

Petr Kačmařík¹, Lubor Bažant², Karel Veselý³, Michal Pavel⁴, Peter Gurník⁵

Družicová navigace pro bezpečnou lokalizaci vlaků

Klíčová slova: *Družicová navigace, GNSS, GPS, Galileo, SBAS, EGNOS, ETCS, zabezpečovací technika, železnice, bezpečný odhad, analýza rizika, lokalizace, útlum signálu, RF rušení, vícecestné šíření*

Úvod

Družicová navigace jako určitý fenomén v letech po konci milénia zevšedněla a mnozí z nás ji využívají ke každodenním činnostem. Je samozřejmou součástí téměř každého mobilního telefonu a téměř každého nového automobilu. Ovšem použití družicové lokalizace v bezpečnostně relevantních aplikacích přináší svá rizika a obtíže, a toto platí o to více v podmínkách, ve kterých funguje železnice. Použití GNSS v železniční zabezpečovací technice pro lokalizaci vlaků na trati není zatím zdárně dořešeno, přestože se toto téma řešilo a řeší v řadě výzkumných projektů.

Příspěvek je koncipován jako přehled kritických výzev a překážek, jejichž zvládnutí je nutné pro využití GNSS v železniční zabezpečovací technice. Při výkladu je odkazováno na V&V projekty, kde se daný problém řešil.

Uvedme hned na úvod přehled posledních V&V projektů, kde se koncept a aplikace GNSS v železniční zabezpečovací technice řešily a na jejichž řešení se významně podílela společnost AŽD Praha s mnoha partnery z Evropy a České republiky. Významné aktivity v této oblasti byly v AŽD vyvíjeny již od roku 2003, ale zde se zaměříme jen na roky 2010 a pozdější. Na většině dále uváděných projektů AŽD Praha úzce spolupracovala s Fakultou aplikovaných věd Západočeské univerzity v Plzni.

Projekt SafeLOC byl řešen v letech 2011–13 v rámci programu Technologické agentury ČR (TAČR) ALFA. Cílem projektu bylo navrhnout a vyzkoušet základní koncepci generického bezpečného vlakového lokátoru. V rámci projektu vznikla i analýza rizika použití GNSS.

¹ Ing. Petr Kačmařík, Ph.D., 1978, Fakulta elektrotechnická ČVUT v Praze, obor Radioelektronika, AŽD Praha s.r.o., závod Technika, Výzkum a vývoj

² Ing. Lubor Bažant, Ph.D., 1969, Fakulta elektrotechnická ČVUT v Praze, obor Radioelektronika, AŽD Praha s.r.o., závod Technika, Výzkum a vývoj

³ Ing. Karel Veselý, Ph.D., 1979, Fakulta aplikovaných věd Západočeské univerzity v Plzni, program Aplikované vědy a Informatika, obor Kybernetika, AŽD Praha s.r.o., závod Technika, Výzkum a vývoj

⁴ Ing. Michal Pavel, 1958, Fakulta jaderná a fyzikálně inženýrská, obor Fyzikální inženýrství, AŽD Praha s.r.o., závod Technika, Oddělení evropských výzkumných projektů

⁵ Ing. Peter Gurník, 1980, Žilinská univerzita v Žilině, Fakulta elektrotechnická, Katedra řídicích a informačních systémů, AŽD Praha s.r.o., závod Technika, Oddělení evropských výzkumných projektů

Dalším významným národním projektem byl projekt RegioSAT řešený v letech 2014–16 v rámci programu TAČR BETA. Projekt řešil výzkumnou potřebu MD ČR s cílem navrhnout vhodné řešení zabezpečení vedlejších tratí s použitím GNSS.

Na mezinárodní úrovni byl rozvíjen koncept bezpečného lokátoru a tzv. virtuální balízy ETCS, a to zejména v projektech GRAIL-2, 3InSat, NGTC a STARS. Projekt GRAIL-2 probíhal v rámci dotačního programu EU FP7 v letech 2010–12, 3InSat probíhal za podpory ESA v letech 2012–14. Trochu více se zmíníme o novějších projektech. NGTC byl řešen v letech 2013–16, přičemž koncept virtuální balízy ETCS byl rozvíjen v rámci pracovního balíčku WP7. Projekt byl podpořen ze 7. rámcového programu EU (FP7). Nedávno skončený projekt STARS pak probíhal v letech 2016–18 jako odpověď na výzvu Agentury pro evropský globální navigační družicový systém (GSA) se sídlem v Praze a byl podpořen v rámci programu EU H2020. Stojí za poznámku, že oba projekty byly sledovány GSA se značným zájmem a pro některá témata GSA zajistila, z vlastních prostředků, užitečnou expertní podporu. Projekt STARS se detailně zabýval analýzou a charakterizací železničního prostředí.

V současnosti je koncept virtuální balízy ETCS řešen v rámci společného podniku EU a významných zástupců železničního sektoru pod označením Shift2Rail JU a jím financovaných projektů, aktuálně X2Rail-2, pracovního balíčku WP3. Firmě AŽD Praha s.r.o. umožňuje členství v Shift2Rail aktivně se účastnit klíčových aktivit v oblasti železničního V&V.

Je záhodno poznamenat, že probíhaly a probíhají i další výzkumné projekty na toto téma jak v Evropě, tak ve světě. Připomeňme v ČR historicky první řešený evropský projekt APOLO (1998–2001) v této oblasti za účasti Českých drah, jehož výsledky naznačily potřebu hybridního řešení – integraci více druhů senzorů pro spolehlivou lokalizaci vlaku. Z nedávné minulosti potom např. mezinárodní projekt RHINOS (2016–2017) za účasti Univerzity Pardubice, zaměřený na dosažení potřebných RAMS parametrů pomocí kombinace systémů GPS, Galileo, EGNOS, pokročilého autonomního monitoru integrity ARAIM a dalších senzorů.

Z výčtu výše uvedených projektů je patrné, že zajištění detekce a eliminace nebezpečí od identifikovaných zdrojů poruch a chyb je velmi obtížné pro celou železniční odbornou komunitu. Kýžený, opravdu bezpečný systém se SIL 4 pro lokalizaci vlaků na trati zůstává nadále cílem snažení všech významných výrobců železniční zabezpečovací techniky.

Ještě je třeba zdůraznit, že tento příspěvek není přímým výsledkem konkrétního výzkumného projektu podpořeného z evropských či národních fondů, ale shrnuje výsledky aktivit podpořených nejen z fondů v rámcových programech EU a programech ALFA a BETA TA ČR, ale i financovaných z vlastních zdrojů AŽD Praha. Relevantní projekty jsou zde uvedené.

1 Družicové navigační systémy

1.1 GNSS

V současnosti jsou provozovány čtyři globální družicové navigační systémy (GNSS), které jsou v různém stadiu modernizace nebo implementace. Jedná se o americký NAVSTAR GPS, ruský GLONASS, čínský BeiDou/COMPASS a evropský Galileo.

Z pohledu použití GNSS v železniční zabezpečovací technice je z více důvodů vhodné zaměřit se výhradně na systémy GPS a Galileo. Systém GPS je v nepřetržitém provozu od poloviny devadesátých let bez zásadnějších výpadků a je průběžně modernizován (konstelace je postupně doplňována družicemi, které vysílají nové civilní signály L2C, L5, L1C). Systém Galileo sice stále není plně implementován, nicméně v posledních letech bylo dosaženo významného pokroku a v současnosti má systém již 22 funkčních družic (družice mají status „Usable“); aktuální stav konstelace lze nalézt zde [1].

Pro společné použití GPS a Galilea je významná dohoda mezi USA a EU z r. 2004 ohledně koordinace vývoje obou systémů s cílem zajištění jejich vzájemné kompatibility [2]. Jejím přímým důsledkem byl návrh modulací signálů GPS a Galileo tak, aby se vzájemně nerušily a naopak bylo možné bez větších komplikací provést jejich společné zpracování v jednom přijímači.

Každý z uvedených GNSS systémů vysílá signály v několika frekvenčních pásmech. Historicky je významné pásmo L1, kde je vysílán původní civilní GPS L1 C/A signál. Toto pásmo je identické s pásmem E1 systému Galileo. Z pohledu využití bezpečnostně relevantních aplikací má dále význam pásmo L5, které je ekvivalentní s pásmem E5a systému Galileo. Výhodou těchto dvou pásem je fakt, že jak L1/E1, tak i L5/E5a náleží do frekvenční oblasti vyhrazené pro služby typu ARNS (Aeronautical Radio Navigation Service). Lze zde tedy očekávat lepší vyžadování i dodržování ochrany takto vyhrazených frekvencí před RF rušením. Zaměření na L1/E1 a L5/E5a také koresponduje s plánovaným rozvojem systému SBAS, viz dále.

1.2 SBAS

Systém SBAS (Satellite-based Augmentation System) poskytuje rozšíření GNSS tak, že je možné GNSS využít v některých bezpečnostně relevantních aplikacích (Safety of Life). Systém SBAS byl primárně vyvíjen pro potřeby civilního letectví, jeho vlastnosti (v aktuální verzi systému) tak reflektují především požadavky civilního letectví.

Systém SBAS monitoruje chování systému GNSS a ionosféry (pomocí sítě pozemních stanic) a na základě tohoto monitoringu poskytuje prostřednictvím svých geostacionárních družic informace o použitelnosti jednotlivých GNSS družic (informace o integritě). Dále poskytuje pro jednotlivé družice korekce, díky kterým dojde ke zpřesnění odhadu polohy.

Systém SBAS není svým charakterem globální systém, ale poskytuje navigační službu jen nad definovanou oblastí (service area). V současnosti existuje několik implementací SBAS systémů (WAAS, EGNOS, GAGAN, MSAS, SDCM, SNAS), které poskytují službu nad různými oblastmi. Jednotlivé systémy jsou kompatibilní na úrovni rozhraní k přijímači GNSS. Systém EGNOS je evropský systém, který je v

operačním režimu od roku 2009 a zajišťuje pokrytí nad evropským kontinentem. Systém je výsledkem spolupráce Evropské kosmické agentury (ESA), Evropské komise (EC) a Evropské organizace pro bezpečnost leteckého provozu (EUROCONTROL), se zodpovědností ESA za technický návrh a vývoj systému, EC prostřednictvím GSA za celkové řízení programu a EUROCONTROL za definici potřeb civilního letectví a stanovení požadavků na systém.

Současná verze systému EGNOS (EGNOS V2) poskytuje informace o integritě a velkoplošné korekce pouze pro signál GPS L1 C/A. Následující verze systému EGNOS V3, která by měla být dostupná kolem r. 2025 [3], bude kromě původní služby (podporující jen GPS L1 C/A) nově podporovat dvoufrekvenční měření GPS (v pásmech L1 a L5) a dále i dvoukonstelaci měření GPS + Galileo na obou zmíněných frekvencích [4].

Zdůrazněme, že samotné použití SBAS/EGNOS signálu nestačí k tomu, aby odhad polohy určený v přijímači dosahoval požadovaných vlastností (zejména integrity) a poskytovatel služby (v Evropě pro systém EGNOS je jím ESSP na základě kontraktu od GSA) tyto vlastnosti garantoval. Nutnou podmínkou totiž je i to, aby samotný přijímač byl navržen a certifikován dle příslušného standardu (MOPS). Pro EGNOS V2 je odpovídající MOPS dokument [5].

Systém SBAS (EGNOS) je ve většině V&V projektů (NGTC, STARS, X2Rail-2), které řeší bezpečné použití GNSS pro železnici, chápán jako součást architektury bezpečné lokalizační funkce. Byť potenciál SBAS je velký (i vzhledem k plánované evoluci systému) a zajisté usnadní nasazení GNSS, jeho využití v železničních zabezpečovacích zařízeních nebude přímočaré. Je potřeba připomenout, že systém SBAS byl a zatím stále je primárně vyvíjen pro leteckou dopravu a letecké prostředí, a nejsou tak při jeho vývoji zohledňovány požadované zásady vývoje železničního zabezpečovacího zařízení dle platných norem. Další nezanedbatelnou komplikací představuje železniční prostředí, které je od leteckého zásadně odlišné. Systém SBAS z principu nemůže poskytnout ochranu před nebezpečnými lokálními vlivy (např. mnohacestné šíření, RF rušení). Z dosavadních analýz dále vyplývá, že systém SBAS nebude samostatně schopen zajistit pro GNSS lokalizaci vlaku požadovanou celkovou úroveň integrity bezpečnosti SIL4.

2 Bezpečný odhad

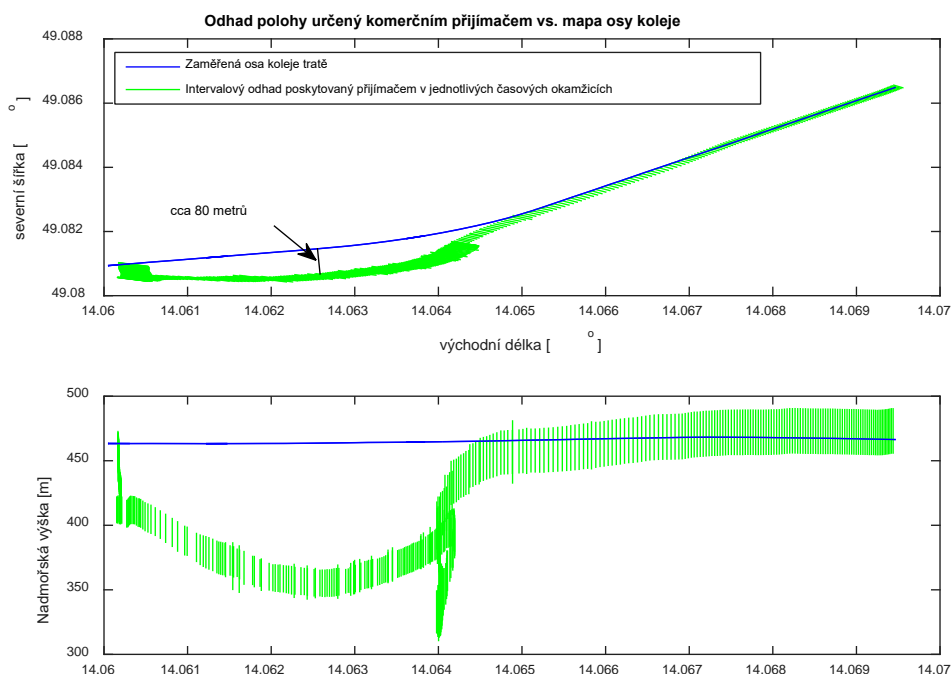
Na základě každodenních zkušeností s využitím GNSS informace např. v automobilové navigaci, mobilních telefonech, fotoaparátech atd. se může jevit jako zcela přirozené použít stejným způsobem GNSS v železničních zabezpečovacích zařízeních. Tj. výstup komerčního (COTS) přijímače GNSS by byl přímo využit jako primární zdroj informace o poloze vlaku v dané aplikaci. Takový přístup by ale znamenal, že se pro použití v zabezpečovacích zařízeních ztotožní informace o bezpečné poloze s odhady, které poskytuje COTS přijímač.

V následující části kapitoly bude vysvětleno, proč je toto ztotožnění nepřijatelné, a to jak z věcného hlediska, tak také z hlediska požadavků příslušných mandatorních norem. Před tímto vysvětlením je však účelné definovat pojem bezpečný odhad veličiny (např. polohy). Bezpečným odhadem se rozumí oblast (obvykle tvaru elipsoidu), pro kterou platí, že tato oblast za všech okolností (měření využitá k určení

odhadu jsou zatížena pouze šumem, nebo měření jsou zatížena i poruchou, ...) obsahuje skutečnou hodnotu odhadované veličiny alespoň s pravděpodobností danou požadavky na bezpečnost lokalizační funkce.

Jedním z důvodů, proč je problematické přímo využít výstup COTS přijímače, je fakt, že COTS přijímač může na svůj výstup poskytovat poměrně často i odhady, které nijak neodpovídají realitě, a přitom tato skutečnost není přijímačem nijak signalizována. Aplikace využívající poskytnutý odhad může tedy chybně předpokládat, že jsou stále splněny pravděpodobnostní požadavky kladené na odhad.

V reálných datech zaznamenaných při měření např. v projektu RegioSAT bylo přitom takové chování COTS přijímačů opakovaně pozorováno. Konkrétní příklad je uveden na obr. 1. Na obrázku je vykreslena skutečná poloha části osy koleje tratě TR197 Čičenice – Volary (modrá křivka) a odhad polohy (zelená oblast) železničního vozidla průběžně poskytovaný v jednotlivých časových okamžicích COTS přijímačem.



*Obrázek 1: Porovnání korespondence odhadu polohy COTS přijímače s osou koleje
Zdroj: výsledky projektu RegioSAT*

Z obrázku je patrné, že při vjezdu vozidla do oblouku (vozidlo se pohybovalo ze severovýchodu na jihozápad) je po určitou dobu COTS přijímačem poskytovaný odhad polohy systematicky vychýlen od skutečné pozice vozidla, a to místy o více než 80 metrů v rovině zeměpisná šířka délka. V nadmořské výšce je pak chyba odhadu místy až 100 metrů. Na základě analýzy tzv. surových měření (viz dále), která byla vstupem pro odhad polohy počítaný v COTS přijímači, bylo přitom zjištěno, že z těchto měření bylo ale možné po celou dobu počítat správné odhady polohy.

Kromě výše popsaného problému je navíc nutné na COTS přijímače, ale i samotné GNSS nahlížet tak, že se jedná o (sub)systemy, které nerespektovaly požadavky

bezpečného životního cyklu dle příslušných standardů (zejména ČSN EN 50126, ČSN EN 50128, ČSN EN 50129). To je další z významných důvodů, proč není možné použít odhad polohy z COTS přijímače přímo a jako výhradní zdroj polohové informace pro bezpečný odhad polohy drážního vozidla.

3 Vlivy na výkonnostní parametry GNSS

Zjednodušeně platí, že výkonnostní parametry lokalizační funkce využívající GNSS (jako např. přesnost, dostupnost, ...) jsou ovlivněny třemi hlavními faktory, a to: a) samotným použitým GNSS systémem, b) použitým GNSS přijímačem, c) prostředím, ve kterém se GNSS přijímač nachází.

Dále se podrobněji zaměříme na přijímač i na prostředí, ve kterém se bude přijímač použitý pro bezpečnou lokalizaci vlaku nacházet. Vlastnosti GNSS systému nejsou v této kapitole rozebírány, protože není v možnostech výrobců železničních zabezpečovacích zařízení tento faktor jakkoliv ovlivnit.

3.1 Vlastnosti přijímače

V řešených V&V projektech byla několikrát diskutována otázka stanovení požadavků na GNSS přijímače pro aplikaci virtuální balízy ETCS (NGTC, X2Rail-2), a to z pohledu standardizace navrhovaného řešení. Cílem je stanovení jeho vlastností (charakteristiky) tak, aby bylo zajištěno dosažení minimálních výkonnostních parametrů GNSS v definovaných podmínkách a řešení bylo interoperabilní. Na druhé straně je požadováno, aby uvedené vlastnosti přijímače nebyly výrazně restriktivní (z pohledu použitých algoritmů) a umožnily cenovou dostupnost technologií s požadovanými vlastnostmi na trhu.

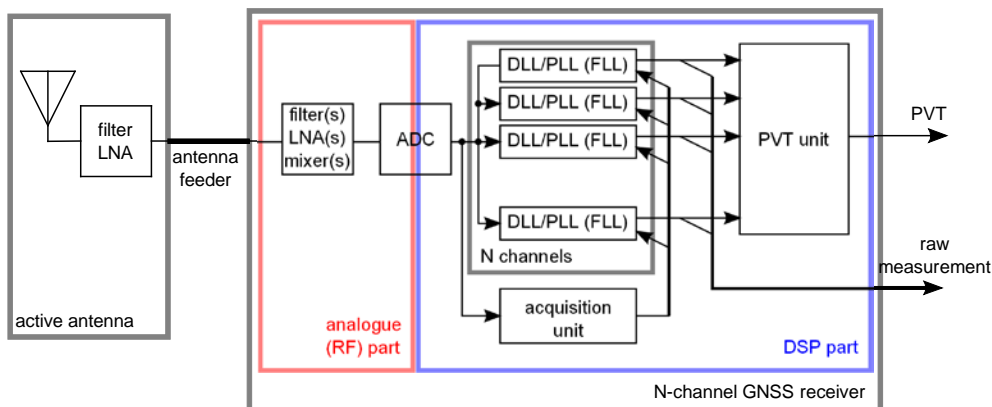
Charakterizace přijímače, která byla autory článku navržena a předložena k diskusi v rámci [6] a nedávno aktualizována v [7], předpokládá klasickou architekturu GNSS přijímače (viz obr. 2), kdy je možné provést rozdělení přijímače na: (a) analogovou RF část a číslicové zpracování signálu v základním pásmu (zpětnovazební systém DLL/PLL) a (b) samostatný blok výpočtu odhadu polohy, rychlosti a času (PVT). Rozhraním mezi oběma definovanými částmi jsou tzv. surová měření (raw measurements).

Na analogovou RF část a část číslicového zpracování signálu v základním pásmu je pohlíženo tak, že každý GNSS signál se v této části zpracovává samostatně v identickém bloku. To umožňuje výrazně zjednodušit návrh testování (resp. měření charakteristik) této části přijímače. Měření je tak možné založit jen na základě přesně definovaného signálu jedné družice doplněného o rušení dle měřené charakteristiky (bílý šum, odražený signál, RF rušení apod.).

V rámci projektu NGTC byla navržena taková sada charakteristik a parametrů, která má zajistit úplný popis této části přijímače. V případě charakteristik nebo parametrů, kde by mohla vzniknout nejednoznačnost jako důsledek neustálené definice, byla popsána kompletní procedura měření včetně podmínek měření.

Jako příklady definovaných charakteristik uvedme citlivost přijímače (jak pro proceduru akvizice signálu, tak i sledování signálu), časy pro prvotní získání synchronizace i opětovnou synchronizaci po výpadku příjmu apod. Byly ale

definovány i komplexní charakteristiky, jako je např. odolnost přijímače oproti mnohacestnému šíření.



Obrázek 2: Uvažovaná architektura GNSS přijímače v projektu NGTC (v rámci úkolu 7.2)

Přístup k charakterizaci bloku výpočtu odhadu PVT je jiný. V tomto případě nelze případné testy provádět jen s jednoduchým modelem signálu jedné družice, ale je potřeba, aby byly testy postaveny na signálech kompletní konstelace. Toto výrazně komplikuje návrh i samotnou definici testů. Proto bylo v rámci NGTC WP7 navrženo, že blok výpočtu polohy bude specifikován ne svými vlastnostmi, ale kompletním popisem algoritmu. Uvedme, že toto je i přístup, jak je definován přijímač pro potřeby v civilním letectví. Zda ale nakonec stejný přístup bude zachován i v železniční doméně, ukáže až další postup v navazujících V&V projektech.

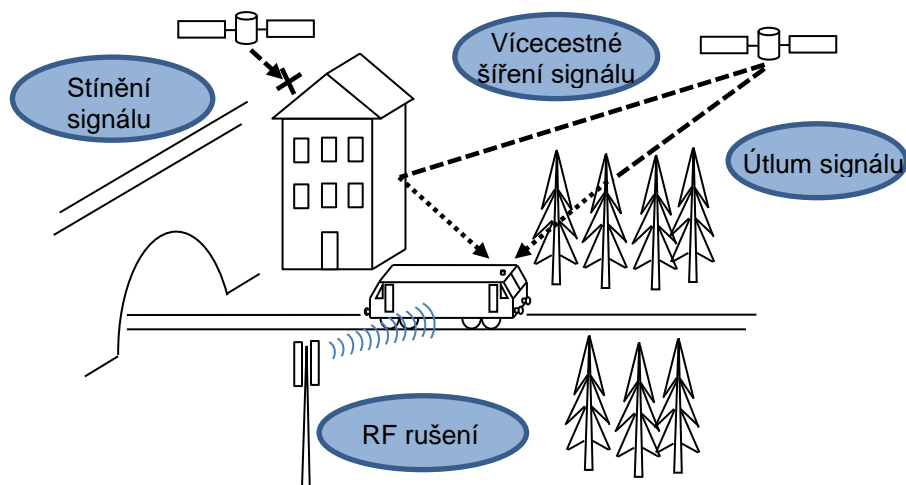
3.2 Vliv prostředí

Specifikem pro použití GNSS pro bezpečnou lokalizaci vlaku je prostředí, ve kterém se přijímač nachází. Podél tratě se charakter prostředí značně mění, a to tak, že nacházíme kompletní škálu situací: od míst, kde je příjem GNSS signálu neovlivněn, až po místa, kde je příjem GNSS signálu zcela znemožněn.

Okolní prostředí působí na GNSS signál vstupující do antény přijímače a způsobuje několik negativních jevů. Základní klasifikace těchto jevů je znázorněna na obr. 3. GNSS signál může být degradován útlumem způsobeným průchodem překážkou. V krajním (ale častém) případě může být výhled k dané družici kompletně zastíněn a příjem signálu od družice zcela znemožněn. V důsledku odrazů signálu (reflexe) a/nebo jeho ohybu na překážce (difrakce) dochází k vícecestnému šíření signálu (multipath). Specifickým případem mnohacestného šíření je situace, kdy se přijímají jen odražené signály (příjem přímého signálu je znemožněn nebo je přímý signál výrazně utlumen). Tento jev se označuje jako NLOS (Non-Line-of-Sight) příjem. Jeho význam spočívá v tom, že algoritmy pro potlačení mnohacestného šíření implementované na úrovni zpracování signálu v základním pásmu (konstrukce jako narrow nebo MEDLL correlator) jsou pro jeho potlačení neúčinné. Zvláštní kapitolou je samozřejmě RF rušení, které může pocházet jak z okolních zdrojů, tak i od samotného drážního vozidla.

Výskyt a působení těchto jevů, ať už samostatně, nebo v kombinaci, znamená vždy negativní dopad na výkonnostní parametry GNSS, tj. přesnost a dostupnost. Navíc, v případě zabezpečovacích zařízení využívajících GNSS, je potřeba zohlednit

dopady lokálních vlivů železničního prostředí na celkovou bezpečnost lokalizační funkce vlaku.



Obrázek 3: Základní klasifikace lokálních vlivů (prostředí) na příjem GNSS signálu

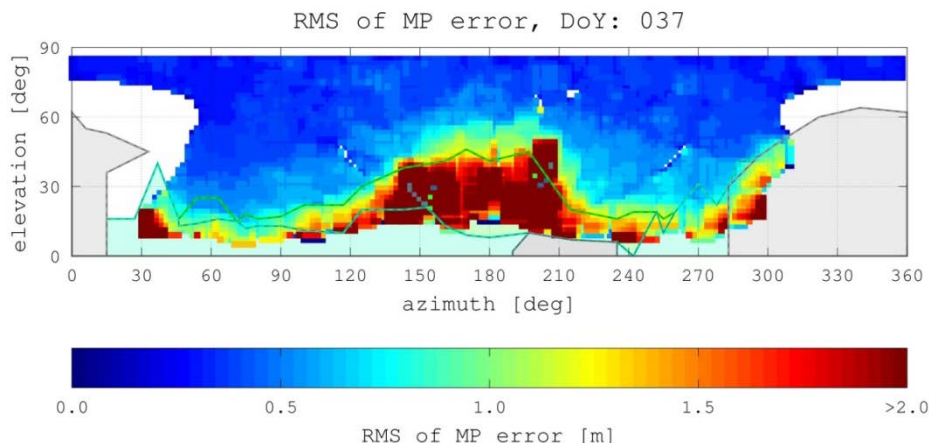
Pro návrh zabezpečovacích systémů využívajících GNSS je proto nezbytné zjistit, jak velký dopad má železniční prostředí (lokální jevy) na výkonnostní parametry lokalizační funkce využívající GNSS. Na základě této znalosti je pak potřeba rozhodnout, jakým způsobem je vhodné tyto jevy ve výpočtu bezpečného odhadu zohlednit.

Jak bylo uvedeno, bezpečný odhad polohy má charakter oblasti, kde se skutečná poloha nachází se stanovenou pravděpodobností. Základem pro stanovení velikosti této oblasti je určení odhadu chyby (ve formě směrodatné odchylky) pro jednotlivá měření k družicím. Ta se určuje na základě tzv. Error Budget modelu, kde je pro příslušný zdroj chyby alokována hodnota této chyby (směrodatná odchylka). Korektní respektování lokálních vlivů v bezpečném odhadu polohy pak lze chápat tak, že určitá míra chyby způsobená např. mnohacestným šířením je korektně respektována použitou hodnotou (alokovanou směrodatnou odchylkou) v Error Budget modelu. Extrémní případy mnohacestného šíření (které by již modelem nebyly pokryty) jsou detekovány a bezpečný odhad polohy pak není poskytnut.

Je třeba zdůraznit, že železniční prostředí se může v čase měnit (např. výstavbou překážek, jako jsou budovy, silničních nadjezdy atd. nebo umístěním zdrojů RF rušení, např. základnových stanic mobilních telefonických sítí v blízkosti tratě) a bude nezbytné navrhnout opatření, která zajistí včasné zjištění a důvěryhodnou evidenci takových změn (např. založených na analýze provozních dat, periodických kontrolních měřeních, legislativních opatřeních jako povinnost poskytovat informace o stavbách v okolí tratě správci železniční infrastruktury apod.).

Vliv mnohacestného šíření na kvalitu příjmu GNSS signálu ve vztahu k prostředí byl analyzován v projektu RegioSAT. Analýza byla založena na dlouhodobém měření se stacionárním přijímačem ve vybrané lokalitě, kde se nacházely překážky způsobující mnohacestné šíření i útlum signálu. V rámci následného vyhodnocení byly počítány tzv. „code minus carrier“ kombinace, které odpovídají chybě zdánlivé vzdálenosti v důsledku mnohacestného šíření na měření konkrétní družice. Tyto hodnoty byly dále zpracovávány s cílem vytvořit „mapu“ chyby mnohacestného šíření pro danou lokalitu v závislosti na azimutu a elevaci. Příklad takového zpracování pro vybraný

den je uveden na obr. 4. V obrázku je dále naznačen obrys překážek (šedě – budovy, zeleně – stromy a keře).



Obrázek 4: Velikost chyby mnohacestného šíření v závislosti na azimutu a elevaci příchozího GNSS signálu; měřeno pro GPS L1 C/A signál; převzato z [9]

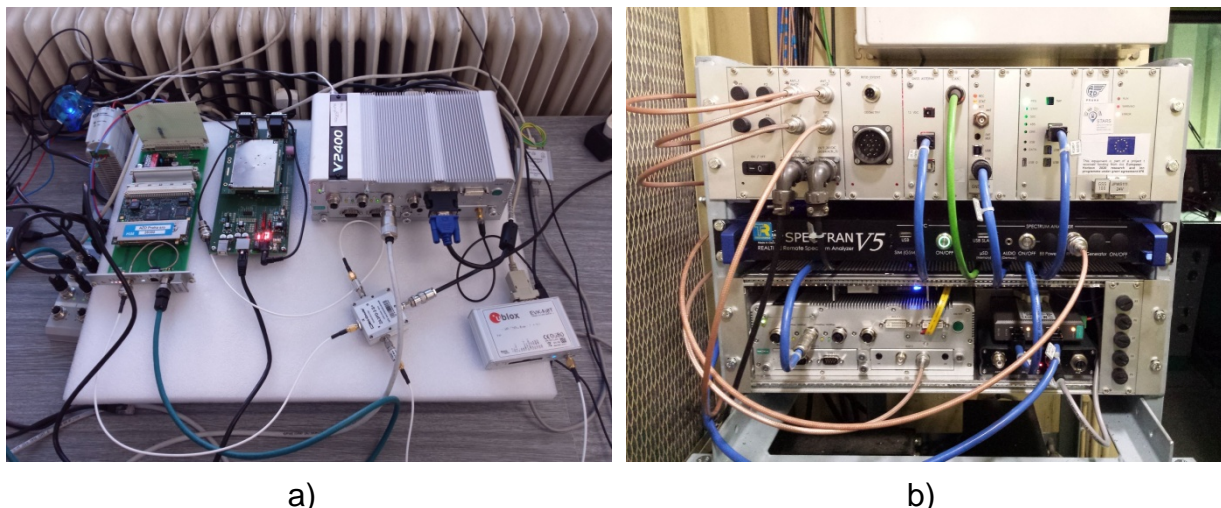
Analýza vlivu železničního prostředí na GNSS byla dále jedním z hlavních řešených témat nedávno skončeného projektu STARS (Satellite Technology for Advanced Railway Signalling). AŽD Praha byla v rámci tohoto projektu, spolu s partnery SIEMENS a Ansaldo STS, jedním ze tří realizátorů rozsáhlých měření na vybraných tratích (v ČR, Švýcarsku a Itálii) s cílem právě analyzovat vliv železničního prostředí.

Samotná měření byla realizována ve spolupráci s Českými drahami, a.s., a Správou železniční dopravní cesty, s.o. Měření probíhala na tratích Číčenice – Volary s vozidlem 814/914.114 a později i na trati Brno hl. n. – Tišnov s vozidlem 362.165. Měření se realizovala za běžného komerčního provozu vozidel během období červenec 2017 – únor 2018.

Pro potřeby projektu byl navržen a realizován měřicí systém. Navržený měřicí systém zahrnoval 3 GNSS přijímače různých výrobců a parametrů. Pro potřeby analýzy vlivu RF rušení byl použit spektrální analyzátor a zařízení pro záznam RF vzorků signálů v pásmech L1 a L5. Jádrem měřicího zařízení bylo průmyslové PC, které zároveň zprostředkovávalo i možnost vzdáleného ovládání a kontroly pomocí LTE modemu. Měřicí systém je zobrazen na obr. 5.

Pro potřeby stanovení zastínění viditelnosti oblohy (a to jiným způsobem než pomocí GNSS signálů) byla součástí měřicí aparatury i panoramatická kamera. Ta byla umístěna na střeše vozidla v těsné blízkosti GNSS antén, aby informace o viditelnosti co nejlépe odpovídala pozici instalovaných GNSS antén, viz obr. 6b).

Další důležitá část měřicího systému zajišťovala na GNSS nezávislou polohovou referenci (tzv. Ground Truth). Tato část obsahovala různé MEMS sensory, dopplerovský radar a snímač otáček. Dle vybavení tratě byly použity dva mechanismy pro recalibraci sensorů. Na trati Číčenice – Volary byl použit RFID systém firmy Harting, v kolejišti byly instalovány RFID transpondéry a součástí měřicí aparatury na vozidle 914.114 pak byla čtečka těchto transpondérů, viz obr. 6a). Trať Brno – Tišnov i vozidlo 362.165 je vybaveno systémem AVV (Automatické vedení vlaku). Recalibrace sensorů byla proto zajištěna pomocí informací z tohoto systému (pomocí informace o projetí nad balízkou MIB).



Obrázek 5: a) laboratorní testování této části měřicího systému, b) kompletní měřicí systém ve strojově vozidla 362.165

AŽD Praha v rámci projektu STARS také navrhla vhodné metody pro analýzy měřených dat a detekci negativních jevů. Díky značné proměnlivosti prostředí byla charakterizace prostředí pojata tak, že ke každé poloze na trati jsou přiřazeny tři skalární parametry, které charakter daného místa popisují. Jedná se o MPL (MultiPath Level), RIL (RF Interference Level) a SVF (Sky Visibility Factor).



Obrázek 6: a) dopplerovský radar (vlevo) a anténa čtečky RFID (uprostřed) pod vozidlem 914.114, b) nástavec s GNSS anténami, širokopásmovou anténou a panoramatickou kamerou na střeše vozidla 914.114

Série obrázků (viz obr. 7) ukazuje proces zpracování panoramatických snímků. Na základě tohoto zpracování byla určena skalární hodnota SVF, která popisovala míru zastínění oblohy v daném místě na trati.

Následné zpracování a analýzy měřených dat potvrdily výskyt všech výše uvedených negativních jevů v železničním prostředí v různém rozsahu a s různou intenzitou. Postup zpracování a závěry provedených analýz jsou uvedené v dokumentu [8].



Obrázek 7: Postup zpracování panoramatických snímků; určení oblasti (azimutu a elevací), kde je signál GNSS zastíněn nebo kompletně blokován

V současnosti jsou detekční metody dále zdokonalovány a koncepce charakterizace prostředí rozvíjena tak, aby bylo možné navrhnout optimální a rychlý postup pro měření a hodnocení parametrů GNSS v železničním prostředí.

4 Analýza rizika použití GNSS

Při integraci GNSS do železničních zabezpečovacích systémů, stejně jako v jiných bezpečnostně relevantních aplikacích, je nutným požadavkem zpracování analýzy rizika (AR). Až s využitím výsledků takové analýzy je možné navrhnout konkrétní způsob bezpečné integrace GNSS jako zdroje bezpečné informace o PVT železničního vozidla do železničních zabezpečovacích systémů. Tato integrace přitom musí obsahovat i návrh konkrétního způsobu zpracování přijímaných surových GNSS dat vedoucího až k získání bezpečného odhadu PVT, neboť, jak bylo ukázáno, nelze „slepě“ přijmout odhad polohy poskytovaný COTS přijímačem.

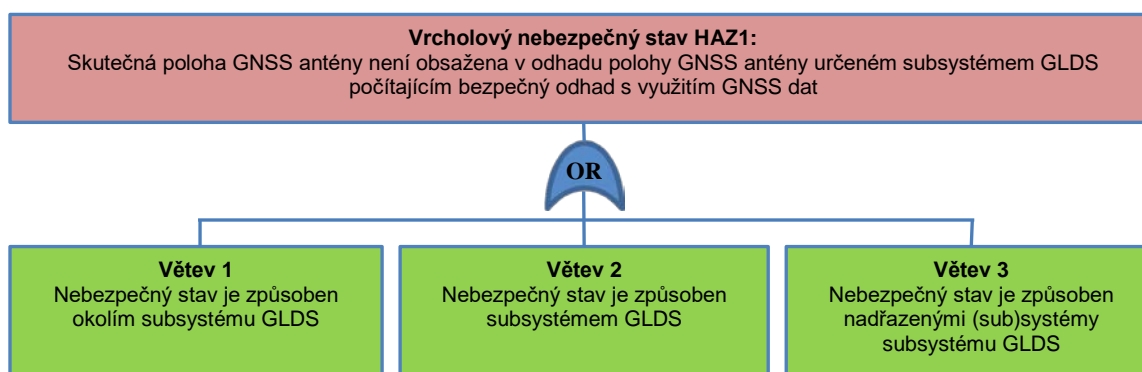
Dále v textu této kapitoly je používán termín GLDS (GNSS Location Determination System), který reprezentuje systém pro bezpečné určení polohy a rychlosti vlaku založený na GNSS. Termín na této úrovni zahrnuje jak mobilní část (vlastní lokátor na drážním vozidle), tak i stacionární část (zpravidla monitorovací stanice GNSS).

AR byla jednou z hlavních činností při řešení národního projektu SafeLOC. Prvním krokem celé AR bylo formulování vrcholového nebezpečného stavu pro lokalizační funkci využívající GNSS, jehož možný vznik je analyzován. Tento nebezpečný stav (v anglické terminologii hazard) byl pro problematiku určení polohy formulován následovně: „HAZ1: Skutečná poloha GNSS antény není obsažena v odhadu polohy GNSS antény určeném subsystémem GLDS počítajícím bezpečný odhad s využitím GNSS dat“.

Po definici stavu HAZ1 byla dalším krokem prováděné AR identifikace událostí, které mohou stav HAZ1 způsobit. Zcela základní událostí mající potenciál způsobit HAZ1 je přitom samotná přirozená stochastická podstata GNSS, ze které plyne, že i bez přítomnosti jakékoliv poruchy může vlivem šumu, přirozeného chování ionosféry a troposféry apod. vzniknout nebezpečný stav HAZ1.

Dalšími událostmi způsobujícími stav HAZ1 jsou již samotné poruchy. Vzhledem k tomu, že celý GNSS je velmi složitý systém a k bezpečnému použití na železnici nebyl prozatím využit, byla k jejich identifikaci využita metoda analýzy FTA, která přistupuje k identifikaci příčin vzniku analyzovaného nebezpečného stavu postupem „shora-dolů“. Při tomto postupu dochází postupným rozkládáním obecnějších příčin vzniku nebezpečného stavu k identifikaci až samotných konkrétních bazických příčin neboli událostí.

V souladu s doporučeními metody analýzy FTA a principem „shora-dolů“ byly události vedoucí ke stavu HAZ1 nejprve rozděleny do tří skupin (viz obr. 8) představujících základní větve stromu FTA. Tyto větve byly následně detailně analyzovány až k identifikaci bazických událostí.



Obrázek 8: Expandování vrcholové události FTA; převzato z [9]

Při AR bylo identifikováno cca 60 bazických událostí. Jako bazické události náležící do větve 1 stromu FTA byly identifikovány například nestandardní vliv troposféry a ionosféry, existence mnohacestného šíření, rušení signálů pohonnou jednotkou lokomotivy, či třeba nežádoucí interference s jinými zdroji radiových signálů.

Událostmi větve 2 jsou poruchy subsystému GLDS. Mezi tyto poruchy patří například selhání hardware GLDS, softwarová chyba zpracování signálů, chybné řešení numerické stability algoritmu výpočtu odhadu polohy přijímače, chyba oscilátoru přijímače obsaženého v GLDS, chyba při demodulaci navigační zprávy, či chyba v algoritmu výpočtu odhadu PVT.

Mezi události náležející do třetí větve pak patří například chyby v navigační zprávě družic vysílané družicovým segmentem GNSS, chybná funkce hodin družice nebo chybná dráha družice.

Při výpočtu odhadu polohy pomocí GNSS a jeho využití v zabezpečovacích systémech je přitom nutné uvažovat i současný vznik/působení více bazických událostí způsobujících stav HAZ1. I z tohoto důvodu je vhodné, aby byla AR prováděna metodou analýzy FTA, která umí i tuto eventualitu postihnout. Výhoda využití FTA se v tomto případě prokáže například i při výpočtu intenzity/pravděpodobnosti vzniku vrcholové události FTA.

Po provedení AR je možné přistoupit k návrhu integrace GNSS do železničních zabezpečovacích systémů. Při této integraci je nutné navrhnout pro všechny identifikované bazické události mající potenciál způsobit stav HAZ1 vhodná opatření, která společně s vhodně navrženým postupem, zohledňujícím možnost vzniku HAZ1 i bez přítomnosti poruchy (přirozený vliv šumu, přirozené chování troposféry, ...),

zajistí, že vznik stavu HAZ1 je snížen na tolerovatelnou úroveň, a je tak získán bezpečný odhad.

Detailní vývoj subsystému GLDS dlouhodobě probíhá ve firmě AŽD Praha ve spolupráci se Západočeskou univerzitou v Plzni a obsahuje značné množství opatření různé složitosti. Mezi tato opatření patří například jednoduchá selekce družic použitých k výpočtu odhadu PVT podle elevačního úhlu, pod kterým je družice viděna, aplikace technik numerické matematiky, či použití vlastního vysoce sofistikovaného RAIM algoritmu, který umožňuje určit bezpečný odhad polohy i v případě výskytu některých identifikovaných poruch.

5 GNSS z pohledu aplikace

5.1 Využití GNSS v systému Radioblok

Možností, jak využít v železničním prostředí bezpečný odhad PVT získaný subsystémem GLDS, je několik. V AŽD Praha byly v rámci projektu RegioSAT provedeny první testy ověřující možnost bezpečného využití GNSS v zabezpečovacím systému Radioblok pro vedlejší tratě úrovně RB0+. Při těchto testech bylo konkrétně ověřováno, jak by bylo možné stávající úroveň RB0+ rozšířit využitím bezpečných odhadů polohy a rychlosti vozidla o nové funkcionality, které by dále snížily pravděpodobnost nedetekování chyby člověka s negativním dopadem na bezpečnost provozu a zvýšily komfort strojvedoucího při řízení vlaku. Tuto úroveň označujeme RB1. Nově navrženými a z větší části též i testovanými funkcionalitami (testováno bylo prvních 5 funkcionalit) byly: a) Automatická odhláška, b) Kontrola projetí cíle povolení čelem vlaku a případné vyvolání nouzové brzdy, c) Zobrazení informace strojvedoucímu o maximální povolené (podle statického jízdního profilu) či předvěstěné traťové rychlosti v daném místě vlaku na trati, d) Kontrola aktuální rychlosti vlaku, e) Zjednodušené přihlášení vozidlové části Radiobloku ke stacionární části Radiobloku, f) Přenos a zobrazení informace o stavu přejezdového zabezpečovacího zařízení na vozidlo, g) Přenos a zobrazení informace o dočasných rychlostních omezeních na trati a h) Správa kompaktnosti vlaku umožňující kontrolovat stav kompaktnosti a integritu vlaku, pokud je souprava či systém umí detekovat.

Provedené testy uskutečněné na trati TR 197 Čičenice – Volary potvrdily jak použitelnost GNSS v železničních zabezpečovacích systémech, tak i smysluplnost nově navrhovaných funkcionalit. Je však nutné konstatovat, že k provoznímu nasazení subsystému GLDS do zabezpečovacích železničních systémů je ještě potřeba dokončit řadu aktivit. Především je nutné důsledně prokázat dosaženou úroveň integrity bezpečnosti a dále vyřešit například problém možného společného výskytu více bazických událostí majících potenciál způsobit nebezpečný stav HAZ1, tedy problém, který je zmiňován v Kapitole 4.

Více informací o navržených funkcionalitách je možné získat z [10]. Každopádně se potvrdilo, že nasazení nových funkcionalit v Radiobloku úrovně RB1 díky aplikaci bezpečného lokátoru a rychloměru využívajícího GNSS umožňuje prudce zvýšit bezpečnost na vedlejších tratích při udržení přiměřených nákladů na jejich vybavení.

Ovšem nepochybným důsledkem nasazení lokátorů založených na GNSS je nutnost umístit významnou část technologie zabezpečovacího zařízení na vozidlo. To je ostatně logickým trendem již od vzniku výkonnějších vlakových zabezpečovačů v 70. a 80. letech např. pro vysokorychlostní tratě ve Francii. Tento nevyhnutelný trend pak pokračuje s vývojem systému ERTMS.

5.2 Využití GNSS v ERTMS – virtuální balíza ETCS

Na mezinárodní úrovni je dlouhodobě rozvíjen koncept virtuální balízy (VB), který by se měl v budoucnu stát součástí specifikací ERTMS/ETCS. Koncept byl zpočátku rozvíjen v rámci pracovní skupiny UNISIG, UNISIG Satellite Positioning WG, posléze v řadě V&V projektů (NGTC, STARS, X2Rail-2), v rámci kterých participovali významní partneři evropského železničního průmyslu. AŽD Praha se na specifikacích aktivně podílí, a to jak v rámci UNISIG, tak i zmíněných projektů. Problematikou se v ČR také dlouhodobě zabývá na půdě Univerzity Pardubice doc. Aleš Filip, který přispívá k návrhům těchto i alternativních koncepcí, mj. ve zmíněném projektu RHINOS [11].

VB je možné chápat tak, že se jedná jen o definované místo na trati, a úkolem vlakové části ETCS pak je zajistit, aby projetí přes místo s VB mělo stejný výsledek jako projetí přes klasickou ETCS balízu, tj. vozidlová část ETCS (OBU) disponuje datovým obsahem balízy, časem přečtení a informací o přesnosti detekování. Detekce daného místa na trati má být založena primárně na GNSS technologii, ale nejen na ni.

Výhody, které se očekávají od zavedení VB do ETCS, jsou především ekonomické: snížení nákladů na instalaci a údržbu traťových zařízení, zejména balíz ETCS, ale také ochrana proti vandalizmu.

VB má být náhrada ETCS balízy pro specifické aplikace ETCS (např. vedlejší tratě, nízkonákladové implementace ETCS L3, atd.). Striktně se dbá, aby změny v současných ETCS specifikacích v důsledku zavedení VB byly minimální.

Přestože je koncept VB řešen dlouhodobě, práce na specifikacích VB postupují pomalu. Důvodem je obtížné hledání konsensu mezi partnery projektů a nové otázky nejen čistě technického charakteru, které se s detailnější analýzou konceptu, ale i dopadu na existující specifikace a řešení ERTMS postupně objevují. Uvedme dále některé z nich:

- Způsob zajištění přenosu informací z SBAS systému na vlakovou část.
- Míra využití dalších (jiných než GNSS) technologií a otázka technologické nezávislosti.
- Možný nárůst počtu a složitosti interoperabilních rozhraní.
- Míra možného odchýlení od současných ETCS specifikací a jejich požadavků na přesnost lokalizace.

Závěr

Tento článek nastínil mnohé výzvy a překážky spojené se zamýšleným využitím GNSS v železniční zabezpečovací technice a popsal řadu již dosažených výsledků.

Patří sem definice konceptu virtuální balízy založené na GNSS a její „čtečky“, tj. bezpečného vlakového lokátoru, či proces dosažení a prokázání bezpečnosti. Bylo ukázáno, proč není možné přímé využití COTS přijímačů či systému SBAS (EGNOS), který je pro tento účel používán v civilním letectví. Ukázali jsme, že zvláštní pozornost je třeba věnovat vlivu prostředí (lokální vlivy v okolí tratě), které díky svému různorodému charakteru výrazně komplikuje nasazení GNSS na železnici.

Začlenění GNSS do zabezpečovacího zařízení se řešilo a řeší v řadě V&V projektů, ve kterých je firma AŽD Praha aktivním účastníkem. Ukazuje se, že způsobů nasazení bezpečného lokátoru je více – např. v systému Radioblok nebo v systému ERTMS.

Z výsledků řešených projektů je patrné, že GNSS má bezesporu značný potenciál stát se zavedenou technologií železniční zabezpečovací techniky, kde může sloužit jako primární zdroj bezpečné polohové informace. Dosavadní vývoj naznačuje, že cesta k nalezení shody, jak aplikovat dosažené výsledky, není jednoduchá, ale cílové řešení se blíží. Očekáváme, že po nalezení jednotné koncepce, patrně na půdě Shift2Rail a za podpory Železniční agentury Evropské unie ERA, dojde k rychlému vývoji odpovídajících standardů i techniky a zavedení GNSS do interoperabilních železničních zabezpečovacích systémů.

Literatura:

- [1] European GNSS Service Centre, Constellation Information [online]. Dostupné z: <https://www.gsc-europa.eu/system-status/Constellation-Information>
- [2] U.S.-EU Summit: Agreement on GPS-Galileo Cooperation. U.S. Department of State Archive [online]. Dostupné z: <https://2001-2009.state.gov/p/eur/rls/fs/36889.htm>
- [3] EGNOS sparks quiet revolution in aircraft landings: GPS World [online]. 2019. North Coast Media LLC. [cit. 27. 2. 2019]. Dostupné z: <https://www.gpsworld.com/egnos-sparks-quiet-revolution-in-aircraft-landings/>
- [4] ESA-EGN-V3-SOW-0024: EGNOS V3 Phases C/D - Summary Statement of Work. Issue 1.0, 2016
- [5] RTCA DO-229E: Minimum Operational Performance Standards for Global Positioning System/Wide Area Augmentation System Airborne Equipment. 15 December 2016
- [6] NGTC-WP7-D-AZD-018: Definition and quantification of GNSS parameters to be measured in railway environment. Deliverable D7.2 of NGTC WP7. Issue 9, 30.9.2014
- [7] X2R2-TSK3.4-D-AZD-008: Test campaigns analysis, Performance Analysis Toolset and Description of Main Toolset Specification. Deliverable D3.4 of X2Rail-2 WP3. Issue 3, 17.12.2018.
- [8] STR-WP4-D-AZD-096: Railway environment characterization. Deliverable 4.3 of STARS. Issue 7, 12.10.2018
- [9] VESELÝ, K. – KAČMARŘÍK, P. – PAVEL, M.: *Critical Safety Aspects of a GNSS Virtual Balise for ETCS*. 2016. Článek prezentovaný na 11. světovém železničním kongresu WCRR konaném v Miláně.
- [10] Projekt RegioSAT: Výsledky veřejné zakázky TB0200MD051 „Zvýšení bezpečnosti železničního provozu na vedlejších tratích s využitím družicových systémů (GNSS)“ vypsané MD ČR prostřednictvím TAČR a řešené společností AŽD Praha, s.r.o., 2014–2016.
- [11] Projekt RHINOS: Railway High Integrity Navigation Overlay System, H2020 – Galileo 2nd Call, č. 687399, <https://www.gsa.europa.eu/railway-high-integrity-navigation-overlay-system>

Použité zkratky:

| | |
|-------|--|
| APOLO | Projekt Advanced Position Locator |
| AR | Analýza rizika |
| ARAIM | Advanced Receiver Autonomous Integrity Monitor |
| COTS | Komerčně dostupný (Commercial Off The Shelf) |
| DOP | Parametr reprezentující vzájemnou geometrii GNSS družic a přijímače |
| EC | Evropská komise |
| EGNOS | Evropský systém SBAS (European Geostationary Navigation Overlay Service) |
| ESA | Evropská kosmická agentura |

| | |
|-------------|---|
| ETCS | European Train Control System (Evropský vlakový zabezpečovací systém) |
| ESSP | European Satellite Services Provider |
| EU | Evropská unie |
| EUROCONTROL | European Organisation for the Safety of Air Navigation (Evropská organizace pro bezpečnost leteckého provozu) |
| FTA | Strom poruchových stavů |
| GAGAN | Indický systém SBAS (GPS-aided GEO augmented navigation) |
| GLDS | GNSS lokalizační subsystém. Subsystém zajišťující bezpečnou funkci polohy vlaku a rychlosti s využitím GNSS |
| GNSS | Globální navigační družicový systém |
| GSA | Agentura pro evropský globální navigační družicový systém |
| HAZ1 | Vrcholová nebezpečná událost „Skutečná poloha GNSS antény není obsažena v odhadu polohy GNSS antény určeném subsystémem počítajícím odhad z GNSS dat“ |
| MD ČR | Ministerstvo dopravy ČR |
| MEMS | MicroElectroMechanical Systems |
| MOPS | Minimum Operational Performance Standard – minimální výkonnostní parametry systému |
| MSAS | Japonský systém SBAS (Multi-functional Satellite Augmentation System) |
| NLOS | Situace, kdy je signál přijímán pouze odraženými cestami |
| OBU | On-board Unit (vozidlová část) |
| PVT | Poloha, rychlost, čas |
| V&V | Výzkum a vývoj |
| RF | Radio Frequency |
| SBAS | Satellite-based Augmentation Systems |
| Shift2Rail | Technologická iniciativa EU a železničního průmyslu formou společného podniku |
| SIL | Safety Integrity Level |
| SVF | Sky Visibility Factor |
| TA ČR | Technologická agentura ČR |
| VB | Virtuální balíza |
| WAAS | Systém SBAS pracující nad územím USA a Kanady (Wide Area Augmentation System) |

Praha, březen 2019

Lektorovali: Ing. Tomáš Duša, Ph.D.
GNSS Centre of Excellence

prof. Ing. Zdeněk Votruba, CSc.
České vysoké učení technické v Praze