

PERSPEKTÍVY PRIAMEHO LETECKÉHO DIGITÁLNEHO SNÍMANIA A ANALÓGOVÉHO LETECKÉHO SNÍMKOVANIA.

Jozef ČERŇANSKÝ

Prírodovedecká fakulta UK, Bratislava

Abstrakt

V príspevku sa analyzujú možnosti, problémy a perspektívy priameho snímania z paluby lietadla alebo satelitného nosiča pomocou trojriadkových digitálnych kamier s veľkým rozlíšením v porovnaní s analógovými leteckými fotokamerami.

1. Úvod

Konštrukcia digitálnych kamier s veľkým počtom obrazových elementov na jednom riadku a konštrukcia trojriadkových digitálnych kamier umiestnených na družiciach - satelitoch alebo lietadlových nosičoch vytvorila predpoklad pre novú etapu mapovania a ďalšieho využitia takto získaných údajov v GIS-och. Z takto nasnímaných digitálnych obrazov možno ďalej priamo spracovať ortorektifikované - rastrové mapy s vysokou absolútnou presnosťou.

Z hľadiska tvorby GIS-ov digitálne obrazy poskytujú okrem bežného obsahu leteckej snímky najmä širšie spektrálne rozlíšenie, teda informácie, ktoré analógové snímky bežne neposkytujú. Digitálne obrazy ako nový zdroj informácií umožnia vytvárať atraktívnejšie mapové výstupy napr. vo forme tematických máp rôzneho druhu a určenia.

Na otázku aký bude ďalší trend vývoja dá odpoveď čas. Avšak už dnes je jasné, že digitálna technológia snímania obrazu Zeme vylúči z procesu snímania fotografiu - snímku, čím odpadne jej fotografické laboratórne spracovanie (vyvolávanie, ustaľovanie, pranie) a digitalizácia na precíznych snímkových skeneroch. Na druhej strane digitálna technológia kladie vysoké nároky na proces snímania obrazu a najmä na proces ukladania veľkého počtu údajov (rádovo niekoľko 100 GB) v reálnom čase. V súčasnej dobe sú analógové snímky ešte široko využívané i napriek pomerne zložitej a drahej chemickej technológii fotografického spracovania najmä farebnej fotografie.

Čas ukáže, kedy sa digitálne technológie snímania obrazu zemského povrchu presadia aj na trhu informačných technológií - pri aktualizácii a obnove topografických máp.

2. Letecké analógové fotogrametrické kamery

Zatiaľ čo výsledné produkty leteckého analógového a digitálneho získavania obrazov zemskeho povrchu môžu vyzerat' prakticky rovnako, metódy jeho získavania sú veľmi rozdielne. Väčšina leteckých snímok je vyhotovená pomocou fotogrametrických kamier na filmovej podložke s rozlíšením cca 8 μm . V súčasnej dobe sa využívajú najmä širokouhlé fotokamery, snímkový formát 230 x 230 mm, s konštantou fotokamery $f = 150 \text{ mm}$ a zorným uhlom okolo 90°. Snímky sa vyhotovujú s približne vertikálnou osou záberu, avšak existujú aj gyroskopické systémy, ktoré umožňujú vyhotoviť zvislé snímky s presnosťou niekoľko desiatok uhlových sekúnd.

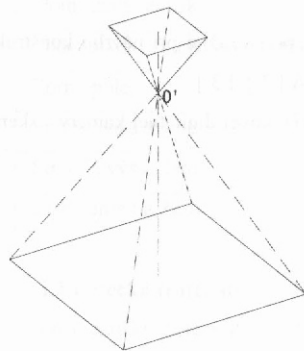
Pre rovinné územia možno potom jednoducho na podklade kontrolných - vlicovacích bodov určiť mierku snímky, alebo pomocou jednoduchého softvérového vybavenia možno snímkové údaje transformovať do mapovej mierky. Ak uvažujeme napr. mapovanie v mierke 1:10 000 pre hodnoty pixela 15 μm , pre uvedené parametre leteckej fotokamery a pre výšku letu cca 1 500 m, bude rozlíšenie na Zemi v hodnote 0,15 m.

Pre nerovinné územia a pre získanie výškovej zložky terénu (DTM) je potrebné využiť stereoskopické snímkovanie, ktoré dosiahneme tak, že už v projekte snímokovaného letu uvažujeme spravidla 60% pozdĺžny a na spájanie jednotlivých pásov 30% priečny prekryt.

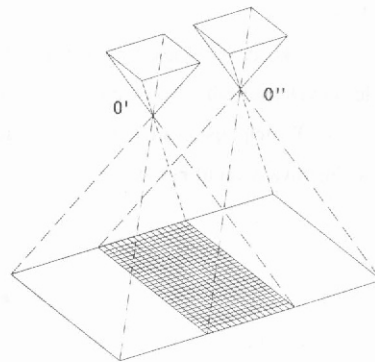
Takto v priebehu jedného dňa za priaznivých atmosférických podmienok možno naexponovať stovky snímok. Fotograficky spracované filmové negatívy alebo diapozitívy potom digitalizujeme na skeneroch s vysokým rozlíšením. Ak uvažujeme, že skener zaznamená 8 bit = 1 byte radiometrických údajov pre každý pixel, čo predstavuje $2^8 = 256$ úrovni šedi pre panchromatickú snímku, potom takto skenovaná letecká snímka vyžaduje cca 230 MB pamäte na pamäťovom médiu [1].

Geometria jednotlivých leteckých snímok je znázornená na **obr. 1**.

Stereoskopický prekryt snímkovej dvojice leteckých snímok je zrejmy z **obr. 2**.



Obr. 1



Obr.2

3. Digitálne lietadlové trojriadkové kamery - lietadlové trojriadkové skenery

Digitálna fotogrametria predstavuje posledný vývojový stupeň fotogrametrie. Vývoj výpočtovej techniky, digitálne techniky spracovania obrazu vyústili do digitálnej ortoprojekcie a do využitia digitálnej snímkovej korelácie ako náhrady operátora stereoskopického vyhodnotenia snímok.

Získavanie obrazových údajov sa uskutočňuje v súčasnej dobe prevažne pomocou analógových filmových kamier. Získavanie digitálnych údajov pomocou plošných digitálnych CCD kamier s porovnateľným rozlíšením nie je v súčasnej dobe reálne a pravdepodobne nebude reálne ani v blízkej budúcnosti.

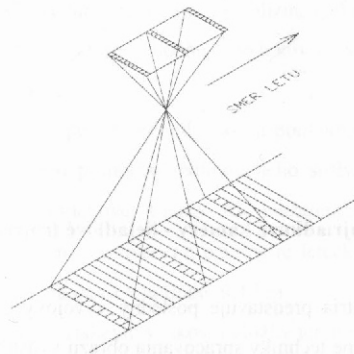
Zaujímavú alternatívu tak pre satelitnú ako aj leteckú fotogrametriu predstavujú digitálne riadkové kamery. Digitálne riadkové kamery poskytujú výhodu získavania digitálneho obrazu priamo na palube lietadla alebo satelitného nosiča. Avšak technika takto vytvoreného obrazu vyžaduje zvláštny prístup, nakoľko riadkový snímač – digitálna kamera je počas snímania jednotlivých riadkov v neustálom pohybe. Koncepcia jednoriadkového snímania bola úspešne overená na satelitoch Landsat TM, ale najmä SPOT, ktorý je schopná pracovať aj v tzv. stereomóde, keď sníma dve susedné stopy ako stereoobraz, avšak so značným časovým posunom.

Trojriadkové snímače sa uplatnili v niektorých kozmických projektoch, ako napr. trojriadkový skener MOMS-02/D2 bol inštalovaný v r. 1993 na druhom nemeckom „space labe“, trojriadkové skenery HRSC a WAOSS boli využité pri mapovaní Marsu v r. 1994,

trojriadkový skener MOMS-02 Priroda bol inštalovaný na ruskej orbitálnej stanici MIR od r. 1996.

Skúsenosti s uvedenými trojriadkovými skenermi boli využité pri návrhu konštrukcie leteckých trojriadkových kamier- skenerov MEOSS a DPA [2], [3].

Princíp získavania obrazových dát s využitím trojriadkovej digitálnej kamery - skeneru je ilustrovaný na **obr.3**.



Obr.3 Snímanie trojriadkovou digitálnou kamerou

Geometria trojriadkového snímania je charakterizovaná :

- paralelnou-rovnobežnou projekciou - v smere letu a
- centrálnou projekciou - v smere **kolmom** na smer letu.

Parametre vonkajšej orientácie každého riadku sú určované pomocou fotogrametrického zväzkového vyrovnania založeného na rozšírenej podmienke kolineárnosti. Tieto parametre sú určované len v istých časových intervaloch pre tzv. orientačné obrazy. Medzi týmito intervalmi je modelovaná časová závislosť parametrov dráhy pomocou vhodnej funkcie. Porovnávacie štúdie ukázali, že pôsobenie paralelnej projekcie treba kompenzovať pomocou navigačných dát, ktoré majú byť uvažované ako pridané parametre pre prvky vonkajšej orientácie do zväzkového vyrovnania [2].

Parametre trojriadkovej digitálnej kamery MEOSS a parametre letu Tab. 1.

Nominálna ohnisková vzdialenosť	61.1 mm
Počet pixelov na jednom riadku	3236
Zorné pole	32°
Snímková mierka	1 : 180 000
Stredná výška letu	11 335 m
Rozlíšenie na Zemi	2,0 x 2,0 m

3.1 Letecká trojriadková digitálna kamera MEOSS

Po niekoľkých testových letoch na palube lietadla, obiehal MEOSS okolo Zeme na indickom satelite, ktorý bol zničený pri kozmickej nehode v r. 1993. Lietadlový trojriadkový skener MEOSS-Monocular Electro Optical Stereo Scanner bol využitý pri snímkovaní v okolí Mnichova v lete 1989 [2]. Parametre uvedeného systému sú usporiadané v **Tab. 1**.

Digitálne spracovanie digitálnych obrazov získaných systémom MEOSS obsahovalo tieto časti:

- stereoskopické priradovanie bodov - image matching,
- fotogrametrické určovanie bodov,
- generovanie digitálneho terénneho modelu (DTM).

Vstupnými údajmi pre fotogrametrické určovanie bodov a DTM boli digitálne obrazové údaje z jednej stopy letu a dvoch priečných stôp systému MEOSS spolu s navigačnými údajmi o polohe lietadla a sklonoch kamery získané z navigačného systému lietadla. Údaje o polohe lietadla boli k dispozícii pre každý 40. skenovací riadok, údaje o sklonoch pre každý 4. riadok obrazu s rozlíšením cca 10''.

Pre porovnanie dosiahnutých výsledkov boli k dispozícii aj letecké snímky z r. 1988, mierka snímky 1:15 000, $f = 153$ mm s pozdĺžnym prekrytom približne 70%.

Stereoskopické priradovanie bodov (image matching) sa uskutočnilo metódou najmenších štvorcov, čo pri primeranej textúre obrazu poskytuje veľmi dobré výsledky. Využitím jedného tzv. štartovacích bodu alebo viacej štartovacích bodov sa vytvorili dve matice okolia a vypočítal sa korelačný koeficient. Potom nasledovali posuny o hodnotu kroku smerom doprava, doľava, smerom hore a dole, pričom sa priebežne počítal korelačný koeficient a sledovala sa jeho hodnota. Ak hodnota korelačného koeficientu klesla pod určitý prah, výsledky vstupovali do zoznamu. Týmto spôsobom sa spracoval celý priestor prekrytu, čím sa vytvorila pravidelná priestorová mriežka. Pre všetky kroky priradovania bodov bola

použitá šablóna 15 x 15 pixel pre krok bola použitá hodnota 9 pixelov a pre prah korelačného koeficientu bola vybraná hodnota 0,7.

Takto bolo vypočítaných 500 000 dvojíc zodpovedajúcich si bodov, čo predstavovalo 2 mil. obrazových súradníc určených v piatich behoch priradenia. Z tohoto veľkého množstva bodov bolo vybratých 123 316 obrazových súradníc dobre geometricky rozložených, ktoré potom vstupovali do zväzkového vyrovnania podľa kritéria maxima korelačného koeficientu.

Výsledky takto získaných priestorových súradníc bodov boli porovnávané s výsledkami analógového leteckého snímkovania.

Empirická štandardná odchýlka dosiahla podľa [2] nasledovných hodnôt:

- okolo 1 m (0,5 pixel) v smeroch X a Y
- 2 m (1 pixel) v smere osi Z, t.j. v smere výšok.

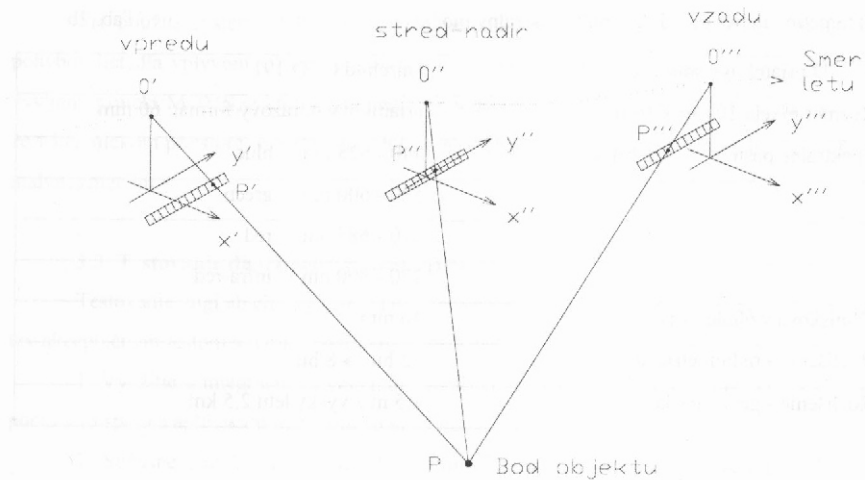
Uvedené výsledky ukázali schopnosť a aplikovateľnosť leteckého trojriadkového snímania obrazu systémom MEOSS aj pre fotogrametrické využitie.

3.2 Letecká trojriadková digitálna kamera DPA

Digitálny stereo a multispektrálny obrazový systém DPA (Digital Photogrammetry Assembly) bol vyvinutý pre fotogrametrické a tematické mapovanie. Špecifická vlastnosť systému DPA je súčasne získavanie stereo obrazov s vysokým rozlíšením tak v panchromatickom pásme (0,2 m/pixel) ako aj získavanie multispektrálnych údajov s presnosťou (0,4m/pixel) [3].

Účelom systému DPA bolo získavanie digitálnych údajov pre topografické mapovanie a automatické generovanie DTM s presnosťou menej ako 3 m a pre generovanie digitálnych ortoobrazov pre mierku 1 : 50 000 a väčšie mierky. Doplnkom mapovacej funkcie bolo multispektrálne snímanie v pásmach viditeľného svetla a blízkeho infračerveného žiarenia.

Mechanizmus, ktorým systém DPA získava stereoobrazy pre výber údajov na rekonštrukciu 3D-objektu je 3-riadková CCD kamera (**obr. 4**). Odrazené svetlo od reálneho bodu na Zemi je súčasne zaznamenané pomocou troch nezávislých lúčov v troch bodoch - subpixeloch systému DPA, ktoré sa nachádzajú na priamkových kanáloch - vzadu, v strede - nadire a vpredu. Vlastnosti systému DPA sú zhrnuté v **tab. 2a, 2b**.



Obr.4 Geometria zobrazenia systémom DPA

Parametre systému DPA - stereo modul

Tab. 2a

6 CCD priamkové snímače (2 na riadok)	Fairchild CCD 191
Rozmer pixela 10 μ m x 10 μ m	priamkový obrazový formát: 120 mm
NADIR-ový kanál	12 000 pixel
PREDNÝ kanál	12 000 pixel
ZADNÝ kanál	12 000 pixel
Konvergenčný uhol	25°
Ohnisková vzdialenosť	80 mm
Rozlíšenie – rádiometrické	12 bit \rightarrow 8 bit
Rozlíšenie – geometrické	0,25m z výšky letu 2,5 km

Na záznam obrazových údajov slúžil záznamník digitálnej pásky AMPEX, ktorý pracoval v dvoch módoch. Mód A dovoľoval záznam stereo-údajov, mód B záznam

multispektrálnych údajov. Geometrické podmienky pre vyhodnotenie stereo-údajov boli podobné ako pri skeneroch SPOT a MOMS.

Parametre systému DPA - multispektrálny modul

Tab. 2b

4 CCD priamkové snímače	Fairchild CCD 191
Rozmer pixela 10 μm x 10 μm	priamkový obrazový formát: 60 mm
Spektrálne pásma - počet 4	440 - 525 nm blue
	520 - 600 nm green
	610 - 685 nm red
	770 - 890 nm infra-red
Ohnisková vzdialenosť	40 mm
Rozlíšenie - rádiometrické	12 bit \rightarrow 8 bit
Rozlíšenie - geometrické	0,5 m z výšky letu 2,5 km

Parametre vnútornej orientácie - posun dvoch konvergentných stereo-kanálov, offšet multispektrálnych priamkových polí, ohnisková vzdialenosť objektívu, skreslenie objektívu boli kalibrované v laboratóriách DASA Mníchov - Nemecko.

Rekonštrukcia parametrov vonkajšej orientácie pre záznam DPA obrazovej jednotky bola zabezpečená jednotkou navigačného systému SAGEM, ktorá bola pripojená priamo k telesu kamery a zaznamenávala lineárne zrýchlenie a uhlovú rýchlosť systému DPA s čítacou frekvenciou CCD riadkového poľa.

Vnútna orientácia systému DPA je prakticky stabilná - pevná, preto možno pre všetky 3 riadky napísať rovnice kolíneárnosti. Vonkajšia orientácia sa mení od jedného trojriadkového obrazu k inému trojriadkovému obrazu.

Pre lepšie pochopenie vysvetlíme termín **trojriadkový obraz**. Je to obraz, ktorý vznikne stereoskopickým prepojením troch riadkov snímaných systémom DPA, pričom :

- prvý riadok predstavuje ---- predný riadok obrazu
- druhý riadok predstavuje ---- nadírový - stredný riadok obrazu
- tretí riadok predstavuje ---- zadný riadok obrazu.

Tieto tri riadky systému DPA spolu vytvárajú **riadkový stereoobraz** (obr. 4).

Za tohoto predpokladu možno využiť štandardné procedúry analytickej aerotriangulácie. Modifikované procedúry zväzkového vyrovnania potom možno využiť na

určenie parametrov vonkajšej orientácie. Pritom treba uvážiť, že susedné skenované riadky sú silne korelované a preto bude potrebné ich preparametrizovať.

Pri použití systému DPA na palube lietadla vzniká problém vysokých frekvencií pohybov lietadla vplyvom vibrácií a turbulencie čo nezodpovedá podmienkam, pre ktoré bol vyvíjaný projekt MOMS, z ktorého sú prevzaté podstatné diely aj pre systém DPA. Je zrejme, že v kozmickom priestore, v podmienkach bežného stavu podliehajú dráhy satelitov veľmi malým zmenám.

3.3 Testovanie digitálneho systému DPA

Testovanie digitálneho systému DPA a jeho mapovacích možností bolo definované tzv. akceptačným testom s týmito podmienkami [3]:

1. Využitie a integrácia so systémom GPS pre určovanie súradníc projekčných centier počas letu spolu s aplikáciou inerciálneho systému (INS)
2. Súčasné snímokovanie testového územia leteckou širokouhlou fotokamerou RMK nielen pre určovanie bodov testového poľa ale aj pre hodnotenie a odhad presnosti digitálneho systému DPA.

Pre hodnotenie možností digitálneho systému DPA - stereo bolo zvolené testové pole lokalizované v značne zvlhnutom teréne asi 20 km západne od Štutgartu, rozmeru 4,5 x 7 km. Testové pole obsahovalo 200 signalizovaných bodov, ktoré boli ďalej klasifikované takto: 38 z nich bolo zameraných pomocou GPS s presnosťou 2 - 3 cm, 38 spojovacích bodov bolo signalizovaných PVC platňami 1 x 1 m a boli určené analytickou aerotrianguláciou s využitím analógovej fotokamery RMK. Viac ako 120 signalizovaných bodov slúžilo ako kontrolné body pre určovanie digitálnym systémom DPA, ktoré boli určované zároveň analytickou aerotrianguláciou zo snímok RMK. Presnosť spojovacích a kontrolných bodov bola určená na základe kovariančnej matice vzázkového blokového vyrovnania v hodnotách 2 až 3,4 cm, pričom snímková mierka snímok RMK bola 1 : 13 000.

Výška letu počas snímania pomocou DPA bola 2000 m, mierka obrazu DPA bola približne 1 : 25 000 čomu zodpovedal rozmer pixelu na Zemi v hodnote 0,25 m.

4. Záver

Výsledky hodnotenia leteckej trojriadkovej digitálnej kamery **MEOSS** ukázali, že vnútri prekrytu dvoch prekrývajúcich sa sôp letu sa dosiahla presnosť: - okolo 1 m (0,5 pixel) v smeroch X a Y a- 2 m (1 pixel) vo výške, čo bolo verifikované na kontrolných bodoch.

Zároveň sa ukázalo, že simultánne vyrovnanie dvoch letových stôp nevyžadovalo navigačné údaje, naopak vyrovnanie jednoduchej stopy vyžaduje navigačné údaje.

Systém trojriadkovej digitálnej kamery DPA ukázal novú koncepciu stereo a multispektrál - neho mapovania s integráciou na GPS a INS. Prvé predbežné určovanie bodov systémom DPA nebolo ešte uspokojivé, pretože model chýb zväzkového blokového vyrovnania nedovoľoval zavádzať opravy zo zmien dráhy letu určené pomocou GPS a INS. Preto sa dosiahla systémom DPA presnosť, ktorá je porovnateľná s presnosťou dosiahnutou systémom MEOSS:

$$m_x = 0,6 \text{ m} \quad m_y = 1,0 \text{ m} \quad m_z = 0,6 \text{ až } 1,9 \text{ m}$$

I napriek uvedeným nepriaznivým okolnostiam sú to veľmi sľubné výsledky. V blízkej budúcnosti možno preto oprávnene očakávať využitie digitálneho snímania pomocou trojriadkových digitálnych kamier tak pre topografické ako aj tematické mapovanie v stredných mierkach.

Literatúra

[1] THORPE, J.: Aerial Photography and Satellite Imagery: Competing or Complementary, EOM, The Magazine for Geographic Mapping, Earth Information, June 1996, pp. 35-38.

[2] HEIPKE, C., et all.: The Evaluation of ME OSS Airborne Three-Line Scanner Imagery: Processing Chain and Results, PE & RS, Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, Vol 62, No. 3, March 1996, pp. 293-299

[3] FRITSCH, D.: Experiences with the Airborne Three-Line Camera System DPA Photogrammetric Week '97, Wichmann Verlag, Huthig GmbH, Heidelberg 1997, pp.63-74.