

UPORABA SATELITSKIH POSNETKOV SPOT ZA IZDELAVO ORTOPODOB

APPLICATION OF SPOT SATELLITE IMAGERY FOR ORTHOIMAGE GENERATION

Aleš Marsetič, Krištof Oštir

UDK: 528.7

IZVLEČEK

V članku je predstavljena uporaba stereopara pankromatskih in multispektralnih posnetkov satelita SPOT v fotogrametričnih aplikacijah. Podane so teoretične osnove izdelave digitalnih modelov višin in ortopodob ter opis praktičnega postopka izdelave ortopodob. Preučene so možnosti uporabe srednjeločljivih podob goratih področij. Natančnost ustvarjenih ortopodob je bila ugotovljena s primerjavo z DOF 5. Dobljeni rezultati so nepričakovano dobri in kažejo na primernost posnetkov SPOT. Na natančnost rezultatov so poleg vhodnih podatkov najpomembneje vplivale omejitve digitalnih, samodejnih tehnik obdelave v uporabljeni programski opremi.

KLJUČNE BESEDE

satelitski posnetki, SPOT, digitalna fotogrametrija, digitalni model višin, ortopodoba, natančnost

Klasifikacija prispevka po COBISS-u: 1.04

ABSTRACT

In the article, the application of stereopairs of panchromatic and multispectral SPOT satellite imagery in photogrammetric applications is presented. Theoretical basis of the generation of digital elevation models and orthoimages and a description of the practical processing of orthoimages are given. Examined are the possibilities of the application of the middle-resolution images from mountainous regions. The accuracy of the orthoimages has been determined by comparing with orthophotos DOF 5. The results are unexpectedly good and show the potential of SPOT imagery. The accuracy of the results has been, in addition to the input data, affected by the restrictions of the digital, automatic processing techniques in the software applied.

KEY WORDS

satellite imagery, SPOT, digital photogrammetry, digital elevation model, orthoimage, accuracy

1 UVOD

Satelitske posnetke se v fotogrametriji uporablja že vrsto let. Zanimivo je, da so blokovno izravnavo s snopi prvič izdelali in znanstveno preskusili prav s podobami SPOT in MOMS (Toutin, 2003). Med glavne izdelke digitalne fotogrametrije spadajo ortopodobe in digitalni modeli višin. Digitalnim modelom višin (DMV) so posvečali veliko pozornosti, odkar so prišli v uporabo v poznih petdesetih letih prejšnjega stoletja. V zadnjih letih jih veliko uporabljamo na področjih geodezije, gradbeništva, geologije, rudarstva, krajinske arhitekture, prostorskega planiranja, agronomije, vojaških operacij, letalskih simulacij itd. (Gong et al., 2000). Pomembnost digitalnih

modelov višin se je povečala s hitrim razvojem geografskih informacijskih sistemov (GIS), digitalne fotogrametrije in daljinskega zaznavanja. Z modeli višin se lahko izdelata tudi nove digitalne izdelke. Med slednjimi so najbolj pomembne digitalne ortopodobe, ki so postale idealna referenčna podlaga za izdelavo in vzdrževanje vektorskih podatkov.

Za rekonstrukcijo zemeljskega površja in izdelavo digitalnega modela višin potrebujemo vrednosti višin točk na terenu. Pri topografskem kartiranju dobimo višine z uporabo stereopara letalskih posnetkov z znano orientacijo (Krupnik, 2000). V zadnjih nekaj letih se pri izdelavi modelov reliefa in ortopodob uporablja tudi satelitske podobe. Med prvimi podobami, ki so bile uporabljene v ta namen, so bile podobe satelita SPOT. Prednost satelitskih podob je velika pokritost površja, kar omogoča en sam stereopar, na drugi strani pa je največja pomanjkljivost prostorska ločljivost, ki pa z uvedbo novih visokoločljivih satelitskih podob ne predstavlja več večje omejitve.

2 SATELITI IN PODOBE SPOT

Sateliti SPOT (Systeme Pour l'Observation de la Terre) so bili zasnovani v francoskem CNES (Centre National d'Etudes Spatiales), kjer so jih razvili skupaj s SNSB (Swedish National Space Board) iz Švedske in OSTC (Federal Office for Scientific, Technical, and Cultural Affairs) iz Belgije. Upravlja jih CNES, s podatki pa razpolagata tudi Švedska in Belgija. Sistem vključuje poleg satelitov tudi več zemeljskih sprejemnih postaj in drugo infrastrukturo, kjer nadzorujejo in programirajo satelite ter izdelujejo in trgujejo s pridobljenimi podobami.

Od leta 1986 so v tirnico izstrelili že pet satelitov SPOT, ki posredujejo podatke visoke in srednje ločljivosti. SPOT 1, SPOT 2 in SPOT 3 imajo na krovu multispektralni (XS) in pankromatski (PAN) senzor. Z multispektralnim senzorjem pridobijo podobe z ločljivostjo 20 m, s pankromatskim pa 10 m. XS-senzor zajema podobe v treh spektralnih kanalih. Sateliti so opremljeni z dvema optičnima instrumentoma HRV (High Resolution Visible), ki lahko delujeta povezano ali samostojno. Skupaj lahko senzorja posnameta pas širine 117 km s 3 km prekrivanja. Instrumenti HRV vsebujejo detektorje, ki delujejo s tehniko vzdolžnega snemanja, kar pomeni, da vsebujejo 3000 oz. 6000 detektorjev, ki snemajo zaporedne vrstice. To zagotavlja visoko geometrijsko natančnost, slaba lastnost pa je težko kalibriranje velikega števila detektorjev. Vsak HRV se lahko zasuka za kot 27° od vertikale, kar omogoča širše področje snemanja, skrajšan čas ponovnega snemanja in izdelavo stereoparov. Satelite SPOT lahko programirajo, da snemajo dele površja, ki jih naroči uporabnik. S tem lahko na primer pogosteje snemajo dele površja, ki jih je prizadela nesreča, saj je čas snemanja pri tem zelo pomemben dejavnik (CCRS, 2004).

SPOT 4 ima poleg instrumentov predhodnih satelitov še nekaj dodatkov (senzor HRVIR) in instrument za spremljanje vegetacije. Najnovejši iz serije, SPOT 5, združuje še nekaj novih instrumentov in izboljšav glede na predhodne senzorje. Najpomembnejši so senzorji HRG, z ločljivostjo 5 m (PAN), in instrument HRS (High Resolution Stereoscopic), s katerim lahko satelit skoraj sočasno posname stereopar.

Sateliti SPOT krožijo na višini približno 822 km. So sončno sinhroni in imajo skoraj polarno tirnico – naklon je približno $98,7^\circ$. Zaradi tega lahko posnamejo območje med 87° severne in 87° južne geografske širine. V nadirju snemajo pas širine 60 km, pri največjem zasuku senzorja

pa do 80 km. Čas ponovnega obiska istega dela površja je 26 dni, z zasukom senzorjev se lahko čas ponovnega snemanja skrajša na tri dni. Če upoštevamo, da okoli Zemlje krožijo štirje delujoči sateliti SPOT (SPOT 3 je nehal delovati leta 1996), potem lahko za poljubno področje na Zemlji vsak dan pridobimo podobo (Kramer, 2002). Podobe SPOT pridobijo s senzorji HRV, HRVIR ali HRG (odvisno od satelita), ki delujejo v visokoločljivem enokanalnem pankromatskem načinu ali v štirikanalnem (trokanalni pri HRV) multispektralnem načinu. HRV-senzor je sestavljen iz štirih linearnih vrstic detektorjev: ena vrstica po 6000 detektorjev za snemanje v pankromatskem načinu in tri vrstice po 3000 detektorjev za vsak multispektralni kanal.

Sprejemna postaja lahko zajete podatke sprejme takoj, ko z anteno zazna signal satelita na obzorju. Sprejet signal demodulirajo, sinhronizirajo in posnamejo na podatkovne kasete vrste HDDT (CRISP, 2004). Na teh kasetah so posneti vsi podatki, ki jih pošlje satelit, vendar ti še niso pripravljeni za uporabo – so v "surovi" obliki. Nato podatke obdelajo, jih razdelijo na posamezne podobe in arhivirajo. Ko uporabnik zahteva določeno podobo, se arhivirane podobe predobdelata na zeleni način. Uporabnik ima na voljo pet različnih stopenj predobdelave, ki imajo različne radiometrične in geometrične popravke: stopnja 1A, 1B, 2A, 2B ali 3 (Spot Image, 2004). Horizontalna natančnost podob je odvisna od stopnje predobdelave in satelita, ki je podobo posnel. Stopnje 1A, 1B in 2A imajo na ravninskem območju natančnost boljšo od 350 m, če so bile posnete s sateliti SPOT 1 do 4, pri SPOT 5 pa dosežejo natančnost 50 m. Stopnje 2B in 3 imajo običajno natančnost, ki je boljša od 30 m, vendar je ta številka odvisna od kakovosti oslonilnih točk in modela višin, ki so bili uporabljeni pri predobdelavi. Z uporabo kakovostnega modela višin lahko stopnja 3 doseže natančnost 15 m. Preden predobdelane podobe izročijo uporabnikom, jih zapišejo v standardni digitalni format. Podobe, pridobljene s satelitom SPOT 5, in stopnje predobdelave 2B in 3 zapišejo v zapis DIMAP (Digital Image MAP), ostale pa v zapis CAP (Centre d'Archivage et de Prétraitement). Zapis CAP je dobil ime po centru za arhiviranje in predobdelavo, za katerega ga tudi izdelujejo. Podatke distribuirajo na optičnih nosilcih oziroma v zadnjem času praviloma prek interneta.

Podobe SPOT so pomemben vir informacij za preučevanje, spremljanje, napovedovanje in upravljanje naravnih virov in človeških dejavnosti na našem planetu. Imajo širok spekter uporabe v kartografiji, gradbeništvu, kmetijstvu, okoljevarstvu, gozdarstvu, opazovanju naravnih nesreč itd.

3 IZDELAVA DIGITALNEGA MODELA VIŠIN IN ORTOPODOB IZ STEREOPAROV PODOB SPOT

Izdelava digitalnega modela višin in ortopodob iz stereopara SPOT podob poteka po fotogrametričnih načelih. Satelitska fotogrametrija se delno razlikuje od letalske fotogrametrije, kjer pridobivajo slike z letalskimi kamerami. Sateliti SPOT pridobivajo podobe, kot rečeno, s tehniko vzdolžnega skeniranja (snemanja). Satelit med potovanjem pravokotno na smer potovanja sproti zajema ozke pasove, ki pozneje tvorijo podobo. Vsak takšen ozek pas, ki na digitalni podobi predstavlja eno vrstico, ima definiran svoj perspektivni center in svoje rotacijske kote, goriščna razdalja in notranja orientacija pa sta za vsako vrstico enaki. Ker se satelit premika gladko in skoraj linearno (po zelo gladki krivulji) skozi celo snemanje podobe, lahko privzamemo, da se tudi perspektivni center giblje po gladki premici.

3.1 SPOT notranja orientacija

Parametri notranje orientacije definirajo notranjo geometrijo senzorja v času zajema podobe. Znani parametri notranje orientacije so nujni pogoj za nadaljnjo transformacijo koordinat podobe v prostorske koordinate. Pri letalski kameri je za določitev notranje geometrije treba definirati več parametrov (glavno točko, goriščno razdaljo, robne marke, distorzijo leč, refrakcijo ...). Pri satelitskih podobah merjenje robnih mark odpade zaradi specifične notranje geometrije in stabilnosti senzorja. Drugi parametri so natančno določeni in se ne spreminjajo. Transformacijski parametri med koordinatami podobe in slikovnimi koordinatami so tako za določen senzor konstantni.

3.2 SPOT zunanja orientacija

Parametri zunanje orientacije definirajo pozicijo in orientacijo senzorja v času, ko je posnel podobo. Elementi, ki določijo pozicijo (X_o, Y_o, Z_o), so koordinate perspektivnega centra O, podane v prostorskem terenskem koordinatnem sistemu. Rotacijski elementi zunanje orientacije pa pomenijo zasuk med prostorskim terenskim koordinatnim sistemom (X, Y, Z) in slikovnim koordinatnim sistemom (x, y, z). Zasuk določimo s tremi rotacijskimi koti: ω (rotacija okoli osi x), φ (rotacija okoli osi y) in κ (rotacija okoli osi z).

Parametre zunanje orientacije dobimo z definiranjem zveze med senzorjem, podobo in zemeljskim površjem. Za natančno določitev te zveze je treba poznati vse parametre notranje in zunanje orientacije vsake uporabljene podobe. Pri določanju teh spremenljivk lahko uporabimo več fotogrametričnih tehnik, ki pa se razlikujejo glede na vhodne in izhodne podatke. Tehniko, ki uporablja manjše število oslonilnih točk in zagotavlja visoko natančnost rezultatov, imenujemo blokovna izravnava snopov. Sočasno lahko obdelujemo cel blok podob, ki se medsebojno prekrivajo. Rešitev iskanih parametrov za celoten blok dobimo z izravnavo po metodi najmanjših kvadratov.

Blokovna izravnava snopov je ena izmed metod blokovne triangulacije. Blokovna triangulacija je proces, s katerim definiramo matematično razmerje med podobo v bloku, senzorjem in terenom, ter tako omogoča izdelavo georeferenciranih podob, iz katerih lahko zajemamo geografske informacije o površju Zemlje. Med vsemi metodami blokovne triangulacije je blokovna izravnava snopov najbolj robustna, če upoštevamo minimizacijo in porazdelitev pogreškov. Metoda uporablja kolinearne enačbe za določitev razmerja med slikovnim in terenskim prostorom. Pri delu s satelitskimi podobami uporabljamo za blokovno triangulacijo kar izraz triangulacija (Leica, 2004).

Satelitska blokovna triangulacija poda model, s katerim lahko določimo razmerje med senzorjem na satelitu in terenskim koordinatnim sistemom v prostoru za vsako posneto vrstico. Razmerje lahko definiramo z elementi zunanje orientacije, to je:

- koordinatami perspektivnega centra centralne vrstice podobe,
- spremembo perspektivnih centrov vzdolž tirnice satelita,
- tremi rotacijami centralne vrstice podobe (koti ω , φ in κ) in
- spremembo kotov vzdolž tirnice satelita.

Poleg namestitve snopov žarkovja na posamezne znane točke ima satelitska blokovna triangulacija še dodatno nalogo, to je določitev zunanje orientacije centralne vrstice in izračun zunanje orientacije vsake druge vrstice podobe. Za izračun parametrov zunanje orientacije, ki se nanašajo na ustrezne vrstice satelitskih podob, se uporabljajo modificirane kolinearne enačbe. Vsaka vrstica ima svoj lastni perspektivni center in rotacijske kote. Med premikanjem satelita in snemanjem posameznih vrstic se ti parametri spreminjajo. Zaradi gladkega gibanja satelita po tirnici so spremembe majhne in jih lahko modeliramo s polinomskimi funkcijami nižjih redov. Uporabimo t. i. polinomski model, ki določa izračun polinomskih koeficientov. Število izračunanih polinomskih koeficientov je odvisno od določene stopnje polinoma, uporabljene v polinomskih modelih. Če vsakemu parametru zunanje orientacije določimo polinom prve stopnje, je število vseh izračunanih polinomskih koeficientov 24 (12 za vsako serijo parametrov zunanje orientacije). Večja kot je stopnja polinoma, večje je število oslonilnih točk, ki jih proces triangulacije potrebuje za rešitev problema (Leica, 2004).

Snopovna izravnava za triangulacijo satelitskih podob je podobna izravnavi, ki jo uporabljamo pri letalskih podobah. Neznane parametre izračunamo z izravnavo po metodi najmanjših kvadratov. Izračunani parametri satelitske snopovne izravnave so:

- terenske koordinate perspektivnega centra srednje vrstice podobe,
- rotacijski koti srednje vrstice podobe,
- koeficienti, s katerimi se izračuna perspektivne centre in rotacijske kote vseh preostalih vrstic podobe,
- terenske koordinate vseh veznih točk ter
- izračunane koordinate oslonilnih točk, ki so rezultat izravnave, in njihova kakovost glede na terensko izmerjene vrednosti.

3.3 Samodejni zajem digitalnega modela višin iz stereoparov podob

Samodejni zajem digitalnega modela višin je proces pridobitve višinskih informacij iz podob ter izdelava digitalnega, tridimenzionalnega prikaza Zemljinega površja. Primarni vir vhodnih podatkov za ta proces so digitalne podobe. DMV lahko izdelamo le, če imamo na razpolago dve ali več podob, ki se delno prekrivajo na območju, kjer želimo izdelati DMV. Pred samo avtomatsko izdelavo modela višin morajo imeti vse uporabljene podobe poznano notranjo in zunanjo orientacijo. Brez teh informacij izdelava modela višin iz prekrivajočih podob z omenjenimi postopki ni izvedljiva.

3.3.1 Proces izdelave digitalnega modela višin

Proces samodejne izdelave digitalnega modela višin lahko razdelimo na tri osnovne korake, in sicer:

- digitalno slikovno korelacijo,
- določitev koordinat točk na površju in
- izdelavo modela.

Digitalna slikovna korelacija (digital image matching)

Digitalno slikovno korelacijo pogosto uporabljamo v daljinskem zaznavanju in GIS-ih pri iskanju podobnosti med območjema dveh podob, ki se delno prekrivata oziroma predstavljata isti del površja. Ta tehnika se uporablja tudi za samodejno izdelavo modela višin. Na voljo imamo več metod digitalne slikovne korelacije, ki se razlikujejo glede načina primerjanja podob. Pri obdelavah uporabljenih posnetkov smo uporabili metodo ujemanja značilnosti (feature-based matching), ki je opisana v nadaljevanju.

Program za slikovno korelacijo z uporabo posebnega matematičnega operatorja najprej samodejno izbere zadostno število karakterističnih točk na vsaki podobi v obravnavanem bloku. Vsaka karakteristična točka predstavlja center slikovne podmatrike, v kateri se radiometrične vrednosti posameznih pikslov med seboj zadostno razlikujejo glede stopnje kontrasta. Karakteristična točka je običajno točka na podobi, ki predstavlja neko značilnost na Zemljinem površju, recimo cestna križišča, robovi hiš itd. Ko so vse karakteristične točke določene, se začne proces digitalne slikovne korelacije. Program poskuša identificirati karakteristične točke, ki predstavljajo isto površinsko značilnost na vsaj dveh prekrivajočih se podobah. Na referenčni podobi se za vsako karakteristično točko določi korelacijsko okno (matrika sivih vrednosti), na sosednji, prekrivajoči se podobi pa iskalno okno. Korelacijsko okno "preleti" iskalno okno in za vsak verjeten primer korelacije (par matrik) se izračuna križni korelacijski koeficient. Pri tem ima lahko vsaka karakteristična točka referenčne podobe več možnih ujemanj na sosednji podobi. Korelacijski koeficient se uporabi kot mera podobnosti oziroma ujemanja med pari slikovnih točk, ki se nahajajo na prekrivajočem delu stereopara. Korelacijski koeficient ima ponavadi vrednosti med nič in ena (v nekaterih primerih med -1 in 1). Velika vrednost korelacijskega koeficienta (0,8 do 1,0) pomeni statistično dobro ujemanje para točk. Majhna vrednost (pod 0,5) pa praktično pomeni, da točki skoraj gotovo predstavljata različen predmet ali značilnost (Leica, 2004). Velikost iskalnega okna, velikost korelacijskega okna in prag korelacijskega koeficienta se določijo pred slikovno korelacijo in imajo velik vpliv na uspešnost in natančnost celotnega procesa.

Določitev koordinat točk na površju

Po izračunu korelacijskih koeficientov statistično določimo najprimernejše pare slikovnih točk, ki predstavljajo določeno točko na površju. Vsaki točki se določi koordinate v koordinatnem sistemu podobe (številko vrstice in stolpca). Rezultat so torej koordinate koreliranih slikovnih točk, ki predstavljajo določeno karakteristično terensko točko na prekrivajočem se delu leve in desne podobe stereopara. Vsaka karakteristična točka ima tako dvojice slikovnih koordinat, iz katerih sledi izračun koordinat 3D terenskih točk v izbranem terenskem koordinatnem sistemu. Na tak način dobimo množico točk z znanimi koordinatami v vseh treh razsežnostih realnega prostora.

Izdelava digitalnega modela višin

Iz pridobljene množice točk lahko izdelamo več različnih tipov izhodnih višinskih podatkov. Najpogostejši so rastrski modeli višin, mreže trikotnikov TIN in datoteke ASCII. Rastrski DMV in TIN predstavljata neprekinjeni ploskvi, datoteka ASCII pa podaja le lokacijo in višino višinskih

točk. TIN je digitalna predstavitev Zemljinega površja, ki je sestavljena iz mreže trikotnikov (izdelamo ga z Delaunayjevo triangulacijo). Rastrski DMV se ustvari z interpolacijo, pri čemer dobimo digitalno mrežo višin oziroma DMV.

3.4 Ortorektifikacija

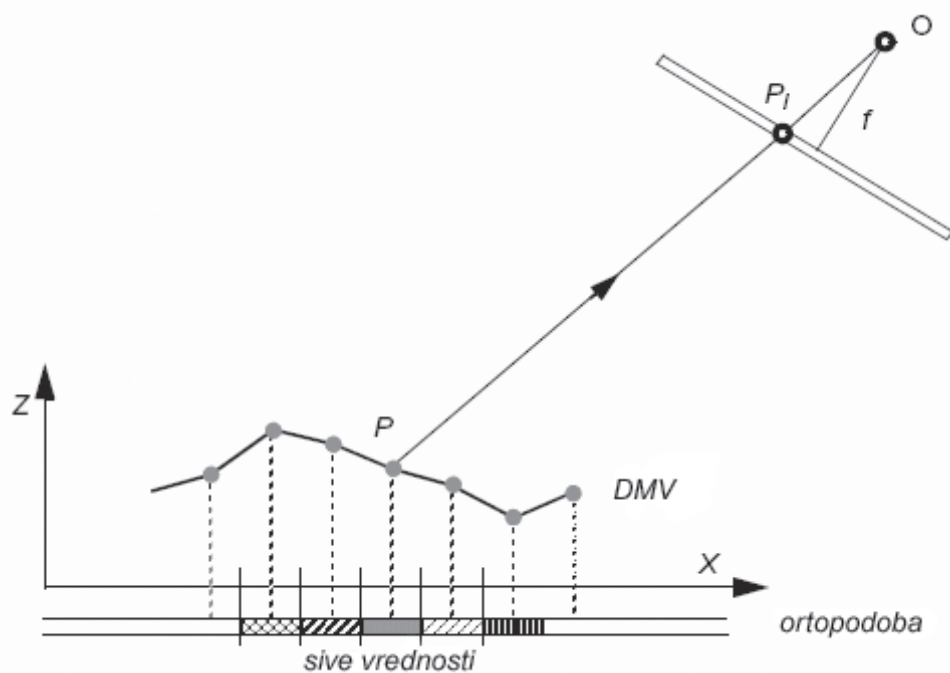
Ortorektifikacija je pretvorba posnete podobe v njeno ortogonalno projekcijo, kar dosežemo s procesom zmanjšanja različnih geometričnih napak, ki jih vsebuje izvorna podoba. Najpogostejši dejavniki, ki pripomorejo k nastanku geometričnih napak, so (Leica, 2004):

- natančnost orientacije senzorja,
- sistematične napake senzorja,
- učinek premaknjenosti reliefa na podobi (relief displacement) in
- neupoštevanje ukrivljenosti Zemlje.

Parametre orientacije senzorja dobimo s triangulacijo bloka. Z uporabo metode najmanjših kvadratov med procesom triangulacije lahko zmanjšamo napake, ki so povezane z nestabilnostjo senzorja. Pri tem je treba poudariti, da imajo senzorji SPOT zelo stabilno notranjo geometrijo. Z izbiro primerne programske opcije se učinek ukrivljenosti Zemlje upošteva in odpravi v procesu triangulacije, učinek premaknjenosti reliefa na podobi pa z uporabo modela višin med procesom ortorektifikacije.

Proces ortorektifikacije iz "surove" podobe izdela ortorektificirano podobo. Pri tem uporabi le rezultate triangulacije in DMV, ki pokriva obravnavano območje. Po ortorektifikaciji je vsak piksel dobljene podobe "geometrično zanesljiv". To pomeni, da je vsaka meritev, ki se jo opravi na ortorektificirani podobi, praktično enaka meritvi, ki bi se jo opravilo na zemeljski površini (ob upoštevanju merila). Podoba, ki je rezultat ortorektifikacije, je v ortogonalni projekciji in jo imenujemo tudi digitalna ortopodoba (Leica, 2004). To pomeni, da je vsaka točka v podobi videti, kot bi jo gledali iz položaja, ki je točno nad njo oziroma pravokotno na Zemljo.

Program popravi učinek premaknjenosti reliefa na podobi v nekaj korakih. Najprej z uporabo kolinearne enačbe, ki je definirana s parametri zunanje orientacije, za vsako točko modela višin izračuna ustrezno pozicijo na "surovi" podobi. Za najdeno lokacijo se določi njeno sivo vrednost s prevzorčenjem okoliških pikslov. Med posamezno celico DMV in njeno upodobitvijo na podobi se izračunajo transformacijski parametri. Pozicija posameznega piksla ortofota na podobi se izračuna z uporabno teh transformacijskih parametrov. Sive vrednosti posameznega piksla pa se določi s tehnikami prevzorčenja (slika 1).



Slika 1: Iskanje sivih vrednosti (Leica, 2004).

Oznake, predstavljene na sliki 1, so:

P - točka na terenu,

P_1 - točka na podobi,

O - perspektivni center,

X, Z - terenske koordinate in

f - goriščna razdalja.

Najpogostejše tehnike prevzorčenja so metoda najbližjega soseda, bilinearna interpolacija in kubična konvolucija. Ponavadi se za izhodno podobo uporabi enaka ali večja velikost celic glede na vhodno podobo (tolerira se 10–20% razlika). Manjša velikost celic lahko vodi v napake. Za pankromatske (10 m) podobe SPOT se priporoča uporabo celic velikosti 10 m, saj večanje velikosti celic ne pripomore k izboljšanju podob (Leica, 2004).

4 POSTOPEK IZDELAVE ORTOREKTIFICIRANIH PODOB IN REZULTATI

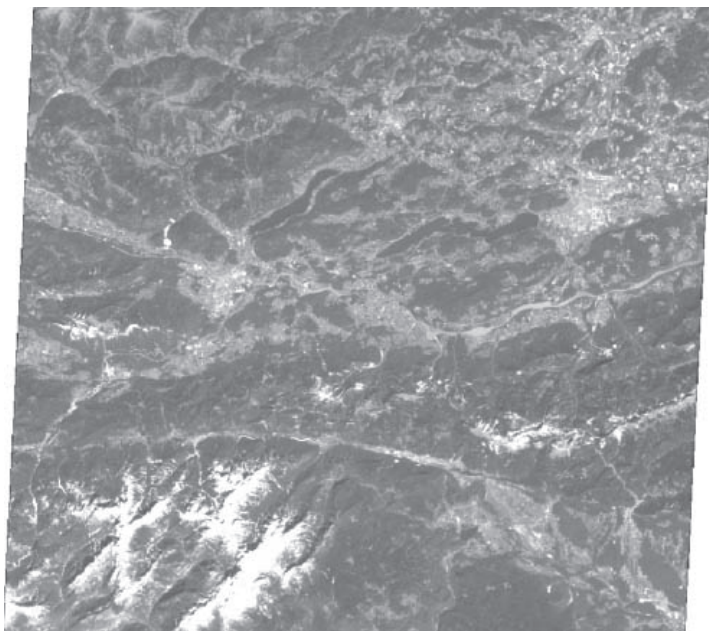
4.1 Podatki

Digitalne modele višin in ortopodobe smo izdelali iz dveh multispektralnih in dveh pankromatskih podob SPOT (preglednica 1). Trokanalne multispektralne podobe so imele prostorsko ločljivost 20 m, pankromatske pa 10 m. Posnetki so bili dobljeni leta 2000 in so služili za spremljanje

naravne nesreče pri Logu pod Mangartom (Oštir et al., 2003). Vse podobe obsegajo približno isti del površja (J del Avstrije, SV del Italije in slovenski del Julijskih Alp, del Karavank ter Pokljuko) (slika 2) in so radiometrično in geometrično popravljene. Dve podobi sta zaradi oblakov, dolgih senc in slabega delovanja detektorjev precej slabše kvalitete.

Podoba	Datum zajema	Satelit	Senzor	Način	Kot zasuka [°]
1	29. 11. 2000	SPOT 1	HRV1	P	7,7
2	29. 11. 2000	SPOT 1	HRV2	MS	7,3
3	21. 8. 2000	SPOT 2	HRV2	P	16,8
4	19. 8. 2000	SPOT 4	HRVIR1	MS	0,9

Preglednica 1: Informacije o podobah.



Slika 2: Primer uporabljene pankromatske podobe SPOT.

Podobe niso bile namenjene izdelovanju modela višin iz stereoparov. Zaradi tega tudi ne izpolnjujejo vseh pogojev, ki so potrebni za dober stereopar. Poleg slabe kakovosti podob in dolgih časovnih razmakov med snemanji stereoparov najbolj bode v oči slabo razmerje med bazo in višino leta, ki naj bi znašalo $B/H \approx 1$ (Krupnik, 2000). Pri pankromatskem stereoparu znaša $B/H = 0,17$, pri multispektralnem stereoparu pa samo $B/H \approx 0,11$. Čeprav vhodne podobe niso bile primerne za izdelavo modelov višin, smo metodo vseeno preizkusili. Pričakovano pa so bili rezultati slabi. Dobljeni modeli višin so imeli več nedefiniranih območij, kjer slikovna korelacija ni uspela, jasno so opazna tudi nekatera pogorja in doline, ki ne sovpadajo popolnoma z znanimi

predstavami o reliefu na območju slovenskih Alp. Korelacija ni povsem uspela tudi zaradi večjih senc, ki so posledica manjše višine Sonca in goratega terena ter sprememb površja na podobah zaradi daljše časovne razlike med zajetjem prve in druge podobe, ter prisotnosti območij z enostavno teksturo (sneg, gozd itd.). Ker je kakovost izdelanih modelov višin slaba, se z njimi v nadaljevanju ne bomo podrobneje ukvarjali.

4.2 Pankromatski stereopar

Za izdelavo ortopodob, ki je bila izvedena v okviru diplomske naloge (Marsetič, 2005), smo uporabili program Erdas Imagine OrthoBASE. S programom vodimo vse faze izdelave, od definiranja bloka do ortorektifikacije. Sam proces je skoraj v celoti samodejen, vendar je za kakovostne rezultate potreben tudi izkušen operater, ki vodi vse faze obdelave. Med pomembnejšimi opravili so izbira lokacij in števila zajetih točk, nastavitve pravih parametrov ter ovrednotenje delnih in skupnih rezultatov.

Preden začnemo kakršno koli fotogrametrično delo s programom OrthoBASE, moramo definirati blok. Blok je termin, ki se uporablja za določanje in opisovanje vseh informacij, ki so povezane s fotogrametričnim projektom, kot so: projekcija, elipsoid, datum; podobe; informacije o modelu senzorja; oslonilne točke; zveza med podobami in terenom (Leica, 2004). Podobam se izdelata še slikovne piramide, ki se uporabljajo pri samodejnem določanju veznih točk in samodejni izdelavi modela višin, povečavi podob, premikanju po podobi itd.

Naslednji korak je definiranje modela senzorja, s katerim se določi geometrija senzorja, kot je ta obstajala v času zajema podobe. To vključuje notranje modeliranje senzorja (notranja orientacija) in določanje zunanje geometrije uporabljenega senzorja (zunanja orientacija). Pri podobah SPOT je proces notranjega modeliranja senzorja enostaven in pogosto vključuje le preverjanje parametrov senzorja, ki se naložijo iz glave datoteke posnetka. Izbrati moramo le stopnjo polinoma parametrov zunanje orientacije, ki se bo uporabljala v procesu triangulacije. Nekoliko obsežnejša je zunanja orientacija, ki vključuje določitev oslonilnih in veznih točk ter triangulacijo. Natančno razmerje med podobami, senzorjem in površjem se lahko določi in zagotovi samo z uporabo oslonilnih točk. Na pankromatskem stereoparu smo določili 17 oslonilnih točk, ki so bile dokaj enakomerno porazdeljene po celem območju (slika 3). Točke smo ponavadi postavili na križišča cest, v visokogorju pa smo uporabili stičišča melišč. Pri tem smo upoštevali samo ozka melišča, ki so bila dobro vidna na obeh podobah. Le z njihovo uporabo smo lahko oslonilne točke enakomerno razporedili po celotnem območju, saj je bila zaradi slabe kakovosti podob večina cest slabo prepoznavnih. Horizontalne koordinate točk v Gauss-Krügerjevem koordinatnem sistemu smo dobili iz DOF5, z deklarirano horizontalno natančnostjo ± 1 m, slikovne koordinate pa smo izmerili na podobah SPOT. Višinsko koordinato smo avtomatsko (s postopkom interpolacije) pridobili iz InSAR DMV25, ki ima v hribovitih območjih deklarirano višinsko natančnost približno ± 14 m, ocenjena povprečna višinska natančnost za območje cele Slovenije pa je 4,5 m. Vezne točke smo večinoma dobili s samodejno slikovno korelacijo. Na področjih, kjer ta ni uspela, smo točke izmerili ročno in skupno dobili 78 veznih točk.



Slika 3: Razporeditev oslonilnih točk za pankromatski stereopar (podlaga: Interaktivni atlas Slovenije).

Po določitvi veznih točk je možno izvesti triangulacijo. Za oceno a-posteriori natančnosti triangulacije smo izbrali sedem kontrolnih točk. Za mero odstopanj koordinat kontrolnih točk, to je razlike med meritvami iz DOF 5 in izračunanimi koordinatami iz triangulacije, smo uporabili RMSE (angl. Root Mean-Square Error), ki je neke vrste generalizirana standardna deviacija. Rezultati triangulacije so prikazani v preglednici 2.

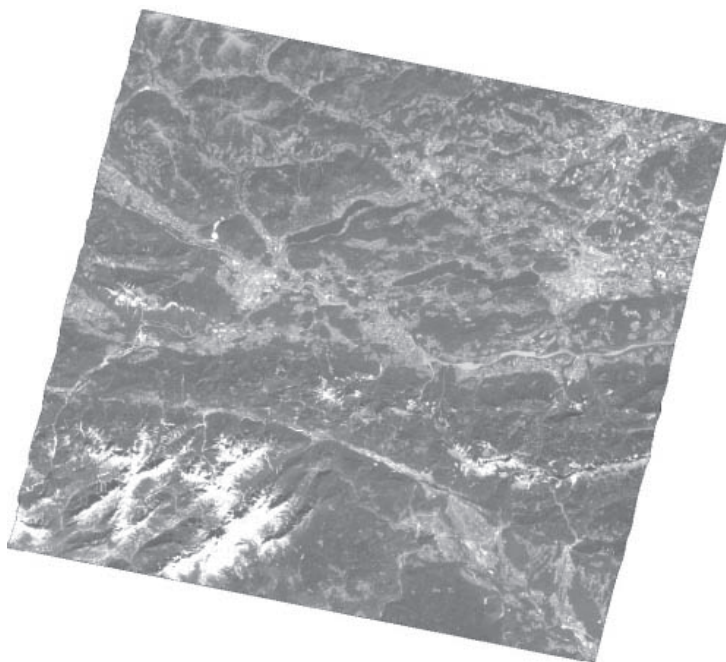
Ter. koordinata	RMSE [m]
X	18,8
Y	14,2
Z	75,3

Preglednica 2: RMSE terenskih koordinat (P).

Rezultati a-posteriori natančnosti v horizontalnih koordinatah so v pričakovanih mejah. Nekoliko natančnejša je koordinata Y. Pri tem pa je treba upoštevati, da rezultati vsebujejo tudi napake merjenja oslonilnih točk na DOF5 (teoretično vsaj pol piksela) in vira (teoretično 1 m), ki je bil podlaga za določanje koordinat oslonilnih in kontrolnih točk. Bistveno slabša je natančnost višinske koordinate, saj je njen RMSE približno štirikrat večji od RMSE horizontalnih koordinat. Razloge najdemo v natančnosti vira in razgibanosti reliefa. Ker je bilo obdelano območje gorato, je bil tak rezultat tudi pričakovan, na rezultate pa vpliva tudi slabo razmerje B/H.

Program OrthoBASE omogoča enostavno ortorektifikacijo posnetkov. Proces je interaktiven, saj je treba določiti izhodne podatke in razne parametre, ki ga vodijo. Poleg tega morajo imeti pred ortorektifikacijo vse uporabljene podobe dobro znano notranjo in zunanjo orientacijo. Pomembna je tudi izbira digitalnega modela višin, posebno pri razgibanem reliefu. Za ortorektifikacijo podob smo uporabili InSAR DMV 25. Ohranili smo enako velikost pikslov

vhodne podobe in ortofota (10 m), za metodo prevzorčenja pa smo izbrali bilinearno interpolacijo. Ortorektificirane (slika 4) in "surove" podobe so si zelo podobne. Največji vidni razliki sta zasuk podob v desno in neraven, rahlo valovit rob. Zaradi specifične smeri snemanja so vse ortopodobe, pridobljene iz satelitskih posnetkov SPOT, zasukane v desno. Manjše razlike v konfiguraciji terena so vidne le v večjih povečavah in pri razgibanem terenu. Dejanska analiza je podrobneje predstavljena v poglavju "Položajna natančnost ortorektificiranih podob".



Slika 4: Ortorektificirana pankromatska podoba.

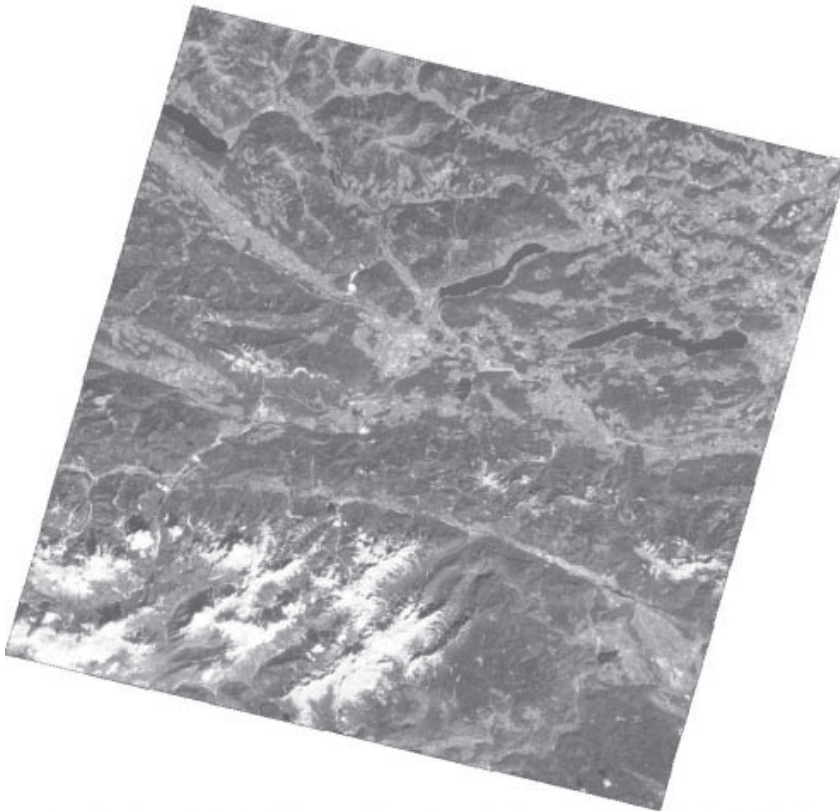
4.3 Multispektralni stereopar

Postopek izdelave ortopodob je tudi v tem primeru enak kot pri pankromatskem stereoparu, razlike so le v podatkih in parametrih. Pri multispektralnem stereoparu smo uporabili manjše število oslonilnih (12) in veznih točk (55). Slaba druga podoba je tudi razlog za manjše število točk, saj lahko s slabimi meritvami le zmanjšamo natančnost triangulacije. Po triangulaciji smo dobili RMSE terenskih in slikovnih koordinat za oslonilne točke, ki so bili boljši kot pri pankromatski izravnavi, kar seveda ni logično. Tudi RMSE za kontrolne točke so veliko boljši od pankromatskih, kar velja posebno za koordinati X in Y. Takšne, nepričakovano dobre rezultate, lahko strokovno utemeljimo le s slučajno ugodnim izidom, katerega verjetnost je v realnosti zelo majhna. RMSE terenskih koordinat za multispektralni stereopar so prikazani v preglednici 3.

Ter. koordinata	RMSE [m]
X	7,2
Y	3,4
Z	56,9

Preglednica 3: RMSE terenskih koordinat (MS).

Pri ortorektificiranju multispektralnih podob smo uporabili isti DMV in enake nastavitve kot pri pankromatskih podobah. Edina sprememba je bila velikost celic izhodne podobe, za katere smo uporabili velikost 20 m. Po ortorektifikaciji smo dobili podobi (slika 5), ki sta imeli enake lastnosti kot ortorektificirani pankromatski podobi.



Slika 5: Ortorektificirana multispektralna podoba.

5 POLOŽAJNA NATANČNOST ORTOREKTIFICIRANIH PODOB

Položajno natančnost ortopodob smo preverili z digitalnimi ortofoti. Uporabili smo DOF5, ki ima deklarirano položajno natančnost ± 1 m in slikovne elemente velikosti 0,5 m, kar je primerna referenca za ortopodobe z slikovnimi elementi velikosti 10 m ali 20 m. Vsako podobo smo razdelili v več (odvisno od obsega podobe) podobmočij, ki so vsebovala po en tip oblike površja (gorovje, dolino, planoto itd.); območja smo poimenovali po toponimih, to je dolinah, planotah, najvišjih vrhovih, mestih itd. Skupno smo na vsaki podobi SPOT posebej izmerili približno 100 točk in jih primerjali z njihovim položajem na posnetkih DOF5. Zaradi pomanjkanja značilnih objektov smo izpustili vsa štiri gorata območja in Mežaklo.

Iz dobljenih razlik po obeh koordinatah smo izračunali povprečno odstopanje (razdaljo) (preglednica 4) med pravim in dobljenim položajem primerjanih točk. Povprečno odstopanje (enačba 1) smo izračunali za cele podobe in za posamezne skupine:

$$po = \frac{\sum_{i=1}^n \sqrt{o_{ix}^2 + o_{iy}^2}}{n}, \quad (1)$$

kjer je:

po – povprečno odstopanje,

o_{ix} – posamezna odstopanja za X,

o_{iy} – posamezna odstopanja za Y in

n – število opazovanj.

Podobmočje	Podoba 1 (P, 10 m)	Podoba 2 (MS, 20 m)	Podoba 3 (P, 10 m)	Podoba 4 (MS, 20 m)
Kr. Gora	14,7 m	16,1 m	13,8 m	13,8 m
Jesenice	8,7 m	7,6 m	14,1 m	14,5 m
Vrata	11,0 m	17,8 m	13,2 m	13,6 m
Planica	10,3 m	13,6 m	12,8 m	8,0 m
Trenta	11,4 m	18,2 m	20,3 m	15,7 m
Log	16,9 m	18,0 m	20,6 m	14,5 m
Pokljuka	11,6 m	14,8 m	9,5 m	14,5 m
Radovljica	-	-	9,9 m	8,6 m
Tržič	-	-	7,4 m	-
Jelovica	-	-	7,1 m	15,9 m
SKUPNO	12,0 m	15,6 m	12,6 m	12,9 m

Preglednica 4: Povprečno odstopanje na kontrolnih točkah za posamezna podobmočja.

Pri interpretaciji rezultatov moramo upoštevati, da imata podobi 1 in 3 prostorsko ločljivost 10 m, podobi 2 in 4 pa 20 m. Pričakovali bi, da bomo pri podobah z večjo prostorsko resolucijo (10 m) dobili boljše rezultate kot pri podobah z manjšo prostorsko resolucijo (20 m), vendar

prikazani rezultati v preglednici 4 tega ne potrdijo. To bi lahko ponovno razložili s slučajno ugodnim izidom. Od podobmočij imajo najmanjša odstopanja Jesenice, Planica, Radovljica in Tržič, največja pa Trenta in Log. Najbolj zanimivi so rezultati podobe 3, kjer so najmanjša odstopanja v desnem delu podobe. Odstopanja so tudi do polovice manjša kot na preostali podobi. Razlog je najverjetneje oblika reliefa, saj je desna stran pretežno ravninska in nima večjih višinskih razlik. Ravne površine pa niso tako odvisne od modela višin, ki se ga uporabi pri ortorektifikaciji, kot so to gorata področja. Poleg tega je tudi interpolacija ravninskih delov pri izdelavi ortopodob enostavnejša in točnejša.

6 ZAKLJUČEK

V študiji smo pokazali postopek izdelave ortopodob iz satelitskih posnetkov SPOT. Rezultati triangulacije pankromatskega stereopara so bili v pričakovanih mejah, česar pa ne moremo trditi za multispektralni stereopar, kjer smo dobili nepričakovano dobre rezultate, ki jih lahko utemeljimo le s slučajno ugodnim izidom. Zaradi konfiguracije terena so nekoliko slabše le višinske koordinate. Pri triangulaciji zadošča tudi manjše število kvalitetnih oslonilnih točk, vendar večje število veznih točk da boljše rezultate, smiselna pa bi bila tudi uporaba veznih točk z znano višino. Tudi rezultati primerjave dobljenih ortopodob z DOF 5 so bili nepričakovani, saj so bila odstopanja pri podobah z večjo in manjšo prostorsko resolucijo skoraj enaka. Odstopanja so bila velikostnega reda enega piksla pri pankromatskem stereoparu in manj kot piksel pri multispektralnem stereoparu, kar odraža rezultate triangulacije. Študija natančnosti posameznih podobmočij ne kaže na povezanost boljših rezultatov z določeno geografsko značilnostjo ali določeno lego v podobi. Pri tem je treba upoštevati dejstvo, da zaradi pomanjkanja značilnih objektov niso bila posebej obdelana gorata področja, kjer je proces ortorektifikacije najbolj odvisen od uporabljenega modela višin. Dobljeni rezultati so primerljivi z rezultati nekaterih avtorjev (Al-Rousan, 1997), ki za srednjeločljive pankromatske podobe SPOT navajajo najboljši RMSE okoli 10 m. Ker imajo ortopodobe le "srednjo" ločljivost, je njihova uporabnost omejena. Primerne bi bile le za kartiranje v srednjih in nekaterih velikih merilih (1 : 50 000 in manjša).

Iz vhodnih podob smo izdelali tudi digitalne modele višin, ki pa so bili zelo slabe kakovosti in nezanesljivi, torej neuporabni. Za izdelavo uporabnih modelov višin so nujno potrebni boljši podatki, ki zadoščajo vsem pogojem izdelave. Poleg tega je kvaliteta modelov višin odvisna tudi od površja, ki ga podobe prikazujejo, saj so rezultati za gorata območja slabši. V tem primeru je prišla veliko bolj do izraza pomanjkljiva slikovna korelacija, ki je odvisna predvsem od vhodnih podatkov. Poleg tega, da so bili podatki slabe radiometrične kakovosti, je bila njihova največja pomanjkljivost slabo razmerje baza/višina (B/H), ki je zelo pomembno pri računanju paralakse in določanju višin v modelu. S primernimi podatki in obdelavo lahko dobimo dober DMV, ki je uporaben tudi za izdelavo ortopodob, kar so potrdili tudi nekateri avtorji (Krupnik, 2000).

Literatura in viri:

Al-Rousan, N., Cheng, P., Petrie, G., Toutin, T., Valadan, Z. (1997). Automated DEM extraction and orthoimage generation from SPOT level 1B imagery. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 8 (63), 965-974.

Fundamentals of Remote Sensing. (2004). Canada Centre for Remote Sensing (CCRS). Pridobljeno 20. 10. 2004 s spletne strani: http://www.ccrs.nrcan.gc.ca/ccrs/learn/tutorials/fundam/chapter2/chapter2_12_e.html.

Gong, J., Li, Z., Zhu, Q., Sui, H., Zhou, Y. (2000). Effects of Various Factors on the Accuracy of DEMs: An Intensive Experimental Investigation. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 9 (66), 1113–1117.

IMAGINE OrthoBASE User's Guide (2004). Atlanta: Leica Geosystems GIS & Mapping Division.

Kramer, J. H. (2002). *Observation of the Earth and its Environment: Survey of Missions and Sensors*. Berlin. Pridobljeno 20. 10. 2004 s spletne strani: http://directory.eoportal.org/pres_SPOT1.html.

Krupnik, A. (2000). Accuracy Assessment of Automatically Derived Digital Elevation Models from SPOT Images. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 8 (66), 1017–1023.

Marsetič, A. (2005). *Izdelava digitalnega modela višin in ortopodob iz satelitskih posnetkov SPOT*. Diplomska naloga. Ljubljana: Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Oddelek za geodezijo.

Oštir, K., Veljanovski, T., Podobnikar, T., Stancič, Z. (2003). Application of satellite remote sensing in natural hazard management : the Mount Mangart landslide case study. *International Journal of Remote Sensing* 24 (20), 3983–4002.

SPOT. (2004). Singapore: Centre for Remote Imaging, Sensing and Processing (CRISP); National University of Singapore. Pridobljeno 20. 10. 2004 s spletne strani: <http://www.crisp.nus.edu.sg/spot/spot.html>.

Spot Image S. A. (2004). Pridobljeno 20. 10. 2004 s spletne strani: http://www.spotimage.fr/html/_167_.php.

Toutin, T. (2003). Block Bundle Adjustment of Landsat 7 ETM+ Images over Mountainous Areas. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 12 (69), 1341–1349.

Vir prostorskih podatkov: DOF 5, 1999–2004; © Geodetska uprava Republike Slovenije.

Prispelo v objavo: 31. maj 2006

Sprejeto: 15. december 2006

Aleš Marsetič, univ. dipl. inž. geod.

Znanstvenoraziskovalni center SAZU, Novi trg 2, SI-1000 Ljubljana

E-pošta: ales.marsetic@zrc-sazu.si

dr. Kristof Oštir, univ. dipl. fizik

Znanstvenoraziskovalni center SAZU, Novi trg 2, SI-1000 Ljubljana

E-pošta: kristof@zrc-sazu.si