

# UPORABA RADARSKIH SATELITSKIH POSNETKOV V PROSTORSKIH ZNANOSTIH

Krištof Oštir-Sedej, Tomaž Podobnikar, dr. Zoran Stančič  
ZRC SAZU, Prostorskoinformacijski center, Ljubljana  
Prispelo za objavo: 1996-01-15  
Pripravljeno za objavo: 1996-02-22

## Izvleček

*Radarski satelitski posnetki se v zadnjih nekaj letih vse bolj uveljavljajo kot pomemben vir informacij o okolju. Članek opisuje fizikalne osnove mikrovalovnega daljinskega zaznavanja ter področja in možnosti njegove uporabe. Ključne besede: interferometrija, radar, SAR, satelitski posnetki*

## Abstract

*Radar satellite images are becoming increasingly important as an environmental data source. In the paper basic principles of microwave remote sensing are described and its various possible applications are presented.*

**Keywords:** *interferometry, radar, SAR, satellite images*

## 1 UVOD

Satelitski posnetki so pomemben vir podatkov o človekovem okolju, zato se vse bolj uporabljajo tako v naravoslovju kot tudi v humanistiki in družboslovju. Vedno več prostorskih raziskav uporablja tovrstne posnetke kot enega od vhodnih podatkov. V preteklosti so se uveljavili predvsem optični satelitski posnetki, ki vsebujejo podatke iz vidnega in infrardečega dela spektra, v devetdesetih letih pa so se začeli uveljavljati tudi radarski posnetki (Preglednica). Razlog je predvsem večje število satelitov z radarskimi instrumenti, kot so: ERS-1, ERS-2 (Earth Resource Satellite, Evropa), JERS (Japanese Earth Resources Satellite, Japonska) ter RADARSAT (Radar Satellite, Kanada).

Med omenjenimi sateliti sta najpomembnejša ERS-1 (izstreljen v svojo orbito julija 1991) ter ERS-2 (izstreljen aprila 1995). Satelita sta v celoti namenjena daljinskemu zaznavanju iz približno polarne orbite (naklon je  $98,5^\circ$ ) in krožita na višini 785 km. Zemljo obideta v 100 minutah. Ko bodo uravnali trajektorijo ERS-2, bosta orbiti satelitov oddaljeni 50 minut. Ta njuna sorazmerna bližina bo omogočala izdelavo digitalnih modelov reliefa iz podatkov, dobljenih z obeh satelitov. Satelita sta skoraj enaka in vsebujeta zelo podobne senzorje. Na obeh so:

- aktivni mikrovalovni instrument AMI (Active Microwave Instrument), ki je sestavljen iz navidezno odprtinskega radarja in merilnika vetrov
- radarski višinomer RA (Radar Altimeter)

- vzdolžni radimetrski skaner ATSR (Along-Track Scanning Radiometer)
- natančen instrument za merjenje razdalj PRARE (Precise Range and Range-Rate Equipment) in
- laserski reflektometer.

	<i>posnetki vidnega in bližnjega infrardečega spektra</i>	<i>termični infrardeči posnetki</i>	<i>navidezno odprtinski radarski posnetki</i>
<i>valovna dolžina (<math>\lambda</math>)</i>	<i>0,4 – 2,2 <math>\mu\text{m}</math></i>	<i>10 – 12 <math>\mu\text{m}</math></i>	<i>3 – 60 <math>\mu\text{m}</math></i>
<i>ločljivost</i>	<i>10 – 80 m</i>	<i>približno 100 m</i>	<i>10 – 30 m</i>
<i>tip senzorja</i>	<i>pasiven</i>	<i>pasiven</i>	<i>aktiven</i>
<i>izvor sevanja</i>	<i>sonce</i>	<i>črno telo</i>	<i>radar</i>
<i>geofizikalni parametri</i>	<i>albedo</i>	<i>temperatura</i>	<i>dielektričnost, geomorfološke lastnosti</i>
<i>prodiranje skozi oblake</i>	<i>ne</i>	<i>ne</i>	<i>da</i>
<i>prodiranje v prst</i>	<i>ne</i>	<i>ne</i>	<i>da</i>
<i>prodiranje skozi vegetacijo</i>	<i>ne</i>	<i>ne</i>	<i>da</i>
<i>prodiranje skozi vodo</i>	<i>da</i>	<i>ne</i>	<i>ne</i>
<i>odvisnost od sončnega sevanja</i>	<i>da</i>	<i>ne</i>	<i>ne</i>
<i>šum/zmatost</i>	<i>nizka</i>	<i>nizka</i>	<i>visoka</i>
<i>geometrični učinki</i>	<i>(ne)</i>	<i>(ne)</i>	<i>da</i>
<i>začetek obratovanja</i>	<i>v 70-ih letih</i>	<i>v 80-ih letih</i>	<i>v 90-ih letih</i>

*Preglednica: Primerjava lastnosti optičnih, infrardečih in radarskih posnetkov*

ERS-2 nosi tudi instrument za globalno merjenje koncentracije ozona GOME (Global Ozone Monitoring Experiment; ESA, 1993). Splošen pregled radarskih senzorjev je v Dodatku.

## 2 FIZIKALNE OSNOVE RADARSKEGA DALJINSKEGA ZAZNAVANJA

Podatki, dobljeni z radarskimi senzorji, se zelo razlikujejo od optično zaznanih, zato moramo za razumevanje prvih poznati osnove delovanja radarskih sistemov in način interakcije mikrovalov z zemeljskim površjem. Oddajnik na satelitu ali letalu proti površini Zemlje pošlje radarski žarek, in sicer poševno navzdol, pravokotno na smer gibanja. Tako „osvetli“ del površine, ki je nekoliko stran od projekcije trajektorije (v primeru satelitov ERS-ja s kotom gledanja  $23^\circ$  je ta pas širok 100 km in je 250 km oddaljen od projekcije poti satelita). Radarski valovi se najprej odbijejo od bližnjih predmetov, nato pa še od daljnjih. Ker poznamo hitrost razširjanja elektromagnetnega valovanja, lahko iz izmerjenih časov potovanja žarka določimo oddaljenost predmetov, na katerih se je ta odbil. Intenziteto odbitega valovanja določa več dejavnikov, med katerimi so najpomembnejši krajevni vpadni kot, razgibanost terena ter prevodnosti in dielektričnost zemeljskega površja (PCI, 1994, Mather, 1989).

## 2.1 Vpadni kot

Če pade radarsko valovanje na odbojno ploskev skoraj ali natančno pravokotno, se bo odbilo precej močneje, kot če pade nanjo pod majhnim kotom. V tem primeru se večji del energije radarskih valov odbije stran od sprejemnika, zato so taka območja videti temna ali le šibko osvetljena. Prav zato krajevni vpadni kot najbolj odločilno vpliva na intenziteto odbitega valovanja. Vpadni kot je vsota naklona terena v smeri proti radarju in kota gledanja radarskega sistema (PCI, 1994).

## 2.2 Razgibanost terena

Vpliv razgibanosti terena najlažje razumemo na primeru morske površine, kjer so vsi drugi vplivi enaki. Kadar je voda gladka kot steklo, je odbojnost nič, saj se celotno radarsko valovanje odbije v smeri stran od detektorja. Ta pojav se imenuje zrcalni odboj. Zmeren odboj dobimo v primeru, ko je vodna gladina še vedno ravna, na njeni površini pa se zaradi vetra pojavijo drobni valovi z valovno dolžino, ki je primerljiva z radarskimi valovi. Odboj je še nekoliko močnejši, ko se valovi na površini vode lomijo. Intenziteta zaznanega valovanja je najmočnejša pri pravokotnem odbojniku, ki ga dobimo s presekom treh med seboj pravokotnih ploskev. Geometrija takega odbojnika poskrbi za to, da se vsak žarek odbije natanko v smer vpada, ne glede na usmerjenost odbojnika. Posebne kovinske odbojnike lahko uporabimo kot kontrolne točke na terenu, saj njihov močan signal enostavno ločimo od okolice (na slikah jih opazimo kot zelo svetle točke). Močan odboj pogosto dobimo tudi na stavbah, katerih stene skupaj z ravnim območjem pred njimi tvorijo delni pravokotni odbojnik.

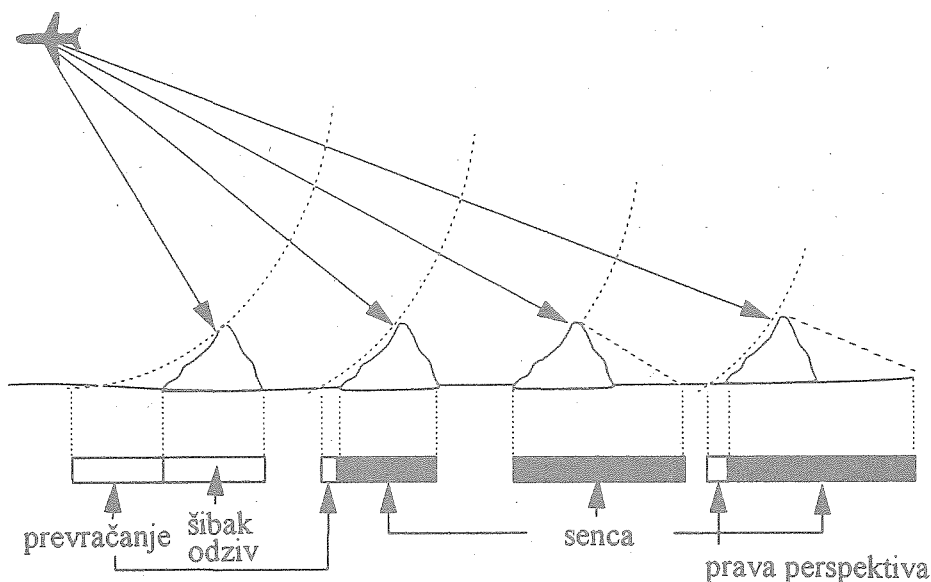
## 2.3 Prevodnost in dielektričnost površja

Kovinski predmeti, kot so na primer ladje ali pločevinaste strehe, imajo veliko električno prevodnost in zato močno odbijajo radarske valove. Pri delno prevodnih snoveh, na primer vlažni prsti ali vegetaciji, najmočneje določa odbojnost kompleksna dielektrična konstanta. Ta konstanta je odvisna tako od čiste dielektrične konstante kot tudi od prevodnosti. Ker ima voda eno največjih dielektričnih konstant med vsemi naravnimi snovmi, je odbojnost prsti in rastlin močno odvisna od vsebnosti vode. Ena najpomembnejših uporab posnetkov SAR-a (Synthetic Aperture Radar – sintetično odprtinski radar) je merjenje vlažnosti, pri čemer lahko, na primer, napovedujemo pridelek (PCI, 1994).

## 2.4 Prevrčanje in sence

V primeru optičnih posnetkov so pobočja gora ali strmejših hribov, ki so obrnjena proti kameri, podaljšana in so vrhovi navidezno bolj oddaljeni od središča slike kot so v resnici. V ortofotu taka popačenja enostavno popravijo, ne da bi pri tem izgubili podrobnosti. Pri radarskih posnetkih pa ni tako. Vrhovi zelo strmih gora so na radarskih posnetkih bližje kot njihova vznožja. Ta pojav se imenuje prevračanje. Slikovni elementi na vrhovih se pomešajo s slikovnimi elementi na pobočjih. Tega mešanja slikovnih elementov se ne moremo znebiti, kar je velika pomanjkljivost radarskih posnetkov. Prevrčanje oziroma kopičenje slikovnih elementov lahko opazimo kot svetle loke v bližini vrhov.

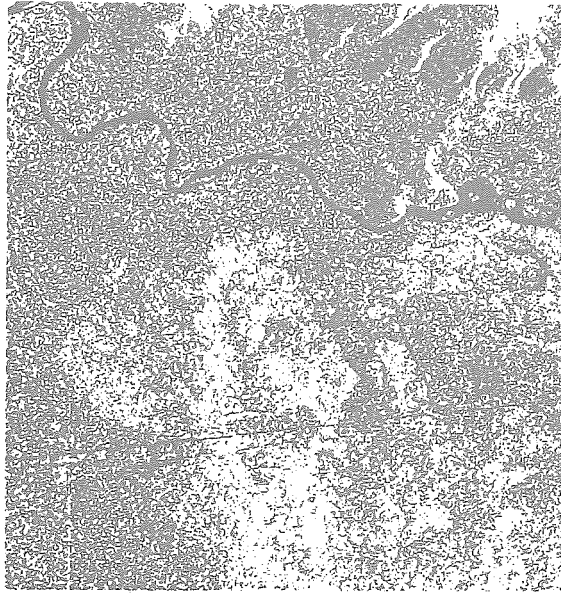
Medtem ko z radarjem izgubimo vse podatke na območju senc in prevračanja, jih pri optičnih izgubimo samo del in sicer v sencah gora. Izgube so precej večje za radarje z majhnim kotom gledanja na območjih z razgibanim reliefom. Pri posnetkih optičnih satelitov, na primer Landsat in SPOT, zaznavamo skoraj navpično odbito elektromagnetno valovanje. Zato tudi na zelo razgibanih območjih nastopi problem senc le pri nizkih vpadnih kotih sonca. Pa še v tem primeru zaradi razpršene svetlobe in lastnega sevanja sence niso povsem temne. Zato lahko tudi na takih območjih dobimo sorazmerno veliko informacij (PCI, 1994).



Slika 1: Vpliv razgibanosti terena na radarske posnetke

## 2.5 Zrnatost

Pri radarskih posnetkih imamo poleg ostalih virov šuma (merilniki, prenos informacij ...) opravka še z zrnatostjo. To povzročijo naključno posejani posamični sipalci (delci v atmosferi, ki razpršijo elektromagnetno valovanje), ki se nahajajo znotraj danega slikovnega elementa (piksla). Nekateri izmed teh so sorazmerno majhni, na primer velikostnega reda radarskih valov (nekaj cm). Če je več sipalcev natanko enako oddaljenih od sensorja, se odbito valovanje močno ojača. Zaradi 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 posejana s poprom in soljo, kar lahko povzroči precej neprijetnosti pri izrednotenju. Seveda lahko učinek zrnatosti zmanjšamo z uporabo filtrov, vendar se moramo zavedati, da s filtriranjem informacije samo izgubljam. Zrnatost je prikazana na sliki 2 (PCI, 1994).



*Slika 2: Znatost je pojav, ki se ga pri radarskih posnetkih ne moremo znebiti*

### 3 UPORABA RADARSKIH POSNETKOV

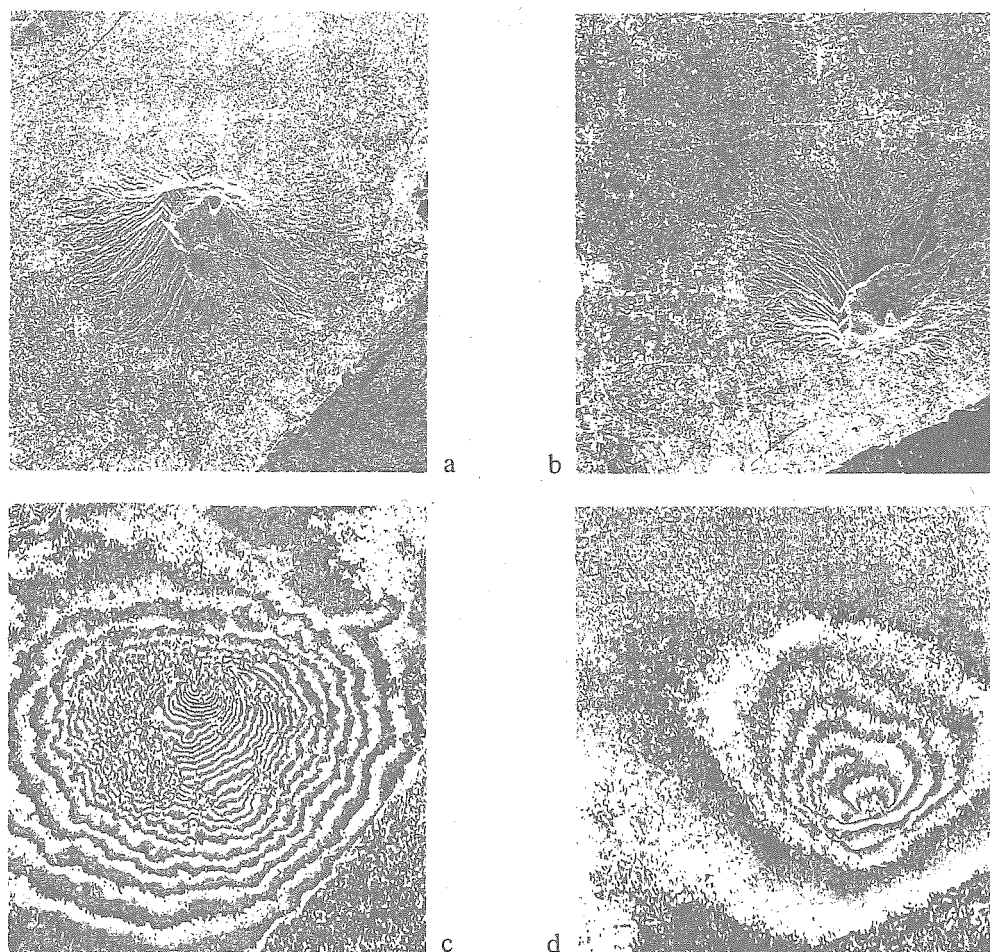
**N**ajvečja prednost radarskih satelitskih posnetkov je sposobnost prodiranja mikrovalov skozi oblake in relativno majhna občutljivost na atmosferska gibanja. So tudi sorazmerno natančni in imajo določene značilnosti, ki jih z optičnimi sateliti ne moremo doseči. Prav zato jih danes uporabljajo na najrazličnejših področjih. Posnetki SAR-a so uporabni za izdelavo geološke karte na suhih območjih, ugotavljanje zemeljskih prelomnic in udorov. S pomočjo radarskih posnetkov lahko raziskujemo geomorfološki razvoj, izvajamo paleoklimatološke raziskave, odkrivamo podzemna nahajališča pitne vode ali iščemo arheološke strukture preteklih civilizacij na puščavskih območjih z raziskavo topografskih struktur pod puščavskim peskom. S posnetki SAR-a se da zelo dobro opazovati vlažnost tal ter določati mejo med vodo in kopnim. Vodne in snežne površine lahko razpoznavamo tudi pod gostim rastlinjem. S ponavljajočimi se meritvami lahko ob znanih naklonih terena ugotavljamo smer in intenzivnost vodnega odtoka posameznih porečij. Večfrekvenčni SAR omogoča merjenje vsebnosti vode v snegu, s čimer lahko glede na višino snega napovedujemo pomladanske poplave. Z uporabo SAR-a redno opazujejo obrise plavajočih ledenih gmot v Arktičnih in Antarktičnih vodah in s tem lažjajo njihovo plovbo. Določajo tudi debelino ledu in razprostranjenost snežne odeje.

**Z** opazovanjem kontrasta dreves glede na sneg lahko ugotavljamo količino lesne mase in ocenjujemo rast dreves ter na ravnem terenu definiramo obrise gozdnih posek. Večfrekvenčni in polarizacijski posnetki SAR-a so primerni za ugotavljanje tipa poljščin in njihove dozorelosti. Najenostavneje ugotavljamo tip poljščine z optičnimi posnetki (če jih uspemo narediti), s pogostimi posnetki SAR-a pa opazujemo njihovo rast (ESA, 1995b). Posnetki SAR-a omogočajo opazovanje in

analizo morskega valovanja, na katerega vplivajo veter, oblika morskega dna in kopnega, morski tokovi itd. Vidne so tudi meje med različnimi temperaturnimi območji ali gostotami voda. S SAR-om lahko opazimo viharje in poskušamo razumeti medsebojni vpliv morja in ozračja kot pomembnega dejavnika vremena in klime (Avsec, 1992). Brez težav pa ugotavljamo razširjenost oljnih madežev na morski gladini, če le ni preveč vetrovno. Ukrepamo lahko zelo hitro (v nekaj urah) in tako preprečimo večje ekološke katastrofe (ESA, 1994).

### 3.1 Kartografija in radarska interferometrija

Posnetki SAR-a so zelo koristni pri izdelavi tematskih in topografskih kart. Podatke več vrst satelitskih posnetkov združujemo za izdelavo tematskih kart, za



Slika 3: SAR-interferometrija pri izdelavi digitalnega modela reliefa območja Vezuva (20 krat 20 km) s kombinacijo dveh interferometričnih slik z višinsko natančnostjo 6 m. Slika a prikazuje radarski satelitski posnetek spuščajoče orbite s pripadajočo interferometrično sliko b ter slika c radarski satelitski posnetek vzenjajoče orbite z interferenčno sliko d

raziskavo večjih območij pa jih mozaično sestavimo. Obstoječe topografske baze najlažje posodobljamo z opazovanjem sprememb na satelitskih posnetkih glede na obstoječe baze. Z zanesljivo kontrolo položaja (z GPS-jem) lahko podatke SAR-ahitro uporabimo v najrazličnejše namene. Radarski višinomeri določajo topografijo vodne površine, prek katere lahko kartiramo morsko dno. Za določanje oblike zemeljske površine je zanimiva tehnika določanja geoida glede na referenčni elipsoid s pomočjo znane, z radarskim višinometrom izmerjene topografije oceanov in morij (ESA, 1995a).

V kartografiji se z možnostjo uporabe radarskih satelitskih posnetkov uveljavlja tudi radarska interferometrija. Njene lastnosti so bile prvič opisane pred dobrimi dvajsetimi leti. Metoda izkorišča fazo valovanja kot natančno sredstvo za določanje razdalj. Temelji na dveh ali več enojnih kompleksnih satelitskih posnetkih, narejenih iz rahlo različnih orbit satelita (Slika 3; ESA, 1995a). Orbiti se smeta med seboj razlikovati samo za nekaj sto metrov, npr. 600 m. Iz fazne razlike med sosednjimi slikami lahko dobimo nadmorsko višino posameznih slikovnih elementov. Iz podatkov, dobljenih iz radarskih satelitov ERS-ja, lahko izdelamo natančen digitalni model reliefa za določeno območje.

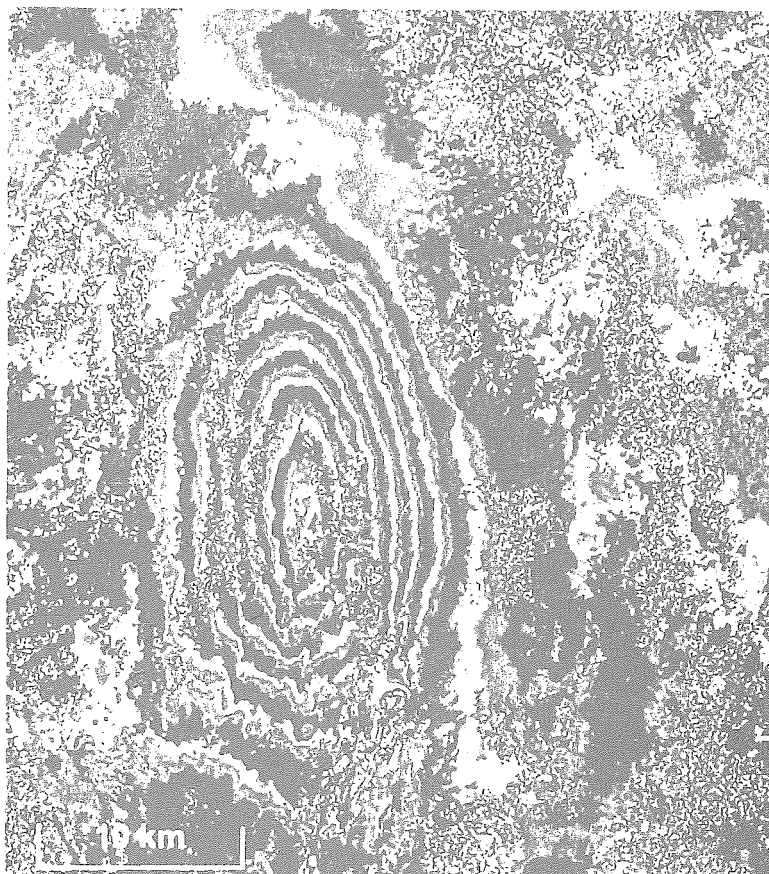
V primeru, da imamo več kot dva posnetka, lahko z metodo diferencialne interferometrije natančno (velikostni red 1 cm) določimo premik predmetov na zemeljski površini. Pri tem lahko natančno merimo premike zemeljske površine, ki so posledica potresov (Slika 4; ESA, 1995a), vulkanskih izbruhov ali premikanja ledenikov. S fazno informacijo, dobljeno iz več posnetkov SAR-a, ne odkrivamo le sprememb zaradi drugačne razgibanosti ali vlažnosti terena, ampak lahko opazujemo tudi medsebojne dekorelacije posnetkov, ki so posledica različne razvojne stopnje rastlinja. Diferencialna interferometrija omogoča izredno natančnost meritev in ima prednost pred klasičnimi, predvsem pri meritvah geotektonskega značaja.

Če želimo iz radarskih posnetkov dobiti digitalni model reliefa, moramo najprej izračunati interferogram. Interferogram podaja fazne razlike med glavnim in pomožnim posnetkom, ki morata seveda biti registrirana drug na drugega. Opraviti moramo tudi ustrezno predobdelavo posnetkov in interferograma. Na sliki lahko določimo fazno razliko v območju med 0 in  $2\pi$ . Vsakemu celotnemu faznemu prehodu ustreza določen višinski interval, ki je odvisen od valovne dolžine satelita in znaša za satelite ERS-ja približno 10 m pri razmiku orbit za 1 000 m. To pomeni, da dobimo karto z medplastnim intervalom velikosti 10 m. Te fazne vrednosti moramo nato spremeniti v višine in tako interferogram pretvoriti v digitalni model reliefa. Tako dobljeni digitalni model reliefa je precej bolj natančen kot isti iz dveh posnetkov SPOT-a. Še večjo natančnost kot pri izdelavi modela reliefa dobimo pri določanju premikov med posameznimi interferogrami. Ob primerjanju dveh interferometrično merjenih razdalj satelita do posamezne točke na zemeljski površini bi morala biti enaka nič, razen če je prišlo do:

- spremembe na zemeljskem površju zaradi rasti vegetacije, človekovega vpliva, vremenskih pojavov itd. ali
- spremembe v atmosferi v času zajemanja posnetkov.

Skratka, z radarskimi posnetki lahko zelo natančno določimo tudi premike zemeljske površine, celo na centimeter natančno. S kompleksnimi radarskimi posnetki lahko

naredimo tudi digitalni model reliefa velike natančnosti. Ravnska ločljivost točk je približno 20 krat 20 m, višinska pa je velikostnega reda meter ali celo manj. To je boljše od večine trenutno dostopnih modelov, vendar se moramo zavedati omejitvev, ki se pojavljajo predvsem v gorskem svetu. Radarske posnetke bi lahko zelo uspešno uporabili za izdelavo natančnega digitalnega modela reliefa v gričevnatem in ravninskem svetu.



*Slika 4: Diferencialna interferometrična slika premikov tal, potresa 17. maja 1993 v Eureka Valleyu, Kalifornija. Interferometrična slika je bila izdelana iz dveh posnetkov SAR-a (pred in po potresu) in digitalnega modela reliefa. Fazna razlika interferenčnega kolobarja je 14 mm.*

#### 4 ZAKLJUČEK

Satelitski posnetki se vse hitreje uveljavljajo v različnih znanostih. Glavni razlogi so vedno večja prostorska in spektralna ločljivost, napredek tehnik zaznavanja in obdelave posnetkov ter vedno boljša pokritost zemeljske površine s posnetki. Ne smemo pozabiti tudi na njihovo dostopnost in nenazadnje tudi relativno nizko ceno. Pri tem postane vprašljiva ekonomičnost uporabe marsikatere klasične geodetske metode pri merjenju in kartiranju zemeljske površine. V bližnji prihodnosti lahko pričakujemo satelitske (tako radarske kot optične) posnetke z zadovoljivo ločljivostjo,



ki bodo nadomestili sedanje aeroposnetke. Že sedaj pa lahko z radarskimi posnetki natančno opazujemo zemeljsko površino in tudi majhne spremembe na njej.

#### Dodatek

**R**adarske naprave, ki jih uporabljata satelita ERS-1 in ERS-2, so naslednje:

- AMI slikovni način (SAR), območje 100 krat 100 km, ločljivost 30 m radarski posnetki zemeljskega površja, oceanov in plavajočega ledu
- AMI valovni način (Wave), območje 5 krat 5 km, meritve na 200 km merjenje dolžine površinskih morskih valov in njihova smer
- AMI veterni način (Wind), širina pasu 500 km, ločljivost 50 km merjenje hitrosti vetra na morski gladini od 2 do 12 m/s in njegova smer
- radarski višinomer (RA), višinska natančnost < 10 cm; oceanska metoda: merjenje višine valov, hitrosti vetra, topografije morske površine; ledna metoda: topografija ledenih ploskev, tipa ledu, meja plavajočega ledu.

Za geodete najuporabnejši izdelek SAR-a, ki je dostopen na trgu, je geokodirana slika (GTC) (ESA, 1993). Velikost slikovnega elementa je 12,5 krat 12,5 m, prostorska natančnost je < 30 m, pozicijska natančnost +/- 150 m, velikost območja slike 100 krat 100 km, količina podatkov 165-288 MB, narejena je reklasifikacija v kartografsko projekcijo in v večini primerov tudi popravki zaradi razgibanosti reliefa.

#### Literatura:

*Avsec, S., Sateliti za opazovanje Zemlje – 3. Življenje in tehnika, Ljubljana, 1992, letnik XLII, št. 11, str. 69-72*

*ESA, ERS User Handbook. Noordwijk, ESA Publications Division, 1993*

*ESA, New Views of the Earth. Scientific Achievements of ERS-1, Noordwijk, ESA Publications Division, 1995a*

*ESA, SAR Ocean Feature Catalogue. Noordwijk, ESA Publications Division, 1994*

*ESA, Satellite Radar in Agriculture. Noordwijk, ESA Publications Division, 1995b*

*Mather, P. M., Computer Processing of Remotely Sensed Images. New York, Wiley and Sons, 1989*

*PCI, Using PCI Software. Richmond Hill, PCI, 1994*

#### Zahvala

Zavod za odprto družbo – Slovenija, Open Society Institute – Slovenia je omogočil udeležbo Krištofa Oštir-Sedeja in Tomaža Podobnikarja na seminarju User Applications of ERS SAR Data Training Course v Frascatiju, za kar se najlepše zahvaljujemo.

*Recenzija: mag. Vasja Bric*

*mag. Brane Pavlin (po prvi izčrpni recenziji prispevka  
odstopa od pokroviteljstva nad končno verzijo  
pripravljenega članka)*