

# PRVÉ SKÚSENOSTI S POUŽITÍM NESENÉHO INERCIÁLNEHO NAVIGAČNÉHO SYSTÉMU V LESNOM PROSTREDÍ

## FIRST EXPERIENCE WITH PEDESTRIAN INERTIAL NAVIGATION SYSTEM APPLICATION UNDER FOREST CONDITIONS

JÁN TUČEK ✉ - MIROSLAV KARDOŠ - JULIÁN TOMAŠTÍK

*Technická univerzita vo Zvolene, Lesnícka fakulta, Katedra hospodárskej úpravy lesov a geodézie, T. G. Masaryka 24, SK - 960 53 Zvolen, Slovak Republic*

✉ e-mail: [jan.tucek@tuzvo.sk](mailto:jan.tucek@tuzvo.sk)

### ABSTRACT

As an alternative for localization using global navigation satellite systems (GNSS) under conditions with poor signal reception and quality of the position solution reached, the devices integrating GNSS with inertial navigation system (INS) are promoted. The same applies to guidance, navigation, positioning and orientation of the aircraft, ships as well as terrestrial vehicles and pedestrian cared equipment. Specific requirements exist also in relation to the location of the sensors in advanced technology for collecting of different kinds of geographic information. This paper provides a brief overview of knowledge concerned to related areas, and presents the results of experimental GNSS/INS equipment testing. The test apparatus consists of NovAtel GNSS receiver ProPak6, inertial surveying unit IMU-KVH1750, and GNSS antenna Novatel GPS-703-GGG. Software Inertial Explorer 8.60 was used for data processing. Testing was conducted in the summer 2015 on the polygon formed by 59 points organized into three tracks/lines under the forest canopy conditions. Mean value of the positional deviation, compared to differential GNSS solutions and deeply integrated (tightly coupled) and smoothed GNSS/INS solutions, decreased from 1.51 to 2.11 meters, which represents 31–52%. Values of the standard deviations (variance) were reduced from 0.91 to 1.43 meters (11–68%) for all three tracks. To be useful for applications in forestry, next knowledge resources can be regarded mainly to (i) the field of platforms and sensors positioning for data gathering for the geographic information creation, (ii) the area of pedestrian navigation especially in the outdoor environment, and (iii) the area of improving the GNSS/INS integration, both in terms of integration solutions as well as the used components parameters.

**Kľúčové slová:** globálny navigačný satelitný systém, degradácia signálu, inerciálny navigačný systém, integrácia, určovanie polohy pod clonou lesného porastu, výsledky testovania

**Key words:** global navigation satellite system, signal degradation, inertial navigation system, integration, location under forest canopy, test results

### ÚVOD

Množstvo aplikácií v inžinierskej geodézii, navigácii ale aj v obhospodarovaní prírodných zdrojov vrátane lesníctva je závislé na lokalizácii pomocou globálnych navigačných satelitných systémov (GNSS). V podmienkach prostredí s vegetačným krytom lesných porastov, ale aj prirodzených a urbánnych kaňonoch sa však príjem signálu GNSS výrazne zhoršuje najmä kvôli cloneniu signálu lesným porastom a terénom, pôsobením viaccestného príjmu (multipath), zhoršením kvality/sily signálu a/alebo nevyhovujúcej geometrie postavenia satelitov. Uvedená problematika sa teší veľkému záujmu tak zo strany konštruktérov a producentov zariadení, geodetov, kartografov a geoinformatikov, ako aj špecialistov z aplikačných oblastí – lesníkov, geológov, technológov atď. Existuje tiež široké portfólio výskumných prác zameraných na štúdium vplyvu detailných charakteristík faktorov (podmienok prostredia) na presnosť lokalizácie v takýchto podmienkach.

Vzhľadom na uvedené obmedzenia, ale aj rýchly všeobecný technologický rozvoj a inovácie sa ako alternatíva alebo ako záložné lokalizácie pomocou GNSS začínajú presadzovať multisenzorové riešenia. Aj keď

obecne prichádza do úvahy použitie viacerých možností (pseudolity, vizuálne senzory, ultrasonické a magnetické senzory), najväčšia pozornosť sa sústreďuje na inerciálne navigačné systémy (INS). Zvlášť intenzívny rozvoj existuje v oblasti integrovaného vedenia, navigácie, polohovania a orientácie leteckých, lodných ale aj pozemných mobilných a v poslednej dobe aj nesených zariadení. Špecifické sú tieto požiadavky tiež vo väzbe na lokalizáciu a polohovanie senzorov pri vyspelých technológiach zberu rôzneho druhu geografických údajov (digitálna fotogrammetria, multi- a hyperspektrálne záznamy, radarové a lidarové údaje) a v poslednom období aj na diaľku ovládaných leteckých nosičov (po anglicky Unmanned Aerial Vehicles – UAV) a integrovaných mobilných a nesených mapovacích systémov. Napriek evidentnej atraktívnosti sa naproti tomu zatiaľ venuje len malá pozornosť využitiu integrovaných GNSS/INS zariadení v lesníctve.

Predložená práca má dva ciele: (i) uvádza stručný prehľad poznatkov z príbuzných a dotknutých oblastí s dôrazom na možnosti, existujúce riešenia a potenciál pre lesnícke aplikácie a (ii) prezentuje výsledky experimentálnych meraní polohy neseným integrovaným GNSS/INS zariadením v lesnom prostredí, ktoré patria k prvým na Slovensku.

## Rozbor problematiky

Takmer všeobecná akceptácia GNSS v poslednom období zároveň prispela k odhalienu a zdôrazneniu zásadných praktických obmedzení tejto technológie – najmä v miestach, kde je signál satelitov blokován alebo odrážaný, teda pod vodou, pod zemou, v budovách, v strmom teréne, v urbánných kaňonoch a pod lesným porastom. Naopak, inerciálne technológie nie sú ovplyvňované takýmito vplyvmi, avšak nevýhodou môže byť strata presnosti s rastúcim časom. Prirodzeným následkom je záujem o spájanie oboch technológií špecialistami pochádzajúcimi z komunit a aplikačných oblastí na obidvoch stranách.

## Určovanie polohy v lesníctve

Terestrické meranie polohy klasickými geodetickými postupmi v lesníctve je špecifické najmä prostredím, v ktorom sa samotné meranie realizuje. Vo väčšine prípadov sa jedná o veľmi variabilné, členité a neprehľadné prostredie, ktoré nepriaznivo vplyva na meranie. Pri geodetických činnostiach je potom nevyhnutné negatívne zasahovať do lesných porastov napr. vytváraním priesekov na zabezpečenie viditeľnosti zámer. Táto činnosť má samozrejme z lesníckeho pohľadu negatívny efekt na lesný porast a jeho výstavbu a zároveň negatívne ovplyvňuje kvalitu a efektívnosť prác samotných (GILLET et al. 2000; ŽÍHLAVNÍK, TUNÁK 2010). Z pohľadu presnosti mapovania a tvorby lesníckych máp je na Slovensku kľúčový Štandard digitálneho mapového diela s obsahom lesného hospodárstva (NLC 2007). Predpokladá, že pri použití vhodných metód bude hodnota strednej súradnicovej chyby  $m_{xy} \leq 0,50$  m. Pri katastrálnom mapovaní sú kritériá presnosti prísnejšie ( $m_{xy} \leq 0,26$  m), ale naopak pri niektorých úlohách môže byť dostačujúca aj nižšia presnosť (napr. predbežné zisťovanie, navigácia a pod.).

Napriek nesporným veľkým prínosom, lesníctvo zároveň predstavuje typickú oblasť s prejavom nedostatkov technológie GNSS, čomu je takisto venovaná náležitá pozornosť. Zároveň treba uviesť, že problematika je dynamická a podlieha vývoju tak z hľadiska parametrov a možností technológie, ako aj prístupov k spracovaniu výsledkov a ich vyhodnotenia. V nedávnom období boli publikované mnohé práce, napr. BAKULA et al. (2009), VALBUENA et al. (2010), KLIMÁNEK (2010) so všeobecnejším zameraním alebo GALÁN et al. (2011), VALBUENA et al. (2012), BLUM et al. (2016) zamerané na uplatnenie špecifických prístupov a/alebo metód vyhodnotenia.

V lesníckom mapovaní je aktuálne dominantná metóda fotogrametrického vyhodnotenia, kde si technológia GNSS našla svoje miesto pri meraní polohy vlícovacích bodov. Je tak možné oveľa rýchlejšie a efektívnejšie zmerať väčší počet vlícovacích a kontrolných bodov pre správne riešenie aerotriangulácie a kontrolu kvality fotogrametrických produktov.

Z výsledkov uskutočnených experimentov v podmienkach lesného prostredia vyplýva, že presnosť merania GNSS technológiou závisí od použitej metódy merania, dĺžky observácie, počtu a konštelácie družíc, konfigurácie terénu, expozície, ako aj charakteristik lesného porastu. Meranie v podmienkach lesného prostredia je teda oveľa náročnejšie ako na voľnom priestranstve. Aj keď vývoj technológie GNSS prináša neustále zdokonaľovanie zariadení a vylepšovanie algoritmov pre vyhodnotenie signálov, výraznejšiu pozitívnu zmenu možno očakávať len zásadnejšou zmenou používaných technológií, vrátane integrácie GNSS s inerciálnymi zariadeniami.

## Inerciálne navigačné/meracie systémy a nezávislá inerciálna navigácia

Inerciálne navigačné systémy predstavujú výrazne komplikovanú a štruktúrovanú oblasť. Je možné nastudovať ju na rozličnej úrovni detailu z rôznych zdrojov od komplexných publikácií (učebníc a štúdií) až po rôzne motivované a koncipované parciálne rozboru a popisy

v časopiseckých publikáciách. V prvej skupine publikácií možno uviesť napr. LAWRENCE (1992), GROVES (2013) alebo v slovenskom jazyku KOPÁČIK (2003) a SOTÁK (2006). Z druhej, mimoriadne rozsiahlej skupiny publikácií uvádzame GAO, LACHAPPELLE (2008), resp. vzhľadom na komplexnosť HASAN et al. (2009), alebo pre slovenského a českého čitateľa dostupnejšie SOTÁK et al. (2008) alebo KRESÁK, BEREŠOVÁ (2014).

Podstatou inerciálnej navigácie je nepretržité určovanie polohy pomocou primárnych inerciálnych senzorov (gyroskopy, akcelerometre), ktoré sú integrované do inerciálnej meracej jednotky (Inertial Measurement Unit – IMU). Vychádzajúc zo známej počiatočnej polohy sa s veľkou frekvenciou meria veľkosť a smer pôsobenia zrýchlenia a uhlovej rýchlosti a vykonáva sa ich dvojité integrácia vzhľadom na čas. Výpočtové spracovanie výstupov IMU zabezpečuje navigačný počítač (Navigation Processor – NP). Napriek existencii skutočne veľmi presných senzorov na meranie primárnych veličín s minimálnymi odchýlkami od skutočnosti, ako aj presným výpočtovým algoritmom sa existujúce chyby meraní pri spracovaní kumulujú vplyvom integrácie parametrov. Následkom sú chyby v navigácii, ktoré typicky rastú s časom a ktoré nie je možné principiálne odstrániť, len znížiť. V súčasnosti sa najčastejšie využívajú tzv. bezplatformové systémy (strap-down), ktoré majú senzory pevne spojené s konštrukciou navigovaného objektu. Každá os objektu pritom zodpovedá osi citlivosti jedného akcelerometra a gyroskopu. Inerciálna jednotka má potom šesť stupňov voľnosti a umožňuje merať posuvný a rotačný pohyb v troch pravouhlých osiach. Na integráciu INS a doplnujúcich údajov sa používa Kalmanov filter (KALMAN 1960; WELCH, BISHOP 2006 alebo LEE et al. 2013).

## Integrácia GNSS/INS

Dominantným podporným senzorom na riešenie podporovanej/integrovannej inerciálnej navigácie je v poslednom období práve GNSS, ktorý poskytuje riešenia určenia polohy, ktoré sú síce zašumené (nepresné), ale stabilné. Naproti tomu INS poskytuje údaje o polohe, ktoré sú plynulé, ale náchylné k posunom. GNSS riešenia môžu byť prerušované pri prerušení príjmu signálu prekážkami, zatiaľ čo riešenia INS sú neprerušované. Oba spôsoby navigácie sú tak komplementárne v tom zmysle, že nevýhoda či slabina jedného senzora je výhodou druhého. Pomocou GNSS podporované INS tak využívajú najlepšie charakteristiky oboch typov senzorov.

Pri aplikácii plytko prepojenej konfigurácie (loosely coupled INS/GNSS integration) Kalmanov filter zapracováva riešenia polohy a rýchlosti z GNSS ako podporné údaje do inerciálneho navigátora. GNSS prijímač je v tomto prípade nezávislým navigačným subsystémom, ktorý je schopný samostatného (nezávislého) polohovania dovtedy, kým môže prijímať signály zo štyroch alebo viacerých satelitov. V prípade, že prijímač sleduje menej ako 4 satelity, nemôže poskytnúť fixácie polohy a rýchlosti Kalmanovmu filtru. V tomto prípade funguje inerciálny navigátor ako nepodporovaný, pričom je subjektom posunov z reziduálnych chýb vo svojom východiskovom polohovaní a inerciálnych senzoroch. Následné korekcie chýb Kalmanovým filtrom sú extrapolované z posledných správne určených údajov GNSS. Prijímač síce môže pokračovať vo vytváraní výstupov na základe pseudovzdialeností alebo fázových pozorovaní pre najmenej 3 satelity, ktoré však plytko riešená integrácia nie je schopná využívať.

V prípade hlboko prepojenej konfigurácie (tightly coupled INS/GNSS integration) sa predpokladá spracovanie GNSS pseudovzdialeností, fázových a Dopplerovských meraní Kalmanovým filtrom. Navigačné funkcie GNSS prijímača – menovite fixácie polohy a časové posuny, prípadne RTK nie sú využívané. Kľúčovou výhodou takejto konfigurácie je nepretržité využitie všetkých GNSS údajov počas celého procesu. Na riadenie navigačných chýb sa tak efektívne využívajú údaje čo i len z jedného satelitu. Toto je zvlášť dôležité v oblastiach s marginálnym

pokrytím GNSS, ako sú lesné porasty, urbánne a prirodzené kaňony s menej ako 4 viditeľnými satelitmi. V danej oblasti existuje intenzívny rozvoj a publikovanie výsledkov (PETOVELLO et al. 2009; QUIN et al. 2013 alebo aj LI et al. 2014).

#### **Integrácia ďalších senzorov, dostupné technológie a aplikačné oblasti**

Aj keď GNSS a INS vytvárajú jadro väčšiny navigačných systémov, v prakticky využívaných aplikáciách sú bežne dopĺňané ďalšími senzormi. Ich výber závisí najmä od povahy aplikácie navigačného systému (GROVES 2013). Pri leteckých ide najmä o barometrické merače výšok, rádiové majáky, magnetický kompas a dopplerovský radar. Námorné využívajú magnetický kompas, rádiové majáky a dopplerovské radary a sonary. V mobilných aplikáciách (vo vozidlách) sú to najmä odometre, ale aj magnetické kompas a u vlakov aj dopplerovský radar. U nesených systémov (pedestrian navigation) je možné využiť služby mobilných operátorov, magnetické kompas a najmä identifikáciu stavov s nulovou rýchlosťou (ZUPT – Zero Velocity Update).

Pre implementáciu v mobilných systémoch boli publikované viaceré práce pokrývajúce priestor od zásadných otázok integrácie (WHITTAKER, NASTRO 2006; XIE, PETOVELLO 2012; SOLOVIEV et al. 2012) až po výsledky rôzne motivovaných a koncipovaných testov (TAYLOR, CLARK 2008; SOLOVIEV et al. 2012; XIE et al. 2014). Obecne je na trhu veľké množstvo výrobcov komponentov ale aj ucelených integrovaných zariadení. Pre oblasť mobilných a nesených aplikácií však možno upozorniť najmä na systémy Applanix In-Fusion Technology a NovAtel SPAN Architecture. Detailnejšie informácie dokumentujúce princípy riešení spolu s hodnotením výsledkov praktických aplikácií boli pre prvú technológiu publikované napr. v práci HUTTON et al. (2008). Pre technológiu NovAtel možno podobný prehľad získať z publikácie KENNEDY et al. (2006).

Ako zdroje informácií využiteľné pre riešenie integrácie ďalších senzorov pre mobilné a nesené aplikácie možno uviesť napr. prácu GAO (2006), ktorá sa zaoberá integráciou ďalších senzorov pre snímanie smeru a rýchlosti u mobilných aplikácií. STIRLING et al. (2005) uvádzajú návrh riešenia senzorov a metódy na lepšie určovanie orientácie pre navigáciu chodcov. Špeciálna pozornosť je u nesených (pedestrian alebo personal) zariadení venovaná identifikácii stavov s nulovou rýchlosťou (ZUPT – Zero Velocity Update). Ide o identifikovanie situácie, kedy sa INS nepohybuje voči zemskému telesu, a tak vylepšiť kalibráciu zdrojov chýb rýchlosti v adjustácii senzorových chýb (GILLET et al. 2000; ZHANG et al. 2011)

## MATERIÁL A METODIKA

Testovaný inerciálny systém pozostáva z GNSS prijímača NovAtel ProPak6, inerciálnej meračskej jednotky IMU-KVH1750 a GNSS antény NovAtel GPS-703-GGG. ProPak6 je 240kanálový GNSS prijímač, schopný prijímať signál prakticky všetkých v súčasnosti funkčných satelitných navigačných systémov (GPS, GLONASS, Galileo, BeiDou, QZSS). Inerciálna meračská jednotka KVH1750 používa gyroskopy na báze optického vlákna a MEMS akcelerometre. Trojfrekvenčná anténa GPS-703-GGG dopĺňa GNSS prijímač a umožňuje príjem signálu všetkých už spomenutých systémov. Celý inerciálny navigačný systém je prispôbený pre pešie použitie uložením do spevneného batohu a je doplnený terénnym počítačom pre ovládanie celého systému (obr. 1). Podrobnejšie údaje môže nájsť vážny záujemca na webovej stránke producenta alebo v prácach citovaných tu v časti Rozbor problematiky. Testovanie inerciálneho navigačného satelitného systému bolo uskutočnené v lete 2015 na bodovom poli v blízkosti obcí Kováčo-



**Obr. 1.** Použitý nesený inerciálny navigačný systém (foto: J. Tomašík, Š. Saloň)

**Fig. 1.** Applied pedestrian inertial navigation system (photo: J. Tomašík, Š. Saloň)

vá a Sielnica. Bodové pole je tvorené 59 bodmi v lesnom prostredí. Ako porovnávací etalón boli použité súradnice týchto bodov, určené metódou polygónového ťahu zameraného univerzálnou meračskou stanicou TOPCON s výslednou presnosťou rádovo niekoľkých centimetrov.

Celkovú priestorovú situáciu a umiestnenie bodov trás bodového poľa znázorňuje obr. 2. Z lesníckeho hľadiska boli podmienky pomerne pestré, ale s ohľadom na diverzitu medzi jednotlivými trasami vcelku porovnateľné. Vzhľadom na rozsah podkladov (veľký celkový počet

porastov), ale najmä na v tejto práci predložený prístup k vyhodnoteniu získaných výsledkov, nepovažujeme za potrebné detailne uvádzať všetky charakteristiky lesných porastov pokrývajúcich celé experimentálne územie. Pre získanie celkovej predstavy ako aj skutočnosť, že pri komentovaní výsledkov používame ako reprezentatívnu trasu č. 3., uvádzame na tomto mieste detaily popisu lesných porastov, ktorými viedla.

Ide o jednoetážové porasty vo fáze žrdkoviny (316b, 317c), tenkej kmeňoviny (316a, 317a) alebo strednej kmeňoviny (317b). Porasty sú nerovnoveké, nerovnomerne vyspelé a zmiešané, s prevahou smreka (317a, 317b), borovice (317c) alebo tvorené zmesou drevín (buk, smrek, dub, hrab (316a, 316b, 317b)). Podrobnejšie taxačné charakteristiky porastov uvádzame v tab. 1.

Pre návrh metodiky testovania nesených integrovaných GNSS/INS zariadení v lesníckych podmienkach (pod clonou vegetačného krytu) existuje len veľmi málo publikovaných príkladov (GILLET et al. 2000; REUTEBUCH et al. 2003). Preto sme sa okrem uvedených prístupov inšpirovali pri návrhu metodiky najmä prístupmi používanými pri testovaní mobilných zariadení buď priamo v lesných podmienkach (SOLOVIEV et al. 2012), alebo častejších testov mobilných zariadení v podmienkach urbánnych kaňonov (GODHA et al. 2006; KENNEDY et al. 2006). Okrem iných okolností pritom zohráva úlohu aj časové hľadisko vývoja technológie, konštrukčné detaily použitých zariadení ako aj špecifický účel testovania v užšom zmysle.

Pre účely popisovaného experimentu bolo bodové pole zamerané formou 3 línií (trás), pričom na začiatku a na konci každej trasy bolo vykonané statické a kinematické zosúladenie (alignment) súčastí zostavy podľa odporúčanií dodávateľa. Statické zosúladenie spočíva v statickej observácii GNSS na mieste s bezproblémovým príjmom signálu po dobu cca 1 minúty. Pri kinematickom zosúladení sa jedná o rýchly priamočiary pohyb v podmienkach s dobrým príjmom GNSS signálu na trase dlhej aspoň niekoľko desiatok metrov. Po tejto inicializácii prístroja nasleduje samotné meranie zvolenej trasy, pričom je odporúčané podľa možnosti v pravidelných intervaloch vykonať krátke zosúladenie zostavy na miestach s dobrým príjmom GNSS signálu. Pri meraní zariadenie ukladá všetky dostupné údaje automaticky v časovom intervale 5krát za 1 sekundu. V súčasnej podobe použitý INS systém neumožňuje meranie polohy jednotlivých bodov, ale nakoľko súčasťou zaznamenaných údajov je aj čas každého merania, bol tento údaj použitý na identifikáciu polohy jednotlivých bodov bodového poľa. Pri krátkej zastávke na každom meranom bode bol zaznamenaný GPS čas udávaný prijímačom, na základe ktorého boli potom jednotlivé body identifikované v rámci záznamov trás.

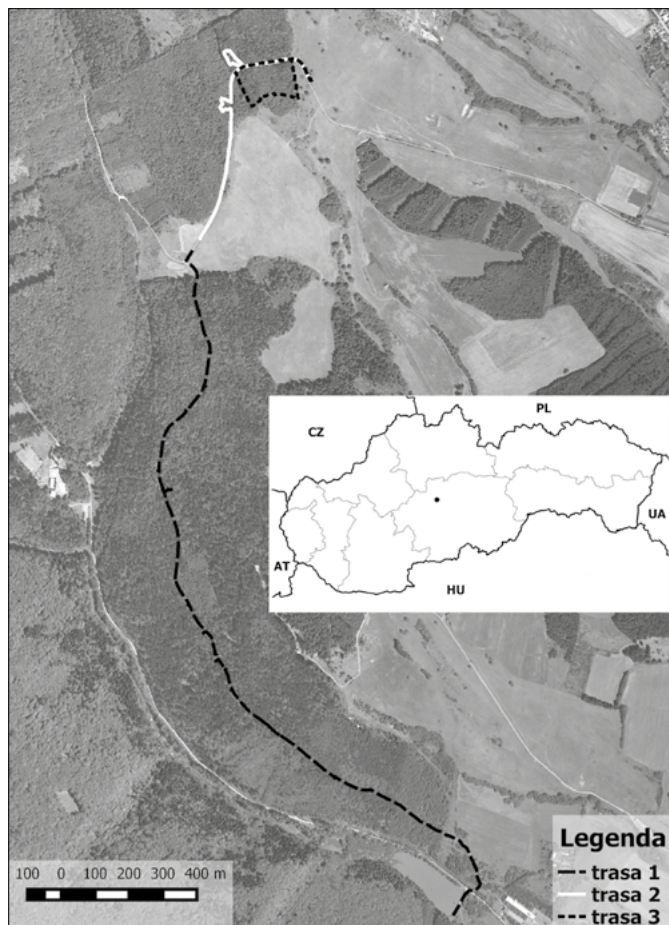
Spracovanie nameraných údajov prebehlo v softvéri Inertial Explorer 8.60 (NovAtel). Ako referenčné údaje pre GNSS riešenie boli použité záznamy získané prijímačom Topcon HiperGGD na báze zriadenej v areáli Technickej univerzity vo Zvolene. Pri spracovaní údajov bol použitý postup pre tzv. „tightly coupled (TC)“ riešenie, ktoré je výrobcom odporúčané. Pre každú z trás boli následne vo forme textového súboru vyexportované výsledky pre autonómne GNSS riešenie (bez postprocesingu), diferenciálne GNSS riešenie, kombinované filtrované TC riešenie a kombinované vyhladené TC riešenie, kde sú prudké zlomy trajektórie eliminované pomocou vyhladzovacieho algoritmu. Následne boli vybrané páry súradníc, ktoré zodpovedali polohám kontrolných bodov na základe času merania. Súradnice v systéme WGS84 boli transformované do systému JTSK a boli vypočítané súradnicové rozdiely medzi súradnicami určenými pomocou inerciálneho navigačného systému a etalónovými súradnicami, určenými totálnou stanicou. Zo súradnicových rozdielov boli následne vypočítané polohové odchýlky jednotlivých bodov. Pre polohové odchýlky boli určené minimá, maximá, priemery a smerodajné odchýlky podľa jednotlivých trás a variantov riešení.

Tab. 1.

Taxačné charakteristiky porastov ktorými viedla trasa č. 3.  
Taxation characteristics of forest stands surrounding the Track no. 3

Dielec <sup>1</sup>	Výmera <sup>2</sup> [ha]	Vek <sup>3</sup>	Zakmenenie <sup>4</sup>	Expozícia <sup>5</sup>
316b	5.05	35	0.9	SV <sup>6</sup>
317a	0.58	55	0.9	J <sup>7</sup>
317b	5.97	75	0.8	JZ <sup>8</sup>
317c	0.61	35	0.9	J <sup>7</sup>

<sup>1</sup>forest management unit, <sup>2</sup>acreage, <sup>3</sup>age, <sup>4</sup>stand stocking, <sup>5</sup>exposure, <sup>6</sup>north-east, <sup>7</sup>south, <sup>8</sup>south-west



Obr. 2.  
Celková priestorová situácia a umiestnenie trás bodového poľa  
Fig. 2.

Overall situation and location of experimental tracks

## VÝSLEDKY

Porovnanie polohy meraných trás s etalónovými súradnicami uvádza-  
me v tab. 2.

Zistené polohy bodov predstavujú okamžitú polohu bodu vzťahnutú k zaznamenanému času, nie je teda použitá žiadna forma priemerovania polohy. Aj z tohto dôvodu boli z výpočtu štatistických charakteristík vylúčené extrémne hodnoty. Jednalo sa výlučne o varianty riešenia GNSS bez postprocesingu a diferenciálne GNSS, pričom počet vylúčených hodnôt bol rádovo 1–2 hodnoty na jednu trasu. Z uvedených výsledkov je zrejmé, že použitie inerciálnej meračskej jednotky malo pozitívny vplyv na dosiahnutú presnosť. Stredná hodnota polohovej odchýlky sa pri porovnaní diferenciálneho GNSS a vyhladeného TC riešenia vo všetkých prípadoch znížila. Podobne sa znížila aj hodnota smerodajnej odchýlky (t.j. rozptylu), kde výnimkou je trasa č. 3. Pri výpočte tejto trasy bolo pomerne málo úspešné aj

diferenciálne GNSS riešenie, ktoré korektne prebehlo iba v miestach krátkej zastávky v okolí bodov (pozri obr. 3).

Ako môžeme vidieť z obr. 3, dostupnosť a spoľahlivosť iba GNSS riešenia je nedostatočná. Celkovo dosiahnuté výsledky iba GNSS merania jasne naznačujú potrebu externých podporných meraní na zvýšenie kvality určenia trajektórie. Nakoľko pre TC riešenie sú potrebné údaje GNSS aj IMU, je možné, že najhoršie výsledky v prípade trasy č. 3 sú spôsobené práve nedostatočným GNSS riešením. V prípade trás č. 1 a 2 sú stredné hodnoty a smerodajné odchýlky prakticky totožné napriek výrazne odlišnej dĺžke týchto trás. Tieto výsledky samozrejme nie je možné zovšeobecňovať, nakoľko sa jedná o prvé merania uvedeným systémom. Porovnanie filtrovaného TC riešenia, čiže TC riešenia bez vyhladenia a kombinovaného vyhladeného TC riešenia nepreukázalo, že by vyhladzovací algoritmus mal nepriaznivý vplyv na polohu pevných bodov. Pre podrobnejšiu analýzu faktorov vplyvujúcich na výslednú presnosť uvádzame na príklade trasy č. 3 aj vplyv

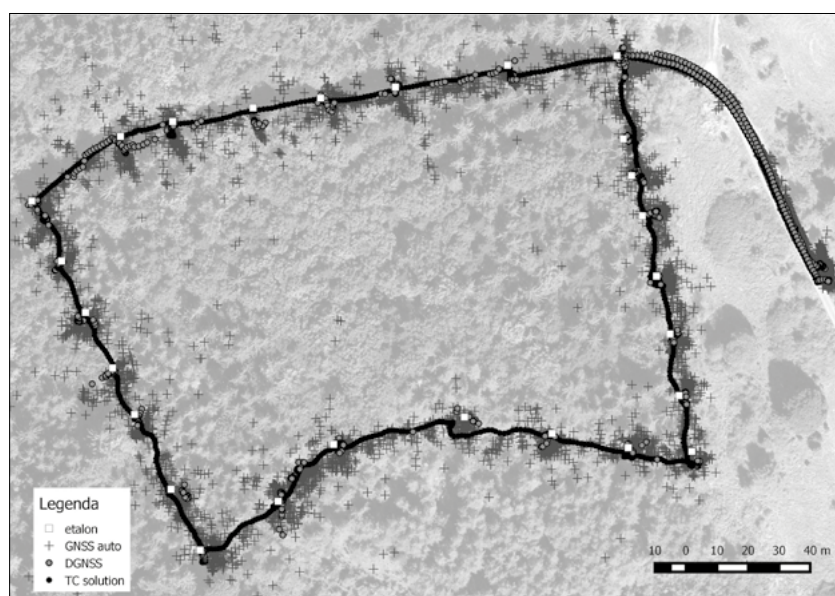
**Tab. 2.**

Základné štatistické charakteristiky polohových odchýlok podľa meraných trás a variantov riešenia. Percentuálna zmena medzi DGNSS a vyhladeným TC riešením

Basic statistical characteristics of positional error according to measured tracks and variant of solution. Percentual change between DGNSS and smoothed TC solution

	trasa'1 n=18 dĺžka <sup>2</sup> = 2,94 km				trasa'2 n=16 dĺžka <sup>2</sup> = 0,89 km				trasa'3 n=27 dĺžka <sup>2</sup> = 0,85 km			
	min	max	priemer <sup>3</sup>	$\sigma$	min	max	priemer <sup>3</sup>	$\sigma$	min	max	priemer <sup>3</sup>	$\sigma$
GNSS nespracované <sup>4</sup>	0.36	7.79	3.71	2.14	1.02	8.00	4.09	2.48	0.09	8.86	5.27	2.00
DGNSS	0.61	4.33	2.20	1.03	0.17	9.09	3.12	2.88	1.23	5.50	2.95	1.12
TC filtrované <sup>5</sup>	0.06	4.10	1.25	0.98	0.15	3.92	1.80	1.2	0.49	5.00	2.39	1.48
TC vyhladené <sup>6</sup>	0.09	3.79	1.51	0.92	0.17	3.06	1.50	0.91	0.01	4.62	2.11	1.43
zmena <sup>7</sup>			-31 %	-11 %			-52 %	-68 %			-28 %	+28 %

<sup>1</sup>track, <sup>2</sup>length, <sup>3</sup>mean, <sup>4</sup>GNSS raw, <sup>5</sup>TC filtered, <sup>6</sup>TC smoothed, <sup>7</sup>change

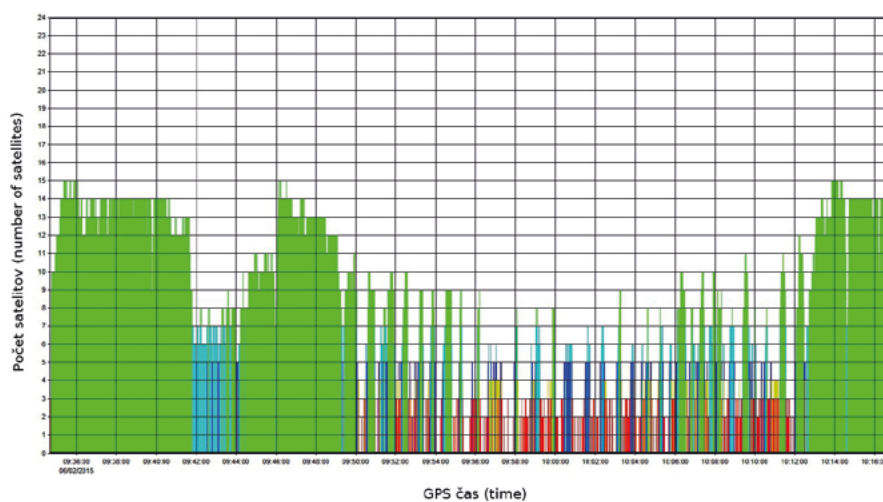


**Obr. 3.**

Znáznornenie autonómneho GNSS riešenia, diferenciálneho GNSS riešenia, „tightly coupled“ riešenia a porovnávacieho etalónu na príklade trasy č. 3

**Fig. 3.**

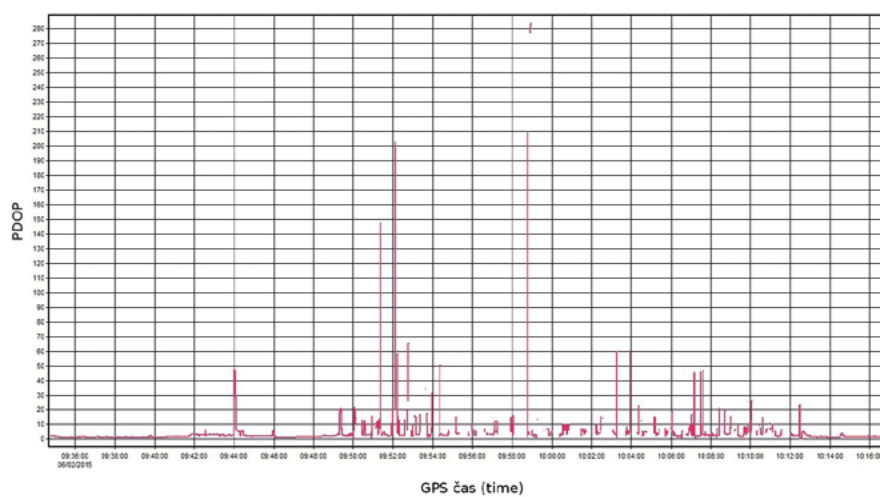
Depiction of autonomous GNSS solution, differential GNSS solution, “tightly coupled“ solution and reference etalon using example of the Track no. 3

**Obr. 4.**

Počet satelitov podľa času merania

**Fig. 4.**

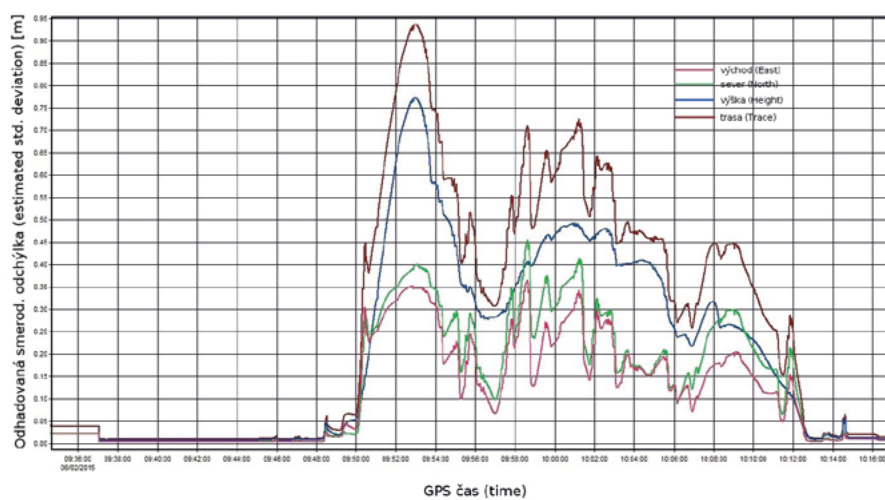
Number of satellites during the time of measurement

**Obr. 5.**

Degradácia celkovej presnosti GNSS merania podľa času

**Fig. 5.**

Degradation of the overall GNSS accuracy during the time of measurement

**Obr. 6.**

Očakávaná presnosť z Kalmanovho filtra (nie sú zahrnuté všetky možné chyby)

**Fig. 6.**

Expected accuracy from Kalman Filter (not all errors are included)

počtu satelitov (obr. 4), a vývoj veľkosti PDOP (Positional Dillution of Precision) ako charakteristiku presnosti určenia polohy pomocou GNSS (obr. 5).

Ako môžeme vidieť, počiatkové hodnoty PDOP boli okolo 2, čo súvisí s inicializáciou systému na voľnom priestranstve. Avšak vstupom do lesného prostredia (obr. 5, čas cca 9:50) sa celková presnosť GNSS merania zhoršila spolu s hodnotami PDOP priemerne od 15 do 20, výnimočne s extrémnymi hodnotami okolo 100. Súvisí to najmä so znížením počtu dostupných satelitov počas merania v lesnom prostredí (obr. 3). Kým na voľnom priestranstve dosahoval počet pozorovaných satelitov až 14, v lesnom prostredí sa znížil vo väčšine prípadov na 2–5, pričom za minimálny počet potrebný pre spoľahlivé riešenie určenia polohy sa považuje 4. Vyskytli sa aj úplné výpadky GNSS signálu. Napriek tomu je zrejme, že aj v týchto situáciách poskytovala experimentálna aparátúra akceptovateľné výsledky. Na druhej strane malo toto zhoršenie významný vplyv na výslednú polohovú presnosť. Podrobnejšie vyhodnotenie vplyvu uvedeného faktora vyžaduje detailnejšie vyhodnotenie, resp. prípravu komplexnejšieho experimentu.

Obrázok 6 ukazuje očakávanú presnosť kombinovaného GNSS/INS riešenia po aplikácii Kalmanovho filtra, pričom aj tu je zrejme výrazná degradácia presnosti po vstupe do lesného prostredia.

Na základe obsahu tab. 3 môžeme konštatovať, že 91 % všetkých epoch GNSS/INS merania dosiahlo po vyrovnaní aplikáciou Kalmanovho filtra hodnotu polohovej odchýlky menšiu než 0,5 m. Zároveň sme štatistickým testom potvrdili, že zistené odchýlky nemajú s pravdepodobnosťou 95 % ( $p < 0.05$ ) normálne rozdelenie.

## DISKUSIA A ZÁVER

Napriek vcelku intenzívnemu a častému využívaniu integrovaných GNSS/INS zariadení pri presnom určovaní polohy leteckých a mobilných zariadení, zatiaľ pomerne zriedkavé sú výsledky nesených (personálnych) aplikácií a riešení v lesnom prostredí. Ešte menej je publikovaných výsledkov pre testy zamerané na zistenie presnosti určenia polohy.

Po zhrnutí možno konštatovať, že nami dosiahnuté výsledky sú porovnateľné s výsledkami experimentov publikovaných inými autormi. Z vyhodnotenia výsledkov vo forme grafu v práci (GILLET et al. 2000) možno usudzovať na submetrovú veľkosť odchýlok voči správnej polohe, ktorá sa však vzťahovala (bola definovaná) pre body na priamej línii, pretože takáto požiadavka je typická pre použitie v geologickom prieskume. V práci REUTEBUCH et al. (2003) je uvedená priemerná veľkosť odchýlky horizontálnej polohy, zistenej na 12 experimentál-

nych trasách s dĺžkou 253–3793 metrov, obsahujúcimi 3 až 20 porovnaných bodov a časom merania 806–6931 sekúnd, pri vyhodnotení v reálnom čase 2,3 m a po postprocesingovom spracovaní 1,4 m. SOLOVIEV et al. 2012 použili pri teste aparátúru NovAtel, avšak s kvalitnejšou inerciálnou jednotkou Honeywell H764G. Publikované výsledky demonštrujú, že výsledky riešenia polohy na základe hlbokjej integrácie umožňujú rekonštruovať polohu bodov trajektórie pohybu vozidla v zalesnenom prostredí na submetrovej úrovni. Na zabezpečenie funkčnosti však musí byť GNSS časť aparátúry integrovaná s inerciálnou jednotkou navigačnej alebo aspoň taktickej kategórie.

Vzhľadom na potreby a možnosti aplikácii v lesníctve, na základe posúdenia širokej palety materiálov publikovaných za posledných zhruba 10–15 rokov, považujeme za vhodné venovať sa najmä (i) oblasti súvisiacej s polohovaním platforiem a senzorov pri zbere údajov pre tvorbu geografických informácií (v lesníctve), (ii) oblasti navigácie chodcov (pedestrian) najmä vo vonkajšom prostredí, (iii) oblasti vylepšovania integrácie GNSS/INS tak z hľadiska riešení integrácie, ako aj parametrov použitých komponentov.

Technológia integrácie GNSS/INS predstavuje významný prínos pri fotogrametrickom vyhodnotení leteckých snímok, ktoré ako sme uviedli v rozbere, predstavujú dominantnú metódu pri mapovaní lesov. Takto je možné určiť parametre vonkajšej orientácie leteckých snímok bez použitia vlčiacich bodov a nevyhnutnosti ich doterajšieho pozemného merania. (IP et al. 2008; WOLF et al. 2014). Okrem digitálnej fotogrametrie sa podobné prístupy uplatňujú tiež u hyperspektrálnych, lidarových a/alebo termálnych senzorov a údajoch z nich. Nové špecifické požiadavky pri zachovaní vlastností klasických riešení pre väčšie nosiče je potrebné riešiť pri použití diaľkovo pilotovaných leteckých systémov (RIEKE et al. 2011; COLOMINA, MOLINA 2014; MIAN et al. 2015).

Polohovanie platformy, resp. senzorov zohráva kľúčovú úlohu aj pri aplikácii mobilných a nesených (pedestrian) mapovacích systémov pod clonou lesného porastu (KAARTINEN et al. 2015; TANG et al. 2015). V prípade nesených zariadení sa problematika prelína s navigáciou chodcov vo všeobecnosti a vo vonkajšom prostredí zvlášť. Okrem širších súvislostí považujeme za vhodné venovať pozornosť najmä prácam zameraným na využiteľnosť modelovania parametrov kroku a využitia ZUPT (PARK, SUH 2010; SUSI et al. 2013; LI et al. 2013) a/alebo uplatneniu ďalších podporných senzorov, vylepšených techník integrácie, využitia kvalitnejších senzorov, prípadne menej výkonných inerciálnych jednotiek.

Prínosy inovačného vývoja zariadení, zvyšovanie ich parametrov a výpočtového výkonu sú neodiskutovateľné (BARBOUR, SCHMIDT 2001

Tab. 3.

Početnosť a kategórie jednotlivých epoch GNSS merania pod clonou lesného porastu v závislosti od očakávanej polohovej presnosti  
Frequency and categories of individual GNSS epoch measurements under forest canopy cover, depending on the expected positional accuracy

Kategória <sup>6</sup>	Tabuľka početnosti <sup>1</sup> : K-S d = 0.06756, $p < 0.01$ ; Lilliefors $p < 0.01$			
	Početnosť <sup>2</sup>	Kumulatívna p. <sup>3</sup>	Relatívna p. (%) <sup>4</sup>	Kumulatívna (%) <sup>5</sup>
0.04<x<=0.10	23	23	1.74	1.74
0.10<x<=0.20	200	223	15.15	16.89
0.20<x<=0.30	389	612	29.47	46.36
0.30<x<=0.40	357	969	27.05	73.41
0.40<x<=0.50	235	1204	17.80	91.21
0.50<x<=0.60	116	1320	8.79	100.00

<sup>1</sup>frequency table, <sup>2</sup>frequency, <sup>3</sup>cumulative frequency, <sup>4</sup>relative frequency, <sup>5</sup>cumulative (relative) frequency, <sup>6</sup>category

versus SCHWARZ, EL-SHEIMY 2007 alebo SCHMIDT 2014). Rovnako je zrejme neustály, možno v poslednom období doslova gradujúci počet vylepšení integračných riešení (ABD RABBOU, EL-RABBANY 2015; QIAN et al. 2015). Zvláštny a pre celkový vývoj veľmi dôležitý záujem možno identifikovať o aplikáciu (miniaturizovaných) INS s nižším (v pôvodnom ponímaní) výkonom a cenou (LI, WANG 2014; HASSANA et al. 2015 ale aj SOTÁK et al. 2008 a pod.).

Pravdepodobne sú práve oni najdôležitejšou zárukou perspektívnosti rozvoja celej, v predloženej práci identifikovanej oblasti s vyústením do zvýšenej využiteľnosti integrovaných GNSS/INS zariadení vo všetkých oblastiach s potrebou presného polohovania v podmienkach degradovaného signálu GNSS, vrátane lesníctva.

#### Podakovanie:

Tento príspevok vznikol ako súčasť riešenia projektu VEGA 1/0953/13 „Geografická informácia o lese a krajine – špecifická tvorba a využitia“. Použitá experimentálna aparatura bola obstaraná v rámci infraštruktúrneho projektu Operačného programu Výskum a vývoj – „Centrum excelentnosti na podporu rozhodovania v lese a krajine“, ITMS kód 26220120069, spolufinancovaného z Európskeho fondu regionálneho vývoja.

## LITERATÚRA

- ABD RABBOU M., EL-RABBANY A. 2015. Integration of multi-constellation GNSS precise point positioning and MEMS-based inertial systems using tightly coupled mechanization. *Positioning*, 6: 81–95.
- BAKULA M., SZCZAK S., PELC-MIECZKOWSKA R. 2009. Performance of RTK positioning in forest conditions: case study. *Journal of Surveying Engineering*, 135: 125–130.
- BARBOUR N., SCHMIDT G. 2001. Inertial sensors technology trends. *IEEE Sensors Journal*, 1: 332–339.
- BLUM R., BISCHOF R., SAUTER U. H., FOELLER J. 2016. Test of reception of the combination of GPS and GLONASS signals under and above forest canopy in the Black Forest, using choke ring antennas. *International Journal of Forest Engineering*, 27 (1). DOI: 10.1080/14942119.2015.1122945
- COLOMINA I., MOLINA P. 2014. Unmanned aerial systems for photogrammetry and remote sensing: A review. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 92: 79–97.
- GALÁN C.O., RODRIGUEZ-PEREZ J.R., TORRE J.M., GARCIA NIETO P.J. 2011. Analysis of the influence of forest environment on the accuracy of GPS measurements by using genetic algorithms. *Mathematical and Computer Modelling*, 54: 1829–1834. DOI: 10.1016/j.mcm.2010.11.077
- GAO G., LACHAPPELLE G. 2008. A novel architecture for ultra-tight HSGPS-INS integration. *Journal of Global Positioning Systems*, 7: 46–61.
- GAO J. 2006. GPS/INS/G Sensors/Yaw Rate Sensor/Wheel Speed Sensors Integrated Vehicular Positioning System. In: *Proceedings of the 19th international technical meeting of the Satellite Division of the Institute of the Navigation. ION GNSS 2006. September 26–29, 2006, Fort Worth Convention Center, Fort Worth, Tx, Fairfax, Institute of Navigation.*: 1427–1439. [CD-ROM]
- GILLET J., SCHERZINGER B. M., LITHOPOULOS E. 2000. Inertial/GPS System for Seismic Survey. In: *Proceed. Society of Exploration Geophysicist (SEG 2000). Calgary, Alberta Canada, June 4-7, 2000.* [CD-ROM]
- GODHA S., LACHAPPELLE G., CANNON M. E. 2006. Integrated GPS/INS System for Pedestrian Navigation in a Signal Degraded Environment. In: *Proceedings of the 19th international technical meeting of the Satellite Division of the Institute of the Navigation. ION GNSS 2006. September 26–29, 2006, Fort Worth Convention Center, Fort Worth, Tx, Fairfax, Institute of Navigation.*: 2151–2164. [CD-ROM]
- GROVES P.D. 2013. *Principles of GNSS, inertial and multisensor integrated navigation systems.* Boston, Artech House: 776 s.
- HASAN A. M., SAMSUDIN K., RAMLI A.R., AZMIR R.S., ISMAEL S.A. 2009. A review of navigation systems (integration and algorithms). *Australian Journal of Basic and Applied Sciences*, 3: 943–959.
- HASSANA M.G., WANG D., XIAO Z. 2015. GNSS/Low-Cost MEMS-INS integration using variational Bayesian adaptive cubature Kalman smoother and ensemble regularized ELM. *Mathematical Problems in Engineering*, 2015: Article ID 682907. DOI: 10.1155/2015/682907
- HUTTON J., IP A., BOURKE T., SCHERZINGER B., GOPAUL N., CANTER P., OVELAND I., BLANKENBERG L. 2008. Tight integration of GNSS post-processed virtual reference station with inertial data for increased accuracy and productivity of airborne mapping. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 37: 829–834.
- IP A.W.L., MOSTAFA M.R., HUTTON J., BARRIERE J.P. 2008. An optimally integrated direct georeferencing and flight management system for increased productivity of airborne mapping and remote sensing. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 37: 579–584.
- KAARTINEN H., HYYPPÄ J., VASTARANTA M., KUKKO A., JAAKKOLA A., YU X., PYÖRÄLÄ J., LIANG X., LIU J., WANG Y., KAIJALUOTO R., MELKAS T., HOLOPAINEN M., HYYPPÄ H. 2015. Accuracy of kinematic positioning using global satellite navigation systems under forest canopies. *Forests*, 6: 3218–3236. DOI: 10.3390/f6093218
- KALMAN R.E. 1960. A new approach to linear filtering and prediction problems. *Transaction of the ASME –Journal of Basic Engineering*, 82 (Series D): 35–45.
- KENNEDY S., HAMILTON J., MARTELL H. 2006. Architecture and system performance of SPAN -NovAtel's GPS/INS solution. In: *2006 IEEE/ION Position, Location, and Navigation Symposium. Coronado, CA, April 24–27, 2006. Piscataway, IEEE Operations Center.* DOI: 10.1109/PLANS.2006.1650612
- KLIMÁNEK M. 2010. Analysis of the accuracy of GPS Trimble JUNO ST measurement in the conditions of forest canopy. *Journal of Forest Science*, 56: 84–91.
- KOPÁČIK A. 2003. *Inerciálne meracie systémy.* Bratislava, STU v Bratislave: 101 s.
- KRESÁK J., BEREŠOVÁ A. 2014. Integrácia medzi inerciálnym navigačným systémom a globálnym navigačným systémom. *Perner's Contacts, Univerzita Pardubice*, 9 (1): 111–119. Dostupné na/Available on: [http://pernerscontacts.upce.cz/34\\_2014/Kresak.pdf](http://pernerscontacts.upce.cz/34_2014/Kresak.pdf)
- LAWRENCE A. 1992. *Modern inertial technology: navigation, guidance and control.* New York, Springer-Verlag New York: 278 s.
- LEE Z. I., KIM S. H., CHOI K. H., LIM J., KANG S. J., CHUN S., LEE H.K. 2013. Design of adaptive filtering algorithm for relative navigation. In: *Proceedings of the World Congress on Engineering and Computer Science 2013. Vol. II. WCECS 2013, 23–25 October, 2013, San Francisco, USA. Newswood Limited.*: 892–896. Dostupné na/Available on: [http://www.iaeng.org/publication/WCECS2013/WCECS2013\\_pp892-896.pdf](http://www.iaeng.org/publication/WCECS2013/WCECS2013_pp892-896.pdf)
- LI Y., WANG J.J., KONG X. 2013. Zero velocity update with stepwise smoothing for inertial pedestrian navigation. In: *International Global Navigation Satellite Systems Society Symposium 2013. Proceedings. Outrigger Gold Coast, Qld, Australia, 16–18 July*



- 2013: 1–10. Dostupné na/Available on: <http://ignss.org/LinkClick.aspx?fileticket=GvR4EcmDn18%3D&tabid=129&mid=524>
- LI Y., WANG J. J. 2014. A pedestrian navigation system based on Low Cost IMU. *Journal of Navigation*, 67: 929–949.
- LI Z., WANG J., LI B., GAO J., TAN X. 2014. GPS/INS/Odometer integrated system using fuzzy neural network for land vehicle navigation applications. *Journal of Navigation*, 67: 967–983. DOI: 10.1017/S0373463314000307
- MIAN O., LUTES J., LIPA G., HUTTON J., GAVELLE E., BORGHINI S. 2015. Direct georeferencing on small unmanned aerial platforms for improved reliability and accuracy of mapping without the need for ground control points. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 40: 397–402.
- NLC. 2007. Štandard digitálneho mapového diela s obsahom lesného hospodárstva. Zvolen, Národné lesnícke centrum: 12 s.
- PARK K.S., SUH S.Y. 2010. A zero velocity detection algorithm using inertial sensors for pedestrian navigation systems. *Sensors*, 10: 9163–9178.
- PETOVELLO M., O'DRISCOLL C., LACHAPPELLE G. 2009. Ultra-tight integration of an IMU with GPS/GLONASS. In: *Proceedings of the 13th International Association of Institutes of Navigation*. Stockholm, Sweden, 27–30 October 2009: 1–10. Dostupné na/Available on: [http://plan.geomatics.ualgary.ca/papers/iain09\\_petovello%20et%20al\\_29oct09.pdf](http://plan.geomatics.ualgary.ca/papers/iain09_petovello%20et%20al_29oct09.pdf)
- QIAN K., WANG G., HU B. 2015. Novel integration strategy for GNSS-aided inertial integrated navigation. *GEOMATICA*, 69: 217–230. DOI: 10.5623/cig2015-205
- QUIN F., ZHAN X., DU G. 2013. Performance improvement of receivers based on ultra-tight integration in GNSS-challenged environments. *Sensors*, 13: 16406–16423. DOI: 10.3390/s13126406
- REUTEBUCH S.E., CARSON W.W., AHMED K.M. 2003. A test of the Applanix POS LS inertial positioning system for the collection of terrestrial coordinates under a heavy forest canopy. In: *Precision Forestry. Proceedings of the Second International Precision Forestry Symposium*. Seattle, Washington, June 15–17, 2003. University of Washington: 21–28. Dostupné na/Available on: [http://www.sefs.washington.edu/research.pfc/pdf/Reutebuch\\_Applanix\\_paper6\\_9\\_03.pdf](http://www.sefs.washington.edu/research.pfc/pdf/Reutebuch_Applanix_paper6_9_03.pdf)
- RIEKE M., FOERSTER T., GEIPEL J., PRINZ T. 2011. High-precision positioning and real-time data processing of UAV-Systems. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 38 (1), Conference on Unmanned Aerial Vehicle in Geomatics, Zurich, Switzerland. Dostupné na/Available on: <http://www.geometh.ethz.ch/uav/g/proceedings/rieki>
- SCHMIDT G. T. 2014. Navigation sensors and systems in GNSS degraded and denied environments. *Chinese Journal of Aeronautics*, 28 (1): 1–10. DOI: 10.1016/j.cja.2014.12.001
- SCHWARZ K.P., EL-SHEIMY N. 2007. Digital mobile mapping systems state of the art and future trends. In: Tao, C.V., Li, J. (eds.): *Advances in mobile mapping technology*. London, Taylor & Francis: 3–18. ISPRS Book Series.
- SOLOVIEV A., TOTH CH., GREJNER-BRZEZINSKA D. 2012. Performance of deeply integrated GPS/INS in dense forestry areas. *Journal of Applied Geodesy*, 6 (1): 3–13. DOI: 10.1515/jag-2011-0005
- SOTÁK M. 2006. Integrácia navigačných systémov. Monografia. Košice, Róbert Bréda: 344 s. ISBN 80-969619-9-3
- SOTÁK M., KRÁLIK V., KMEC F. 2008. Cenovo dostupná inerciálna navigácia pre integrované navigačné systémy. *AT&P journal*, 6/2008: 72–74. Dostupné na/Available on: [http://www.atpjournalsk/buxus/docs/casopisy/atp\\_2008/pdf/atp-2008-06-72.pdf](http://www.atpjournalsk/buxus/docs/casopisy/atp_2008/pdf/atp-2008-06-72.pdf)
- STIRLING R., FYFE K., LACHAPPELLE G. 2005. Evaluation of a new method of heading estimation for pedestrian dead reckoning using shoe mounted sensors. *The Journal of Navigation*, 58: 31–45. DOI: 10.1017/S037346330400306
- SUSI M., RENAUDIN V., LACHAPPELLE G. 2013. Motion mode recognition and step detection algorithms for mobile phone users. *Sensors*, 13 (2): 1539–1562. DOI:10.3390/s130201539
- TANG J., CHEN Y., KUKKO A., KAARTINEN H., JAAKKOLA A., KHORAMSHAHI E., HAKAL T., HYYPPÄ, J., HOLOPAINEN M., HYYPPÄ H. 2015. SLAM-aided stem mapping for forest inventory with small-footprint mobile Lidar. *Forests*, 6 (12): 4588–4606. DOI:10.3390/f6124390
- TAYLOR D.W.A., CLARK B.T. 2008. GPS-Denied geolocation for geophysical data acquisition and analysis. In: *21st EEGS Symposium on the Application of Geophysics to Engineering and Environmental Problems*, April 6–10, 2008m, Philadelphia, USA. Red Hook, Curran: 340–347. DOI: 10.4133/1.2963274
- VALBUENA R., MAURO F., RODRIGUEZ-SOLANO R., MANZANERA J.A. 2010. Accuracy and precision of GPS receivers under forest canopies in mountainous environment. *Spanish Journal of Agricultural Research*, 8 (4): 1047–1057. DOI: 10.5424/sjar/2010084-1242
- VALBUENA R., MAURO F., RODRIGUEZ-SOLANO R., MANZANERA J.A. 2012. Partial least squares for discriminating variance components in global navigation satellite systems accuracy obtained under scots pine canopies. *Forest Science*, 58 (2): 139–153. DOI: 10.5849/forsci.10-025
- WELCH G., BISHOP G. 2006. An introduction to the Kalman filter. [on-line] Chapel Hill, University of North Carolina, TR 95-041. [cit. 2016-01-15] Dostupné na/Available on: [https://www.cs.unc.edu/~welch/media/pdf/kalman\\_intro.pdf](https://www.cs.unc.edu/~welch/media/pdf/kalman_intro.pdf)
- WHITTAKER W., NASTRO L. 2006. Utilization of position and orientation data for preplanning and real time autonomous vehicle navigation. In: *2006 IEEE/ION Position, Location, and Navigation Symposium*. Loews Coronado Bay Resort, San Diego, California, April 25–27, 2006. Piscataway, IEEE: 372–377. DOI:10.1109/PLANS.2006.1650625
- WOLF P., DEWITT B., WILKINSON B. 2014. *Elements of photogrammetry with application in GIS*. Boston, McGraw-Hill Education: 676 s.
- XIE P., PETOVELLO G. 2012. Improving high sensitivity receiver performance in multipath environment for vehicular applications. In: *Proceedings of the 25th International Technical Meeting of The Satellite Division of the Institute of Navigation (ION GNSS 2012)*. Nashville, TN, September 17–21, 2012. Manassas, Institute of Navigation: 448–458.
- XIE P., HE Z., PETOVELLO G. 2014. Performance evaluation of integration of on-board vehicle sensors with high sensitivity receivers in urban canyons. [on-line] In: *Proceedings of Chinese satellite navigation conference 2014*. May 21–23, Nanjing, China. [10 s.] [cit. 2016-01-12]. Dostupné na/Available on: [http://plan.geomatics.ualgary.ca/papers/csnc2014\\_full\\_paper\\_xie%20et%20al%20-%20final.pdf](http://plan.geomatics.ualgary.ca/papers/csnc2014_full_paper_xie%20et%20al%20-%20final.pdf)
- ZHANG R., LOSCHONSKY M., REINDL L. M. 2011. Study of zero velocity update for both low- and high-speed human activities. *International Journal of E-Health and Medical Communications*, 2: 46–67. DOI: 10.4018/jehmc.2011040104
- ŽÍHLAVNÍK Š., TUNÁK D. 2010. Racionalizácia mapovacích prác použitím metódy polygónových ťahov. *Vedecká štúdia. Technická univerzita vo Zvolene*: 84 s.

## FIRST EXPERIENCE WITH PEDESTRIAN INERTIAL NAVIGATION SYSTEM APPLICATION UNDER FOREST CONDITIONS

### SUMMARY

Devices based on integration of global navigation satellite systems (GNSS) with inertial navigation system (INS) are promoted as an alternative for localization using GNSS under conditions with poor signal reception and poor quality of positioning solution. Our study provides a brief overview of the knowledge from related and concerned areas, and presents the results of experimental position measurements using pedestrian (personally cared) integrated GNSS / INS apparatus in a forest conditions, which are among the first in Slovakia.

Terrestrial position measurement using conventional geodetic methods in forestry is particularly specific because of environment, in which the actual measurement is conducted. In most cases, this is a very variable, complicated and non-transparent environment that adversely affects the measurement (GILLET et al. 2000; ŽÍHLAVNÍK, TUNÁK 2010). Despite the undeniable great benefit, forestry and related areas are also a typical fields with evidence of the shortcomings of GNSS, with appropriate attention given to these problems (BAKULA et al. 2009; VALBUENA et al. 2010; KLIMÁNEK 2010 with a more general focus, while GALÁN et al. 2011; VALBUENA et al. 2012, and BLUM et al. 2016 focused on implementation of specific approaches and/or evaluation methods).

Although the development of GNSS technology provides continuous improvement of equipment parameters and in algorithms efficiency for signal evaluation, a stronger positive change can only be expected after more substantial change of the technology used, including the integration of GNSS with inertial equipment.

The essence of inertial navigation is a continuous positioning using primary inertial sensors (gyroscopes, accelerometers), which are integrated into inertial measurement unit (Inertial Measurement Unit – IMU). Size and direction of acceleration effects and angular velocity is measured with high frequency from a known starting position, and their double integration is performed with respect to time. Navigation Processor (NP) provides computational processing of IMU outputs. Despite the existence of truly high-precision sensors for measurement of the primary variables with minimum deviations from reality and accurate computational algorithms, the existing measurement errors are amplified during the processing as a result of integration of parameters. Resulting errors in navigation, which typically grow with time, cannot be eliminated in principle, only reduced. So called “strap-down” systems, which utilize the sensors firmly connected to the construction of navigated object, are currently the most commonly used. Each axis of this object corresponds to sensitive axis of one accelerometer and gyroscope. Inertial unit has therefore six degrees of freedom and allows the measurement of shift and rotational motion in three orthogonal axes. The Kalman filter is applied for integration of INS and additional data (KALMAN 1960; WELCH, BISHOP 2006 and LEE et al. 2013).

The knowledge analysis focuses on related and affected areas with an emphasis on the possibilities, existing solutions and potential for forestry applications. In particular, the principal questions of the GNSS/INS integration (PETOVELLO et al. 2009; Quin et al. 2013 or even LI, WANG 2014), applications for mobile terrestrial equipment (WHITTAKER, NASTRO 2006; XIE et al. 2014; SOLOVIEV et al. 2012), reported results of tests of mobile applications (TAYLOR, CLARK 2008; SOLOVIEV et al. 2012; XIE et al. 2014), a description of advanced technologies in the market (Applanix In-Fusion Technology and NovAtel SPAN Architecture) as well as the integration of additional sensors (STIRLING et al. 2005; GAO 2006; ZHANG et al. 2011; LI et al. 2014) are included.

The test apparatus consists of NovAtel GNSS receiver ProPak6, inertial surveying unit IMU-KVH1750 and GNSS antenna Novatel GPS-703-GGG (Fig. 1). Software Inertial Explorer 8.60 was used for data processing. Testing was conducted in summer 2015 on the polygon formed by 59 points organized into three tracks/lines in the forest environment. The overall situation and the locations of surveyed points are shown in Fig. 2. For purposes of the presented experiment the point field was surveyed using three lines (tracks) in forest stands described in Tab. 1. Basic statistical characteristics of positional errors according to measured tracks and variants of solutions are reported in Tab. 2. The mean value of the positional deviation when compared to differential GNSS solutions and deeply integrated (tightly coupled) and smoothed GNSS/INS solutions, decreased from 1.51 m to 2.11 m, which represents 31–52%. The values of the standard deviation of error (variance) were reduced from 0.91 m to 1.43 m (11–68%) for all three tracks. We report also the number of satellites during the measurement time (Fig. 4), the development of degradation of the overall accuracy of GNSS measurements during the measurement time (Fig. 5), the expected accuracy of the measurement based on the Kalman filter (Fig. 6) as an additional sources of information.

In summary, we can conclude that our results are comparable with experimental results published by other authors, who also reached the sub-meter size of deviation from the reference position (GILLET et al. 2000; REUTEBUCH et al. 2003; SOLOVIEV et al. 2012). The assumption that the GNSS part of apparatus must be integrated with inertial navigation unit of navigation or at least tactical category, was confirmed as well.

Considering needs and potential applications in forestry, based on the assessment of a wide variety of materials published over the last 10–15 years, next knowledge resources can be regarded mainly to (i) the field of platforms and sensors positioning for data gathering for the geographic information creation (IP et al. 2008; WOLF et al. 2014; COLOMINA, MOLINA 2014; MIAN et al. 2015; TANG et al. 2015; KAARTINEN et al. 2015), (ii) the area of pedestrian navigation especially in the outdoor environment (LI et al. 2013; SUSI et al. 2013), (iii) the area of improving the GNSS/INS integration, both in terms of integration solutions (LI, WANG 2014; HASSANA et al. 2015) as well as the used components parameters (SCHWARZ, EL-SHEIMY 2007; SCHMIDT 2014).

*Zasláno/Received: 05. 02. 2016*

*Přijato do tisku/Accepted: 31. 03. 2016*