

Matej Varga, univ. bacc. ing. geod. et geoinf. ▶ diplomski studij, Geodetski fakultet, Sveučilište u Zagrebu, Kačićeva 26, 10000 Zagreb, e-mail: mvarga@geof.hr

GLOBALNI GEODETSKI OPAŽAČKI SUSTAV ~ GGOS

SAŽETAK

MODERNA GEODETSKA ISTRAŽIVANJA UKLJUČUJU ŠIROKI SPEKTAR SVEMIRSKIH I TERESTRIČKIH TEHNIKA KOJA PRIDONOSE ZNANJU O KRUTOJ ZEMLJI, ATMOSFERI I OCEANIMA. U PROTEKLA DVA DESETLJEĆA U SKLOPU IAG-A RAZVIJALI SU SE SERVISI U SVRHU GLOBALNE KOORDINACIJE GEODETSKIH AKTIVNOSTI TE ZA OSIGURANJE VISOKO-TOČNIH I POUZDANIH GEODETSKIH PROIZVODA. RAZUMIJEVANJE PROCESA UNUTAR CJELOKUPNOG SUSTAVA ZEMLJE I PROMJENA ISTOGA TIJEKOM VREMENA ZAHTIJEVAJU KONSTANTNO PRAĆENJE IZ TIH JE RAZLOGA OSNOVAN GLOBALNI GEODETSKI OPAŽAČKI SUSTAV (GGOS), A KOJI UNUTAR ORGANIZACIJE IAG-A POVEZUJE SVE SERWISE I PROGRAME ZA PRAĆENJE I ISTRAŽIVANJE ZEMLJE. TAKVIM SUSTAVOM DOBITAT ĆE SE VRIJEDNE INFORMACIJE U PODRUČJIMA: PRIRODNIH KATASTROFA, LJUDSKOGA ZDRAVLJA, IZVORA ENERGIJE, KLIME, VODA, VREMENA, ITD.

1. UVOD

KLJUČNE RIJEČI
GGOS
servisi IAG-a
opažanje Zemlje
geodetske i
svemirske tehnike
GGOS 2020

Zemlja je mjesto različitih dinamičkih procesa uzrokovanih unutarnjim i vanjskim silama. Svi ti procesi nastaju i djeluju u različitim vremenskim i prostornim skalama. Kao posljedica nekih od tih procesa velika su područja Zemlje izložena prirodnim katastrofama poput uragana, tajfuna, poplava i potresa (slika 1). Urbana područja upravo su najviše rizična. Čovječanstvo se trenutno susreće s ograničenjima planeta Zemlje i konačnim resursima koji ne mogu zadovoljiti rastuću ljudsku populaciju, a koja je i dalje najveći kreator raznolikih promjena na Zemlji. Brzina promjena klime presudna je za nemogućnost predviđanja i prevencije nastanka i razvoja takvih katastrofa.

Moderna geodetska istraživanja, koja uključuju široki spektar svemirskih i terestričkih tehnologija, pridonose znanju o krutoj Zemlji, atmosferi

i oceanima. Mnoge od tih geodetskih tehnika zahtijevaju globalnu pokrivenost terestričkom infrastrukturom, uz pridružene svemirske segmente. Nadalje, razvoj svemirskih geodetskih tehnika omogućuju opsežna praćenja fizikalnih osobitosti Zemlje i to s visokom točnošću i prostornom i vremenskom rezolucijom. Takova geodetska opažanja daju presudne informacije o geodinamičkim procesima, a koji uzrokuju prirodne procese poput potresa, vulkanskih erupcija, klizišta, promjenama u razini vodenih masa i vodama na kopnu.

U protekla dva desetljeća u sklopu IAG-a (International Association of Geodesy), krovne svjetske geodetske zajednice, razvijali su se servisi u svrhu globalne koordinacije geodetskih aktivnosti te za osiguranje visoko-točnih i pouzdanih geodetskih proizvoda. Takvi proizvodi su prije svega služili kao potpora raznolikim geofizičkim istraživanjima. Danas ti isti servisi, zasnovani na različitim geodetskim tehnikama i podacima, pružaju usluge za široki spektar korisnika, a ne samo za geodetsku i geofizičku zajednicu. Razumijevanje procesa unutar cjelokupnog sustava Zemlje i promjena istih tijekom vremena zahtijevaju konstantno praćenje. Stoga se tijekom XXIII.



SLIKA 1. Neki od razloga potrebe praćenja aktivnosti na Zemlji



SLIKA 2. Logo GGOS-a

IUGG-ovog (International Union of Geodesy and Geophysics) kongresa 2003. u Sapporo-u javila inicijativa za osnivanjem Globalnog geodetskog opažajućeg sustava (Global Geodetic Observing System) (slika 2). Takav bi sustav unutar organizacije IAG-a povezo sve servise i programe za praćenje i istraživanje Zemlje. Na kongresu IUGG-a 2007. godine potvrđen je status GGOS-a kao organizacije koja obuhvaća dva različita dijela: 1. radne grupe, zavode, komisije i istraživačke skupine; 2. infrastrukturu različitih instrumenata, satelitskih misija, kontrolnih i obrađivačkih centara. Organizacijske komponente GGOS-a već su postojale unutar organizacije IAG-a, dok se tehnološka i istraživačka infrastruktura znatno proširila. Primjerice, GPS sustav koji je jedan od dijelova GGOS-a, održava Ministarstvo obrane Sjedinjenih Američkih Država. Satelitske misije koje sudjeluju u GGOS-u, a uključuju satelitsku altimetriju, gravimetriju i InSar, također nisu direktno pod okriljem IAG-a. U prosincu 2004., na IAG-ovom izvršnom susretu u San Franciscu, GGOS sustav je službeno pušten u rad, nakon što su nekoliko mjeseci ranije osnovani uredi za koordinaciju, standarde i konvencije, mreže i komunikaciju te povjerenstvo za satelitske misije. Trenutačno se veliki znanstveni potencijal GGOS-a razvija u sklopu programa nazvanoga GGOS 2020: Zadovoljavanje potreba globalnog društva na planetu Zemlji.

2. ZNANSTVENE, TEHNOLOŠKE I CIVILNE POTREBE GGOS-A

Većina svakodnevnih objekata i aplikacija koje koristi čovjek povezani su s poznavanjem položaja; bilo da je riječ o položaju neke točke na Zemljinom tlu, zgrade, mosta, brane, naftne platforme ili položaja mobilnog telefona, poljoprivrednih strojeva, automobila, kamiona, vlaka, aviona ili broda. Svi ti položaji određuju se preko terestričkoga referentnog okvira, a o kojemu direktno ovisi sama točnost položaja točaka. Za određivanje visine objekata u današnje vrijeme se sve više koristi GNSS mjerna tehnika. To za sobom povlači potrebu za što točnijim modeliranjem geoida, kako bi se s elipsoidnih visina moglo preći na ortometrijske visine koje se koriste u svakodnevnoj praksi. Osim toga, globalni zračni, lučni i cestovni promet, koji podrazumijeva svakodnevne prelaske milijuna ljudi preko državnih granica, također zahtijeva kompatibilne prostorne baze podataka.

Važan znanstveni zadatak u kojemu GGOS može puno doprinijeti je i umanjenje utjecaja prirodnih nepogoda i katastrofa poput potresa, vulkanskih erupcija, klizišta, slijeganja terena, promjene razine mora, tsunamija, poplava, udara groma i uragana. GNSS, InSAR i gravimetrijska mjerenja mogu se koristiti za praćenje vulkana prije erupcije ili deformacija u zonama potresa. Gravimetrija i altimetrija mogu se koristiti za praćenje riječnih slivova, a altimetrija i mareografska opažanja za praćenje promjene razine mora. Sva ta mjerenja usko su vezana na, već spomenuti, terestrički referentni okvir.

Na Zemlji se konstantno mijenja omjer leda, snijega i podzemnih voda. Promjena i distribucija masa, zajedno s površinskim i podzemnim migracijama masa, gibanjima unutar plašta i kore, mijenjaju gravitacijsko polje Zemlje, rotaciju te oblik Zemlje. GGOS mjerenja prate takve dinamičke promjene na i unutar Zemlje. Nadalje, praćenje i navigacija među-planetarynih svemirskih letjelica zahtijevaju poznavanje točnog terestričkog i svemirskog referentnog okvira, Zemljine orijentacijske parametre i položaje referentnih stanica. Sadašnje i predviđanje budućih potreba radiometrijskih mjerenja, geodetskih koordinata i kalibracijskih parametara pokazuje

FIZIKALNI/GEOMETRIJSKI PARAMETAR	JEDINICA	2005.	2006.	2010.	2020.	2030.
Doppler (slučajno) (60 s)	mm/s	0.05	0.03	0.03	0.03	0.02
Doppler (sustavni) (60 s)	mm/s	0.05	0.001	0.003	0.003	0.002
Udaljenost (slučajno)	m	0.8	0.3	0.5	0.3	0.1
Udaljenost (sustavno)	m	0.6	1.1	2	2	1
Δ VLBI	nrad	5	2.5	2	1	0.5
Troposfersko zenitno kašnjenje	cm	1	0.8	0.5	0.5	0.3
Ionosfera	TECU	5	5	5	3	2
EOP (realno vrijeme)	cm	30	7	5	3	2
EOP (nakon obrade)	cm	5	5	3	2	0.5
Geocentrične koordinate stanica	cm	3	3	2	2	1
Koordinate izvan-galaktičkih objekata (kvazari)	nrad	1	1	1	1	0.5
Efemeride Marsa	nrad	-	2	3	2	1

TABLICA 1. Sadašnje i buduće potrebe radiometrijskih mjerenja, geodetskih koordinata i kalibracijskih parametara (Plag i dr. 2006)

Primjena/proces	Parametar	Preciznost	Latentnost	Referentni okvir	Vrijeme realizacije
Mjerenje s preciznim pozicioniranjem	3D koordinate	10-50 mm	dani	nacionalni	desetljeće
	ubrzanje	1 mm/god.	-		
Praćenje	3D koordinate	<10 mm	dani	lokalni	desetljeće
	ubrzanje	<10 mm/god.	tjedni		
Kontrola procesa	horizontalno	10-100 mm	sekunda-minuta	lokalni	desetljeće
Građevinarstvo	3D	<10 mm	sekunda-minuta	lokalni	mjesec-godina
Rano alarmiranje	3D	10 mm	sekunda-minuta	globalni	dani
Katastrofe i procjene rizika	3D	<10 mm	dani-mjeseci	globalni	desetljeće
Predikcija vremena	IPWV	1-5 kg/m ²	5-30 minuta	globalni	desetljeće
Klimatske varijacije	IPWV	1 kg/m ²	1-2 mjeseca	globalni	desetljeće
Znanstvene studije	3D koordinate	<10 mm	-	globalni	desetljeće
	ubrzanje	<1 mm/god.	-		
Opažanja Zemlje	3D koordinate	<10 mm	nekoliko dana	globalni	desetljeće
	ubrzanje	<1 mm/god.	-		

TABLICA 2. Sadašnje i buduće potrebe glavnih aplikacija (Plag i dr. 2006)

tablica 1. Predviđanja u tablici 1 relativna su i spekulativna i ovisit će o budućim specifikacijama i dometima svemirskih misija.

Kako bi se mogao modelirati oblik, gravitacija i rotacija svemirskih objekata, svemirske letjelice moraju biti vrlo točno navođene. Pri tim svemirskim misijama, laserska i Dopplerovska mjerenja imaju najvažniju ulogu, pa se stoga laserska mjerenja trenutačno poboljšavaju s centimetarske na milimetarsku razinu.

Za korisnike koji trebaju pozicioniranje u realnom vremenu zahtjeva se preciznost od 1-10 cm, a kod nekih slučajeva i bolje od cm. Za zadatke praćenja promjena koji traju duže vremensko razdoblje kritična je granica promjene 1 mm/godišnje. To ovisi o kvaliteti baze podataka održavane kroz duže vrijeme (primjerice desetljeće).

Kvantitativne potrebe imaju više smisla ukoliko pokazuju jasnu vezu sa specifičnim aplikacijama korištenim u svakodnevnom životu. Ostale važnije primjene ili procesi u konkretnim primjerima, a za koje će GGOS davati rezultate, s pripadajućim parametrima i preciznošću, dani su u tablici 2.

U tablici 3. prikazani su najzahtjevniji znanstveni procesi i aplikacije kao funkcija latentnosti i vremenske skale (Plag i dr. 2006).

Za većinu zadataka potrebno je poznavanje kinematike Zemljine površine s točnošću od <1 mm/god. Željena preciznost geoida manja je od 1 cm za valne duljine ispod nekoliko desetaka kilometara. Kako bi se osiguralo praćenje vodenih masa na Zemlji mora se zadovoljiti točnost bolja od 10 mm za vodeni stupac prostorne valne duljine manje od 500 km. Vremenska rezolucija takvih modela trebala bi biti manja od 1 mjeseca ili bolja (10 dana).

Osim toga, GGOS proizvodi zahtijevaju:

- Preciznost svemirskog referentnog okvira od 25 μ s (microarcseconds), sa stabilnošću od 3 μ s/godišnje.
- Realizaciju terestričkoga referentnog okvira unutar 1 mm, stabilnog na 0.1 mm/god..

- Zemljine orijentacijski parametre precizne na 1 mm (s 2-tjednim čekanjem rezultata) i 3 mm (s rješenjem u realnom vremenu).
- Statički geoid: precizan na 1 mm, stabilan do 0.1 mm/god, s prostornom rezolucijom od 10 km.
- Vremenski promjenjivi geoid: precizan na 1 mm, stabilan do 0.1 mm/god., s prostornom rezolucijom 50 km i vremenskom rezolucijom od 10 dana.

3. IZAZOVI GGOS-A

Neki od najvažnijih znanstvenih rezultata GGOS-a proizlaze iz integracije triju tradicionalnih geodetskih fundamentalnih grana: geometrije, rotacije Zemlje i gravitacijskog polja (slika 3). Integracija tih triju grana omogućava bolje razumijevanje anomalija masa Zemljine površine, njihovog gibanja i izmjena unutar čitavog Zemljinog sustava.

Izazovi istraživanja unutar tih triju znanstvenih područja su (Plag i dr. 2009):

- Kombinacija različitih geodetskih satelitskih sustava (SLR, VLBI, GPS, DORIS, InSAR, oceanska altimetrija i altimetrija leda), gravimetrijskih svemirskih tehnika (analiza poremećajnih putanja, visoki-niski i niski-niski SST, satelitska akcelerometrija i gradiometrija), relevantnih astrometrijskih tehnika i misija, GNSS sustava i zemaljskih stanica. Osim toga, globalna mreža prijamnika i opservatorija moraju funkcionirati unutar jednoga Zemaljski

fiksnog koordinatnog sustava. 3D koordinate i geopotencijalne visine moraju se također pratiti s istom preciznošću te osiguranom stabilnošću kroz dulje vrijeme.

- Svemirski segment mora biti komplementaran terestričkim i zračnim tehnikama. To ujedno znači kombinaciju podataka različitih mjernih tehnika, gustoća i rezolucije. Uz to, kopno, led i oceani nastoje se pratiti s najvišom mogućom prostornom rezolucijom.
- Mora se ostvariti poveznica između geodetskih mjerenja GGOS-a i ostalih važnih geofizičkih istraživanja. To je zapravo zahtjevan interdisciplinarni zadatak koji zahtijeva suradnju između: geofizičara, geologa, glaciologa, oceanografa, hidrografa, itd. Takva kooperacija treba dovesti do razumijevanja tektonskih gibanja, vulkanske aktivnosti, potresa, dinamike gibanja leda, strukture i promjena u oceanskim gibanjima, toplinskim gibanjima oceanskih masa, promjenama razine mora i atmosfere dinamičke.
- Mjerenje vremenskih varijacija rotacije Zemlje te modeli geoida zbog potpunog razumijevanja raspodjele masa i sastava krute Zemlje.

Glavna uloga geodezije u geoznanostima, uz široku lepezu raznolikih zadaća, još uvijek je realizacija visoko-preciznog i dugoročno stabilnog referentnog koordinatnog okvira (slika 4). To omogućuje ostalim geoznanstvenicima pouzdano prostorno motrenje procesa iz područja njihovog interesa.

Proces	Parametar	Preciznost	Prostorna rezolucija	Vremenska rezolucija	Okvir	Vrijeme realizacije
Gibanja unutar plašta i tektonska gibanja	3D ubrzanja	<1 mm/god.	-	-	globalni	nekoliko desetljeća i duže
	statički geoid	<10 ⁻⁹	-	-	globalni	
	sekularni trend istezanja	10-19 s ⁻¹	1000 km	-	globalni	
Post-glacijalna gibanja	3D ubrzanja	<1 mm/god.	100 km	-	globalni	nekoliko desetljeća i duže
	geoid	<10 ⁻⁹	-	-	globalni	
	trend istezanja	10-15 s ⁻¹	100 km	-	globalni	
	rotacija Zemlje	0.1 mas/god.	-	-	globalni	
Klimatske promjene	lokalna morska razina	<1 mm/god.	(2-10) • 102 km	-	globalni	desetljeće
	3D pomaci	1 mm	100 km	mjeseci	globalni	
	3D ubrzanja	<1 mm/god.	<100 km	-	globalni	
	lokalna gravitacija	<0.3 μGal	<100 km	-	lokalni	
	geoid	<10 mm	200 km	-	globalni	
Cirkulacija oceana	rotacija Zemlje	0.1 mas/god.	-	-	-	desetljeće
	lokalna morska razina	<1 mm/god.	100 km	mjeseci	-	desetljeće
Hidrološki ciklus	gravitacijsko polje	<10 ⁻⁹	100 km	mjeseci	globalni	desetljeće
	3D pomaci	<1 mm	100 km	mjeseci	globalni	desetljeće
Sezonske promjene	gravitacijsko polje	<10 ⁻⁹	100 km	mjeseci	globalni	desetljeće
	lokalna gravitacija	1 μGal	-	mjeseci	lokalni	desetljeće
	3D pomaci	<1 mm	100 km	mjeseci	globalni	desetljeće
	rotacija Zemlje	1 mas	-	mjeseci	-	desetljeće
Atmosferske promjene	rotacija Zemlje	1 mas	-	dani	-	desetljeće
	gravitacija	0.01 μGal	1000 km	sati	globalni	godine
Plima i oseka	3D pomaci	1 mm	1000 km	sati	globalni	godine
	trend promjene	10-15 s ⁻¹	1-1000 km	<dan	globalni	godine
Gibanja Zemljine kore	3D pomaci	< 1 mm	<100 km	<dan	globalni	godine
	lokalna gravitacija	0.1 μGal	<<102 km	<dan	globalni	godine
Seizmo-tektonika	3D pomaci	1 mm	<100 km	dani	globalni	dani-godine
	trend rastezanja	10-19 s ⁻¹	<10 km	godine-sekularne godine	lokalni	desetljeće
Vulkani	3D pomaci	1 mm	1-100 km	<dan	lokalni	godine
	gravitacija	1μGal	1-100 km	dani	lokalni	godine
Potresi, tsunamiji	3D pomaci	1 mm - 1 cm	<<100 km	sekunda-dani	lokalni	tjedni-desetljeće
	rastezanje	10-8	≈10 km	ofseti	lokalni	-
	trend rastezanja	10-15 s ⁻¹	≈10 km	<god.	lokalni	godine
	lokalna gravitacija	0.3 μGal	<<102 km	sekunda- dani	lokalni	tjedni-desetljeće

TABLICA 3. Potrebe korisnika za znanstvenim istraživanjima i procesima (Plag i dr. 2009)

Navedeni ciljevi na granici su današnjih mogućnosti. Zahtijevaju ujedinjeni napor u teoriji, matematičkim metodama, rukovanju i modeliranju informacijama, mjernim kampanjama, razvoju instrumenata, organizaciji, itd. Definirani ciljevi i izazovi u preciznosti, ravnomjernosti, konzistentnosti i stabilnosti rezultata odnose se na sve komponente i stupnjeve obrade i modeliranja geodetskih podataka.

Kako bi se to postiglo potrebno je postići dogovore u pogledu:

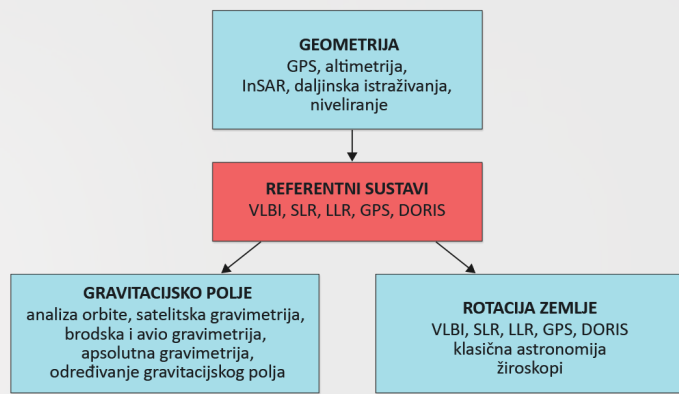
- fundamentalnih konstanti,
- geodetskog datuma, vremena i geopotencijala (sve unutar 1 ppm),
- standarda,
- geofizičkih modela (krute Zemlje, plimnih valova, atmosfere, oceana, leda, ionosfere, troposfere) koji se koriste za redukcije i korekcije efekata,
- komplementarnih mjerenja u drugim znanstvenim disciplinama.

Konkretni znanstveni zadaci GGOS-a su:

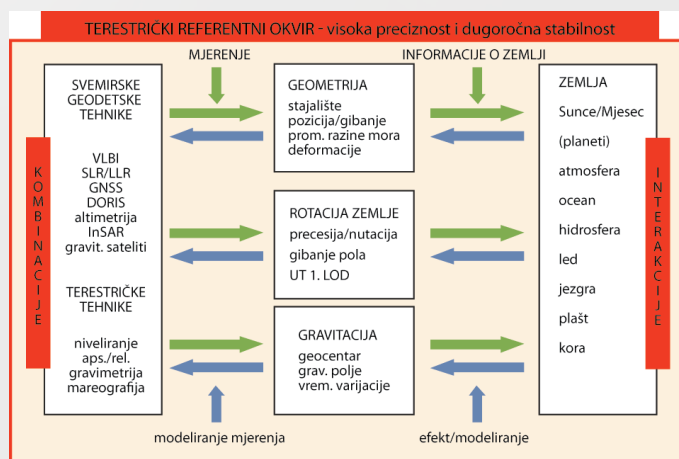
- definirati svemirski referentni koordinatni sustav,
- definirati terestrički referentni koordinatni sustav (geodetski datum),
- definirati gravitacijski referentni sustav,
- definirati sve fizikalne i matematičke modele koji se koriste u analizi GGOS mjerenja,
- osigurati i održavati precizni, stabilni i homogeni svemirski referentni koordinatni okvir,
- osigurati i održavati precizni, stabilni i homogeni terestrički referentni okvir,
- osigurati i održavati vremenski ovisne Zemljine orijentacijske parametre koji se koriste za transformaciju koordinata između terestričkih i svemirskih referentnih koordinatnih sustava,
- osigurati i održavati definicije, konstante i modele geodetskih referentnih sustava,
- osigurati i održavati parametre koji opisuju statičke i vremenski promjenjive komponente Zemljinoga gravitacijskog polja,
- osigurati i održavati parametre statičkih i vremenski promjenjivih komponenata oblika Zemlje, leda i površina oceana,
- osigurati i održavati parametre koji opisuju ionosferu i troposferu,
- osigurati i održavati parametre koji opisuju promjene masa između površine Zemlje, oceana i atmosfere.

Kao rezultat navedenih zadataka GGOS će na raspolaganje davati ili daje slijedeće proizvode:

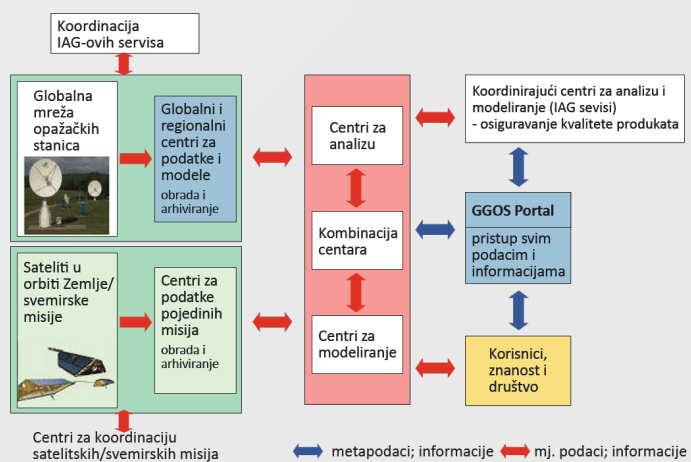
- katalog svemirskih radio-izvora,
- katalog točaka koje realiziraju terestrički referentni okvir (zajedno s koordinatama u zadanim epohama i njihovim promjenama),
- vremenske setove koordinata dodatnih točaka prognošenja terestričkog referentnog okvira,
- model promjene površine Zemlje uzrokovan plimnim efektima atmosferskog tlaka, dna oceana i kopnenih voda (uključujući snijeg i led),
- precizne orbite i realizaciju vremena za GNSS satelite,
- vremenske setove Zemljinih orijentacijskih parametara (UT1, gibanje pola, precesija/ nutacija) zajedno s njihovim promjenama,
- vrijednosti konstanti te izvedenih fizikalnih i geometrijskih parametara geodetskog referentnog sustava,
- vrijednosti parametara koji opisuju statičke i vremenski promjenjive komponente Zemljinoga gravitacijskog polja,
- karte ionosfere,
- vremenske serije kašnjenja signala zbog vodene pare u troposferi,
- vremenske serije kutnih momenata atmosfere, oceana, kopnenih voda (snijega i leda), plašta i kore,
- vremenske serije ledenih blokova i kretanja glečera,
- identične vremenski promjenjive koordinate, orijentacijske i gravitacijske parametre za druge planete i svemirska tijela unutar Sunčeva sustava.



SLIKA 3. Tri "stupa" GGOS-a



SLIKA 4. Mjerenja i modeliranje Zemlje u svrhu realizacije terestričkoga referentnog okvira



SLIKA 5. Izgled GGOS-a (globalne mreže opservatorija, satelitske misije, centri za podatke, centri za analizu i centri za koordinaciju)

4. STRUKTURA GGOS-A

GGOS sustav je dizajniran kako bi zadovoljio sadašnje i buduće potrebe znanstvene i društvene zajednice. To je vrlo kompleksan sustav s mnogo različitih senzora i instrumenata, na Zemlji, u atmosferi i u svemiru koji su integrirani u jedan globalni opažajući sustav. Općenito gledajući, takav sustav je vrlo moćan geodetski „instrument“ za praćenje cijele Zemlje. Kako bi se mogao realizirati GGOS mora ujediniti, ne samo globalnu terestričku mrežu opservatorija i satelitskih misija, već i komunikacijsku strukturu, centre za analizu, centre za koordinaciju i internetski portal.

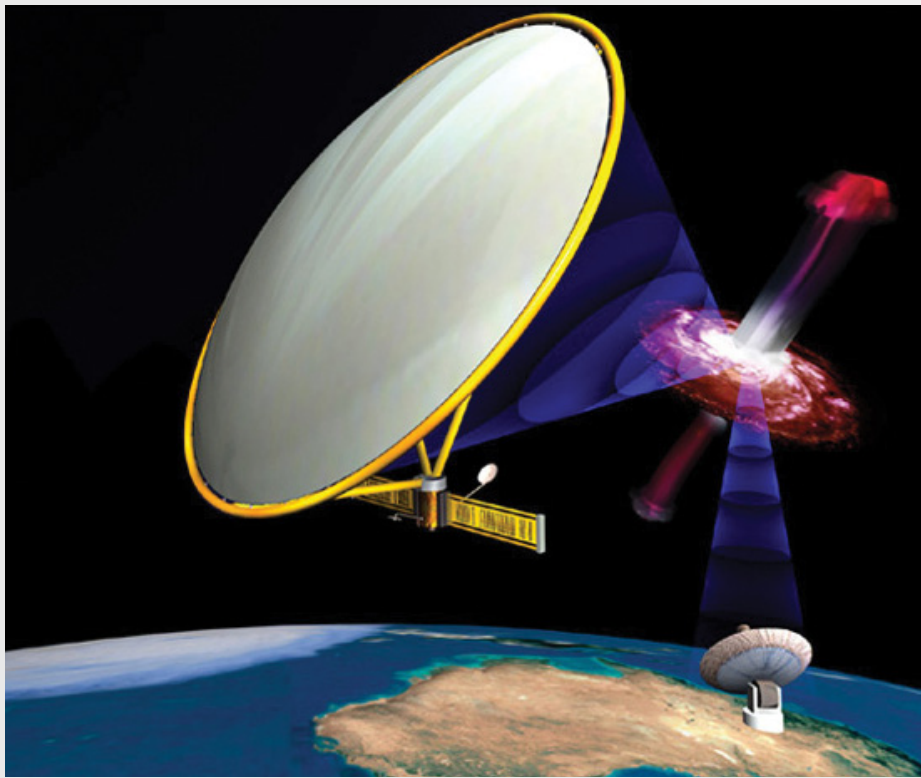
GGOS se sastoji od četiri glavna dijela (slika 5):

1. Instrumentalni sustavi: obuhvaćaju globalne terestričke mreže geodetskih stanica i opservatorija, satelite koji opažaju Zemlju, satelitske navigacijske sustave i svemirske misije.
2. Infrastruktura za prijenos, obradu i pohranu podataka.
3. Centri za analizu podataka, koji obuhvaćaju potpunu i konzistentnu obradu velike i različite količine podataka, integriranu

analizu i kombinaciju istih te asimilaciju obrađenih opažanja u kompleksne modele.

- GGOS portal: omogućuje pristup svim proizvodima i aplikacijama, uključujući popratnu dokumentaciju i metapodatke.

Globalni geodetski sustav sastoji se od više geodetskih tehnika koje opažaju i prate ključne geometrijske i fizikalne veličine Zemlje. Koordinacija između različitih IAG-servisa te kombinacija tehnika i različitih proizvođača u nadležnosti je IERS-a (International Earth Rotation Service) i IGFS-a



SLIKA 6. VLBI (Very Long Baseline Interferometry) tehnika

VRSTA PARAMETRA	VLBI	GNSS	DORIS/PRARE	SLR	LLR	ALTIMETRIJA	SKUP PARAMETARA
Prostorne koordinate (kvazari)	X						ICRF
Nutacija	X	(X)		(X)	X		Rotacija Zemlje
Gibanje pola	X	X	X	X	X		
UT1	X						
Length of Day (LOD)		X	X	X	X		ITRF
Koordinate+brzina (ITRF)	X	X	X	X	X	(X)	
Geocentar		X	X	X		X	
Gravitacijsko polje		X	X	X	(X)	X	Gravitacijsko polje
Orbite satelita		X	X	X	X	X	
LEO (Low-Earth-orbits)		X	X	X		X	
Ionosfera	X	X	X			X	Atmosfera
Troposfera	X	X	X			X	
Vrijeme/frekvencija; satovi	(X)	X		(X)			

TABLICA 4. Parametri za kombinaciju i integraciju geodetskih opažačkih tehnika

KOMPONENTA	CILJEVI	TEHNIKE	NADLEŽNOST
Geokinetika (veličina, oblik, kinematika, deformacija)	Oblik i vremenske varijacije površine Zemlje/leđa/oceana (litosferne ploče, vulkani, potresi, glečeri, varijacije oceana, razine mora)	Altimetrija, InSAR, GNSS, VLBI, SLR, DORIS, niveliranje, mareografska mjerenja	Međunarodni i nacionalni projekti, svemirske misije, IGS, IAS, budući InSAR servis
Rotacija Zemlje (nutacija, precesija, gibanje pola, LOD (Length-of-day) varijacija)	Integrirani efekt promjene kutnog momenta i momenta inercije (promjene masa u atmosferi, oceanima, krutoj Zemlji, kori/plaštu)	Astronomija, VLBI, LLR, SLR, GNSS, DORIS, terestrički žiroskopi	Međunarodna geodetska i astronomska zajednica (IERS, IGS, IVSD, ILRS, IDS)
Gravitacijsko polje	Geoid, gravitacijski potencijal statičke Zemlje, vremenske varijacije krute Zemlje, promjene mase u globalnom vodenom ciklusu)	Apsolutni i relativni gravimetri, zračna gravimetrija, sateliti u orbiti, satelitske misije (CHAMP, GRACE, GOCE)	Međunarodna geofizička i geodetska zajednica (GGP, IGFS, IgeS, BGI)
Terestrički okviri	Globalni oblak diskretnih točaka, određenih s mm do cm točnošću	VLBI, GNSS, SLR, LLR, DORIS, prijenos vremena, apsolutna gravimetrija	Međunarodna geodetska zajednica (IES, IVS, ILRS, IGS, IDS)

TABLICA 5. Znanstvena područja GGOS-a

(International Gravity Field Service).

Tablica 4 prikazuje konkretni doprinos svemirskih/geodetskih tehnika pojedinim fizikalnim ili geometrijskim parametrima. Za realizaciju ITRF-a koriste se sve tehnike (VLBI (slika 6), GNSS, DORIS/PRARE, SLR, LLR i altimetrija). Za modeliranje gravitacijskog polja koriste se GNSS, DORIS/PRARE i SLR tehnike uz altimetriju leđa i oceana.

4.1 UNUTARNJA ORGANIZACIJA GGOS-A

Unutarnja organizacijska struktura GGOS-a sastoji se od: upravnog odbora, izvršnog odbora, znanstvenog vijeća, servisa, komisija i međukomisijskih povjerenstava, radnih skupina, ureda za koordinaciju, zavoda za standarde i konvencije, zavoda za mreže i komunikacije te zavoda za satelitske misije.

Upravni odbor je tijelo zaduženo za donošenje odluka o promjenama s potrebnom dvotrećinskom većinom. Ostale odluke nastoje se donijeti konsenzusom. Upravni odbor sastaje se najmanje jednom godišnje, a sastoji se od 30 članova. Izvršni odbor sastoji se od 6 članova koji se biraju na četverogodišnji mandat. Znanstveno vijeće kao neovisno multidisciplinarno savjetodavno vijeće daje znanstvenu potporu upravnom i izvršnom odboru GGOS-a, a sastoji se od 7-12 članova. Servisi, komisije i međukomisijska povjerenstva temelje se na IAG-ovim komponentama kako bi osigurali geodetsku infrastrukturu potrebnu za praćenje Zemlje i globalnih znanstvenih istraživanja. Ne teži se preuzimanju IAG-ovih servisa koji funkcioniraju vrlo dobro, već kombinacija i osiguravanje okvira za buduće funkcioniranje i dugoročnu stabilnost. Radne skupine organizira i odobrava upravni i izvršni odbor, na dulji ili kraći period, ovisno o potrebama i aktualnim projektima. Ured za koordinaciju pruža svakodnevnu podršku funkcioniranju sustava. Osigurava konstantan tijek informacija, održava i arhivira dokumentaciju o aktivnostima, pruža podršku među servisima i radionicama. Osim toga, održava i internetski portal (GGOS Web site and Portal). Web portal bit će specifičan po pružanju mogućnosti korištenja svih proizvoda GGOS-a preko baze relevantnih metapodataka i servisa ustanovljenih prema međunarodnim standardima. Zavod za standarde i konvencije konstantno prati geodetske standarde, standardizirane jedinice, fundamentalne fizikalne konstante, rezolucije i konvencije svih proizvoda geodetske zajednice. Također, preispituju se i procjenjuju svi aktualni standardi, konstante, rezolucije, konvencije prihvaćeni od IAG-a te predlažu potrebne promjene. Zavod za

mreže i komunikacije razvija strategije za dizajn, integraciju i održavanje osnovne geodetske mreže i instrumenata na različitim mjestima u svijetu te infrastrukture za podršku tako da zadovolje dugoročne zahtjeve (10-20 godina). Primarna je težnja na održavanju potrebite infrastrukture za unapređenje globalnih referentnih okvira uz istovremenu podršku razvoju znanstvenih aplikacija temeljenih na prikupljenim podacima. Zavod za satelitske misije odgovoran je za osiguranje integriteta i rada satelitskih misija. Djeluje kao podrška suradnji između geodetske zajednice i svemirskih agencija, uz naglasak na geodetske potrebe i koncepte potrebne GGOS-u. Zajedno s ostalim strukturama GGOS sustava razvija nove koncepte budućih satelitskih misija.

IAG-ovi servisi za GGOS neposredno prikupljaju podatke, a dijele se u kategorije geometrije, gravimetrije, hidrosfere i dodatnih servisa:

- geometrija: IERS (International Earth Rotation and Reference Systems Service), IGS (International GNSS Service), IVS (International VLBI Service), ILRS (International Laser Ranging Service), IDS (International DORIS Service),
- gravimetrija: IGFS (International Gravity Field Service), BGI (Bureau Gravimetric International), IGES (International Geoid Service), ICET (International Center for Earth Tides), GGP (Global Geodynamics Project), ICGEM (International Center for Global Earth Models),
- hidrosfera: PSMSL (Pemanent Service for Mean Sea Level), IAS (International Altimetry Service) i
- dodatno: BIPM (Bureau International des Poids et Mesures), IBS (IAG Bibliographic Service).

Tablica 5 prikazuje GGOS podijeljen na znanstvena područja zajedno s pripadajućim geodetskim/svemirskim tehnikama, ciljevima i nadležnošću.

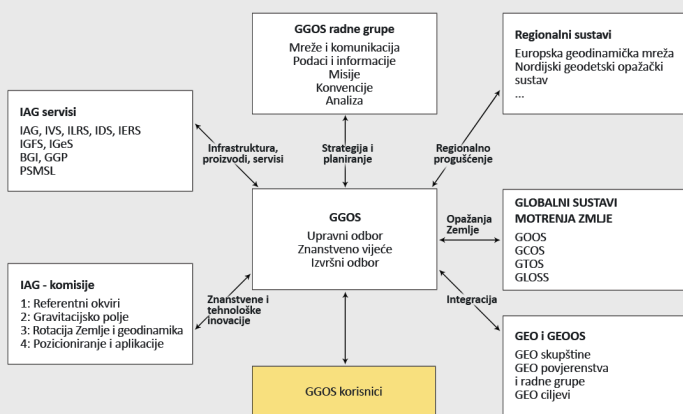
GGOS ima znanstvenu podršku IAG-ovih komisija, a infrastrukturu IAG-ovih servisa. Sve relacije i povezanosti između različitih struktura i komponenata koje zajedno čine GGOS sustav prikazuje slika 7.

Kratice korištene na slici 7 su: GOOS (Global Ocean Observing System), GCOS (Global Climate Observing System), GTOS (Global Terrestrial Observing System), GLOSS (Global Sea Level Observing System), GEO (Group on Earth Observations), GEOSS (Global Earth Observation System of Systems).

4.2 VIŠE "SLOJNI" SUSTAV

Globalni geodetski opažajući sustav ima 5 glavnih stupnjeva (razina) na temelju kojih, aktivno ili pasivno, opaža fizikalne i geometrijske parametre Zemlje (slika 8). To su:

- Stupanj 1: Terestrička geodetska infrastruktura sastoji se od globalne VLBI mreže od 40 stanica pod nadležnosti IVS-a, globalne SLR/LLR mreže 40 opservatorija pod nadležnosti ILRS-a, međunarodne GNSS mreže s više od 300 stanica koordinirane pomoću IGS-a, mreže od 50 DORIS stanica, globalne mreže apsolutnih gravimetrijskih stanica, globalne mreže mareografskih stanica, itd.
- Stupanj 2: LEO (Low-Earth-orbit) sateliti. LEO satelitske misije već imaju tradiciju od nekoliko desetljeća, a velika im je prednost



SLIKA 7. Struktura GGOS-a sa svim vezama i odnosima

MISIJA	TIP	TRAJANJE MISIJE
CHAMP	Gravitacija/magnetsko polje/atmosfera	2000-2009
GRACE	Gravitacija, atmosfera	2002-2010
GOCE	Gravitacija	2007-2009
TOPEX-POSEIDON	Altimetrija oceana	1992-2004
Jason-1	Altimetrija oceana	2001-2007
ICESAT	Altimetrija leda	2003-2008
CRYOSAT-2	Altimetrija leda	2009-2011
ERS-2	Altimetrija/klima/okoliš	1995-2008
ENVISAT	Altimetrija/klima/okoliš	2002-2008
TerraSAR-X	SAR/InSAR/atmosfera	2007-2010
TanDEM-X	SAR/InSAR/atmosfera	2009-2011
EnMAP	Vidljivi/hiperspektar	2010-2013

TABLICA 6. Satelitske misije integrirane u GGOS (stupanj 2)

homogeno i konzistentno prikupljanje podataka cijele Zemlje. Potencijal LEO satelitskih misija je ogroman i, uz već postojeće (tablica 6), u budućnosti se planiraju nove misije (DESdYnl, COSMIC, integracija TerraSAR-X i TanDEM-X, ESA SWARM).

- Stupanj 3: GNSS i SLR sateliti. GNSS (Global Navigation Satellite System) napreduje vrlo velikom brzinom. Očekuje se kompletiranje GLONASS-a (Globalnaya Navigatsionaya Satelinaya Sistema) do kraja 2011. Europski Galileo sustav trebao bi biti dovršen do kraja ovoga desetljeća, a kineski COMPASS, japanski QZSS (Quasi-Zenith Satellite System) i IRNSS (Indian Radionavigation Satellite System) doprinijet će ideji od više od 120 satelita za dobivanje visoko preciznog i pouzdanog položaja u realnom vremenu na površini cijele Zemlje. SLR (Satellite Laser Ranging) tehnika realizira se mini-satelitima poput LAGEOS-1 i LAGEOS-2, ETALON-1 i ETALON-2. Svi GPS, GLONASS i Galileo sateliti u budućnosti će se opremiti retroreflektorima.
- Stupanj 4: Svemirske misije i geodetska oprema na planetima.
- Stupanj 5: Izvangalaktički objekti.

5. BUDUĆNOST GGOS-A

U budućnosti se očekuje razvoj novih i evolucija postojećih mjernih tehnika koje će se postupno uključivati u GGOS. Primjerice, GNSS reflektometrija na LEO (Low-Earth orbit) satelitima koja se temelji na refleksiji GNSS signala od oceanskih i ledom pokrivenih površina. Očekuje se da će do 2015. više od 120 GNSS satelita davati signale za tu mjernu tehniku koja ima ogromni potencijal mjerenja i praćenja oceanske i ledene topografije u visokoj vremenskoj i prostornoj rezoluciji.

Jedan od većih dobitaka u budućnosti bit će rano alarmiranje civilizacije od tsunamija (slika 9), potresa, erupcije vulkana, uragana, tornada i sličnih prirodnih nepogoda.

Nadalje, koncept koji se ubrzano razvija je integracija više svemirskih geodetskih tehnika na posebne mikro-satelite. Ti mikro-sateliti opremit će se s GNSS antenama za precizno određivanje orbita, zvjezdanim sensorima za radio-okultacijska istraživanja i SLR retroreflektorima te VLBI odašiljačima signala za određivanje položaja. Takva mikro-satelitska konstelacija globalno će povezati sve „mjerne jezgre“ na Zemlji te tako povećati kvalitetu svih ostalih mjerenja.

Trenutačno su vremenska nehomogenost geodetskih mjerenja zbog razvoja tehnologije, nejednolikost rasporeda stanica na Zemlji te konstantno poboljšanje geofizičkih modela i geodetskih metoda analize, ograničenje za kvalitetne studije globalnih promjena na Zemlji. Razvoj u mogućnostima analize podataka pojedinih i kombinacije mjernih tehnika, kao i poboljšanje referentnih okvira i geofizičkih modela te stalno povećanje moći računala, osigurat će brze i homogene proračune kompletne geodetske baze podataka s najvećom mogućom točnošću, a sa svrhom dobivanja maksimalno točnih i homogenih podataka za globalne studije.

Budući GGOS sustav (GGOS 2020) sadržavat će homogeniji raspored terestričkih stanica i temeljit će se na satelitskoj komunikaciji i prijenosu po-

data. Osim toga, sve više će aplikacija i proizvoda biti dostupno u realnom ili što bliže realnom vremenu. Stoga se standardi i protokoli za operacije u realnom vremenu trenutačno ubrzano razvijaju. VLBI sustav u budućnosti će prerasti u tzv. e-VLBI, s prijenosom podataka iz opažajkih stanica preko high-speed mreža. Nadalje, VLBI teleskopi moći će primati oko 10 puta više podataka od današnjih. Geodetske svemirske tehnike također će povećati frekvenciju prijema podataka. Primjerice, GNSS stanice današnjih 30, opažati će 100 stanica s frekvencijom od 50-100 Hz. Tako visoke frekvencije prijama podataka unaprijedit će praćenje seizmike i potresa te scintilacija u ionosferi. Buduće InSAR misije (poput Terra SAR-X i TanDEM-X) prikupljat će podatke izražene u 10^{15} bitova. Međutim, infrastruktura za podršku toj količini podataka nije još dizajnirana ni razvijena, ali je za 10 godina vrlo realna i ostvariva.

Konačno, svi GGOS „proizvodi“ 2020. trebali bi biti relativne preciznosti 10^{-9} u odnosu na apsolutne vrijednosti mjerenih veličina. Takva preciznost, međutim, nije dovoljna. Kako bi zadovoljila već prije navedene potrebe, konzistentnost između svih tih „proizvoda“ trebala bi također biti usklađena na razini 10^{-9} .

Takvim sustavom dobivat će se vrijedne informacije u područjima:

- Katastrofa: smanjenje ljudskih gubitaka i materijalnih dobara uzrokovanih prirodnim ili ljudskim faktorom.
- Zdravlja: razumijevanje čimbenika u okolišu koji djeluju na ljudsko zdravlje.
- Izvora energije: unaprjeđenje upravljanjem energetske resursima i potencijalima.
- Klime: razumijevanje, procjena, predviđanje, ublažavanje i adaptacija na klimatske promjene.
- Voda: poboljšanje iskorištavanja i upravljanja vodnim resursima radi boljeg razumijevanja globalnoga vodenog ciklusa.
- Meteoroloških informacija: dobitak kvalitetnijih meteoroloških informacija, prognoze i upozorenja.
- Ekosustava: unaprjeđenje upravljanjem i zaštiti kopnenih, obalnih i morskih ekosustava.
- Poljoprivrede: podrška održivoj poljoprivrednoj proizvodnji i borbi protiv dezertifikacije.
- Bioraznolikosti: razumijevanje, praćenje i očuvanje raznolikosti biološkog i životinjskog svijeta.

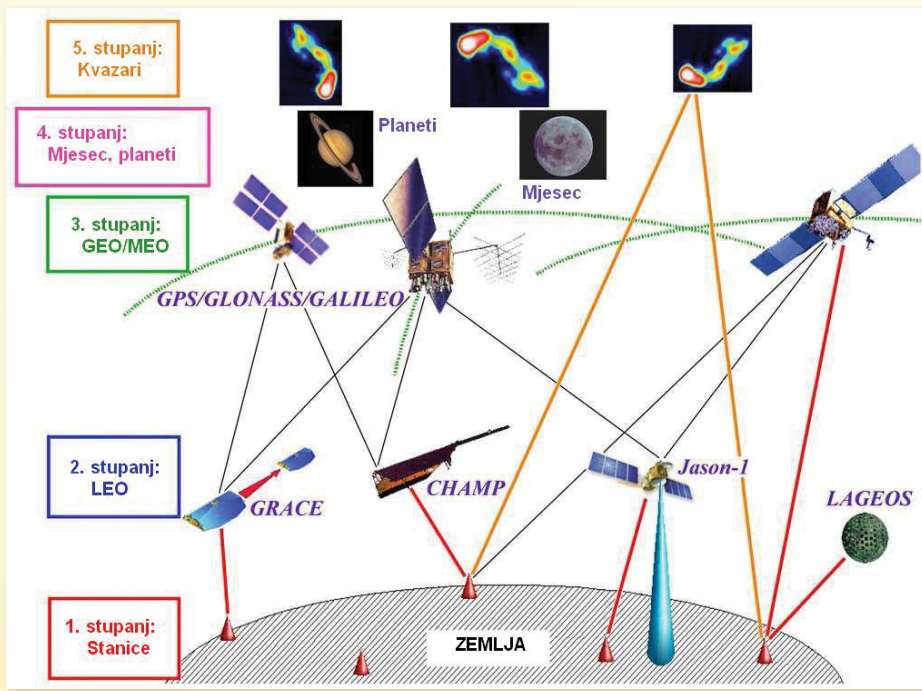
Preduvjet za iskorištenje punog potencijala geodezije za promatranje Zemlje i dobivanje praktičnih aplikacija je sofisticirana integracija svih geodetskih tehnika (svemirskih, zračnih, pomorskih i terestričkih), obrada modela i kombinacija istih s geofizičkim modelima u jedan kompleksni sustav. Takva integracija, unutar globalnih istraživanja promjena na Zemlji, omogućit će zaključke o promjenama i deformacijama površine Zemlje, anomalijama masa te razmještaju istih između različitih dijelova Zemlje (litosfere, hidrosfere, atmosfere). Upravo je GGOS veliki iskorak prema takvoj integraciji i postizanju spomenutih ciljeva.

LITERATURA

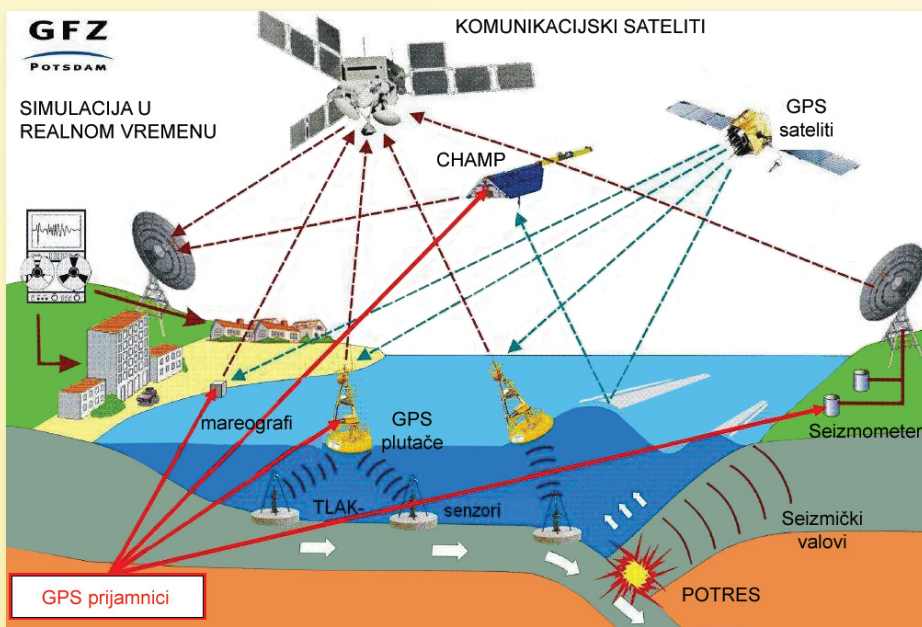
- › Plag, H.-P. (2005): The GGOS as the backbone for global observing

and local monitoring: a user driven perspective, J. of Geodynamics, 40, 479–486, doi: 10.1016/j.jog.2005.06.012.

- › Plag, H. P., Pearlman, M. (2009): Global Geodetic Observing System: Meeting the Requirements of a Global Society on a Changing Planet in 2020, Springer, XLIV, 332 str.
- › Plag, H.-P., Beutler, G., Forsberg, R., Ma, C., Neilan, R., Pearlman, M., Richter, B., Zerbini, S. (2006): Linking the Global Geodetic Observing System (GGOS) to the Integrated Global Observing Strategy Partnership (IGOS-P) through the Theme 'Earth System Dynamics', International Association of Geodesy Symposia, pp. 727–734, Springer Verlag, Berlin.
- › Plag, H.-P., Rizos, C., Rothacher, M., Neilan, R. (2008): The Global Geodetic Observing System (GGOS), Detecting the Fingerprints of Global Change in Geodetic Quantities.
- › URL-1: International Association of Geodesy, <http://www.iag-aig.org/>, (ožujak 2011.).
- › URL-2: GGOS sustav, <http://www.ggos.org/>, (travanj 2011.).
- › URL-3: GGOS sustav, nova web stranica, <http://www.iag-ggos.org/ggos2020/>, (travanj, svibanj 2011.).



SLIKA 8. Integracija 5 stupnjeva geodetskih i instrumentalnih tehnika



SLIKA 9. Sustav za alarmiranje kod nastanka tsunamija