

Ověření prostorové přesnosti ortofota vytvořeného prostředky UAS (drony)

Ing. Karel Raděj, CSc.¹⁾, Ing. David Vilím²⁾,
Dr. Ing. Lubomír Soukup³⁾, Ing. Milan Kocáb, MBA¹⁾,
Ing. Jiří Lechner, CSc.¹⁾,

¹⁾ Výzkumný ústav geodetický, topografický a kartografický, v. v. i.,

²⁾ Geoline, spol. s r. o.,

³⁾ Ústavu teorie informace a automatizace AV ČR, v. v. i.

Abstrakt

Článek popisuje způsob vyhodnocení prostorové přesnosti metody fotogrammetrického mapování prostředky UAS (drony). Určení prostorové přesnosti této nové metody pro potřeby pozemkových úprav je podmínkou pro akceptaci výsledků zeměměřických činností prováděných ve státním zájmu. Ověření prostorové přesnosti bylo provedeno ve dvou termínech a dvěma různými prostředky UAS (drony) v území, které již bylo zaměřeno geodetickými metodami. Byla prokázána způsobilost navrhované metody pro její využití při velkoměřítkovém mapování i při pozemkových úpravách.

Verification of Spatial Accuracy of an Orthophotomap created by UAS

Abstract

The article deals with assessment of spatial accuracy of photogrammetric mapping by means of UAS (Unmanned Aerial Systems). Spatial accuracy assessment of this novel method for land consolidation purposes is a prerequisite for acceptance of surveying results in state interests. The spatial accuracy has been verified by two different UAS means and in two different terms. Eligibility of the proposed method for large-scale mapping and for land consolidation was proved.

Keywords: UAS, orthophotomap, positional and vertical accuracy, mapping, land consolidation

1. Úvod

V rámci výzkumného úkolu Výzkumného ústavu geodetického, topografického a kartografického (VÚGTK), v. v. i., řešeného ve spolupráci s firmou Geoline, spol. s r. o. za finanční podpory Technologické agentury ČR s názvem „Výzkum uplatnění a začlenění prostředků UAS do zpracování komplexních pozemkových úprav a udržitelného rozvoje krajiny“, bylo provedeno ověření polohové a výškové přesnosti ortofota vytvořeného bezpilotním leteckým systémem UAS (Unmanned Aerial Systems) nazývaným běžně i v geodetické praxi „dron“.

Území pro vyhodnocení polohové a výškové přesnosti mapování a vyhotovení obecné metodiky pro mapování se střední souřadnicovou chybou $1) \pm 0,14$ m bylo zvoleno tak, aby na vzorku dat byly jednak zástavba, liniové stavby, vegetace, mezníky a dostatečné výškové poměry. Rozloha území byla vybrána v rozsahu asi 72 ha, kde byl zastoupen intravilán, liniová stavba (silnice a železnice), pole, částečně zarostlý terén a svažité terén (obr. 1). Na tomto území bylo již uskutečněno měření geodetickými metodami pro potřeby pozemkové úpravy a měření UAS bylo v podstatě prováděno jako opakované měření jinou metodou.

2. Technické podmínky pro mapování metodou UAS

Při použití UAS jako metody pro určování podrobných bodů polohopisu a výškopisu byly na základě požadované přesnosti stanoveny následující technické podmínky a parametry snímkování:

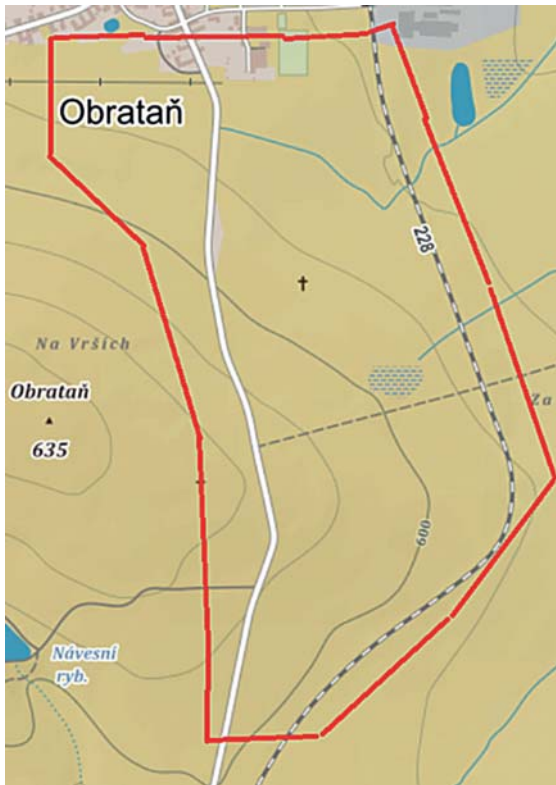
- Podélný překryt $p = 80$ %, příčný překryt $q = 70$ % a lineární vzdálenost mezi středy pixelů na zemi (Ground sample distance – GSD) menší nebo rovna 3 cm.
- Snímačem (senzorem) umístěným v bezpilotním letadle a pořizujícím letecké snímky byla digitální kamera s minimální velikostí snímacího senzoru 13 x 17 mm a velikost obrazového prvku (pixelu) na tomto snímacím senzoru byla větší než 4,5 μ m.
- Snímkování bylo provedeno tak, aby za jakoukoliv částí hranice zájmového území bylo na všech letových drahách pořízeno ještě nejméně osm snímků.
- Vstupní body pro georeferencování byly signalizovány pomocí terčů z vhodného materiálu o rozměru přibližně třiapůlnásobku velikosti GSD (9-10 cm).
- Rozložení vstupních bodů bylo pravidelné v celé ploše vybrané části pozemkové úpravy (obr. 2) a tyto body byly i vně obvodu tak, aby vytvořily „obálku“ kolem hranice a byly zobrazeny na alespoň šesti snímcích.
- Počet vstupních bodů odpovídal počtu snímků děleno 100 plus jedna. Například v našem případě měření bylo georeferencováno na 10 signalizovaných vstupních bodech v S-JTSK.
- Signalizace podrobných bodů se většinou neprovádí. Provádí se pouze tehdy, pokud je vlastní podrobný bod rozměrově menší než třiapůlnásobek velikosti GSD nebo tehdy, když jeho kontrast s okolím neumožňuje jednoznačnou interpretaci podrobného bodu na ortofotu pro vyhotovení mapy je bod potřebný (v našem případě k tomu nedošlo).
- Je potřeba signalizovat a zaměřit geodetickou metodou (GNSS – dvojí nezávislé měření) i kontrolní body na lokalitě, a to v odlišných místech než body vstupní. Počet kontrolních bodů musí být přinejmenším stejný jako počet vstupních bodů.

1) Termín střední chyba je použit v souladu s platnou katastrální vyhláškou [7]. V dalším textu je použit aktuálně užívaný termín směrodatná odchylka.

- Na základě výše uvedených parametrů a s ohledem na konfiguraci vstupních bodů se vyhotovil letový plán, byla stanovena výška a rychlost letu (zpravidla pomocí počítačového programu specifického pro použitý typ UAS). Tento program též zajistí výpočet důležitých parametrů pro stabilitu letu s ohledem na hmotnost dronu a kamery, podmínky v letovém plánu, letové vzdálenosti a využitelnou kapacitu baterií pro mapování. Během měření bylo možno operativně změnit výšku a směr letu [3].

3. Mapování lokality s využitím UAS

Mapování s využitím UAS bylo rozděleno do dvou nezávislých etap měření v k. ú. Obrataň (okres Pelhřimov). První měření bylo provedeno systémem Trimble UX5 HP (obr. 3) a proběhlo v červnu 2017, tedy na konci jara, druhé měření bylo na stejné lokalitě provedeno v listopadu 2017 s jiným systémem MAVinci Sirius (obr. 4) s cílem vyhodnotit dosti odlišné podmínky měření (zvláště vegetační podmínky), a též rozdílné systémy vyhodnocení.



Obr. 1 Výškové poměry lokality



Obr. 2 Rozmístění vstupních (modré) a kontrolních bodů (červené)



Obr. 3 Plánování letu, letových drah a překrytí snímků systémem Trimble



Obr. 4 Plánování letu, letových drah a překrytů snímků systémem MAVinci

První měření polohopisu a výškopisu na zájmové lokalitě bylo provedeno dne 12. 6. 2017. Počasí bylo příznivé bez deště, bylo polojasno, k poledni již bylo zataženo. Toto první měření a vytvoření ortofota bylo provedeno společností GEOTRONICS Praha, s. r. o. Snímky byly pořízeny kamerou Sony a7R 35 mm s rozlišením 7 360 x 4 912 s výškou letu 200 m, GSD 2.67 cm.

Druhé měření polohopisu a výškopisu se konalo na podzim dne 23. 11. 2017 na stejné lokalitě, ale za jiných podmínek. Povětrnostní podmínky byly příznivé, jasno, teplota 8°C, vítr 4 m/s s nárazy 5 m/s, povrch lokality byl bez listů a viditelnost na rostlý terén byla dokonalá. Také letecké prostředky byly odlišné. Měření a vyhodnocení ortofota prováděla firma UpVision s. r. o., Praha 5. Byla využita technologie pořizení záznamu letu od firmy MAVinci UAS MAVinci Sirius. Snímky byly pořízeny kamerou Panasonic Lumix GX1, ohnisko 14 mm, CMOS rozlišení 4592 x 3448, typ čipu Live MOS, s výškou letu 111 m, GSD 3 cm.

4. Analýza prostorové přesnosti mapování v lokalitě Obrataň

Kontrola polohové a výškové přesnosti byla provedena na předem zvolených, rovnoměrně rozprostřených kontrolních bodech, které byly měřeny geodeticky ve dvou na sobě nezávislých etapách měření.

Měření fotogrammetrické pro tvorbu ortofota bylo provedeno prostředky UAS v různou dobu s různými systémy UAS. Šlo tedy o nezávislé pozorování stejné lokality v různých ročních obdobích (za nestejných počasí) různými aparaturami.

Při prvním měření (jarní etapa) bylo zájmové území nalétáno poprvé obousměrně, tj. v podélném i příčném směru, a podruhé jednosměrně, tj. pouze v podélném

směru. Dalo se předpokládat, že polohová a výšková přesnost bodů určených při dvojím způsobu určení bude odlišná. Výpočty polohových a výškových souřadnic bodů byly proto realizovány pro obě měření samostatně. Ve druhé (podzimní) etapě bylo zájmové území nalétáno pouze jednosměrně. Předmětem analýzy přesnosti tedy byly 3 soubory souřadnic kontrolních bodů.

Ze seznamu dvojích souřadnic kontrolních bodů, bylo třeba porovnat tyto nezávisle určené souřadnice z ortofota s geodeticky určenými souřadnicemi a odhadnout polohovou a výškovou přesnost bodů určených z dronu. Polohové souřadnice se zpracovávaly odděleně od výšek bodů. Vyhodnocení naměřených souřadnic a výšek bylo provedeno v Ústavu teorie informace a automatizace AV ČR, v. v. i. (ÚTIA AV ČR) s využitím systému Mathematica.

Přesnost ortofota byla určena na základě analýzy dostatečného počtu kontrolních bodů rovnoměrně rozmístěných v testovaném území (obr. 1). Pro výpočty přesnosti kontrolních bodů určených z dronu byly použity seznamy souřadnic, které byly určeny jednak kamerou z dronu s následným určením souřadnic v grafickém systému MicroStation na ortofotu, případně z mračna bodů a porovnány se souřadnicemi z opakovaného nezávislého měření geodetickými metodami pomocí GNSS metodou RTK a i polární metodou. Vstupní přesnost pro jednotlivé kontrolní body byla určena z vybraného souboru geodeticky určených bodů [2], [4].

Přesnost polohy kontrolních bodů je vyjádřena pomocí polohové směrodatné odchylky (střední souřadnicové chyby) a směrodatné odchylky výšek. Hledanou polohovou směrodatnou odchylku označíme $\sigma_{XY,dron}$, hledanou směrodatnou odchylku výšek $\sigma_{Z,dron}$. Předpokládáme, že výšky kontrolních bodů mají normální rozdělení pravděpodobnosti a polohové souřadnice mají dvojrozměrné symetrické normální rozdělení. Platnost tohoto předpokladu pro souřadnice a výšky zaměřené geodeticky byla v minulosti mno-

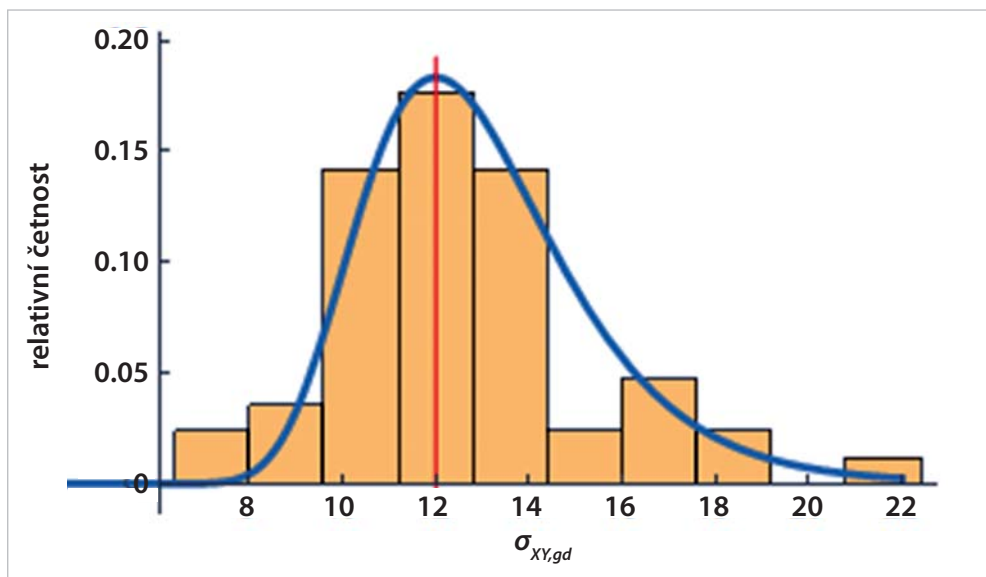
hokrát potvrzena. Normalita výškových a souřadnicových odchylek na kontrolních bodech byla ověřena pomocí Pearsonova testu dobré shody a Kolmogorovova-Smirnova testu na hladině významnosti 0,95. Souřadnice a výšky určené kamerou z UAS mají tedy také normální rozdělení pravděpodobnosti, neboť součet normálně rozdělených veličin (geodeticky určená souřadnice nebo výška plus její odchylka) má opět normální rozdělení.

4.1 Odhad vstupní přesnosti geodetického určení polohy bodů

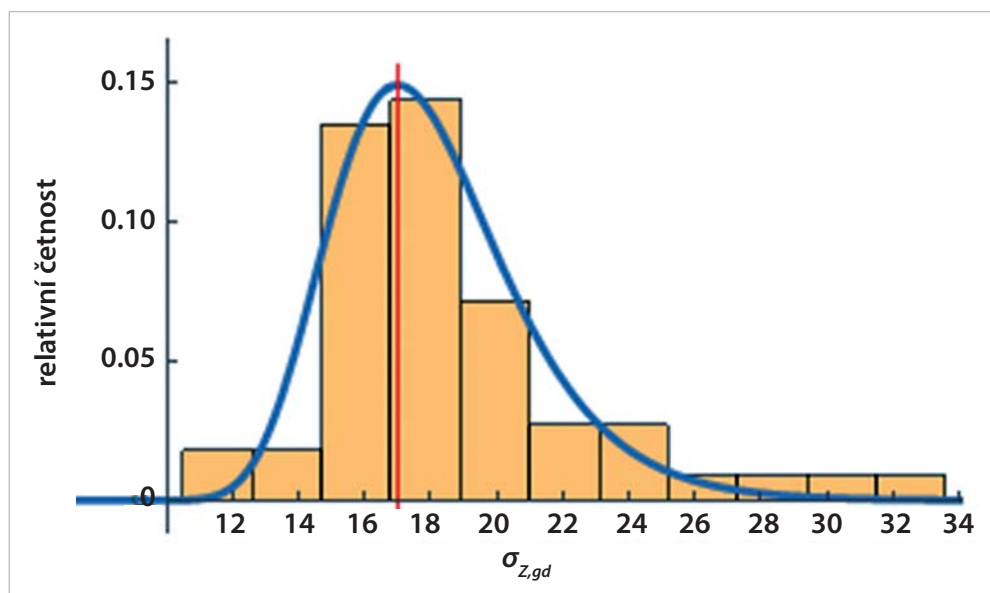
U každého kontrolního bodu je spolu s jeho souřadnicemi v systému S-JTSK a výškou B_{pv} uvedena i souřadnicová

směrodatná odchylka $\sigma_{xy,i}$ a směrodatná odchylka výšky $\sigma_{z,i}$. Tyto hodnoty byly opakovaně určeny aparaturou GNSS na 53 kontrolních bodech ve druhé etapě. Tyto údaje se mírně liší (v mm u polohových souřadnic, u výšek maximálně o 2 cm), přestože všechny kontrolní body byly zaměřeny stejně přesným postupem. Lze proto považovat všechny geodeticky zaměřené body za stejně přesné a předpokládat, že zjištěné odchylky jsou důsledkem náhodných vlivů. Tomu odpovídá i histogram relativních četností, který má charakteristický tvar odpovídající rozdělení pravděpodobnosti směrodatné odchylky. Tento histogram ukazují grafy (obr. 5 a 6).

Modrá křivka na obr. 5, 6 znázorňuje rozdělení pravděpodobnosti směrodatné odchylky $\sigma \in \{\sigma_{xy,gd}, \sigma_{z,gd}\}$, která má hustotu pravděpodobnosti:



Obr. 5 Histogram relativních četností a graf hustoty pravděpodobnosti směrodatné odchylky polohových souřadnic ($\sigma_{xy,gd}$); vodorovná osa je okótována v mm



Obr. 6 Histogram relativních četností a graf hustoty pravděpodobnosti směrodatné odchylky výšek ($\sigma_{z,gd}$); vodorovná osa je okótována v mm

$$g(\sigma) = \frac{q^{\frac{n}{2}} e^{-\frac{q}{2\sigma^2}}}{2^{\frac{n}{2}-1} \sigma^{n+1} \Gamma\left(\frac{n}{2}\right)} \quad (1)$$

Veličina q má hodnotu kvadratického součtu odchylek geodeticky určených souřadnic nebo výšek od průměrné souřadnice nebo výšky během měření aparaturou GNSS na jednom kontrolním bodě, n je počet těchto odchylek. Symbol Γ představuje gama funkci (viz např. [8]).

Případ $\sigma = \sigma_{XY,gd}$ ve vzorci (1) znamená, že rozdělení pravděpodobnosti s hustotou g odpovídá odchylkám souřadnic ve směru osy X i ve směru osy Y . Sloučení obou souřadnicových odchylek do jednorozměrné náhodné veličiny je oprávněné, neboť přesnost v obou souřadnicových osách je stejná.

Hustota pravděpodobnosti (1) je odvozena od rozdělení chí-kvadrát standardním způsobem (tzn. náhodná veličina $\frac{q}{2\sigma^2}$ má rozdělení chí-kvadrát s n stupni volnosti), viz např. [8].

Parametry q , n byly odhadnuty pomocí bayesovského přístupu, zvláště pro směrodatnou odchylku polohových souřadnic a zvláště pro směrodatnou odchylku výšek. Na základě těchto parametrů byly vypočteny nejvěrohodnější odhady směrodatných odchylek a jejich konfidenční intervaly na hladině významnosti 0,95.

$$\sigma_{XY,gd} = (12 \pm 5,5) \text{ mm}, \quad \sigma_{Z,gd} = (17 \pm 6,4) \text{ mm}.$$

Uvedené konfidenční intervaly byly pro pohodlí čtenáře záměrně zvoleny symetricky kolem maximálně věrohodného odhadu tak, aby pravděpodobnost výskytu skutečné hodnoty směrodatné odchylky v symetrickém intervalu byla 0,95. Riziko, že skutečná hodnota směrodatné odchylky je větší než horní mez konfidenčního intervalu, je proto téměř 5 %. Tato poněkud nestandardní volba konfidenčních intervalů je výhodná, neboť z praktického hlediska je rozhodující především horní mez konfidenčního intervalu. Uživatelé totiž nezajímá riziko, že skutečná hodnota směrodatné odchylky je příliš malá. Toto riziko je v případě 95 % hladiny významnosti téměř nulové. Stačilo by tedy uvádět vždy jen horní mez konfidenčního intervalu, avšak zápis pomocí symbolu \pm je přehlednější a jeho použití má již svou tradici. Proto bude tento symetrický typ konfidenčního intervalu používán i v dalším textu.

Hodnoty nejvěrohodnějších odhadů směrodatných odchylek jsou na obr. 5 a 6 znázorněny svislou červenou čarou.

4.2 Předběžný, přibližný odhad výstupní přesnosti

Standardní postup odhadu přesnosti souboru bodů vychází z představy, že souřadnicové rozdíly (příp. výškové rozdíly) vypočtené z obou daných seznamů souřadnic náleží k jedné a téže náhodné veličině s nulovou střední hodnotou. Přesnost této náhodné veličiny se pak obvykle určuje pomocí výběrové směrodatné odchylky (viz např. [8]). Označíme ji $s_{\epsilon,XY}$ příp. $s_{\epsilon,Z}$ a vypočteme podle vzorce

$$s_{\epsilon,XY} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_{dron,i} - x_{gd,i})^2 + (y_{dron,i} - y_{gd,i})^2}{2n}}, \quad (2)$$

$$\text{popř. } s_{\epsilon,Z} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (z_{dron,i} - z_{gd,i})^2}{n}},$$

kde:

$x_{dron,i}$ je polohová souřadnice i -tého bodu určená dronem,
 $y_{dron,i}$ je polohová souřadnice i -tého bodu určená dronem,
 $z_{dron,i}$ je výška i -tého bodu určená dronem,
 $x_{gd,i}$ je polohová souřadnice i -tého bodu určená geodeticky,
 $y_{gd,i}$ je polohová souřadnice i -tého bodu určená geodeticky,
 $z_{gd,i}$ je výška i -tého bodu určená geodeticky.

Tyto charakteristiky přesnosti pro 3 dané seznamy souřadnic kontrolních bodů uvádí tab. 1.

Tento standardní postup by bylo možné použít jen za předpokladu, že by vstupní přesnost kontrolních bodů byla řádově vyšší, než očekávaná přesnost určení dronem ($\sigma_{dron} > 10 \sigma_{gd}$). Tento předpoklad však není splněn, neboť hodnoty výběrových směrodatných odchylek $s_{\epsilon,XY}$, $s_{\epsilon,Z}$ převyšují vstupní směrodatné odchylky $\sigma_{XY,gd}$, $\sigma_{Z,gd}$ jen několikrát; v případě polohových souřadnic 2. etapy jen 3,3 krát. Pouze u výšek z 1. etapy je poměr očekávané směrodatné odchylky a vstupní směrodatné odchylky téměř 15, což by už mohlo opravňovat k zanedbání vstupní nepřesnosti. Tento poměr se však zmenší, pokud ho vztáhneme k směrodatné odchylce dronu σ_{dron} . Ta je totiž vždy menší než výběrová směrodatná odchylka s_{ϵ} . To je zřejmým důsledkem zákona hromadění směrodatných odchylek

$$\sigma_{dron}^2 \doteq s_{\epsilon}^2 - \sigma_{gd}^2 < s_{\epsilon}^2. \quad (3)$$

(Symbol σ_{dron} představuje některý ze symbolů $\sigma_{XY,dron}$, $\sigma_{Z,dron}$ stejně zjednodušení platí i pro symboly s_{ϵ} , σ_{gd} .)

Nepřesnost geodeticky určených souřadnic a výšek kontrolních bodů vyjádřená směrodatnými odchylkami $\sigma_{XY,gd} = 12$ mm, $\sigma_{Z,gd} = 17$ mm a jejich hustotami pravděpodobnosti vykreslenými na obr. 5, 6 tedy nelze zanedbat. Je proto nutné navrhnout jiný způsob odhadu směrodatných odchylek $\sigma_{XY,dron}$, $\sigma_{Z,dron}$, který by tuto nepřesnost respektoval. Takovýto odhad lze učinit pomocí bayesovského přístupu za použití Jeffreysovy apriorní hustoty pravděpodobnosti (viz např. [9], [10]). Aposteriorní hustota pravděpodobnosti pak vyjde ve tvaru

$$f(\sigma) = \frac{2^{1-\frac{m}{2}} \sigma (m s_{\epsilon}^2)^{\frac{m}{2}} (\sigma^2 + \tau^2)^{-\frac{m}{2}-1} e^{-\frac{(m s_{\epsilon}^2)}{(\sigma^2 + \tau^2)}}}{\Gamma\left(\frac{m}{2}\right) - \Gamma\left(\frac{m}{2}, \frac{(m s_{\epsilon}^2)}{2\tau^2}\right)}. \quad (4)$$

Funkce Γ se dvěma argumenty, která se vyskytuje ve jmenovateli vzorce (4), je tzv. neúplná gama funkce (viz např. [11]).

Tab. 1 Přibližný odhad výstupní přesnosti

seznam souřadnic	počet bodů		$s_{\epsilon,XY}$ [mm]	$s_{\epsilon,Z}$ [mm]
	polohových	výškových		
1. etapa jednosměrně	108	65	62	251
1. etapa obousměrně	111	66	57	137
2. etapa jednosměrně	77	55	40	128

Vzorec (4) lze použít jak pro odhad souřadnicové směrodatné odchylky $\sigma_{XY,dron}$, tak pro odhad směrodatné odchylky výšek $\sigma_{Z,dron}$. Je však třeba do něj dosadit jiné hodnoty σ , τ , m , s_ϵ .

Pro $\sigma = \sigma_{Z,dron}$ je třeba do vzorce (4) dosadit:
 τ je zadaná směrodatná odchylka výšek, $\tau = \sigma_{Z,gd'}$
 m je počet bodů, na kterých byly určeny obě výšky,
 s_ϵ je výběrová směrodatná odchylka výšek, $s_\epsilon = s_{\epsilon,Z}$.

Pro $\sigma = \sigma_{xy,dron}$ je třeba do vzorce (4) dosadit:
 τ je zadaná souřadnicová směrodatná odchylka, $\tau = \sigma_{xy,gd'}$
 m je dvojnásobek počtu bodů, na kterých byly určeny souřadnicové rozdíly,
 s_ϵ je výběrová souřadnicová směrodatná odchylka, $s_\epsilon = s_{\epsilon,xy}$.

Tvar hustoty pravděpodobnosti f vypočtený podle vzorce (4) pro různé datové soubory je zobrazen na **obr. 7, 8**.

Nejvěrohodnějším odhadem parametru σ je modus hustoty pravděpodobnosti (4). Ten se vypočte jako argument maxima funkce f , což vede na vzorec

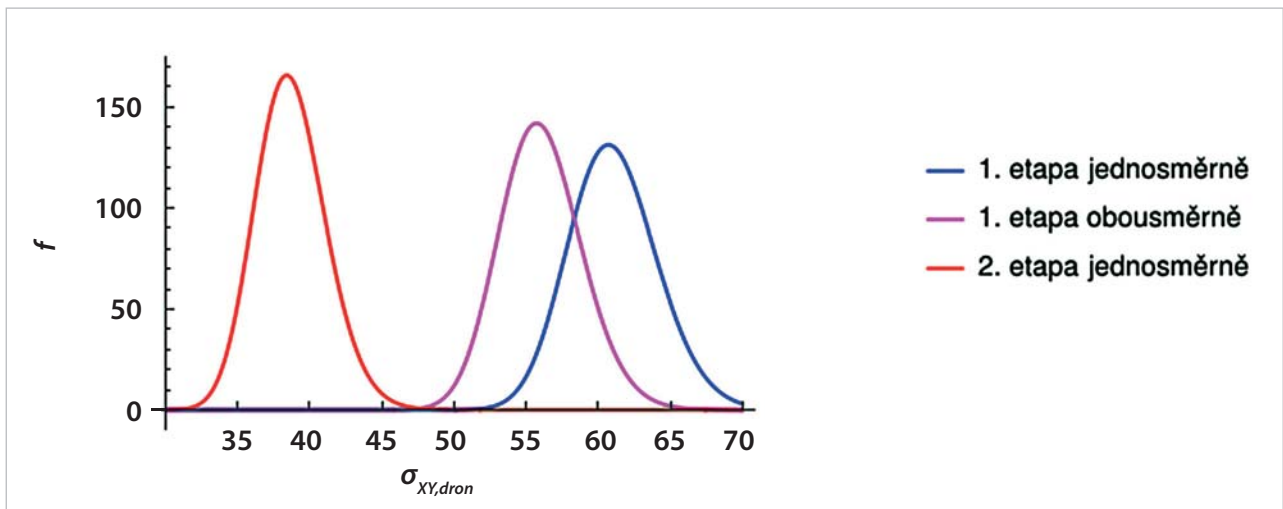
$$\hat{\sigma} = \sqrt{\frac{\theta + \sqrt{\theta^2 + 4(m+1)\tau^4}}{2(m+1)}}, \quad (5)$$

kde $\theta = m(s_\epsilon^2 - \tau^2)$.

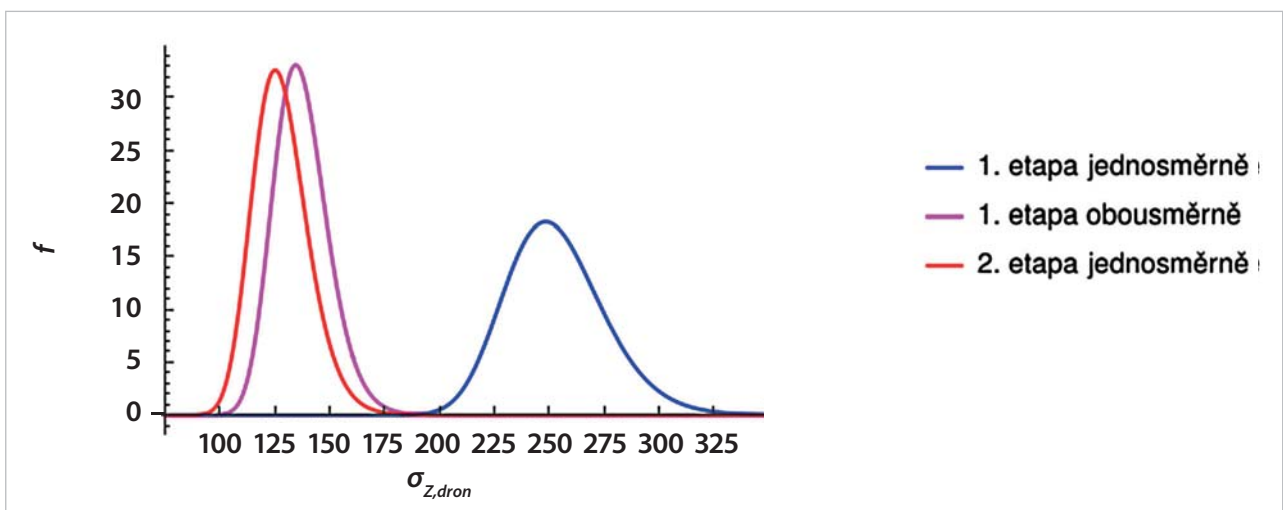
4.3 Odhad přesnosti polohových souřadnic a výšek

Nejvěrohodnější odhady směrodatných odchylek $\sigma_{xy,dron}$, $\sigma_{Z,dron}$ vypočtené podle vzorce (5) jsou v **tab. 2** pro všechny 3 seznamy souřadnic.

Spolu s hodnotami směrodatných odchylek jsou v tabulce uvedeny i intervaly spolehlivosti. Správná hodnota směrodatné odchylky leží v příslušném intervalu s pravděpodobností 0,95. Mezní hodnoty intervalů spolehlivosti byly vypočteny pomocí integrálu hustoty pravděpodobnosti (4). Grafy těchto hustot pravděpodobnosti, které odpovídají šesti směrodatným odchylkám uvedeným v **tab. 2**, ukazují **obr. 7, 8**. Číselné hodnoty na vodorovných osách grafů v těchto obrázcích jsou v mm.



Obr. 7 Hustoty pravděpodobnosti směrodatné odchylky polohových souřadnic $\sigma_{XY,dron}$ pro různé soubory souřadnic



Obr. 8 Hustoty pravděpodobnosti směrodatné odchylky výšek $\sigma_{Z,dron}$ pro různé soubory souřadnic

Tab. 2 Odhad přesnosti souřadnic bodů 3D modelu lokality nasnímané dronem

seznam souřadnic	počet bodů		$\sigma_{XY,dron}$ [mm]	$\sigma_{Z,dron}$ [mm]
	polohových	výškových		
1. etapa jednosměrně	108	66	61 ± 6.1	249 ± 45.3
1. etapa obousměrně	111	65	56 ± 5.6	135 ± 24.9
2. etapa jednosměrně	77	55	38 ± 4.8	125 ± 25.8

5. Shrnutí analýzy polohové a výškové přesnosti měření prostředky UAS

V předložené analýze přesnosti je navržena metoda odhadu směrodatné odchylky souřadnic bodů zaměřených kamerou z dronu. Tento odhad byl proveden na základě seznamu souřadnic kontrolních bodů obsahujícího souřadnice bodů určených jednak dronem a jednak nezávisle geodeticky aparaturou GNSS či polárním měřením. Navržená metoda zohledňuje nepřesnost polohy geodeticky zaměřených kontrolních bodů.

Výsledky analýzy jsou přehledně uvedeny v tab. 2. Nejistota výsledných směrodatných odchylek je v této tabulce kvantifikována intervaly spolehlivosti na hladině významnosti 0,95. Grafické znázornění této nejistoty podávají hustoty pravděpodobnosti na obr. 7, 8.

Nejllepšího výsledku bylo dosaženo v listopadové etapě. Při ní byla polohová směrodatná odchylka (38 ± 5) mm a směrodatná odchylka výšek (125 ± 26) mm. Nejméně přesně bylo záměrně území nasnímano při jednosměrném nalétávání v červnové etapě. Tehdy bylo dosaženo přesnosti (61 ± 6) mm v poloze a (249 ± 45) mm ve výšce. Všechny tyto údaje platí za předpokladu, že geodetické zaměření kontrolních bodů má přesnost (12 ± 6) mm v poloze a (17 ± 6) mm ve výšce.

Polohová a výšková přesnost určená z vyhodnocení údajů na lokalitě ukazuje:

- Opakované druhé měření UAS v příčném směru zvýší polohovou a výškovou přesnost pro potřeby mapování nevýznamně. Pro praktické potřeby mapování se tedy neuplatní.
- Směrodatné odchylky kontrolních bodů $\sigma_{XY,dron}$, $\sigma_{Z,dron}$ uvedené v tab. 2 se liší od předběžných hodnot výběrových směrodatných odchylek $s_{\epsilon,XY}$, $s_{\epsilon,Z}$ uvedených v tab. 1 jen o několik málo mm. Pro praktické použití je tedy možno místo vzorce (5) použít standardní výpočet výběrových směrodatných odchylek podle vzorců (2). Tyto výsledky dokazují, že požadovaná polohová a výšková přesnost mapování (například pro pozemkové úpravy) může být dodržena a průkazně zkontrolována na základě předběžných odhadů přesnosti podle vzorců (2). Jejich použití pro jiné účely nebo při horší přesnosti geodetického určení souřadnic kontrolních bodů než 2 cm je již diskutabilní. V takovém případě je třeba vzít v úvahu aktuální hodnoty směrodatných odchylek geodetického určení souřadnic a výšek a k odhadu směrodatných odchylek bodů zaměřených dronem použít vztahy (4), (5).

6. Polohová přesnost mapování pro pozemkové úpravy podle katastrální vyhlášky

Podle platné katastrální vyhlášky se posuzuje dosažená přesnost souřadnic nově určovaného podrobného bodu polohopisu při mapování pro pozemkové úpravy postupem, kdy se přesnost považuje za vyhovující, když:

a) výběrová střední souřadnicová odchylka vypočtená metodou nejmenších čtverců, nebo

b) výběrová směrodatná souřadnicová odchylka vypočtená z dvojice měření je menší než mezní souřadnicová odchylka, která byla vypočtená tak, že se mezní souřadnicová odchylka u_{xy} stanoví jako dvojnásobek základní směrodatné souřadnicové odchylky m_{xy} .

V případě souboru obsahujícího více než 20 nově určených podrobných bodů polohopisu musí být současně nejméně 40 % výběrových směrodatných souřadnicových odchylek menších, než je hodnota základní směrodatné souřadnicové odchylky m_{xy} [5] [7].

Při testování pomocí kontrolních bodů zaměřených vyšší přesností s jejich souřadnicemi vyhodnocenými z mapování UAS, bylo v tomto případě postupováno tak, jako kdyby souřadnice kontrolních bodů zaměřených prokazatelně s vyšší přesností byly bezchybné. Souřadnicový rozdíl odpovídajících si kontrolních bodů nemá charakter rozdílu mezi dvojím měřením, ale jde o určení skutečné souřadnicové odchylky.

Při posouzení dosažené přesnosti určení souřadnic nově určovaného kontrolního bodu z mračna bodů a určení souřadnic a výšek kontrolního bodu z ortofota, bylo postupováno jako při porovnání nezávislého určení souřadnic kontrolního bodu polohopisu a výškopisu s jejich souřadnicemi z geodetického měření [1].

Pro připomenutí příslušných ustanovení katastrální vyhlášky [7] uvádíme, že skutečná souřadnicová odchylka nesmí překročit hodnotu mezní souřadnicové odchylky u_{xy} vypočtené jako dvojnásobek základní směrodatné souřadnicové odchylky m_{xy} , přičemž základní směrodatná souřadnicová odchylka se stanoví podle kódu kvality podrobných bodů. Kód kvality podrobných bodů určených geodetickými metodami je stanoven podle hodnoty výběrové střední souřadnicové odchylky v závislosti na základní směrodatné souřadnicové odchylce m_{xy} takto:

Kód kvality	Základní střední souřadnicová odchylka [m]
3	0,14 m
4	0,26 m
5	0,50 m

Testovaná hodnota s_{xy} je tedy jejich kvadratický průměr. Je tedy 2,5 krát větší, než hodnota vypočtená podle výše uvedeného vztahu. Pro celý zpracovávaný soubor jsou vypočteny střední odchylky souřadnic

$$s_x = \sqrt{\sum(dx^2/N)}, \quad (6)$$

$$s_y = \sqrt{\sum(dy^2/N)}, \quad (7)$$

kde N je počet testovaných bodů.

V závěrečné statistice je mimo jiné potřeba uvést, kolik procent bodů mělo hodnotu s_{xy} menší, než je požadovaná hodnota m_{xy} (má být alespoň 40 %), u kolika procent bodů byla hodnota s_{xy} v intervalu $(m_{xy}, 2m_{xy})$ a u kolika procent bodů byla hodnota $2m_{xy}$ překročena. Požadovaná směrodatná odchylka je stanovena pro každý bod podle jeho kódu kvality 3 [7].

Polohová přesnost ortofota v lokalitě Obrataň byla určena ve druhém pokusném testování na základě pouze osmi kontrolních bodů (pro praxi příznivější postup), s cílem doložit a prokázat polohovou přesnost a homogenitu digitálního souboru (polohopisu a výškopisu) ortofota používanějším způsobem.

K tomuto účelu je potřeba před začátkem leteckých prací v terénu navrhnout kontrolní body rovnoměrně rozmístěné po lokalitě mezi body vstupní a s hustotou rozmístění obdobnou jako body vstupní. Kontrolní body se v terénu signalizují bílými značkami o velikosti 9 x 9 až 10 x 10 cm. Zaměřují se geodeticky s přesností $\pm 0,025$ m. Prokázání přesnosti ortofota se provede na základě nezávislého určení souřadnic kontrolních bodů polohopisu a výškopisu a porovnáním s hodnotami zaměřenými prostřednictvím UAS na ortofotu a s využitím mračna bodů vygenerovaného z 3D modelu.

Za testovaný soubor bodů se určí seznam souřadnic a výšek kontrolních bodů určených z ortofota a mračna bodů a jako referenční soubor je seznam souřadnic identických kontrolních bodů určených geodetickou metodou s vyšší přesností (obr. 9).

Po jednotném očíslování dvojic bodů se oba soubory uloží do databáze. Výpočet začíná statistickým porovnáním dvou seznamů souřadnic. Nejprve byly vypočteny souřadnicové rozdíly

$$dx = x_k - x_m, dy = y_k - y_m, \quad (8)$$

kde x_m, y_m jsou souřadnice z testovaného souboru a x_k, y_k jsou souřadnice z referenčního souboru.

Z těchto rozdílů je vypočtena polohová odchylka

$$dPol = \sqrt{(dx^2 + dy^2)}, \quad (9)$$

a směrník polohové odchylky.

Obdobně jsou porovnány i výšky bodů s tím, že lze porovnávat i seznamy, v nichž mají body pouze výšky a polohu nemají definovanu.

Dále se vypočte empirická směrodatná souřadnicová odchylka z dvojice měření dle vztahu

$$s_{xy} = \sqrt{(dx^2 + dy^2)}, \quad (10)$$

4001	715181.42	1121493.24	584.40	715181.41	1121493.19	584.29	-0.01	-0.05	-0.11	0.034	0.006	0.024	0.049	211.7996
4002	714955.84	1121510.63	579.72	714955.79	1121510.68	579.75	-0.05	0.05	0.03	0.035	0.033	0.034	0.068	351.3261
4003	715317.97	1121569.25	587.04	715317.93	1121569.25	587.16	-0.04	-0.01	0.12	0.004	0.026	0.019	0.037	291.4488
4004	715117.04	1121723.50	584.74	715116.95	1121723.48	584.69	-0.09	-0.02	-0.05	0.011	0.062	0.044	0.088	288.4214
4005	714943.24	1121979.15	588.78	714943.24	1121979.09	588.72	-0.00	-0.06	-0.07	0.043	0.003	0.031	0.061	204.1686
4006	714978.75	1122225.65	597.48	714978.76	1122225.63	597.35	0.01	-0.02	-0.13	0.015	0.008	0.012	0.024	166.9501
4007	715181.10	1122110.77	604.46	715181.06	1122110.70	604.58	-0.04	-0.07	0.12	0.047	0.029	0.039	0.078	235.3878
4008	715397.61	1122038.35	611.68	715397.56	1122038.26	611.68	-0.05	-0.09	0.00	0.066	0.033	0.052	0.104	229.7899

Obr. 9 Protokol o porovnání souřadnic kontrolních bodů z geodetického měření a měření dronem systémem GROMA

STATISTIKA:	

Typ testování	: Pro kód kvality 3
Počet bodů (n)	: 8
Požadovaná střední souřadnicová chyba (mxy)	: 0.140m
Mezní střední souřadnicová chyba (uxy=2.0*mxy)	: 0.280m
Koeficient konfidence	: 2.0
Počet bodů s sxy v intervalu <0, mxy)	: 8 (100.0%)
Počet bodů s sxy v intervalu <mxy, 2.0*mxy)	: 0 (0.0%) (označeny ???)
Počet bodů s sxy v intervalu <2.0*mxy, +Nek.)	: 0 (0.0%) (označeny xxx)
Maximální výběrová střední souřadnicová chyba (sxy):	0.052m
Výběrová střední souřadnicová chyba X (sx)	: 0.037m
Výběrová střední souřadnicová chyba Y (sy)	: 0.031m
Výběrová střední souřadnicová chyba (sxy)	: 0.034m
Koeficient použitý pro výpočet výběrových chyb (k)	: 2.0
Počet nenalezených bodů	: 0
Počet bodů nalezených vícekrát	: 0

Obr. 10 Statistika výsledných hodnot z testování dvojic souřadnic kontrolních bodů systémem GROMA (charakteristiky přesnosti jsou uvedeny v souladu s označením v katastrální vyhlášce)

7. Závěr

Výsledná statistika prokázala, že dovolená směrodatná souřadnicová odchylka 0,14 m nebyla překročena, ani dosažena a hodnoty polohové přesnosti kontrolované na 8 vybraných a rovnoměrně rozmístěných bodech mají výběrovou směrodatnou souřadnicovou odchylku 0,034 m (obr. 10). Tato metoda je navržena do metodiky pro kontrolu polohové přesnosti vzhledem k tomu, že bylo dosaženo v podstatě stejných výsledků, jako při podrobné analýze přesnosti v prvním případě, kdy byla zohledněna i polohová a výšková nepřesnost geodetické metody při určení kontrolních bodů.

Mapovací činnosti prováděné v rámci pozemkových úprav patří k činnostem prováděným ve veřejném zájmu. Z tohoto hlediska je nezbytné, aby byly při použití metody UAS splněny požadavky právních a technických předpisů, které tyto zeměměřické činnosti určitým způsobem regulují a byl aplikován i systém řízení kvality geodetických prací [6]. Jde zejména o splnění požadavků zákona o zeměměřictví a jeho prováděcí vyhlášky a zákona o metrologii.

LITERATURA:

- [1] REKTORYS a kol.: Přehled užití matematiky, SNTL, 1968, 1140 s., č. L11-EI-II-84/1566/III.

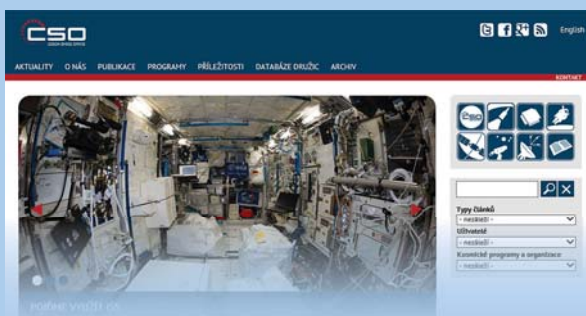
- [2] VYKUTIL, J.: Vyrovnávací počet, VUT Brno, 1973, 299 s., č. 55-574-73.
 [3] KARAS, J.-TICHÝ, T.: Drony. Computer Press, Brno, 2016, 264 s., ISBN 978 80 251-4690-4
 [4] CHARVÁT, K.-KOCÁB, M.-KONEČNÝ, M.-KUBÍČEK, P.: Geografická data v informační společnosti. Zdičky: VÚGTK, v. v. i., 2007. 268 s., ISBN 978-80-85881-28-8.
 [5] Zákon č. 256/2013 Sb., o katastru nemovitostí (katastrální zákon) v aktuálním znění.
 [6] Vyhláška č. 13/2014 Sb., o postupu při provádění pozemkových úprav a náležitostech návrhu pozemkových úprav, ve znění pozdějších předpisů.
 [7] Vyhláška č. 357/2013 Sb., ČÚZK, ze dne 1. 11. 2013 o katastru nemovitostí (katastrální vyhláška) ve znění vyhlášky č. 87/2017 Sb.
 [8] ANDĚL, J.: Matematická statistika. Praha, SNTL, 1978.
 [9] KOCH, K.-R.: Bayesian Inference with Geodetic Applications, Springer-Verlag, 1990.
 [10] Jeffreysovy apriorní hustoty pravděpodobnosti. [online]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Jeffreys_prior#One-parameter_case.
 [11] Neúplná gama funkce. [online]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Incomplete_gamma_function.

Do redakce došlo: 14. 8. 2018

Lektoroval:
doc. Ing. Josef Weigel, CSc.,
Fakulta stavební,
Vysoké učení technické v Brně

Centrum studentských aktivit České kosmické kanceláře

a vzdělávací spolek KOSMOS-NEWS uspořádali v roce 2018 pro studenty, mladé vědce a ostatní mladé zájemce o kosmonautiku 184 přednášek, s celkovou účastí 7 913 posluchačů (průměr 43 posluchačů na jednu přednášku, většinou žáků a studentů). Přehled všech aktuálně zařazených a probíhajících programů a nabízených přednášek najdete na adrese <http://www.halousek.eu>. Nabízejí vzdělávací a popularizační přednášky o kosmonautice pro školy a další vzdělávací instituce.



22. 5. 2019, Vesmírný Tábor 2019 – Tomáš Petrásek: Najdeme mimozemšťany?
 19. 6. 2019, Vesmírný Tábor 2019 – Milan Halousek: Apollo 11 – první kroky pozemšťanů po Měsíci
 20. 7. 2019, Planetárium Hradec Králové – Den přistání prvních lidí na Měsíci
 26. 7. 2019, Pátečníci 2019 – Sisyfos Praha - Neil Armstrong
 11. 9. 2019, Vesmírný Tábor 2019 – Martin Jelínek: Gama záblesky, robotické dalekohledy a astronomie, ve kterých rozhodují vteřiny
 4. 10. 2019, Hvězdárna Jičín – Mart'an
 9. 10. 2019, Vesmírný Tábor 2019 – Dušan Majer: Pět událostí SpaceX roku 2019
 13. 11. 2019, Vesmírný Tábor 2019 – Jana Kviderová: Je kosmonautům někdy špatně?
 11. 12. 2019, Vesmírný Tábor 2019 – Petr Brož: Co můžeme vyčíst z povrchu Marsu o jeho minulosti?

Česká kosmická kancelář, o.p.s., Sokolovská 32/22, Praha 8 - Karlín
(100 m od stanice metra Florenc)

<http://www.czechspace.cz>