

UDK 551.461.2:528.225:629.783:550.83
Pregledni znanstveni članak / Review

Satelitska altimetrija: tehnologija i primjena u geodeziji

Marijan GRGIĆ – Zagreb¹, Senka JUKIĆ – Vrgorac²,
Robert Steven NEREM – Boulder³, Tomislav BAŠIĆ – Zagreb¹

SAŽETAK. Radarska satelitska altimetrija metoda je prikupljanja globalnih visokopreciznih podataka o razini mora u odnosu na odabrani geocentrični referentni okvir. Opažanja satelitskom altimetrijom omogućuju određivanje oblika i veličine Zemlje te računanje Zemljina polja ubrzanja sile teže što su i osnovne geodetske zadaće zadane definicijom geodezije. Mjerenja promjene srednje razine mora prikupljena satelitskom altimetrijom služe kao izravni pokazatelj djelovanja klimatskih promjena i drugih geofizičkih procesa na Zemlji, a primijenjena su i za definiranje visinskih sustava na kopnu i moru, izradu karata dubina, procjenu vertikalnih gibanja obalnih područja i sl. U ovom radu detaljno je prikazan osnovni koncept tehnologije uz primijenjene principe obrade radarskih opažanja. Poseban je naglasak na prikazu i analizi korekcija altimetrijskih opažanja potrebnih zbog propagacije signala kroz atmosferu te utjecaja geofizičkih fenomena vodenih površina na odaslani signal. Rad detaljno prikazuje razvoj tehnologije kroz tri faze uz analizu doprinosa svake te opisuje smjernice budućeg razvoja tehnologije. Naposljetku, prikazani su proizvodi satelitske altimetrije dostupni za primjenu u geodetske svrhe kao što su modeli anomalija ubrzanja sile teže, dubina, trendova srednje promjene razine mora i drugi.

Ključne riječi: satelitska altimetrija, promjena razine mora, obalna altimetrija, prostorni podaci.

1. Uvod

Satelitska geodezija obuhvaća geodetske mjerne tehnike koje omogućuju rješavanje globalnih i lokalnih geodetskih zadata mjenjenjem sa, prema ili između umjetnih satelita (Seeber 2008). Globalne geodetske zadaće uključuju određivanje

¹ Dr. sc. Marijan Grgić, Geodetski fakultet Sveučilišta u Zagrebu, Kačićeva 26, HR-10000 Zagreb, Hrvatska, e-mail: marijan.grgic@geof.hr,

Prof. dr. sc. Tomislav Bašić, Geodetski fakultet Sveučilišta u Zagrebu, Kačićeva 26, HR-10000 Zagreb, Hrvatska, e-mail: tomlav.basic@geof.hr,

² Senka Jukić, mag. ing. geod. et geoinf., Hrvatskih velikana 36, HR-21276 Vrgorac, Hrvatska, e-mail: senka.jukic1@gmail.com,

³ Prof. dr. Robert Steven Nerem, Colorado Center for Astrodynamics Research, University of Colorado Boulder, 429 UCB University of Colorado Boulder 80309, Sjedinjene Američke Države, e-mail: nerem@colorado.edu.

Zemljina polja ubrzanja sile teže odnosno modeliranje geoida, otkrivanje i modeliranje geodinamičkih procesa, promjena Zemljine kore i sl., dok lokalne geodetske zadaće uključuju npr. inženjersku i katastarsku izmjeru te navigaciju (ibid.). Radarska satelitska altimetrija jedna je od osnovnih satelitskih mjernih tehnika namijenjena ponajprije rješavanju globalnih geodetskih zadaća radarskim mjerenjima sa satelita prema Zemlji.

Satelitska altimetrija osigurava prikupljanje visokopreciznih globalnih podataka ujednačene točnosti o razini mora što omogućuje praćenje geofizičkih karakteristika mora i većih vodenih površina, odnosno morske topografije i cirkulacije unutar tekućih vodenih tijela. Tijekom posljednjih četiriju desetljeća satelitska altimetrija revolucionalizirala je geoznanosti, ponajviše geodeziju, oceanografiju i geofiziku (Fu i Cazenave 2000). Svoju primjenu ova metoda izmjere pronašla je u modeliranju oblika Zemlje i Zemljina polja ubrzanja sile teže, modeliranju reljefa morskog dna i vertikalnih pomaka Zemljine kore u obalnim područjima te praćenju klimatskih fenomena i dugoročnih klimatskih promjena (npr. Rapp i Bašić 1992, Cazenave i dr. 1999, Hwang i dr. 2002, Nerem i dr. 1999, Smith i Sandwell 1997). Podaci satelitske altimetrije distribuiraju se u obliku izvornih mjerenja te proizvoda spremnih za uporabu u geoznanostima, najčešće izračunatih modela ili servisa za računanje.

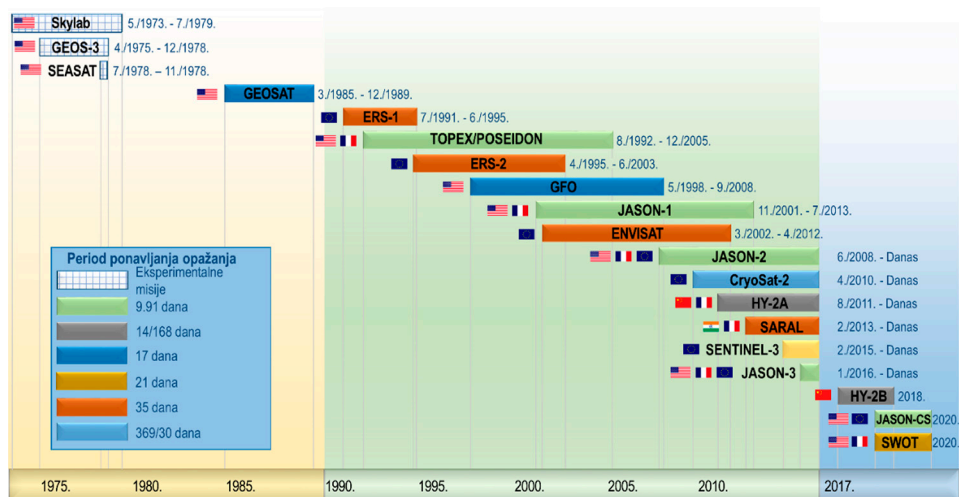
U ovom radu pregledno su prikazani osnovni principi metode radarske satelitske altimetrijske izmjere, njezin povijesni razvoj, trenutačna dostignuća i očekivana poboljšanja tehnologije u bliskoj budućnosti te su prikazani dosadašnji znanstveni i stručni rezultati u razvoju i primjeni tehnologije relevantni ponajprije za geodeziju. Ovaj pregled nastao je u sklopu doktorske disertacije dr. sc. Marijana Grgića, izrađene na Sveučilištu u Zagrebu u suradnji s University of Colorado Boulder pod mentorstvom prof. dr. sc. Tomislava Bašića i prof. dr. Roberta Stevensa Nerema. Autori su u sklopu istraživanja objavili niz radova (vidi: Grgić 2017, Grgić i dr. 2017a, Grgić i dr. 2017b, Grgić i dr. 2017c, Grgić i dr. 2017d), a nekoliko je radova u pripremi.

2. Evolucija tehnologije

Koncept satelitske altimetrije razvijen je šezdesetih godina dvadesetog stoljeća u sklopu NASA-ine (National Aeronautics and Space Administration) inicijative NGSP (National Geodetic Satellite Program) za razvoj svemirskoga geodetskog programa, a formaliziran 1969. godine u Williamstownu u Sjedinjenim Američkim Državama za vrijeme konferencije na temu čvrste Zemlje i fizike oceana (Kaula 1970).

Prethodno je konceptualno u sklopu povezanog svemirskog programa realiziran i globalni navigacijski satelitski sustav (GNSS), koji je poslije rezultirao razvojem GPS-a (Global Positioning System), čime su određene smjernice razvoja satelitske geodezije. Pred satelitsku altimetriju kao osnovni cilj za vrijeme konceptualnog razvoja postavljeno je određivanje Zemljina oblika, što se u današnjem kontekstu primjene tehnologije može smatrati ograničenom ambicijom (Vignudelli i dr. 2011).

Razvojne faze satelitske altimetrije kroz satelitske altimetrijske misije prikazane su na slici 1. Uz vremenski prikaz satelitskih misija prikazani su periodi ponavljanja opažanja te države koje su sudjelovale u razvoju pojedine satelitske misije.



Slika 1. Vremenska crta razvoja altimetrijskih misija podijeljena u tri ere – razvojnu (žuto), suvremenu (zeleno) i buduću (plavo) – uz podatke o periodu ponavljanja misija te državi u kojoj je misija razvijena (Grgić 2017).

Tablica 1. Operativne karakteristike satelitskih misija lansiranih do danas (Fu i Caze-nave 2000).

| Satelitska misija | Visina orbite (km) | Inklinacijski kut | Pokrivenost Zemlje | Udaljenost tragova na Ekvatoru (km) | Pojas | Frekvencije (GHz) |
|-------------------|--------------------|-------------------|--------------------|-------------------------------------|-------|-------------------|
| GEOSAT | 785 | 108° | 72° | 163 | Ku | 13,5 |
| ERS-1 | 785 | 98° | 81,5° | 80 | Ku | 13,8 |
| TOPEX/Poseidon | 1336 | 66° | 66° | 315 | Ku/C | 13,6/5,3 |
| ERS-2 | 785 | 98° | 81,5° | 80 | Ku | 13,8 |
| GFO | 785 | 108° | 72° | 163 | Ku | 13,5 |
| JASON-1 | 1336 | 66° | 66° | 315 | Ku/C | 13,6/5,3 |
| ENVISAT | 785 | 98° | 81,5° | 163 | Ku/S | 13,6/3,2 |
| JASON-2 | 1336 | 66° | 66° | 315 | Ku/C | 13,6/5,3 |
| CryoSat-2 | 717 | 92° | 88° | 7 | Ku | 13,6 |
| HY-2A | 964 | 99° | 60° | 90 | Ku/C | 13,6/5,3 |
| SARAL | 800 | 98° | 81,5° | 90 | Ka | 35 |
| SENTINEL-3 | 815 | 98° | 88° | 75 | Ku/C | 13,6/5,4 |
| JASON-3 | 1336 | 66° | 66° | 315 | Ku/C | 13,6/5,3 |

Nastavno na vremenski prikaz razvoja tehnologije, operativne karakteristike satelitskih misija lansiranih do danas dane su u tablici 1. Raznolikost satelitskih misija prikazana je s obzirom na visinu orbita satelita, inklinacijske kutove orbita, pokrivanje geografskog područja Zemlje, udaljenosti putanja (trag, engl. *track*) satelita na Ekvatoru te frekvencijski pojas i frekvencije altimetara.

2.1. Razvojna faza tehnologije

Lansiranjem satelita Skylab 1973. godine započela je razvojna odnosno eksperimentalna era satelitske altimetrije (McGoogan i dr. 1974). Pošto je Skylab otkrio veliki potencijal radarske altimetrije, već 1975., kao treći satelit u programu NGSP-a, lansiran je satelit GEOS-3 (Geodynamics Experimental Ocean Satellite) u svrhu poboljšanja metoda praćenja satelita i određivanja orbita te razumijevanja Zemljina polja ubrzanja sile teže (Stanley 1979). Satelitska misija ostvarila je preciznost mjerenja u jednosekundnom intervalu od oko 25 cm, što uz nisku točnost određivanja orbite satelita od oko 5 m nije moglo zadovoljiti zahtjeve za primjenu u geodetske svrhe (Rosmorduc i dr. 2011).

Značajan napredak ostvaren je tijekom satelitske misije SEASAT, kojom je ostvarena 5-centimetarska preciznost altimetrijskih mjerenja te su znatno poboljšane metode određivanja orbita satelita i geofizičkih korekcija koje se primjenjuju tijekom obrade altimetrijskih podataka (Tapley i dr. 1982). To je ostvareno simultanim opažanjem različitim instrumentima sa satelita: (1) SAR instrumentom (Synthetic Aperture Radar), (2) mjerачem raspršenja (engl. *scatterometer*), koji se upotrebljavao za određivanje brzine i smjera vjetra iznad vodene površine, (3) višefrekvencijskim mikrovalnim radiometrom, koji se upotrebljavao za određivanje temperature vodene površine i (4) radarskim altimetrom (Rosmorduc i dr. 2011). Tako prikupljeni podaci omogućili su modeliranje cirkulacije oceanskih valova i vjetra uz morske površine, modela geoida na području mora te topografije morskog dna (Cheney i Marsh 1981, Dixon i dr. 1984, Douglas i dr. 1984).

Posljednja misija razvojne faze (slika 1), GEOSAT (GEOdetic SATellite), lansirana je 1985. godine s osnovnim ciljem određivanja potencijala ubrzanja sile teže na moru te modeliranja topografije mora u prvom redu za potrebe američke ratne mornarice (McConathy i Kilgus 1987). O uspješnosti satelitske misije svjedoči i izračun kojim je satelitska misija ostvarila uštedu mornarici u iznosu od oko 280 milijuna američkih dolara zamijenivši dugotrajnu brodsku gravimetrijsku izmjeru (Sandwell i McAdoo 1990).

2.2. Suvremena era tehnologije

Devedesete godine dvadesetog stoljeća prekretnica su u primjeni tehnologije tijekom koje su poduzeti značajni koraci prema operativnoj oceanografiji (engl. *operational oceanography*). Operativna oceanografija podrazumijeva mogućnosti prognožiranja razine i temperatura mora te morskih struja (Flather 2000), a osnovni su preduvjet za to pouzdana i visokofrekventna mjerenja altimetrima dostupna u realnom vremenu. Potencijal tehnologije prepoznala je i Europska svemirska agencija (ESA), koja je definirala i osnovne ciljeve budućih misija u projektu PRARE (Precision Range and Range-Rate Equipment): (1) kalibracija radarskih altimetara unutar 10 cm korištenjem laserskih retroreflektora na Zemlji, (2) preuzimanje

i distribucija mjerenih podataka u realnom vremenu te (3) automatiziranje obrade podataka i razvoj brzo dostupnih standardiziranih proizvoda (Strawbridge i Laxon 1994). Početak realizacije zacrtanih ciljeva ostvaren je satelitskom misijom ERS-1 (European Remote Sensing).

U isto vrijeme NASA i francuska agencija CNES (Centre National d'Études Spatiales) razvili su i lansirali jednu od najznačajnijih satelitskih geodetskih misija u povijesti – TOPEX/Poseidon – koja je revolucionalizirala razumijevanje oblika i potencijala ubrzanja Zemljine sile teže te satelitsku altimetriju kao tehnologiju (Nerem 1995). Radarski altimetar satelita TOPEX/Poseidon, uz standardnu mikrovalnu frekvenciju od oko 12 GHz (K_u pojas, engl. K_u band), bio je opremljen i drugom frekvencijom u C-pojasu (oko 5 GHz), što je postao standard za kasnije satelitske misije. To je, uz uvođenje treće frekvencije na mikrovalnom radiometru satelita, omogućilo efikasno računanje ionsferske korekcije te uklanjanje utjecaja vjetrova na altimetrijska mjerenja (Vignudelli i dr. 2011). Revolucionarna satelitska misija ostvarila je točnost određivanja orbite satelita iskazanu srednjom kvadratnom pogreškom od oko 2,5 cm te preciznost mjerenja od 2 cm iskazanu standardnim odstupanjem, čime je ostvarena procijenjena preciznost određivanja razine mora na otvorenom moru satelitskom altimetrijom od oko 4 cm (Fu i Cazenave 2000). Znanan napredak u točnosti određivanja orbite satelita ostvaren je mjernim sustavom DORIS (Doppler Orbitography and Radiopositioning Integrated by Satellite) za praćenje satelita sa Zemlje.

Kao što je prikazano na slici 1, tijekom devedesetih lansirana je i misija ERS-2, koja je naslijedila ERS-1, te GFO (Geosat Follow-On), koja je naslijedila misiju GEOSAT. Sličan intenzitet učestalosti lansiranja altimetrijskih satelitskih misija nastavljen je i u prvim godinama 21. stoljeća, kada je misija JASON-1 (Joint Altimetry Satellite Oceanography Network) naslijedila TOPEX/Poseidon uz četverogodišnje razdoblje simultanog opažanja dvaju satelita. JASON-1 dizajniran je ponajprije kako bi se odredili trendovi promjene srednje razine mora odnosno procijenile posljedice klimatskih promjena (Ménard i dr. 2003). Godine 2002. lansirana je i satelitska misija Envisat koja je naslijedila ERS-misije. Osnovni ciljevi misije bili su omogućavanje izrada studija o okolišu, razvoja studija biološke oceanografije te kartiranja ledenih površina na Zemlji (Frappart i dr. 2006).

Trenutačno su aktivne sljedeće satelitske misije (Grgić 2017):

- JASON-2, nasljednica misije Jason-1, realizirana 2008. godine kao zajednički projekt NOAA-e (National Oceanic and Atmospheric Administration), NASA-e, CNES-a i EUMETSAT-a (European Organisation for the Exploitation of Meteorological Satellites),
- CryoSat-2 (Cryogenic Satellite), misija izrađena u sklopu ESA-ina svemirskog programa 2010. godine,
- HY-2a (HaiYang), misija realizirana 2011. godine pod vodstvom CNSA (China National Space Administration),
- SARAL, misija lansirana 2013. godine suradnjom ISRO-a (Indian Space Research Organisation) i CNES-a,
- SENTINEL-3, misija realizirana u sklopu ESA-ina svemirskog programa Copernicus s vodstvom EUMETSAT-a te
- JASON-3, misija koja omogućuje simultano opažanje unutar istih operativnih karakteristika i vodstva definiranih za JASON-2.

Podaci navedenih satelitskih misija u kombinaciji s podacima prije završenih misija omogućuju niz aktivnosti u geodeziji, oceanografiji, geofizici, glaciologiji i ostalim geoznanostima. Iste su detaljnije analizirane u ovom radu.

2.3. Budućnost tehnologije

Satelitske altimetrijske misije bliske budućnosti trebale bi omogućiti i poboljšati efikasno praćenje razine površine jezera, rijeka i obalnih područja, prognoziranje intenziteta tropskih ciklonalnih poremećaja, uragana, te omogućiti razvoj poboljšanih modela morskih mijena i struja (Vignudelli i dr. 2011). Tako se u bliskoj budućnosti očekuje lansiranje satelita HY-2a, te satelitskih misija JASON-CS (alternativno ime Sentinel-6) i SWOT (Surface Water Ocean Topography) (slika 1) (Vignudelli i dr. 2011).

3. Princip satelitske altimetrijske izmjere

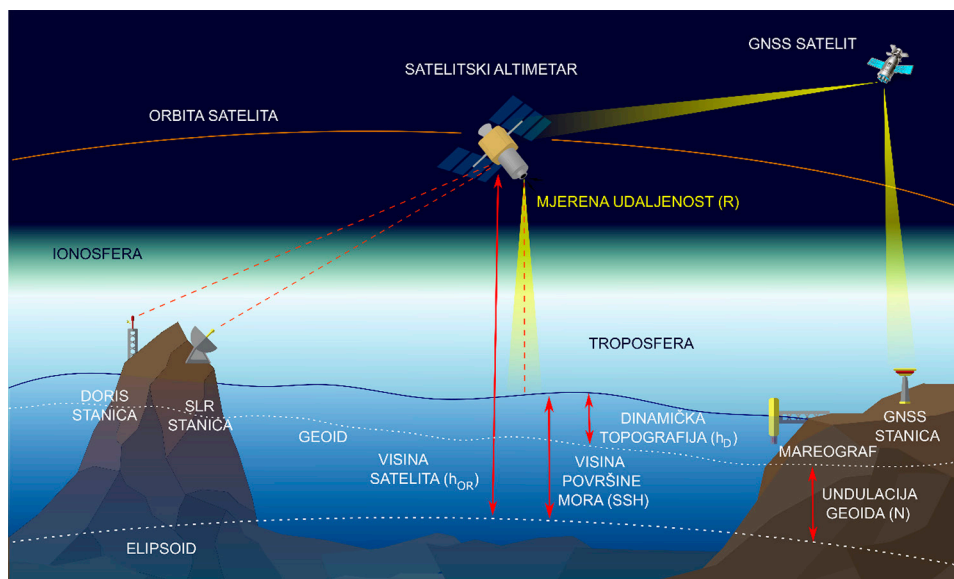
Satelitska altimetrija metoda je određivanja visine vodene površine u odnosu na definirani geodetski referentni okvir (npr. elipsoid ili geoid) na temelju mjerenja udaljenosti između satelita i vodene površine. Mjerenje udaljenosti temelji se na mjerenju vremena potrebnog radarskom signalu za prelazak udaljenosti od satelita do vodene površine i od vodene površine do satelita uz niz korekcija potrebnih zbog propagacije signala kroz atmosferu te utjecaja geofizičkih fenomena vodenih površina na reflektirani signal (prema Vignudelli i dr. 2011). Preduvjet za određivanje visine vodene površine poznavanje je položaja satelita u jasno definiranom geodetskom referentnom sustavu.

3.1. Temeljna formula satelitske altimetrije

Koncept mjerenja visine morske razine satelitskim altimetrom kao i osnovne geodetske plohe relevantne za mjerenja prikazani su na slici 2. Altimetar sa satelita u pravilnim vremenskim intervalima šalje kratki impuls mikrovalnog zračenja poznate snage prema morskoj površini. Impuls djeluje s grubom morskom površinom i dio zračenja odbija se natrag prema altimetru. Uz poznatu brzinu radarskog signala, tj. brzinu svjetlosti u vakuumu c , te uz zanemarivanje refrakcije, udaljenost satelita od morske površine \hat{R} može se izračunati na temelju vremena t potrebnog za prevaljivanje dvostrukog puta ($2\hat{R}$) impulsa signala (Fu i Cazenave 2000). Temeljna jednadžba altimetrije tada poprima oblik:

$$\hat{R} = \frac{ct}{2}. \quad (1)$$

Da je atmosfera savršeni vakuum i da je distribucija valova u oceanu dobro poznata, udaljenost između altimetra i morske površine utvrdila bi se jednadžbom (1) iz vremena dvostrukog puta signala i snage emitiranog radarskog signala. Međutim, prisutnost suhih plinova, isparavanja vode i slobodnih elektrona u atmosferi reducira snagu radarskog signala uzrokujući modifikacije povratnog signala (Vignudelli i dr. 2011). Nakon primjene korekcija, osnovna jednadžba za računanje korigirane udaljenosti R može imati oblik:



Slika 2. Usporedba mjernih principa radarske altimetrije i mareografskih mjerenja (Grgić 2017).

$$R = \hat{R} - \sum_j \Delta R_j = \hat{R} - (\Delta R_{tropoS} + \Delta R_{tropoV} + \Delta R_{iono} + \Delta R_{dm} + \dots), \quad (2)$$

gdje vrijednosti $\Delta R_j, j=1, \dots$ predstavljaju korekcije za različite komponente atmosferskih utjecaja, npr. utjecaj suhe i vlažne komponente troposfere ΔR_{tropoS} i ΔR_{tropoV} te ionosfere ΔR_{iono} , odnosno fizikalnih utjecaja na površinu mora kao što su morske struje i mijene, gibanje Zemljina pola (engl. *pole tide*), mijene čvrste Zemlje (engl. *solid Earth tide*) i dinamika mora (engl. *sea-state bias*) ΔR_{dm} . Posljedica potonjeg najčešće se može izraziti nagibom valova koji uzrokuju odbijanje radarskih signala s malim pomakom. Pomak je povezan s lokalnim prilikama (vjetar i valovi). Korekcija pomaka zbog morskog položaja pokušava se uzeti u obzir za razliku između raspršene površine i stvarne srednje razine mora unutar otiska altimetra. Korekcija je kombinirani efekt elektromagnetskih i asimetričnih pomaka (Vignudelli i dr. 2011).

3.2. Princip radarskog mjerenja

Zbog fizičkih obilježja atmosfere i morske površine, frekvencije koje su najprikladnije za satelitsku altimetriju obuhvaćaju mikrovalni frekvencijski raspon od 2 do 18 GHz (Fu i Cazenave 2000). To uključuje S-band (1,55–4,20 GHz), C-band (4,20–5,75 GHz), X-band (5,75–10,9 GHz) i Ku-band (10,9–22,0 GHz) radarske frekvencije (tablica 1) u spektrima kojih je refleksija vodenih površina visoka. Na frekvencijama većim od 18 GHz povećava se prigušenje signala atmosfere, čime se smanjuje snaga odaslanog signala koji doseže površinu mora i reflektiranog signala koji se vraća natrag do altimetra. Veličina otiska signala na površini mora

proporcionalna je valnoj duljini elektromagnetskog zračenja i obrnuto proporcionalna veličini antene (ibid.). Zbog toga je veličina antene praktično ograničenje za korištenje frekvencijskih spektara u satelitskoj altimetriji.

Elektromagnetsko zračenje koje je odaslano prema morskoj površini smanjeno je utjecajem atmosfere. Signal koji dolazi do morske površine dijelom se apsorbira u morskoj vodi, a dijelom raspršuje o grubu morsku površinu u širokom rasponu čime se smanjuje snaga povratnog signala. Snaga povratnog signala mjenjenog radarom stoga ovisi o karakteru raspršenosti morske površine, parametrima radarskog sustava i prigušenju u oba smjera djelovanjem atmosfere (Vignudelli 2011).

Parametri su sustava radara valna duljina λ odaslano i primljenog elektromagnetskog zračenja, odaslana snaga P_t u vatima te odaslani i primljeni dobitak antene (engl. *antenna gain*) G_t i G_r . Budući da se sustav altimetra koristi istom antenom za primanje i odašiljanje radarskih impulsa, G_t i G_r su identični te se mogu zamijeniti oznakom G . Tada se snaga povratnog radarskog signala na diferencijalnom području otiska antene dA na površini mora može povezati s λ , P_t i udaljenosti R od satelita do ciljanog područja (Fu i Cazenave, 2000):

$$dP_r = t_\lambda^2 \frac{G^2 \sigma^2 P_t}{(4\pi)^3 R^4}, \quad (3)$$

gdje je σ faktor proporcionalnosti, a $t_\lambda(R, \theta)$ atmosferska prozirnost definirana kao dio elektromagnetskog zračenja na valnoj duljini λ koja je odaslana kroz atmosferu od udaljenosti R pod kutom θ . Prozirnost je u oba smjera $t_\lambda^2(R, \theta)$. Za potrebe primjene podataka u geodeziji, ukupna povratna snaga definirana je kao povratna radarska snaga P_r dobivena refleksijom signala od područja otiska altimetra na vodenoj površini A_r . U tom su slučaju dP_r i σ značajni samo kad se smatraju srednjim veličinama preko svih diferencijalnih ciljnih područja unutar polja. Postavke raspršenja razine mora unutar otiska antene karakterizirane su diferencijalnim radarskim križnim presjecima $\sigma = \sigma_0$. Bezdimenzionalna veličina σ_0 (izražena u decibelima) razlikuje se ovisno o otisku antene (Fu i Cazenave 2000). Ukupna povratna snaga dobivena je integriranjem puta signala preko područja otiska signala na vodenoj površini (Fu i Cazenave 2000):

$$P_r = t_\lambda^2 \frac{G^2 \sigma^2 P_t}{(4\pi)^3 R^4} \int_{A_r} G^2 \sigma_0 dA. \quad (4)$$

Ovaj izraz pretpostavlja da je područje otiska antene dovoljno malo da se R i t_λ mogu smatrati konstantama, a s obzirom na to da je signal ograničen trajanjem radarskog impulsa, dobitak antene G ne ovisi o azimutnom kutu odaslano signala (ibid.). Uz iznimku σ_0 , svaka veličina na desnoj strani jednadžbe je ili poznati parametar radarskog sustava (G , λ ili P_t) ili fizikalni parametar (R i t_λ).

Fu i Cazenave (2000) objasnili su i odnos radijusa otiska altimetra na vodenoj površini i frekvencije poslanog signala te vremena potrebnog signalu za potpunu refleksiju od vodene površine. Radijus otiska, ovisno o morskim valovima, najčešće iznosi od 3 do 5 km (Rosmorduc i dr. 2011). S obzirom na to da povratna snaga signala izmjerena na altimetru u znatnoj mjeri ovisi o refleksivnosti površine, satelitskom altimetrijom prikuplja se znatno niži broj mjerenja u obalnim područjima i na području rijeka i jezera (Grgić i dr. 2017b). Stoga se uvode metode

dodatne obrade (engl. *re-tracking*) altimetrijskih signala opažanih na tim područjima. Obalni altimetrijski proizvodi definirani su poslije u ovom radu.

3.3. Korekcije podataka satelitske altimetrije

Pregled najčešće korištenih modela i korekcija u obradi altimetrijskih podataka prikazan je u tablici 2. Svi utjecaji na signal uzrokuju kašnjenje povratnog signala te su zato korekcije pozitivnih iznosa (jednadžba 2). Procjena udaljenosti promjenljiva je duž satelitske orbite zbog promjena u topografiji morske površine i promjena u visini orbite u odnosu na središte Zemlje (Fu i Cazenave 2000).

Tablica 2. Najčešće korekcije i modeli koji se danas primjenjuju u obradi izvornih altimetrijskih mjerenja (Grgić 2017).

| Modeli/ korekcije | Naziv | Izvornici |
|--|--------------------------------------|---|
| Orbita | CNES | Pavlis i dr. (2012) |
| | ESOC EIGEN | Hauschild i Montenbruck (2009) |
| | GDR | Cerri i dr. (2010) |
| Suha/vlažna troposferska korekcija | ECMWF | Desportes i dr. (2007) |
| | NCEP | Bromwich i dr. (2007) |
| | ERA | Dee i dr. (2011) |
| Ionosferska korekcija | Bent | Llewellyn i Bent (1973) |
| | JPL GIM | Jee i dr. (2010) |
| | IRI2007 | Bilitza i Reinisch (2008) |
| | NIC09 | Scharroo i Smith (2010) |
| Inverzna barometrijska korekcija | Lokalna/Statička | Fu i Cazenave (2000) |
| | MOG2D dinamička/Lokalna srednja | Carrère i Lyard (2003) |
| Morske mijene i mijene čvrste Zemlje | EOT11a | Savcenko i Bosch (2012) |
| | FES2012 | Carrère i Lyard (2003) |
| | GOT4.10 | Ray (1999) |
| | HAMTIDE | Taguchi i dr. (2014) |
| | Gibanje polova Zemlje | Fu i Cazenave (2000) |
| | Mijene čvrste Zemlje | Melchior (1983) |
| | Korekcija zbog gibanja mora | Fu i Cazenave (2000) |
| Geodetska referentna ploha | TOPEX/GRS80 elipsoid | Fu i dr. (1994), Moritz (1980) |
| | CNES-CLS11/DTU15 srednja razina mora | Schaeffer i dr. (2012), Andersen i dr. (2015) |
| | EGM2008/EIGEN6 geoid | Pavlis i dr. (2012), Förste i dr. (2014) |

Osnovni preduvjet određivanja visine vodene površine na temelju mjerene udaljenosti od satelita poznavanje je položaja satelita koji leti u unaprijed definiranoj orbiti, odnosno njegove visine h_{OR} u fiksnom geocentričnom referentnom sustavu. Određivanje položaja satelita danas se obavlja putem DORIS i SLR (Satellite Laser Ranging) praćenja sa Zemlje i GNSS-tehnologijom iz svemira (slika 2). Procijenjena točnost određivanja orbite suvremenih satelita iznosi 1 cm (Luthcke i dr. 2003). Visina morske površine *SSH* (engl. *sea surface height*), odnosno vodene površine općenito, u referentnom sustavu u kojem je izražen položaj satelita (u pravilu elipsoidna visina) može se izraziti:

$$SSH = h_{OR} - R = h_{OR} - \hat{R} + \sum_j \Delta R_j . \quad (5)$$

Dinamički efekti geostrofičkih morskih struja imaju primarnu važnost za primjene satelitske altimetrije u oceanografiji (Fu i Cazenave 2000, Taguchi i dr. 2014). Stoga se dinamička topografija mora (slika 2) može matematički opisati jednadžbom:

$$h_D = SSH - N - h_T - h_A , \quad (6)$$

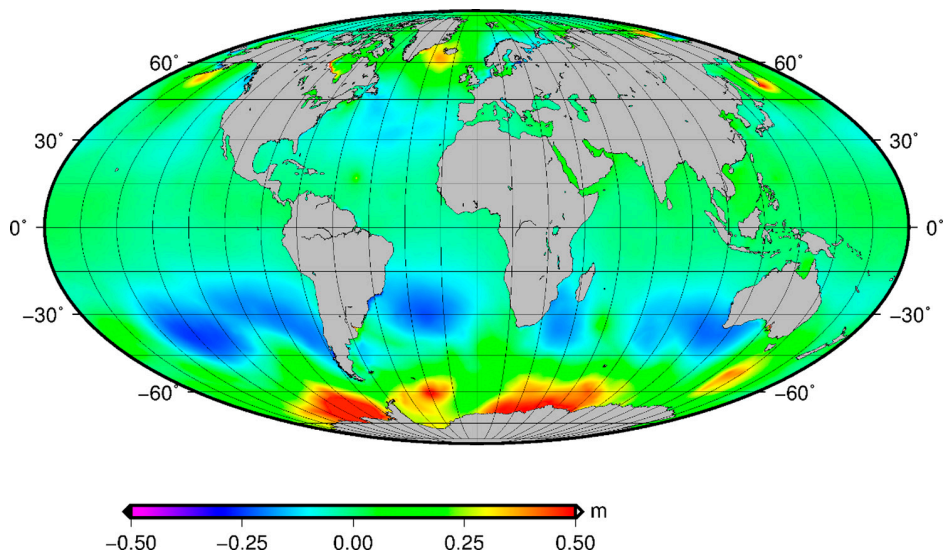
pri čemu je N undulacija geoida (slika 2), a h_T i h_A su utjecaj morskih mijena odnosno atmosferskog tlaka koji se računaju iz modela odnosno korekcija za trenutak mjerenja (tablica 2). Utjecaj atmosferskog tlaka može se opisati inverznim barometrijskim (IB) efektom, odnosno direktnim utjecajem promjene atmosferskog tlaka na razinu vodene površine pri čemu se s porastom tlaka zraka smanjuje razina vodene površine i obrnuto. Promjene u tlaku zraka od 100 Pa uzrokuju promjene od oko 1 cm u razini vodene površine (Carrère i Lyard 2003, Rosmorduc i dr. 2011). Iako se atmosferski utjecaj može odrediti iz korekcije za suhu troposferu ili izravno iz dugoročnih modela (tablica 2), danas se najčešće upotrebljavaju *in situ* podaci integrirani u modele koji se distribuiraju više puta dnevno (najčešće svakih 6 ili 12 sati). U izradu modela uključene su vodeće svjetske meteorološke organizacije poput ECMWF-a (European Centre for Medium range Weather Forecasting) i svemirske agencije, npr. CNES.

Najčešće korišten model za obradu altimetrijskih podataka je DAC (Dynamic Atmospheric Correction) MOG2D (2 Dimensions Gravity Waves model) (tablica 2). DAC integrira visoke frekvencije atmosferskog tlaka i niske frekvencije inverznog barometrijskog efekta uzrokovanog površinskim vjetrom (Carrère i Lyard 2003). Model korekcija distribuira se s frekvencijom od 6 sati kao grid dimenzija $0,25^\circ \times 0,25^\circ$ preko distribucijskog centra AVISO (Archiving, Validation and Interpretation of Satellite Oceanographic Data). Na slici 3 prikazan je utjecaj atmosferskog efekta na mjerenu razinu mora 25. 9. 2017. u 12 sati. Prosječni mjesečni utjecaj atmosferskog tlaka na razinu mora u području Mediterana iznosi oko 3 cm (Grgić i dr. 2017b).

Razina mora može biti izražena i anomalijom razine mora (engl. *sea level anomaly*) h_{SLA} u odnosu na srednju razinu mora (engl. *mean sea surface*) h_{MSS} :

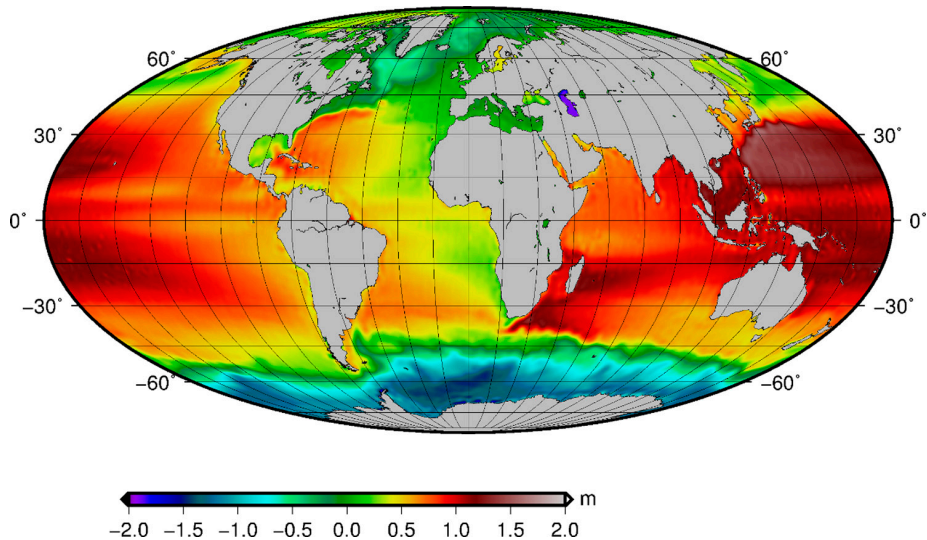
$$h_{SLA} = SSH - h_{MSS} . \quad (7)$$

Srednja razina mora je ploha koja nastaje usrednjavanjem duljeg razdoblja opažanja razine mora u trajanju od minimalno jedne godine zbog izraženih sezonskih utjecaja promjene razine mora, a optimalno 18,6 godina zbog Zemljina nutacijskog perioda (Dehant 1990). Srednja razina iskazana na geoidu predstavlja topografiju mora



Slika 3. Utjecaj atmosferskog tlaka na razinu mora izračunat iz modela MOG2D DAC (Carrère i Lyard 2003) za ponedjeljak, 25. 9. 2017. u 12 sati (prikaz u Mollweideovoj ekvivalentnoj pseudocilindričnoj projekciji).

(engl. *sea surface topography*) (Koblinsky i dr. 1993). Topografija mora (slika 4) jedna je od osnovnih varijabli u određivanju modela oblika Zemlje – geoida (Bašić 2009) – te se ista stoga može ubrojiti u jedan od osnovnih altimetrijskih proizvoda.



Slika 4. Srednja dinamička topografija mora prikazana na temelju modela DTU10MDT (Andersen i dr. 2015) (prikaz u Mollweideovoj ekvivalentnoj pseudocilindričnoj projekciji).

3.4. Odnos apsolutne i relativne razine mora

Satelitska altimetrija omogućuje praćenje promjene razine vodenih površina u odnosu na jasno definirani globalni geodetski referentni okvir na globalnom referentnom elipsoidu ishodište kojeg je u središtu Zemljinih masa (Nerem 1995). S obzirom na tako definirani referentni sustav, mjerenja promjene razine mora mogu se povezati s globalnim ili lokalnim modelima geoida te se takva mjerenja mogu nazvati apsolutnim mjerenjima.

Tradicionalna metoda mjerenja razine mora na mareografima pak omogućuje mjerenja s obzirom na lokalne geodinamičke i geofizičke uvjete ovisne o lokaciji mareografa i svih specifičnosti prostora na kojem su postavljeni. Mareografska mjerenja su visokofrekventna, visokoprecizna te najčešće ekonomski povoljna uz dostupno dugo razdoblje opažanja te mogućnosti opažanja u obalnim područjima (Douglas 2001). Ipak, mareografska mjerenja opterećena su utjecajem lokalnih geodinamičkih pojava, ponajprije vertikalnim gibanjem Zemljine kore (Grgić i dr. 2017b), pa se takva mjerenja mogu nazvati relativnim.

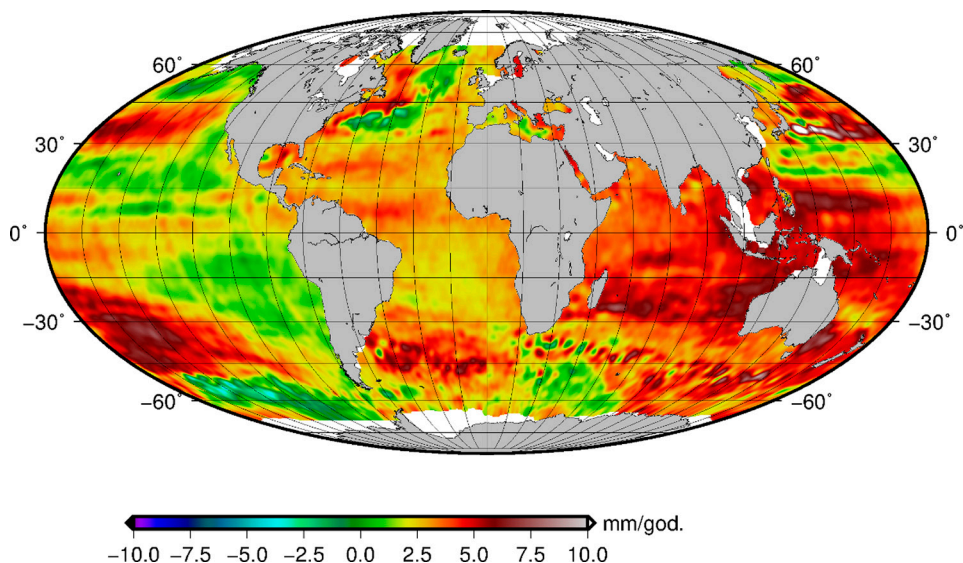
Povezivanje apsolutnih i relativnih promjena mjerenih razina mora zahtjevan je zadatak koji najčešće uključuje redukciju mareografskih mjerenja na apsolutna mjerenja korištenjem trendova vertikalne promjene Zemljine kore dobivenih iz GNSS-opažanja na stanicama raspoređenima uz mareografske stanice. Najnoviji pristup rješavanju problemu prikazan je u Grgić i dr. (2017b).

3.5. Altimetrijski podaci u obalnom području i na kopnu

Postupcima ponovne obrade signala složenim algoritmima dobivaju se poboljšani altimetrijski podaci u obalnim područjima i na kopnu. Problemi povezani uz postupke obrade podataka detaljno su objašnjeni u Vignudeli i dr. (2011). Danas su najčešće korišteni algoritmi obrade podataka u obalnom području ALES (Adaptive Leading Edge Subwaveform) i X-TRACK (Passaro i dr. 2014, Roblou i dr. 2007). Altimetrijski *re-trackeri* valove snage povratnih signala najčešće uspoređuju s prije poznatim modelima valova te na taj način rekonstruiraju mjerenja vodenih površina (Passaro i dr. 2014). Zahvaljujući takvim proizvodima, pogreške altimetara reducirane su u obalnim područjima čime se otvara put kontinuiranom praćenju obalnog okoliša i osiguravanju pokrivenosti mjerenjima u blizini obale (Roblou i dr. 2007).

4. Primjena altimetrijskih podataka u geodeziji

Primjena podataka satelitske altimetrije za praćenje promjena srednje razine mora, kao osnovnoga geodetskog zadatka, jedan je od najučinkovitijih načina praćenja klimatskih promjena (Scharroo i dr. 2010). Procjena promjene srednje razine mora danas upućuje na trend povećanja od 3,110,4 mm/god. (slika 5) oko kojeg je usuglašeno pet vodećih znanstvenih institucija u području istraživanja: AVISO, CSIRO (Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation), CU (University of Colorado Boulder), GSFC (Goddard Space Flight Center) te NOAA (Henry i dr. 2014). Procjene trendova su približne iako se metode obrade podataka i računanja trenda razlikuju jer se računanja mogu provoditi postupkom



Slika 5. Globalni trend promjene srednje razine mora na temelju podataka preuzetih od CU-a (Masters i dr. 2012) izjednačenih metodom najmanjih kvadrata za područje od -66° do 66° geodetske širine od 1993. godine do danas (prikaz u Mollweideovoj ekvivalentnoj pseudocilindričnoj projekciji).

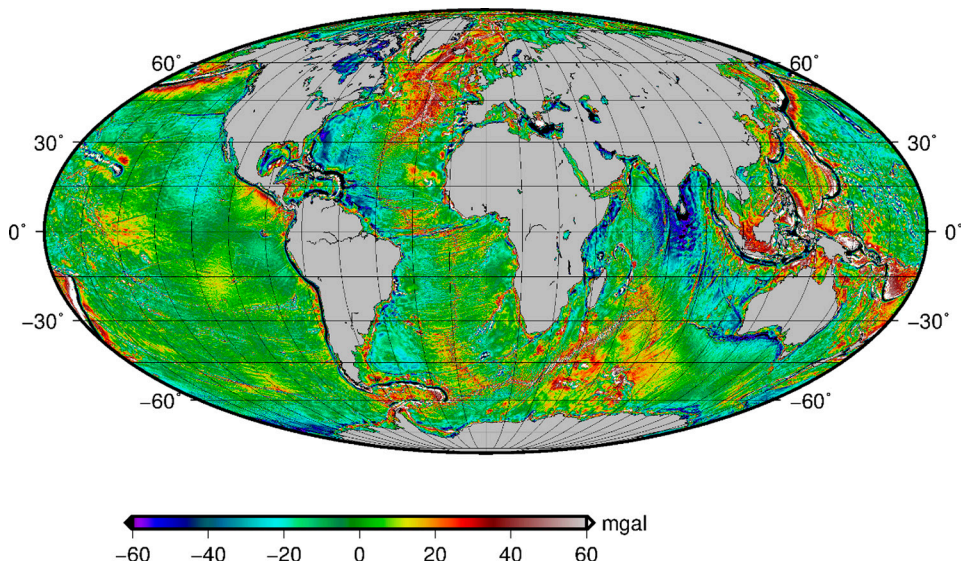
usrednjavanja podataka duž putanja kretanja satelita (metoda obrade usvojena na CU Boulder) ili metodom izrade gridova iz mjerenih podataka u rezoluciji $2^{\circ} \times 2^{\circ}$ na koje se poslije primjenjuju postupci usrednjavanja (metoda obrade prihvaćena od ostalih istraživačkih skupina) (Henry i dr. 2014).

Prve studije o globalnim trendovima promjene razine mora na temelju podataka satelitske altimetrijske misije Geodetic Satellite (Geosat) proveli su Wagner i Cheney (1992) procijenivši rast razine mora od 1213 mm/god. iz podataka za 30-mjesečno razdoblje opažanja. Godine 1995. Nerem je objavio srednji trend globalne promjene razine mora u iznosu od $5,810,7$ mm/god. izračunat numeričkom obradom TOPEX/Poseidon podataka. Nedugo zatim, Cazenave i dr. (1999) obradili su podatke četiri i pol godine opažanja misije TOPEX/Poseidon te četiri godine opažanja satelitske misije ERS-1 primjenom poboljšanih korekcija za nekonzistentnost atmosferskih uvjeta u kojima se obavljaju altimetrijska mjerenja te poboljšanim geofizičkim korekcijama što je rezultiralo procjenom globalnog rasta srednje razine mora od $1,410,2$ mm/god. Prosječni trendovi promjene srednje razine mora u Mediteranskome moru i Jadranskome moru (vidi sliku 5) odgovaraju globalnim trendovima, uz znatnu ovisnost o položaju. Više o trendovima u Mediteranskom moru dostupno je u Cazenave i dr. (2002), Tsimplis i dr. (2008) i Grgić i dr. (2017b), a o porastu mora u Jadranskome moru dostupno je u Fenoglio-Marc i dr. (2012) i Grgić i dr. (2017c).

Određivanje srednje razine mora omogućuje definiranje vertikalnih referentnih sustava u sklopu uspostave visinskih sustava države ili regije (Rožić 2009). Primjena satelitske altimetrije posebno je važna za uspostavu vertikalnog okvira na moru i oceanima (referentnog sustava dubina). Uz kombinaciju s mareografskim

podacima, satelitska altimetrija može dati relevantan uvid u vertikalne pomake obalnih područja (npr. Fenoglio-Marc i dr. 2012). Naposljetku, kombiniranjem podataka o srednjoj razini mora, geodinamičkih karakteristika prostora i modela terena, moguće je dobiti uvid o utjecaju promjene razine mora na nekom području (Grgić 2017).

Osim studija promjene srednje razine mora, satelitska altimetrija za klimatološke potrebe izravno povezane s primjenom u geodeziji omogućuje praćenje meteoroloških pojava kao što su *el Niño* (El Niño– Southern Oscillation) i *la Niña*, koji uzrokuju značajne promjene temperature oceanske vode te posljedično klimatološke promjene po cijelom svijetu (Nerem i dr. 1999).



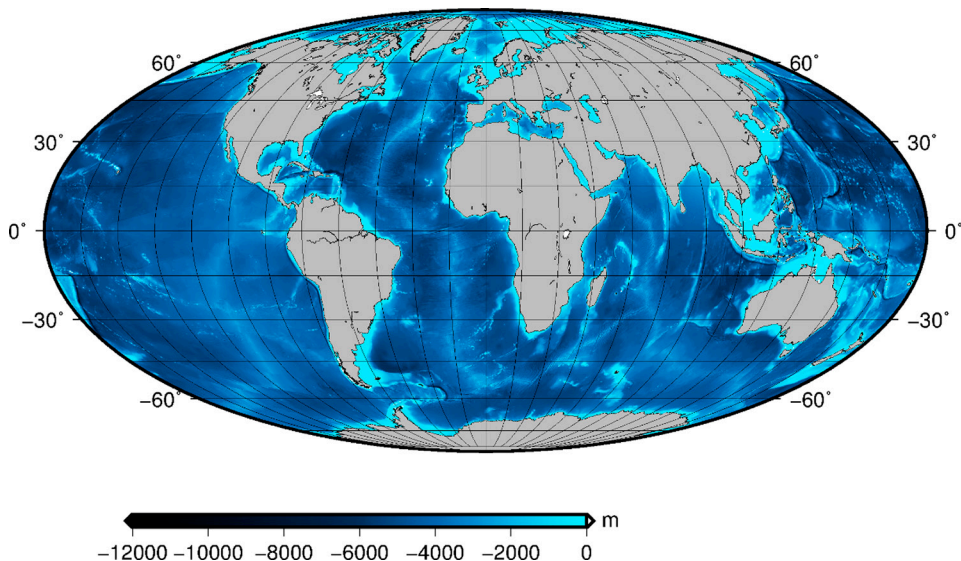
Slika 6. Globalni model anomalija ubrzanja sile teže iz više satelitskih altimetrijskih misija (podaci za prikaz preuzeti iz Andersen i dr. (2010); prikaz u Mollweideovoj ekvivalentnoj pseudocilindričnoj projekciji).

Jedna od izravnih primjena satelitske altimetrije, razmatrana i u sklopu obrade altimetrijskih podataka u ovom radu, analiza je i modeliranje Zemljina oblika i veličine (slika 4). Satelitskom altimetrijom moguće je izračunati srednju razinu mora u odnosu na geoid, što omogućuje efikasno i kvalitetno modeliranje geoida, posebno za područje mora i oceana (Rapp i Bašić 1992, Hwang i dr. 2002, Pavlis i dr. 2012, Förste i dr. 2014).

Nastavno na određivanje topografije mora, iz podataka satelitskih altimetrijskih misija moguće je rekonstruirati gravitacijsko polje na vodenim površinama (ibid.). Hwang i dr. (2002) prikazali su tri postupka računanja anomalija Zemljina polja ubrzanja sile teže (anomalije geoida) iz altimetrijskih podataka: (1) primjenom metode kolokacije po najmanjim kvadratima (engl. *least squares collocation*) uz altimetrijske podatke te izračunate nagibe površina duž putanje satelita, (2)

primjenom metode kolokacije po najmanjim kvadratima uz altimetrijske podatke i izračunate otklone vertikala te (3) primjenom Vening Meinesz formule iz podataka otklona vertikale na vodenim površinama dobivenih iz altimetrije. Na slici 6 prikazan je globalni model anomalija geoida izračunat iz više altimetrijskih misija (Andersen i dr. 2010).

Podaci satelitske altimetrije koji su pravilno raspoređeni na morima i oceanima mogu se kombinirati s rijetkim i razmjerno skupim mjerenjima dubine broda radi izrade batimetrijskih modela (Smith i Sandwell 1994). Time satelitska altimetrija nadopunjuje mjerenja najčešće izvedena ultrazvučnim dubinomjerima na specifičnim lokacijama. Tako izrađene karte, iako ne mogu biti korištene za preciznu podvodnu navigaciju, mogu upućivati na topografiju morskog dna, odnosno veće geotektonske strukture poput granica litosfernih ploča i sl. (ibid.). Na slici 7 prikazana je karta dubina izvedena iz podataka Andersen i dr. (2010).



Slika 7. Globalni model dubina izrađen na temelju podataka preuzetih iz Andersen i dr. (2010); (prikaz u Mollweideovoj ekvivalentnoj pseudocilindričnoj projekciji).

Izračunate anomalije ubrzanja sile teže i batimetrijske karte vrlo često se upotrebljavaju u interdisciplinarnim istraživanjima povezanim s geodezijom – npr. tektonofizici i studijama o tektonskim gibanjima jer učinkovito otkrivaju granice tektonskih ploča i specifičnosti lokalnih područja (Fu i Cazenave 2000, Sandwell i dr. 2014). Uz navedeno, podaci satelitske altimetrije uspješno se upotrebljavaju za analizu tsunamija (Okal i dr. 1999, Ablain i dr. 2006) kao i za niz primjena u oceanografiji i glaciologiji koje su pobliže objašnjene u Douglas i dr. (1987) te Fu i Cazenave (2000).

5. Zaključak

Od ranih devedesetih godina dvadesetog stoljeća satelitska altimetrija primijenjena je u različitim geodetskim zadaćama i zadacima povezanih znanstvenih disciplina čime je omogućen napredak geodezije, ali i uključivanje geodezije u interdisciplinarna istraživanja. Satelitskom altimetrijom omogućeno je napredno određivanje Zemljina oblika i veličine uz razvoj modela ubrzanja Zemljine sile teže čime je realiziran znatan dio zadataka postavljenih u definiciji geodezije. Uz navedeno, satelitska altimetrija omogućuje efikasno, globalno i razmjerno učestalo praćenje promjena srednje razine mora kao indikatora klimatskih promjena te služi kao osnova za uspostavu visinskih sustava na moru i kopnu. Naposljetku, u sklopu interdisciplinarnih istraživanja, satelitska altimetrija omogućuje određivanje globalnih modela dubina, procjenu utjecaja promjene razine mora, vertikalna kretanja Zemljine kore obalnih područja te tektonske geomorfologije morskog dna.

U ovom radu pregledno su prikazani osnovni principi tehnologije te korekcije za obradu i primjenu podataka satelitske altimetrije u geodetskim zadaćama. Uz evoluciju tehnologije i smjernice budućeg razvoja prikazani su i konkretni proizvodi odnosno modeli koji otvaraju širok prostor za buduća znanstvena i primijenjena inženjerska istraživanja.

Literatura

- Ablain, M., Dorandeu, J., Le Traon, P. Y., Sladen, A. (2006): High resolution altimetry reveals new characteristics of the December 2004 Indian Ocean tsunami, *Geophysical research letters*, 33(21), L21602.
- Andersen, O. B., Knudsen, P., Berry, P. A. (2010): The DNSC08GRA global marine gravity field from double retracked satellite altimetry, *Journal of Geodesy*, 84(3), 191–199.
- Andersen, O., Knudsen, P., Stenseng, L. (2015): *The DTU13 MSS (Mean Sea Surface) and MDT (Mean Dynamic Topography) from 20 Years of Satellite Altimetry*, Springer Berlin, Heidelberg.
- Bašić, T. (2009): Jedinstveni transformacijski model i novi model geoida Republike Hrvatske, *Izvešća o znanstveno-stručnim projektima 2006.–2008. godine*, Državna geodetska uprava, 5–21.
- Bilitza, D., Reinisch, B. W. (2008): International Reference Ionosphere 2007: Improvements and new parameters, *Advances in Space Research*, 42(4), 599–609.
- Bromwich, D. H., Fogt, R. L., Hodges, K. I., Walsh, J. E. (2007): A tropospheric assessment of the ERA-40, NCEP, and JRA-25 global reanalyses in the polar regions, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 112(D10).
- Carrère, L., Lyard, F. (2003): Modeling the barotropic response of the global ocean to atmospheric wind and pressure forcing-comparisons with observations, *Geophysical Research Letters*, 30(6), 1275.
- Cazenave, A., Dominh, K., Ponchaut, F., Soudarin, L., Cretaux, J. F., Le Provost, C. (1999): Sea level changes from Topex-Poseidon altimetry and tide gauges, and vertical crustal motions from DORIS, *Geophysical Research Letters*, 26(14), 2077–2080.
- Cazenave, A., Bonnefond, P., Mercier, F., Dominh, K., Toumazou, V. (2002): Sea level variations in the Mediterranean Sea and Black Sea from satellite altimetry and tide gauges, *Global and Planetary Change*, 34(1), 59–86.

- Cerri, L., Berthias, J. P., Bertiger, W. I., Haines, B. J., Lemoine, F. G., Mercier, F., Ries, J., Willis, P., Zelensky, N., Ziebart, M. (2010): Precision orbit determination standards for the Jason series of altimeter missions, *Marine Geodesy*, 33(S1), 379–418.
- Cheney, R. E., Marsh, J. G. (1981): Seasat altimeter observations of dynamic topography in the Gulf Stream region, *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 86(C1), 473–483.
- Dee, D. P., Uppala, S. M., Simmons, A. J., Berrisford, P., Poli, P., Kobayashi, S., Andrae, U., Balmaseda, M., Balsamo, G., Bauer, P., Bechtold, P. (2011): The ERA-Interim reanalysis: Configuration and performance of the data assimilation system, *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 137(656), 553–597.
- Dehant, V. (1990): On the nutations of a more realistic Earth model, *Geophysical Journal International*, 100(3), 477–483.
- Desportes, C., Obligis, E., Eymard, L. (2007): On the wet tropospheric correction for altimetry in coastal regions, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 45(7), 2139–2149.
- Dixon, T. H., Naraghi, M., McNutt, M. K., Smith, S. M. (1983): Bathymetric prediction from Seasat altimeter data, *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 88(C3), 1563–1571.
- Douglas, B. C. (2001): Sea level change in the era of the recording tide gauge, *International Geophysics*, 75, 37–64.
- Douglas, B. C., Agreen, R. W., Sandwell, D. T. (1984): Observing global ocean circulation with Seasat altimeter data, *Marine Geodesy*, 8(1–4), 67–83.
- Douglas, B. C., McAdoo, D. C., Cheney, R. E. (1987): Oceanographic and geophysical applications of satellite altimetry, *Reviews of Geophysics*, 25(5), 875–880.
- Fenoglio-Marc, L., Dietz, C., Groten, E. (2004): Vertical land motion in the Mediterranean Sea from altimetry and tide gauge stations, *Marine Geodesy*, 27(3–4), 683–701.
- Fenoglio-Marc, L., Braitenberg, C., Tunini, L. (2012): Sea level variability and trends in the Adriatic Sea in 1993–2008 from tide gauges and satellite altimetry, *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 40, 47–58.
- Flather, R. A. (2000): Existing operational oceanography, *Coastal Engineering*, 41(1), 13–40.
- Förste, C., Bruinsma, S., Abrikosov, O., Flechtner, F., Marty, J. C., Lemoine, J. M., Biancale, R. (2014): EIGEN-6C4-The latest combined global gravity field model including GOCE data up to degree and order 1949 of GFZ Potsdam and GRGS Toulouse, EGU General Assembly Conference Abstracts, 16.
- Frappart, F., Calmant, S., Cauhopé, M., Seyler, F., Cazenave, A. (2006): Preliminary results of ENVISAT RA-2-derived water levels validation over the Amazon basin, *Remote sensing of Environment*, 100(2), 252–264.
- Fu, L. L., Cazenave, A. (2000): *Satellite altimetry and earth sciences: a handbook of techniques and applications* (Vol. 69), Academic Press, Cambridge.
- Fu, L. L., Christensen, E. J., Yamarone, C. A., Lefebvre, M., Menard, Y., Dorrer, M., Escudier, P. (1994): TOPEX/POSEIDON mission overview, *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 99(C12), 24369–24381.
- Grgić, M. (2017): The Estimation of the Adriatic Sea Level Variability and Changes Based on Multi-Satellite Altimetry Data, Sveučilište u Zagrebu Geodetski fakultet, Zagreb.
- Grgić, M., Jukić, S., Nerem, R. S., Bašić, T. (2017a): The Assessment of an Impact of Mean Sea Level Change in the Mid-Adriatic Region Based on Satellite Altimeter Records, 17th International Multidisciplinary Scientific Geoconference SGEM 2017, 23, 263–270.

- Grgić, M., Nerem, R. S., Bašić, T. (2017b): Absolute Sea Level Surface Modeling for the Mediterranean from Satellite Altimeter and Tide Gauge Measurements, *Marine Geodesy*, 40(4), 239–258.
- Grgić, M., Nerem, R. S., Bašić, T. (2017c): Sea Level Trends in the Adriatic Sea from Satellite Altimetry and Tide Gauges, rad u postupku recenzije.
- Grgić, M., Nerem, R. S., Bašić, T. (2017d): The Estimation of Sea Level Rise Impact on Coastal Zones of the Eastern Adriatic Sea, Tenth Coastal Altimetry Workshop Abstracts, Firenca, 28.
- Hauschild, A., Montenbruck, O. (2009): Kalman-filter-based GPS clock estimation for near real-time positioning, *GPS solutions*, 13(3), 173–182.
- Henry, O., Ablain, M., Meyssignac, B., Cazenave, A., Masters, D., Nerem, S., Garric, G. (2014): Effect of the processing methodology on satellite altimetry-based global mean sea level rise over the Jason-1 operating period, *Journal of Geodesy*, 88(4), 351–361.
- Hwang, C., Hsu, H. Y., Jang, R. J. (2002): Global mean sea surface and marine gravity anomaly from multi-satellite altimetry: applications of deflection-geoid and inverse Vening Meinesz formulae, *Journal of Geodesy*, 76(8), 407–418.
- Jee, G., Lee, H. B., Kim, Y. H., Chung, J. K., Cho, J. (2010): Assessment of GPS global ionosphere maps (GIM) by comparison between CODE GIM and TOPEX/Jason TEC data: Ionospheric perspective, *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 115(A10), A10319.
- Kaula, W. (1970): The terrestrial environment: Solid Earth and Ocean Physics, Williamstown report, M.I.T., Cambridge.
- Koblinsky, C. J., Nerem, R. S., Williamson, R. G., Klosko, S. M. (1993): Global scale variations in sea surface topography determined from satellite altimetry, *Sea Level Changes: Determination and Effects*, 155–165.
- Llewellyn, S. K., Bent, R. B. (1973): Documentation and description of the Bent ionospheric model. National Technical Information Service, Indialantic.
- Luthcke, S. B., Zelensky, N. P., Rowlands, D. D., Lemoine, F. G., Williams, T. A. (2003): The 1-centimeter orbit: Jason-1 precision orbit determination using GPS, SLR, DORIS, and altimeter data special issue: Jason-1 calibration/validation, *Marine Geodesy*, 26(3–4), 399–421.
- Masters, D., Nerem, R. S., Choe, C., Leuliette, E., Beckley, B., White, N., Ablain, M. (2012): Comparison of global mean sea level time series from TOPEX/Poseidon, Jason-1, and Jason-2, *Marine Geodesy*, 35, 20–41.
- McConathy, D. R., Kilgus, C. C. (1987): The Navy GEOSAT mission: An overview, Johns Hopkins APL technical digest, 8(2), 170–175.
- McGoogan, J. T., Miller, L. S., Brown, G. S., Hayne, G. S. (1974): The S-193 radar altimeter experiment, *Proceedings of the IEEE*, 62(6), 793–803.
- Melchior, P. (1983): The tides of the planet Earth, Organic Photonics and Photovoltaics, Pergamon Press, Oxford.
- Ménard, Y., Fu, L. L., Escudier, P., Parisot, F., Perbos, J., Vincent, P., Desai, S., Haines, B., Kunstmann, G. (2003): The Jason-1 mission special issue: Jason-1 calibration/validation, *Marine Geodesy*, 26(3–4), 131–146.
- Moritz, H. (1980): Geodetic reference system 1980, *Bulletin géodésique*, 54(3), 395–405.
- Nerem, R. S. (1995): Measuring global mean sea level variations using TOPEX/POSEIDON altimeter data, *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 100(C12), 25135–25151.

- Nerem, R. S., Chambers, D. P., Leuliette, E. W., Mitchum, G. T., Giese, B. S. (1999): Variations in global mean sea level associated with the 1997–1998 ENSO event: Implications for measuring long term sea level change, *Geophysical research letters*, 26(19), 3005–3008.
- Okal, E. A., Piatanesi, A., Heinrich, P. (1999): Tsunami detection by satellite altimetry, *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 104(B1), 599–615.
- Passaro, M., Cipollini, P., Vignudelli, S., Quartly, G. D., Snaith, H. M. (2014): ALES: A multi-mission adaptive subwaveform retracker for coastal and open ocean altimetry, *Remote Sensing of Environment*, 145, 173–189.
- Pavlis, N. K., Holmes, S. A., Kenyon, S. C., Factor, J. K. (2012): The development and evaluation of the Earth Gravitational Model 2008 (EGM2008), *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 117(B4), B04406.
- Rapp, R. H., Bašić, T. (1992): Oceanwide gravity anomalies from GEOS-3, Seasat and Geosat altimeter data, *Geophysical research letters*, 19(19), 1979–1982.
- Ray, R. D. (1999): A global ocean tide model from TOPEX/POSEIDON altimetry: GOT99.2. NASA Center for AeroSpace Information, Greenbelt.
- Roblou, L., Lyard, F., Le Henaff, M., Maraldi, C. (2007): X-TRACK, a new processing tool for altimetry in coastal oceans, u *Geoscience and Remote Sensing Symposium*, Barcelona.
- Rosmorduc, V., Benveniste, J., Lauret, O., Maheu, C., Milagro, M., Picot, N. (2011): Radar altimetry tutorial, ESA, Bruxelles, 112–128.
- Rožić, N. (2009): Hrvatski transformacijski model visina. Izvješća o znanstveno-stručnim projektima 2006.–2008. godine, Državna geodetska uprava, 23–46.
- Sandwell, D. T., McAdoo, D. C. (1990): High-accuracy, high-resolution gravity profiles from 2 years of the Geosat Exact Repeat Mission, *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 95(C3), 3049–3060.
- Sandwell, D. T., Müller, R. D., Smith, W. H., Garcia, E., Francis, R. (2014): New global marine gravity model from CryoSat-2 and Jason-1 reveals buried tectonic structure, *Science*, 346(6205), 65–67.
- Savcenko, R., Bosch, W. (2012): EOT11a-empirical ocean tide model from multimission satellite altimetry. Tech. rep., Deutsches Geodätisches Forschungsinstitut, München.
- Schaeffer, P., Faugere, Y., Legeais, J. F., Ollivier, A., Guinle, T., Picot, N. (2012): The CNES_CLS11 global mean sea surface computed from 16 years of satellite altimeter data, *Marine Geodesy*, 35, 3–19.
- Scharroo, R., Smith, W. H. (2010): A global positioning system-based climatology for the total electron content in the ionosphere, *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 115(A10), A10318.
- Seeber, G. (2008): *Satellite Geodesy – Foundations, Methods, and Applications*, De Gruyter, Berlin.
- Smith, W. H., Sandwell, D. T. (1994): Bathymetric prediction from dense satellite altimetry and sparse shipboard bathymetry, *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 99(B11), 21803–21824.
- Smith, W. H., Sandwell, D. T. (1997): Global sea floor topography from satellite altimetry and ship depth soundings, *Science*, 277(5334), 1956–1962.
- Stanley, H. (1979): The GEOS 3 project, *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 84(B8), 3779–3783.
- Strawbridge, F., Laxon, S. (1994): ERS-1 altimeter fast delivery data quality flagging over land surfaces, *Geophysical research letters*, 21(18), 1995–1998.

- Taguchi, E., Stammer, D., Zahel, W. (2014): Inferring deep ocean tidal energy dissipation from the global high-resolution data-assimilative HAMTIDE model, *Journal of Geophysical Research*, 119(7), 4573–4592.
- Tapley, B. D., Born, G. H., Parke, M. E. (1982): The Seasat altimeter data and its accuracy assessment, *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 87(C5), 3179–3188.
- Tsimplis, M. N., Marcos, M., Somot, S. (2008): 21st century Mediterranean sea level rise: steric and atmospheric pressure contributions from a regional model, *Global and Planetary Change*, 63(2), 105–111.
- Vignudelli, S., Kostianoy, A. G., Cipollini, P., Benveniste, J. (2011): *Coastal altimetry*, Springer Science Business Media, Berlin.
- Wagner, C. A., Cheney, R. E. (1992): Global sea level change from satellite altimetry, *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 97(C10), 15607–15615.

Satellite Altimetry: The Technology and its Application in Geodesy

ABSTRACT. Radar satellite altimetry is a method that enables obtaining the global high-precision sea level data related to desired geocentric reference frame. Satellite altimeter observations enable efficient solving of the main geodetic tasks addressed by the definition of geodesy, which include measuring the Earth's size and shape as well as the determination of the Earth's gravitational field. The measurements obtained by satellite altimeters are direct indicator of the Earth's response to climate change and other geophysical phenomena. The obtained data are used for determination of the height systems over the land and the sea, bathymetric map making, estimation of vertical land motion etc. This paper presents the basic concept of satellite altimeter technology along with principal principles of altimeter data processing. A special attention was paid to the review and analysis of the altimeter data corrections due to signal propagation through the atmosphere and the influence of geophysical phenomena on the emitted signal. Further, the study reviews in detail the development of technology through three phases, analyzing the contribution of each and describing the guidelines for future technology development. Finally, the study shows the products derived from satellite altimetry currently available for utilization in geodetic applications such as the models of gravity field, bathymetry, sea level trends, and others.

Keywords: satellite altimetry, sea level change, coastal altimetry, spatial data.

Primljeno / Received: 2017-09-29

Prihvaćeno / Accepted: 2017-12-20