

VPLIV KAKOVOSTI VHODNIH PODATKOV NA KAKOVOST ORTOFOTA

INFLUENCE OF INPUT DATA QUALITY ON THE QUALITY OF ORTHOPHOTO

Mojca Kosmatin Fras

UDK: 528.7

POVZETEK

Prispevek obravnava vpliv različnih vhodnih podatkov, ki jih potrebujemo za izdelavo ortofoto karte, na končni izdelek. Na kakovost najbolj vplivajo natančnost podatkov orientacije posnetkov, kakovost digitalnega modela višin in kakovost digitalne podobe. Na kratko je opisan postopek izdelave ortofota, podrobneje so obravnavani posamezni vhodni podatki in njihov vpliv na izdelek. Razumevanje obravnavane tematike je pomembno za pravilno uporabo ortofota.

Klasifikacija prispevka po COBISS-u: 1.04

ABSTRACT

In the article, the influence of input data for orthophoto map production on the final product is discussed. The quality of orthophoto is mostly influenced by image orientation parameters, quality of the digital elevation model and digital image quality. A short description of orthophoto production procedure is given, and the input data and their impact on the product is treated in more detail. The understanding of this topic is highly relevant for a correct use of the orthophoto.

KLJUČNE BESEDE

fotogrametrija, ortofoto, digitalni model višin, kakovost

KEY WORDS

photogrammetry, orthophoto, digital elevation model, quality

1 UVOD

Ortofoto je dandanes vsakdanji izdelek, nepogrešljiv predvsem kot podlaga za različne prostorske aplikacije. Nadomešča vektorske podatke tam, kjer ustrezni niso na voljo, ali pa jih dopolnjuje. Uporablja se kot rastrska podlaga v geolociranih prostorskih bazah, na njem se izdelujejo geodetske podlage za potrebe planiranja, z njim na različne načine fotografsko realistično »oblepimo« trirazsežne modele (projekcija na digitalni model terena, modele stavb itd.). Pisati o tej tematiki, vsaj tako se zdi, je v tem času nepotrebno. Vendar pa je za pravilno uporabo in razumevanje kakovosti tega razširjenega izdelka treba poznati nekaj dejstev, ki marsikomu, tudi v geodetskih krogih, niso poznana – vsaj take so moje izkušnje. Dejstvo je, da kakovosti ortofota ne moremo homogeno opredeliti glede na en list karte, zato tudi ne moremo posplošeno govoriti o njegovi pozicijski natančnosti; razloge za to navajam v tem članku. Med klasičnim izdelkom – karto ali načrtom – in ortofotom so nekatere pomembne razlike, ki med drugim vplivajo tudi na interpretacijo kakovosti, in jih bom v tem članku opredelila. V članku obravnavam predvsem teoretični vidik, ne podajam pa dejanske ocene kakovosti izdelka; to bi lahko izdelali le z obsežnejšo študijo.

2 TEHNOLOGIJA IZDELAVE ORTOFOTA

Tehnologija izdelave ortofota je v strokovni literaturi dobro opisana (npr. Kraus, 2003), zato za razumevanje problematike v tem prispevku navajam le kratek povzetek. Ortofoto (tudi: ortofotografija, ortofotokarta) je fotogrametrični izdelek, ki ga dobimo s transformacijo fotografskega posnetka v ortogonalno projekcijo. Digitalni ortofoto (v praksi se je uveljavila kratica DOF) izdelamo z digitalnimi postopki. Ker se danes uporablja izključno digitalna tehnologija, je pridevnik digitalni odveč. Zato v članku večinoma uporabljam le termin ortofoto.

Ortofoto je izdelan iz letalskih fotografij s postopkom diferencialnega redresiranja. Letalski posnetek je upodobitev fotografiranega objekta v centralni projekciji. Če poznamo elemente notranje in zunanje orientacije fotografije, lahko rekonstruiramo prostorski položaj fotografije, kot je bila v trenutku ekspozicije. Skozi vsako točko na fotografiji lahko rekonstruiramo premico, ki povezuje to točko, projekcijski center fotoaparata in objektno točko. Vemo, da objektna točka leži nekje na tej premici, njen točni položaj pa lahko določimo le tako, da pridobimo dodatno informacijo. Ta je lahko sosednja fotografija (stereopar), na kateri je objektna točka tudi upodobljena, ali pa uporabimo digitalni model višin. V prvem primeru prostorski položaj točke rekonstruiramo iz najbolj verjetnega preseka prostorskih premic iz obeh fotografij, v drugem primeru pa prostorsko točko dobimo s presekom premice z modelom višin. Pri klasičnih fotogrametričnih metodah se najbolj uporabljajo postopki na osnovi zajema podatkov iz stereopara. Postopek preseka slikovnega žarka z digitalnim modelom višin uporabimo takrat, ko podatke zajemamo le iz ene fotografije naenkrat. Če nas zanima samo geometrija (prostorske koordinate točke), potem govorimo o postopku »enoslikovnega risanja« (angl. monoplotting). Če pa nas poleg geometrije zanima tudi fotografska vsebina (barvne ali sive vrednosti digitalne podobe), govorimo o postopku izdelave ortofota. Presek premice z digitalnim modelom višin določi koordinate točke X, Y, Z, hkrati pa tej informaciji pripišemo še barvo iz podobe. Ta postopek ponovimo za vsak slikovni element (piksel) in rezultate zapisujemo v novo digitalno podobo, ki se tako po majhnih delčkih polni z ustrezno vsebino – od tod izraz diferencialni postopek.

Strnjeno so faze pri izdelavi ortofota naslednje:

- skeniranje fotografij,
- orientacija fotografij,
- priprava digitalnega modela višin,
- geometrična in semantična transformacija,
- združevanje ortopodob,
- oprema karte,
- zapis na digitalni medij/izris.

Ker danes ortofoto izdelujemo izključno na digitalni način, mora biti fotografija v digitalni obliki (digitalna fotografija oziroma podoba). Analogne fotografije moramo zato najprej skenirati. Zaradi visokih zahtev kakovosti se skeniranje izvaja na preciznih fotogrametričnih skenerjih, ki so namenjeni posebej za to nalogo. Imajo visoko geometrično ločljivost (od 4 μ m naprej), visoko

geometrično natančnost (2 μm), barvno globino 10 bitov ali več, so hitri, omogočajo skeniranje v svitku idr. Geometrično ločljivost (velikost piksla) moramo primerno izbrati glede na tehnične karakteristike izdelka. Primer:

- želena velikost slikovnega elementa ortofota v naravi: 0,5 m,
- merilo posnetka: 1 : 17 500,
- potrebna minimalna ločljivost skeniranja: 30 μm oz. 850 DPI (v praksi običajno izberemo večjo geometrično ločljivost, npr. 15 μm , ker s tem zmanjšamo napake pri transformacijah).

Glede na merilo ortofota moramo ustrezno izbrati tudi merilo posnetka. Razmerje med obema meriloma grobo ocenimo z naslednjo empirično enačbo (Kraus, 2003):

$$m_p = k \cdot \sqrt{m_k} ,$$

kjer je:

m_p - modul merila posnetka,

m_k - modul merila karte,

k - faktor, ki leži med 200 in 300.

<i>Merilo karte/ortofota</i>	<i>Modul merila posnetka</i>
<i>1 : 1000</i>	<i>6300 – 9500</i>
<i>1 : 5000</i>	<i>14 000 – 21 000</i>
<i>1 : 10 000</i>	<i>20 000 – 30 000</i>
<i>1 : 25 000</i>	<i>32 000 – 47 000</i>

Tabela 1: Razmerje med merilom posnetka in merilom izdelka (Kraus, 2003).

Orientacija fotografij je sestavljena iz notranje orientacije, ki se nanaša na fotoaparatus (konstanta fotoaparata, položaj glavne točke na fotografiji; te podatke pridobimo iz kalibracijskega protokola fotoaparata), in zunanje orientacije, ki pomeni položaj fotografije v prostoru v trenutku ekspozicije (trije premiki in trije zasuki). Elemente zunanje orientacija posnetkov izračunamo z izravnavo v projektu aerotriangulacije.

Glede digitalnega modela višin imamo dve možnosti. Če je DMV ustrezne kakovosti na razpolago, potem uporabimo tega, v nasprotnem primeru ga je treba zajeti. V procesu izdelave ortofota to izvedemo z avtomatskimi postopki slikovnega ujemanja (angl. image matching). DMV je torej neke vrste dodatni izdelek v postopku izdelave ortofota. Postopki slikovnega ujemanja imajo sicer velike prednosti (predvsem velika hitrost zajema), vendar tudi pomembne slabosti, ki kvarijo končno kakovost DMV. Cilj postopkov slikovnega ujemanja je, da z ustreznimi matematičnimi in statističnimi metodami izbrani točki na eni podobi avtomatsko poiščemo najbolj verjetno

homologno točko na sosednji podobi. Merila podobnosti so opredeljena z relativnimi odnosi, na primer kot korelacija ali najmanjše odstopanje. Ustrezni računalniški program izbira točke za zajem natančno na pozicijah X, Y izbrane kvadratne mreže, višina se nato izračuna iz avtomatsko izmerjene paralakse točke. Obstajajo različne metode, ki so bolj ali manj zanesljive in natančne (npr. metoda križnega korelacijskega koeficienta, metoda izravnave po metodi najmanjših kvadratov idr.); s kompleksnostjo algoritma običajno narašča tudi čas, ki je potreben za zajem točk. Profesionalna fotogrametrična oprema za izdelavo ortofota vsebuje kakovostne algoritme, zato so tu uporabljeni algoritmi dovolj natančni. Problem se pojavi v sami vsebini fotografije. Na fotografiji se upodobijo vrhovi dreves, zato avtomatski algoritem izmeri višine po vrhu gozda, DMV pa bi moral potekati po tleh. Točke DMV se avtomatsko izmerijo tudi na stavbah, na mostovih in drugih grajenih objektih. Še najmanj težav je na odprtem terenu, kjer pa zanesljivost kljub temu lahko zmanjšuje neizrazita tekstura slike. Avtomatsko zajeti DMV mora zato pregledati operater in ročno popraviti napake, kar je lahko precej zamudno in neučinkovito (na enem listu TTN je pri velikosti celice DMV 25 m okrog 11 000 višinskih točk). V gozdu se tla morda sploh ne vidijo in je »spuščanje« višin lahko le približno; zahteve po natančnosti DMV v gozdu (za namene izdelave ortofota) so zato običajno manjše.

Geometrična transformacija se eksaktno izvede z enačbo centralne projekcije posnetka (osnovna fotogrametrična enačba) tako, da se geometrija vsakega piksla ortofota (X, Y koordinate piksla) preslika na fotografijo (t. i. posredni postopek). Ker je za izračun te enačbe potrebnih precej računskih operacij, se v praksi uporabi poenostavljeni postopek z interpolacijo med sidrnimi točkami.

Detajlni opis postopkov semantične transformacije presega namen tega prispevka. V kontekstu obravnave kakovosti ortofota pa moramo vedeti, da barvo vsakega posameznega piksla ortofota določimo z različnimi vrstami interpolacije barvnih vrednosti med sosednjimi piksli. Najbolj enostavna je metoda najbližjega sosedstva – vzamemo barvno vrednost tistega piksla, v katerega se je objektna točka preslikala na fotografiji (geometrija piksla je definirana z njegovim središčem; točka pa se seveda lahko upodobi na katerem koli mestu posnetka). Boljše rezultate dobimo z interpolacijo barvnih vrednosti (npr. bilinearna interpolacija vrednosti med štirimi sosednjimi piksli, bikubična interpolacija idr.).

Za izdelavo ortofoto karte v izbranem merilu in formatu je treba običajno združiti vsebino iz več redresiranih podob (angl. mosaicking). Na končnem izdelku je ta združitev najmanj vidna, če spoj izberemo na naravnih mejah (npr. meja gozda, cesta ipd.). Ker se podobe med sabo glede na določene vidne parametre lahko precej razlikujejo (npr. v svetlosti, kontrastu), jih je treba med sabo uskladiti. Ti postopki so lahko popolnoma ali delno avtomatizirani. Ta obdelava pa ne vpliva na geometrično kakovost ortofota, temveč le na njegovo semantično kakovost in estetski videz. Na koncu ortofoto karto še opremimo z ustrezno vsebino (izvenokvirna vsebina, koordinatna mreža, zemljepisna imena idr.), jo shranimo na digitalnem mediju in po potrebi izrišemo na risalniku.

2 ELEMENTI, KI VPLIVAJO NA KAKOVOST ORTOFOTA

Na kakovost ortofota, ki je izdelan s postopkom diferencialnega redresiranja, vplivajo predvsem:

- kakovost vira (fotografije oz. podobe),
- natančnost parametrov orientacije,
- kakovost digitalnega modela višin,
- uporabljene metode za geometrično in semantično transformacijo,
- časovna ažurnost vhodne slike.

Dominantni pogreški posameznih elementov vplivajo predvsem na pozicijsko natančnost ortofota in se v splošnem radialno večajo od sredine posnetka (nadirna točka), kjer so blizu nič, proti robovom fotografije. **Na robovih ortofotografij so pogreški največji**, kar lahko upoštevamo pri mozaičenju podob za izdelavo ortofoto karte tako, da vzamemo čim bolj centralne dele posameznih ortofotografij.

Kakovost fotografije je osnovni pogoj za izdelavo kakovostnega ortofota. V procesu od nastanka fotografije do njene digitalne oblike so prisotni različni pogreški, ki jih s skrbno načrtovanim postopkom lahko zmanjšamo na najmanjšo možno mero. Ostanejo preostanki pogreškov optične distorzije, deformacije filma, geometrične natančnosti skenerja ipd. Poleg geometrične natančnosti pa je zelo pomembna tudi semantična kakovost fotografije (vidnost detajlov, primerna svetlost in ostrina slike ipd.), ki jo nadzorujemo s pravilno ekspozičijo in izbiro kakovostnega fotografskega filma.

Elemente notranje orientacije običajno poda proizvajalec fotoaparata, ki izvede laboratorijsko kalibracijo. Čeprav so profesionalni fotoaparati za letalsko snemanje izdelani robustno, se s časom ti parametri spremenijo, zato je treba kalibracijo ponoviti v določenem časovnem obdobju (redno vsaj na vsake tri leta). Kalibracijo je treba ponoviti tudi, kadar se pojavljajo večja sistematična odstopanja pri transformaciji slikovnih koordinat na robne marke oziroma če je bil fotoaparat izpostavljen večjim mehanskim vplivom (npr. močnejši udarec ob pristanku letala).

Elementi zunanje orientacije se izračunajo v projektu aerotriangulacije. Vsak pogrešek v kotu zasuka oziroma premiku projekcijskega centra neposredno vpliva ne prostorski položaj slikovne premice skozi izbrano točko posnetka. Natančnost izračunanih parametrov zunanje orientacije je ocenjena v poročilu aerotriangulacije. Izdela se na osnovi ocene á priori natančnosti oslonilnih točk in neodvisne primerjave med izračunanimi koordinatami in terensko izmerjenimi koordinatami na kontrolnih točkah. Kriteriji za posamezna dovoljena odstopanja (kotna odstopanja, odstopanja koordinat ipd.) so podani v tehničnih specifikacijah projekta aerotriangulacije. Ti kriteriji upoštevajo potrebno kakovost za nadaljnjo izdelavo ortofota. Torej je zelo pomembno, da je aerotriangulacija izvedena strokovno korektno in da se pred izdelavo ortofota preveri njena kakovost.

Kakovost DMV ima zelo velik vpliv na pozicijsko natančnost ortofota in jo podrobneje obravnavam v 3. točki. Tu razložimo le dejstvo, da digitalni model površine ni popolnoma identičen vsebini, ki jo upodablja fotografija. Na ortofotu bodo pozicijsko pravilno prikazani le tisti elementi slike, ki ležijo na uporabljenem višinskem modelu. Pozicijsko so premaknjeni vsi grajeni objekti, vrhovi

dreves, hitri višinski prehodi terena ipd. Radialni pogrešek (ΔR) planimetričnih koordinat točke, ki ne leži na digitalnem modelu površine, izračunamo po naslednji enačbi:

$$\Delta R = \frac{\Delta Z}{\frac{c}{\rho} + \tan \alpha \cdot \cos \beta},$$

kjer je:

ΔZ - višinska razlika med višino objekta in površino, ki jo definira digitalni model višin,

c - konstanta kamere,

ρ - slikovna radialna razdalja upodobljene točke od glavne točke posnetka,

α - naklonski kot terena,

β - kot med absciso na ortofotu in radialno smerjo proti točki (preseka vertikalne ravnine, ki poteka skozi premico med slikovnim nadirjem in upodobljeno točko, s terenom).

Primer: slame strehe, ki je 10 m nad terenom in je na fotografiji oddaljeno od nadirja 10 cm, je na ortofotu radialno premaknjeno za približno 6 m ($c = 130$ mm).

V točki 2 smo omenili, da pri geometrični transformaciji centralno projekcijo nadomestimo s transformacijo med t. i. sidrnimi točkami. Manjši delček upodobljenega terena na podobi lahko aproksimiramo s ploskvijo, ki poteka skozi štiri točke. Za te štiri točke se običajno izberejo kar vogali, ki tvorijo eno celico mreže DMV. Za te točke najprej izračunamo njihove upodobitve z eksaktnimi enačbami, nato med kvadratom celice DMV in upodobljenim štirikotnikom na podobi izračunamo parametre bilinearne transformacije. Za vse piksele, ki se nahajajo znotraj ene celice DMV, izračunamo njihovo geometrijo na fotografiji (slikovne koordinate) z bilinearno interpolacijo. Napako (δ) v slikovnih koordinatah, ki jo pri tem naredimo glede na eksaktno enačbo, izračunamo z naslednjo empirično enačbo (Kraus, 2003):

$$\delta = \frac{s^2}{4 \cdot c} \cdot \tan \alpha,$$

kjer je:

α - naklonski kot terena,

c - konstanta kamere,

s - velikost stranice celice DMV, izražena v merilu fotografije.

Za primer izračunajmo velikost napake (δ) pri naslednjih podatkih: $c = 150$ mm, višina leta 3 km nad terenom, velikost stranice DMV = 50 m, maksimalni naklon terena ne presega 50 %. Izračunana napaka slikovne koordinate znaša 5 μ m. Ta napaka je precej manjša od same velikosti piksla celo pri ekstremnih vrednostih, zato lahko brez škode uporabimo poenostavljen geometrični postopek.

Določitev barvne vrednosti (oz. stopnje sivine v črno-belih podobah) posameznega piksla ortofota vodi do interpretacijske napake, ki se posredno lahko izrazi tudi z geometrično napako. Kot je bilo omenjeno že v točki 2, barvno vrednost posameznemu pikslu ortofota lahko priredimo na več načinov. Najbolj enostavna metoda bližnjega sosedstva (vzamemo barvno vrednost najbližjega piksla na podobi) lahko vodi do interpretacijske napake celo 30 % (interpretacijska napaka pomeni, da je v nekaterih pikslah zapisana napačna vsebina), zato ni najbolj priporočljiva. Precej boljše rezultate dobimo z bilinearno interpolacijo barvnih vrednosti med štirimi sosednjimi piksli (izračunana slikovna točka se nahaja med njihovimi centri). Ta metoda se tudi v praksi najbolj uporablja, velikost interpretacijske napake je nekaj odstotkov. Uporabimo lahko še transformacije višjega reda (bikubična, polinomska idr.), vendar število potrebnih operacij hitro naraste, interpretacijska napaka pa se ne zmanjša bistveno. Ne glede na uporabljeno metodo interpolacije barvnih vrednosti pa je določena stopnja interpretacijske napake vedno prisotna, ker objekti nad terenom v smeri slikovnega žarka ustvarjajo »mrtvi kot«.

Na koncu ne smemo pozabiti tudi na časovno ažurnost ortofota. Datum ortofota je datum letalskega snemanja in ne njegove izdelave. Pri prekrivanju podatkov ortofota s podatki iz drugih podatkovnih baz je treba upoštevati njihovo morebitno časovno neskladje.

3 VPLIV KAKOVOSTI DMV NA KAKOVOST ORTOFOTA

Zaradi velikega vpliva kakovosti DMV na kakovost ortofota je treba to temo podrobneje preučiti. Po definiciji je digitalni model višin (DMV) digitalna podatkovna zbirka, ki omogoča interpolacijo poljubne točke terena z vnaprej definirano višinsko natančnostjo (Koelbl, 2001). DMV je osnovno sestavljen iz mreže kvadratov višinskih točk, pri čemer je velikost mrežne celice izbrana različno. V praksi se pojem natančnosti DMV velikokrat razume napačno, ker se upošteva le natančnost višin v vogalnih točkah mreže. Dejansko nas zanima, s kakšno natančnostjo lahko rekonstruiramo katero koli točko terena. Velikost mrežne celice in vrsta terena zelo vplivata na natančnost interpolacije višin. Če je teren dokaj raven in gladek, je celica lahko večja, pa bodo rezultati interpolacije še vedno zadovoljivi. Če pa je teren zelo razgiban (npr. v gorah, na krasu) in – še posebej – če je veliko strmih prehodov (skalni robovi, terase, useki ipd.), samo z mrežo višinskih točk ne moremo doseči želene natančnosti. DMV je zato nujno nadgraditi z dodatnimi informacijami (kote, strukturne linije, robne linije itd.); v tem kontekstu se običajno uporablja pojem digitalni model reliefa (DMR), čeprav terminologija v strokovni literaturi v tem ni dosledna (izraze digitalni model višin, digitalni model reliefa, digitalni model terena, digitalni model površine ipd. različni avtorji uporabljajo različno). Interpolacija višin znotraj ene mrežne celice se izvede z linearno interpolacijo med sosednjimi točkami (npr. bilinearna interpolacija, bikubična interpolacija, Delaunayjeva triangulacija, tudi metode kolokacije). Med natančnostjo višin v vogalnih točkah mreže in velikostjo mrežne celice mora obstajati razumna povezava; npr. višinski model z 20-metrsko celico ni a priori boljši (bolj natančen) od višinskega modela s 25-metrsko celico, kar se v praksi med uporabniki tudi velikokrat napačno interpretira. V prvi vrsti je pomembna metoda in kakovost zajetih višin, velikost celice pa je treba določiti glede na želeno natančnost interpoliranih točk.

Povzemam nekatere rezultate, ki jih je na osnovi različnih študij izvedla ekipa priznanih evropskih strokovnjakov (Koelbl, 2001), in sicer o priporočeni velikosti mrežne celice pri vnaprej definirani višinski natančnosti in razvrstitvi terena v tri skupine:

Natančnost DMV [m]	Potrebna velikost mrežene celice [m]		
	Ravninski teren	Hribovit teren	Gorati teren
4	66	41	23
2	41	26	15
1	23	15	8
0,5	13	8	5

Tabela 2: Potrebna velikost mrežne celice DMV pri vnaprej opredeljeni višinski natančnosti interpoliranih točk (Koelbl, 2001)

V praksi se za velikost mrežne celice običajno vzamejo okrogle vrednosti. Posplošeno so primerne velikosti mrežnih celic, če upoštevamo tudi zahtevnejši teren, naslednje:

- višinska natančnost interpoliranih točk pod +/- 1 m: mrežna celica 5 m,
- **višinska natančnost interpoliranih točk med +/- 1 m in +/- 2 m: mrežna celica 10 m,**
- višinska natančnost interpoliranih točk +/- 3 m in več: 20 m.

Digitalni model višin je v procesu izdelave ortofota potreben za opredelitev horizontalnega položaja rastrskega slikovnega elementa (piksla). Natančnost DMV tako neposredno vpliva na pozicijsko natančnost DOF. Vpliv višinskega pogreška na planimetrično natančnost ocenimo z naslednjim matematičnim izrazom, ki velja za posnetke, vzporedne terenu (Kraus, 2003):

$$\Delta\rho = \Delta R \frac{c}{Z_0} = \Delta Z \frac{\rho}{Z_0} = \Delta Z \frac{\rho}{c \cdot m},$$

kjer je:

$\Delta\rho$ - radialni pogrešek v slikovni ravnini, ki nastane zaradi višinskega pogreška določene točke,

ρ - slikovna radialna razdalja upodobljene točke od glavne točke posnetka,

ΔR - radialni pogrešek planimetričnih koordinat točke na terenu,

c - konstanta fotoaparata,

m - modul merila posnetka,

Z_0 - snemalna višina,

ΔZ_0 - višinski pogrešek točke.

Iz zgornjega izraza oblikujemo enačbe tako, da upoštevamo, katere podatke imamo na razpolago oziroma kaj želimo izračunati. Pomembna je ugotovitev, da na planimetrični pogrešek ortofota neposredno vpliva goriščna razdalja (konstanta) fotoaparata; pri enakih ostalih parametrih širokokotni objektiv povzroči večji radialni pogrešek v slikovni ravnini kot normalnokotni objektiv. Pogrešek se tudi veča od središča posnetka proti robovom in je največji v vogalih posnetka.

Za primer izračunajmo dovoljen višinski pogrešek za naslednje parametre:

$$c = 153 \text{ mm},$$

$$\Delta R = 1 \text{ m}.$$

Ker vemo, da je največji pogrešek v vogalu posnetka, vzamemo za vrednost slikovne razdalje od glavne točke največjo vrednost ($\rho = 160 \text{ mm}$). Vrednosti vstavimo v enačbo:

$$\Delta Z = \Delta R \cdot \frac{c}{\rho}$$

in zaokroženo dobimo vrednost dovoljenega višinskega pogreška za točke v vogalih posnetka 1 m. Iz tabele 2 vidimo, da takšno natančnost višin interpoliranih točk v DMV lahko dosežemo, če je pri ustrezni natančnosti višin točk mreže velikost stranice celice 8 m za gorat teren, 15 m za hribovit teren in 23 m za ravninski teren.

4 PRIMERJAVA ORTOFOTA IN KARTE

Ortofoto kot izdelek v obliki rastrske slike je v opredeljenem oziroma znanem enotnem merilu in se ga ponavadi geometrično enači z vektorsko karto istega merila. Iz obdobja analognih izdelkov smo navajeni, da grafično merilo posredno določa tudi geometrično natančnost prikazane vsebine. Tako ima npr. karta v merilu 1 : 5000 planimetrično natančnost $\pm 1 \text{ m}$, kar ustreza grafični natančnosti 0,2 mm na karti. Takšno tolmačenje geometrične natančnosti ortofoto karte v istem merilu po vsem, kar smo razložili zgoraj, ni korektno. Mejno planimetrično natančnost vsekakor predstavlja velikost piksla v ortofotu, ki za merilo 1 : 5000 znaša 0,5 m (napaka lahko torej znaša 2 piksla). Vendar je to le projektirana velikost, ki jo lahko poljubno spreminjamo z merilom fotografije in geometrično ločljivostjo skeniranja. Najbolj kritični element predstavlja DMV. Če bi želeli doseči enotno planimetrično natančnost ortofota v merilu 1 : 5000 $\pm 1 \text{ m}$, bi morali izpolniti zelo visoke zahteve natančnosti vhodnih višinskih podatkov (npr. poljubna točka od realnega površja ne bi smela odstopati več kot $\pm 1 \text{ m}$). Najlažje se tej natančnosti približamo na pretežno ravnem in odprtem terenu, kjer se tudi metoda avtomatskega zajema DMV dobro obnese. Zelo so problematična gozdna, gosto poseljena in gorata območja. Številni posegi v naravno oblikovitost terena, ki se kažejo predvsem ob prometnicah (useki, nasipi ipd.), morajo biti vključeni v digitalni model višin, ravno tako kot druge posebnosti terena.

Na topografskih kartah je z raznimi sredstvi običajno prikazana tudi višinska komponenta (kote, plastnice, sence). Ortofoto pa je izključno dvorazsežni izdelek. Če želimo, lahko preko fotografske

vsebine pretisnemo tudi višinske podatke kot na karti, vendar te podatke lahko dobimo le iz drugih virov. Poleg tega je ortofoto, čeprav v znanem merilu, še vedno samo fotografski prikaz. Vsebino, ki jo prikazuje, mora uporabnik znati pravilno interpretirati. Nekateri uporabniki se včasih odločijo za vektorizacijo vsebine iz ortofota. Takšna rešitev je – odvisno od namena tako zajetih podatkov – lahko sprejemljiva, ne pa vedno. Tako zajeti podatki z gotovostjo nimajo geometrične natančnosti, ki je ekvivalentna grafičnemu merilu, saj je poleg pogreškov vira (ortofota) prisoten še dodaten pogrešek vektorizacije. Vedeti moramo: če obstaja ortofoto, obstajajo tudi izvirne fotografije, iz katerih je bil ortofoto izdelan, zato je bolje vsebino zajemati iz stereoparov (na fotogrametričnem analitičnem instrumentu ali fotogrametrični digitalni postaji). Poleg precej boljše geometrične natančnosti od ortofota, ki jo lahko dosežemo, in treh zajetih koordinatah, stereoeffekt močno poveča interpretabilnost vsebine.

5 TEHNIČNE KARAKTERISTIKE DOF 5

Digitalni ortofoto, ki ga pri nas poznamo pod nazivom DOF 5, je sistemski izdelek Geodetske uprave RS, ki se v Sloveniji izdeluje že skoraj 10 let. Intenzivnost njegove izdelave se je zelo povečala v okviru projekta Posodobitev evidentiranja nepremičnin, saj je bil eden od njegovih pomembnih rezultatov. Konec leta 2002 je bilo naše ozemlje v celoti pokrito s tem izdelkom, tako da se sedaj že odvija prvi ciklus obnove. Vzdrževanje ortofota bo predvidoma potekalo v povprečju na 6 let (3 leta na intenzivnih območjih, 9 let na izrazito neintenzivnih območjih). Osnovni vir za izdelavo DOF 5 so posnetki cikličnega aerosnemanja Slovenije (CAS) z nazivnim merilom okrog 1 : 17 500. Po naročilu je seveda možna tudi izvedba ortofota v drugih merilih; predvsem v večjih mestih naročajo izdelavo ortofota v merilu 1 : 1000. Državni izdelek je zaenkrat v črno-beli tehniki, možna pa je tudi izdelava v barvah. Geometrična ločljivost skeniranja je 14 ěm, kar je enako 1814 DPI. Za velikost letalske fotografije 23 cm x 23 cm znaša velikost sive podobe 270 MB (oz. 810 MB za barvno podobo). Poleg osnovne skenirane podobe se običajno zapišejo še posamezni nivoji slikovne piramide (prevzorčene podobe z različno geometrično resolucijo, ki omogočajo hitrejšo avtomatsko obdelavo; običajno v štirih nivojih), kar računalniški zapis osnovne podobe poveča za približno 1/3.

Ob izdelavi DOF 5 se je z metodo avtomatskega slikovnega ujemanja, ki je opisana zgoraj, zajemal tudi višinski model, ki smo ga s kratico poimenovali DMR 25. DMR se je sprva zajemal le na 40 m in se nato interpoliral na 25 m. Pri zajemu podatkov je prišlo mestoma tudi do grobe napake pri izbiri izhodišča koordinatnega sistema za DMR, kar se je kasneje popravilo. Rigoroznost kontrole natančnosti višin ter ročno popraviljanje višin z vrhov drevesnih krošenj in hiš na tla se je povečalo po odpravi začetnih težav projekta. Natančnost novejših podatkov DMR 25 je bila na odprtem terenu ocenjena na 0,5 do 2 m (Radovan et al., 2000), v gozdu pa zaradi težav z interpretacijo in vidnostjo tal na 3 do 5 m, lahko tudi 10 m ali več. Bistveno slabšo natančnost dosega DMR 25 na tistih listih DOF 5, ki so bili narejeni s 40-metrsko celico in naknadno interpolirani v 25-metrsko mrežo. Tam, kjer je bil DMR 25 ustrezno kontroliran, pa je to še vedno najbolj natančen vir, ki je trenutno v Sloveniji na razpolago. Z uporabo podatkov radarske tehnologije je bil v Sloveniji izdelan tudi t. i. InSAR DMV 25 (interferometrični SAR). Podatki prekrivajo celo Slovenijo v izredno homogeni in relativno visoki natančnosti (ocenjeno v povprečju

okoli 4,5 m za celo Slovenijo). Kljub temu pa je natančnost teh višin slabša, kot jo lahko dosežemo s fotogrametrično metodo. V teku je tudi izdelava digitalnega modela Slovenije, ki bo v prihodnosti nadomestil obstoječe različne višinske baze. Izdelava temelji na kombiniranju obstoječih virov in njihovo ustrezno obdelavo.

Zadnjih nekaj let se izvaja tudi sistemska kontrola izdelanih listov DOF 5 (Kosmatin Fras, 2003), ki pa žal ne vključuje kontrole pozicijske natančnosti. Le na osnovi tovrstne kontrole in ustrezno zajetih vzorčnih podatkov, ki bi jih primerjali s terenskimi meritvami, bi lahko izdelali oceno geometrične natančnosti izdelka. Edina takšna obsežnejša študija je bila narejena v okviru doktorske disertacije (Lipej, 1997), kjer je avtorica ocenila planimetrično natančnost DOF 5 $\pm 2,77$ m (testno območje cca 27 km² v okolici Kopra, izračunana RMS-vrednost na okoli 50 kontrolnih točkah, ki so bile na terenu izmerjene z GPS), vendar pa ti rezultati ne kažejo več današnjega stanja.

6 ZAKLJUČEK

Ortofoto je zelo pomemben izdelek geodetske stroke, ki se je uveljavil pri najrazličnejših uporabnikih. Žal nejasnosti glede njegove dejanske kakovosti (predvsem geometrične natančnosti) kot tudi poznavanja nekaterih dejstev, ki sem jih skušala zajeti v tem članku, pri uporabnikih ta izdelek včasih vzbuja tudi nezadovoljstvo. Upam, da sem v članku uspela pokazati, da je ortofoto lahko izredno kakovosten izdelek, vendar za to potrebujemo tudi zelo visokokakovostne vhodne podatke. Po tehnološki plati je stroka sposobna zagotoviti takšne podatke, vendar bi bila njihova cena izredno visoka in cena izdelka bi za obstoječe razmere postala nesprejemljiva. Glede na okoliščine bi največ lahko dosegli z uvedbo sistemske geometrične kontrole, tako da bi lahko uporabnikom podali realno oceno njegove kakovosti. Sicer pa je tehnologija izdelave ortofota danes optimizirana in v okviru dejanskih zmožnosti tudi ekonomična.

Čeprav je izdelava ortofota postala praktično rutinski posel, smo še vedno priče nadaljnjemu razvoju. Predmet intenzivnega raziskovanja je predvsem tehnologija za izdelavo »popolnega« ortofota (angl. true orthophoto), na katerem so planimetrično pravilno prikazani tudi zgrajeni objekti in drugi elementi fotografije, ki se nahajajo nad terenom. Izpopolnjujejo se tudi algoritmi za avtomatski zajem višin in prepoznavanje vsebine iz podob kot tudi metode za združevanje ortopodob v ortofotokarto. Izdelamo lahko tudi ortofoto, ki je narejen iz visokoresolucijskih satelitskih podob (npr. Ikonos, Quick Bird). Geometrična ločljivost v pankromatskem območju je že blizu tisti, ki jo dobimo iz letalskih posnetkov. Zaenkrat pa so ti izdelki še dražji od klasičnih (Kosmatin Fras et al., 2001), dobavni čas pa je lahko tudi zelo dolg.

Literatura in viri:

- Koelbl, O. (2001). *Technical Specifications for the Elaboration of Digital Elevation Models*. EPFL, Lausanne, Švica.
- Kraus, K. (2003). *Photogrammetrie, Band 1, Geometrische Informationen aus Photographien und Laserscanneraufnahmen*. 7. izdaja. Berlin: Walter de Gruyter GmbH.
- Kosmatin Fras, M. et al. (2001). *Spremljanje razvoja stroke in novih tehnologij. Tehnično poročilo projekta*. Geodetski inštitut Slovenije, Ljubljana.

Kosmatin Fras, M. (2003). Quality management system in photogrammetric projects: approaches and experience in Slovenia. Objava v zborniku. Bačič, Željko (ur.). Geoinformation for practice: proceedings of the ISPRS WG VI/3 workshop, Part 6/W11, Vol.34, str. 137-142.

Lipej, B. (1997). Optimizacija prostorskega planiranja kot rezultat GIS tehnologije in prostorskega upravljanja. Doktorska disertacija. Ljubljana: FGG - Oddelek za geodezijo.

Radovan, D., Kosmatin Fras, M., Podobnikar, T. et al. (2000). Digitalni model reliefa Slovenije – priprava projektne dokumentacije. Ekspertiza. Geodetski inštitut Slovenije in ZRC SAZU, Ljubljana.

doc. dr. Mojca Kosmatin Fras, univ. dipl. inž. geod.

FGG - Oddelek za geodezijo, Jamova 2, SI-1000 Ljubljana

E-pošta: mfras@fgg.uni-lj.si, tel.: (01) 4768 552

Prispelo v objavo: 10. maj 2004