

Marek Jonáš¹

Možnosti využití systémů EGNOS a Galileo v železniční zabezpečovací technice

Klíčová slova: EGNOS, DGPS, GPS, Galileo

1 Úvod

V souvislosti s rychlým rozvojem techniky a technologií během posledních dekád, se začalo uvažovat o použití satelitní navigace v železniční zabezpečovací technice. Tedy nahrazení zabezpečovacích systémů založených na různých prvcích umístěných v kolejišti zabezpečovacími systémy využívajícími globálních satelitních navigačních systémů (GNSS - Global Navigation Satellite System). Tato myšlenka s sebou ale přináší celou řadu komplikovaných problémů. Pro území Evropy je k dispozici systém EGNOS (European Geostationary Navigation Overlay Service), který je také označován za první fázi v budování nezávislého evropského satelitního navigačního systému (GNSS1). Druhou fází (GNSS2) má být samotné spuštění kompletního nezávislého evropského satelitního navigačního systému Galileo. Systém EGNOS je evropský zpřesňující systém, který zvyšuje přesnost GPS (Global Positioning System – americký systém) na území Evropy.

2 Evropské normy

Zařízení, u kterých je zamýšleno jejich budoucí použití 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, ČSN EN 50128 a ČSN EN 50159). V těchto normách je popsán přístup k managementu bezporuchovosti, pohotovosti, udržitelnosti a bezpečnosti na drahách tzv. RAMS (reliability, availability, maintainability and safety). To jsou hlavní atributy, kterými jsou popsány vlastnosti železničních zabezpečovacích systémů. Tyto normy také zavádějí pojmy jako např. koncepce rizika a úroveň integrity bezpečnosti (SIL - Safety Integrity Level). Koncepce rizika je kombinací dvou faktorů a to:

¹ Ing. Marek Jonáš, nar. 1985. Absolvent FEI Univerzita Pardubice 2010, obor komunikační a řídicí technologie. V současnosti pokračuje v doktorandském studiu na Univerzitě Pardubice v oboru informační, komunikační a řídicí technologie. Zabývá se stanovením spolehlivosti GNSS pro pozemní bezpečnostní aplikace.

- pravděpodobnosti výskytu (četnosti) události nebo kombinace 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. Riziko je pak následně nutné minimalizovat, ovšem úplnému odstranění rizika klasicky brání technické a ekonomické aspekty vývoje a výroby zařízení.

Na koncepci rizika navazují úrovně integrity bezpečnosti (SIL), neboli různé přísné požadavky na integritu bezpečnosti, které by měly umožnit, aby pro méně kritické aplikace byla navrhována jednodušší a tudíž levnější zařízení. Dá se takto zohlednit zvolením příslušné hodnoty úrovně integrity bezpečnosti různá frekvence výskytu hazardních stavů a různý stupeň závažnosti jejích následků. [4]

3 Systém EGNOS

Evropský systém EGNOS je aplikace principu SBAS (Satellite Based Augmentation System), což je obecný standard pro zpřesňující systémy satelitní navigace. Tento standard je založen na metodě DGPS (Differential GPS). Systém EGNOS využívá síť tzv. referenčních monitorovacích stanic (RIMS - Ranging and Integrity Monitoring Stations), které jsou rozmístěny po celé Evropě a jejichž poloha je přesně zaměřená. Tyto stanice provádějí měření vzdálenosti ke všem viditelným družicím. Změřené vzdálenosti porovnávají s vypočtenými předpokládanými hodnotami a zjištěné rozdíly (korekce) se poté vysílají, pomocí k tomu určených satelitů, k uživatelům. V přijímači uživatele se přijaté korekce použijí k opravě měření a tak se významně zvýší přesnost určení polohy.

Systém EGNOS rozšiřuje satelitní navigační systém GPS i o další služby, například umožňuje práci v módu SOL (safety of life), který bude využit v bezpečnostně relevantních aplikacích (je certifikován pouze pro použití v leteckých aplikacích, ale je zamýšleno jeho použití i v pozemních aplikacích, např. řízení dopravy, atd.). V rámci módu SOL se vysílají informace o integritě systému (sleduje se stav družic a v případě poruchy některé družice je na to uživatel upozorněn). [3,6]

4 Navigační systém Galileo

Vývoj globálního satelitního navigačního systému Galileo je financován evropskými státy a Evropskou unií. Všechny náležitosti tohoto projektu spadají do kompetence evropské kosmické agentury (ESA - European Space Agency). Počátkem devadesátých let se objevily studie poukazující na potřebu vlastního evropského civilního družicového navigačního systému. Evropská unie přijala

rozhodnutí vybudovat vlastní systém, který bude garantovat trvalou provozuschopnost, potřebnou pro využívání v krizových situacích. Navigační systémy GPS a GLONASS (Global Orbiting Navigation Satellite System – ruský systém), které jsou dostupné na území Evropy, jsou pod kontrolou americké a ruské armády a žádné garance trvalé provozuschopnosti neposkytují. Kompletní systém Galileo se bude skládat z 30 družic obíhajících na kruhových drahách ve výšce přibližně 23,5 tisíce kilometrů nad zemským povrchem a jeho zprovoznění v základní konfiguraci se očekává v roce 2014. [5]

5 Vztah mezi parametry satelitních navigačních systémů a parametry používanými v zabezpečovací technice na železnici

Současné satelitní navigační systémy byly navrženy podle leteckých bezpečnostních požadavků. Tedy i jejich parametry, které popisují jejich vlastnosti, korespondují s avionickými potřebami. Systém EGNOS poskytuje dva základní módy ve kterých může pracovat a to:

- En Route: pro případ letu v jedné výškové hladině (v normách označovaný jako NPV – Non-precision Approach)
- Precision Approach: pro přesné přiblížení k letišti a přistání

Bezpečnostní filozofie používaná na železnici je však zcela odlišná. Pro to, aby mohly být satelitní navigační systémy použity na železnici, je třeba najít cesty, jak je použít v souladu s evropskými normami pro železniční zabezpečovací techniku (viz. 2. Evropské normy). Vztahy mezi ukazateli kvality GNSS a železničními atributy RAMS byly popsány v [7]. Systém EGNOS je již dnes plně funkční, včetně služby SOL, jejíž certifikace pro použití v avionických bezpečnostně kritických aplikacích byla dokončena v prosinci 2010. Pro další aktivity které povedou ke vzniku aplikací založených na satelitních navigačních systémech a které budou použitelné v železniční zabezpečovací technice, je potřeba zjistit skutečné vlastnosti systému EGNOS. Následující text pojednává o prvních měřeních, které byly prováděny za účelem experimentálního prozkoumání současných vlastností systému EGNOS. [1,7]

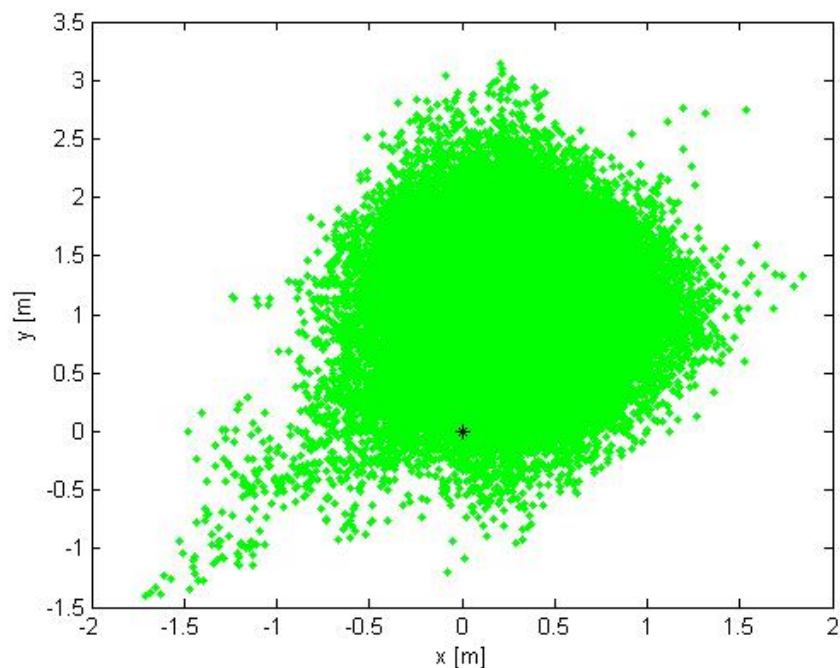
6 Měření skutečných vlastností systému EGNOS

Měření probíhalo v laboratoři inteligentních systémů (SŽDC TÚDC LIS) v Pardubicích. Byly použity dva totožné přijímače PolaRx3, vyrobené firmou Septentrio. Oba přijímače byly připojeny k jedné anténě, která je napevno nainstalovaná na střeše budovy. Jedná se tedy o statické měření a poloha antény je přesně zaměřená. Důležitost statického měření spočívá v tom, že lze jednoduše

a přesně vyhodnocovat chyby v poloze udávané přijímačem, porovnáním přesné polohy antény s hodnotami naměřenými pomocí SBAS přijímače. Při statickém měření se také spíše projeví různé chyby satelitního navigačního systému, které by při dynamickém měření mohly zůstat skryty. Při statickém měření je pravděpodobné, že chyby, které se při měření objeví, nejsou způsobeny vlivem měnících se podmínek v okolí přijímače. Jelikož se anténa nepohybuje, podmínky v jejím okolí jsou neměnné. Samozřejmě se ale pohybují satelity systému GPS, které obíhají kolem země po přesně stanovených drahách a jejich konstelace na obloze se v jednom konkrétním místě na zemi opakuje s periodou přibližně 24 hodin. Nejprve je nutné provádět právě statická měření, aby mohly být popsány skutečné parametry signálu vysílaného satelitním navigačním systémem (SIS - Signal In Space) a teprve následně zkoumat jevy, které způsobují zhoršení příjmu na zemském povrchu (stínění, vícecestné šíření, atd.)

6.1 Výsledky měření

Následně jsou uvedeny některé grafy s naměřenými hodnotami. Měření dat probíhalo od 24.11.2010 15:00 hod. do 25.11.2010 14:30 hod., délka měření je tedy 23,5 hod. Přijímače prováděly vyhodnocení polohy jednou za vteřinu.



Obr.1. Naměřené hodnoty a skutečná poloha antény

Na obr. 1 jsou zobrazeny všechny naměřené hodnoty (zelené body) spolu se skutečnou polohou antény (hvězdička). V grafu je vidět, že rozptýlení bodů v horizontálním i vertikálním směru je přibližně tři metry.

Měření probíhalo současně na dvou přijímačích Septentrio PolaRx3, z nichž jeden byl nastaven do módu En route a druhý do módu Precision approach. Výsledky měřených parametrů v obou módech byly v podstatě stejné, ve sledovaných parametrech nebyly objeveny žádné znatelné rozdíly. Dále jsou uváděny výsledky měření v módu En Route.

6.2 Úroveň zabezpečení

Kromě diferenciálních korekcí poskytuje tedy systém EGNOS také informace o integritě systému. Každému módu systému je přiřazeno nějaké konkrétní požadované riziko integrity (četnost nebezpečné nedekované poruchy). Pro mód Precision approach je uváděna maximální četnost nebezpečné nedekovatelné poruchy $\lambda_{PA} = 2 \cdot 10^{-7} / 150 s$, pro mód En Route $\lambda_{EN} = 1 \cdot 10^{-7} / 1 \text{ hodina}$. I tyto hodnoty byly ale odvozeny z avionických požadavků, konkrétně na základě statistických údajů o leteckých nehodách. Bylo analyzováno, že pro použití v železniční zabezpečovací technice je vhodnější mód En Route, protože u něj je riziko integrity alokováno jen v horizontálním směru.

Přijímač, který je navržen pro použití v bezpečnostně relevantních aplikacích, z přijímaných zpráv počítá v reálném čase (jednou za vteřinu) tzv. úroveň zabezpečení PL (Protection Level) určené polohy. Úroveň zabezpečení PL [m] garantuje, že poloha uživatele bude za daných podmínek určena s požadovanou četností poruch. Úroveň zabezpečení je počítána zvláště ve vertikální (VPL) a v horizontální rovině (HPL). Pro účely železniční zabezpečovací techniky jsou rozhodující garance správného určení polohy v horizontálním směru, takže je nutné se zaměřit na vlastnosti parametru HPL.

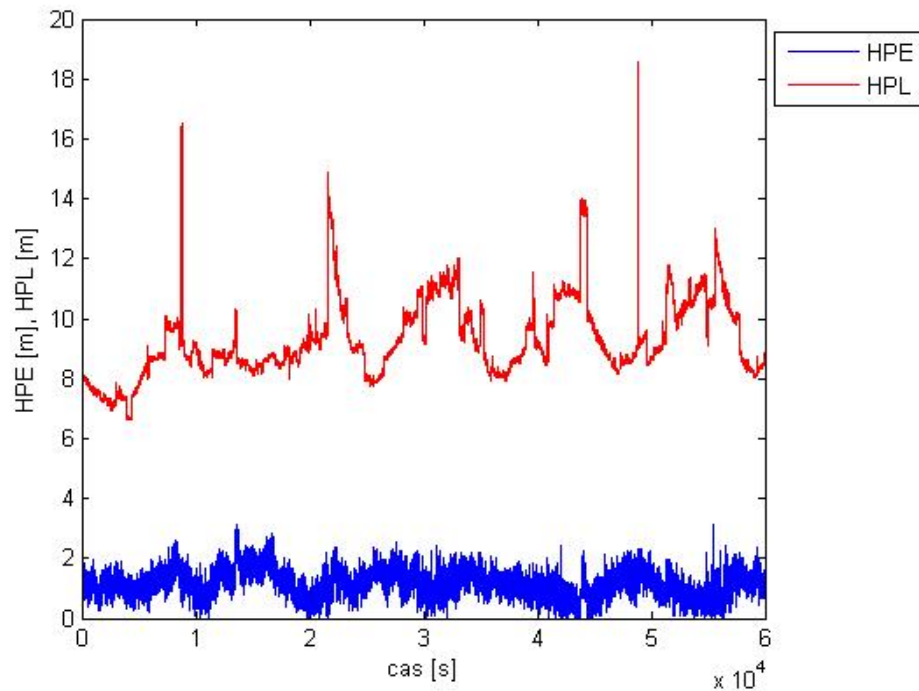
HPL se v přijímači počítá podle vztahu:

$$HPL = K_H \cdot \sigma_{H,\max}$$

kde $\sigma_{H,\max}$ je přijímačem odhadnutá maximální hodnota směrodatné odchylky naměřených bodů v horizontálním směru a K_H je konstanta, jejíž velikost zohledňuje letecké požadavky na četnost poruch.

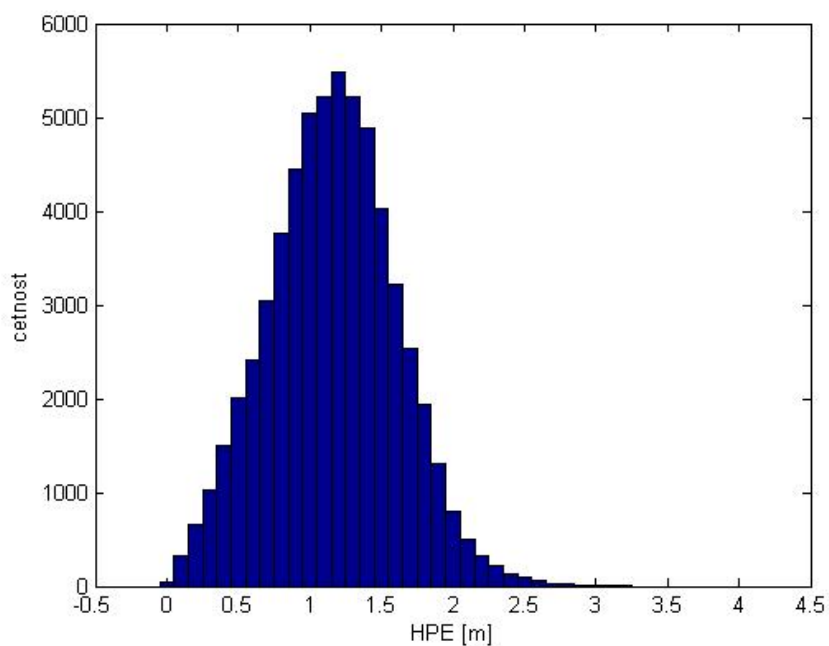
Vypočtená hodnota HPL zahrnuje vliv možných HW a SW chyb systémů GPS/EGNOS, vliv chyb efemeridů GPS satelitů, vliv geometrie mezi satelity a přijímačem uživatele, vliv ionosféry, vliv troposféry a také požadovanou četnost poruch určení polohy. Na obr. 2 je porovnání skutečné chyby polohy (HPE -

Horizontal position error - jednotlivé rozdíly mezi skutečnou a naměřenou polohou antény) a HPL. [2,3]

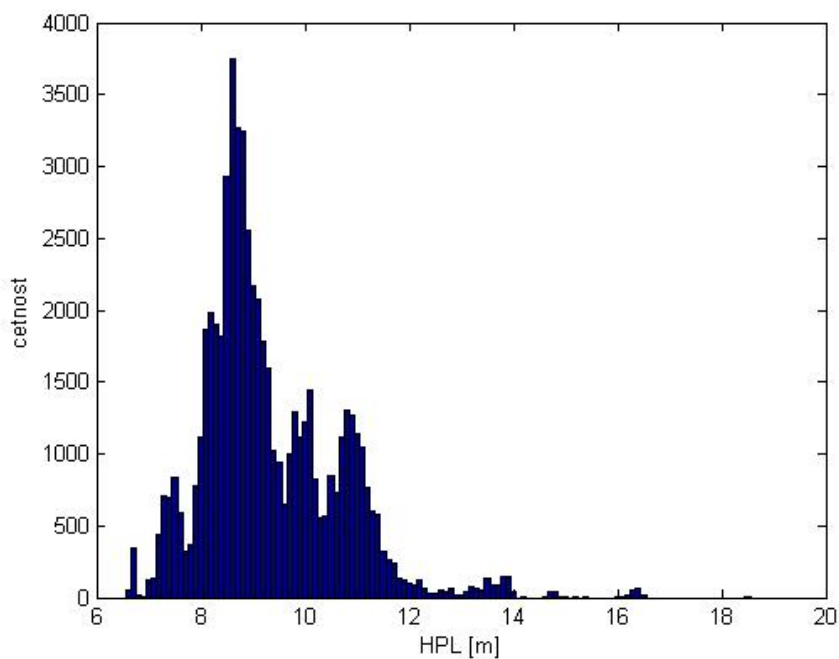


Obr.2. Horizontální chyba polohy HPE a horizontální úroveň zabezpečení HPL

V grafu je vidět, že skutečná chyba určení polohy (HPE) se pohybuje přibližně v intervalu 0 - 2 m. HPL se pohybuje většinou v rozmezí 8-12 m, ale v některých krátkých úsecích se její hodnota náhle zvyšuje někdy až na 18 m i když skutečná hodnota chyby nijak výrazně nestoupá. Na tyto anomálie v naměřených datech je podrobněji zaměřena část 6.4 Úsek se zvýšenou hodnotou HPL.



Obr. 3. Histogram HPE

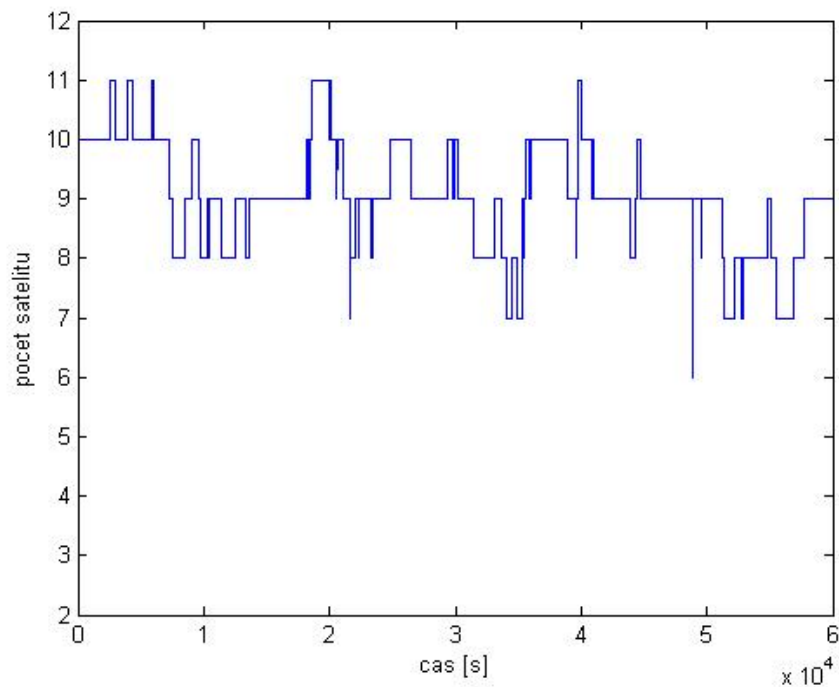


Obr. 4 Histogram HPL

Na obr. 3 je histogram HPE, který ukazuje, že nejvyšší četnost má chyba okolo 1,2 metru a že horizontální chyba polohy má přibližně Rayleighovo rozložení pravděpodobnosti. Na obr. 4 je pro porovnání uveden histogram hodnot HPL,

ze kterého vyplývá, že nejvyšší četnost má hodnota HPL přibližně 8,3 metru. Ojediněle se vyskytují i zvýšené hodnoty okolo 14, 16 i 18 metru, jak je vidět i na obr. 2.

6.3 Počet viditelných satelitů

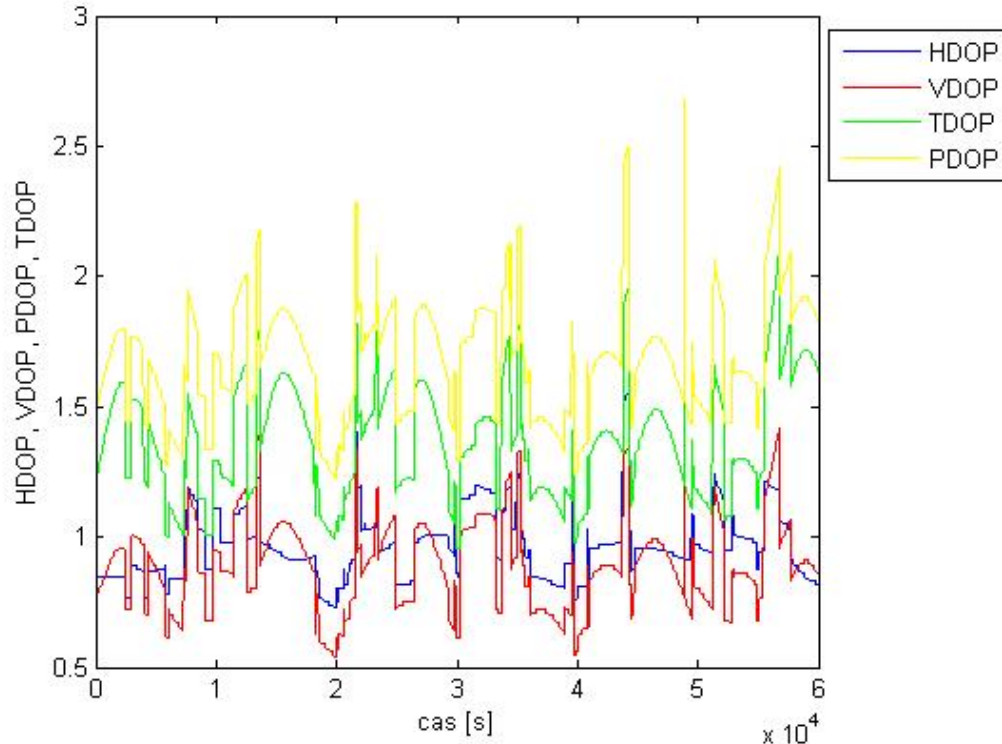


Obr. 5 Počet GPS satelitů použitých k výpočtu polohy

Na obr. 5 je zachycen průběh počtu GPS satelitů použitých pro výpočet parametrů v průběhu měření. Je vidět že jejich počet většinou kolísá mezi 8 - 11, v některých úsecích ale klesá na 7 a v jednom okamžiku dokonce jen na 6 satelitů. Průběh počtu satelitů použitých při výpočtu je periodický s periodou přibližně 24 hodin. V dalších měřeních bylo ověřeno, že náhlé snížení počtu satelitů použitých při výpočtu polohy přichází náhodně. Jejich počet se někdy sníží až na 4, což je úplné minimum, kdy se dá ještě poloha vůbec určit, ale už jen se značnou chybou. Pro detailnější analýzu náhlých snížení počtu satelitů použitých k výpočtu polohy, by bylo opět nutné znát konkrétní algoritmy použité v přijímačích Septentrio PolaRx3.

V grafu na obr. 6 jsou průběhy čtyř parametrů, které udávají zhoršení kvality určení polohy a zhoršení přesnosti času systému v závislosti na rozložení satelitů na obloze (DOP - Dilution of precision). Vždy platí, že čím vyšší je hodnota parametru, tím horší je konstelace satelitů a tím je horší také přesnost. HDOP udává úroveň horizontální přesnosti určení polohy, VDOP vertikální přesnosti určení polohy, PDOP celkovou přesnost určení polohy a TDOP přesnost času systému. Z grafu je jasně patrné, jak jsou tyto parametry korelované. Při porovnání s obr. 5 je vidět, jak

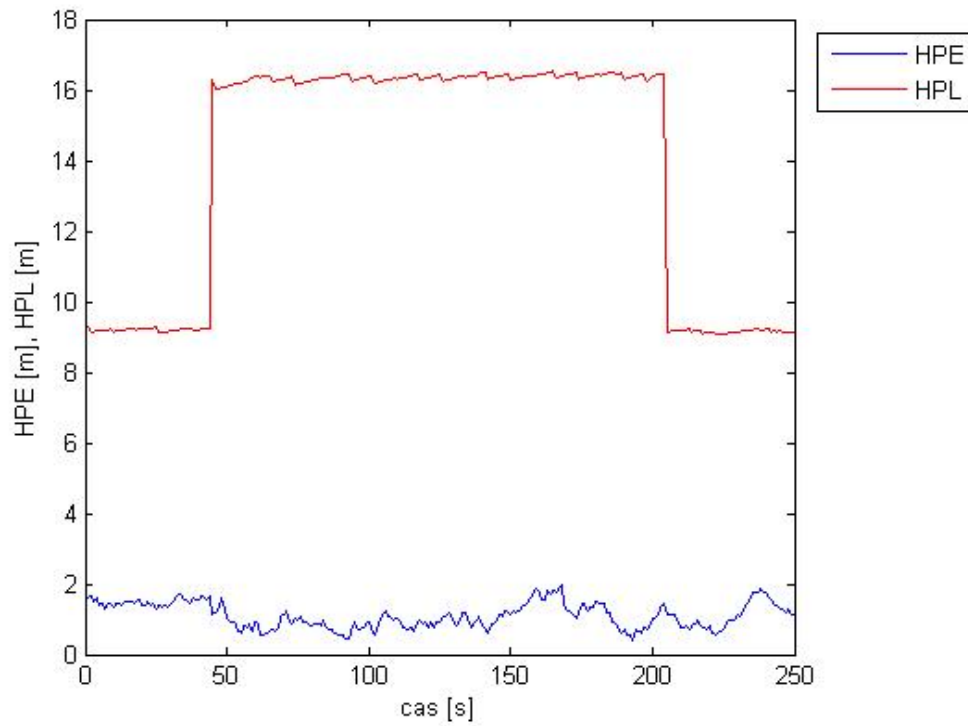
při poklesu počtu satelitů použitých k výpočtu hodnota jednotlivých parametrů (HDOP, VDOP, TDOP, PDOP) stoupá.



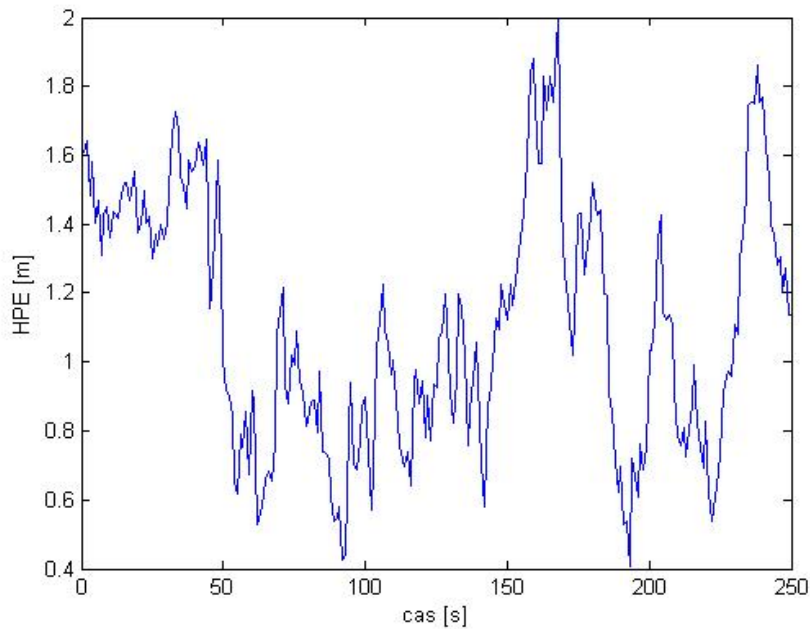
Obr. 6 Parametry HDOP, VDOP, PDOP a TDOP

6.4 Úsek se zvýšenou hodnotou HPL

Na obr. 7 je detailní přiblížení jednoho z úseků, kde HPL náhle stoupá. Je vidět, že hodnota HPL se skokově zvýšila z přibližně 8,6 metrů na přibližně 16 metrů. Na této úrovni zůstává 150 sekund a poté se skokově vrací zpět na hodnotu 8,6 metrů. Přitom skutečná hodnota chyby určení polohy (HPE) se pořád pohybuje v intervalu 0 - 2 metrů. Zobrazený úsek obsahuje 250 vzorků, je tedy v čase dlouhý 250 sekund a po celou dobu trvání tohoto úseku je k výpočtu parametrů použit konstantní počet satelitů a to 9. Zdá se, že hodnota HPL je v tomto okamžiku z neznámých důvodů až příliš vysoká. Na obr. 8 je zobrazen pouze průběh skutečné horizontální chyby určení polohy (HPE) v tomto okamžiku. Je vidět, že HPE kolísá v rozmezí přibližně 0,4 - 2 metrů. HPE v tomto úseku nikdy nepřekročí hodnotu 2 metry, zdá se tedy, že zvýšení hodnoty HPL v tomto úseku dat až na 16 metrů je neopodstatněné. Pro detailnější analýzu by bylo potřeba znát konkrétní algoritmy použité v přijímači Septentrio PolaRx3, konkrétně, jaký je přesně vztah mezi HPL a HPE. Bez znalosti použitých algoritmů nelze zhodnotit příčiny náhlých zvýšení parametru HPL, které se vyskytují v naměřených datech. Tyto skokovité, náhlé zvýšení hodnoty HPL byly pozorovány i při ostatních provedených měřeních, zdá se tedy, že se vyskytují poměrně často.



Obr. 7 Detailní přiblížení úseku s vysokou hodnotou HPL



Obr. 8 Průběh HPE v úseku se zvýšenou hodnotou HPL

7 Závěr

Při experimentálním zkoumání vlastností systému EGNOS byly pozorovány některé zvláštnosti v chování systému (průběh parametru HPL). Je tedy potřeba detailněji prozkoumat systém a ověřit jeho správnou funkci. Hlavně je potřeba se zaměřit na otázku integrity systému EGNOS.

Následující aktivity budou směřovat k dalšímu prozkoumání skutečného chování systému EGNOS pomocí dalších měření v odlišných módech nastavení SBAS přijímače. Například zkoumání rozdílů při použití pouze satelitů GPS, při použití satelitů GPS i GLONASS, nebo v budoucnu i satelitů systému Galileo. Systém GLONASS ovšem není součástí certifikace systému EGNOS pro použití v avionických bezpečnostně relevantních systémech, použití satelitů GLONASS může tedy vést jen ke zvýšení přesnosti, ale jejich použití zatím nemůže vést ke zlepšení integrity. Je také potřeba detailněji prozkoumat mechanismy výpočtu informací o integritě systému (výpočet HPL). Případně pak porovnat výsledky dosažené při zpracování naměřených dat v softwaru MATLAB s výsledky získanými zpracováním naměřených dat pomocí programu PEGASUS. To je specializovaný software pro zpracování dat systému EGNOS, který je stále ve vývoji a je vyvíjen firmou EUROCONTROL. Tento software je určen právě pro ověření činnosti systému EGNOS a na podporu jeho certifikace.

8 Použitá literatura

- [1] Filip, A.: Which of EGNOS Navigation Modes for Railway Signalling: Precision Approach or En Route? International Symposium on Certification of GNSS Systems & Services (CERGAL 2010), Rostock, Germany, April 28-29, 2010.
- [2] Filip, A. Integrita bezpečnosti a spolehlivost systémů EGNOS a Galileo [online]. 2011 [cit. 3.1.2011] Dostupné na: <http://www.tudc.cz/lis/ceske_budejovice_2009.pdf>.
- [3] RTCA DO-229D – Minimum operational performance standards for GPS WAAS Airborne Equipment. RTCA, Inc., Washington, D.C., 2006.
- [4] Hloušek, P. Bezpečnost moderních zabezpečovacích systémů [online]. 2010 [cit. 28.12.2010] Dostupné na: <<http://www.vlaky.net/zeleznice/spravy/003099-Bezpecnost-modernich-zeleznicnich-zabezpecovacich-systemu.asp?print=1>>.
- [5] Šunkevič, P. Galileo [online]. 2010 [cit. 29.12.2010] Dostupné na: <<http://www.czechspace.cz/cs/ckk/galileo>>.

- [6] EGNOS: European Geostationary Navigation Overlay Service [online]. 2011 [cit. 2.1.2011] Dostupné na:
<www.egnospro.esa.int/Publications/ESA_EGNOS_br284_2009.pdf>.
- [7] Filip, A., Beugin, J., Marais, J., Mocek, H.: Interpretation of the Galileo Safety-of-Life Service by Means of Railway RAMS Terminology. Trans on Transport Sci., vol. 1, no. 2, 2008, pp. 61-67. ISSN 1802-971X.

Praha, březen 2011

Lektoroval: Ing. Petr Kolář
ČD, a.s., GŘ - Projektová kancelář