	Závislost mezi chybou v horizontální rovině HPE a chybou ve vertikálním směru VPE v případě zkrácené pseudovzdálenosti	64
Obr. 41.	Závislost mezi chybou v horizontální rovině HPE a chybou ve vertikálním směru VPE v případě prodloužené pseudovzdálenosti	65
Obr. 42.	Schematické znázornění chování chyb ve vertikální rovině při simulaci chyby v pseudovzdálenosti.....	65
Obr. 43.	Průběh elevace satelitu SVN 1 během jednodenního měření; zdroj: vygenerováno pomocí programu Pegasus.....	66
Obr. 44.	Polohové body v případě simulace chyby pseudovzdálenosti satelitu SVN 1 po celou dobu jednodenního měření; zdroj: vlastní.....	67
Obr. 45.	Průběh HPE a HPL při chybě pseudovzdálenosti satelitu SVN 1 po celou dobu jednodenního měření; zdroj: vlastní	68
Obr. 46.	Průběh výšky při chybě pseudovzdálenosti satelitu SVN 1 po celou dobu jednodenního měření; zdroj: vlastní	68
Obr. 47.	Průběh délky pseudovzdálenosti satelitu SVN 1 během měření; zdroj: vygenerováno pomocí programu Pegasus	69
Obr. 48.	Průběh parametrů HDOP a VDOP v během měření měření; zdroj: vlastní	70
Obr. 49.	Zvýraznění příslušnosti parametrů k jednotlivým satelitům v projekční matici S; zdroj: vlastní	Error! Bookmark not defined.
Obr. 50.	Schematicke zobrazení vztahu mezi chybami v horizontální rovině a ve vertikálním směru; zdroj: vlastní	Error! Bookmark not defined.
Obr. 51.	Schematické znázornění vztahu mezi chybovými stavy, detekční mezí a požadovanou velikostí detekované chyby (HAL); zdroj: vlastní	73
Obr. 52.	Polohové body při simulaci chyby satelitu 2 o velikosti 3 m; zdroj: vlastní	74
Obr. 53.	Chyba v horizontální rovině HPE a ve vertikálním směru VPE při simulaci chyby satelitu 2 o velikosti 3 m; zdroj: vlastní.....	75
Obr. 54.	Aktuální hodnoty v projekční matici (56) se zvýrazněním hodnot <i>seast</i> , 2 <i>snorth</i> , 2 a <i>sup</i> , 2 náležících k satelitu SVN 2; zdroj: vlastní.....	75
Obr. 55.	Polohové body při simulaci chyby satelitu 2 o velikosti 5 m; zdroj: vlastní	76
Obr. 56.	Chyba v horizontální rovině HPE a ve vertikálním směru VPE při simulaci chyby satelitu 2 o velikosti 5 m; zdroj: vlastní.....	76
Obr. 57.	Polohové body při simulaci chyby satelitu 2 o velikosti 12 m; zdroj: vlastní	77
Obr. 58.	Chyba v horizontální rovině HPE a ve vertikálním směru VPE při simulaci chyby satelitu 2 o velikosti 12 m; zdroj: vlastní.....	77
Obr. 59.	Polohové body při simulaci chyby satelitu 2 o velikosti 20 m; zdroj: vlastní	78
Obr. 60.	Chyba v horizontální rovině HPE a ve vertikálním směru VPE při simulaci chyby satelitu 2 o velikosti 20 m; zdroj: vlastní.....	78
Obr. 61.	Podrobné schéma navržené detekční metody; zdroj: vlastní.....	80

Obr. 62.	Histogram výšky, vygenerovaný z reálných naměřených dat, proložený křivkou Normálního (Gaussova) rozdělení; zdroj: vlastní.....	80
Obr. 63.	Grafické znázornění parametrů metody; zdroj: vlastní	82
Obr. 64.	Blokové schema postupu určení detekční meze; zdroj: vlastní	83
Obr. 65.	Polohové body při simulaci chyby satelitu 8 o velikosti 5 metrů; zdroj: vlastní...	85
Obr. 66.	Chyba v horizontální rovině HPE a ve vertikálním směru VPE při simulaci chyby satelitu SVN 8 o velikosti 5 metrů; zdroj: vlastní.....	86
Obr. 67.	Absolutní hodnota chyby ve vertikálním směru $ VPE $, a detekční meze (červená – Normální rozdělení, zelená – Generalizované Pareto rozdělení) při simulaci chyby satelitu SVN 8 o velikosti 5 metrů; zdroj: vlastní	86
Obr. 68.	Polohové body při simulaci chyby satelitu 8 o velikosti 10 m; zdroj: vlastní	87
Obr. 69.	Chyba v horizontální rovině HPE a ve vertikálním směru VPE při simulaci chyby satelitu SVN 8 o velikosti 10 m; zdroj: vlastní.....	87
Obr. 70.	Absolutní hodnota chyby ve vertikálním směru $ VPE $, a detekční meze (červená – Normální rozdělení, zelená – Generalizované Pareto rozdělení) při simulaci chyby satelitu 8 o velikosti 10 m; zdroj: vlastní	88
Obr. 71.	Polohové body při simulaci chyby satelitu SVN 8 o velikosti 15 m; zdroj: vlastní 88	
Obr. 72.	Chyba v horizontální rovině HPE a ve vertikálním směru VPE při simulaci chyby satelitu 8 o velikosti 15 m; zdroj: vlastní.....	89
Obr. 73.	Absolutní hodnota chyby ve vertikálním směru $ VPE $, a detekční meze (červená – Normální rozdělení, zelená – Generalizované Pareto rozdělení) při simulaci chyby satelitu 8 o velikosti 15 m; zdroj: vlastní	89
Obr. 74.	Závislost pravděpodobnosti falešného alarmu na PFA na HAL pro hodnoty $slopeMAX= 0,5;2,5$ a 5 (normální rozdělení) zdroj: vlastní	90
Obr. 75.	Závislost pravděpodobnosti falešného alarmu na PFA na HAL pro hodnoty $slopeMAX= 5; 25$ a 50(normální rozdělení) zdroj: vlastní	91
Obr. 76.	Závislost pravděpodobnosti falešného alarmu na $slopeMAX$ pro hodnoty HAL = 1 - 3 (normální rozdělení) zdroj: vlastní	91
Obr. 77.	Závislost pravděpodobnosti falešného alarmu na PFA na HAL pro hodnoty $slopeMAX= 0,5;2,5$ a 5 (generalizované paretovo rozdělení) zdroj: vlastní	92
Obr. 78.	Závislost pravděpodobnosti falešného alarmu na PFA na HAL pro hodnoty $slopeMAX= 0,5;25$ a 50 (generalizované paretovo rozdělení) zdroj: vlastní	92
Obr. 79.	Závislost pravděpodobnosti falešného alarmu na $slopeMAX$ pro hodnoty HAL = 1 - 3 (Generalizované Paretovo rozdělení) zdroj: vlastní	93

Seznam tabulek

Tab. 1.	Výsledky simulací pro prodlouženou pseudovzdálenost.....	63
Tab. 2.	Výsledky simulací pro zkrácenou pseudovzdálenost	64
Tab. 3.	Shrnutí výsledků ověření simulací pomocí matematického modelu pro chybu v horizontální rovině.....	79
Tab. 4.	Shrnutí výsledků ověření simulací pomocí matematického modelu pro chybu ve vertikálním směru	79