

IZDELAVA DIGITALNIH MODELOV RELIEFA PLANETOV S POUDARKOM NA KLINOMETRIJI

THE PRODUCTION OF DIGITAL ELEVATION MODELS OF PLANETS WITH AN
EMPHASIS ON CLINOMETRY

Mihaela Triglav Čekada

UDK: 528.87
POVZETEK

Predstavljene so štiri metode za pridobivanje višinskih podatkov iz posnetkov, narejenih z aktivnimi ali pasivnimi senzorji: klinometrija, stereometrija, interferometrija in polarimetrija. Podrobno je predstavljena klinometrija, ki višinske podatke površja pridobiva iz samo enega posnetka na osnovi preučevanja senc in osenčenj. Predstavljena je izdelava digitalnih modelov reliefov planetov Merkurja, Venere in Marsa ter manjših teles Osončja, s poudarkom na uporabnosti klinometrije.

KLJUČNE BESEDE

daljinsko zaznavanje, klinometrija, digitalni modeli reliefa, planeti, asteroidi, kometi

Klasifikacija prispevka po COBISS-u: 1.04

ABSTRACT

Four methods for extracting height data from photographs made with active or passive sensors are described: clinometry, stereometry, interferometry, and polarimetry. Clinometry is described in detail. It is a method which extracts height data from just one photograph with the use of the shape-from-shading principle. Digital terrain models of planets Mercury, Venus and Mars and smaller bodies of the Solar system are described. Emphasis is given on the use of the clinometry.

KEY WORDS

remote sensing, clinometry, stereometry, interferometry, polarimetry, digital terrain models of planets, asteroids and comets

1 UVOD

Geodezija oz. različne geodetske metode niso omejene samo na Zemljo. Tudi za planete, asteroide in komete uporabljamo različne metode daljinskega zaznavanja že od samih začetkov vesoljskih raziskav. Metode določitve digitalnega modela reliefa (DMR) lahko razdelimo na interferometrijo, polarimetrijo, stereometrijo in klinometrijo. Zadnji dve lahko uporabljamo za aktivna snemanja: radar, SAR (umetnoodprtinski radar), laser, in pasivna snemanja: vizualni, IR-posnetki; prvi dve pa samo za različne tipe aktivnih snemanj. Polarimetrija se še ne uporablja v komercialne namene. Stereometrija in interferometrija sta za razliko od klinometrije in polarimetrije večslikovna postopka. Stereometrija se uporablja za SAR- in vizualna snemanja in je zaenkrat še vedno najbolj razširjena metoda, uporabljena na Zemlji. Interferometrija nam ob enakih pogojih snemanja lahko da natančnejše podatke od stereometrije, pri snemanjih v vidnem delu spektra pa ne pride v poštev.

V članku bomo podrobneje predstavili klinometrijo, ki se je za izmero na Zemlji skorajda ne uporablja več. Zasedimo jo lahko samo še pri izmeri polarnih in tropskih območij, kjer nam primanjkuje natančnejših stereoskopskih posnetkov (Paquerault in Maitre, 1998). Aktualna pa še vedno ostaja za izmero ostalih teles Osončja, saj nam omogoča pridobivanje višinskih podatkov iz samo enega posnetka. Večino teles posnamejo ob samo nekaj preletih vesoljskega telesa, pri čemer pa ne moremo pričakovati njihove pokritosti s stereopreklpom.

Metode določitve digitalnih modelov reliefa lahko razdelimo glede na ekonomičnost ali pogostost uporabe za različna telesa našega Osončja, torej različne tipe raziskovalnih sond oziroma odprav. Za izmero planetov lahko uporabljamo vse štiri prej omenjene metode z aktivnim ali pasivnim snemanjem, saj načrtujejo odprave ciljno za določen planet. Tako moramo za planet z gosto atmosfero uporabiti več aktivnih oblik snemanj kot denimo za planet s tanko atmosfero. Ker pa so programi letov sond in snemanja različnih teles, do katerih pridejo na poti, zaradi velike možnosti neuspeha misij dokaj natrpani, velikokrat kakemu telesu ne namenijo več kot preleta. Zato lahko pri asteroidih in kometih pogosto prekrijemo večino telesa s samo eno serijo slik. Torej nam za asteroide in komete razen kombiniranja slučajnih stereoparov iz dveh posnetkov, narejenih iz različnih oddaljenosti, ostane na razpolago samo še klinometrija.

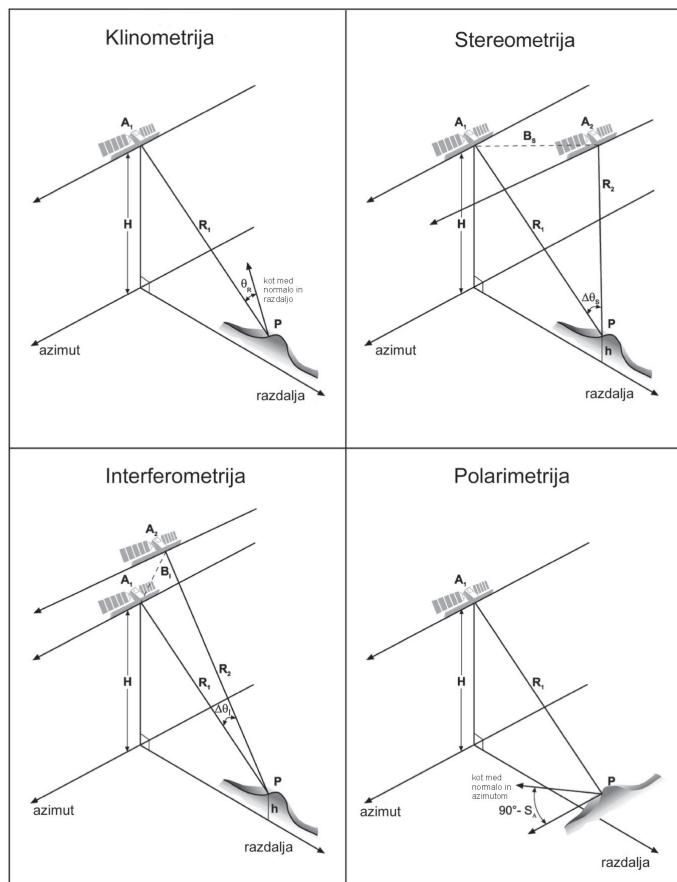
2 METODE DOLOČITVE DIGITALNIH MODELOV RELIEFA

Vse štiri prej omenjene metode pridobivanja višin lahko najhitreje ločimo, če primerjamo geometrijo satelit – površje oz. kamera – površje (slika 1). Satelit v vseh štirih primerih opišemo v koordinatnem sistemu satelita, ki je sestavljen iz treh koordinat: azimuta (smer gibanja satelita), razdalje, pravokotne na smer gibanja satelita (imenujemo jo kar razdalja), ter višine leta satelita H .

R_1 je oddaljenost prvega satelita od površja, ki ga preučujemo oz. snemamo, R_2 pa analogno razdalja drugega satelita (ali drugega preleta satelita) do površja pri metodah, kjer potrebujemo dva preleta površja z različno smerjo gledanja. Pri klinometriji je θ_R smer gledanja oz. vpadni kot snemanja določen kot razlika med normalo površja in smerjo gledanja s satelita v ravnini, določeni s koordinatnima osema razdalje in višine satelita. Pri stereoskopskem snemanju predstavlja kot $\Delta\theta_s$ razliko med vpadnima kotoma obeh satelitov oz. preletov. Enako razliko predstavlja kot $\Delta\theta_1$ pri interferometriji, le da je ta kot veliko manjši od kota $\Delta\theta_s$. Razdalja B_s je baza med satelitoma pri stereoskopskem snemanju, B_1 pa pri interferometričnem snemanju. Enako kot pri kotih je interferometrična baza veliko krajša od stereoskopske baze. B_s je običajno nekaj sto kilometrov in B_1 nekaj sto metrov. Pri polarimetriji je S_A naklon površja, definiran v ravnini azimuta in normale (opisane s koordinatnima osema azimuta in višine satelita).

2.1 STEREOOMETRIJA

Pri stereometriji dobimo višine površja (relativne in absolutne višine) na podlagi razlike med posnetkoma istega površja, posnetima iz dveh različnih kotov gledanja. Uporabljamo jo lahko za pasivna snemanja (vizualno) in tudi za aktivna (radar, SAR). Višinske razlike površja pridobivamo z odpravljanjem horizontalne paralakse. Enak princip uporabljamo za posnetke pridobljene s pasivnim ali aktivnim snemanjem. Potrebujemo pa več časa, da zaradi posebnih radiometričnih



Slika 1: Geometrija snemanj za različne metode določitve digitalnih modelov reliefa (povzeto po Toutin in Gray, 2000).

in geometričnih aspektov radarskih in umetnoodprtinsko radarskih (SAR) stereoposnetkov spregledamo radarski stereoposnetek.

2.2 INTERFEROMETRIJA

Za merjenja relativnih in absolutnih višin površja uporabljamo radarske meritve (aktivne oblike snemanja), saj bi bila uporaba vizualnih snemanj prezahtevna za izdelavo interferograma (veliko krajša valovna dolžina in od tod tudi veliko manjša dovoljena odstopanja pri postavitvi senzorjev v času snemanja interferograma). Interferometrična posnetka, ki nam predstavljata interferogram, lahko dobimo z uporabo dveh anten na satelitu v istem trenutku ali z uporabo ene antene na različnih lokacijah v dveh različnih trenutkih (dva preleta). Na interferogramu imamo predstavljene razlike v fazi odbitega valovanja z obeh posnetkov, ki nam omogoča merjenje višin celo z natančnostjo, manjšo od valovne dolžine sensorja. Eden izmed senzorjev za interferometrične meritve je senzor InSAR (interferometrični umetno odprtinski radar), ki se ga je uporabilo že za izdelavo digitalnega modela reliefa Slovenije (Oštir s sodel., 2000).

2.3 POLARIMETRIJA

Polarimetrija meri naklone in razdalje na osnovi razlik v polarizaciji odbitega valovanja (uporablja se jo pri aktivnih senzorjih). Večinoma se polarimetrijo uporablja za tematsko klasifikacijo terenov, omogoča pa tudi določanje višin. Oceno višine površja dobimo iz empiričnih primerjav, ki so povezane s predhodno analizo lokalnega naklona površja in njegove polarizacije. Za podlago uporabljamo že obstoječi digitalni model reliefa, zato polarimetrije ne moremo uporabljati za novo izmero. Polarimetrija še ni vsesplošno uporabljena metoda.

3 KLINOMETRIJA

Klinometrija je zelo stara metoda za določanje relativnih višinskih razlik na osnovi senc in osenčenj, prepoznavnih na površini površja iz samo enega posnetka. Uporablja se jo samo še v redkih primerih: predvsem za določanje višin v tropih ali za druga telesa našega Osončja. Uporabimo jo, ko ne poznamo osnovne višine površja (nimamo definiranega izhodišča površja) ali nimamo oslonilnih točk z znanimi koordinatami. Klinometrija nam lahko pomaga razvozlati mikrotopografijo površja, ne more pa izboljšati položajne natančnosti. V netopografske namene se klinometrija uporablja še za robotsko gledanje. Metoda je doživela pravi razcvet v 80. letih dvajsetega stoletja predvsem zaradi izdelave sonde Venus Radar Mapper, kjer se jo je intenzivno uporabilo.

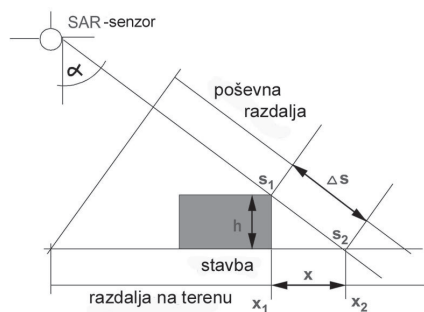
Metoda je problematična zato, ker določa višino na podlagi matematičnih modelov površja, za katere pa ni nujno, da najbolj pravilno opisujejo realno stanje. Danes jo izpodrivata stereometrija in interferometrija, ki določata višine brez predpostavk o površju.

Klinometrijo lahko izvajamo na posnetkih, narejenih v vidnem in radarskem delu spektra. Tako jo lahko delimo glede na tip posnetka na radarsko klinometrijo in fotoklinometrijo. Informacijo o višinah objektov lahko pridobimo na dva načina, iz senc in osenčenj.

3.1 Klinometrija na osnovi senc

Senca, ki jo neki objekt meče, nam da podatek o višini vzdolž značilnih linij površja (kontur). Zelo pomembno je, da senca pade na nerazgiban teren, saj jo le tako lahko uporabimo za izmero višine objekta. Sam objekt pa mora biti dokaj pravilnih oblik (stavbe, drevje, klifi in zelo strma pobočja). Dolžina sence je odvisna od kota, pod katerim osvetljuje površje izvor sevanja, ki je lahko Sonce pri pasivnih snemanjih ali kar senzor pri aktivnih snemanjih. Pri aktivnih senzorjih imamo poleg pojava sence še pojav zakritja, ko do nekega objekta elektromagnetno valovanje sploh ne pride, ker se je že prej ustavilo na nekem drugem objektu. Ker je aktivni senzor oddajno-sprejemni sistem na enem mestu, se sence in zakritja med seboj mešajo. Na SAR-posnetkih so sence popolnoma brez informacij, saj se elektromagnetno valovanje v radarskih valovnih dolžinah ne siplje tako kot vidna svetloba.

Iz poznavanja dolžine senc in geometrije satelita lahko z uporabo enostavnih trigonometričnih modelov izračunamo relativne višine objektov (slika 2). Kljub enostavni geometriji pa zelo točnih rezultatov ne moremo dobiti, saj smo zelo odvisni od resolucije posnetka in količine šuma oz.



Slika 2: Geometrija nastanka sence pri aktivnem snemalnem sistemu, npr. SAR-senzor. Merimo poševno razdaljo Δs in kot snemanja α . Izračunamo razdaljo sence na površju in iz nje višino objekta.

svetlikanj na radarskih posnetkih. Tako dobimo neostre robove senc, ki jih moramo pred obdelavo izostriti z uporabo filtrov. Šum je slučajno razporejen po posnetku in nastane zaradi tega, ker predstavlja en slikovni element na terenu odbojni center za več radarskih žarkov (Wilson in Hancock, 1999; Bolter in Leberl, 2000).

3.2 Klinometrija na osnovi osenčenj

Osenčenje je na posnetku prikazano kot spremenljiva svetlost nekega območja. Razlike v svetlosti nastanejo zaradi tega, ker so nekateri deli površja obrnjeni tako, da odbijajo več sevanja nazaj k senzorju, drugi pa manj. Osenčenje nam, za razliko od senc, da podatke o celotni površini, ne samo vzdolž kontur, kjer vidimo sence. Da lahko določimo naklon in višino območja, moramo poznati funkcijo odboja površja in lego vira snemanja.

Če predpostavimo, da je neko območje enakomerno in je odbojnost (albedo) tega območja znana, lahko uporabimo Lambertov model za homogene površine in izračunamo obliko. Pri Lambertovem modelu je odbojnost na posamezni točki neodvisna od kota gledanja, odvisna pa je od kota med izvorom sevanja in normalo površja. Če je izvor sevanja v enaki smeri, kot kaže normala površja, dobimo tam največji odboj. Nasprotno pa dobimo najšibkejši odboj tam, kjer je normala površja pravokotna na smer izvora sevanja. Lambertovo površino najlažje opišemo kot ravno mat površino (primer papir).

Lambertov model pri klinometriji uporabljamo tudi za površine s spreminjajočo se odbojnostjo, kar pomeni, da ne dobimo pravega modela višin. Od leta 1986 naprej so razvili še nekaj boljših modelov za izračun površin, ki upoštevajo tudi interakcijo radarskega snopa in površine (geometrija površine, vegetacija, lastnosti prsti ...), ki pa se v praksi ne uporabljajo veliko, saj je klinometrija zadnja desetletja v zatonu.

Poleg problema odbojnosti je problem klinometrije osenčenj še definicija vpadnega kota. Tudi če je pravilno določen, predstavlja množico možnih orientacij v prostoru. Če hočemo določiti normalni vektor površja, ki je pravokoten na površino, moramo poznati dva kota. Na vsakem slikovnem elementu snemanja z aktivnim senzorjem pa dobimo samo en podatek o svetlosti, ki pa ni dovolj za rešitev enačbe z dvema neznankama. Potrebujemo dodaten pogoj. Osnovna rešitev

problema izračuna normalnega vektorja površja temelji na Wideyjevi hipotezi o lokalni ukrivljenosti površja iz leta 1986 (Toutin in Gray, 2000). Ker pa ta metoda nima iteracije, je zelo občutljiva na vpliv napak zaradi napačne integracije površine (napačna kalibracija, šum).

4 PRIMERI UPORABE KLINOMETRIJE PRI IZDELAVI DMR-JEV PLANETOV IN MANJŠIH TELES OSONČJA

Digitalni model reliefa predstavimo tudi kot odstopanje površja telesa od rotacijskega elipsoida, ki to telo najlepše opiše. Na primer, Marsov rotacijski elipsoid se imenuje areoid (Donlin, 2002). Rotacijski elipsoid telesa moramo poznati tudi za predstavitev telesa v kartografskih projekcijah. Pri telesih nepravilnih oblik, kot so asteroidi in kometna jedra, je rotacijskemu elipsoidu ekvivalenten foboid. Ime je dobil po Fobosu, Marsovi luni, ki je prvo kartirano telo nepravilnih oblik. Foboid je množica radijev takega telesa. Radiji foboida so določeni v razmiku, ki ga predpiše kartograf, saj definira tudi natančnost, s katero bo tako telo lahko kartiral (Stooke in Keller, 1990).

Tudi pri planetih in drugih vesoljskih telesih poznamo geodetski datum, ki je definiran z naslednjimi parametri: orientacija rotacijske osi telesa v prostoru, njegova precesija, hitrost rotacije telesa, orientacija telesa v določenem izhodiščnem trenutku, velikost in oblika elipsoidnega približka referenčne ploskve sferoida planeta in njegovih odstopanj, če so ta poznana (Duxbury s sodel., 2001).

V nadaljevanju bomo predstavili digitalne modele reliefa trdnih teles Osončja. Ustavili se bomo predvsem na objektih, na katerih se je izvedlo največ meritev, ter predvsem na prikazu uporabe klinometrije. Zemljine Lune ne bomo omenjali, saj bi ji lahko namenili celoten članek. Prav tako ne bomo omenjali raziskav lun plinastih planetov Osončja, saj bi močno preseglji obseg enega članka.

4.1 Merkur

Prva in edina uspešna sonda, ki je Merkur preučevala od blizu, je bila v letih 1974–1975 sonda Mariner 10. V treh mimohodih planeta je posnela 45 % njegovega površja (Guštin, 2003; Cook s sodel., 1997). Ob vseh treh preletih je snemala planet ob enakem kotu senc in osvetljenosti. Večina stereoparov pokriva južno poloblo Merkurja. S pomočjo stereoskopije dobimo približno 17 % površja, pokritega z višinsko natančnostjo, boljše od 2 km, 12 % ima višinsko natančnost, boljše od 1 km, 8 % natančnost, boljše od 500 m, ter samo 3 % natančnost, boljše od 300 m. Izvzeta so tista območja, kjer velikost slikovnega elementa presega 3 km. Na Marinerjevih posnetkih je tudi veliko šuma, ki je v preteklosti oteževal delo na analognih instrumentih. Dandanes lahko šume odpravimo z različnimi filtri, zato so realno ti posnetki postali uporabni šele zdaj.

Območja, kjer ni stereopreklopa, so izmerjena s pomočjo fotoklinometrije, ki uporablja Lommel-Seelinger-Lambertov model odbojnosti (Wattes s sodel., 1997). Globine kraterjev merijo s klinometrijo na osnovi senc. Ta metoda je omejena na tiste kraterje, katerih sence padejo do središča kraterja, ker vemo, da samo tako zajamemo tudi najglobljo točko kraterja.

Območja, ki jih Mariner ni posnel, snemajo z interferometričnimi merjenji z Zemlje. V ta namen od leta 1991 uporabljajo dva radarska observatorija: Goldstone Solar System (Kalifornija) in Arecibo (Portoriko), kjer je Arecibo oddajnik in Goldstone sprejemik. Pred izboljšanjem radarja Arecibo v letu 2000 so dosegali resolucijo Merkurjeve topografije 15 km, sedaj pa dosežejo že 3 do 1,5 km (Harmon s sodel., 2001). Pred tem so od poznih 60. let uporabljali observatorij Haysack (Massachusetts), z dvema tipoma merjenj, ki sta dala resolucijo 100 in 5 km.

4.2 Venera

Venero je preučevalo že veliko sond, tu se bomo ustavili samo pri tistih, ki so prispevale največ podatkov za izdelavo njenega DMR-ja. Zaradi njene goste atmosfere lahko na Veneri izvajamo samo radarske meritve (izvajali so predvsem SAR-meritve).

Najizdatnejše podatke o topografiji površja je dala sonda Magellan, ki je Venero dosegla v avgustu 1990. Magellanov SAR-senzor je posnel več kot 96 % površja z največjo resolucijo 75 m – večina je posneta s 100- do 250-metrsko resolucijo (Kirk s sodel., 2000; Willis s sodel., 1997). Okoli 17 % pa je pokritih tudi z radarskim stereopreklopom, dobljenim v dveh zaporednih ciklih preleta istega območja (Burba s sodel., 2003). Geometrija stereosnemanj je zelo dobra, zato omogoča vertikalno natančnost tudi do 10 m (Kirk s sodel., 2000). Na krovu je imel Magellan SAR-senzor stranskega pogleda in radarski višinomer.

Ker je polovica planeta posneta samo ob enem prehodu Magellana, se pri izdelavi DMR-ja uporabljajo tudi SAR-posnetki sond Venera 15 in 16 z resolucijami od 1,0 do 1,8 km. Veneri 15 in 16 sta na krovu nosili identične senzorje: SAR in radarski višinomer. S snemanji sta začeli v letu 1983, v orbito pa sta se vtirili z enodnevno zamudo, tako da sta posneli ista področja površja s kotom 4° med njunima slikovnim ravninama. Za nepokrita področja pa uporabljajo še zemeljske posnetke z radarskega observatorija Arecibo, ki imajo resolucijo 2 km. Kot vezne točke med različnimi posnetki uporabljajo meritve radarskih višinomerov Magellana in Pioneer Venus Orbiterja (v orbito okoli Venere se je vtiril leta 1978). Magellanov radarski višinomer ima resolucijo od 8 do 20 km (razmik med izmerjenimi točkami), odvisno od geografske širine, na kateri je snemal (Burba s sodel., 2003).

Na območjih, kjer ni stereopreklopa, so si pri izdelavi DMR-ja pomagali z radarsko klinometrijo. Radarska klinometrija da dokaj ugodne rezultate, če se jo izvaja vpeto v mrežo točk, pridobljenih iz stereozajema.

Za izdelavo geoloških kart celotne Venere v merilu 1 : 10 000 000 načrtujejo izdelavo DMR-ja z velikostjo celice 10 km, ki ga zgoraj omenjeni podatki omogočajo (Burba s sodel., 2003). V bivši ZSSR so izdelali karte celotne Venere še natančnejšega merila – 27 radiomozaikov Venere 15 in 16 v merilu 1 : 5 000 000 (Inge in Batson, 2002). Za posamezna območja, ki so dobro pokrita s stereoposnetki Magellana, so izdelali tudi DMR-je z velikostjo celice 600 m (Kirk s sodel., 2000), kot test pa omenjajo tudi velikost celice 75 m (Davis s sodel., 2002).

4.3 Mars

Izdelavo digitalnih modelov reliefov na Marsu lahko razdelimo na globalne DMR-je, ki pokrivajo celotno površje Marsa, in lokalne DMR-je, namenjene pristajališčem sond na površju.

Prvi DMR, ki pokriva skoraj celotno površje planeta, je izdelan iz posnetkov, narejenih v vidnem spektru sond Viking 1 in 2, ki sta snemali med letoma 1976 in 1980. Resolucija, kot gledanja, kakovost in ostali parametri teh posnetkov so zelo različni, zato je iskanje stereoparov med njimi dokaj težavno. Omogočajo pa izdelavo DMR-ja planeta z velikostjo celice manj kot 1 km. Na eni tretjini planeta omogočajo Vikingovi stereopari vertikalno natančnost manj kot 300 m, na zelo majhnem delu Marsa pa celo 10 m (Kirk s sodel., 2000).

Novejši DMR celotnega Marsa pa bo izdelan iz podatkov, pridobljenih s pomočjo sonde Mars Global Surveyor, ki je snemala Mars med letoma 1998 in 2002. Orbite sonde so na ekvatorju med sabo zamaknjene za 1,3 km, ponekod tudi za 7,4 km (Rasiek s sodel., 2001). Sonda ima na krovu dva senzorja: Mars Orbiter Laser Altimeter – MOLA in Mars Orbiter Camera – MOC (Duxbury s sodel., 2001; Kim s sodel., 2000). MOLA je laserski višinomernik z višinsko natančnostjo približno 40 cm ter razmikom med dvema izmerjenima točkama na površju Marsa 300 m. Zaradi tako velikega zamika med orbitami je kar 40 % DMR-ja planeta z velikostjo celice 1,8 km izdelanega z interpolacijo med izmerjenimi točkami MOLA. Vertikalna natančnost izmere višin je bila ob snemanju 5 m, poizkusili pa jo bodo izboljšali z uporabo natančnejših tehnik rekonstrukcije orbite sonde. Prav tako bodo poizkusili izboljšati MOLA DMR na velikost celice 0,9 km s pomočjo MOC-posnetkov.

Senzor MOC je kamera, ki snema v vizualnem delu spektra in omogoča stereogrametrične in fotoklinometrične meritve. MOC je snemala z resolucijo 1,5 m v zelo ozkem kotu snemanja, zato je bilo narejenih zelo malo stereoskopskih prekrivanj. Stereoskopske meritve zato izvajajo na mešanih stereoparih MOC in Vikingov 1 in 2.

Danes je za osnovno geodetsko mrežo Marsa namenjen prej opisani, izboljšani MOLA DMR.

Posameznih regij Marsa pa se lotevajo tudi v manjši resoluciji, kjer uporabljajo vse razpoložljive posnetke in poleg stereoskopije še fotoklinometrijo. Osnovni DMR izdelajo stereoskopsko, med posameznimi točkami pa ga zgostijo s pomočjo fotoklinometrije (Rasiek s sodel., 2001). Pri fotoklinometriji uporabljajo izboljšan Lambertov zakon odbojnosti – lunarni Lambertov model odbojnosti, ki se uporablja tudi za Luno (Beyer s sodel., 2002). Take DMR-je uporabljajo za načrtovanje pristajališč roverjev (samohodna vozila za preučevanje Marsa), ki so ali bodo preučevali samo površje planeta. Za varno premikanje roverja moramo imeti izdelan DMR, ki nima več kot 1 m položajne napake. Najprej izberejo točko pristanka roverja z uporabo DMR-ja z velikostjo celice 10 m. Ob pristanku tak DMR še zgostijo z uporabo posnetkov, narejenih med pristajanjem in ob pristanku roverja. Pri avtomatizaciji izdelave takega DMR-ja jim delata probleme dva različna pogleda na območje: aeroposnetek, narejen med pristajanjem, in panoramski posnetek s tal. Na koncu tako pridobijo DMR z velikostjo celice 1 cm blizu točke pristanka in 1 m na robu območja gibanja roverja, kar je 0,6 do 1 km stran od točke pristanka (Xu s sodel., 2001).

4.4 Asteroidi in kometi

Klinometrija pride najbolj do izraza pri preučevanju vesoljskih teles, katerim je namenjen samo en mimohod sonde. Pri njih lahko izvajamo stereometrijo samo iz posnetkov, narejenih z dveh različnih oddaljenosti. Pri takih objektih je v najboljšem primeru pridobljena samo tretjina višinskih podatkov s stereometrijo, s klinometrijo pa vsi ostali. Ker asteroidi nimajo atmosfere, jih preučujejo večinoma s senzorji, ki snemajo v vidnem spektru, prav tako neaktivna kometna jedra (ko je komet še zelo oddaljen od Sonca). Ko je v bližini Sonca komet že aktiven, njegovega jedra ne moremo ločiti od kome (plinskega in prašnega ovoja okoli jedra komete). Omenimo samo asteroida Ida in Eros ter komet Borrelly.

Asteroid Ida je v letu 1993 preletela sonda Galileo na poti k Jupitru, ki ga je dosegla v letu 1995. Ob peturnem preletu osvetljene strani asteroida je sonda posnela 79 posnetkov v vidnem delu spektra z resolucijo med 25 in 1740 m. Najnatančnejši DMR $30 \times 12 \times 10$ km velike hemifobe (polovica asteroida, glej prej omenjeno ekvivalenco med rotacijskim elipsoidom in foboidom) ima velikost celice 34 m in je izdelan s pomočjo fotoklinometrije (Zeitler s sodel., 2000; Giese s sodel., 1996).

Eros (dimenzije $33 \times 13 \times 13$ km) je bil prvi asteroid z umetnim satelitom – sondo NEAR-Shoemaker, ki je na koncu misije v letu 2001 na njem tudi pristal. Na svoji poti k Erosu je sonda v letu 1997 obiskala še asteroid Mathilde. DMR Erosa so izdelali na dva načina, najprej iz vizualnih posnetkov, potem pa še iz podatkov laserskega višinomerstva, v obeh primerih z velikostjo celice 250 m. V vizualnem delu spektra je bil asteroid posnet z resolucijo 20 m, ponekod celo 5 m (Zuber in Smith, 2001).

Leta 2001 je sonda Deep Space 1 med 90-minutnim preletom posnela komet Borrelly. Jedro komete je podolgovato in je dolgo približno 8 km, najširše pa okrog 6 km. Sonda je posnela 20 črno-belih slik, izmed katerih so tri tvorile stereopare. Iz njih so izdelali DMR z velikostjo celice 48 m in vertikalno natančnostjo 120 m. Na tem DMR-ju se razločno vidijo strukture, večje od 500 m, in z višinsko razliko, večjo od 150 m (Oberst s sodel., 2002).

5 SKLEP

V članku smo pregledali izdelavo digitalnih modelov reliefov Marsa, Venere in Merkurja ter dva vzorčna asteroida in en komet. Vidimo, da največkrat uporabljajo klinometrijo za telesa Osončja, ki jim namenijo samo en prelet sonde, ostalih teles – planetov – pa se lotevajo bolj sistematično. Danes se klinometrija za izmero višin iz posnetkov Zemlje uporablja zelo redko, saj nam večšlikovna postopka (stereometrija in interferometrija) dajeta boljše rezultate.

Pri uporabi teh metod za kartografijo drugih teles Osončja pa je popolnoma drugačno razmerje. Najbolj uporabljeni metodi sta klinometrija in stereometrija, tako različica v radarskem kot v vidnem delu spektra. Za izmero osnovnih geodetskih mrež oz. začetnih mrež digitalnih modelov reliefa planetov in asteroidov pa se v novjšem času največkrat uporablja lasersko skeniranje. Ko enkrat že imamo narejeno osnovno mrežo planeta ali kakega drugega telesa v Osončju, lahko nanjo vpnemo stereoskopske ali klinometrične meritve.

Izdelava digitalnih modelov reliefov trdih planetov je identična nastanku globalnega digitalnega modela reliefa Zemlje, od definicije geodetskega datuma naprej. Razlikujeta se le po tem, da je pri izdelavi digitalnih modelov reliefov planetov treba upoštevati vse razpoložljive meritve, medtem ko lahko v primeru obdelave Zemlje uporabimo le najbolj natančne meritve. Zato kljub velikemu številu sond, namenjenih k Merkurju, Veneri in Marsu, o kakšnih digitalnih modelih reliefa enotnih natančnosti, ki pokrivajo celotna površja planetov, ne moremo govoriti. Še slabše je pri manjših telesih Osončja, ki velikokrat niso niti v celoti posneta.

Klinometrija se na telesih Osončja obnese tudi zato, ker večinoma delamo s slabimi resolucijami (veliki slikovni elementi) ter velikimi območji z enakim albedom. Prav tako nam velike napake pridobljenih digitalnih modelov višin ne delajo problemov, saj večinoma želimo dobiti iz razpoložljivih podatkov vsaj nek digitalni model reliefa, kajti novih meritev ne moremo tako preprosto naročiti kot za Zemljo.

Zato pa klinometrija na Zemlji pride v poštev edinole v območjih, ki niso ekonomsko zanimiva (polarna in tropska območja) in si financiranja novih snemanj ne moremo privoščiti. Če se spustimo še na manjša območja Zemlje, vidimo uporabnost klinometrije še v obdelavi enoslikovnih arhivskih posnetkov. Tu pa moramo paziti predvsem na to, da klinometrijo uporabljamo za pridobivanje višinskih podatkov z območij z enakim albedom (gozd, porasel z isto vrsto dreves, ledeniki, puščave ...).

Literatura in viri:

- Beyer, R. A., McEwen, A. S. (2002). *Photoclinometry measurements of meter-scale slopes for the potential landing sites of the 2003 Mars exploration rovers*. *Lunar and Planetary Science XXXIII*.
- Bolter, R., Leberl, F. (2000). *Shape-from-shadow building reconstruction from multiple view SAR images*. 24th Workshop of the Austrian Association for Pattern Recognition (OAGM/AAPR), Villach, Austria, Band 142, <http://www.icg.tu-graz.ac.at/bolter00c/>, (zadnji dostop julij 2004).
- Burba, G. A., Shashkina, V. P., Kryuchkov, V. P., Shalimov, I. V. (2003). *Cartographic support to Venglobgek international project on the general geologic mapping of Venus: the main outlines*. *Advances in Planetary Mapping 2003, Huston, Texas*, http://astrogeology.usgs.gov/Projects/ISPRS/MEETINGS/Houston2003/abstracts_houston.html, (zadnji dostop julij 2004).
- Cook, A. C., Robinson, M. S., Oberst, J. (1997). *Assessment of Mariner 10 stereo images of Mercury*. 28th Annual Lunar and Planetary Science Conference, str. 253–254.
- Davis, A. M., Ghail, R. C., Watt, L. (2002). *High resolution digital elevation model of Venus*. *Lunar and Planetary science XXXIII*, http://www.ese.ic.ac.uk/userfiles/PDF/p926_AD&RG&LW1665_02.pdf, (zadnji dostop julij 2004).
- Donlin, C. (2002). *Topographic map of Mars M 25M RKN*. <http://geopubs.wr.usgs.gov/open-file/of02-282/>, (zadnji dostop julij 2004).
- Duxbury, T. C., Kirk, R. L., Archinal, B. A., Neumann, G. A. (2001). *Mars geodesy/cartography working group recommendations on Mars cartographic constants and coordinate systems*, http://www.wflag.wr.usgs.gov/USGSFlag/Space/Isprs/MEETINGS/Flagstaff2001/abstracts/isprs_etm_OCT01_duxbury_A_mars_constants.pdf (zadnji dostop julij 2004).
- Giese, B., Oberst, J., Kirk, R. L., Zeitler, W. (1996). *High resolution digital terrain models of asteroid, Ida: a comparison between photogrammetry and the shape-from-shading method*. *Lunar and Planetary Science*, vol 27, str.409–410.
- Guštin, A. (2003). *Merkur, Spika, letnik XI, številka 1*, str.10–17.
- Harmon, J. K., Perillat, P. J., Slade, M. A. (2001). *High-resolution radar imaging of Mercury's North Pole*. *Icarus*, vol. 149, issue 1, str. 1–15.

Inge J. L., Batson, R. M. (2002). *Index of maps of the planets and satellites 1992*.

<http://astrogeology.usgs.gov/Projects/MapBook/> (zadnji dostop julij 2004).

Kim, J. R., Muller, J.-P., Morley, J. (2000). *Automated MOLA track registration in MOC and Viking images and its application for the establishment of new 3-D control points on Mars*. ISPRS, Vol. XXXIII, part B4, Amsterdam.

Kirk, R. L., Howington Kraus, E., Rosiek, M. (2000). *Recent planetary topographic mapping at the USGS, Flagstaff: Moon, Mars, Venus, and beyond*. ISPRS, vol. XXXIII, del B4, Amsterdam.

Oberst, J., Giese, B., Soderblom, L. (2002). *The nucleus of comet Borrelly: a study of morphology and surface brightness*. 33rd Annual Lunar and Planetary Science Conference, Houston, Texas.

Oštir, K., Podobnikar, T., Stancič, Z., Mlinar, J. (2000). *Digitalni model višin Slovenije InSAR25*, Geodetski vestnik, letnik 44, št. 4, str. 374–383.

Paquerault, S., Maitre, H. (1998). *Elevation Model Generation by Using Radarsat Images*, Adro final Symposium, Montreal (Quebec), Kanada.

Rasiek, M. R., Kirk, R., Howington-Kraus, E. (2001). *Utilizing Mars digital image model (MDIM) and Mars Orbiter laser altimeter (MOLA) data for photogrammetric control*. ISPRS WG IV/9 Extraterrestrial Mapping Workshop "Planetary Mapping 2001", Flagstaff, Arizona, virtual meeting.

Stooke, P. J., Keller, P. (1990). *Map projections for non-spherical worlds/the variable-radius map projections*. Cartographica, vol 27/2.

Toutin, T., Gray, L. (2000). *State-of-the-art of elevation extraction from satellite SAR data*. ISPRS JP&RS, Vol. 55, <http://www.ccrs.nrcan.gc.ca/ccrs/rd/sci-pub/bibpdf/4751.pdf> (zadnji dostop julij 2004).

Wattes, T. R., Robinson, M. S., Cook, A. C. (1997). *Topographic models for discovery rupes Mercury using digital stereophotogrammetry and photoclinometry*. 28th Annual Lunar and Planetary Science Conference, str. 509–510.

Willis, J. J. (1997). *Using single-circle Magellan radar imagery to constrain heights and slope angles of Venusian geologic features*. 28th Annual Lunar and Planetary Science Conference, str. 561–562.

Wilson, R. C., Hancock, E. R. (1999). *A reflectance model for radar shape from shading*. BMVC99, konferenca, <http://www.bmva.ac/bmvc/1999/papers/16.pdf> (zadnji dostop julij 2004).

Xu, F., Ma, F., Li, R., Matthies, L. H., Olson, C. F. (2001). *Automated generation of hierarchical DEM for Mars Rover navigation*. Proceedings of 3rd Mobile Mapping Conference, Cairo, Egipt, januar 3.–5., 2001, <http://shoreline.eng.ohio-state.edu/research/mars>, (zadnji dostop julij 2004).

Zeitler, W., Ohlhof, T., Ebner, H. (2000). *Photogrammetric point determination using digital Galileo, SSI images from asteroid Ida*. ISPRS, Vol. XXXIII, part B4, Amsterdam.

Zuber, M. T., Smith, D. E. (2001). *Comparison of shape models for 433 Eros using imaging and altimetry*. ISPRS WG IV/9 Extraterrestrial Mapping Workshop "Planetary Mapping 2001", Flagstaff, Arizona, virtual meeting.

Mihaela Triglav Čekada, univ. dipl. inž. geod.

Geodetski inštitut Slovenije, Jamova cesta 2, SI-1000 Ljubljana
mihaela.triglav@geod-is.si

Prispelo v objavo: 19. julij 2004