

DIGITALNI MODEL VIŠIN SLOVENIJE InSAR 25

dr. Krištof Oštir *, mag. Tomaž Podobnikar *,
dr. Zoran Stančič *, Jurij Mlinar **

KLJUČNE BESEDE:
digitalni model višin,
radarska
interferometrija

Izvleček

Znanstvenoraziskovalni center Slovenske akademije znanosti in umetnosti je po naročilu Geodetske uprave Republike Slovenije s tehniko radarske interferometrije izdelal digitalni model višin (InSAR 25). Za izdelavo so bili uporabljeni radarski posnetki Evropske vesoljske agencije (ESA). Interferometrični model z ločljivostjo 25 m in povprečno višinsko natančnostjo manj kot 5 m nudi trenutno najkakovostnejše podatke višin za območje celotne Slovenije. Projekt je pomemben tudi zato, ker predstavlja enega redkih primerov uporabe radarskih satelitskih posnetkov za izdelavo digitalnega modela višin za večje območje ali celotno državo sploh.

Abstract

Digital elevation model InSAR 25

Scientific Research Centre of the Slovenian Academy of Sciences and Arts applied radar interferometry to produce digital elevation model for the Surveying and Mapping Authority of the Republic of Slovenia. For the production of the digital elevation model (InSAR 25) radar imagery of the European Space Agency was used. The produced InSAR 25 has a spatial resolution of 25 m and 5 m average vertical accuracy for the entire Republic of Slovenia. The result of the project is internationally important because it is one of the first cases of successful application of radar imagery for large areas digital elevation models production.

KEY WORDS: *digital*
elevation model, radar
interferometry

374

1. UVOD

Razvoj tehnologije računalniške obdelave podatkov, fotogrametrije, daljinskega zaznavanja, geodetskih tehnik merjenja in drugih področij znanosti in tehnike je narekoval izgradnjo digitalnega modela reliefa in višin. V svetu zasledimo prve poskuse izdelave digitalnega modela reliefa v sredini 50-ih let. Tudi v Sloveniji ima to področje že dolgo tradicijo. O izdelavi digitalnega modela višin - DMR 100 - za celotno območje Slovenije so začeli premišljevati v začetku 70-ih let in ga leta 1973 tudi začeli izdelovati. Prvi končni rezultat - DMR 500 - za celotno Slovenijo iz sredine 70-ih let ni neposredno vplival na nadaljnji razvoj. Prvi uporaben rezultat digitalnega modela višin, DMR 100, sega v sredino 80-ih let. Izdelan je bil z digitalizacijo višinskih točk v pravilno kvadratasto celično mrežo ločljivosti 100 x 100 m. Kot osnova za zajem podatkov so služile predvsem topografske karte TTN 5 in TTN 10. DMR 100

je bil na začetku izdelave občudovanja vreden dosežek v evropskem in svetovnem merilu. Na žalost pa je bil ta izdelek do letošnjega leta edini model višin, ki je prekrival celotno območje Slovenije. Predvsem zaradi slabše natančnosti in tudi ločljivosti (Radovan, 1991; Stančič et al., 1999) je ta model višin za današnje uporabnike večinoma nepripraven in zastarel.

Sredi 90-ih let so v okviru projektov Geodetske uprave RS pričeli s sistematičnim zajemom podatkov za model višin s celično mrežo ločljivosti 25 x 25 m - z izdelavo DMR 25. Omenjeni model višin izdelujejo s fotogrametričnimi metodami vzporedno z izdelavo ortofoto načrtov (DOF 5). Osnovni vir so posnetki cikličnega aerosnemanja Slovenije (CAS) v merilu 1 : 17.500. DMR 25 je trenutno izdelan za 2437 od skupaj 3258 listov TTN 5. Izdelava DMR 25 bo zaključena v sredini prihodnjega leta s pokritjem celotne Slovenije, s čimer se bo začela faza vzdrževanja.

Oba predstavljena modela višin, DMR 100 in DMR 25, sta plod izdelave več izvajalcev in zaradi tega na posameznih območjih nehomogena. Sestavljena sta iz posameznih delov (blokov ali listov kart), ki so naknadno brez prekrivanja robov sestavljeni v celični model.

V zadnjem desetletju ter predvsem v zadnjih letih je zaslediti opazen razvoj tehnik izdelave digitalnega modela višin. Največji razcvet doživljata predvsem tehniki radarske interferometrije in laserskega skeniranja. Slednja omogoča zajem podatkov s pomočjo odboja laserskega signala od površja Zemlje. Oddajnik in senzor sta navadno pritrjena na letalu ali helikopterju. S to tehniko dosežemo višinsko natančnost od 0,1 m do 0,5 m za odprta in zmerno razgibana območja. Tehnika je še sorazmerno draga, zato je primerna predvsem za izdelavo natančnih digitalnih modelov višin na manjših območjih. Kljub visokim stroškom izdelave pa nekatere države lasersko skeniranje že uporabljajo za zajem podatkov višin na nivoju cele države (Knabenschuh et al., 1999).

V začetku 90-ih let so se začeli uveljavljati radarski satelitski posnetki in s tem radarska interferometrija, ki med drugim omogoča tudi izdelavo digitalnega modela višin. Pravo revolucijo v interferometriji in radarskem daljinskem zaznavanju nasploh je povzročil satelit ERS-1, ki ga je Evropska vesoljska agencija izstrelila julija 1991 in se je izkazal kot pomemben vir podatkov o okolju (Oštir, 2000). Z interferometrijo lahko pridobivamo podatke o višinah za izdelavo topografskih kart, z diferencialno metodo lahko merimo zelo majhne relativne premike zemeljskega površja, opazujemo površinske vodne tokove, določamo tipe tal ipd. Pred približno petimi leti smo se tudi pri nas začeli ukvarjati z analizami možnosti izdelave digitalnega modela višin in z zaznavanjem premikov zemeljskega površja. V letih 1999 in 2000 smo na Znanstvenoraziskovalnem centru SAZU izdelali interferometrični digitalni model višin s celično mrežo 25 x 25 m, InSAR 25, ki ga opisujemo v tem članku.

2. INTERFEROMETRIČNI MODEL VIŠIN

Razvoj radarske interferometrije je vplival na pospešitev izdelave kakovostnega digitalnega modela višin za območje Slovenije. Pomemben korak pri tem je bila izdelava homogenega modela višin InSAR 25 z ločljivostjo 25 x 25 m za Slovenijo. V nadaljevanju si bomo ogledali osnovne korake pri izdelavi InSAR 25.

2.1 Osnove radarskega daljinskega zaznavanja

Radarsko daljinsko zaznavanje ima veliko ugodnih lastnosti, kot so neobčutljivost za vremenske pojave, možnost snemanja ponoči ter veliko število delujočih radarskih, predvsem satelitskih sistemov. Snemanje z radarjem močno spominja na fotografiranje z bliskavico, saj z mikrovalovnim elektromagnetnim valovanjem »osvetlimo« območje na zemeljskem površju in naredimo njegovo »sliko« (Oštir et al., 1996). Snemanje si lahko predstavljamo kot fotoaparata, ki z bliskovno lučjo pošlje svetlobni impulz, nato pa na film zabeleži njegov odboj. Namesto kamere, leč in filma uporablja radar antene in računalniške medije, ki zaznavajo in zapisujejo posnetke. Na radarskih posnetkih, ki jih dobimo, lahko vidimo samo elektromagnetno valovanje, ki se je odbilo nazaj v smeri antene (Freeman, 1996). Radar je torej aktivni inštrument, antena proti površju Zemlje pošlje mikrovalovni signal, signal se na površju razprši v vse smeri, antena zazna odbito valovanje (slika 1). Jakost odbitega valovanja določajo: krajevni vpadni kot, razgibanost ter prevodnost in dielektričnost zemeljskega površja.

376

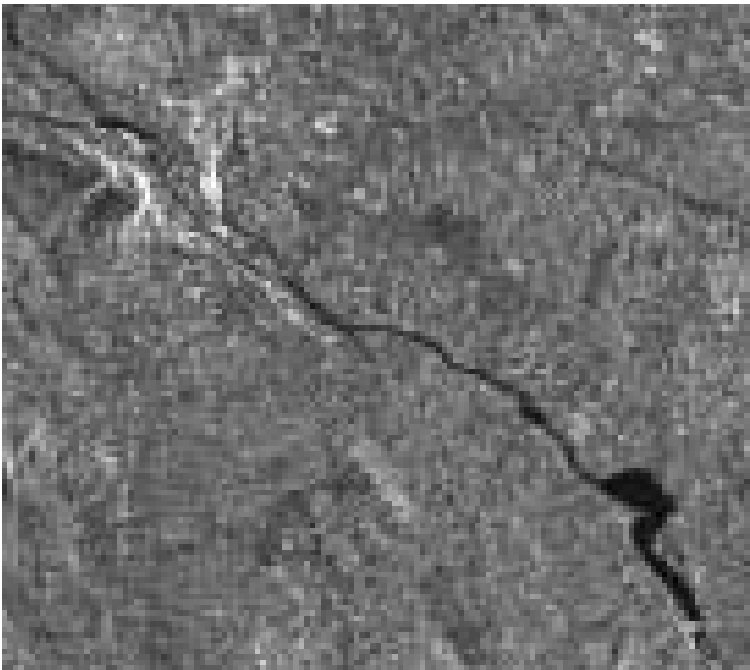
Slika 1: Radar usmeri impulz proti površju Zemlje in meri njegov odboj



Radaru, ki opazuje površje Zemlje nekoliko vstran od nadirja, pravimo radar bočnega pogleda. Dolžina antene vpliva na azimutno ločljivost, torej ločljivost v smeri leta. Čim daljša je antena, boljša je ločljivost v tej smeri. Tako imenovan radar z umetno odprtino (synthetic aperture radar, SAR) s posebno tehniko iz sorazmerno kratke antene ustvari navidezno zelo dolgo anteno. Pri tem sestavi več zaporednih signalov (odbojev), ki jih radar

sprejme med premikanjem v smeri leta. »Odprtina« v tem primeru predstavlja celotno razdaljo, na kateri radar zaznava energijo, odbito z zemeljskega površja, in jo sestavlja v posnetek.

Pri radarskih posnetkih imamo poleg drugih virov šuma (merilniki, prenos informacij ipd.) opravka še z zrnatostjo. Zrnatost povzročijo naključno posejani posamični sipalci znotraj danega slikovnega elementa (piksla). Nekateri izmed teh so sorazmerno majhni, na primer velikosti radarskih valov (nekaj centimetrov). Če je več sipalcev natanko enako oddaljenih od senzorja, se odbito valovanje lahko močno ojača. Zaradi te, tako imenovane konstruktivne interference, je na posnetkih nekaj slikovnih elementov videti nesorazmerno svetlih, medtem ko so lahko sosednji slikovni elementi zaradi destruktivne interference zatemnjeni. Rezultat omenjenega pojava je slika, ki je videti, kot da bi bila »posejana s poprom in soljo«, kar lahko povzroči precej neprijetnosti pri ovrednotenju.



Slika 2: Zrnatosti se pri radarskih posnetkih ne moremo izogniti. Slika prikazuje območje Sorškega polja s Kranjem levo zgoraj in jezo hidroelektrarne Mavčiče desno spodaj

2.1.1 Matematično ozadje

Recimo, da imamo par kompleksnih radarskih posnetkov, narejenih iz rahlo premaknjenih tirnic. Ugotovimo lahko, da je višina točk na posnetkih povezana s fazno razliko med njima.

$$h(y, \phi) = H - y \cos \left(\xi - \arcsin \left(\frac{\lambda \phi}{2\pi p B} \right) \right)$$

ali približno

$$h(\phi) \approx h_n \frac{\phi}{2\pi},$$

kjer je osnovna razdalja (razdalja med dvema antenama) podana z dolžino B in kotom usmerjenosti glede na vodoravno ravnino \hat{i} , h je višina reliefa, H višina orbite (nad izbranim referenčnim elipsoidom), h_n nedoločnostna višina (višina, pri kateri je razlika poti žarkov obeh satelitov enaka valovni dolžini), y horizontalna razdalja med satelitom in točko odboja valovanja na zemeljskem površju, ϕ faza. Faktor p pove, ali valovanje oddajata in sprejemata obe anteni oziroma ali ga ena oddaja, sprejemata pa obe.

2.2 Postopek interferometrične obdelave za izdelavo InSAR 25

Postopek izdelave interferograma in digitalnega modela višin InSAR 25 je, kljub dokaj preprosti teoretični podlagi, razmeroma zapleten. Približno ga lahko razdelimo na naslednje korake:

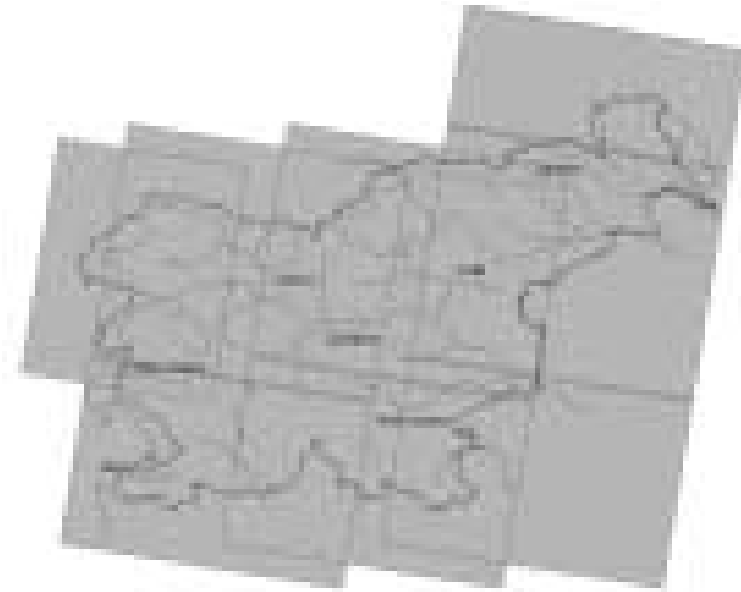
- izbira parov posnetkov,
- natančna medsebojna poravnava posnetkov,
- priprava zunanjega modela višin,
- računanje interferograma,
- izboljšanje interferograma,
- razvijanje faze,
- ustvarjanje digitalnega modela višin,
- geokodiranje,
- združevanje interferogramov in ovrednotenje kakovosti.

V nadaljevanju si bomo nekoliko podrobneje pogledali vsako izmed faz.

2.2.1 Izbira parov posnetkov

Za kompleksne posnetke satelitov ERS lahko podatke o orbitah in ugodnih parih dobimo kar na internetu na straneh Evropske vesoljske agencije (ESA). Pri izbiri para posnetkov se moramo zavedati tako teoretičnih kot tudi praktičnih omejitev. Osnovna razdalja ne sme biti niti premajhna niti prevelika. Posnetka se morata prekrivati v delu, ki nas zanima. Kljub navidez dobri izbiri lahko naletimo na težave, ki so posledica močno različnih vremenskih razmer v času zajetja posnetkov. Izbira parov posnetkov torej zelo vpliva na zmožnost obdelav. Za najbolj ugodne posnetke se je izkazal čas brez vegetacije zgodaj spomladi.

V projektu je bilo uporabljenih 26 posnetkov ERS, večinoma spuščajoče se tirnice, in sicer več produktov satelitov ERS-2 kot ERS-1. Datum zajema posnetkov se giblje v času od 1995 do 1999.



Slika 3: Uporabljeni posnetki za izdelavo modela višin InSAR 25 Slovenije

2.2.2 Natančna medsebojna poravnava posnetkov

Natančna medsebojna poravnava posnetkov je zelo pomemben in hkrati zelo zapleten korak pri interferometrični obdelavi satelitskih posnetkov. Gre za natančno poravnavo enega posnetka z drugim, pri čemer je zahtevana natančnost približno desetina piksla. Natančna medsebojna poravnava posnetkov poteka v dveh korakih: najprej posnetka grobo položimo enega preko drugega, nato pa opravimo še fino medsebojno poravnavo posnetkov. Medtem ko prvo polaganje poteka v amplitudnem prostoru (gledamo samo svetlost posnetkov), drugo izvršimo v faznem prostoru in torej upoštevamo realne in imaginarne vrednosti izbranih pikslov. V primeru, da sta posnetka narejena z različnima frekvencama ponavljanja pulza (pulse repetition frequency), moramo enega od njiju prevzorčiti, pri čemer je zelo pomembno, kakšen algoritem prevzorčenja uporabimo.

2.2.3 Priprava zunanje modela višin

Sledila je priprava zunanje modela višin, ki olajša obdelave in poveča natančnost končnega digitalnega modela višin InSAR 25. Pri tem daje dobre rezultate že površno poznavanje oblike površja. V našem primeru smo za zunanji model uporabili obstoječi DMR 100 Geodetske uprave RS, ki smo ga v ta namen pretvorili v radarsko geometrijo.

2.2.4 Računanje interferograma

Računanje interferograma je bistven korak celotne obdelave, ki pa ni zahteven niti računsko niti pojmovno. Gre namreč za množenje enega posnetka s kompleksno konjugirano vrednostjo drugega ali, če zapišemo z eksponentnim in običajnim zapisom kompleksnih števil:

$$A_1 e^{i\phi_1} = (A_1 e^{i\phi_1})^* A_2 e^{i\phi_2} = A_1 A_2 e^{i(\phi_2 - \phi_1)},$$
$$a_1 + ib_1 = (a_1 + ib_1)^* (a_2 + ib_2) = a_1 a_2 - b_1 b_2 + i(a_1 b_2 + b_1 a_2).$$

Kot lahko vidimo v prvi enačbi, je amplituda interferograma produkt amplitud posnetkov, njegova faza pa je razlika njunih faz. Opisani računski postopek poteka sorazmerno hitro. Pred nadaljnjo uporabo pa moramo dobljeni »surovi« interferogram še dodatno obdelati. Glavni opravili pri tem sta glajenje interferograma in odstranjevanje faze ravnega terena.

2.2.5 Izboljšanje interferograma

Gre za sklop metod za izboljšanje videza interferograma in olajšanje nadaljnjih obdelav, in sicer za odstranjevanje faze ravnega terena, zmanjševanje ločljivosti in filtriranje.

Dobljeni posnetek vsebuje tudi tako imenovano fazo ravnega terena oziroma fazni vzorec, ki bi ga satelit zaznal tudi v primeru, če bi opazoval ravnino. Omenjeno dejstvo razumemo in nas pojmovno ne moti, vendar veliko število kolobarjev na posnetkih povzroči neprijetnosti pri nadaljnjih obdelavah, zato se moramo znebiti faze ravnega terena. To lahko storimo na dva načina, odvisno od tega ali poznamo orbitalne parametre satelita (upoštevamo trajektorije satelita) ali ne (statistično odpravimo fazo).

2.2.6 Razvijanje faze

Faze, ki jih dobimo pri kompleksnih posnetkih, so nedoločene do faktorja 2π , zato moramo razlike med kolobarji integrirati (seštevati) in tako odpraviti nedoločeno ter določiti absolutno fazo. Postopek ponavadi poteka tako, da iz piksla z znano fazo določamo vrednosti v sosednjih pikslih. Dobljeni rezultati seveda niso natančno določeni, saj bi morali pri računih upoštevati fazo začetnega piksla, ki pa je ne poznamo. Vendar to ne predstavlja nikakršne ovire, ker je pri nadaljnjih računih ne potrebujemo. Obrnjena faza namreč že kaže obliko terena.

2.2.7 Ustvarjanje digitalnega modela višin

Razvita absolutna faza, kot rečeno, že podaja obliko opazovanega zemeljskega površja. Poseben problem pa je pretvorba elipsoidnih višin, ki jih dobimo z radarsko interferometrijo, v ortometrične, kakršne uporabljamo v kartografiji in pri vsakdanji uporabi v geodeziji (na primer nivelman). Ortometrične višine modela smo pridobili s pazljivo izbiro kontrolnih točk, za katere smo poznali vse tri koordinate in jih prepoznali na radarskih posnetkih. Z njihovim upoštevanjem smo popravili podatke o tirmici in s tem omogočili neposredno pretvorbo faze v višino brez poznavanja oblike geoida. Pretvorba faze v nadmorsko višino ni enostavna in je odvisna od pravilnega določanja vodoravnih koordinat.

2.2.8 Geokodiranje

Sledi geokodiranje oziroma pretvorba iz poševne geometrije radarja v izbrani koordinatni sistem. V našem primeru gre za pretvorbo iz WGS84 v Gauss-Krügerjevo projekcijo na Besselovem elipsoidu. Uporabili smo približno 100 kontrolnih točk na posnetek. Za prilagajanje smo izbrali polinom prvega ali drugega reda tako v smeri višin kot v vodoravni smeri.

2.2.9 Združevanje interferogramov

Z združevanjem interferogramov lahko občutno izboljšamo kakovost digitalnih modelov višin. V nalogi smo uporabili glajenje z zunanjim modelom višin in koherentno uteženo združevanje. Pri glajenju z zunanjim modelom višin smo s slabšim modelom (DMR 100) izboljšali natančnost končnega modela tako, da smo poiskali trend napake in ga odstranili.

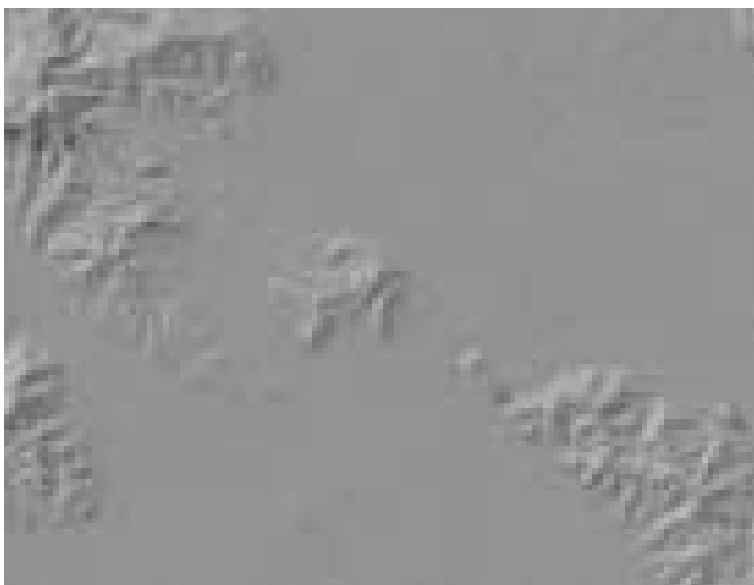
2.2.10 Ovrednotenje kakovosti

Kakovost izdelanega digitalnega modela višin InSAR 25 smo ovrednotili z nekaj neodvisnimi metodami (Stančič et al., 2000), in sicer s primerjavo raznih raztresenih točk na manjših, a morfološko različnih testnih območjih, s primerjavo s točkami, zajetimi z analitično fotogrametrično metodo ter s primerjavo z obstoječim DMR 100, delom obstoječega DMR 25 in najboljšo kombinacijo podatkov za testiranje. Glede na omenjene metode smo dobili naslednje vrednosti višinske natančnosti:

- ravninska območja ~ 2 m
- gričevnata območja ~ 5 m
- gorata območja ~13 m

Ugotovili smo, da je natančnost digitalnega modela višin InSAR 25 za Slovenijo kot celoto okoli 5 m.

Slika 4: Detajl senčenega digitalnega modela višin InSAR 25 za območje Ljubljane. Lepo se vidi vkop severne obvoznice, podutiški kamnolom, Ljubljanico in Savo, pa tudi zgradbe.



3. ZAKLJUČEK

V svetu in tudi pri nas je opaziti vedno večje povpraševanje po natančnih modelih reliefa. Tudi geografski informacijski sistemi (GIS) že nekaj časa podpirajo vključevanje modelov reliefa v kakovostne analize zemeljskega površja (na primer za izračune naklonov, osenčenosti, hidrološke analize ipd.), druge modele (na primer erozijski, vremenski ipd.) in tridimenzionalne predstavitve zemeljskega površja. Brez informacij o reliefu bi bilo nemogoče zagotoviti uspešno upravljanje za državo pomembnih evidenc, kot so na primer evidence kmetijskih in gozdnih zemljišč, hidrografije itd. Nenazadnje velja omeniti tudi razvoj interneta, ki posredno vpliva na vedno večjo povpraševanje in izmenjavo teh podatkov. Z internetskimi orodji, kot je npr. VRML, je mogoče tridimenzionalne modele reliefa učinkovito predstaviti večjemu številu potencialnih uporabnikov prostorskih podatkov.

Pomembno vlogo na področju digitalnega modela višin imata znanost in tehnika. Razvoj teh področij neposredno vpliva na tehnologijo zajema višinskih podatkov in izdelavo modelov reliefa ter višin. Velike spremembe zaznavamo tudi na področju izdelave topografskih baz podatkov, v katere zajemamo vedno več objektov tudi s tretjo dimenzijo, torej znano nadmorsko višino. Razmišlja se tudi o vključitvi produktov digitalnega modela reliefa v topografske baze, kot sta analitično senčeni relief in avtomatsko generirane plastnice.

Izdelani interferometrični model višin (InSAR 25) se naslanja na najnovejša dognanja na področju radarskega daljinskega zaznavanja. Model višin nudi trenutno najkakovostnejše podatke o reliefu za območje vse Slovenije. Za razliko od dosedanjih modelov so podatki interferometričnega modela homogeni in neodvisni, saj so izdelek enega izvajalca in se ne opirajo na klasične tehnike zajema višin. Z interferometričnim modelom višin upravlja Geodetska uprava Republike Slovenije. V izdelavi je tudi generaliziran model višin InSAR 100, ki bo uporaben predvsem za manj zahtevne analize na območju celotne Slovenije. Omenjeni model bo imel sicer enako ločljivost kot DMR 100, vendar ga odlikuje predvsem neprimerno boljša natančnost nadmorskih višin in že omenjena homogenost.

InSAR 25 vidimo kot prehodni model višin. Kmalu, torej mnogo hitreje kot smo dočakali naslednika DMR 100, bomo imeli na razpolago digitalni model višin in reliefa naslednje generacije. Načrtujemo namreč izgradnjo zbirke podatkov reliefa na osnovi dostopnih podatkov iz razpoložljivih registrov in evidenc. Zbirka podatkov bo omogočala izgradnjo učinkovitega modela za kakovostno izdelavo in vzdrževanje digitalnega modela reliefa in višin (Podobnikar et al., 2000).

Literatura

- Freeman, T.**, *What is Imaging Radar?*, Jet Propulsion Laboratory, Pasadena, 1996. (<http://southport.jpl.nasa.gov/desc/imagingradarv3.html>), zadnji obisk 13.10.2000.
- Knabenschuh, M., Petzold, B.**, *Data post-processing of Laser Scan Data for countrywide DTM production*.
- Fritsch, D., Spiller, R.** (ur.): *Photogrametric Week '99, Stuttgart September 20-24, 1999*, Wichmann, Heidelberg, Nemčija, 1999, str. 233-240
- Oštir, K.**, *Analiza vpliva združevanja radarskih interferogramov na natančnost modelov višin in premikov zemeljskega površja*. Doktorska disertacija, Univerza v Ljubljani, FGG, Oddelek za geodezijo, 2000, 175 str.
- Oštir, K., Podobnikar, T., Stančič, Z.** *Uporaba radarskih satelitskih posnetkov v prostorskih znanostih*. Geodetski vestnik, 1996, let. 40, št. 1, str. 27-35, ilustr.
- Podobnikar, T., Stančič, Z., Oštir, K.**, *Data integration for the DTM production*.
- Kosmatin Fras, M., Mussio, L., Crosilla, F.** (ur.): *ISPRS, Proceedings of the Workshop: International cooperation and technology transfer, Ljubljana, Slovenia February 2-5, 2000*, IGF, Ljubljana. vol. XXXII, part 6W8/1, 2000. str. 134-139
- Radovan, D.**, *Korekture in analiza natančnosti digitalnega modela reliefa Slovenije (DMR 100)*, Ljubljana, Naročnik Republiška geodetska uprava, Izvajalec Inštitut za geodezijo in fotogrametrijo FGG, 1991, 16 str.
- Stančič, Z., Oštir, K., Podobnikar, T.**, 1. Poročilo o rezultatih testiranja nekaterih podatkov Geodetske uprave RS. 2. Možnost izdelave DMR-ja iz obstoječih podatkov Geodetske uprave RS. Študija. ZRC SAZU, 1999, 40 str.
- Stančič, Z., Podobnikar, T., Oštir, K., Veljanovski, T.**, *Izdelava digitalnega modela višin z radarsko interferometrijo*. Končno tehnično poročilo. Naročnik: Geodetska uprava RS, Ljubljana. ZRC SAZU, 2000, 165 str.

Prispelo v objavo: 2000-10-16

Recenzija: mag. Dalibor Radovan
Niko Čížek