

Aleš Filip<sup>1</sup> a Jiří Suchánek<sup>2</sup>

## Certifikace satelitního signálu GALILEO pro železniční aplikace

Klíčová slova: *GALILEO, GNSS, GPS, lokální prvky, zabezpečovací technika*

### 1. ÚVOD

Zástupci evropských železnic a železničního průmyslu v minulých letech specifikovali základní požadavky na vlakový polohový lokátor založený na Globálním navigačním satelitním systému (GNSS) v rámci mezinárodních skupin expertů (GNSS Rail Advisory Forum v Bruselu v období 1999-2000, UIC GALILEO Applications for Rail v Paříži v období 2005-2006) [1], [2].

Aby však bylo možné využívat GNSS a zejména pak evropský navigační systém GALILEO v železničních telematických systémech včetně bezpečnostních aplikací, je nutné rovněž velmi jasně specifikovat, jaká měřítka kvality z hlediska železnice by měl systém GNSS/ GALILEO dosáhnout a garantovat. Teprve pomocí těchto měřítek bude možné provést řádnou analýzu spolehlivosti a bezpečnosti podle příslušných standardů CENELEC ČSN EN 50126 [3], ČSN EN 50128 [4], ČSN EN 50129 [5], ČSN EN IEC 51608 (1-7) [6], atd., a rozhodnout o potřebné architektuře GNSS. Cílem tohoto článku je nastínit způsob, jakým by kritéria kvality pro satelitní signál mohla být odvozena, a co je třeba učinit pro to, aby byla garantována.

### 2. DEFINICE PROBLÉMU

Současným problémem je, že odvození měřítek kvality satelitního signálu GPS/GNSS/GALILEO (tj. přesnost, integrita, kontinuita, pohotovost a další související metriky) [7], [8], [9] vychází zejména z letecké filozofie bezpečnosti definované pomocí tzv. konceptu požadované výkonnosti RNP (Required Navigation Performance) pro jednotlivé fáze letu. Avšak tato avionická měřítkva kvality SIS nekorespondují se železničními měřítky, jak je zřejmé ze standardů [3]-[6]. Absence metodiky pro převod ukazatelů kvality a standardů souvisejících s certifikací GALILEO doposud brání na mezinárodní úrovni důslednému posouzení míry použitelnosti systému GALILEO pro železniční telematické aplikace včetně aplikací bezpečnostně relevantních. Rovněž absence jasných železničních požadavků na GALILEO působí v současné době potíže při vývoji přijímače GALILEO SoL (Safety of Life) v rámci evropského projektu GIRASOLE (nositel Alcatel Alenia Space).

---

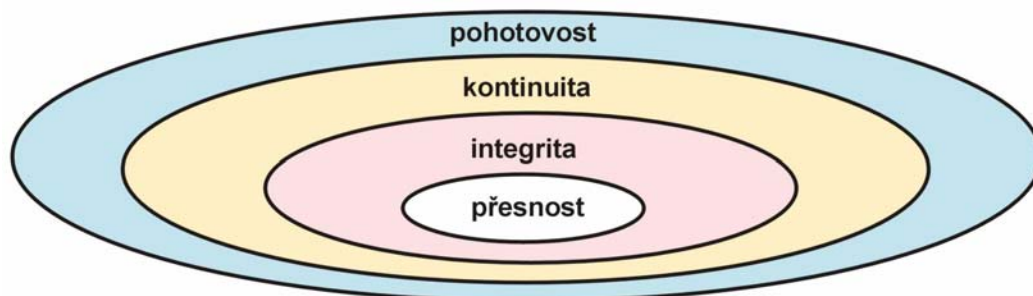
<sup>1</sup> Doc. Ing. Aleš Filip, CSc., VUT FEL Brno 1983 - obor technická kybernetika, ČVUT FEL Praha 1988 - vědecká aspirantura, výzkum v oblasti ultrarychlých optických telekomunikací na University of Tokyo 1993-1995, Univerzita Pardubice DFJP 2004 – habilitován docentem. Vedoucí specializovaného střediska TÚČD Laboratoře inteligentních systémů v Pardubicích. Zabývá se využitím satelitní navigace pro železniční aplikace.

<sup>2</sup> Ing. Jiří Suchánek, ČVUT FEL Praha 1979 - obor sdělovací elektrotechnika. Spolupracuje při využití systému GALILEO pro železniční telematické aplikace. Od r. 2005 ředitel TÚČD.

### 3. PŮVOD POŽADAVKŮ NA KVALITU SATELITNÍHO SIGNÁLU

V roce 1993 komise pro leteckou navigaci Mezinárodní organizace pro civilní letectví (ICAO) požádala AWOP (All Weather Operations Panel) s cílem prověřit možnost rozšíření konceptu RNP, který byl původně určen pouze pro let na dané letové hladině (En-route), o operace přistání a vzletu. Tehdy bylo doporučeno zahrnout do RNP tato hlavní měřítka kvality SIS: přesnost, integritu, kontinuitu (nepřetržitost) a pohotovost.

**Přesnost** - je definována v termínech chyby navigačního systému NSE (Navigation System Error) jako rozdíl mezi odhadnutou polohou a skutečnou polohou za bezchybných podmínek, obvykle vyjádřené jako  $2\sigma_{NSE}$  (95%). Je to statistické vyjádření chyby. Přesnost je jediný primární ukazatel kvality RNP, který je samostatný. Ten tvoří základ pro všechny ostatní ukazatele kvality RNP – viz obr. 1.



Obr. 1: Vztah mezi ukazateli kvality signálu GNSS

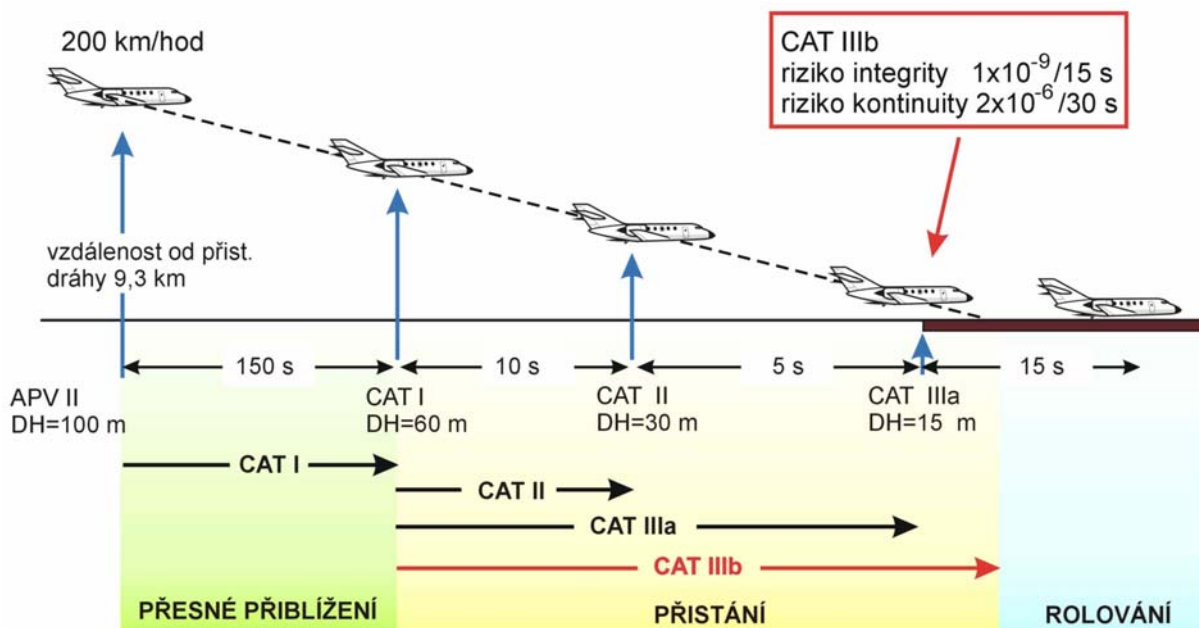
**Integrita** - je schopnost systému poskytovat včasné varování uživatelům, když by systém neměl být použit pro navigaci. Integrita se obvykle vyjadřuje pomocí tzv. rizika integrity (IR), což je pravděpodobnost, že vypočítaná chyba určení polohy přesáhne odpovídající mez výstrahy AL (Alert Limit), aniž by o tom byl uživatel informován v daném časovém intervalu TTA (Time-To-Alarm), např. 1 s. Riziko integrity se vždy týká nedetekovaných poruch. Integrita se uvádí za určitý interval (Exposure Time), což je obvykle trvání specifické operace.

**Kontinuita** - je pravděpodobnost provádění navigace bez přerušení během daného časového intervalu. Kontinuita je vyjádřena pomocí termínu rizika kontinuity (CR), což je maximální přípustná pravděpodobnost neplánovaného přerušení služby pro uvažovaný časový interval. CR je, jednoduše řečeno, způsobena poruchou systému, která byla detekovaná a ohlášená nebo falešnou výstrahou při správné funkci systému.

**Pohotovost** - je procento času, během kterého jsou služby navigačního systému poskytované s požadovanou přesností, integritou a kontinuitou. Systém může mít vysokou pohotovost, ale současně i velmi malou kontinuitu z důvodu četných, velmi krátkých přerušení.

Požadavky na satelitní signál SIS (Signal-In-Space) GALILEO pro bezpečnostní aplikace SoL (Safety of Life) jsou následující:  $IR=2.0 \times 10^{-7}$  v jakémkoliv intervalu 150 s,  $CR=8,0 \times 10^{-6}$  v jakémkoliv intervalu 15 s, pohotovost služby 99,5%, TTA=5,2 s, horizontální mez výstrahy (HAL)=12 m, vertikální mez výstrahy (VAL)=20 m [7]. Očekává se, že pozemní rozšíření satelitního systému GNSS (tzv. lokální prvky) poskytnou SIS s

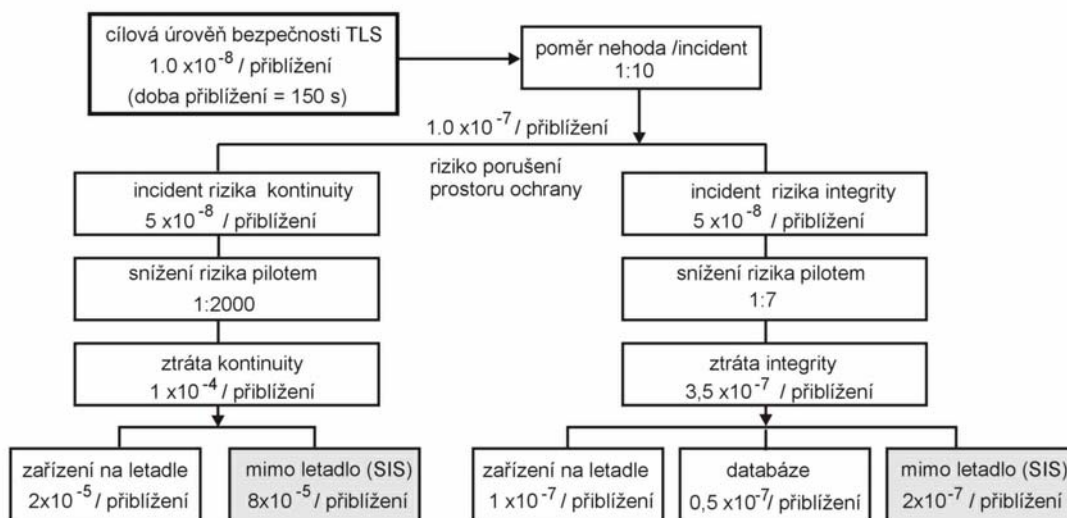
$IR=1,0 \times 10^{-9}$  v jakémkoliv intervalu 30 s,  $CR=2,0 \times 10^{-6}$  v jakémkoliv intervalu 30 s a  $TTA = 2$  s [9] – viz tab. 1.



Pozn: DH (Decision Height) - výška pro rozhodování

Obr. 2: Znázornění operací přesného přiblížení (CAT I) a přistání (CAT II, CAT III)

Alokace rizika v letectví vychází z tzv. cílové úrovně bezpečnosti TLS (Target Level of Safety), pro kterou byla experty stanovena (na základě statistických údajů o nehodách) hodnota  $TLS=10^{-7}$ /hod. Ze znalosti průměrné délky letu (1,5 hod), druhu operací prováděných během letu od vzletu až po přistání, míry jejich nebezpečnosti a průměrné doby trvání operací byla provedena alokace rizika pro tyto jednotlivé operace. Z této analýzy vyplynulo, že cílová pravděpodobnost nehody při konečném přiblížení (CAT I, CAT II, CAT III – viz obr. 2) může být nejvýše  $1 \times 10^{-8}$  / přiblížení. Potom podle stromu rizik (viz obr. 3) byly odvozeny požadavky týkající se integrity a kontinuity SIS [13].



Obr. 3: Odvození požadavků na GNSS SIS pro konečné přiblížení letadla dle CAT I

Na obr. 3 je pro operaci CAT I alokováno riziko integrity SIS s hodnotou  $2 \times 10^{-7} / 150$  s a riziko kontinuity SIS s hodnotou  $8 \times 10^{-5} / 15$  s. Podobně lze odvodit nejnáročnější požadavky na ukazatele kvality SIS pro operaci přistání CAT IIIb, kde pro SIS je vyžadováno riziko integrity  $1 \times 10^{-9} / 30$  s horizontálně či  $1 \times 10^{-9} / 15$  s vertikálně (tab. 1). Riziko kontinuity by pro operaci CAT IIIb nemělo překročit hodnotu  $2 \times 10^{-6} / 30$  s v horizontálním či  $2 \times 10^{-6} / 15$  s ve vertikálním směru. Požadavky na SIS pro další operace jsou uvedeny rovněž v tab. 1.

Tabulka 1: Požadavky na satelitní signál pro přiblížení letadel s vertikálním naváděním [9]

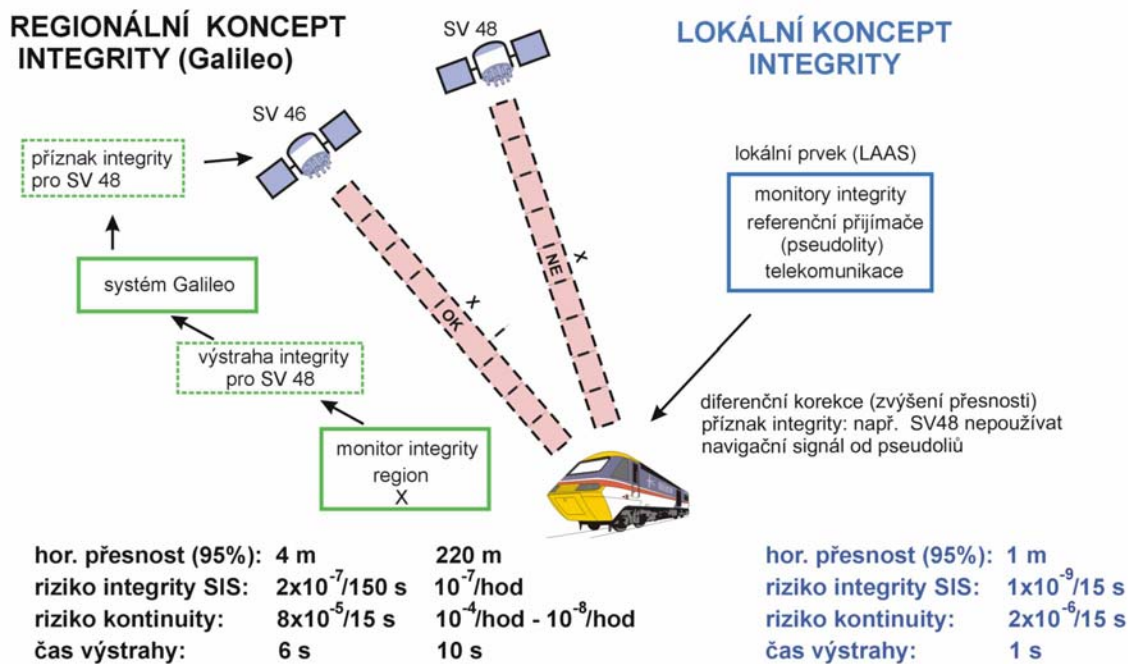
		Operace			
		APV II	CAT I	CAT II/ CAT IIIa	CAT IIIb (kontakt)
Přesnost (95%)	horizontální	16 m	16 m	5 m	5 m
	vertikální	8 m	4 m	2,9 m	2,9 m (2 m)
Mez výstrahy	horizontální (HAL)	40 m	40 m	17 m	17 m
	vertikální (VAL)	20 m	10 m	10 m	10 m (5,3 m)
Riziko integrity	horizontální	$2 \times 10^{-7} / 150$ s	$2 \times 10^{-7} / 150$ s	$1 \times 10^{-9} / 15$ s	$1 \times 10^{-9} / 30$ s
	vertikální				$1 \times 10^{-9} / 15$ s
Riziko kontinuity	horizontální	$8 \times 10^{-6} / 15$ s	$8 \times 10^{-6} / 15$ s	$4 \times 10^{-6} / 15$ s	$2 \times 10^{-6} / 30$ s
	vertikální				$2 \times 10^{-6} / 15$ s
Čas do výstrahy		6 s	6 s	2 s	2 s (1 s)
Pohotovost		0,99 až 0,999999	0,99 až 0,999999	0,99 až 0,999999	0,99 až 0,999999
Satelitní navigační systém		GPS nebo Galileo	WAAS/ EGNOS	LAAS	LAAS

#### 4. GLOBÁLNÍ, REGIONÁLNÍ A LOKÁLNÍ KONCEPT INTEGRITY

Navzdory skutečnosti, že americký systém GPS byl úspěšně použit v četných aplikacích, stále existuje riziko, že se může objevit v systému selhání nebo jiná anomálie. Řídící segment GPS sice monitoruje satelity a SIS, ale je schopen poskytnout informaci o integritě se zpožděním až 30 minut. Pro železniční uživatele je pochopitelně toto zpoždění nepřijatelné. Kromě toho systém GPS negarantuje kontinuitu služby evropským železničním uživatelům. Dále budoucí služby SoL (Safety of Life) systému GALILEO nebo regionálních systémů SBAS (Satellite Based Augmentation Systems), jako je např. evropský EGNOS nebo americký WAAS, nejsou schopny poskytnout uživateli informaci o použitelnosti SIS s dostatečně nízkým rizikem integrity, krátkým časem výstrahy TTA (Time-To-Alarm) a nízkou úrovní horizontální meze výstrahy HAL (Horizontal Alert Limit), které jsou nutné pro účely železniční zabezpečovací techniky. Regionální SBAS systémy jsou schopné poskytnout prostřednictvím svého pozemního kanálu integrity GIC (Ground Integrity Channel) a geostacionárních satelitů (AOR-E, IOR, Artemis, ...) následující integritu:  $IR = 2 \times 10^{-7} / 150$  s,  $TTA = 6$  s,  $HAL = 11$  m. Avšak požadavky zabezpečovací techniky jsou náročnější:  $THR = 10^{-9}$  /hod pro úroveň SIL 4,  $TTA \leq 1$  s, přesnost 1 m (95%) a HAL 2.5 m [1]. Kromě toho výše uvedené globální a regionální systémy nejsou schopné monitorovat poruchy SIS v důsledku lokálních účinků.

Avšak ukazatele kvality GNSS SIS (přesnost, integrita, kontinuita a pohotovost) mohou být zlepšeny použitím lokálních prvků GNSS, které zahrnují lokální monitor integrity satelitního signálu, redundantní referenční přijímače a v případě potřeby rovněž pseudolity (tj. pozemní vysílače satelitního navigačního signálu). Přínosy lokálních prvků jsou následující:

1) úplné lokální řízení bezpečnosti a vysoký stupeň nezávislosti na globálním systému; 2) vyloučení komunikační linky mezi lokálními prvky a globálním systémem GALILEO; 3) dosažení přesnosti 1 m (95%); 4) dosažení krátké doby do výstrahy (TTA, tj. Time-To-Alarm) 1 s a snížení četnosti rizika integrity na úroveň  $1 \times 10^{-9}/30$  s ; 5) vysoká kontinuita služby a pohotovost. Na druhé straně tento lokální koncept předpokládá, že lokální prvky budou certifikovány a také provozovány podle specifických předpisů. Porovnání principů globálního a lokálního konceptu GNSS je na obr. 4.



Obr. 4: Regionální a lokální koncept integrity GNSS SIS

Pracoviště TÚČD - Laboratoř inteligentních systémů - si je vědomo významu lokálních prvků GNSS pro aplikace satelitní navigace v železniční zabezpečovací technice, a proto připravilo a v současné době již řeší výzkumný projekt reg. č. 102/06/0052 s názvem "Lokální prvky GNSS pro železniční zabezpečovací techniku" na základě grantu uděleného Grantovou agenturou ČR. Spolunositelem je Univerzita Pardubice, ÚEI (2006 – 2008).

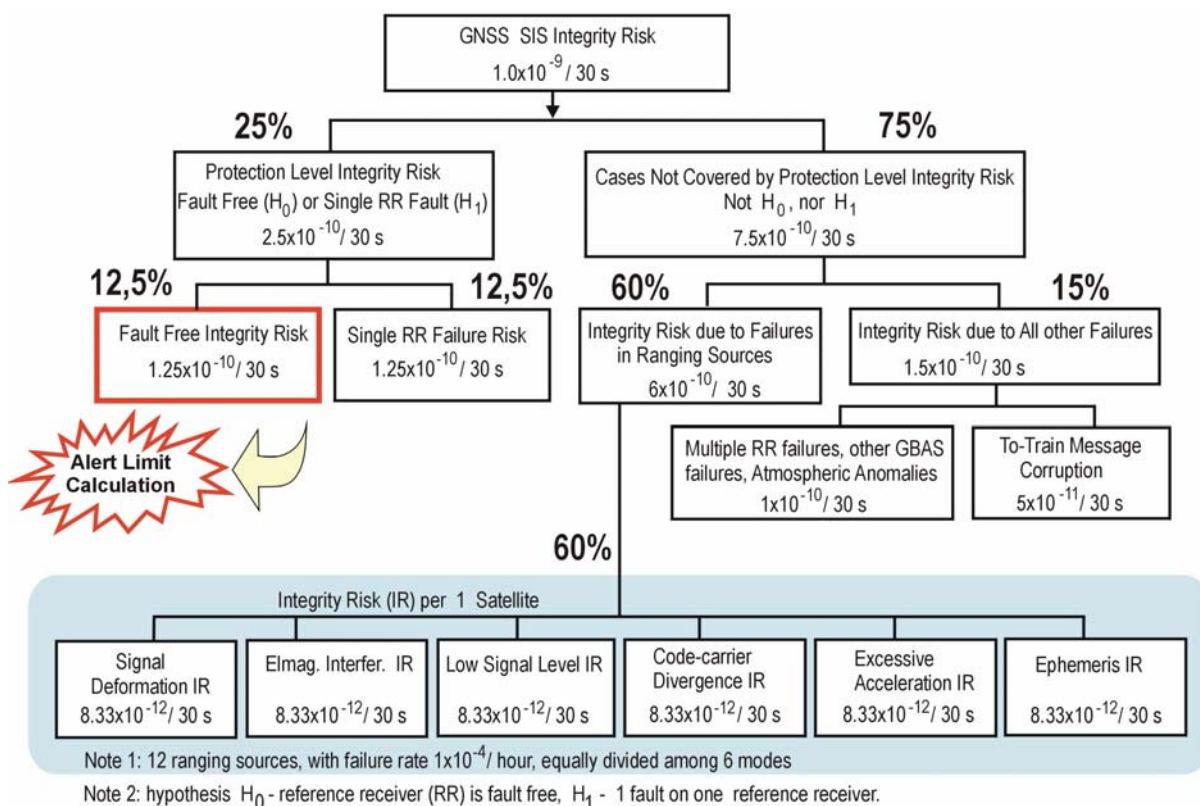
Ke konci roku 2006 pracoviště TÚČD získá měřicí systém s pseudolity, který bude sloužit k určování polohy v místech, kde to současný systém GPS neumožňuje - např. v tunelech, hlubokých traťových zářezech, apod.

## 5. NÁSOBITELÉ SELHÁNÍ DETEKCE A ÚROVNĚ ZABEZPEČENÍ

V této části článku je uveden příklad alokace rizika integrity pro nejnáročnější letecké operace – přistání dle CAT III s využitím lokálních prvků s redundantními referenčními přijímači. Rovněž je uveden výpočet základních ukazatelů nutných pro ohodnocení rizika určení polohy vlaku na základě GNSS s lokálními prvky.

Palubní přijímač GNSS počítá úroveň zabezpečení  $PL$  (Protection Level), která ohraničuje chybu polohy s požadovanou pravděpodobností. Úrovně zabezpečení jsou počítány na základě dvou hypotéz: 1) bezchybná hypotéza  $H_0$  a 2) hypotéza  $H_1$ , že pozemní referenční přijímač selhal. Hypotéza  $H_0$  se týká normálních podmínek měření ve všech referenčních přijímačích a na všech dálkoměrných zdrojích (satelitech). Každá úroveň zabezpečení  $PL$  je porovnána s mezí výstrahy  $AL$ , což je maximální dovolená chyba polohy, která může být překročena s pravděpodobností udávanou úrovní zabezpečení.

Většina alokovaného rizika integrity SIS (tj. 75%) je alokována případům nepokrytým hypotézami ani  $H_1$ , ani  $H_0$  (obr. 5). Tato “ne”  $H_1 / H_0$  rizika musí být dále přerozdělena poruchám v pozemním systému a dálkoměrných zdrojích. Alokace rizika týkající se poruch dálkoměrných zdrojů zahrnuje vlivy jako deformace signálu, elektromagnetické rušení, nízká úroveň signálu, divergence kód-nosná, chyby hodin satelitů, chyby efemeridů.



Obr. 5: Alokace rizika integrity pro operaci CAT III [9]

Zbytek rizika integrity SIS (tj. 25%) je alokována riziku integrity úrovně zabezpečení. Úroveň zabezpečení při absenci závady  $PL_{H_0}$  významně omezuje geometrii satelitů. Proto úroveň výstrahy  $AL$  není překročena v důsledku ojedinělých závad nýbrž chyb při absenci závad. Na druhé straně úroveň zabezpečení  $PL_{H_1}$  se pokouší odhadnout průměrnou korekci v důsledku závady na měření  $j$ -tým referenčním přijímačem pro  $i$ -tý satelit. Pro každý typ úrovně zabezpečení požadovaná pravděpodobnost ohraničení celkové příčné chyby je poskytována násobiteli selhání detekce  $K_{ffmd}$  (případ bez závady) a  $K_{md}$  (případ se závadou). Násobitelé selhání detekce jsou určeny požadavky systému na integritu SIS. Závisí na počtu  $M$  referenčních přijímačů GNSS, jak je zřejmé podle rovnic (1) a (2) [8], [9]:

$$K_{ffmd} = Q^{-1}\left(\frac{P_{ffmd}}{2}\right), \quad \text{kde} \quad P_{ffmd} = \frac{P_{lat\_pl}(MI)}{(M+1) \cdot P(H_0)} \quad (1)$$

a

$$K_{md} = Q^{-1}(P_{md}), \quad \text{kde} \quad P_{md} = \frac{M \cdot P_{lat\_pl}(MI)}{(M+1) \cdot P(H_1)} \quad (2)$$

$P(H_1)$  je apriorní pravděpodobnost jedné závady na referenčním přijímači. Ta by neměla přesáhnout  $10^{-5}$  / operaci podle [9].  $Q(x)$  je jednostranná koncová pravděpodobnost Gaussova rozdělení za hodnotou  $x$ .  $P_{lat\_pl}(MI)$  je celková pravděpodobnost mylné informace (MI), tj. pro  $NSE > PL$ , která je alokovaná hypotézám  $H_0$  and  $H_1$  v příčném směru. Platí, že apriorní pravděpodobnost při podmínce absence poruchy  $P(H_0) \sim 1$ . Jestliže se předpokládá, že celkové riziko integrity je  $1,0 \times 10^{-9}$  / 30 s (SIL 4), potom riziko alokované k úrovni zabezpečení (tj. 25%) je  $2,5 \times 10^{-10}$  / 30 s. Rovnoměrná alokace mezi vertikální a příčný směr poskytne  $P_{lat\_pl} = 1,25 \times 10^{-10}$  / 30 s. Pro lokální prvek GNSS se třemi referenčními přijímači ( $M = 3$ ) z rovnic (1) a (2) obdržíme  $K_{ffmd} = 6,64$  and  $K_{md} = 3,91$ . Příčné úrovně zabezpečení  $LPL_{H0}$  a  $LPL_{H1}$  jsou úměrné  $K_{ffmd}$  a  $K_{md}$ , jak je zřejmé z rovnic (3) a (4) [8]:

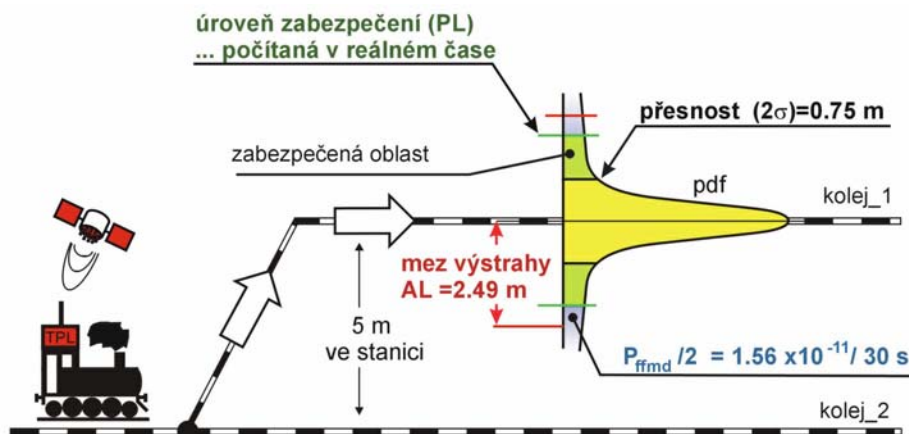
$$LPL_{H0} = K_{ffmd} \sqrt{\sum_{i=1}^N s_{i\_lat}^2 \sigma_i^2} = K_{ffmd} \cdot \sigma_{lat,H0} \quad (3)$$

$$LPL_{H1,j} = \left| \sum_{i=1}^N s_{i\_lat} B_{i,j} \right| + K_{md} \cdot \sigma_{lat,H1} \quad (4)$$

Kde  $N$  je počet satelitů použitých pro výpočet polohy,  $s_{i,lat}$  je příčný koeficient pro  $i$ -tý satelit ve výpočtu polohy,  $\sigma_i$  směrodatná odchylka pseudovzdálenosti,  $\sigma_{lat,H0}$  je směrodatná odchylka polohy za podmínky absence závady,  $B_{i,j}$  je tzv.  $B$  hodnota (charakterizuje odchylku v korekci pseudovzdálenosti z důvodu vyloučení  $j$ -tého referenčního přijímače pro  $i$ -tý satelit a  $j$ -tý referenční přijímač) a  $\sigma_{lat,H1}$  je standardní odchylka chyby polohy za podmínky “s poruchou”. Protože nevíme, která hypotéza je v daném okamžiku pravdivá, ( $H_0$  or  $H_1$ ), hodnota  $LPL$  je zvolena jako maximum z  $LPL_{H0}$  a  $LPL_{H1}$ , t.j.  $LPL = \max\{PL_{H0}; PL_{H1}\}$ .

## 6. PŘÍKLAD URČENÍ MEZE VÝSTRAHY

Vztah mezi  $AL$  and  $\sigma_{NSE}$  je daný jako  $AL = \sigma_{NSE} \cdot K_{ffmd}$ . Jestliže např. přesnost mobilního GNSS přijímače je 1 m ( $2\sigma_{NSE}$ ), potom  $AL$  pro požadovaný  $IR$   $1,0 \times 10^{-9}$  / 30 s dosahuje



Obr. 6: Vztah mezi přesností, rizikem integrity, úrovní zabezpečení (PL) a mezí výstrahy (AL)

3,32 m. Pro tutéž hodnotu  $\sigma_{NSE}$ , ale pro  $IR = 1,0 \times 10^{-8} / 30$  s,  $K_{ffmd}$  se sníží jen na hodnotu 6,29 a odpovídající  $AL$  se sníží na 3,15 m. V případě, kdy přijímač GNSS má přesnost 0,7 m, potom pro  $IR = 1,0 \times 10^{-9} / 30$  s mez výstrahy  $AL$  dosáhne 2,32 m. Tyto skutečnosti by měly být uvažovány zejména v případě, když diferenční přijímač je zamýšlený pro rozlišení paralelních kolejí na výhybce, kde vzdálenost mezi osami paralelních kolejí je přibližně 5 m - viz obr. 6.

Je nutné poznamenat, že z důvodu jednoduchosti byl ve výše uvedených výpočtech uvažován jen samostatný GNSS (ne inerciální senzory). Inerciálních a další senzory (odometr, akcelerometr, Dopplerův rychloměr, gyroskop, apod.) mohou významně zlepšit jak integritu, tak kontinuitu určení polohy.

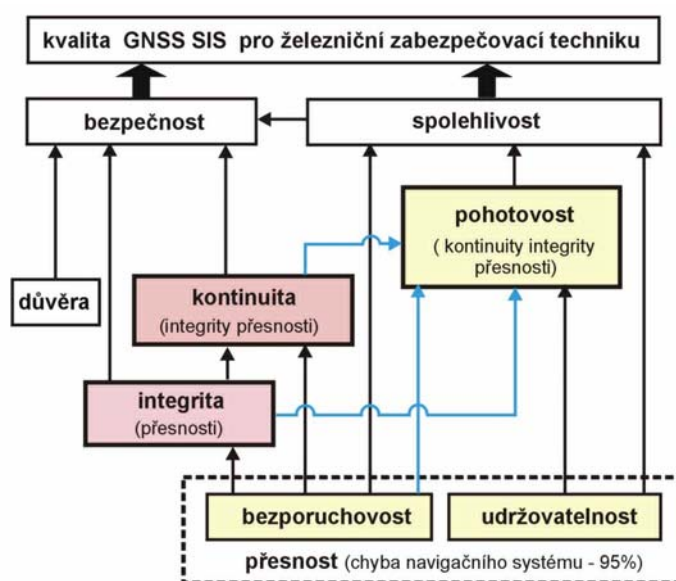
## 7. UKAZATELE KVALITY GNSS SIS A ZABEZPEČOVACÍHO SYSTÉMU

Vztah mezi hlavními atributy kvality zabezpečovacího systému je uveden na obr. 7 [14].



Obr. 7: Vzájemný vztah mezi hlavními atributy kvality zabezpečovacího systému

Na základě skutečností uvedených v části 3. tohoto článku lze zahrnout ukazatele kvality GNSS SIS mezi ukazatele kvality zabezpečovacího systému na principu GNSS dle obr. 8.



Obr. 8: Vzájemný vztah mezi atributy kvality zabezpečovacího systému na principu GNSS [10]



Je však nutné poznamenat, že stále existuje řada odlišností a rozporů v použitých definicích atributů kvality satelitní navigace a v železničních zabezpečovacích systémech.

Příkladem je definice integrity bezpečnosti podle normy ČSN EN 50129 [5], která říká, že je to *schopnost systému vztahujícího se k bezpečnosti provádět požadované bezpečnostní funkce za všech stanovených podmínek, ve stanoveném pracovním prostředí a po stanovenou dobu*. To znamená, že jestliže určení polohy vlaku po dobu daného intervalu je považována jako bezpečnostní funkce, potom zřejmě včasné varování týkající se poruchy SIS, jak je uvedeno v letecké definici integrity, je nedostatečné [11].

Do současné doby nebyl samostatný požadavek na kontinuitu v železniční zabezpečovací technice třeba. Požadavek kontinuity byl poprvé zaveden během vývoje rádiových systémů pro přesné přiblížení letadel dle kategorie III ke konci 60. let. Avionický požadavek kontinuity služby se týká bezpečnosti, protože v některých nejkritičtějších fázích letu neplánované přerušení určení polohy by mohlo být nebezpečné. Kontinuita není samostatný ukazatel, který má nějaký smysl sám o sobě. Kontinuita závisí na přesnosti a integritě. Otázka je, jak moc kontinuity SIS je skutečně třeba pro železniční bezpečnostně relevantní funkce, protože požadavek kontinuity významně ovlivňuje cenu satelitního navigačního systému.

Další otázkou je, jakým způsobem interpretovat čas ohrožení (Exposure Time), který je použit při specifikaci rizika integrity GNSS SIS. V letectví je čas ohrožení (či vystavení) daný délkou trvání dané fáze letu. Čili riziko integrity je definováno jako maximální přípustná pravděpodobnost nebezpečné poruchy po dobu trvání dané operace. Např. pro přesné přiblížení dle CAT I je tento interval ohrožení 150 s. Naproti tomu pro stejnou operaci CAT I je interval ohrožení pro kontinuitu pouze 15 s. Důvodem je, že z hlediska kontinuity je nejnebezpečnějších posledních 15 s před tzv. rozhodovací výškou DH (Decision Height), během kterých se pilot musí rozhodnout (podle viditelnosti, atd.), zda pokračovat v přistání či tuto operaci přerušit a přejít vyšší záložní letovou hladinu. Integrita bezpečnosti v železniční zabezpečovací technice se vyjadřuje odlišně – četností nebezpečné poruchy za hodinu.

V souvislosti s definicí integrity bezpečnosti pro GNSS SIS bude rovněž nutné posoudit vliv techniky vyhlazování pseudovzdálenosti (Code-carrier Smoothing) na délku časového intervalu mezi nezávislými vzorky monitoru integrity. Je to z toho důvodu, že interval mezi nezávislými vzorky má podstatný vliv na určení integrity bezpečnosti GNSS SIS.

Na obr. 5 je znázorněna alokace rizika integrity SIS pro přistání letadla dle CAT III. Z tohoto diagramu je zřejmé, že 25% rizika integrity je přiřazeno palubnímu monitoru integrity. Avšak na železnici je podstatně horší viditelnost satelitů z důvodu četných překážek kolem trati (hluboké zářezy, stromy, profil terénu, atd.). Tedy pro železniční prostředí není jednoduše možné převzít alokaci rizika podle obr. 5, nýbrž je nutné ji přehodnotit.

Kromě výše uvedených otázek a nesrovnalostí existuje celá řada dalších, na které je nutné odpovědět, aby bylo možné důsledně provést kvalitativní a kvantitativní analýzy rizika.

## 8. CERTIFIKACE SYSTÉMU GALILEO PRO ŽELEZNIČNÍ APLIKACE

Z předcházejícího odstavce je zřejmé, že význam hlavních ukazatelů bezpečnosti a spolehlivosti použitých v letectví a na železnici je odlišný. Aby bylo možné použít GNSS na železnici, je nutné vypracovat postup certifikace GNSS/ GALILEO telematické aplikace. Z tohoto důvodu ČD TÚČD spolu s Univerzitou Pardubice a ČD Telematikou navrhly v říjnu

2006 nový návrh projektu do soutěže MD ČR s názvem “**Certifikace satelitního navigačního systému GALILEO pro železniční telematické aplikace**“.

Předpokládá se, že řešení tohoto projektu odpoví na následující dvě otázky:

- Jaké ukazatele kvality GNSS certifikovat?
- Jakým způsobem certifikovat?

Proto prvním cílem tohoto návrhu projektu je vytvořit matematický aparát – tj. “společný jazyk”, který umožní: 1) přeložit termíny spolehlivosti a bezpečnosti systému GNSS/ GALILEO včetně jejich vzájemných vazeb do železniční terminologie RAMS a naopak, 2) porozumět, která měřítka bezpečnosti GNSS by měla být použita pro železniční bezpečnostní aplikace a 3) určit, jak by měla být měřítka bezpečnosti implementována do železničního konceptu bezpečnosti.

Druhý cíl je zaměřen na specifikaci železničních požadavků na satelitní signál GNSS, aby bylo možné pokrýt široké spektrum železničních telematických aplikací – počínajíc využitím GNSS/ GALILEO pro informační systémy, sledování nebezpečných nákladů, určení polohy vlaků pro potřeby zabezpečovací techniky na vedlejších tratích až po nejnáročnější aplikace jako je inicializace vlakového polohového lokátoru, rozlišení paralelních kolejí při/po průjezdu výhybkou proti hrotu, posun ve stanicích, implementace pohyblivého bloku, atd.

Třetí cíl stanovuje určit železniční požadavky na architekturu a signál lokálních prvků GNSS z důvodů uvedených v částech 4 a 5.

Čtvrtým cílem projektu bude vypracování postupů certifikace a návrhy standardů pro použití GNSS v železničních telematických aplikacích ve smyslu norem CENELEC EN 50126, EN 50129, EN IEC 61508 (1-7), atp.

Vybrané postupy certifikace a návrhy technických standardů budou pilotně ověřeny na zkušební trati a v laboratoři pomocí existujících nástrojů vyvinutých v rámci předcházejících výzkumných projektů na pracovišti ČD TÚČD, ČD-Telematiky a Univerzity Pardubice – ÚEI (např. pomocí simulátoru vlakového polohového lokátoru, lokálních prvků GNSS, vlakového polohového lokátoru na elektrické lokomotivě řady 130, atd.).

Předpokládá se, že potenciálními uživateli výsledků budou MD ČR, Drážní úřad, akreditované schvalovací instituce, provozovatelé železnic, provozovatelé infrastruktury, ESA (European Space Agency), GJU (Galileo Joint Undertaking), mezinárodní skupina expertů UIC Galileo Application for Rail, výrobci navigační techniky, železniční průmysl, vysoké školy, atd.

## **9. PRAKTICKÉ VYUŽITÍ GNSS PRO URČENÍ POLOHY VOZIDEL NA ČD**

Přesné určení polohy kolejových vozidel na principu GNSS bylo poprvé využito na ČD při technicko-bezpečnostní zkoušce (TBZ) všech sedmi jednotek CDT 680 Pendolino na přelomu r. 2005/ 2006 [12]. Část TBZ dle ČSN 280101 s využitím GNSS zahrnovala:

- 1) ověření přesnosti rychloměru v úseku délky min. 50 km při maximální provozní rychlosti (160 km/hod) a v úseku min. 5 km při rychlosti 210 km/hod;
- 2) měření zrychlení (dynamické vlastnosti jízdy);
- 3) ověření délky ujeté vzdálenosti;

## 4) měření zábrzdne vzdálenosti.

Před uskutečněním zkoušek bylo nutné vypracovat metodiku měření na principu diferenční metody GPS a RTK (Real Time Kinematics), zřídit referenční stanice DGPS podél trati, zaměřit polohu referenčních stanic, zřídit rádiovou síť ve zkušební oblasti, vytvořit přesnou mapu osy koleje, vyvinout programové vybavení v prostředí C++Builder a MatLab pro vyhodnocení měření a ověřit správnost metodiky. K určení přesného času a polohy začátku brzdění byla využita funkce GNSS přijímače zvaná Event Marker. Z metodiky je zřejmé, že chyba určení zábrzdne vzdálenosti metodou RTK (fázové měření) nepřesáhne +/- 0,78 m při rychlosti do 210 km/ hod.



(a)



(b)

Obr. 8: TBZ jednotky CD 680 Pendolino s využitím GNSS: (a) antény GPS L1+L2 na střeše jednotky, (b) vyhodnocení měření zábrzdne vzdálenosti a rychlosti v kabině strojvedoucího.

Výhody použití GNSS pro účely TBZ spočívají zejména v : 1) automatickém záznamu dat; 2) automatickém zpracování měření a vypracování protokolu v kabině strojvedoucího; 3) vysoké přesnosti měření zejména při vysokých rychlostech vozidel, kdy je již prakticky nemožné sledovat značky podél trati.

V současné době pracovníci TÚČD STAB řeší úlohu využití přijímače GNSS pro lokalizaci závad na kolejovém svršku. Přípravuje se rovněž aplikace poskytování informace o okamžité poloze vlaku a rychlosti vlaku pro cestující. Je zřejmé, že s postupem doby se bude počet aplikací GNSS na železnici zvyšovat.

## 9. ZÁVĚR

GIOVE A, první se dvou satelitů systému GALILEO, byl umístěn na oběžnou dráhu 12. ledna 2006 a začal úspěšně vysílat navigační signál. Celý navigační systém by měl být uveden do provozu kolem r. 2011. V současné době je v Evropě řešena celá řada projektů zaměřená na využití systému GALILEO v sektoru dopravy, včetně železniční. Proto jsou urgentně požadovány jasné a konzistentní požadavky na GALILEO SIS. Nejen jako vstupní informace pro vývoj přijímačů GALILEO SoL, lokálních prvků, atd., ale také pro validaci, verifikaci a certifikaci systému GALILEO pro železniční aplikace, bez kterých by nebylo jinak možné uvažovat o využití satelitní navigace na železnici. To dává železnicím nejen

příležitost většího zapojení do vývoje systému GALILEO, ale také profitovat z této moderní technologie v budoucnosti.

### PODĚKOVÁNÍ

Výsledky uvedené v tomto článku vznikly za finanční podpory Grantové agentury ČR v rámci projektu reg. č. 102/06/0052 s názvem “Lokální prvky GNSS pro železniční zabezpečovací techniku”.

### LITERATURA:

- [1] GNSS Rail Advisory Forum – Application and User Requirements, European GNSS Secretariat, Brussels, 2000.
- [2] Dokumenty pracovní skupiny UIC GALILEO Application for Rail, Thematic Area A: “Road map for implementation”, červen 2005; Thematic Area B: “Economic estimates of GNSS/ GALILEO applications”, prosinec 2005, Thematic Area C: “Integration of technologies for maximization of effects”, květen 2006.
- [3] ČSN EN 50126, “The Specification and Demonstration of Dependability – Reliability, Availability, Maintainability and Safety (RAMS), 2002.
- [4] ČSN EN 50128, “ Railway Applications: Communications, signalling and processing systems – Software for Railway control and protection systems, 2003.
- [5] ČSN EN 50129, “Railway applications: Safety related electronic systems for signalling”, 2003.
- [6] ČSN EN 61508(1-7). “Functional safety of electrical/ electronic/ programmable electronic safety-related system”, 2002.
- [7] Galileo Mission, High Level Definition, EC DG-TREN, Doc. No. I07/00050/2001, 2001.
- [8] ICAO. “Aeronautical Telecommunications”, Volume I (Radio Navigation Aids), Amendment 79, 2004.
- [9] RTCA. “Minimum Aviation System Performance Standards for the Local Area Augmentation System (LAAS)”, RTCA DO-245 A, 2004.
- [10] Filip, A.: “Railway Safety Certification Requirements for the Galileo Signal-In-Space.” International Symposium on Certification of GNSS Systems & Services (CERGAL’06), Braunschweig, Germany“, April 4-5, 2006.
- [11] Filip, A., Polivka, A., Suchánek, J.: “Practical Analysis of Satellite Navigation Performance for Train Control”, 7th World Congress on Railway Research, Montréal (WCRR’2006), Canada, June 4-8, 2006 (příspěvek vypracovaný společně s Transportation Technology Center, Inc. v Pueblu, Co., USA.)
- [12] Bažant, L., Filip, A., Mocek, H., Taufer, J., Maixner, V.: “GNSS for Technical and Safety Tests of CDT 680 Pendolino Train Set”. International Symposium on Certification of GNSS Systems & Services (CERGAL’06), Braunschweig, Germany“, April 4-5, 2006.
- [13] Manual for Validation of GNSS in Civil Aviation, EC DG Tren, Sept. 2000.
- [14] Zahradník, J., Rástočný, K., Linhart, M.: Bezpečnost železničních zabezpečovacích systémů. EDIS, Žilina, 2004.



V Praze, listopad 2006

Lektoroval: Ing. František Kopecký, Ph.D.