

PŘIHLÁŠKA VYNÁLEZU

Zveřejněná podle §31 zákona č. 527/1990 Sb.

(21) Číslo dokumentu:

2022-221

(13) Druh dokumentu: **A3**

(51) Int. Cl.:

G01S 19/52 (2010.01)
G01S 19/38 (2010.01)

(19)
ČESKÁ
REPUBLIKA



ÚŘAD
PRŮMYSLOVÉHO
VLASTNICTVÍ

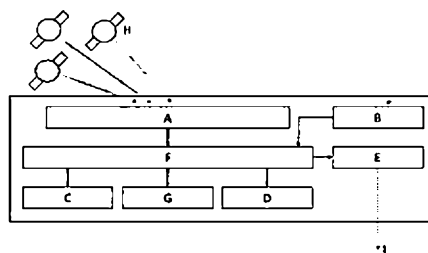
(22) Přihlášeno: **27.05.2022**
(40) Datum zveřejnění přihlášky vynálezu: **06.12.2023**
(Věstník č. 49/2023)

(71) Přihlašovatel:
AŽD Praha s.r.o., Praha 10, Záběhlice, CZ

získaný odhad se uloží do paměti a případně též zobrazí na displeji.

(72) Původce:
Ing. Karel Veselý, Ph.D., Most, CZ
doc. Ing. Ondřej Straka, Ph.D., Plzeň, Jižní
Předměstí, CZ
Ing. Ivo Punčochář, Ph.D., Nové Sedlo, CZ
Ing. Ladislav Král, Ph.D., Plzeň, Jižní Předměstí,
CZ

(74) Zástupce:
Patent-K s.r.o., Husníková 2086/22, 158 00 Praha
5, Stodůlky



(54) Název přihlášky vynálezu:
Postup určování intervalového odhadu velikosti rychlosti železničního vozidla pomocí GNSS a subsystém k realizaci tohoto postupu.

(57) Anotace:
Vynález se týká postupu určování intervalového odhadu rychlosti železničního vozidla pomocí GNSS v železničním prostředí, při kterém přijímač na železničním vozidle sleduje signály ze satelitů GNSS, přičemž se nejprve stanoví odhad vektoru rychlosti vozu včetně konfidenčního elipsoidu v souřadnicovém systému ECEF WGS84. Následně se tento odhad transformuje do vhodného lokálního ENU koordinačního systému. Dále je z takto transformovaného odhadu vektoru rychlosti určen 2D odhad vektoru rychlosti v horizontální rovině, z něhož se určí konfidenční interval představující odhad velikosti horizontální rychlosti vozidla. Následně se s využitím znalosti maximálně možného podélného sklonu tratě a konstrukční rychlosti vozidla, či odhadu velikosti horizontální rychlosti vozidla stanoví odhad maximálně možné velikosti vertikální rychlosti vozidla, načež se odhady velikostí horizontální a vertikální rychlosti se sloučí do finálního intervalového odhadu celkové velikosti rychlosti železničního vozidla. Takto

Postup určování intervalového odhadu velikosti rychlosti železničního vozidla pomocí GNSS a subsystém k realizaci tohoto postupu

5 Oblast techniky

Vynález se týká postupu určování intervalového odhadu velikosti rychlosti železničního vozidla pomocí GNSS a subsystému k realizaci tohoto postupu.

10

Dosavadní stav techniky

Globální družicové navigační systémy (GNSS) se běžně používají pro určování polohy a navigaci v mnoha dopravních systémech. V železniční dopravě se GNSS běžně používá například v
15 systémech sloužících k informování cestujících o poloze vlaku. Nicméně, v současné době se GNSS nepoužívá v zabezpečovacích systémech sloužících k řízení železniční dopravy ve funkcích, ve kterých by GNSS sloužilo k samotnému poskytnutí bezpečné informace. Rostoucí zájem stran zúčastněných v železniční dopravě, velký počet relevantních evropských projektů (De Miguel et al., 2017; Marais et al., 2017) a snaha certifikovat GNSS pro lokalizaci vlaků Filip et al. (2018);
20 Rispoli a kol. (2018) však naznačují silnou vůli využívat GNSS také ve funkcích souvisejících s bezpečností.

Za účelem získání bezpečného odhadu polohy pomocí GNSS byl pro letectví vyvinut rozšiřující systém známý jako Satellite Based Augmentation System (SBAS). Součástí tohoto systému je i
25 přesně definovaný postup výpočtu bezpečného odhadu polohy pro letecké prostředí. Tento postup však nelze v železničním prostředí přímo použít, jelikož okolní prostředí antény přijímače se významně liší od leteckého prostředí. Tato odlišnost, která je způsobena přítomností tunelů, lesních kaňonů, městské zástavby atd., vede na mnohem komplikovanější příjem satelitních signálů spočívající jak v nedostupnosti signálů, tak i v možnosti příjmu signálů, které jsou zatíženy
30 poruchami způsobenými okolním prostředím antény přijímače. Právě možná přítomnost těchto poruch značně komplikuje použitelnost postupů výpočtu odhadu, které byly vyvinuty pro letectví. Úspěšné použití GNSS pro funkce související s bezpečností železnic je tak podmíněno dalším zlepšováním výkonosti GNSS, zejména pokud jde o integritu poskytnutých odhadů.

Přestože je GNSS určen hlavně k určování odhadu polohy, lze jej použít také k určení odhadu
35 vektoru rychlosti a velikosti rychlosti. Použití GNSS tedy představuje alternativu ke stávajícím snímačům velikosti rychlosti, jako jsou inkrementální rotační kodér, Dopplerův radar nebo snímač vířivých proudů. Mezi hlavní výhody odhadu vektoru rychlosti či velikosti rychlosti založeného na GNSS přitom patří nižší mechanické namáhání použitých čidel, snadno přístupná instalace či
40 absence problému prokluzu nebo skluzu kola.

Existují nejméně tři metody určení odhadu vektoru rychlosti pouze z měření GNSS. Nejjednodušší metoda je výpočet odhadu vektoru rychlosti jako rozdílu mezi dvěma po sobě následujícími odhady polohy, který je dělen periodou vzorkování. Hlavní nevýhodou této metody je nízká přesnost v
45 řádu m/s, která souvisí s přesností odhadu polohy vypočítaného z pseudovzdáleností. Lepší přesnosti lze dosáhnout pomocí GNSS přijímačů, které poskytují měření dopplerovských frekvenčních posunů (Dyukov et al., 2015; Gaglione & Petovello, 2015). Tato druhá metoda je také poměrně jednoduchá k implementaci a má přesnost cm/s. Třetí metoda využívá měření fáze nosné vlny a poskytuje nejpřesnější odhady v řádu mm/s (Ding & Wang, 2011; Freda et al., 2015).
50 Tato poslední metoda je však náročnější na implementaci kvůli takzvaným „cycle slips“, které je třeba odstranit vhodnými technikami (Karaim et al., 2014).

Pokud je odhad vektoru rychlosti nebo velikosti rychlosti určen k použití ve funkci související s bezpečností, je třeba provést bezpečnostní analýzu odhadovacího postupu. Tato analýza může být
55 pro první a třetí metodu náročnější, jelikož používají měření z více časových okamžiků.

Ve všech případech lze přesnost odhadu vektoru rychlosti nebo velikosti rychlosti dále zlepšit fúzí informací z inerciální měřicí jednotky (IMU), dynamického modelu, mapy tratě atd. (Niu et al., 2018; Otegi et al., 2018; Zhang et al., 2020). Ačkoli použití dodatečných informací může vést k velmi přesnému odhadu, odhadovací postup se může stát poměrně složitým a obtížněji hodnotitelným z hlediska bezpečnosti kvůli problémům s konvergencí rekurzivního zpracování, omezené přesnosti dynamického modelu a mapy tratě, nebo schopnosti udržovat všechny zdroje informací aktuální, např. stavební změny koleje v případě použití mapy tratě.

Na rozdíl od jiných dopravních systémů představuje železniční trať striktní omezení na polohu železničního vozidla. Vektor rychlosti je pak téměř tangenciální k železniční trati. Z tohoto důvodu je v železničních aplikacích často postačující určení pouze odhadu velikosti rychlosti, např. rychloměr, který bude mít požadované vlastnosti. Protože však bodový odhad velikosti rychlosti není dostatečnou informací ve funkcích souvisejících s bezpečností, je nutné stanovit odhad ve formě konfidenčního intervalu velikosti rychlosti, pro který platí, že tento interval pokrývá skutečnou velikost rychlosti s požadovanou pravděpodobností. Přejít z bodového odhadu velikosti rychlosti na odhad velikosti rychlosti ve formě konfidenčního intervalu, respektive způsob tohoto přechodu, představuje speciální vlastnost níže popsaného postupu, která jej odlišuje od mnoha stávajících postupů, které navíc neposkytují konfidenční interval odhadu velikosti rychlosti, ale spíše pouze kovarianční matici chyby odhadu vektoru rychlosti, přestože má tento interval zásadní význam pro funkce související s bezpečností. Současné postupy jsou navíc spíše obecné a nejsou přizpůsobeny železničnímu prostředí, aby mohlo být v případě potřeby dosaženo splnění vysokých bezpečnostních požadavků při zachování dostatečné přesnosti odhadu.

Bodový odhad vektoru rychlosti antény přijímače lze stanovit z polohy antény GNSS přijímače a měření Dopplerova posunu klasickou metodou vážených nejmenších čtverců. Následně lze pro tento bodový odhad konstruovat konfidenční množinu. Přejít z množinového odhadu vektoru rychlosti na intervalový odhad velikosti rychlosti ve formě konfidenčního intervalu je přitom výzva, kterou je možné formulovat jako optimalizační úlohu. K řešení této úlohy může být přistoupeno například formou iteračního algoritmu a různých aproximací, které však mohou mít za následek nižší přesnost intervalového odhadu velikosti rychlosti, či složitější prokazatelnost dosažení správného výsledku z důvodu použití numerických přístupů. Hlavně druhá uvedená nevýhoda přitom může mít negativní dopady na možnost použití intervalového odhadu velikosti rychlosti v bezpečnostně relevantních aplikacích.

Alternativně lze intervalový odhad velikosti rychlosti konstruovat s využitím dalších snáz či hůře dostupných informací. Jelikož přesnost odhadu vertikální složky rychlosti je v případě GNSS horší v porovnání s horizontálními složkami, použití dalšího zdroje informace o velikosti vertikální složky může zlepšit přesnost intervalového odhadu velikosti rychlosti. Toto může být zajímavé zvláště u železnic, kde je podélný sklon železnice obvykle poměrně malý kvůli požadavkům na stavbu kolejí. Právě tohoto faktu využívá postup popisovaný v této přihlášce vynálezu.

Závěrem této kapitoly lze aktuální nedostatky stávajících postupů určování intervalového odhadu velikosti rychlosti vozidla s využitím GNSS v železničním prostředí shrnout následujícími odstavci.

Stávající postupy nejsou adresně zaměřeny na železniční prostředí, což může někdy vést ke zbytečně nepřesnému odhadu. Pokud by byly využity vhodné dodatečné informace platné pro železniční prostředí, mohlo by být často dosaženo přesnějších intervalových odhadů velikosti rychlosti.

Jsou-li již používány dodatečné informace, např. mapa tratě, bývá často obtížné a nákladné tyto informace získat, případně udržovat jejich aktuální platnost. Rovněž nemusí být snadné zohlednit případnou nepřesnost dodatečné informace, např. právě případ mapy tratě.

V případě odhadu je často poskytován pouze bodový odhad bez udání míry důvěry v tento odhad. Míra důvěry je případně uvedena spíše pro odhad vektoru rychlosti, ne však již pro odhad velikosti rychlosti.

- 5 Ne vždy je implementace používaného postupu jednoduchá. Platí přitom, že složitá implementace může komplikovat prokázání bezpečnosti odhadu v případě jeho zamýšleného použití v bezpečnostně relevantních systémech.

- 10 Někdy bývají použity aproximativní přístupy k přechodu z odhadu vektoru rychlosti na intervalový odhad velikosti rychlosti. U těchto aproximací však může být komplikovanější prokázání bezpečnosti v případě plánovaného využití odhadu jako bezpečnostně kritické informace. Například různá zanedbání při stanovení intervalového odhadu mohou způsobit, že odhad ve skutečnosti nesplňuje požadovanou pravděpodobnost pokrytí. Typickým příkladem zanedbání může být například zanedbání vertikální složky rychlosti.

- 15 Komplikací též může být použití numerických metod k řešení optimalizační úlohy, u kterých může být někdy komplikovanější prokázat, že „dokonvergovaly“ do správného řešení. Toto může být nevýhodou v případě plánovaného použití intervalového odhadu v bezpečnostně relevantních aplikacích.

20

Podstata vynálezu

- 25 Výše uvedené nedostatky jsou do značné míry odstraněny postupem určení intervalového odhadu velikosti rychlosti pomocí GNSS, který je vyvinut přímo pro železniční dopravu a je předmětem této přihlášky vynálezu. Postup přitom využívá skutečnost, že v železničním prostředí je dovolena pouze omezená velikost podélného sklonu tratě, která dosahuje poměrně malých hodnot. Díky znalosti maximálně možného podélného sklonu tratě je možné odděleně konstruovat relativně přesné intervalové odhady velikosti rychlosti vozidla v horizontální rovině a vertikálním směru.
- 30 Výsledný intervalový odhad velikosti rychlosti je následně stanoven vhodným sloučením těchto dvou dílčích intervalových odhadů. Detailněji lze podstatu vynálezu vyjádřit tak, že se nejprve stanoví bodový odhad vektoru rychlosti vozidla včetně konfidenčního elipsoidu odvozeného z kovarianční matice a požadované pravděpodobnosti pokrytí skutečné rychlosti množinovým odhadem v koordinačním systému ECEF WGS84. Následně se tento množinový odhad transformuje do vhodného lokálního ENU koordinačního systému. Z takto transformovaného množinového odhadu vektoru rychlosti je určen množinový odhad vektoru rychlosti v horizontální rovině, z něhož se určí konfidenční interval $\langle \hat{v}_{EN,min}, \hat{v}_{EN,max} \rangle$ představující intervalový odhad velikosti rychlosti v horizontální rovině. Následně se s využitím znalosti maximálního možného podélného sklonu tratě a konstrukční rychlosti vozidla stanoví intervalový odhad velikosti rychlosti ve vertikálním směru. Alternativně přitom může být místo konstrukční rychlosti vozidla využita
- 40 při určení intervalového odhadu velikosti rychlosti ve vertikálním směru též hodnota $\hat{v}_{EN,max}$. Nakonec se intervalové odhady velikosti rychlosti v horizontální rovině a ve vertikálním směru vhodně sloučí do finálního intervalového odhadu velikosti rychlosti železničního vozidla vyjádřeného konfidenčním intervalem. Tento intervalový odhad se vhodně, v závislosti na záměru
- 45 použití informace, zobrazí na displeji a uloží do datové paměti, např. pro potřebu pozdějších analýz rychlosti vozidla a/nebo předá nadřazenému, zejména zabezpečovacímu, systému provádějícímu dohled nad pohybem vozidla.

- 50 Další podstatou vynálezu je samotný subsystém pro realizaci uvedeného postupu využívající GNSS satelity a GNSS přijímač na vozidle. Tento subsystém je opatřen sběrníci, ke které je kromě GNSS přijímače připojena též paměť, monitor, procesor, datová paměť a další paměť. Jeho detailní uspořádání je vidět na blokovém schématu, které je uvedeno a detailněji popsáno dále v přihlášce vynálezu.

Cílem vynálezu je navrhnout nový postup a subsystém, který bude poskytovat intervalový odhad velikosti rychlosti železničního vozidla s využitím dostupných měření Dopplerova posunu z jednoho časového okamžiku, maximální absolutní hodnoty podélného sklonu koleje a případně též konstrukční rychlosti železničního vozidla. Využití poslední informace však není nutné, jak bude z dalšího textu patrné. Při návrhu postupu je upřednostňován ne iterativní výpočet před iteračním, aby se případné použití navrženého subsystému v bezpečnostně relevantní aplikaci obešlo bez složitého prokazování konvergence iterativního výpočtu a omezeného šíření chyb.

Z předchozího odstavce je tedy patrné, že postup popisovaný v této přihlášce vynálezu je navržen tak, aby používal pouze měření z jednoho okamžiku a co nejméně externích informací, které jsou navíc snadno udržovatelné v aktuálně platném stavu. Díky těmto vlastnostem je vyvinutý postup poměrně snadno realizovatelný a snáze využitelný v bezpečnostně relevantních aplikacích zejména po provedení vhodných rozšíření, která spočívají v zohlednění skutečnosti, že měřená data mohou být nejen pod vlivem šumu, ale též poruchy.

Hlavní výhody zde vyvinutého subsystému jsou tedy následující.

Doplňující informace, jako maximálně možný podélný sklon koleje, případně též konstrukční rychlost vozidla, využitě při výpočtu odhadu jsou snadno zjistitelné a udržovatelné, na rozdíl např. oproti celé mapě tratě. Toto snižuje náklady na provoz a údržbu zařízení.

Vlivem využití doplňujících informací je určení odhadu implementačně jednodušší než řešit klasické optimalizační úlohy využívané při určení intervalového odhadu velikosti rychlosti.

Intervalový odhad velikosti rychlosti určený zde popisovaným postupem je ve většině případů přesnější než intervalový odhad velikosti rychlosti určený přímo z konfidenčního elipsoidu, který je získán při výpočtu odhadu vektoru rychlosti.

Ve výpočtu není nic zanedbáváno, tedy konfidenční interval bude skutečnou velikost rychlosti při předpokladu neexistence poruch v GNSS měřeních obsahovat skutečně s požadovanou nebo vyšší pravděpodobností. Toto představuje výhodu při použití subsystému v bezpečnostně relevantních aplikacích.

Intervalový odhad lze určit analyticky. Není tedy nutné řešit optimalizační úlohu pomocí numerických metod. Toto může představovat výhodu v případě, že bude postup použit v bezpečnostně relevantních aplikacích.

Objasnění výkresů

Postup určení intervalového odhadu velikosti rychlosti železničního vozidla s pomocí GNSS a subsystém realizující tento postup budou podrobněji popsány na konkrétním příkladu uskutečnění vynálezu s pomocí přiloženého blokového schéma a vývojového diagramu. Na Obr. 1 je blokové schéma subsystému, který realizuje navrhovaný postup určení intervalového odhadu velikosti rychlosti vozidla a poskytuje tento odhad dalším subsystémům umístěným na vozidle. Na Obr. 2 je vývojový diagram stručně znázorňující navržený postup.

Příklady uskutečnění vynálezu

Subsystém realizující postup určení intervalového odhadu velikosti rychlosti železničního vozidla pomocí GNSS obsahuje GNSS přijímač A přijímající informace z GNSS družic, který je přes sběrnici F propojen s procesorem C, pamětí 1 B, pamětí 2 E a pamětí 3 G. Dále může být ke sběrnici F připojen monitor D.

- Vstupními body subsystému jsou GNSS přijímač A a paměť 1 B. Prostřednictvím GNSS přijímače A vyvinutý subsystém získává potřebná měření dopplerovských frekvenčních posunů a parametry pro výpočet polohy a rychlosti GNSS družic H. Samotné polohy a rychlosti družic mohou být počítány buď přímo v GNSS přijímači A, nebo alternativně též v procesoru C. Do paměti 1 B jsou pak buď on-line nebo off-line ukládány hodnoty jako maximálně možný podélný sklon $\beta_{\max}$ koleje, v případě potřeby konstrukční rychlost $v_{\max}$ železničního vozidla, vlnová délka nosné vlny, směrodatné odchylky šumů měření, požadovaná pravděpodobnost p_{poz} pokrytí skutečné velikosti rychlosti intervalovým odhadem a případně též aktuální poloha či odhad aktuální polohy vozidla, není-li tato určována uvnitř samotného subsystému, např. v GNSS přijímači A. Platí přitom, že většina parametrů může být do subsystému, respektive do paměti 1 B, zadána hned při montáži subsystému na vozidlo, či ještě před ní, a poté jsou měněny pouze výjimečně, např. změna konstrukční rychlosti. Samotný proces zadání parametrů je v blokovém schématu uvedeném na Obr. 1 označen jako J.
- Veškeré činnosti, které jsou popsány v textu níže, probíhají v procesoru C. Výsledky, respektive intervalový odhad velikosti rychlosti vozidla, mohou být následně zobrazovány na monitoru D. Budiž přitom poznamenáno, že monitor D nemusí být nutně součástí subsystému. Jeho součástí je především tehdy, má-li být subsystém využit jako rychloměr. Výsledky jsou též ukládány do paměti 2 E, ze které mohou být předávány, ať již on-line či off-line, což je v blokovém schématu naznačeno šipkou vedoucí z paměti 2 E, dalším železničním systémům a využívány tak například k dohledu nepřekročení maximálně povolené rychlosti vozidla v dané oblasti, či k zobrazení informace na displeji zobrazovací jednotky, která není součástí zde popisovaného subsystému. Samotný proces předání výsledků do externích železničních systémů je v blokovém schématu uvedeném na Obr. 1 označen jako J.
- Zbylé dva bloky jsou pomocné a slouží k zajištění fungování celého subsystému. Přes sběrnici F probíhá veškerá komunikace mezi ostatními bloky subsystému a v paměti 3 G je uložena programová realizace samotného postupu.
- V následujícím textu je rozepsán nový postup určení intervalového odhadu velikosti rychlosti. Jde o přehlednější popis postupu, který byl již stručně představen v předchozím textu. Poznamenejme, že striktně vzato jde o dvě verze postupu zapsané v jednom, kdy rozdíl ve verzích spočívá v odlišné realizaci kroku 7. Ve vyvinutém subsystému je přitom celý postup realizován v procesoru C, přičemž jeho programová realizace, tj. jedna konkrétní verze z dvou níže popsaných, je uložena v paměti 3 G. Vstupy postupu jsou prostřednictvím sběrnice F získávány z GNSS přijímače A a paměti 1 B. Výstup postupu je pak uložen do paměti 2 E a případně též zobrazen prostřednictvím monitoru D.
- Vstupy postupu určení intervalového odhadu velikosti rychlosti železničního vozidla pomocí GNSS: GNSS měření a informace, tj. měřený Dopplerův frekvenční posun pro jednotlivé družice z jednoho časového okamžiku, polohy a rychlosti GNSS družic z odpovídajícího časového okamžiku, směrodatné odchylky šumů jednotlivých měření, vlnová délka nosné vlny; poloha či odhad polohy GNSS antény; $\beta_{\max}$ - maximálně možný podélný sklon koleje; p_{poz} - požadovaná pravděpodobnost pokrytí skutečné velikosti rychlosti intervalovým odhadem.
- Vstup potřebný pouze pro první verzi: konstrukční rychlost $v_{\max}$ železničního vozidla.
- Výstup postupu: intervalový odhad velikosti rychlosti v podobě konfidenčního intervalu $\hat{v}^C$, pro který platí, že skutečná velikost rychlosti leží uvnitř tohoto intervalu s pravděpodobností alespoň p_{poz} .

Jednotlivé kroky vyvinutého postupu určení intervalového odhadu velikosti rychlosti železničního vozidla pomocí GNSS vedoucí k určení konfidenčního intervalu představujícího intervalový odhad velikosti rychlosti:

- 5 1. Stanovení bodového odhadu vektoru rychlosti $\hat{\mathbf{r}}_{\text{ECEF}}^{3D}$ včetně kovarianční matice $\Sigma_{\text{ECEF}}^{3D}$ v ECEF WGS84 koordinačním systému charakterizující příslušný konfidenční elipsoid. Konfidenční elipsoid $\mathcal{E}_{\text{ECEF}}^{3D}$ je přitom při předpokladu normálního rozdělení šumů klasicky vymezen vztahem

$$10 \quad \mathcal{E}_{\text{ECEF}}^{3D} = \left\{ \mathbf{u} \in \mathbb{R}^3: (\mathbf{u} - \hat{\mathbf{r}}_{\text{ECEF}}^{3D})^T (\Sigma_{\text{ECEF}}^{3D})^{-1} (\mathbf{u} - \hat{\mathbf{r}}_{\text{ECEF}}^{3D}) \leq q_{3,p_{\text{poz}}} \right\},$$

kde parametr $q_{3,p_{\text{poz}}}$ představuje kvantil χ^2 rozdělení se třemi stupni volnosti pro zadanou pravděpodobnost p_{poz} .

- 15 2. Stanovení bodového odhadu a kovarianční matice může být realizováno například metodou vážených nejmenších čtverců.

Stanovení rotační matice $\mathbf{R}_{\text{ECEF}}^{\text{ENU}}$ umožňující transformovat body a vektory z ECEF koordinačního systému WGS84 do lokálního ENU koordinačního systému.

20

Tato matice je dána vztahem

$$\mathbf{R}_{\text{ECEF}}^{\text{ENU}} = \begin{bmatrix} -\sin(\lambda) & \cos(\lambda) & 0 \\ -\sin(L)\cos(\lambda) & -\sin(L)\sin(\lambda) & \cos(L) \\ \cos(L)\cos(\lambda) & \cos(L)\sin(\lambda) & \sin(L) \end{bmatrix},$$

kde L představuje zeměpisnou šířku a λ zeměpisnou délku odhadu polohy antény.

25

Lokální ENU je pravotočivý ortonormální 3D koordinační systém, jehož natočení vůči ECEF koordinačnímu systému je dáno polohou přijímače, respektive jejím bodovým odhadem, ve které se přijímač nachází v čase, pro který je počítán odhad velikosti rychlosti. Počátek tohoto koordinačního systému je však shodný s počátkem ECEF koordinačního systému. Rovina EN systému je tečná k referenčnímu elipsoidu WGS84 v bodě odhadu polohy přijímače, přičemž první osa E systému směřuje k východu a druhá osa N k severu. Třetí osa U je na zbylé osy E a N kolmá a její směr je dán pravotočivostí systému.

30

- 35 3. S využitím rotační matice z bodu 2 vyjádřit bodový odhad vektoru rychlosti, kovarianční matici a konfidenční elipsoid z bodu 1 v lokálním ENU koordinačním systému definovaným v bodě 2. Výsledkem je bodový odhad rychlosti vozidla

$$\hat{\mathbf{r}}_{\text{ENU}}^{3D} = (\mathbf{R}_{\text{ECEF}}^{\text{ENU}})^T \hat{\mathbf{r}}_{\text{ECEF}}^{3D}$$

40

a jemu příslušná kovarianční matice

$$\Sigma_{\text{ENU}}^{3D} = (\mathbf{R}_{\text{ECEF}}^{\text{ENU}})^T \Sigma_{\text{ECEF}}^{3D} \mathbf{R}_{\text{ECEF}}^{\text{ENU}}$$

45

jednoznačně definující konfidenční elipsoid v ENU koordinačním systému.

4. Transformovat, respektive promítnout, bodový odhad vektoru rychlosti a příslušnou kovarianční matici charakterizující konfidenční elipsoid z bodu 3 ($\hat{\mathbf{r}}_{\text{ENU}}^{3D} \cdot \mathbf{a} \cdot \Sigma_{\text{ENU}}^{3D}$) do horizontální (EN) roviny lokálního ENU koordinačního systému z bodu 2. Výstupem této transformace je 2D bodový odhad $\hat{\mathbf{r}}_{\text{ENU}}^{2D}$ horizontální rychlosti vozidla a příslušná kovarianční matice 2×2 Σ_{ENU}^{2D} . Hodnoty $\hat{\mathbf{r}}_{\text{ENU}}^{2D}$ a Σ_{ENU}^{2D} jsou určeny jako první dvě složky vektoru $\hat{\mathbf{r}}_{\text{ENU}}^{3D}$ a první a druhý řádek a sloupec matice Σ_{ENU}^{3D} .
5. S využitím pravděpodobnosti p_{poz} a hodnot $\hat{\mathbf{r}}_{\text{ENU}}^{2D}$ a Σ_{ENU}^{2D} určit v rovině EN konfidenční elipsu $\mathcal{E}_{\text{EN}}^{2D}$, která definuje (elipsa + všechny body uvnitř elipsy) množinový odhad $M_{\mathcal{E}}$ horizontální složky rychlosti vlaku, pro který platí, že skutečná horizontální rychlost vozidla je uvnitř elipsy $\mathcal{E}_{\text{EN}}^{2D}$ s pravděpodobností p_{poz} .

Při vymezení konfidenční elipsy se v tomto případě při předpokladu normálního rozdělení šumů používá kvantil χ^2 rozdělení se dvěma stupni volnosti pro zadanou pravděpodobnost p_{poz} . Jinak je způsob vymezení stejný jako v případě 3D prostoru

$$\mathcal{E}_{\text{ENU}}^{2D} = \left\{ \mathbf{u} \in \mathbb{R}^2: (\mathbf{u} - \hat{\mathbf{r}}_{\text{ENU}}^{2D})^T (\Sigma_{\text{ENU}}^{2D})^{-1} (\mathbf{u} - \hat{\mathbf{r}}_{\text{ENU}}^{2D}) = q_{2, p_{\text{poz}}} \right\}$$

6. S využitím $\mathcal{E}_{\text{EN}}^{2D}$ respektive $M_{\mathcal{E}}$ určit konfidenční interval $\langle \hat{v}_{\text{EN}, \min}, \hat{v}_{\text{EN}, \max} \rangle$ představující odhad velikosti horizontální rychlosti vozidla. Hodnoty $\hat{v}_{\text{EN}, \min}$ a $\hat{v}_{\text{EN}, \max}$ představují minimální a maximální vzdálenost počátku ENU koordinačního systému od množinového odhadu $M_{\mathcal{E}}$. Tyto vzdálenosti lze určit analyticky prostřednictvím řešení vhodné kvartické rovnice.

Maximální vzdálenost leží vždy na elipse $\mathcal{E}_{\text{EN}}^{2D}$. Minimální vzdálenost leží buď na elipse $\mathcal{E}_{\text{EN}}^{2D}$, nebo má hodnotu 0 – to tehdy, pokud počátek ENU leží uvnitř elipsy $\mathcal{E}_{\text{EN}}^{2D}$.

7. Určit konfidenční interval $\langle 0, \hat{v}_{\text{U}, \max} \rangle$ představující odhad velikosti vertikální rychlosti vozidla. Hodnotu $\hat{v}_{\text{U}, \max}$ je možné určit dvěma způsoby. Jsou tak dvě verze navrhovaného postupu:

- a. První verze: Hodnota $\hat{v}_{\text{U}, \max}$ je určena s pomocí maximálně možného podélného sklonu koleje β_{max} a konstrukční rychlosti vozidla v_{max} jako

$$\hat{v}_{\text{U}, \max} = v_{\text{max}} \sin(\beta_{\text{max}})$$

- b. Druhá verze: Hodnota $\hat{v}_{\text{U}, \max}$ je určena s pomocí maximálně možného podélného sklonu koleje β_{max} a hodnoty $\hat{v}_{\text{U}, \max}$ určené v předchozím bodě jako

$$\hat{v}_{\text{U}, \max} = \hat{v}_{\text{EN}, \max} \tan(\beta_{\text{max}}).$$

8. Určit výstup postupu, tedy určit výsledný odhad velikosti rychlosti přijímače představovaný konfidenčním intervalem $\langle \hat{V}^c \rangle$ jako

$$\hat{V}^C = \langle \hat{v}_{EN,min}, \sqrt{(\hat{v}_{EN,max})^2 + (\hat{v}_{U,max})^2} \rangle.$$

Představený postup lze stručně znázornit pomocí vývojového diagramu na Obr. 2.

5 Experimentální ověření vyvinutého postupu.

Navržený postup byl vyhodnocen experimentálně pomocí simulačních dat. Vyhodnocení bylo zaměřeno na analýzu délek získaných intervalových odhadů, tzn. k analýze přesnosti odhadu, a na porovnání dosahované přesnosti obou verzí postupu prezentovaného v této přihlášce vynálezu s dosahovanou přesností alternativních metod výpočtu odhadu velikosti rychlosti. Při těchto analýzách byla vyhodnocována přesnost odhadu v závislosti na různých konstelacích družic, různých velikostech rychlosti vozidla a různém podélném sklonu železniční tratě. Podélný sklon vozidla byl volen z intervalu $\langle -\beta_{max}, \beta_{max} \rangle$ kde hodnota β_{max} byla stanovena na základě pravidel na konstrukci železničních tratí v České republice. Velikost rychlosti byla uvažována v intervalu $\langle 0; 80 \text{ km/h} \rangle$, přičemž tento interval byl zvolen s ohledem na běžné rychlosti železničních vozidel na regionálních tratích v České republice. Je však potřeba uvést, že použití postupu a celého subsystému pochopitelně není omezeno pouze na regionální tratě. Konstelace družic pak byly voleny s ohledem na podmínky viditelnosti družic v železničním prostředí.

Detailnější popis experimentálních testů a dosažených výsledků není předmětem této přihlášky vynálezu. Dále jsou uvedena pouze výsledná hlavní pozorování.

1. Délka intervalového odhadu velikosti rychlosti je téměř nezávislá na konkrétní hodnotě aktuálního podélného sklonu tratě, který je z intervalu $\langle -\beta_{max}, \beta_{max} \rangle$.

Tento závěr však není vhodné automaticky rozšířit i na hodnoty podélného sklonu tratě, který nenáleží do analyzovaného intervalu $\langle -\beta_{max}, \beta_{max} \rangle$.

2. Platí, že v situacích, kdy je výborná konstelace družic, malý podélný sklon koleje a menší rychlost vozidla, dosahuje první verze vyvinutého postupu méně přesných odhadů než klasické, tj. běžně používané metody i než druhá verze vyvinutého postupu. Důvodem je skutečnost, že využití maximálního možného podélného sklonu koleje spolu s konstrukční rychlostí vozidla vede ke konzervativnějším odhadům vertikální rychlosti vozidla, než které lze získat z aktuálních měření Dopplerových posunů a aktuálního šumu, respektive jeho vlastností.

3. Druhá verze vyvinutého postupu dosahuje až na výjimky přesnějších odhadů než všechny ostatní testované metody. Mezi tyto výjimky patří velmi dobrá geometrie družic a současně vyšší rychlost vozidla. Metodou, která je zcela sporadicky přesnější než druhá verze vyvinutého postupu, je přitom metoda, která při výpočtu používá numerické postupy, a její použití v bezpečnostně relevantní aplikaci by tak mohlo být složitější než použití zde popsaného postupu určení intervalového odhadu velikosti rychlosti železničního vozidla pomocí GNSS.

Průmyslová využitelnost

Technické řešení nalezne uplatnění především v železniční dopravě, není však na železniční dopravu omezeno.

PATENTOVÉ NÁROKY

1. Postup určování intervalového odhadu velikosti rychlosti železničního vozidla pomocí GNSS v železničním prostředí, při kterém přijímač na železničním vozidle sleduje signály ze satelitů GNSS, **vyznačující se tím**, že se nejprve stanoví odhad vektoru rychlosti vozu včetně konfidenčního elipsoidu v souřadnicovém systému ECEF WGS84, a následně se tento odhad transformuje do vhodného lokálního ENU koordinačního systému, dále je z takto transformovaného odhadu vektoru rychlosti určen 2D odhad vektoru rychlosti v horizontální

rovině, z něhož se určí konfidenční interval $\langle \hat{v}_{EN,min}, \hat{v}_{EN,max} \rangle$ představující odhad velikosti horizontální rychlosti vozidla a následně se s využitím znalosti maximálně možného podélného sklonu β_{max} tratě a konstrukční rychlosti vozidla, či odhadu velikosti horizontální rychlosti vozidla stanoví odhad $\hat{v}_{U,max}$ maximálně možné velikosti vertikální rychlosti vozidla, načež se odhady velikosti horizontální a vertikální rychlosti sloučí do finálního intervalového odhadu celkové velikosti rychlosti železničního vozidla, který je dán

$$\hat{v}^C = \langle \hat{v}_{EN,min}, \sqrt{(\hat{v}_{EN,max})^2 + (\hat{v}_{U,max})^2} \rangle$$

vztahem a takto získaný odhad se uloží do paměti a případně též zobrazí na displeji.

2. Postup podle nároku 1, **vyznačující se tím**, že se odhad velikosti vertikální rychlosti $\hat{v}_{U,max}$ vozidla je dán vztahem, $\hat{v}_{U,max} = v_{max} \sin(\beta_{max})$, kde v_{max} je konstrukční rychlosti vozidla.

3. Postup podle nároku 1, **vyznačující se tím**, že se odhad velikosti vertikální rychlosti $\hat{v}_{U,max}$ vozidla je dán vztahem $\hat{v}_{U,max} = \hat{v}_{EN,max} \tan(\beta_{max})$.

4. Postup podle kteréhokoli z nároků 1 až 3, **vyznačující se tím**, že získaný odhad velikosti rychlosti železničního vozidla se poskytne přes komunikační protokol externím zařízením.

5. Subsystem pro provádění postupu podle kteréhokoli z nároků 1 až 4, **vyznačující se tím**, že obsahuje GNSS přijímač (A) přijímající signály z GNSS satelitů, který je připojen na sběrnici (F), ke které je připojena paměť 1 (B), procesor (C), paměť 2 (E) a paměť 3 (G).

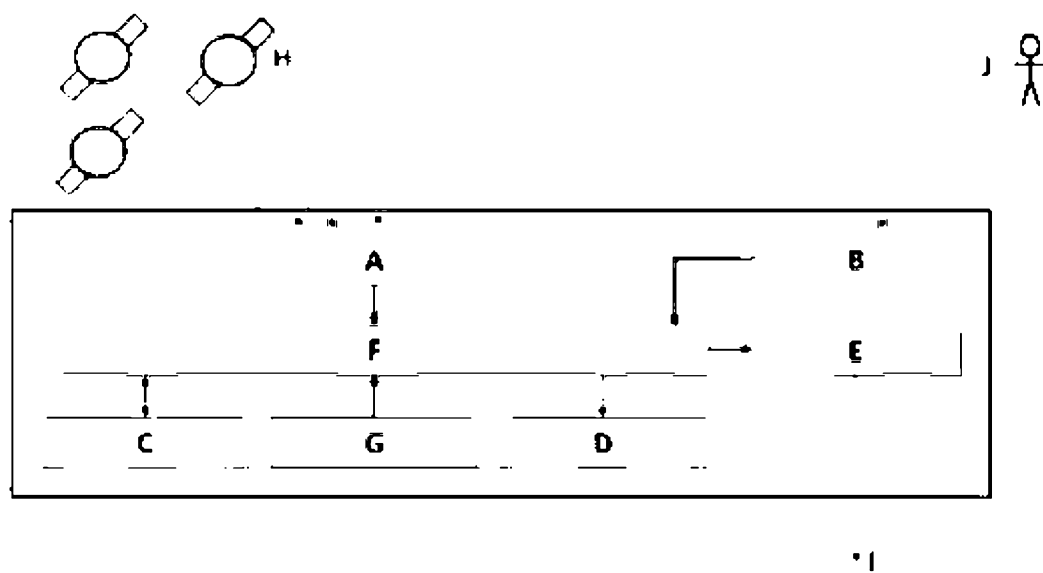
6. Subsystem podle nároku 5, **vyznačující se tím**, že ke sběrnici (F) je připojen monitor (D).

2 výkresy

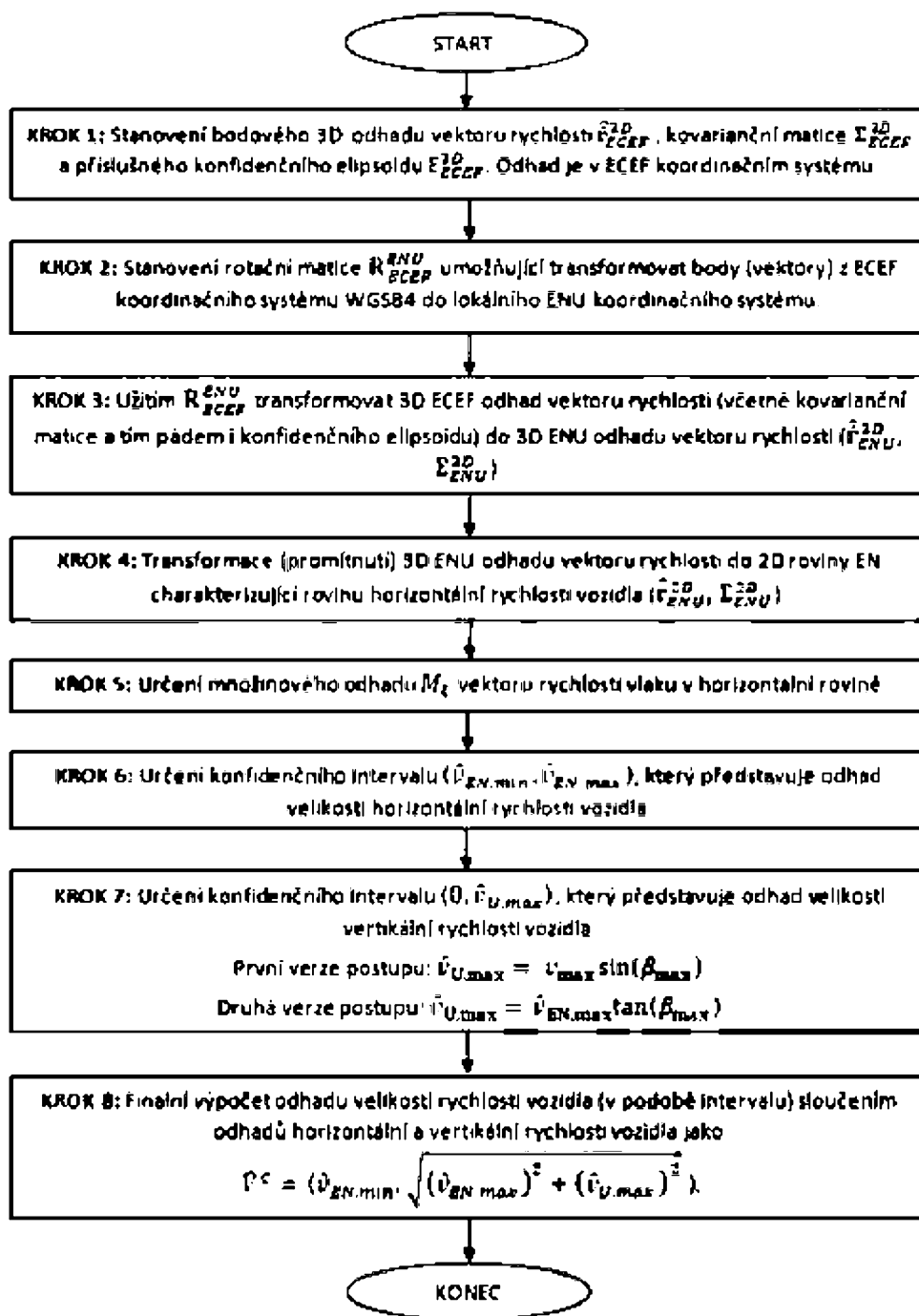
Seznam vztahových značek:

- A GNSS přijímač s anténou
- B Paměť 1 (flash)

- C Procesor
- D Monitor
- E Paměť 2 (HDD, databáze)
- F Sběrnice
- G Paměť 3 (ROM či EPROM)
- H GNSS družice
- I Výstup (online či off-line) subsystému do externích zařízení (přes dohodnutý protokol)
- J Externí zadání potřebných parametrů



Obr. 1



Obr. 2