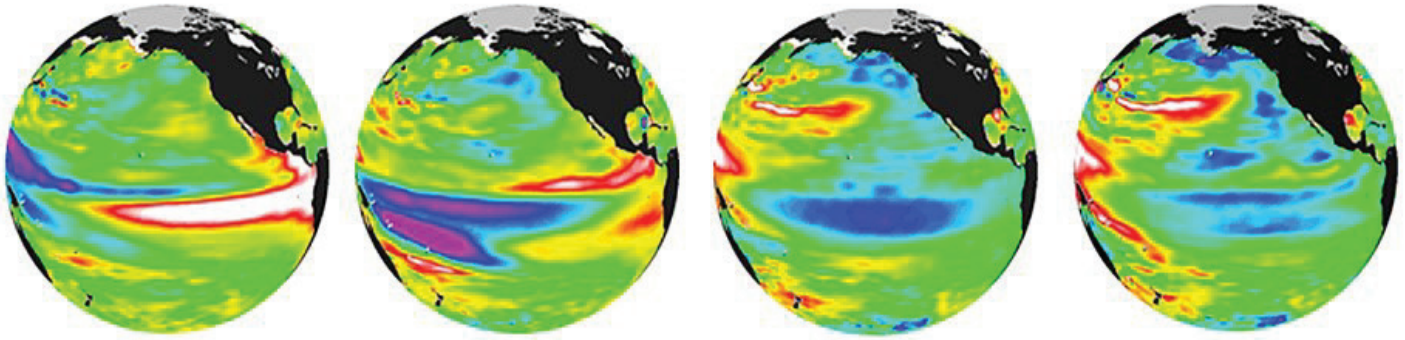


Petra Curiš, univ. bacc. ing. geod. et. geoinf., diplomski studij, Geodetski fakultet, Sveučilište u Zagrebu, Kačićeva 26, 10000 Zagreb, e-mail: pecuris@geof.hr
 Anja Černeka, univ. bacc. ing. geod. et. geoinf., diplomski studij, Geodetski fakultet, Sveučilište u Zagrebu, Kačićeva 26, 10000 Zagreb, e-mail: ancerneka@geof.hr
 Ana Čiček, univ. bacc. ing. geod. et. geoinf., diplomski studij, Geodetski fakultet, Sveučilište u Zagrebu, Kačićeva 26, 10000 Zagreb, e-mail: ancicek@geof.hr
 Matej Čurić, univ. bacc. ing. geod. et. geoinf., diplomski studij, Geodetski fakultet, Sveučilište u Zagrebu, Kačićeva 26, 10000 Zagreb, e-mail: mcuric@geof.hr



Satelitske altimetrijske misije

SAŽETAK: U radu je prikazan značaj i primjena satelitske altimetrije. Opisan je i princip rada metode satelitske altimetrije koja je izuzetno korisna za dobivanje fizikalnih parametara u područjima mora i oceana, što je pak od presudnog značaja za uspješno rješavanje različitih znanstvenih i praktičnih zadataka u području geodezije. Svoju je primjenu metoda pronašla u mnogobrojnim znanostima koje su uglavnom vezane za proučavanje planeta Zemlje, tzv. geoznanosti. Razvoj altimetrije započeo je 60-ih godina 20. stoljeća te su se do današnjeg dana razvile brojne satelitske altimetrijske misije gdje je svaka misija sa sobom nosila različiti skup instrumenata i time otkrivala nove činjenice i dotad nepoznate pojave. S obzirom na to da je većina misija polučila dobre rezultate i ostvarila zadane ciljeve, pristupilo se razvoju budućih misija uz daljnje ulaganje financijskih sredstava. U radu su prikazani i rezultati proteklih satelitskih altimetrijskih misija kao i zahtjevi koji se stavljaju pred buduće misije. Posebna je pozornost posvećena aktualnim satelitskim altimetrijskim misijama, njihovim karakteristikama, mogućnostima i podacima koje su nam sposobne pružiti.

Ključne riječi: altimetar, CNES, misije, satelitska altimetrija, SSH

Satellite Altimetry Missions

ABSTRACT: The paper presents the importance and application of satellite altimetry. It is also described the working principle of the satellite altimetry, that is extremely useful for obtaining physical parameters in the areas of seas and oceans which is crucial to the successful resolution of various scientific and practical tasks in the field of geodesy. The method has found its application in many sciences, which are mainly related to the study of Earth or so-called geosciences. Development of altimetry started in the 60s of the 20th century, and to the present day have developed several satellite altimetry mission where every mission was carrying a different set of instruments and thus revealing a new fact and previously unknown phenomena. Since most of the mission received good results, and achieve their goals, it is approached to the development of future missions and further investment funds. This seminar paper presents the results of recent satellite altimetry missions, as well as the demands that are put in front of future missions. Special attention is dedicated to current satellite altimetry missions, their characteristics, capabilities and data that we are able to provide.

Keywords: altimeter, CNES, missions, satellite altimetry, SSH, CNES.

1. Uvod

Razvojem tehnike i znanosti došlo je do zaključka da bi promatranja Zemlje iz svemira bila isplativija i omogućavala bi veću globalnu pokrivenost u odnosu na terestričke postupke (triangulacija, nivelman i gravimetrija), što je rezultiralo uspostavljanjem jedne od relativno novijih geodetskih tehnika – satelitske altimetrije koja se počela razvijati ubrzo nakon što je 1957. godine lansiranje umjetnih satelita postalo realnost. To je prva operativna tehnika mjerenja Zemlje iz svemira gdje se mikrovalni radijski signali odaslani sa satelita primaju i registriraju nakon refleksije od Zemljine površine. Posebno dobre rezultate satelitska altimetrija daje iznad vodenih površina uslijed povoljnih reflektivnih svojstava vode, što rezultira njezinom primjenom prvenstveno u oceanografiji, geodeziji i geofizici.

Pojavom satelitske altimetrije oceanografima je dan jedinstven alat za praćenje promjena morske površine u vremenu i prostoru te je omogućeno da se u vrlo kratkom vremenu stekne puno bolja spoznaja o geoidu na moru (Fu i Cazenave, 2001). U današnje moderno doba za geodeziju je neophodno poznavanje topografije oceana (mora) u svrhu ispunjavanja jedne od njezinih glavnih zadaća – određivanja vanjskog polja ubrzanja sile teže Zemlje i njezinog oblika i dimenzija kao nerazdvojnih cjelina. Površina oceana ekvipotencijalna je ploha Zemljinog polja ubrzanja sile teže (zanemarimo li utjecaj valova, vjetera, plimnih valova i ostalih gravitacijskih i negravitacijskih sila) (URL-2). U svojoj prvoj aproksimaciji ta je ekvipotencijalna ploha Zemlje definirana sferom. Zbog

Zemljine rotacije ekvipotencijalna površina mora je bliža u svojoj aproksimaciji elipsoidu čiji je polarni polumjer 43 km kraći od ekvatorijalnog. S obzirom na to da elipsoid vrlo dobro aproksimira Zemlju, odstupanja aktualne visine mora iznose do 100 m od idealnog elipsoida. Nejednakošću u plohi morske površine uzrokovane su varijacijama u gravitacijskom polju (URL-2). Kako je oko 71 % površine Zemlje prekriveno vodom, postalo je neophodno razviti tehnike i metode koje će zadovoljiti potrebe u proučavanju takvih područja. Značajnu ulogu u ispunjavanju te zadaće danas ima upravo satelitska altimetrija pomoću koje se promijenio način prikaza Zemljine vodene površine te posredstvom čijih mjerenja dolazimo do fizikalnih parametara Zemljinog polja ubrzanja sile teže na morima i oceanima.

Zahvaljujući ulozenom naporu u posljednja dva desetljeća, a uključujući blisku međunarodnu suradnju radarskih inženjera, geodeta, geofizičara, oceanografa i programera, tehnologija i znanost toliko su napredovali da se danas pred radarskim altimetrima postavljaju najteži zahtjevi poput određivanja topografije mora s točnošću od par centimetara, što je poboljšanje za tri reda veličine u odnosu na mjerenja provedena u samim počecima rada ove tehnologije (Fu i Cazenave, 2001). Razvoj altimetrije, počevši od prvih Skylab, GEOS-3 (engl. *Geodynamics Experimental Ocean Satellite*) i SEASAT-a (engl. *SEAfaring SATellite*) preko GEOSAT (engl. *GEOdetic SATellite*), ERS-1 i ERS-2 (engl. *European Remote Sensing Satellite*), Topex/Poseidon (engl. *Topography Experiment*), Jason-1 i Jason-2, GFO (engl. *Geosat Follow-On*), EnviSat (engl. *Environmental Satellite*) i ostalih misija,

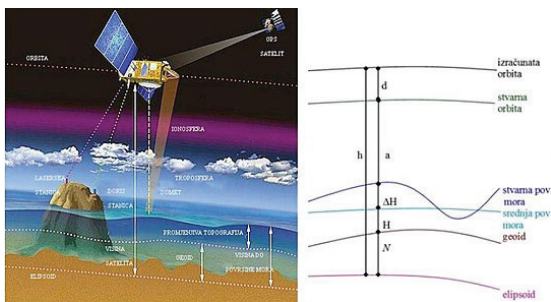
rezultirao je mnoštvom korisnih podataka čiji je napredak u pogledu kvalitete i točnosti vrlo očit. U nastavku ovog rada prikazat će se povijest razvoja satelitske altimetrije, njezini princip rada te primjena u geoznanstvenim disciplinama. Također će se predočiti rezultati prošlih misija te ciljevi koji su postavljeni pred buduću, dok će se poseban naglasak staviti na karakteristike i mogućnosti aktualnih misija. Na kraju je sukladno provedenim istraživanjima izveden vlastiti zaključak.

2. Satelitska altimetrija

Pojavom satelitske altimetrije 60-ih godina prošlog stoljeća omogućeno je dobivanje fizikalnih parametara Zemljina polja sile teže na morima i oceanima. Štoviše, zbog automatske i brze obrade podataka moguće je ostvariti pouzdane proračune topografije oceana i mora koji nam uspješno služe za rješavanje najrazličitijih znanstvenih i praktičnih zadataka u geodeziji (Bašić, 2013).

2.1. Princip rada satelitske altimetrije

Metoda satelitske altimetrije temelji se na posebno konstruiranom radar altimetru koji sa satelita odašilje radiosignale prema Zemlji te mjeri vrijeme potrebno da se signal reflektiran od vodene površine vrati (Bašić, 1993). Ovo se mjerenje naziva domet altimetra (engl. *altimeter range*). Na taj se način dobiju sirovi podatci koji se odnose na trenutnu ili kvazistacionarnu površinu mora ili oceana, koju uobičajeno označavamo sa SSH (engl. *Sea Surface Height*), iznad referentne plohe elipsoida. Takvi se podatci korigiraju za utjecaj gravitacijskih sila (Zemljinih plimnih valova, atmosferskih utjecaja i ostalih geofizičkih efekata), ali i za utjecaj negravitacijskih sila koje uzrokuju varijacije SSH-a (vremenske promjene oceanskih struja uslijed vjetera, gustoće mora i saliniteta) (Bašić, 1993). Karakteristične veličine u satelitskoj altimetriji prikazane su na slici 2. 1.



Slika 2. 1. Karakteristične veličine u satelitskoj altimetriji (Bašić, 2013; URL-1)

Veličina SSH-a sastoji se od dvije karakteristične veličine: geoidne undulacije N i topografije morske površine SST (engl. *Sea Surface Topography*) ili dinamičke visine. Dinamička topografija posljedica je djelovanja negravitacijskih sila i u sebi sadrži efekte globalnih strujanja i cirkulacije oceana (mora) (Bašić, 1993). Primjenom relacija iz fizikalne geodezije dobivamo parametre Zemljnog polja sile teže kao što su: otkloni vertikalne, geoidne undulacije i anomalije ubrzanja sile teže. Osnovna jednadžba altimetrijskih mjerenja dana je izrazom (2. 1.) koji je moguće izvesti sa slike 2. 1. (Bašić, 2013):

$$h = N + H + \Delta H + a + d \quad (2. 1.)$$

Određujući prosječnu promjenu visine SSH-a kroz određeno vrijeme, možemo definirati srednju površinu mora MSS (engl. Mean Sea Surface). Visina satelita h određuje se dobivanjem podataka o putanji satelita pomoću globalno raspoređene mreže laserskih i/ili Dopplerovskih stanica. Trajektorija i visina satelita dalje je poboljšana računom parametara orbite satelita. Glavni dijelovi mjernog sustava su (Bašić, 2013):

- + satelit u orbiti koji ponavlja isti trag putanje na tlu vrlo blisko (unutar oko 1km)
- + radarski sustav za mjerenje udaljenosti od satelita do morske površine s visokom točnošću (obično na dvije frekvencije) i
- + sustav praćenja, sposoban locirati satelit okomito u bilo kojem trenutku unutar nekoliko centimetara.

2.2. Povijesni razvoj satelitske altimetrije

Prva prava oceanografska istraživanja provedena su 1872. godine. Te je godine ekspedicija „Challenger“, pod vodstvom sir Charlesa Wyvillea Thompsona i Johna Murraya, 42 mjeseca istraživala oceane prikupljajući podatke kao što su dubine, temperatura i podatci o strujanjima. Navedeni podatci postavili su temelj moderne oceanografije (URL-1). Godine 1957. prvi se put pojavljuju umjetni sateliti, a samim tim otvara se novo polje istraživanja – svemir. Na kongresu u Williamstowu 1969. godine raspravljalo se o izvedivosti nove discipline – svemirske oceanografije uz pomoć radara. Sjedinjene Američke Države prva su država koja je upotrijebila satelitski altimetar kroz misije Skylab, GEOS-3, SEASAT i GEOSAT. Europska svemirska Agencija (engl. European Space Agency - ESA) 1991. godine izvela je lansiranje ERS-1 satelita koji je nosio radarski altimetar dok su 1987. godine CNES (fr. Centre National d'Etudes Spatiales) i NASA (engl. National Aeronautics and Space Administration) formalno sklopili partnerstvo za zajednički projekt nazvan Topex/Poseidon satelitska misija.

2.3. Primjena satelitske altimetrije

Informacije dobivene iz altimetrijskih podataka mogu se koristiti za određivanje Zemljinog oblika i veličine, anomalija ubrzanja sile teže, gibanja tektonskih ploča i pukotina, praćenje gibanja polova i određivanje međunarodnog terestričkog referentnog sustava. Primjena altimetrije moguća je i prilikom izučavanja tsunamija, valova potaknutih vertikalnom deformacijom oceanskog dna i uzroka podmorske seizmičke aktivnosti. U nekim je slučajevima njihovo djelovanje na površini mora moguće vidjeti uz pomoć altimetara i prema tome je moguće proučavati način na koji se šire (URL-1). Proučavanje valova omogućuje bolje razumijevanje međusobnog djelovanja Zemlje i Mjeseca, a time se dobiva važan izvor podataka za predviđanje modela atmosfersko-oceanski povezanih događanja kao što je El Niño, La Niña ili monsoni (Rosmorduc i dr., 2011). Ovi globalni atmosfersko-oceanski fenomeni, koji nastaju uslijed fluktuacija pravaca vjetrova i temperature vode u tropskim dijelovima Tihog oceana, pojavljuju se u periodima od dvije do sedam godina (URL-19). Jedna od primjena altimetrije odnosi se na određivanje debljine leda i topografije ledenjaka pomoću altimetara koji mogu doseći visoke geografske širine (URL-1). Za pojedina zatvorena mora, rijeke i močvare hidrološke se informacije teško mogu pribaviti zbog nepristupačnosti terena ili zbog nedostatka mjernih stanica, pa se u takvim slučajevima koriste altimetri koji mogu promatrati varijacije u visini pri čemu je točnost takvih altimetrijskih mjerenja degradirana nekoliko centimetara, uglavnom zbog heterogenosti površine (Rosmorduc i dr., 2011).

3. Satelitske altimetrijske misije

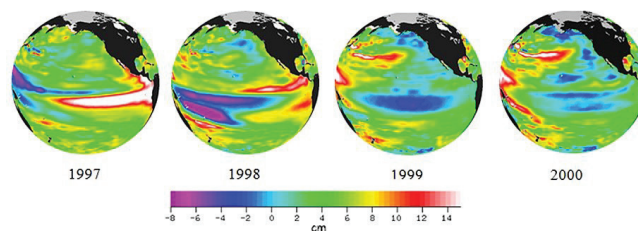
Od 1986. godine misije pružaju visoko kvalitetna altimetrijska mjerenja koja su integrirana s ostalim podatcima da se dobije najšira moguća slika temeljnih mehanizama na djelu i njihova asimilacija oceanskim i klimatskim predikcijskim modelima (Rosmorduc i dr., 2011).

3.1. Protekle satelitske altimetrijske misije

U tablici 3. 1. prikazane su protekle satelitske altimetrijske misije.

Skylab je nosio prvi satelitski altimetar koji je imao cilj pokazati sposobnost prikupljanja geodetskih i oceanografskih podataka preko određenog područja (URL-3) dok je GEOS-3 ponudio značajan napredak u odnosu na Skylabov altimetar, uključujući bolje performanse i bolju globalnu pokrivenost. Ipak, točnost je altimetra i dalje bila slaba tako da je srednje kvadratno odstupanje mjerenja za SSH visine u čvornim točkama, tj. mjestima na površini Zemlje gdje se sijeku uzlazni i silazni tragovi putanje satelita, iznosilo oko 40 cm (Rapp, 1986). Rezolucija kao mjera za količinu informacije s obzirom na gustoću i raspored opaženih točaka dosta je slaba, tj. oko 70 km uzduž i 20 – 400 km između tragova (Sandwell, 1991). Satelit je pokrivač područje između +65° i -65° geografske širine. Poseban cilj SEASAT misije bio je prikupiti podatke o vjetrovima, temperaturi mora, visini valova, topografiji oceana, količini vodene pare u atmosferi i ledenim morima. U odnosu na prethodne misije postignuto je značajno poboljšanje rezolucije, koja u vertikalnom smislu iznosi desetak centimetara dok u horizontalnom iznosi od 18 do 100 km, pokazujući fine strukture geoida pogotovo u slabo premjerenim područjima južne hemisfere (Stewart, 1988). Altimetar se koristio i pri određivanju visine ledenih pokrivača na Grenlandu i Antarktici. Prvih 18 mjeseci GEOSAT-ovih opažanja, koja su bila namijenjena prvenstveno za vojne svrhe, rezultirala su rezolucijom od 4 km razmaka između altimetrijskih tragova u području između +72° i -72° širine, ali su ti podatci tada bili nedostupni civilnim korisnicima. Satelit je izgorio u atmosferi nakon približno 80 ciklusa ponavljanja (Bašić, 1993). Podatci ove misije korišteni su i za dobivanje informacija o promjeni temperature s obzirom na

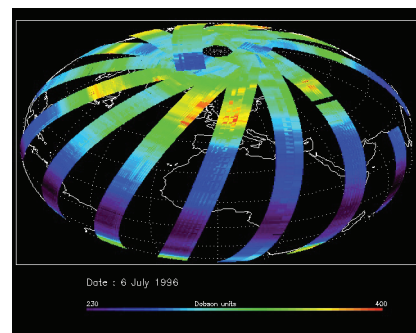
dubinu ili tlak, o anomalijama razine mora u ekvatorijalnom dijelu Pacifika, pokazujući tako širenje Kelvinovog vala, pa čak i pri proučavanju pješčanih dina (Porter, 1989). Kelvinov val pripada skupini valova određenih prisustvom obale, topografskih oblika u moru te drugih graničnih područja u moru, a nastaje kao posljedica djelovanja vjetera na površinu mora (URL-4). Satelit ERS-1 letio je u tri različite orbite: trodnevno razdoblje za kalibraciju i opažanja ledenih mora, razdoblje od 35 dana za multidisciplinarna opažanja oceana i od 168 dana za primjenu u geodeziji (URL-1). Altimetar funkcionira u dva mjerna moda, odnosno načina rada. Prvi se način rada koristi za mjerenje visine valova, brzine vjetera te promjene razine mora na temelju čega se proučava topografija oceana i njihova strujanja, dok se drugi odnosi na opažanje različitih parametara nad ledenim pokrovima (URL-3). Jedan od takvih primjera je i provedena studija o promjeni visine ledenog pokriva na Grenlandu u razdoblju od 1992. do 1999. godine. Podatci prikupljeni s ERS-1 satelita pokazuju promjene u iznosu od $4,3 \pm 0,4$ cm/god (Khvorostovsky i dr., 2001). Primjećuje se pad visine na rubovima ledenih površina jer je to područje najintenzivnijih ljetnih otapanja. Topex/Poseidon misiju obilježava činjenica da je to prvi satelit na koji je eksperimentalno ugrađen GPS prijemnik u svrhu što točnijeg određivanja pozicije (radijalna pozicija satelita određena s točnošću većom od 3 cm dok je točnost cijelog sustava bila veća od 5 cm). Misija predstavlja svojevrsnu revoluciju u promatranju



Slika 3. 1. Prosječne godišnje anomalije topografije površine izračunate iz TOPEX/Poseidon podataka od 1997. do 2000.(Fu i Menard, 2004)

vation de la Terre) dizajnirala je i razvila Francuska svemirska agencija. Cjelokupna SPOT organizacija obuhvaća sedam satelita, terestričke kontrolne stanice, globalnu mrežu stanica za praćenje i međunarodnu mrežu stanica za distribuciju podataka. Sveukupno postoji sedam SPOT satelita od kojih su tri (SPOT-5, SPOT-6 i SPOT-7) još uvijek aktivni (URL-20). Satelit Jason-2 preuzima i nastavlja zadatak Topex/Poseidon i Jason-1 misije. Njegov rad započinje zahvaljujući suradnji CNES-a, Eumestata (engl. *European Organisation for the Exploitation of Meteorological Satellites*), NASA-e i NOAA-e. Nosi istu vrstu opreme kao i njegovi prethodnici: Poseidon altimeter, radiometar i tri jedinice za pozicioniranje. Jason-2 putuje standardnom orbitom Jason-1 satelita s koje se mogu prikupiti podatci za oko 90 % Zemljine površine u ciklusu od 10 dana (URL-18). Primarni je zadatak Jason-2 satelita prikupljanje visoko preciznih altimetrijskih mjerenja u realnom vremenu za razvijanje prognostičkih modela oceana. U kombinaciji s GRACE (engl. *Gravity Recovery and Climate Experiment*) i GOCE (engl. *Gravity Field and Steady-State Ocean Circulation Explorer*) satelitima Jason-2 omogućuje bolje proučavanje i praćenje geoida. Ta mjerenja koristi ECMWF (engl. *European Centre for Medium Range Weather Forecast*) gdje se u kombinaciji s ostalim satelitskim podatcima stvaraju globalni atmosferski modeli i predviđaju vremenske prognoze oceana. Zahvaljujući dosadašnjim altimetrijskim mjerenjima, dobiven je podatak da razina mora raste 3 mm godišnje (Slika 3. 4.). Ta vrijednost je dva puta veća od vrijednosti koje su mareografi prognozirali prošlog stoljeća, što ukazuje na ubrzani rast razine mora (URL-17).

Nedavno su podatci Jason-2 satelita korišteni pri detektiranju poplava na području Bangladeša. Na tom je području tijekom 2014. godine zabilježen niz poplava koje su uz pomoć sustava SERVIR (engl. *The Regional Visualization and Monitoring System*) i njegovog centra za predviđanje i uzbunu od poplava FFWC (engl. *Flood Forecasting and Warning Centre*) uspješno predviđene. Jason-2 također mjeri vodostaj rijeka Ganges i Brahmapute 966 km uzvodno od Bangladeša čime poplave mogu biti predviđene tri do pet dana unaprijed (URL-18). Misija CRYOSAT (engl. *CRYOgenic-SATellite*) prva je europska misija posvećena proučavanju Zemljinog leda tj. kriosfere. Zasnovala ju je ESA i sastoji se od jednog CRYOSAT-2 satelita lansiranog u Kazahstanu (URL-14). Ciljevi su ove misije mjerenje promjena



Slika 3. 2. Prikaz ozona Zemlje (URL-7)

MISIJA	POČETAK	ZAVRŠETAK	KUT INKLINACIJE	VISINA	PERIOD ORBITIRANJA
Skylab	14.05.1973.	11.07.1979.	50°	435 km	28, 59, 84 dana
GEOS-3	09.04.1975.	07.1979.	115°	846 km	nema podataka
SEASAT	07.1978.	10.1978.	108°	800 km	17 dana
GEOSAT	10.03.1985.	31.01.1990.	108°	800 km	17,05 dana
ERS-1	17.07.1991.	31.03.2000.	98,52°	785 km	3, 35, 168 dana
Topex/Poseidon	10.08.1992.	18.01.2006.	66°	1336 km	9,9156 dana
ERS-2	21.04.1995.	06.07.2011.	95,52°	785 km	35 dana
GFO	10.02.1998.	26.11.2008.	108°	800 km	17 dana
Jason-1	07.12.2001.	01.07.2013.	66°	1336 km	9,9156 dana
EnviSat	01.03.2002.	08.06.2012.	98,55°	786 km	30 - 35 dana

Tablica 3. 1. Protekle altimetrijske misije (URL-5; URL-6)

Zemlje i njezinih oceana, omogućujući prvu globalnu pokrivenost topografije morske površine (URL-1). Slika 3. 1. pokazuje prosječnu godišnju anomaliju površine mora za razdoblje od 1997. do 2000. godine s prikazom evoluiranja El Niña u La Niņu, a nakon čega slijedi razvoj sporih promjena u Pacifiku, odnosno nova faza pacifičkih dekadskih oscilacija (Fu i Menard, 2004).

Glavni je cilj ERS-2 misije promatranje Zemlje, naročito njezine atmosfere i oceana, zbog čega je jednaka svojoj prethodnici ERS-1 (URL-1). Tijekom niza operativnih godina rada provedena su brojna istraživanja te postignuti brojni rezultati primjene ERS-2 satelita. Slika 3. 2. prikazuje cjelokupno područje ozona, na mapi Zemlje, opažanog tijekom jednog dana (6. 6. 1996). Opažanja su provedena pomoću senzora GOME (engl. *Global Ozone Monitoring Experiment Envisat*) (URL-7).

Tijekom 2000. godine provedena je opsežna provjera GFO orbite te geofizičkih mjernih podataka. Rezultati ukazuju da se točnost orbite može procijeniti na 5 – 6 cm koristeći kombinaciju SLR-a (engl. *Satellite Laser Ranging*) i altimetra (Zhao i dr., 2004). Satelitska altimetrijska misija Jason, zajednički pothvat CNES-a i NASA-e, omogućila je novi uvid u cirkulaciju oceana te praćenje plime i oseke. Satelit EnviSat namijenjen je ekološkim studijama te naročito proučavanju klimatskih promjena (URL-1). U sklopu projekta GlobTemperature provedeno je promatranje i mjerenje temperature površine Zemlje. Cilj je bio ujediniti čitav niz podataka dobivenih iz niza satelita u jedan zajednički format koji će biti dostupan putem jedinstvene *online* arhive. Na slici 3. 3. jasno su vidljive globalne površinske anomalije temperature uspoređene s prosječnim temperaturama (URL-8).

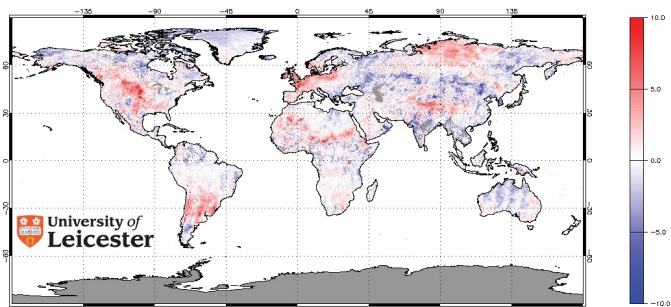
3.2. Aktualne satelitske altimetrijske misije

U tablici 3. 2. prikazane su aktualne satelitske altimetrijske misije. Za misije koje još uvijek traju u stupcu ZAVRŠETAK nema podataka o datumu završetka misije.

Sateliti SPOT (fr. *Satellite Pour l'Obser-*

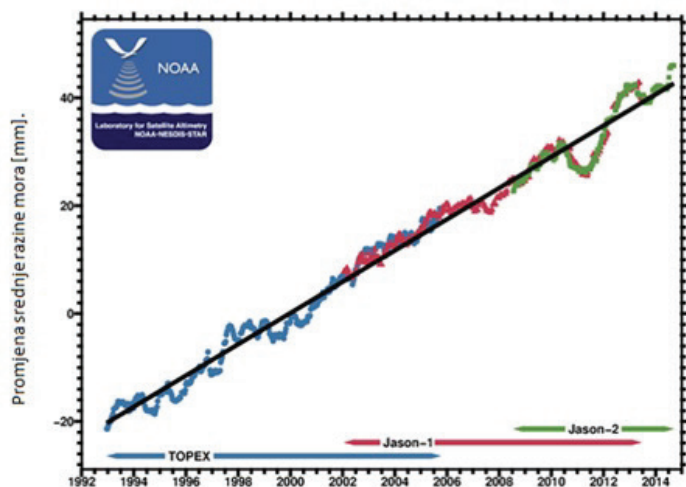
MISIJA	POČETAK	ZAVRŠETAK	KUT INKLINACIJE	VISINA	PERIOD ORBITIRANJA
SPOT-1	22.02.1986.	2003.	98,7°	822 km	26 dana
SPOT-2	22.01.1990.	30.06.2009.	98,7°	822 km	26 dana
SPOT-3	26.09.1993.	14.11.1996.	98,7°	822 km	26 dana
SPOT-4	24.03.1998.	11.01.2013.	98,7°	822 km	26 dana
SPOT-5	04.05.2002.	-	98,7°	822 km	26 dana
SPOT-6	09.09.2012.	-	98,2°	694 km	26 dana
SPOT-7	30.06.2014.	-	98,2°	694 km	26 dana
Jason-2	20.06.2008.	-	66°	1336 km	9,9156 dana
CRYOSAT-2	08.04.2010.	-	92°	717 km	369 dana
HY-2	15.08.2011.	-	99,3°	971 km	14 dana (2 god.)
				973 km	168 dana (1 god.)
SARAL	25.02.2013.	-	98,55°	800 km	35 dana

Tablica 3. 2. Aktualne satelitske altimetrijske misije (URL-10; URL-11; URL-12)



Slika 3. 3. Globalne površinske anomalije temperature (URL-8)

Globalna srednja razina mora mjerena Topex/Poseidon, Jason-1 i Jason-2 satelitima.



Slika 3. 4. Razina mora mjerena Topex/Poseidon, Jason-1 i Jason-2 misijom (URL-17)

debljine ledenih pokrivača koji prekrivaju Antarktiku i Grenland, kao i varijacija u debljini relativno tankog plutajućeg leda u polarnim oceanima. Kombinacija tehnologije na satelitu i polarnih orbita osigurat će dokaze za daljnje razumijevanje veze između leda i klime (URL-16). Nakon trogodišnjeg kontinuiranog CRYOSAT mjerenja predstavljene su karte debljine arktičkog leda za ljetni period 2011., 2012. i 2013. godine iz kojih je moguće uočiti otapanje leda. Mjerenja CRYOSAT-a provedena 2011. godine ukazuju da se razine leda približavaju najnižoj razini, koja je izmjerena 2007. godine. Jedno od zanimljivijih otkrića CRYOSAT misije jest veliki krater na antarktičkom ledu otkriven 2013. godine. Naime, krater je svojvremeno bio jezero iz kojeg je voda u periodu od 2007. do 2008. godine istekla u ocean ostavivši iza sebe krater velikog promjera te uzrokovavši veliku poplavu ispod antarktičkog ledenog pokrivača. Na temelju podataka dobivenih pomoću NASA-inog ICESata i CRYOSAT-a, tim znanstvenika iz ESA-e otkrio je da se volumen arktičkog leda smanjio za 36 % tijekom jesenskog perioda i 9 % tijekom zimskog perioda u razdoblju od 2003. do 2012. godine. Posljednja CRYOSAT mjerenja debljine arktičkog leda za 10. i 11. mjesec 2014. godine ukazuju da se volumen smanjio na 10200 kubičnih kilometara dok je isti u 2013. godini iznosio 10900 kubičnih kilometara (URL-15). Glavni je cilj HY-2 (kin. Hai Yang) izmjera dinamičkih i ekoloških parametara oceana u području mikrovalova dobivanje podataka o morskim vjetrovima, razini i temperaturi morske površine te dobivanje vremenske prognoze kako bi se izbjegle katastrofe na moru (URL-13). Rezultati HY-2 za Arktički ocean uspoređeni su s altimetrijskim podacima satelita SARAL (engl. *Satellite with ARgos and AltiKa*) i CRYOSAT-2 te prikazuju veće standardno odstupanje i srednju razinu mora višu za 10 cm. SARAL i CRYOSAT-2 prikazuju slične rezultate, dok HY-2 prikazuje niže vrijednosti anomalije razine mora. Primjena različitih korekcija može biti uzrok odstupanjima među mjerenjima (Cheng i dr., 2014). U tablici 3. 3. dani su rezultati altimetrijskih misija.

Na osnovi ponovnog prijelaza satelita preko istog područja izračunato je

standardno odstupanje površine mora od 7,1 cm (vrijednosti uzete za geografsku širinu manju od 50°). Vrijeme između dva prolaza satelita je najviše 3 dana kako bi se eliminirali utjecaji promjene razine mora (Hailong i dr., 2014). SARAL satelit koristi prvi altimetar koji radi na frekvencije od 35 GHz. Prednost visoke frekvencije je bolja prostorna rezolucija dok su nedostaci osjetljivost na kišne i oblačne uvjete (Verron i dr., 2013). Središnji ciljevi misije su (URL-12):

- + obavljati precizna i kontinuirana globalna mjerenje razine površine mora za:
 - + razvijanje oceanografije
 - + bolje razumijevanje klime i razvijanje mogućnosti prognoziranja
 - + operativnu meteorologiju i aplikaciju obalnih i kopnenih voda te leda.

- + osigurati, u suradnji s Jason-2 misijom, kontinuirano promatranje oceana i
- + ispuniti zahtjeve dane od strane raznih međunarodnih studijskih programa o klimi i oceanu, te pridonijeti izgradnji sustava globalnog praćenja oceana.

Dostupnost podataka iznosi oko 99,4 %, što premašuje očekivanja misije od 95 % (Verron i dr., 2013).

3. 3. Buduće satelitske altimetrijske misije

U tablici 3. 4. prikazane su buduće satelitske altimetrijske misije. Misije još nisu započele s radom, te se zbog toga u tablici nalaze samo podatci godine planiranja lansiranja satelita.

Satelitska misija Jason-3 osigurati će barem 6 mjeseci preklapanja s Jason-2 misijom. Cilj je misije, poput njezinih prethodnika, prikupiti visokoprecizne altimetrijske podatke. Sentinel sateliti dio su GMES (engl. *Global Monitoring for Environment and Security*) programa pod okriljem ESA-e i Europske unije (URL-1). Njezin glavni zadatak je točnije praćenje SSH-a, oceana i kriosfere te debljine plutajućeg leda. Konfiguracija satelita obuhvaćat će GNSS (engl. *Global Navigation Satellite System*) i LRR (engl. *Laser Retro Reflector*) instrumente (URL-9). Nastavljajući se na mjerenja Jason-3 satelita, Jason-CS (engl. *Jason Continuity of Service*) misija trebala bi osigurati višegodišnje prikupljanje podataka o oceanskoj topografiji. Planirana su najmanje dva satelita, Jason-CS/Sentinel-6 A i Jason-Cs/Sentinel-6 B. CFOSAT (engl. *Chinese-French Oceanic SATellite*) uključuje dva glavna instrumenta: francuski radar SWIM (engl. *Surface Wave Investigation and Monitoring*) za određivanje smjera, amplitude i valne duljine površinskih valova te kineski SCAT (engl. *Solar Cell Array Tester*) za određivanje brzine vjetra. Buduća satelitska misija SWOT (engl. *Surface Water Ocean Topography*) planirani je projekt koji uključuje NASA-u, CNES, Kanadsku svemirsku agenciju te Svemirsku agenciju Ujedinjenog Kraljevstva. Cilj je ujediniti hidrološke i oceanografske zajednice u jedan jedinstveni sustav. Sama misija trebala bi ostvariti rezoluciju od 15 do 25 km te mnoga druga postignuća (URL-1).

4. Zaključak

Satelitska altimetrija ostvarila je jedinstven doprinos pri promatranju i razumijevanju oceana, atmosferskih pojava i klimatskih promjena na globalnoj razini. Takav uspjeh nije slučajna, već je rezultat dobro smišljenog, planiranog i integriranog koncepta koji u sebi uključuje satelitska i *in situ* („na licu mjesta“) opažanja.

Misije	CryoSat-2	HY-2A	Saral
anomalija srednje razine mora (m)	-0,019	-0,115	-0,013
standardno odstupanje (m)	0,083	0,180	0,088

Tablica 3. 3. Rezultati misija (Cheng i dr., 2014)

MISIJA	PLANIRANO LANSIRANJE	KUT INKLINACIJE	VISINA	PERIOD ORBITIRANJA
Jason-3	2015.	66°	1336 km	10 dana
Sentinel-3	2015.	98,65°	814,5 km	27 dana
Jason-CS	2017.	66°	1336 km	10 dana
CFOSAT	2018.	90°	500 km	nije definiran
SWOT	2020.	77,6°	890 km	21 dan

Tablica 3. 4. Buduće satelitske altimetrijske misije (URL-12)

Podatci dobiveni pomoću satelitskih altimetara omogućuju praćenje cirkulacije oceana u realnom vremenu, što je pak od velike važnosti pri razvoju oceanografskih operativnih servisa, a implicira sigurno i efikasno obavljanje svakodnevnih aktivnosti na platformama, brodovima i u pomorskim lukama. Kartiranje struja, vrtloga te vjetrova vrlo je korisno u području komercijalne plovidbe i rekreativnog jedrenja na moru prilikom optimiziranja ruta. Brodovi za polaganje kabela i naftne platforme zahtijevaju poznavanje obrasca strujanja mora i oceana kako bi se izbjegla područja na kojima su prisutne jake struje. Altimetrijski su podatci važni i u području ribarstva pri identificiranju područja veće koncentracije ribe te lociranju područja na kojem se nalaze točno određene vrste ribe.

Na temelju desetogodišnjih visoko točnih altimetrijskih podataka moguće je analizirati sezonske i višegodišnje varijacije glavnih struja te glavnih vrtloga i na taj način poboljšati spoznaje o njima. Satelitska altimetrija pruža bogatstvo informacija o strukturama morskog dna, kao i procesima koji dovode do formiranja istih. Jedan od najvažnijih rezultata altimetrijskih mjerenja je potvrda o kretanju litosfernih ploča, prikaz njihovih granica, transformnih rasjeda, grebena i jaraka. Otkriven je veliki broj lanaca podvodnih planina te nam njihovo kartiranje pomaže pri kreiranju modela vrućih točaka (engl. *Hotspot*). Modeliranjem promjena distribucije topline u oceanu znanstvenici mogu proučavati klimatske pojave kao El Niño i La Niña, te na taj način spriječiti elementarne nepogode poput poplava i suša. Rezultati altimetrijskih mjerenja u kombinaciji s rezultatima dobivenih uređajem za mjerenje brzine vjetera mogu se implementirati u atmosferski model, koji se koristi za predviđanje uragana i olujnog nevremena, što je od velike pomoći pri pravovremenom alarmiranju stanovništva na određenom području.

Današnja geodezija zahtjeva globalni multidisciplinarni pristup za proučavanje minucioznih prostorno-vremenskih pojava koje se pojavljuju u Zemljinom sustavu. Oceani su golema, duboka i neprozirna prostranstva koja su većim dijelom još uvijek neistražena. Stoga je potrebno usavršiti instrumente kako bi se takva područja mogla što bolje istražiti. Uspješnost satelitske altimetrije pri opažanju i razumijevanju oceana ovisit će ne samo o svojstvima pojedinih satelitskih misija već i o entuzijazmu koje vlada među znanstvenicima i njihovoj sposobnosti da prihvate i usvoje nova znanja misija. Važno je nastaviti razvijati instrumentarij u svrhu poboljšanja kalibracije te prostorne i vremenske rezolucije za mezoskalna i submezoskalna opažanja. Istovremeno, potrebno je ulagati u razvoj *in situ* instrumentarija jer će puni potencijal satelitske altimetrije doći do izražaja tek u kombinaciji s tom mjernom tehnikom.

Literatura:

- + Bašić, T., (2013), *Fizikalna geodezija, Skripta, Sveučilište u Zagrebu, Geodetski fakultet, Zagreb.*
- + Bašić, T., (1993), *Primjena satelitske altimetrije u istraživanju Zemljinog polja sile teže na Jadranu, Zbornik Geodetskog fakulteta Sveučilišta u Zagrebu u povodu 30. obljetnice samostalnog djelovanja (1962.-1992.), str. 1.-8.*
- + Zhao, C., Shum, C. K., Yi, Y., (2004), *Calibration results of GFO, Satellite Altimetry for Geodesy, Geophysics and Oceanography, International Association of Geodesy Symposia, vol. 126, str. 41.-45.*
- + Cheng, Y., Baltazar Andersen, O., (2014), *Hy-2A Satellite altimetric data evaluation in the Arctic ocean, Proceedings of the IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, str. 5164.-5166.*
- + Fu, L. L., Menard, Y., (2004), *Advances in large-scale ocean dynamics from a decade of satellite altimetric measurement of ocean surface topography, Satellite Altimetry for Geodesy, Geophysics and Oceanography, International Association of Geodesy Symposia, vol. 126, str. 33.-37.*
- + Fu, L. L., Cazenave, A., (2001), *Satellite Altimetry and Earth Science: a handbook of techniques and applications, vol. 69, London, Academic Press.*
- + Hailong, P., Bo, M., Mingsen, L., Wu, Z. (2014), *Hy-2A Satellite Calibration And Validation Approach And Results, Proceedings of the IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, str. 4528.-4531.*
- + Khvorostovsky, K. S., Bobylev, L. P., Johannessen, O. M., (2001), *A study of Greenland ice sheet elevation change by using satellite altimeter data, Proceedings of the IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, vol. 2, str. 943.-945.*
- + Porter, D., (1989), *GEOSAT Altimetric Measurements Of Wind, Waves, And Sea Surface Heights-An Overview, OCEANS '89. Proceedings, vol.1, str. 208.-213.*
- + Rosmorduc, V., Benveniste, J., Bronner, E., Dinardo, S., Lauret, O., Maheu, C., Milagro, M., Picot, N., (2011), *Radar Altimetry Tutorial, CLS: France*

+ Rapp, R. H., (1986), *Gravity anomalies and sea surface heights derived from a combined GEOS 3/Seasat altimeter data set, Journal of Geophysical Research: Solid Earth (1978-2012), vol.91, no. B5, str. 4867.-4876.*

+ Sandwell, D. T., (1991), *Geophysical applications of satellite altimetry, Reviews of Geophysics Supplement, vol.29, str 132.-137.*

+ Stewart, R. H., (1988), *Seasat: Results of the mission, Bulletin of the American Meteorological Society, vol. 69, str. 1441.-1447.*

+ Verron, J., Philippis, S., Bonnefond, P., Faugère, Y., Richman, J., Griffin, D., Pascual, A., Birol, F., Aouf, L., Calmant, S., Michel, A., Tournadre, J., (2013.), *SARAL/AltiKa: A Ka Band Altimetric Mission, Aviso Users Newsletter, vol.10, France.*

Popis URL-ova:

- + URL-1: Satelitska altimetrija. [Internet], <raspoloživo na: <http://www.aviso.altimetry.fr/en/home.html>>, [pristupljeno 7. prosinca 2014.]
- + URL-2: Topex. [Internet], <raspoloživo na: http://topex.ucsd.edu/WWW_html/mar_grav.html>, [pristupljeno 7. prosinca 2014.]
- + URL-3: EOP. [Internet], <raspoloživo na: <https://directory.eoportal.org/web/eoport/home>>, [pristupljeno 13. prosinca 2014.]
- + URL-4: Mala internet škola oceanografije. [Internet], <raspoloživo na: <http://skola.gfz.hr/>>, [pristupljeno 20. prosinca 2014.]
- + URL-5: CFOSAT. [Internet], <raspoloživo na: <http://www.aviso.altimetry.fr/en/missions/future-missions/cfosat.html>>, [pristupljeno 18. prosinca 2014.]
- + URL-6: GEOSAT. [Internet], <raspoloživo na: <http://science.nasa.gov/missions/geosat/>>, [pristupljeno 20. listopada 2014.]
- + URL-7: ERS. [Internet], <raspoloživo na: http://www.esa.int/spaceinimages/Images/2001/04/European_research_has_obtained_outstanding_results_in_Earth_Observation_with_ERS>, [pristupljeno 19. prosinca 2014.]
- + URL-8: Promjena temperature. [Internet], <raspoloživo na: http://www.esa.int/spaceinimages/Images/2014/01/Temperature_changes>, [pristupljeno 19. prosinca 2014.]
- + URL-9: Sentinel-3. [Internet], <raspoloživo na: <https://earth.esa.int/web/guest/missions/esa-future-missions/sentinel-3>>, [pristupljeno 21. prosinca 2014.]
- + URL-10: Spot. [Internet], <raspoloživo na: <http://www.cnes.fr/web/CNES-en/1421-spot-at-a-glance.php>>, [pristupljeno 20. studenog 2014.]
- + URL-11: Spot. [Internet], <raspoloživo na: <https://apollomapping.com/imagery/medium-resolution-satellite-imagery/spot>>, [pristupljeno 25. listopada 2014.]
- + URL-12: CFOSAT. [Internet], <raspoloživo na: <http://www.aviso.altimetry.fr/en/missions/future-missions/cfosat.html>>, [pristupljeno 3. prosinca 2014.]
- + URL-13: HY-2. [Internet], <raspoloživo na: <https://directory.eoportal.org/web/eoport/satellite-missions/h/hy-2a>>, [pristupljeno 21. prosinca 2014.]
- + URL-14: Cryosat. [Internet], <raspoloživo na: <http://znanost.geek.hr/clanak/uspjesno-lansiran-esa-in-cryosat-2-ledeni-satelit/>>, [pristupljeno 4. listopada 2014.]
- + URL-15: Cryosat. [Internet], <raspoloživo na: http://www.esa.int/Our_Activities/Observing_the_Earth/The_Living_Planet_Programme/Earth_Explorers/CryoSat-2/Overview>, [pristupljeno 21. listopada 2014.]
- + URL-16: Cryosat. [Internet], <raspoloživo na: <http://www.aviso.altimetry.fr/en/missions/present-missions/cryosat>>, [pristupljeno 21. studenog 2014.]
- + URL-17: Jason-2. [Internet], <raspoloživo na: <http://www.ospo.noaa.gov/Operations/Jason2/index>>, [pristupljeno 21. prosinca 2014.]
- + URL-18: Jason-2. [Internet], <raspoloživo na: <https://www.servirglobal.net/Global/Articles/tabid/86/Article/1334/servirs-flood-forecasting-system-proving-itself-in-bangladesh.aspx>>, [pristupljeno 1. prosinca 2014.]
- + URL-19: Jason-2. [Internet], <raspoloživo na: <http://www.eumetsat.int/web-site/home/Satellites/CurrentSatellites/Jason2/index>>, [pristupljeno 10. prosinca 2014.]
- + URL-20: Spot. [Internet], <raspoloživo na: <http://www.aviso.altimetry.fr/en/missions/present-missions/spot>>, [pristupljeno 15. listopada 2014.]