

DIGITÁLNA AEROTRIANGULÁCIA S PODPOROU ÚDAJOV GNSS A IMU

Jakub SOLANKA¹, Miriama KURČÍKOVÁ², Miroslav KARDOŠ³, František CHUDÝ⁴

^{1,2,3,4} Katedra hospodárskej úpravy lesov a geodézie, Lesnícka fakulta, Technická univerzita vo Zvolene, T. G. Masaryka 24, 960 53, Zvolen, Slovenská republika
xsolanka@tuzvo.sk

Abstrakt

V súčasnom lesníckom mapovaní dominuje v získavaní informácií digitálna fotogrametria. Vplyvom rozvoja a dostupnosťou hardvérového a softvérového vybavenia na spracovanie fotogrametrických materiálov v digitálnom tvare, ako aj silnejúcim tlakom na racionalizáciu všetkých hospodársko úpravníckych činností si digitálna fotogrametria našla trvalé miesto v lesníckom mapovaní. Príspevok sa zaoberá spracovaním projektov digitálnej aerotriangulácie s využitím leteckých meračských snímok s vysokou priestorovou rozlišovacou schopnosťou, ktoré boli získané na jar 2013 kamerou UltraCam XP. Projekty aerotriangulácie sú spracované v softvérovom prostredí INPHO, s využitím a bez využitia vlícovacích bodov. Do projektov vstupujú parametre vonkajšej orientácie snímok získané priamo počas snímkového letu. V oboch prípadoch je využité blokové vyrovnanie zväzku lúčov s využitím korekcií systematických posunov v určení projekčných centier snímok metódou GNSS a korekcie systematických vplyvov uhlov (ω , φ , κ) získaných jednotkou IMU. Výsledná polohová a výšková presnosť je vyhodnotená na základe signalizovaných kontrolných bodov, ktorých súradnice boli získané prostredníctvom statickej metódy GNSS.

Abstract

In current forestry mapping dominates obtaining information digital photogrammetry. Influence the development and availability of hardware and software for photogrammetric processing of materials in digital form, as well as mounting pressure to rationalize all forest management activities to digital photogrammetry has found a permanent place in the forest mapping. The paper deals with digital processing projects aerotriangulation using aerial survey images with high spatial resolution capability, which were collected in spring 2013 camera UltraCam XP. Aerotriangulation projects are processed in INPHO software environment, using and without using ground control points. Projects entering the external orientation parameters of images obtained directly during the survey flight. In both cases, the used block alignment beam using the correction of systematic shifts in the determination of design centers frames GNSS method and the correction of systematic impact angles (ω , φ , κ) obtained IMU unit. The resulting horizontal and vertical accuracy is evaluated on the basis of signalized control points whose coordinates were obtained by the static method GNSS.

Kľúčové slova: digitálna fotogrametria, aerotriangulácia, letecka meračská snímka, globalny navigačný satelitný systém, GNSS, inerciálna meračská jednotka

Keywords: digital photogrammetry, aerotriangulation, aerial survey image, global navigation satellite system, GNSS, inertial measurement unit, IMU

1. ÚVOD

Medzi najpoužívanejšie metódy v lesníckom mapovaní patrí digitálna fotogrametria, určovanie polohy bodov pomocou globálnych navigačných satelitných systémov (GNSS), či kombinácia polárnej metódy s využitím univerzálnych meračských staníc. V súčasnosti sa na lesníckom mapovaní podieľajú dve zložky, a to terestrické meranie a fotogrametrické vyhodnotenie spolu s fotointerpretáciou.

Mimoriadny rozvoj geodetických prístrojov v poslednej dobe vytláča doteraz používané geodetické prístroje, najmä optické diaľkomery a nahrádza ich elektronickými tachymetrami, resp. totálnymi stanicami a prístrojmi globálnych navigačných satelitných systémov (HALVOŇ, 2008).

GNSS prístroje umožňujú užívateľom možnosť určovania polohy a výšky bodov s využitím špeciálnych prijímacích zariadení s vysokou presnosťou v krátkom čase. Základný princíp merania a vysoká presnosť umožňuje ich nasadenie priamo v lesníckej praxi bez potreby mimoriadnej úpravy postupu merania a vzhľadom na špecifické a väčšinou nepriaznivejšie podmienky v zalesnenom území oproti voľnému priestranstvu (napr. ŽÍHLAVNÍK, Š. 2004, HALVOŇ 2006, MELUŠ 2007).

Ďalší trend vývoja je zameraný na zlepšenie výsledkov automatizovaných pracovných úkonov v rámci fotogrametrického vyhodnotenia – digitálna aerotriangulácia, automatická tvorba digitálneho modelu terénu (DMT) a povrchu (DMP), tvorba pravých ortofotomáp. Letecké meračské snímky (LMS) sa v súčasnosti lesníckeho mapovania získavajú z primárnych zdrojov – digitálnych veľkoformátových kamier, ktoré nahradili tradičné analógové kamery. Ich prínosy sú zrejmé najmä v oblasti interpretovateľnosti snímok vyplývajúcej z väčšieho rozsahu zachytených rádiometrických hodnôt, z toho vyplývajúca vyššia úspešnosť automatického vyhľadávania spojovacích bodov pri automatickej aerotriangulácii, možnosť súčasného vyhotovenia snímok čiernobielych, v prirodzených alebo farebné – infračervených farbách pri jednom lete. V súčasnej dobe sa kladú čoraz väčšie nároky na digitálne snímky najmä na ich geometrickú presnosť reprezentovanú veľkosťou obrazového elementu, na rádiometrické rozlíšenie a na spektrálnu rozlišovaciu schopnosť čiže počet pásiem v rámci elektromagnetického spektra, čo má výrazný vplyv na kvalitu a kvantitu údajov získaných zo spracovaných snímok.

2. ROZBOR PROBLEMATIKY

S masívnym nástupom digitálnych záznamov, výkonného softvérového a hardvérového vybavenia v prvých rokoch 21. storočia sa aj v lesníctve udomácnila digitálna fotogrametria a dnes predstavuje dominantnú technológiu, ktorou sa vyhodnocuje 100% snímkových materiálov, ktoré sa používajú v mapovaní lesa, tak z kvantitatívnej ako aj z kvalitatívnej stránky. (CHUDÝ – KARDOŠ – ŠADIBOL 2012)

Metódy fotogrametrie sú pri lesníckom mapovaní najhospodárnejšou meračskou metódou a uľahčujú náročné geodetické práce najmä v horských oblastiach, neprístupných terénoch, miestach po kalamitách a umožňujú získavanie väčšieho množstva informácií, ktoré terénnym meraním a prešetrovaním len ťažko alebo vôbec nemožno získať. Digitálna fotogrametria priniesla do procesu spracovania referenčných údajov o predmetoch na povrchu zeme, o snímaní povrchu zeme a tvorbe všetkých druhov mapových výstupov veľké zintenzívnenie a zvýšenie produktivity prác. Digitálne fotogrametrické systémy sú čoraz dostupnejšie pre širší okruh používateľov.

Digitálna fotogrametria podľa WOLF - DEWITT (2000) robí prácu so snímkami efektívnejšou, čo má následok v znížení ceny jej produktov. Hlavné výhody jej použitia môžeme zhrnúť do nasledovných bodov:

- Digitálna fotogrametria obsahuje algoritmy pre spracovanie a manipuláciu s obrazom (zaostrovanie, filtrovanie, kompresia, obrazové pyramídy, dláždenie)
- Obsahuje známe algoritmy z analytickej fotogrametrie (triangulácia, snímkové orientácie), pričom tieto sú zdokonalené a automatizované
- Digitálna automatická aerotriangulácia umožňuje orientovať blok snímok s využitím menšieho počtu vlícovacích bodov
- Ďalšie zníženie potrebného počtu vlícovacích bodov priniesla aplikácia technológie GNSS/IMU poskytujúca údaje o prvkoch vonkajšej orientácie snímok

Snímkové triangulácie

Snímkové triangulácie predstavujú súbor metód, pomocou ktorých sa zisťujú polohové súradnice nových bodov zo snímky fotogrametrickým spôsobom (ŽÍHLAVNÍK, Š., ET AL. 2005). Tieto body môžu slúžiť na zhustenie bodového poľa pre terestrické domeranie lesného detailu neviditeľného na snímke alebo na výpočet prvkov externej orientácie fotokamery pri fotogrametrickom vyhodnotení – tzv. vlícovacie body.

Snímkové triangulácie nám umožňujú zhustiť bodové pole fotogrametricky s dostatočnou presnosťou na to, aby mohli byť použité ako vlíčovacie. Týmto dosiahneme zníženie počtu terestricky meraných vlíčovacích bodov. Snímkové triangulácie výrazne zrýchľujú postup lesníckych mapovacích prác a obmedzujú množstvo ekonomicky náročných terestrických geodetických meraní a tým prispievajú k ich zhospodárneniu. Umožňujú určiť veľký počet vlíčovacích bodov v relatívne krátkom čase, bez ohľadu na prístupnosť a členitosť terénu. Snímková triangulácia je viac všeobecný termín, pretože tento proces je možné aplikovať ako na letecké tak aj pozemné snímky.

Aerotriangulácia

Aerotriangulácia je zaužívaný termín pre proces určovania súradníc X, Y. Aerotriangulácia sa používa pre mnoho úloh. Jednou z hlavných úloh je zhustenie vlíčovacích bodov cez snímkové rady/bloky na použitie v nasledujúcich fotogrametrických úkonoch (WOLF - DEWITT, 2000).

Každý stereo model potrebuje pre svoju orientáciu minimálne 3 polohové a 4 výškové vlíčovacie body. V záujme zníženia tohto počtu boli vyvinuté rôzne metódy aerotriangulácie. (napr. ALBERTZ - WIGGENHAGEN 2009, WOLF - DEWITT 2000)

Vlíčovacie body sú nevyhnutné pre rozsiahle bloky snímok a cena za ich vyhotovenie môže byť vysoká, najmä ak by sa merali terestrickou metódou. Aerotriangulácia sa používa ako efektívna metóda na zhustenie vlíčovacích bodov, ktoré vychádzajú z menšieho počtu v teréne meraných a signalizovaných bodov. V súčasnosti pomocou kinematickej metódy merania GNSS je možné získať súradnice projekčných centier priamo v lietadle, čo môže úplne nahradiť potrebu terestrického merania vlíčovacích bodov. Zatiaľ ešte tieto systémy nedosahujú požadovanú presnosť a ich výsledky sú zaťažené aj systematickými chybami. Z toho dôvodu je stále nutné využívanie určitého počtu vlíčovacích bodov.

Výhody aerotriangulácie podľa WOLF - DEWITT (2000) sú v tom, že väčšina práce sa vykonáva v laboratórnych podmienkach, z čoho vyplýva, že nevzniká meškanie prác v dôsledku nepriaznivého počasia. Ďalšiu výhodu pripisuje tomu, že sa minimalizujú terestrické merania v ťažko dostupných terénoch, v zalesnených územiach, skaliskách, extrémnych terénoch a nevyžaduje sa priamy prístup na pozemky v projektovanej oblasti.

Podstata aerotriangulácie je v orientácii snímkovej dvojice pretínaním nazad na dané vlíčovacie body a po priorientovaní ďalšej snímky sa „pretínaním napred“ určí priestorová poloha nových objektových bodov. Tieto sa používajú na učenie ďalšieho stanovišťa spätným pretínaním atď. Princíp aerotriangulácie je založený na postupnom priradovaní jednotlivých modelov prenášaním mierky a priestorovej orientácie prvého modelu na ďalšie modely, ktoré sú spojené do pásu. Jednotlivé úkony sú zaťažené systematickými chybami nepravidelného charakteru. Pri priradovaní modelov sa objavujú odchýlky v polohe a výškach triangulovaných a kontrolných vlíčovacích bodov. Tieto odchýlky sa ďalšími výpočtami rozdelia medzi všetky určené body. Odchýlky vznikajú predovšetkým hromadením systematických a nie náhodných chýb, ako je to vo väčšine geodetických metód (ŽÍHLAVNÍK, Š., 2004).

Aerotriangulácia sa delí na tri kategórie:

Analógová aerotriangulácia zahŕňa manuálnu vnútornú, vzájomnú a absolútnu orientáciu nadväzujúcich modelov v snímkových radoch s použitím analógových priestorových vyhodnocovacích prístrojov. Tieto, podľa ŽÍHLAVNÍK, Š. (2004) umožňujú zámenu pozorovania ľavého a pravého projektora, teda priradovanie snímkového modelu. Vlčovacie body, ktorých súradnice musia byť známe musia byť na začiatku, na konci, prípadne aj v strede snímkového pásu.

Semianalytická aerotriangulácia zahŕňa manuálnu vnútornú a vzájomnú orientáciu stereomodelov na stereo vyhodnocovacom prístroji s nasledujúcim meraním modelových súradníc. Absolútna orientácia je vykonávaná počítačsky – odtiaľ pochádza názov semianalytická.

Analytická aerotriangulácia pozostáva z precízneho merania snímkových súradníc vlíčovacích a spojovacích bodov a z následného počítačského riešenia vnútornej, vzájomnej a absolútnej orientácie,

ktorých výstupom sú priestorové súradnice v geodetickom súradnicovom systéme. Fotogrametrický zväzok lúčov je v analytických metódach definovaný matematickými vzťahmi (ŽÍHLAVNÍK, Š. ET AL. 2005).

Digitálna aerotriangulácia

Digitálna aerotriangulácia sa v súčasnosti v rámci fotogrametrického procesu spracovania leteckých snímok považuje za najdôležitejší krok. Bez správneho vyriešenia automatickej aerotriangulácie nemožno vytvoriť ďalšie produkty fotogrametrie ako sú ortofotosnímky, následne ortofotomapy a iné (napr. CHUDÝ - ŠADIBOL, 2013).

Predstavuje aplikáciu analytickej aerotriangulácie v počítačovom prostredí digitálnych fotogrametrických systémov. Digitálna fotogrametria a digitálne fotogrametrické systémy vytvorili nové predpoklady pre využitie digitálnej aerotriangulácie tým, že manuálne spracovanie v analytickej fotogrametrii bolo nahradené automatizovanými postupmi, najmä aplikáciami obrazovej korelácie. (ŽÍHLAVNÍK, Š. ET AL. 2013).

Takto bol postupne vytvorený systém digitálnej automatickej aerotriangulácie (DAAT), ktorá generuje blokovú konfiguráciu, automaticky vyberá spojovacie body bloku v pásmach dvojnásobného, trojnásobného a priečného prekrytu, tieto sú navzájom priradované do susedných snímok a priraduje im presnosť pod úrovňou priestorového rozlíšenia, tzv. sub-pixelovú presnosť. Výsledkom riešenia sú vytvorené stereo dvojice, resp. blok snímok (KOŽUCH, 2003).

Digitálna aerotriangulácia je vlastne aplikáciou analytických metód do počítačového prostredia. Pri analytických metódach sa rozlišujú dva typy možných riešení: etapové a komplexné (PAVELKA, 2009).

3. MATERIÁL A METÓDY SPRACOVANIA

Digitálne letecké meračské snímky boli získané kamerou UltraCam Xp s ohniskovou vzdialenosťou 100,50 mm (snímkované v apríli, rok 2013) v úrovni spracovania Level3 (podľa technickej špecifikácii kamery). Snímky zachytávajú zimný aspekt lesných porastov. Všetky listnaté porasty boli v čase snímkovania bez olistenia a prízemná vegetácia nebola ešte vyvinutá.

Tab. 1 Parametre použitých leteckých snímok

Snímkový materiál	RGB
Rádiometrické rozlíšenie	8 bit
Kamera	UltraCam Xp
Pozdĺžny a priečny prekryt	80 x 60 %
Fyzická veľkosť pixela	6,0 μ m
Geometrické rozlíšenie (GSD)	0,10 m
Termín snímkovania	apríl 2013
Počet snímok	1205

Vlícovacie body

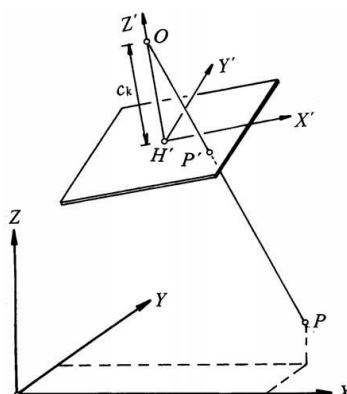
Pre digitálne letecké snímky boli vlícovacie a kontrolné body zamerané v čase snímkovania v roku 2013. Jednalo sa o signalizované kruhy a štvorce bielej farby, ktoré boli zachytené na leteckých snímkach. Ich súradnice boli získané zameraním pomocou technológie GNSS statickou metódou. Ako kontrolné body boli rovnako použité signalizované body, resp. boli zamerané následne po vykonaní snímkového letu a jednalo sa o body dobre identifikovateľné na snímkach a v teréne napr. kanalizačné poklapy, vodorovné dopravné značenie a pod. Podobne ako vlícovacie body aj tieto boli zamerané technológiou GNSS statickou metódou.

Metodika práce pozostávala zo spracovania fotogrametrických projektov digitálnych leteckých snímok s využitím rôznych prístupov v procese aerotriangulácie vo fotogrametrickom systéme INPHO. Pracovný postup sme realizovali na základe tzv. komplexného (Schmidovho) riešenia, ktoré využíva metódy vyrovnania lúčových zväzkov.

Lúčové zväzky sa vyrovnávajú pre každú snímku alebo v blokoch a dajú sa k nim pridať opravy z rôznych chýb (refrakcia, distorzia, zakrivenie Zeme a pod.). Pokiaľ rozšírime komplexné riešenie na viacej snímok a počítame hlavne nové body, ktoré sa budú používať ako vlícovacie, jedná sa o analytickú aerotrianguláciu. Komplexné riešenie pre rozsiahle bloky je veľmi náročné na výpočtovú techniku i softvér, ktorý musí riešiť rozsiahle sústavy rovníc s množstvom neznámych. Pretože sa jedná o iteratívny výpočet, je nutné dosadiť počiatočné približné hodnoty neznámych. Práve toto bol jeden z problémov v minulosti. Dnešná výpočtová technika a technológie GNSS/IMU priniesli v tomto smere zásadný posun (PAVELKA, 2009).

Takéto komplexné metódy analytickej aerotriangulácie kladú minimálne požiadavky na počet a rozloženie daných (vlícovacích) bodov. Jednou z hlavných predností komplexného riešenia je, že vo výpočtoch sa súčasne uvažuje súbor všetkých podmienok, ktorými je možné analyticky vyjadriť vzťah medzi meranými snímkovými súradnicami a zodpovedajúcimi geodetickými súradnicami ako daných, tak aj určených bodov.

Základnou podmienkou, z ktorej komplexné riešenie vychádza, je podmienka kolíneárnosti (obr. 1), ktorá znamená, že projekčné centrum, snímkový bod a zodpovedajúci bod na teréne leží na jednej priamke (BITTERER, 2005).



Obr. 1 Podmienka kolíneárnosti (BITTERER, 2005)

Pri digitálnej aerotriangulácii sme využili rôzne prístupy za účelom overenia polohovej a výškovej presnosti na kontrolných bodoch a racionalizácie spracovania leteckých snímok. Z tohto dôvodu sme spracovali nasledujúce experimenty:

V experimente č. 1 sme v aerotriangulácii použili 15 vlícovacích a 16 kontrolných bodov s využitím korekcie systematických posunov v určení projekčných centier snímok metódou GNSS a tiež korekcie systematických vplyvov uhlov (ω , φ , κ) získaných inerciálnou meračskou jednotkou (IMU).

V experimente č. 2 bolo využitých len 16 kontrolných bodov rovnako ako v experimente č. 1. Jednalo sa o digitálnu automatickú aerotrianguláciu bez využitia vlícovacích bodov a kontrolné body sme použili len na overenie polohovej a výškovej presnosti DAAT.

3. VYSLEDKY A DISKUSIA

Pri vyhodnotení výsledkov sme navzájom porovnávali stredné súradnicové chyby vypočítané z odchýlok na kontrolných bodoch v polohe a výške na oboch projektoch. Presnosť digitálnej aerotriangulácie je charakterizovaná strednou kvadratickou chybou m_{xy} (RMS) na kontrolných bodoch. Nakoniec sme strednú kvadratickú chybu porovnali s STN 01 3410 Mapy veľkých mierok – základné a účelové mapy (tab. 2).

Tab. 2 Triedy presnosti mapovania - STN 01 3410 ZÚM

Triedy presnosti	m_{xy}
1.trieda	0,04 m
2.trieda	0,08 m
3.trieda	0,14 m
4.trieda	0,26 m
5.trieda	0,50 m

Tabuľka č. 3 uvádza hodnoty stredných chýb súradníc na vlícovacích a kontrolných bodoch projektu č. 1. Reálnu predstavu o polohovej a výškovej presnosti udávajú hodnoty na kontrolných bodoch.

Tab. 3 Hodnoty stredných chýb súradníc pre osi x, y, z – projekt č.1

	Vlícovacie body [m]			Kontrolné body [m]		
	x	y	z	x	y	z
Stredná chyba	0.035	0.021	0.120	0.080	0.058	0.161
max	0.069	0.048	0.252	0.185	0.163	0.371
min	0.003	0.001	0.042	0.018	0.002	0.005
Počet	15	15	15	16	16	16

Tabuľka č. 4 uvádza hodnoty stredných chýb súradníc na kontrolných bodoch projektu č. 2. Hodnoty chýb na vlícovacích bodoch nie sú uvedené, nakoľko v projekte neboli žiadne vlícovacie body použité.

Tab. 4 Hodnoty stredných chýb súradníc pre osi x, y, z – projekt č. 2

	Vlícovacie body [m]			Kontrolné body [m]		
	x	y	z	x	y	z
Stredná chyba	-	-	-	0.084	0.064	1.036
max	-	-	-	0.176	0.139	1.253
min	-	-	-	0.016	0.016	0.720
Počet	0	0	0	16	16	16

Z daných výsledkov môžeme konštatovať, že horšie výsledky sme dosiahli v projekte č. 2 bez vlícovacích bodov, kde sme nemali možnosť odstrániť systematické chyby z údajov vonkajšej orientácie získanými pomocou GNSS/IMU. Konkrétne sa jednalo o chyby systematických posunov v dôsledku časovej synchronizácie a v určení projekčných centier kinematickou metódou GNSS (obr. 3).

Výsledky podporuje aj dosahovaná presnosť určenia projekčných centier a náklonov systémom GNSS/IMU, kde podľa PAVELKU (2009) je vnútorná presnosť integrovaného GPS/INS systému v polohe 0,05-0,3 m, v rýchlosti nosiča 0,005 m/sec, v náklonoch 0,005° a v azimute 0,008°.

Pre odstránenie týchto systematických chýb je nevyhnutné zamerať dostatočné množstvo vlícovacích bodov (napr. INPHO 2012, PAVELKA 2009).

Ak porovnáme hodnoty stredných súradnicových chýb, tak zistíme že sa v presnosti líšia o 4,6 cm ($m_{xy}=0,028$ m v projekte č. 1, $m_{xy}=0,074$ m v projekte č. 2). Oveľa výraznejší prínos malo použitie vlícovacích bodov v projekte č. 1 na strednú výškovú chybu ($m_z=0,161$ m vs. $m_z= 1,036$ m). Tu je rozdiel v presnosti viac ako 6-násobný. Z uvedených výsledkov strednej výškovej chyby je zrejmy prínos vlícovacích bodov najmä

pre výškovú stabilitu snímkového bloku. V tomto prípade (projekt č. 1) dosiahnuté výsledky korešponujú s teoretickými očakávanými hodnotami vzhľadom na typ a kvalitu použitého snímkového materiálu napr. podľa INPHO (2012) (výšková presnosť = 1,5 x polohová presnosť). Dosiahnuté výsledky poukazujú na význam použitia vlíčovacích bodov aj v súčasnosti, keď je možné získať údaje vonkajšej orientácie priamo počas snímkového letu. Naopak výsledky projektu č. 2 poukázali na efektívnosť a rýchlosť spracovania digitálnej aerotriangulácie bez vlíčovacích bodov, pričom dosiahnutá presnosť je pre určité úlohy postačujúca. Porovnaním so STN 01 3410 môžeme konštatovať, že obidva projekty zhodne dosiahli 2. triedu presnosti mapovania.



Obr. 2 Systematické chyby v určení projekčných centier snímok (INPHO, 2012)

Pre porovnanie:

HALVOŇ (2011) uvádza výsledky digitálnej aerotriangulácie spracovanej vo fotogrametrickom systéme INPHO. Na lokalite ŠLP Zvolen 2002 sa vykonala týmto softwarom revízia výsledkov aerotriangulácie spracovanej v programe ImageStation z roku 2002. Lokalita VŠLP v roku 2002 predstavovala 88 čiernobielych analógových snímok s prekrytom 60 x 30% s veľkosťou pixla 15 μm . Lokalita Dobrá Niva bola snímokaná v roku 2008 digitálnou kamerou UltraCamX s priestorovým rozlíšením 0,20 m a prekrytom 60 x 30%. V prípade čiernobielych snímok boli v projekte aerotriangulácie použité len približné stredy snímok a v projekte digitálnych snímok z roku 2008 kompletne prvky vonkajšej orientácie získané jednotkou GNSS/IMU. Výsledná presnosť udávaná softwarom po vyrovnaní bloku pre lokalitu Dobrá Niva je $m_x=0,040$ m, $m_y=0,049$ m, $m_z=0,153$ m. Pre lokalitu ŠLP Zvolen $m_x=0,078$ m, $m_y=0,081$ m, $m_z=0,167$ m.

ŠADIBOL (2010) uvádza výsledky digitálnej aerotriangulácie spracovanej vo fotogrametrickom systéme INPHO. Spracovával panchromatické a multispektrálne snímky v úrovni spracovania 2 (Level 2 – označenie výrobcu) z digitálnej kamery UltraCamD od firmy Vexcel zachytávajúce územie VŠLP. Pre svoj výskum použil 160 snímok v šiestich snímkových radoch s 85% priečnym a 35% pozdĺžnym prekrytom. Vytvoril 8 projektov, ktorých hlavnou úlohou bolo posúdenie presnosti jednotlivých projektov aerotriangulácie v závislosti od počtu vlíčovacích bodov s využitím údajov GPS/IMU jednotiek. Bez vlíčovacích bodov dosiahol výsledok, kde stredná súradnicová chyba $m_{xy}=0,385$ m. S použitím 4 vlíčovacích bodov dosiahol strednú súradnicovú chybu $m_{xy}=0,047$ m. S narastajúcim počtom vlíčovacích bodov sa mu polohová presnosť výrazne nemenila.

KARDOŠ – SOLANKA – MADARÁSZ (2013) uvádzajú výsledky digitálnej aerotriangulácie spracovanej vo fotogrametrickom systéme INPHO. Jednalo sa o spracovanie územia VŠLP snímokaného v roku 2011 pomocou kamery UltraCamX. Použitých bolo 3025 RGB snímok s pozdĺžnym a priečnym prekrytom 80 x 60%. Geometrické rozlíšenie dosahovalo 0,10 m a fyzická veľkosť pixla 7,2 μm . Bez použitia vlíčovacích bodov bola dosiahnutá stredná súradnicová chyba $m_{xy}=0,071$ m. S použitím 47 vlíčovacích bodov dosiahla stredná súradnicová chyba $m_{xy}=0,051$ m. Stredná výšková chyba m_z bez použitia vlíčovacích bodov dosiahla po odstránení systematických chýb $m_z=0,266$ m. Pri použití 47 vlíčovacích bodov dosiahla $m_z=0,121$ m. Aj v tomto prípade sa preukázalo, že so vzrastajúcim počtom vlíčovacích bodov dochádza k zlepšovaniu polohovej a výškovej presnosti digitálnej aerotriangulácie.

4. ZÁVER

Využitie fotogrametrie má v slovenskom lesníckom mapovaní dlhú tradíciu, pričom za vyhotovenie a aktualizáciu lesníckeho tematického mapového diela je zodpovedné Národné lesnícke centrum s jeho oddeleniami. Efektívnosť a ekonomika využitia fotogrametrie v lesníctve redukuje terestrické merania na minimum (napr. meranie vlícovacích a kontrolných bodov, meranie lesného detailu neviditeľného na snímke).

Proces spracovania leteckých snímok vo fotogrametrickom projekte sa podstatne zvýšil s nástupom digitálnych kamier. Zvýšenie geometrickej, spektrálnej a rádiometrickej rozlišovacej schopnosti digitálnych snímok sa prejavilo v oblasti automatickej aerotriangulácie, najmä spôsobu vyhľadávania spojovacích bodov na jednotlivých snímkach v dôsledku lepšej textúry a štruktúry obrazu.

Z hľadiska dosiahnutých výsledkov polohovej presnosti pri projektoch, v ktorých boli použité vlícovacie body môžeme skonštatovať, že použitie prídavných parametrov v procese aerotriangulácie má pozitívny vplyv na zvýšenie polohovej presnosti. Z tohto výsledku nám taktiež vyplýva, že za účelom vyhodnotenia snímok a zhustenia bodového poľa nie je potrebné zamerať taký veľký počet vlícovacích bodov ako pri analógovom vyhodnocovaní (univerzálna fotogrametrická metóda), čo môžeme považovať za nezanedbateľnú výhodu digitálnej fotogrametrie. Ďalej môžeme konštatovať, že pri väčších blokoch snímok nezávisí ich geometrická stabilita od počtu ale hlavne od správneho rozloženia východiskových vlícovacích bodov. Na dostatočný počet vlícovacích bodov je viazané najmä použitie korekcie systematických chýb pri prvkoch vonkajšej orientácie. Z tohto dôvodu je potrebné zamerať určitý počet vlícovacích bodov na začiatku a konci každého snímkového radu, prípadne na celom bloku.

Pri zhodnotení projektov bez použitia vlícovacích bodov môžeme skonštatovať, že dosiahli porovnateľnú polohovú presnosť ako projekty, v ktorých boli použité vlícovacie body. Značný rozdiel sa ukázal pri stredných výškových chybách m_z . Z tohto môžeme skonštatovať, že vlícovacie body majú značný vplyv na zníženie systematickej chyby pri strednej výškovej chybe. Diskutovanou témou v súčasnosti je možnosť aerotriangulácie s využitím GNSS bez použitia vlícovacích bodov. Aj keď tomu teoreticky nič nebráni, ale z dôvodu kontroly je vždy potrebný aspoň minimálny počet kontrolných bodov.

Dosiahnuté presnosti stredných súradnicových m_{xy} chýb preukázali možnosti mapovania v 2. triede presnosti podľa STN 013410 Mapy veľkých mierok. Toto je mimoriadne významný poznatok a prínos do oblasti digitálnej fotogrametrie a samozrejme aj pre lesnícku prax. Treba zdôrazniť, že v rámci hospodárskej úpravy lesov sa pre obnovu programov starostlivosti o les snímkuje približne 4500 km² zalesnených území. Vyhodnotenie snímok metódou digitálnej fotogrametrie a využitie poznatku minimálneho počtu vlícovacích bodov znamená výrazne zvýšenie hospodárnosti lesníckeho mapovania. Digitálna fotogrametria s využitím digitálnej aerotriangulácie pri spracovaní rozsiahlych blokov snímok predstavuje efektívnu metódu určovania podrobných geodetických bodov v porovnaní s terestrickým meraním. V prípade digitálnych snímok zohráva dôležitú úlohu pri výslednej polohovej presnosti aerotriangulácie najmä geometrické rozlíšenie snímok tzv. Ground sampling distance (GSD).

Nástup digitálnej fotogrametrie dáva predpoklady na jej využitie pre určovanie vlícovacích bodov metódou aerotriangulácie, čo výrazne zvyšuje hospodárnosť lesníckeho mapovania. Výsledkom digitálnej aerotriangulácie sú spresnené parametre vonkajšej orientácie snímok a priestorové modely snímok z minimalizovanými vertikálnymi paralaxami, čo umožňuje zisťovať priestorové súradnice kdekoľvek v celom snímkovom bloku s využitím malého počtu, resp. žiadnych vlícovacích bodov (v prípade využitia údajov GNSS/IMU).

POUŽITÁ LITERATÚRA

ALBERTZ, J.- WIGGENHAGEN, M., 2009. Guide for photogrammetry and remote sensing. 5th completely revised and extended edition. Heidelberg, Wichmann: 334 p.

BITTERER, L., 2005. Základy fotogrametrie. Stavebná fakulta na Žilinskej univerzite.

HALVOŇ, L., 2006. Využitie metód GPS pri lesníckom mapovaní. In. Geodézia v lesníctve. Zvolen: TU Zvolen. ISBN 801-228-1684-1, s. 26-38.

HALVOŇ, L., 2008. Lesnícke mapové dielo. In: *Lesnícka geodézia a fotogrametria - trendy: sympóziu s medzinárodnou účasťou: zborník referátov*. Zvolen: Technická univerzita vo Zvolene, 2008. s. 112-131. ISBN 978-80-228-1949-7.

HALVOŇ, L., 2011. Posúdenie presnosti vyhodnotenia leteckých meračských snímok metódami digitálnej fotogrametrie pri lesníckom mapovaní. Dizertačná práca. Zvolen: Technická univerzita vo Zvolene. 117 s.

CHUDÝ, F. – Kardoš, M. – ŠADIBOL, J., 2012. Digitálna fotogrametria neoddeliteľná súčasť lesníckeho mapovania. Technická univerzita vo Zvolene. Vedecká štúdia, s. 85. ISBN 978-80-228-2314-2

CHUDÝ, F., ŠADIBOL, J., 2013. Panchromatické zaostrovanie multispektrálnych snímok na získavanie kvantitatívnych a kvalitatívnych informácií v oblasti lesníckeho mapovania In. sborník z konferencie GIS Ostrava2013. [Online]. [Dátum: 25. 10. 2013.] http://gis.vsb.cz/GIS_Ostrava/GIS_Ova_2013/sbornik/papers/gis2013508affc97d081.pdf

INPHO, 2012. Uživatelský manuál spoločnosti INPHO. INPHO GmbH, Stuttgart.

Kardoš, M. – Solánka, J. – Madarász, Z., 2013. Digitálna aerotriangulácia s podporou GNSS/IMU. Zvolen: Technická univerzita vo Zvolene, s. 59 – 69. ISBN 978-80-228-2569-6.

Kožuch, M., 2003. Digitálne ortofotomapy – zdroj aktuálnych informácií o krajine. Prírodovedecká fakulta UK Bratislava, dizertačná práca, 121 s.

Meluš, J., 2007: Vplyv lesného prostredia na presnosť pri meraniach GNSS, In: Aktuálne problémy lesníckeho mapovania, zborník, Zvolen: TU Zvolen, s. 61 – 73. ISBN 978-80-228-1809-4

Pavelka, K., 2009. *Fotogrametrie 1*. 1.vydanie. Praha : České vysoké učení technické v Praze. s. 200. ISBN 978-80-01-04249-6.

ŠADIBOL, J., 2010. Digitálna fotogrametria v lesníckom mapovaní. Dizertačná práca. Zvolen: Technická univerzita vo Zvolene. 92 s.

Wolf, R. - Dewitt, A., 2000. Elements of Photogrammetry with Application in GIS. 3rd edition, McGraw-Hill, Boston, 608 p., ISBN 0-07-292454-3

Žihlavník, Š., 2004. Geodézia, fotogrametria a mapovanie v lesníctve. Zvolen: Technická univerzita vo Zvolene, 388 s. ISBN 80-228-1287-0

Žihlavník, Š., Chudý, F., Kardoš, M., 2005. Digitálna fotogrametria v lesníckom mapovaní. Zvolen: Technická univerzita vo Zvolene. Vedecké štúdie, 2/2005/2, s. 80 s. ISBN 80-228-1545-4.

Žihlavník, Š., Kardoš, M., Tunák, D. 2013. Určovanie podrobných geodetických bodov v zalesnených územiach. Zvolen: Technická univerzita vo Zvolene. Vedecká monografia, 115 s.

STN 01 3410. Mapy veľkých mierok - Základné a účelové mapy