

# Verifikácia letovej trasy vrtuľníka Mi-17 Modern pomocou GPS

mjr. Ing. Kamil Bílek<sup>1</sup>, Dr. Ing. Martin Kalafut<sup>2</sup>, Vladimír Kováč<sup>1</sup>, mjr. Ing. František Lukáč<sup>1</sup>

## Abstract:

The main goal of this paper is the verification of the onboard present GPS navigation equipment of the helicopter Mi – 17 Modern by means of other types of GPS receivers. In the past, there were several fatal crashes of helicopters of similar types. Therefore it also became necessary to prove in a complex manner, the reliability of the navigation systems used by helicopters of this type.

## 1. Úvod

Letecká preprava síce štatisticky vykazuje percentuálne najnižšie množstvo havárií, ak sa však nejaká havária stane, jej dôsledky bývajú takmer vždy fatálne. Aj Ozbrojené sily Slovenskej republiky (OSSR) využívajú leteckú prepravu pre svoje potreby ako je napr. výcvik a príprava pilotov bojových stíhacích lietadiel a vrtuľníkov a teda existuje aj tu vždy isté percento pravdepodobnosti, že aj napriek vysokej miere umenia pilotáže vojenských pilotov sa letecké nešťastia stávajú aj vo vzdušných silách OSSR.

Spoemeňme len zopár prípadov: zrážka dvoch bojových lietadiel MIG-29 pri Smolníku, pád vrtuľníka pri Pušovciach v roku 2002 a nedávny pád vrtuľníka pri Sabinove v tomto roku.

Na základe doterajších skúseností s vyšetrovaním vážnych leteckých incidentov a katastrof vznikla požiadavka na softvérové a hardvérové vybavenie umožňujúce detailné zobrazenie terénu v mieste vážnej leteckej katastrofy a následnej simulácie priebehu letu tesne pred haváriou s využitím najmodernejšej dostupnej techniky. Jedným z kľúčových komponentov takéhoto vybavenia je technológia GPS.

Topografický ústav v Banskej Bystrici bol úlohovým listom NGŠ (Náčelníka generalného štábu) určený preveriť nasledovné:

- Možnosť prepojenia údajov z palubného zapisovača FDR umiestnených na palubách lietadiel a vrtuľníkov OSSR
- Možnosť prepojenia údajov z palubného zapisovača TESTER umiestneného na lietadlách MIG-29
- Možnosť prepojenia údajov z radarového centra CRVO Zvolen, systému Letvis alebo iného rádiolokátora
- Preverenie presnosti palubných navigačných prístrojov GPS

V prípade možnosti vytvorenia takéhoto prepojenia údajov následne existuje možnosť získať nástroj objektívneho posúdenia letu po skončení letu s možnosťou vizualizácie skutočného letu vo virtuálnej realite. Takýto nástroj bude používaný v prípadoch, keď nie je možné objektívne posúdenie inými dostupnými prostriedkami.

Z dôvodu rozporuplných údajov získaných z prístroja GPS na palube vrtuľníka a ďalších dostupných údajov o mieste havárie vrtuľníka Mi-17 v roku 2002, bol

---

<sup>1</sup>mjr. Ing. Kamil Bílek, Vladimír Kováč, mjr. Ing. František Lukáč – Topografický ústav, Ružová 8, 975 53 B. Bystrica  
tel./fax: 0960/412 501, 0960/412 587, email: [kamil.bilek@mil.sk](mailto:kamil.bilek@mil.sk), web: [topu.army.sk](http://topu.army.sk)

<sup>2</sup>Dr. Ing. Martin Kalafut - AGIS Slovakia, spol. s r. o., Prievozska 14/A, 821 09 Bratislava  
tel./fax: 02/58238 367, email: [agissk@netax.sk](mailto:agissk@netax.sk), web: [www.agis.sk](http://www.agis.sk)

Topografický ústav poverený vykonať v súčinnosti so Vzdušnými silami (VzS) OSSR kontrolné lety s porovnaním presnosti navigačných prostriedkov na palube vrtuľníka Mi-17 Modern.

## 2. Prístrojové vybavenie, technologický postup merania a vyhodnotenie merania

Verifikácia letovej trasy a kontrola navigačných prístrojov vrtuľníka Mi-17 Modern sa uskutočnila dňa 15. júna 2005 na letisku Sliač. Postup prác bol rozdelený do nasledovných častí:

- Overenie navigačných prístrojov vrtuľníka na známom bode
- Overenie vplyvu chodu vrtuľníka na GPS prístroje
- Určenie letovej trasy vrtuľníka pomocou GPS prijímačov Trimble 2101 a GeoExplorer CE, model GeoXT
- Určenie letovej trasy vrtuľníka pomocou rádionavigačných prístrojov

### 2.1 Prístrojové vybavenie GPS

Na verifikáciu letovej trasy vrtuľníka boli k dispozícii nasledovné GPS prístroje (hardvér) a spracovateľský softvér:

- Trimble 2101 (Obr. 1) – GPS prijímač s aktivovaným meraním P(Y) kódu (integrováný v palubnej doske vrtuľníka Mi-17 Modern)



Obr. 1. P(Y) - kódový navigačný GPS prijímač Trimble 2101 pre celosvetové vojenské letecké operácie.

- GeoExplorer CE, model GeoXT so softvérom TerraSync Professional, v2.41 a Pathfinder Office, v3.10
- Trimble 5700 CORS (Continuously Operating Reference Station) GPS prijímač so softvérom GPSBase, v2.30 (permanentná referenčná stanica Topografického ústavu – akronym BBYS)
- Trimble 4000SSi GPS prijímač so softvérom Trimble Geomatics Office, v1.62

## 2.2 Overenie navigačných prístrojov vrtuľníka na známom bode

Pred štartom boli určené geocentrické ETRS-89 súradnice zvoleného bodu (označeného ako RWY1) na heliporte, na ktorom bol potom postavený vrtuľník. Bola použitá statická metóda merania s GPS prijímačom Trimble 4000 SSI. Interval zberu dát bol 15s a dĺžka observácie 10 minút. Geocentrické súradnice bodu RWY1 v súradnicovom systéme ETRS-89 boli vypočítané softvérom Trimble Geomatics Office vzhľadom na permanentnú referenčnú stanicu BBYS a sú uvedené v Tabuľke č. 1. Na bode permanentnej referenčnej stanice BBYS, ktorý sa nachádza v objekte Topografického ústavu v Banskej Bystrici, je nainštalovaný GPS prijímač Trimble 5700 CORS so softvérom GPSBase a tento bod je vzdialený od určovaného bodu na heliporte (RWY1) necelých 13 km.

V palubnej doske vrtuľníka Mi-17 Modern je integrovaný GPS prijímač Trimble 2101, ktorý je schopný merať P(Y) kód (využíva službu PPS – Precise Positioning Service) t.j. je schopný udávať okamžitú geocentrickú polohu v reálnom čase s absolútnou presnosťou **1-3 m** bez nutnosti použitia DGPS korekcií v reálnom čase. Po približnom centrovaní vrtuľníka nad zvoleným kontrolným bodom (RWY1) na heliporte, boli zaregistrované jeho geocentrické súradnice pred odletom. Ten istý bod (RWY1) bol znova zameraný P(Y)-kódovým meraním prijímačom Trimble 2101 po pristátí z kontrolného letu. Geocentrické súradnice z oboch meraní sú tiež uvedené v Tabuľke č. 1.

Kontrolný bod	GPS prijímač	Polohové geocentrické súradnice		Typ geocentrických súradníc
		B [° ' "] (zemepisná šírka)	L [° ' "] (zemepisná dĺžka)	
RWY1	Trimble 2101	48 38 21.480	19 08 15.960	autonómne z P(Y) kódových meraní pred odletom
	Trimble 2101	48 38 21.360	19 08 16.080	autonómne z P(Y) kódových meraní po prilete
	Trimble 2101	48 38 21.420	19 08 16.020	autonómne - <b>priemer</b> z P(Y) kódových meraní pred odletom a po prilete
	Trimble 4000SSI	48 38 21.445	19 08 15.975	určené post-processingom vzhľadom na BBYS z fázových meraní L1/L2

Tabuľka č. 1. Geocentrické súradnice kontrolného bodu (RWY1) na heliporte určené rôznymi GPS prístrojmi a metódami merania a spracovania.

Ako je zrejme z Tabuľky č. 1, súradnice kontrolného bodu RWY1 určené z P(Y) kódových meraní prijímačom Trimble 2101 pred odletom a po prilete sa navzájom líšia v zemepisnej šírke (B) aj v zemepisnej dĺžke (L) o 0.12", čo predstavuje polohovú odchýlku 0.17" (asi 5m). Odhliadnúc od nepresnosti merania samotného GPS prijímača, podstatnou mierou k tejto odchýlke prispela tá skutočnosť, že nebolo dosť dobré možné presne zcentrovať GPS anténu prijímača Trimble 2101 nad kontrolný bod RWY1 ani pred odletom ani po prilete, keďže GPS anténa je umiestnená nad pilotnou kabínou a jej centrácia bola možná len v rámci presnosti vonkajšieho navedenia vrtuľníka nad kontrolný bod.

Súradnicové rozdiely v geocentrickej zemepisnej šírke ( $\Delta B$ ) a v geocentrickej zemepisnej dĺžke ( $\Delta L$ ) v kontrolnom bode RWY1 medzi geocentrickými súradnicami určenými z fázových meraní dvojfrekvenčného GPS prijímača Trimble 4000SSI

a z P(Y) kódových meraní GPS prijímačom Trimble 2101 (ich priemernou hodnotou) sú nasledovné:

$$\Delta B_{(4000SSi - \text{Trimble 2101 priemerné})} = 0.025''$$
$$\Delta L_{(4000SSi - \text{Trimble 2101 priemerné})} = -0.045''$$

Vyššie uvedené súradnicové rozdiely predstavujú polohovú odchýlku 0.051" (asi 1.3m). Na základe tejto polohovej odchýlky sa dá konštatovať, že presnosť P(Y) kódového leteckého navigačného GPS prijímača Trimble 2101 používaného vo vrtuľníku Mi-17 Modern je na požadovanej úrovni.

### 2.3 Overenie vplyvu chodu vrtuľníka na GPS prístroje

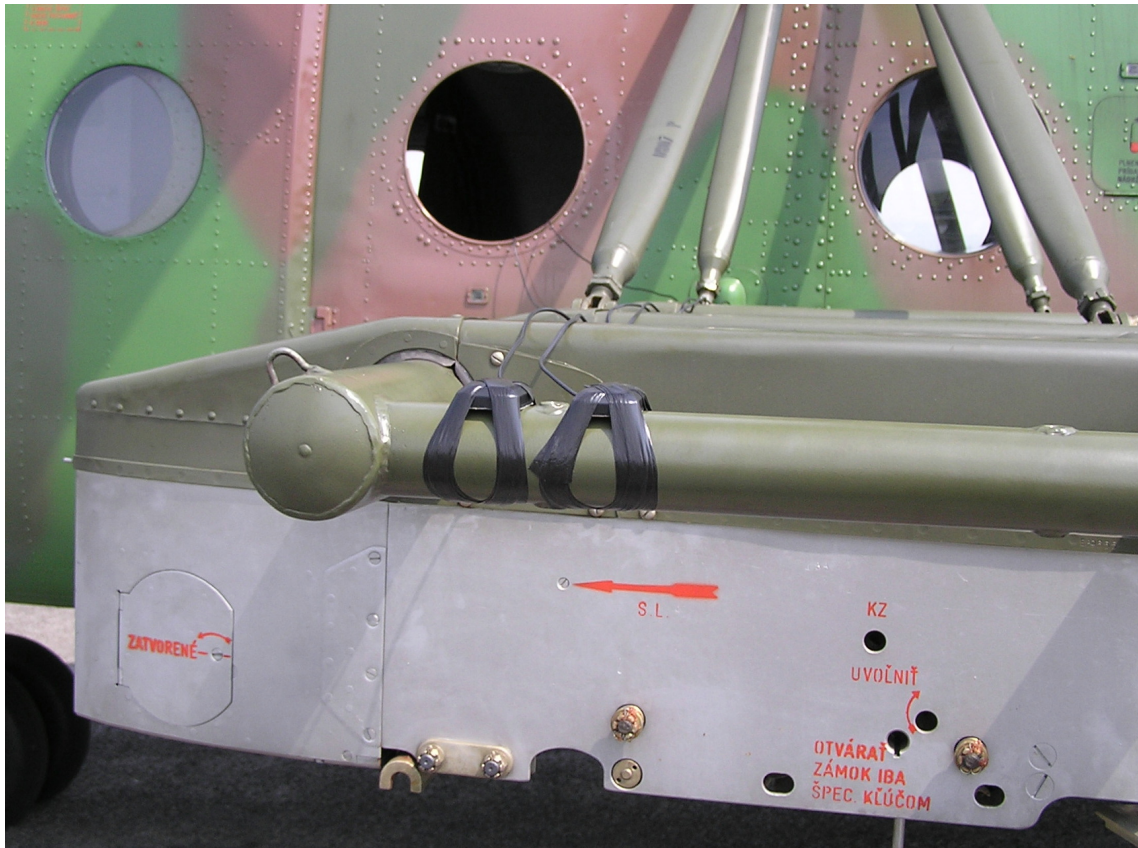
Anténa GPS prijímača Trimble 2101 je umiestnená nad pilotnou kabínou (pozri Obr. 2). Po spustení chodu rotora, listy vrtule pri svojom otáčavom pohybe zasahujú aj do priestoru nad GPS anténou a môžu teda negatívne vplyvať na GPS meranie GPS prístrojom Trimble 2101. Na mieste je teda otázka, aký vplyv má uvedená skutočnosť na presnosť GPS meraní vo vrtuľníku Mi-17 Modern a tým aj na presnosť GPS navigácie.



Obr. 2. Umiestnenie antény GPS prijímača Trimble 2101 na vrtuľníku Mi-17 Modern.

Na overenie vplyvu chodu vrtuľníka na kvalitu GPS meraní boli realizované testovacie GPS merania. Prvé meranie sa realizovalo pri vypnutom motore vrtuľníka, kým druhé meranie bolo realizované s roztočeným rotorom až na prah vzlietnutia, pričom v oboch prípadoch bola GPS anténa umiestnená na identickom mieste na vrtuľníku (viď Obr. 3) a v prípade roztočeného rotora, krútiace sa listy vrtule zasahovali priestor nad GPS anténou. Na Obr. 3 je možné vidieť dve antény, druhá anténa bola záložná.

Testovacie GPS merania boli vykonané jednofrekvenčným GPS prijímačom Trimble GeoExplorer CE, model GeoXT s externou GPS anténou Geo 3 Mini, ktorá bola umiestnená na ľavom zbraňovom závesníku a fixovaná pomocou lepiacich pásov (viď Obr. 3). GPS prijímač GeoXT bol umiestnený v kabíne vrtuľníka a nastavený na kódové meranie (L1 C/A kód) s intervalom merania 1s.



Obr. 3. Umiestnenie antény Geo 3 Mini GPS prijímača Trimble GeoXT na vrtuľníku Mi-17 Modern počas testovania (druhá anténa je záložná).

Namerané údaje boli diferenciálne skorigované (DGPS post-processing) softvérom Pathfinder Office. Ako referenčná stanica bola opäť využitá permanentná stanica BBYS.

V Tabuľke č. 2 sú uvedené geocentrické súradnice testovacieho bodu na zbraňovom závesníku vrtuľníka Mi-17 Modern (označeného ako Geo 3 Mini) určené DGPS post-processingom z meraní pri vypnutom rotore a z meraní pri roztočenom rotore až na prah vzlietnutia.

Testovací bod	GPS prijímač	Polohové geocentrické súradnice		Typ geocentrických súradníc
		B [° ' "] (zemepisná šírka)	L [° ' "] (zemepisná dĺžka)	
Geo 3 Mini	Trimble GeoXT	48 38 21.473	19 08 16.738	určené DGPS post-processingom vzhľadom na BBYS z kódových meraní L1 (C/A) s vypnutým rotorom
	Trimble GeoXT*	48 38 21.472	19 08 16.751	určené DGPS post-processingom vzhľadom na BBYS z kódových meraní L1 (C/A) s roztočeným rotorom

Tabuľka č. 2. Geocentrické súradnice testovacieho bodu (Geo 3 Mini) určené GPS prístrojom Trimble GeoXT pri vypnutom a roztočenom rotore vrtuľníka Mi-17 Modern.

Stredná chyba v určení polohy bodu  $\sigma_P$  je v prvom prípade (v pokojovom stave rotora)  $\pm 0.4$  m s konfidenčným intervalom spoľahlivosti  $1\sigma$  a smerodajná odchýlka 0.2 m.

V druhom prípade (s roztočeným rotorom až na prah vzlietnutia) je stredná chyba v určení polohy bodu  $\sigma_P \pm 0.6$  m s konfidenčným intervalom spoľahlivosti  $1\sigma$  a smerodajná odchýlka 0.8 m.

Súradnicové rozdiely v geocentrickej zemepisnej šírke ( $\Delta B$ ) a v geocentrickej zemepisnej dĺžke ( $\Delta L$ ) na testovacom bode Geo 3 Mini medzi geocentrickými súradnicami určenými pri vypnutom rotore a pri zapnutom rotore až na prah vzlietnutia sú nasledovné:

$$\begin{aligned}\Delta B_{(\text{Trimble GeoXT} - \text{Trimble GeoXT}^*)} &= 0.001'' \\ \Delta L_{(\text{Trimble GeoXT} - \text{Trimble GeoXT}^*)} &= -0.013''\end{aligned}$$

Vyššie uvedené súradnicové rozdiely predstavujú polohovú odchýlku 0.013" (asi 0.4m). Na základe vyššie uvedených charakteristík presností a súradnicových rozdielov je možné konštatovať, že rotácia vrtule vrtuľníka Mi-17 Modern nemala zásadný vplyv na presnosť určenia polohy pomocou GPS prijímača GeoXT. Tu si je však nutné uvedomiť umiestnenie GPS antény prijímača GeoXT (viď Obr. 3). Keďže bola umiestnená na najvzdialenejšom bode od rotora vrtuľníka, listy vrtule zasahovali len svojimi koncami do priestoru nad anténou.

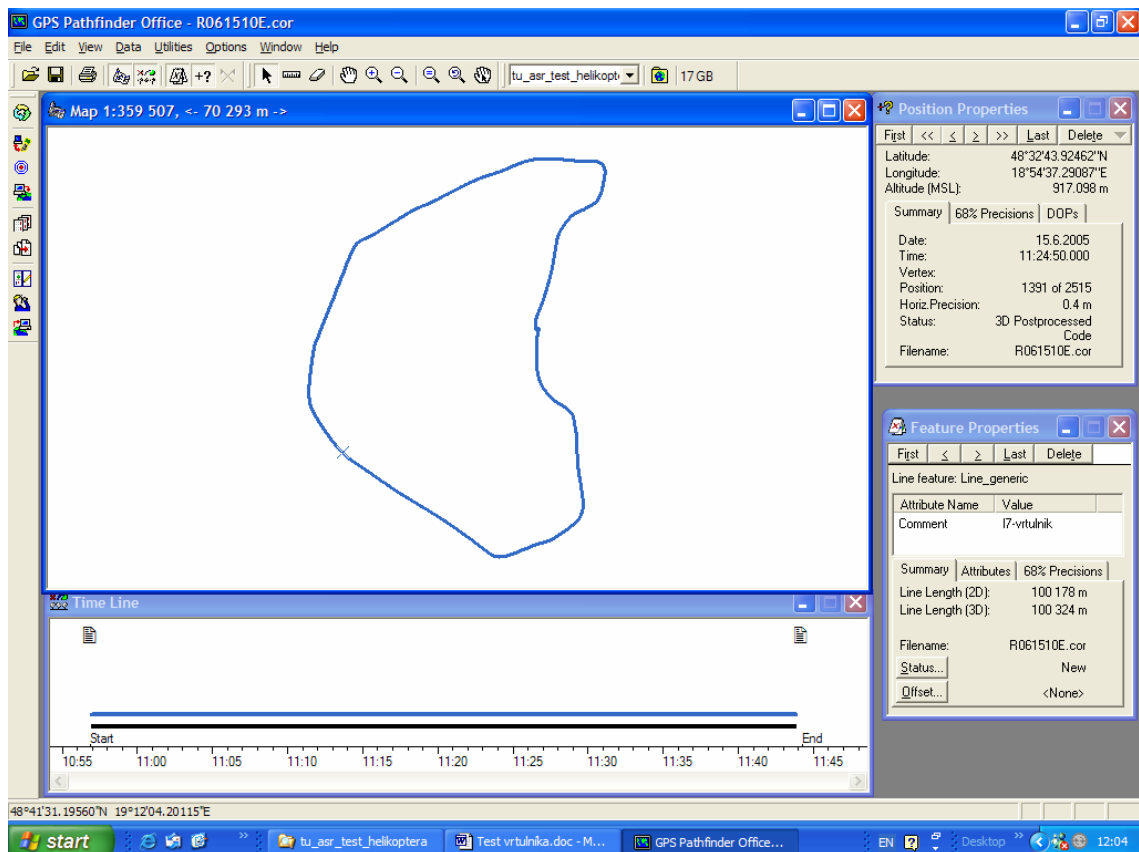
V prípade umiestnenia GPS antény prijímača Trimble 2101 (viď Obr. 2), ktorá je nainštalovaná blízko rotora vrtule nad pilotnou kabínou, listy vrtule pri rotovaní plne zasahujú do priestoru nad anténou a ich negatívny vplyv na presnosť určenia polohy môže byť citeľnejší.

## 2.4 Určenie letovej trasy pomocou GPS prijímačov Trimble 2101 a GeoXT

Kvôli komplexnému overeniu presnosti navigačného prístroja Trimble 2101, ktorý je inštalovaný vo vrtuľníku Mi-17 Modern bol realizovaný testovací let (dlhý asi 100 km) nad okolím Sliača. Celý priebeh letu bol registrovaný aj prijímačom Trimble GeoXT s externou anténou upevnenou na už spomínanom zbraňovom zásobníku (viď Obr. 3). Prijímač bol nastavený na kódový (L1 C/A) zber údajov s intervalom merania 1s a bol aktivovaný aj príjem DGPS korekcií v reálnom čase systému EGNOS (European Global Navigation Overlay System), ktoré boli ešte upresnené postprocessingovou diferenciálnou korekciou v Pathfinder Office softvéri.

Po ukončení letu boli namerané údaje diferenciálne skorigované v softvéri Pathfinder Office s využitím údajov z permanetnej stanice BBYS. Po kódových diferenciálnych korekciách horizontálna presnosť  $\sigma_P$  určenia trasy letu sa pohybuje na úrovni  $\pm 0.4$ m -  $\pm 0.5$ m ( $1\sigma$ ) a vertikálna presnosť  $\pm 1.1$ m ( $1\sigma$ ). Priebeh letu vyhodnotený softvérom Pathfinder Office po diferenciálnej korekcii je znázornený na Obr. 4.





Obr. 4. Priebek testovacieho letu vrtuľníka Mi-17 Modern na základe meraní s GPS prijímačom Trimble GeoXT a diferenciálne skorigovaný softvérom Pathfinder Office.

Tá istá trasa letu bola polohovo zaznamenaná aj GPS prijímačom Trimble 2101 (vid' Obr. 1) integrovaným v palubnej doske vrtuľníka Mi -17 Modern a s GPS anténou umiestnenou nad pilotnou kabínou (vid' Obr. 2). Diferencie polohových zložiek (v geocentrickej zemepisnej šírke a geocentrickej zemepisnej dĺžke) medzi GPS prijímačmi GeoXT a Trimble 2101 sú demonštrované na Obr. 5

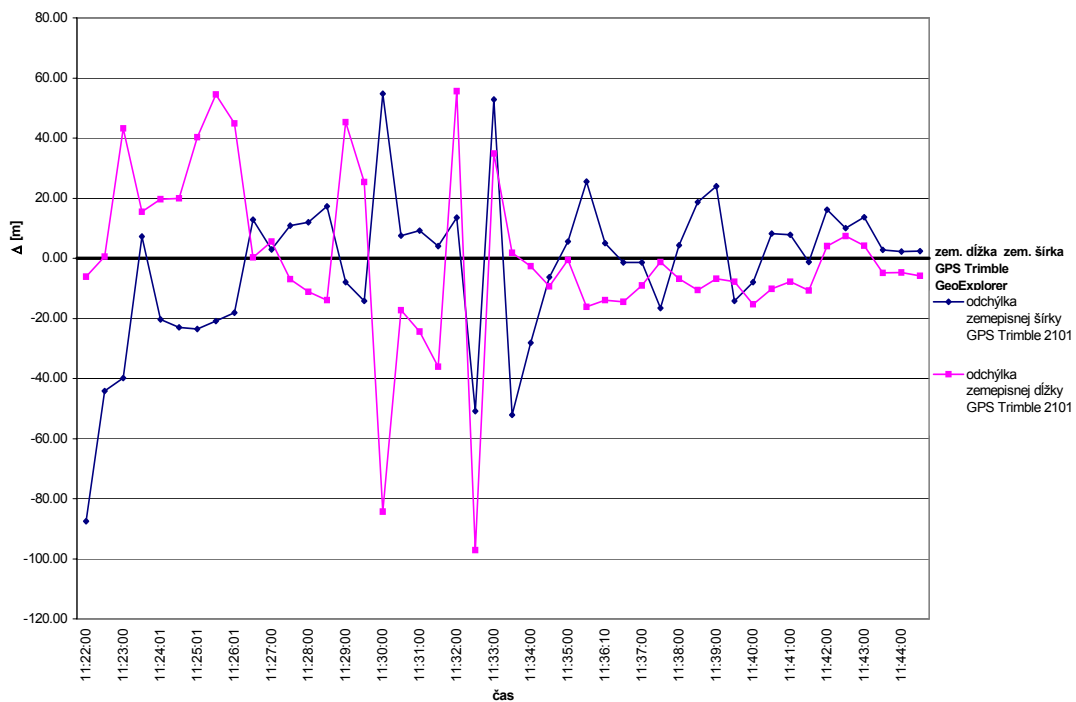
Ako etalón boli uvažované polohové zložky geocentrických zemepisných súradníc určené z GPS meraní prijímača GeoXT a následne diferenciálne skorigované softvérom Pathfinder Office vzhľadom na permanentnú referenčnú stanicu BBYS.

Z grafov na Obr. 5 je zjavných niekoľko časových okamihov, kedy diferencie polohových zložiek geocentrických súradníc medzi použitými GPS prijímačmi dosiahli veľmi veľké hodnoty (viac ako 90m). Tieto disproporce boli zväčša zaznamenané vtedy, keď bol zmenený smer letu vrtuľníka. Pri priamom lete vrtuľníka sú diferencie menšie ako 20m. Na tomto mieste je potrebné však znovu podotknúť, že obe GPS antény neboli umiestnené na identickom mieste, ale na dvoch rôznych miestach vzdialených od seba asi 6m, takže diferencie v polohových zložkách geocentrických súradníc reprezentované grafmi na Obr. 5 sú už implicitne zaťažené touto chybou. Táto skutočnosť však nevysvetľuje veľké diferencie v polohových zložkách geocentrických súradníc v niektorých iných časových okamihoch.

Rozdiel v zemepisnej šírke a dĺžke ( $\Delta$ ) určenou GPS Trimble GeoExplorer a GPS Trimble 2101  
 Časový blok 1



Rozdiel v zemepisnej šírke a dĺžke ( $\Delta$ ) určenou GPS Trimble GeoExplorer a GPS Trimble 2101  
 Časový blok 2



Obr. 5. Diferencie polohových zložiek geocentrických súradníc z priebehu testovacieho letu vrtuľníka Mi-17 Modern medzi GPS prijímačmi Trimble GeoXT a Trimble 2101.



Jedným z možných vysvetlení týchto veľkých diferencií v niektorých časových okamihoch môže byť aj to, že anténa GPS prijímača Trimble 2101, ktorá je umiestnená blízko rotora a počas letu je priestor nad ňou neustále rušený listami vrtule krútiacimi sa vysokou rýchlosťou, registruje GPS signál v extrémne sťažených podmienkach z hľadiska jeho príjmu.

Ďalším negatívnym faktorom je, že pri zmene smeru letu sa vrtuľník nakloní a na určitý časový okamih môže jeho sklon úplne zaciľniť príjem GPS signálu z niektorých práve sledovaných GPS družíc, čo má okamžitý negatívny vplyv na presnosť.

V neposlednom rade si je potrebné uvedomiť, že trasa letu viedla ponad niekoľko silných vysielačov rádiových vln, čo mohlo tiež mať nezanedbateľný negatívny vplyv na presnosť pri letovej výške niekoľkých stoviek metrov.

Všetky vyššie spomenuté skutočnosti ako možné zdroje negatívneho vplyvu na presnosť by bolo vhodné podrobnejšie analyzovať a prípadne doplniť ďalšími praktickými experimentálnymi meraniami letu vrtuľníka Mi – 17 Modern.

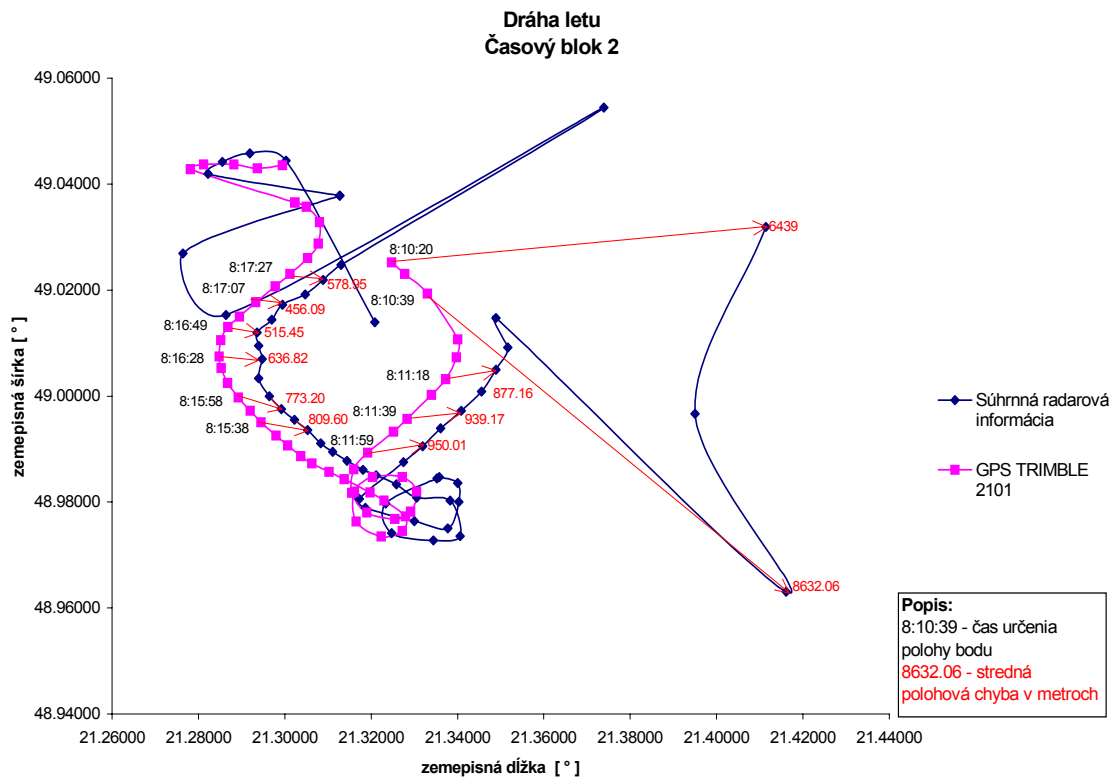
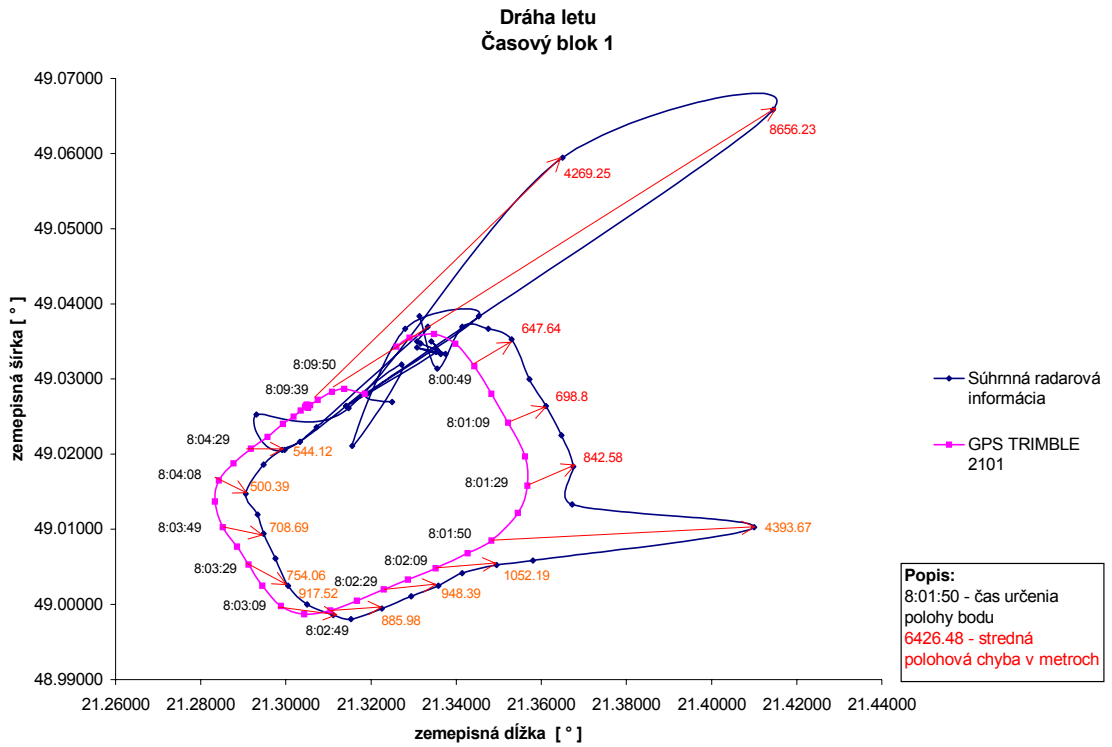
Napriek všetkým vyššie uvedeným anomáliám v diferenciách polohových zložiek geocentrických súradníc letovej trasy vrtuľníka Mi – 17 Modern medzi GPS prijímačmi GeoXT a Trimble 2101 je možné konštatovať, že GPS prijímač Trimble 2101, ktorý je k dispozícii na palube vrtuľníka, spĺňa požiadavky naň kladené pre navigačné účely.

## **2.5 Porovnanie letovej trasy vrtuľníka Mi-17 Modern určenej z GPS meraní prijímača Trimble 2101 a zo súhrnnej radarovej informácie (SRI)**

Keďže GPS prijímač Trimble 2101 je súčasťou vrtuľníka Mi – 17 Modern a spĺňa požiadavky naň kladené z hľadiska presnosti navigácie, ním zaznamenaná trasa (z inej lokality ako je ilustrované na Obr. 4) bola vzatá ako etalón a bola konfrontovaná s tou istou trasou zaznamenanou pomocou súhrnnej radarovej informácie (SRI), čo je ilustrované na Obr. 6.

Z Obr. 6 sú zjavné niekedy až dramaticky veľké polohové diferencie priebehu trasy dosahujúce bežne 500m až 900m a na niektorých miestach až neuveriteľných niekoľko kilometrov.

Vzhľadom na to, že na polohy určené GPS prijímačom Trimble 2101 je možné brať ako referenčne správne, problematickými polohami sú polohy určené zo SRI. Dôvody, prečo sa polohy pochádzajúce zo SRI tak dramaticky odlišujú od polôh určených GPS prijímačom Trimble 2101, nie sú autorom tohto príspevku známe a je nevyhnutne nutné ich urgentne identifikovať.



Obr. 6. Diferencie polohových zložiek geocentrických súradníc z priebehu letu vrtuľníka Mi-17 Modern medzi GPS prijímačom Trimble 2101 a SRI.

### 3. Zhodnotenie dosiahnutých výsledkov

Na overenie funkčnosti a presnosti navigačného zariadenia GPS (prijímača Trimble 2101) vo vrtuľníku Mi – 17 Modern bol použitý taký typ GPS prijímača (GeoXT), ktorý garantoval presnosť určenia polohy na úrovni 50 cm ( $1\sigma$ ).

Z dosiahnutých výsledkov vyplýva, že:

- Navigačný GPS prijímač Trimble 2101 integrovaný v palubnej doske vrtuľníka Mi – 17 Modern a s externou anténou umiestnenou nad pilotnou kabínou blízko rotora vrtule je plne funkčný a spĺňa požiadavky naň kladené pre navigačné účely
- Anténa GPS prijímača Trimble 2101, ktorý sa používa na navigáciu vrtuľníka Mi – 17 Modern prijíma signál z družíc GPS v extrémne sťažených podmienkach z hľadiska príjmu signálu GPS a bola by vhodná ich ďalšia analýza doplnená ďalšími praktickými experimentálnymi meraniami letu vrtuľníka Mi – 17 Modern
- Polohy určené zo súhrnnej radarovej informácie (SRI) sa veľmi líšia od polôh určených z GPS meraní prístroja Trimble 2101
- Je nevyhnutne nutné urýchlene zistiť príčinu týchto veľkých disproporcií a po jej identifikovaní ju okamžite odstrániť.