

STATUS I PERSPEKTIVE POSTOJEĆIH I PLANIRANIH SATELITSKIH NAVIGACIJSKIH SUSTAVA

» Asim Bilajbegović

SAŽETAK. U zadnje dvije godine učinjeni su značajni koraci u izgradnji, moderniziranju postojećih te koncipiranju i testiranju novih navigacijskih satelitskih sustava. Zbog toga je u ovom radu opisan status i perspektiva postojećih i planiranih satelitskih navigacijskih sustava: GPS-a, GLONASS-a, Galileo-a, COMPASS-a, QZSS-a, IRNSS-a, WASS-a, MSAS-a, EGNOS-a, GAGAN 3-a, SDCM-a i SNAS-a. Za postojeće sustave (GPS) koncipirana i naručena je treća generacija satelita, a za GLONASS očekuje se potpuna konstelacija u 2010. godini. Višebrojnost satelitskih navigacijskih sustava zahtijeva od proizvođača GNSS prijammika hibridnost (prijam svih signala), a ispitivanja autora pokazuju da se softveri za obradu hibridnih satelitskih mjerenja moraju osuvremeniti novim matematičkim modelima.

Zbog opširnosti teme odnosno brojnosti navigacijskih satelitskih sustava opisat će se samo najbitnije karakteristike statusa i perspektive pojedinačnih satelitskih sustava.

KLJUČNE RIJEČI: satelitski navigacijski sustavi, GPS, GLONASS, Galileo, COMPASS, QZSS, IRNSS, WASS, MSAS, EGNOS, GAGAN, SDCM, SNAS

> 1. Uvod

Kako su u zadnje dvije godine učinjeni značajni koraci u izgradnji i moderniziranju postojećih te koncipiranju i testiranju novih navigacijskih satelitskih sustava, u sljedećim poglavljima opisani su prvenstveno status i nove komponente satelitskih sustava, zatim kvaliteta i poboljšanja satelitskih signala, perspektive i koncept budućih prijammika i softvera za integriranu obradu budućih GNSS-a. Pregled postojećih i planiranih navigacijskih sustava prikazan je u tablici 1, (Becker 2009).

Sukladno tablici 1 u sljedećim poglavljima opisani su ukratko navedeni navigacijski satelitski sustavi.

> 2. GPS segmenti i modernizacija

2.1 SVEMIRSKI SEGMENT

Trenutačno (25.01.2010.) su u upo-

trebi 32 satelita, od toga 12 GPS IIA, 12 GPS IIR, 8 GPS IIR-M i u pripremi je jedan satelit GPS II-F s trećom civilnom frekvencijom L5. Sateliti IIR-M emitiraju novi civilni signal L2C, a osim toga sateliti IIR-20 (M7, SVN 49) i IIR-21 (M8, SVN 50) opremljeni su za emitiranje test verzije L5 signala. SAD su morale do 26. kolovoza 2009. u putanju lansirati satelit koji emitira L5 frekvenciju da bi zadržale pravo na dodijeljenu frekvenciju. Pregled GPS signala, blokova satelita s godinom lansiranja ili planiranog lansiranja, dan je u tablici 2. i prikazan na slici 1.

USA DOD (**D**e**p**artment of **D**efense) najavilo je da će od jeseni 2009. uspostaviti nove navigacijske vijesti (CNAV) na L2C frekvenciji. To će ostvariti instaliranjem novog softvera na 8 GPS IIR-M satelita. Nove navigacijske vijesti sadrže niz poboljšanja u odnosu na Broadcast-

Messages na frekvenciji L1, snaga emitiranja signala je jača i dekodiranje signala je robusnije. Novost je fleksibilnija struktura podataka s promjenjivim duljinama bloka i varijabilnim intervalima odašiljanja. Struktura bloka je objašnjena u ICD-GPS-200D i sadrži ukupno 65 vrsta vijesti. U početku će se primjenjivati 15 CNAV-okvira s podacima. Npr. message Typ 0, sadržavati će broj satelita (PRN) i podatke o vremenu u intervalima od 12 sekundi.

Novi signal na frekvenciji L5 na budućim satelitima GPS IIF i GPS III sadržavati će CNAV- message (URL-1)

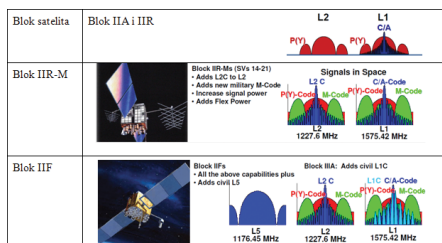
Firma Lockheed Martin razradila je osnovna tehnička svojstva, a procijenjeni su troškovi, vremenski plan izgradnje i lansiranja bloka III GPS satelita. Prva dva satelita bloka III trebalo bi zgotoviti do 2014. godine, onda bi slijedila izgradnja 8 satelita bloka IIIB i 16 satelita bloka IIIC.

Satelitski sustav	Postojeći odn. planirani broj satelita	Vrsta sustava: Globalni/Regionalni Augmentation	Zemlja izgradnje sustava
GPS	24+	Globalni	USA
GLONASS	24	Globalni	Rusija
Galileo	27	Globalni	Europa
COMPASS	35	Globalni	Kina
QZSS	3	Regionalni	Japan
IRNSS	7	Regionalni	Indija
WASS	3	Augmentation	USA
MSAS	2	Augmentation	Japan
EGNOS	3	Augmentation	Europa
GAGAN 3	3	Augmentation	Indija
SDCM	2?	Augmentation	Rusija
SNAS	?	Augmentation	Kina

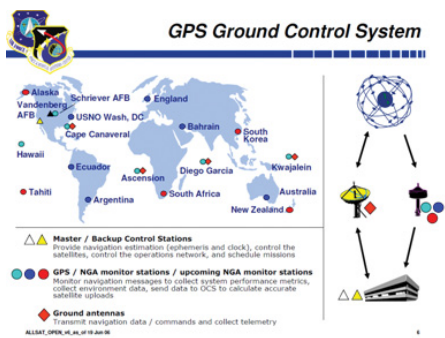
Tablica 1. Postojeći i planirani navigacijski sustavi

GPS Blok	IIA i IIR	IIR-M	IIF	III
Godina	1978.-2005.	2005.	2009.-2011.	2014.
S i g n a l i	L1 C/A	L1 C/A	L1 C/A	L1 C/A
	L1 P(Y)	L1 P(Y)	L1 P(Y)	L1 P(Y)
		L1 M	L1 M	L1 M
				L1 C
	L2 P(Y)	L2 P(Y)	L2 P(Y)	L2 P(Y)?
		L2 C	L2 C	L2 C
		L2 M	L2 M	L2 M
			L5	L5

Tablica 2. GPS evolucija (modernizacija)



Slika 1. Prikaz razvoja GPS signala (Reaser, C. R. 2006)



Slika 2. Kontrolni (zemaljski) segment GPS (URL-1)

Blok III sateliti emitirali bi četvrti civilni signal L1C. Ovi sateliti će moći međusobno komunicirati i dovoljno je s jedne kontrolne stanice poslati podatke vidljivim satelitima, a oni ih dalje dostavljaju preostalima. To omogućava brže dostavljanje aktualnih efemerida i upozorenja o pogreškama satelita, što povećava pouzdanost satelitskih vijesti i podataka.

Povezano s modernizacijom GPS satelita, prijete opasnost isključivanja dosadašnjih signala na L2 frekvenciji. Onda uporaba P-koda na frekvenciji L1 i L2 od 31.12.2020. ne bi bila moguća, zbog premalog broja starih satelita. A to znači da se ne garantira primjena GPS prijaimnika iz 1980-ih, 1990-ih, kao i današnjih prijaimnika. Kako u svijetu ima instaliranih preko 10.000 dvofrekvencijskih prijaimnika na permanentnim stanicama, modernizaciju GPS treba uzeti u obzir da se izbjegnu pogrešne investicije.

Vrlo važno svojstvo je integritet satelitskog sustava, poglavito tijekom slijetanja zrakoplova, neophodna je potpuna pouzdanost GPS signala. Prema ispitivanjima (Enge 2008) od 1993. do 2008. bilo je ukupno tri slučaja pogrešnih efemerida satelita, dva do tri slučaja pogrešnih satelita s velikim hodom sata i oko 24 malih anomalija. Npr. od 8. do 10. listopada 2007. pet satelita bloka IIR i jedan satelit IIR-M su od 2 do 12 sati emitirali koruptirane podatke. Oni su prenosili C/A kodove na L1 frekvenciji koji nisu bili uporabljivi. Uzrok je bila pogreška pohrane prenesenih podataka od kontrolnih stanica. Zapravo, softver za prijenos podataka imao je pogrešku u pohrani podataka na satelitima. Neki prijaimnici su sa starim almanahom slijedili satelite, a drugi nisu

uopće mjerili pseudoudaljenosti. Pogreške pseudoudaljenosti su bile između 10 do 100 km. Zbog toga, bitno je imati više od 30 satelita istog sustava ili iz kooperativnih različitih sustava.

Slično Galileo-u GPS sateliti bloka III imat će servis traženja i spašavanja kojeg trenutačno razvija NASA.

2.2 KONTROLNI (ZEMALJSKI) SEGMENT GPS

Globalna mreža kontrolnih stanica imati će 17 monitornih postaja i dvije redundantne glavne operativne centrale. Cilj je mogućnost opažanja svakog satelita s tri monitoring (opažačke) postaje.

Zapravo stara Master Control Station je 14. rujna 2007. predala svoju nadležnost novom operacijskom centru Schriever Air Force Base u Colorado Springs u Colorado. Znatno poboljšanje je novi kompjuter i softver za računanja navigacijskih vijesti, novi program za kontrolu satelita i više antena za komunikaciju. Mogućnost komunikacije sa satelitima je sa 92,7% povećana na 94,5%. Povećani broj GPS prijaimnika na monitoring stanicama omogućuje 100% nadziranje signala satelita i uz 99,8% redundanciju putanja satelita (Slika 2).

> 3. GLONASS modernizacija

3.1 SVEMIRSKI SEGMENT

Već sedmu godinu GLONASS se nalazi u procesu modernizacije koja je planirana u trajanju od 11 godina. GLONASS sustav 25.01.2010. ima 18 aktivnih satelita i jedan u pričuvu. Krajem 2009. trebalo je biti aktivno 22, krajem 2010. trebalo bi biti 24 i krajem 2011. 30 aktivnih satelita. Prvi start GLONASS-K satelita planiran je krajem 2010., (URL-2).

15. veljače 2008. ruska vlada objavila je promjenu FDMA (Frequency Division Multiple Acces) modulacije u CDMA (Code Division Multiple Acces) na frekvencijama L1 i L2. Signali će imati binarnu Offset-Carrier strukturu BOC (2,2) sa srednjom frekvencijom od 1.575,42 MHz i BOC (4,4) strukturu na frekvenciji 1.176,45 MHz. (Ove frekvencije odgovaraju L1 i L5 frekvencijama GPS-a, i približno odgovaraju Galileo-vim i COMPASS-ovim signalima).

Dodatni FDMA signal bit će moduliran na L3 frekvenciji (1.197,648-1.212,255 MHz, nešto ispod L2 GPS frekvencije). Time se postiže kompatibilnost satelita novih generacija: GLONASS-M, GLONASS-K i GLONASS-KM sa GPS i Galileom. GLONASS-M (2003.-2015.) sateliti imaju produljen vijek trajanja na 7 godina, civilni G2C signal i stabilizirane satove satelita, te poboljšanu opskrbu energijom satelita pomoću solarnih panela.

GLONASS-K (2010.-2025.) sateliti imaju produljeni vijek trajanja satelita na 10 godina, treću civilnu frekvenciju, uvođenje se GNSS informacije integriteta, a imati će search and rescue servis i korekcije u realnom vremenu.

GLONASS-KM satelit je u fazi definiranja i njihovo uvođenje planirano je od 2015. godine.

Broadcast efemeride GLONASS satelita od 20. rujna 2007. su date u sustavu PZ-90.02 te su se tako odstupanja u odnosu na ITRF 2000 smanjila od 50 m na svega 5-7 m. UERE - sustavna pogreška duljina smanjena je sa 3,3 na 1,8 m. Za transformaciju koordinata između ITRF 2000 i PZ-90.02 dovoljne su za sada tri translacije $\Delta X = -0,36$ m, $\Delta Y = 0,08$ m i $\Delta Z = 0,18$ m.

Stabilnost GLONASS-M cezijum-satova kreće se u području od $0,2-0,8 \cdot 10^{-13}$. Problemi pri obradi hibridnih mjerenja GPS+GLONASS-a u budućnosti će se smanjiti. Sada je zbog različitih frekvencija G1 i G2 na satelitima (kanalima) pogreška sata satelita ovisna o kanalima istog satelita, što izaziva smetnje, odnosno poteškoće pri obradi podataka mjerenja.

3.2 KONTROLNI SEGMENT

Kontrolni segment sastoji se od 10 stanica i to: jedne master kontrolne stanice, tri kombinirane stanice za: monitoring, telemetriju koje posjeduju atomske satove i uplink funkciju. Dvije od ovih stanica izvode i laserska mjerenja do satelita. Segment ima još šest monitoring stanica, a u planu je proširenje kontrolnog segmenta na područja izvan Rusije.

3.3 PREDNOSTI GPS-A + GLONASS-A DANAS?

Ovdje se mogu susresti brojne publikacije pune optimizma. Ispitivanja autora (Biljbegović i dr. 2008) o poboljšanju pouzdanosti i točnosti upotrebom GPS i GLONASS-a sa 14 satelita u HEPS-u (visokoprecizni servis u realnom vremenu) za različite zaklone horizonta dao je poboljšanja od svega 13% (Tablica 3).

Planiranim prelaskom sa FDMA (Frequency Division Multiple Acces) na CDMA (Code Division Multiple Access) kao kod GPS-a i to na frekvencijama L1 i L5 te potpunom izgradnjom GLONASS sustava za očekivati su znatnija poboljšanja.

Isto tako ispitivanja autora tijekom svibnja 2009. o prednosti hibridnih sustava GPS-a i GLONASS-a (danas sa 18 satelita), korištenjem rapidne statičke metode i novog Trimble softvera TBC V. 2.0, nisu dala znatnije prednosti u odnosu na korištenje samo GPS signala.

Ovdje problem leži i u algoritmu

Tip prijamnika	Ukupni broj mjerenja		Mjerenja sa standardnim odstupanjima unutar granice tolerancije				Broj neuspjelih mjerenja		Prednosti R8 GNSS [%]
Mjerenja na točkama s malim zaklonima horizonta									
R8 GNSS	76	100,0 %	72	94,7 %	2	2,6 %	2	2,6 %	
R8 GPS	76	100,0 %	67	88,2 %	8	10,5 %	1	1,3 %	+13,1 %
Bilana za R8 GNSS				+6,5 %		+7,9 %		-1,3 %	
Mjerenja na točkama s srednjim zaklonima horizonta									
R8 GNSS	96	100,0 %	85	88,5 %	11	11,5 %	0	0,0 %	
R8 GPS	96	100,0 %	78	81,2 %	18	18,8 %	0	0,0 %	+14,6 %
Bilanz für R8 GNSS				+7,3 %		+7,3 %		0,0 %	
Mjerenja na točkama s velikim zaklonima horizonta									
R8 GNSS	80	100,0 %	20	25,0 %	25	31,2 %	35	43,8 %	
R8 GPS	80	100,0 %	15	18,8 %	22	27,5 %	43	53,8 %	+12,5 %
Bilancar R8 GNSS				+6,2 %		-3,7 %		+10,0 %	
Analiza svih mjerenja (na točkama s malim, srednjim i velikim zaklonima horizonta)									
R8 GNSS	252	100,0 %	177	70,3 %	38	15,1 %	37	14,7 %	
R8 GPS	252	100,0 %	160	63,5 %	48	19,1 %	44	17,5 %	+13,6 %
Bilanz für R8 GNSS				+6,8 %		+4,0 %		+2,8 %	

Tablica 3. Rezultati mjerenja na točkama s različitim zaklonima horizonta sa samo GPS satelitima (R8 GPS) i s GPS+GLONASS satelitima (R8 GNSS), (Bilajbegović i dr. 2008)

softvera, tj. računanja dvostrukih faznih razlika samo unutar jednog satelitskog sustava. Zbog toga se softveri za obradu hibridnih podataka mjerenja moraju osjetno poboljšati.

> 4. Galileo

Brojne publikacije opisuju ovaj budućí europski satelitski sustav. Zbog toga su u radu sažete glavne karakteristike Galileo sustava (Weber i drugi 2001):

- nezavisnost od drugih satelitskih navigacijskih sustava,
- interoperabilitet s GPS-om,
- postojanje različitih servisa (npr. otvorenog, sigurnosnokritičkog, reguliranog),
- implementiranje servisa integriteta (na području i izvan Europe),
- neovisnost servisa integriteta od Galileo kontrolnog sustava (GCS),
- globalni servisi (search & rescue, servis navigacijskih podataka),

- globalno pozicioniranje i globalna dostupnost skale vremena na osnovi globalne konstelacije satelita,
- regionalne komponente sustava (monitoring i up-link stanice),
- intergacija s regionalnim sustavima, npr. s EGNOS-om,
- integracija s lokalnim (diferencijalnim) sustavima i
- kompatibilnost s UMTS (mrežama mobilnih telefona).

4.1 SVEMIRSKI SEGMENT

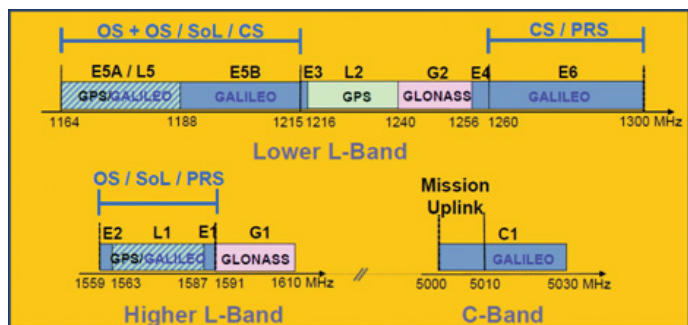
Galileo će se sastojati od 30 MEO (Medium Earth Orbit) satelita, odnosno (27/3/1) 27 satelita s 3 satelita u pričuvu (Benedicto i dr. 2000). Visina satelita planirana je oko 23.260 km s kutom nagiba putanje od 56°.

U okviru razvojne faze prvi Galileo satelit GIOVE-A (Galileo In Orbit Validation Element) razvila je tvrtka Survey Satellite Technology Limited (SSTL). Lansiran je 28. prosinca 2005. sa Sojuz raketom. Satelit ima masu 600 kg s volumenom 1,1*1,3*1,4. Drugi satelit GIOVE-B trebao je biti lansiran početkom 2006 godine. Ovaj satelit radio

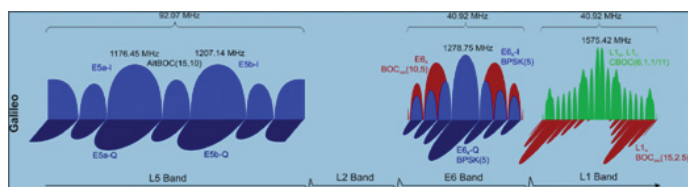
je prijašnji »Galileo Industries« konzorcij koji je imao tehničkih problema s glavnim elementima satelita i lansiran je tek 26.04.2008. s višegodišnjim zakašnjenjem. Satelit ima masu 523 kg s volumenom od 0,955*0,955*2,4 m³. Zbog toga je naručen drugi satelit GIOVE-A2 od engleske tvrtke SSTL. Radi spora Njemačke i Italije oko industrijske nadležnosti za izgradnju Galileo sustava te niza drugih problema, potpuna izgradnja sustava očekuje se tek 2014. godine, a ne kako je u početku planirano 2008. Dosadašnja opsežna ispitivanja signala i frekvencija Galilea dala su inicijativu za modernizaciju GPS-a, GLONAS-a i putokaz za izgradnju COMPASS-a (Slika 3 i 4 i Tablica 4). Sredinom prosinca 2009. naručena je izgradnja 14 Galileo satelita za 566 milijuna eura kod OHB System AG tvrtke u Bremenu.

Talijanska tvrtka Thales Alenia dobila je izgradnju kontrolne stanice s troškovima od 85 milijuna eura. Galileo će imati dva kontrolna centra, jedan u Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt u Oberpfaffenhofen kod München-a, a drugi u Italiji.

Značenje skraćenica u tablici 4: OS- Open Service; SoL- Safety of Life; CS- Commercial Service (regulacija trenutna nepoznata); PRS: Public Regulated Service; Mcps- Megachips po sekundi; sps- simbola po sekundi.



Slika 3. Pregled signala i servisa Galilea



Slika 4. Shematski prikaz definicija signala Galileo sustava (Eissfeller i dr. 2007b)

Signal	Frekvencija [MHz]	Servisi	Modulacija signala	Chiprate [Mcps]	Daterate [sps]
E5a	1176,45i	OS	AltBOC (15;10)	10,23	250
E5b	1207,14	OS SoL CS	AltBOC (15;10)	10,23	250
E6	1278,75	CS	BPSK (5)	5,115	1000
E6	1278,75	PRS	BOC (10;5)	5,115	100
E1B	1575,42	OS SoL CS	CBOC (6,1;1/11)	1,023	250
E1A	1575,42	PRS	BOC (15;2,5)	2,5575	100

Tablica 4. Pregled Galileo frekvencija i modulacija signala

Otvoren servis (OS) biti će na frekvencijama E1 i E5a/E5b/E5ab s besplatnim korištenjem.

Komercijalni servis (Commercial service-CS) biti će zatvorenog karaktera čije će se korištenje plaćati. Imati će visoku brzinu prijenosa podataka Datenrate 1000 symbols/sec.

Sigurnosni servis (SOL) nasuprot Otvorenom servisu, proširen je upozorenjima o ograničenju točnosti i ispadu satelita.

Regulirani ili državni servis (PRS) namijenjen je isključivo državnim službama: policiji, obalnim stražama (mornarici), službama sigurnosti i vojsci.

E5ab je poseban signal sa velikom valnom duljinom što uspješno smanjuje multipath-efekte. Budući prijammnici moći će primati pojedinačne signale E5a i E5b, odnosno ukupne E5(ab) signale i to prijammnici kvalitetnije (skuplje) izrade.

Točnost Galilea karakterizira:

- više opažanih veličina tj. 3 (4) frekvencije: L1, E6, E5a, E5b,
- veći broj satelita 27 (30), odnosno veća redundancija omogućava bolju procjenu pogrešaka i pouzdanije i brže rješenje ambiguiteta (brže inicijaliziranje),
- veća valna duljina signala i nova modulacija,
- integritet Galileo-a i informacije kao npr. Sinal-in-Space Accuracy (SiSA),
- bolja geometrija i raspolaganje,
- Galileo je optimiran za veće vertikalne kutove i bolje raspolaganje satelita-

ma u gradskim područjima.

Da se dobije uvid u snagu signala GPS-a i Galilea navedimo osnovnu formulu za računanje snage signala:

$$P_r = \frac{P_t \lambda^2}{(4\pi r)^2}$$

P_t : snaga emitiranja npr. C/A - code na $L1 = 478,63 \text{ W} = 26,8 \text{ dBW}$

λ : valna duljina nosećeg vala

P_r : snaga primljenog signala npr. za C/A - kod = $1,610 \cdot 10^{-16} \text{ W} = -157,8 \text{ dBW}$

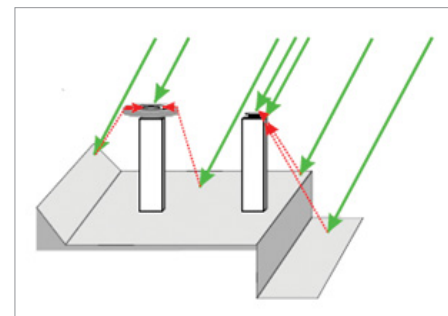
r : udaljenost satelit - prijammnik

$$P[\text{dBW}] = 10 \cdot \log_{10} \frac{P[\text{W}]}{1[\text{W}]}$$

Ispitivanje kvalitete GPS i Galileo signala (posebice šuma) ispitivao je (Eissfeller i dr. 2007) u ovisnosti od širine pojasa signala (Tablica 5). Očigledno manje šumove imaju Galileo signali. Najmanji šum od GPS signala ima signal na frekvenciji L5. Ova frekvencija odgovara frekvenciji E5a Galileo-va signala čiji je šum tri do četiri puta manji.

4.1.1 MULTIPATH EFEKTI (VIŠESTRUKI REFLEKSIJE SIGNALA)

Odaslani signali satelita mogu direktno doći do antene prijammnika ili kao reflektirani signali. Teorijski, zbog višestrukih refleksija, mjerene udaljenosti od antene do satelita mogu biti maksimalno pogrešne za $\pm 1/4$ valne duljine signala (Bi-



Slika 5. Multipath efekti

lajbegović i dr. 2007) (Slika 5).

Poznato je da su multipath efekti ovisni od Bandwidth (širine pojasa signala). Istraživanja multipath efekata za GPS i Galileo signale pri primjeni »uske« korelacije za redukciju ovih efekata proveli su Eissfeller i dr. (2007) (Tablica 6.)

4.2 ZEMALJSKI SEGMENT

Zemaljski segment Galileo-a sastojat će se od Kontrolnog segmenta za upravljanje sustavom, koji ima zadaću određivanja putanje i vremena satova satelita (Ground Control Segment-GCS) i segmenta za nadzor integriteta sustava (Integrity Determination System-IDS) (Weber 2001). GCS segment sastojati će se od 18 do 20 monitoring stanica, 9 up-link stanica, 5TTC stanice i dva kontrolna centra (jedan u Njemačkoj, a drugi u Italiji).

> 5. BeiDOU-2/COMPASS

COMPASS se sastoji iz dvije komponente:

- od jednog regionalnog navigacijskog sustava koji služi za komunikaciju i
- globalnog navigacijskog satelitskog sustava.

U konačnoj verziji sustav bi imao 35 satelita. Kina je ITU (Internationalen Telekommunikations Union) prijavila 27 satelita na srednjoj visini od 21.500 km (MEO-orbit) s kutom inklinacije putanje od 55°, s frekvencijama odašiljanja 1.207,14, 1.268,52, 1.561,1 i 1.589,74 MHz s QPSK modulacijom i CDMA tehnologijom koja je interoperabilna s GPS-om i Galileo-om.

Planirano je da sustav ima otvoreni (open) i authorised (autorizirani) servis.

Open servis davao bi položajnu točnost od 10 m, brzinu s točnošću od 0.2 m/s i vrijeme s točnošću od 50 ns. Planiran je »authorised service« s visokom točnošću, pouzdanošću te integritetom.

5.1 SVEMIRSKI SEGMENT

Planirana su i tri geostacionarna satelita s inklinacijom od 55° i poluosi elipse putanje od oko 42.160 km koji će prekrivati područje Kine i rubna područja Azije.

Pet, već lansiranih, geostacionarnih satelita za pozicioniranje i komunikaciju sa duljinom od 58°, 75°, 80°, 140°, 110,5° i

Signal	Vrsta modulacije	Snaga [dB.W]	B - Bandwidth [MHz]	Signal/ šum odnos S/N [dB.Hz]	Šum [m]
GPS C/A L1	BPSK(1)	-160	24	41,5	0,24
GPS C/A L1	BPSK(1)	-160	8	41,5	0,41
Galileo E1	BOC(1;1)	-155	24	46,5	0,14
Galileo E1	BOC(1;1)	-155	8	46,5	0,23
Galileo E6	BPSK(5)	-155	24	46,5	0,11
GPS L5	BPSK(10)	-154	24	47,5	0,08
E5a ili E5b	AltBOC(15;10)	-155	24	46,5	0,02

Tablica 5. Pregled šumova za GPS i Galileo kodna mjerenja za različite bandwidth i modulacije signala (Eissfeller i dr. 2007a)

Signal	Modulacija	B [MHz]	Max. pog. zbog mult. ef. [m]	Reprezentativna srednja vrijednost mult. ef. [m]	
				za nezaklonjen horizont	u gradu
GPS C/A	BPSK (1)	8	12,0	0,24	4,85
Galileo L1	BOC (1,1)	8	12,0	0,24	4,85
Galileo C/A	BPSK (1)	24	6,9	0,20	3,35
Galileo L1	BOC (1,1)	24	6,9	0,20	3,35
Galileo L1	MBOC (6,1,11/11)	24	5,2	0,17	2,04
Galileo E6	BPSK (5)	24	4,00	0,14	1,97
GPS L5	BPSK (10)	24	4,51	0,15	1,42
E5a ili E6a	AltBOC (15,10)	24	1,62	0,04	0,30
E5ab	AltBOC (15,10)	51	1,62	0,04	0,30

Tablica 6. Maksimalne i reprezentativne multipath pogreške za kodna mjerenja uz primjenu »uske« korelacije za redukciju multipath efekata (Eissfeller i dr. 2007a)

160° operativno je od 2004. godine. To je ustvari bidirekcijski sustav sa emitiranim frekvencijama satelita od 2.491,75 +/- 4,08 MHz i frekvencijama prijamnika od 1.615,68 MHz.

Kombinacijom regionalnih i globalnih komponenata sustava, (Studija od Huang und Tsai 2008), dobiti će se PDOP vrijednosti na azijskom području, bolje nego što će pružati GPS+Galileo sustav zajedno. Isto tako specijalnom kombinacijom triju vrsta putanja satelita u područjima sa zaklonom horizonta imati će se na raspolaganju, za azijsko područje, više signala satelita nego s GPS-om i Galileo-m zajedno.

Prvi MEO satelit lansiran je 13. travnja 2007., a tim sa Stanford Universitya analizira ove signale. Drugi Compass-G2 satelit lansiran je 14. 04. 2009., a treći Compass-G1 satelit lansiran je nedavno, 16.01.2010. godine. Planirana je potpuna konstelacija operativnih satelita 2013. godine.

Kinezi planiraju i sličan sustav WAAS/EGNOS-u s imenom SNAS (Sino Navigational Augmentation System.).

> 6. IRNSS

Ovaj indijski regionalni satelitski sustav IRNSS (Indian Regional Navigational Satellite System) je u razvoju od 2006. godine od strane Indijske svemirske agencije (ISRO). Trebao bi biti izgrađen u sljedećih četiri do pet godina. Planirano je ukupno 7 satelita sa zemaljskim kontrolnim stanicama. Indija ne ide u razvoj globalnog sustava već za tu svrhu misli koristiti kineski COMPASS.

Tri satelita bi imala geostacionarnu putanju, a preostala četiri imala bi geosinkronizirane putanje s nagibom putanja od 29°. Prvi IRNSS satelit trebao bi biti lansiran 2010. god. i trebao bi omogućiti određivanje položaja točaka u Indiji s točnošću od 20 m.

Indijska vlada odlučila je sa 169 milijuna američkih dolara financirati sustav GAGAN (GPS-Aided Geo Augmented Navigation), koji je sličan EGNOS sustavu, a

trebao bi biti izgrađen do 2011. godine.

Sustav je koncipirala ISRO i Airports Authority of India, a trebao bi biti izgrađen i implementiran od strane Američko-indijskog konzorcija. Sustav bi se prvenstveno koristio za civilnu navigaciju i odašiljao bi signale na L1 i L5 frekvenciji sa dva S-band navigacijska signala i korekciju sata satelita sa 50 bita po sekundi.

> 7. QZSS

QZSS je japanski »Quasi-Zenith Satellite System« koji s kombinacijom GPS satelita treba omogućiti opažanja na točkama s zaklonom horizonta u japanskim gradovima i brdima (Solarić 2007). Sustav se sastoji od tri kvazi geostacionarna satelita sa geosinkroniziranim putanjama, a lansiranje prvog satelita planirano je u 2009. godini (Slika 6). Vertikalni kut jednog od tri satelita biti će uvijek veći od 70° na južnom području Japana. U japanskim gradovima uvjet za GPS satelite u 60% slučajeva je da je faktor PDOP<6. Kombinacijom GPS+QZSS sustava ovaj podatak se mijenja i iznosi oko 90%.

QZSS sateliti će imati na frekvenciji L1 novi kod LIC, a slati će signale i na frekvencijama L2, L5 i E5/E6 te će imati novi tip oscilatora, tj. hidrogeni maser. Na L1 frekvenciji će biti nova poruka L1- SAIIF, korekturni signal koji će davati točnost pseudoudaljenosti u dijelovima metra i omogućit će npr. raspoznavanje trake po kojoj se vozi auto.

7.1 MSAS

Japan gradi i SBAS za nadopunu GNSS s imenom MSAS (Multi-functional Satellite Augmentation System) i sa MTSAT 1 i 2 satelitima (»Multifunctional Transport Satellite System«) koji objedinjuju meteorološku i komunikacijsku službu. Ova dva satelita se kreću u geostacionarnoj putnji iznad istočnog Pacifika i prenose korekcijske podatke sada samo za GPS satelite. Prvi MTSAT-1R je lansiran 26. 02. 2005. i ima duljinu od 140°. Podr-



Slika 6. Putanja QZSS satelita

žava AMSS (Aeronautical Mobile Satellite Service), te zrakoplovi mogu preko njega, pomoću L-banda, poslati podatke stanicama na zemlji. MTSAT-2 lansiran je 18.02. 2006. godine.

> 8. Kratki pregled SBAS izgrađenih ili s započetom izgradnjom satelitskih sustava

Navedimo ovdje i osnovnu svrhu izgradnje SBAS (Satellite Based Augmentation Systems) sustava. Ovi sateliti prvenstveno su razvijeni za pružanje informacija o integritetu navigacijskih rezultata i za povećanje pouzdanosti zračnog prometa (Tablica 7).

> 9. Zaključak

Analizom stanja planova modernizacije postojećih te izgradnje budućih satelitskih navigacijskih sustava može se konstatirati:

- Da je očito došlo do zastoja u razvoju Galileo-a, ali to je omogućilo brojne analize budućih signala i modulacija te usmjerilo postojeće GNSS sustave na uvođenje novih frekvencija (tri) i modulacije signala.

- Da naredbom 14 Galileo satelita 13.12. 2009. kod OHB System AG tvrtke u Bremenu i naredbe za izgradnju kontrolnog centra kod talijanske tvrtke Thales Alenia neće više biti nesporna oko dovršetka Galileo navigacijskog sustava. Sustav bi trebao biti potpuno operativan u 2014. godini.

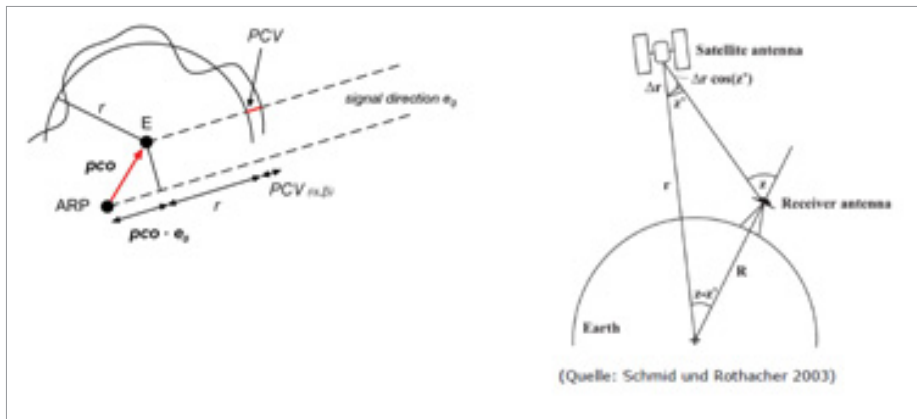
- Da inteligentni razvoj kombinacije GNSS regionalnih geostacionarnih sustava (Japan, Kina i Indija) omogućava s minimalnim troškovima veliku dostupnost većeg broja satelita i u područjima sa zaklonima horizonta, a samim time i veliku točnost u određivanju koordinata u navigaciji.

- Da će veliki napredak i razvoj u budućnosti doživjeti DGNSS i PDGNSS s umreženim postajama na Zemlji te će se korekcije DGNSS ili PDGNSS emitirati sa satelita ili sa stanica na zemlji.

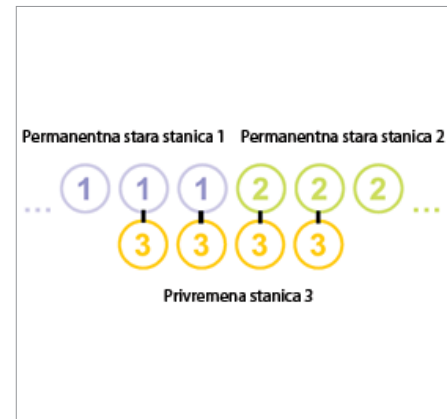
- Da će kombinacija više GNSS sustava s geostacionarnim satelitima dovesti do smanjenja broja stalnih umreženih

SBAS sustav	Satelit	Putanja-položaj	PRN broj	Opaska	RMS [m]	Medijan [m]
WASS	Intelsat Galaxy XV	142,2° W	135	L1/L5	4	3
	Telesatz Antik F1R	107,3° W	138	L1/L5	4	3
EGNOS	Inmarsat-3F2/ IOR-E	15,5° W	120	Inicijalno operativan	<10000	<10000
	Artemis	21,5° E	124	U testiranju		
	Inmarsat - 3F5/ AOR - W	25,0° E	126	Inicijalno operativan		
MSAS	MTSAT - 1R	140,1° E	129	Koris. pov. PRN 137	15	5
	MTSAT - 2	145,0° E	137	Koris. pov. PRN 129	15	5
GAGAN	GSAT - 4	82,0° E	127	Od 2009 L1/L5		

Tablica 7. Pregled SBAS satelitskih sustava



Slika 7. Varijacije faznog centra antena prijamnika i satelita



Slika 8. Kontrolirani postupak zamjene antena i prijamnika permanentnih stanica

stanica.

• Da će se u budućnosti razvoj i primjena posebice osjetiti kod Precise Point Positioning (PPP) te se već danas može ostvariti točnost od 1 dm iz cca. jednosatnog opažanja ili centimetarska točnost iz četverosatnog opažanja. Obrada GNSS-a s PPP mjerenjima u DHHN 2006.-2011. pokazuje da maksimalne razlike između mjerenja različitih dana iznose 8,5 mm u smjeru sjevera, 7,9 mm u smjeru istoka i u visini od 26,2 mm (Feldmann-Westendorff 2009). Primjena PPP metode obrade pored preciznih efemerida satelita i pogrešaka njihovih satova zahtijeva:

- fazni ekscentricitet antena satelita i varijacije njihovog faznog centra (PCV),
- precizne modele plimnih valova Zemlje,
- poznavanje deformacija kopna pod utjecajem opterećenja plimnih valova oceana te
- poznavanje parametara rotacije Zemlje, tj. gibanja njenih polova.

Na razvoj prijamnika mislila je IGS te je 2008. publicirala strateške zahtjeve za GNSS prijarnike (Rollo i drugi 2008).

Budući prijarnici trebali bi imati jake kompjutere, a dekodiranje i obradu visokofrekvencijskih signala će preuzimati softveri prijarnika. S velikom ulogom softvera trebala bi padati i cijena prijarnika na svega nekoliko tisuća dolara.

Posebice se očekuje ubrzan razvoj hibridnih prijarnika. Tako je američka vojska razvila nugget-prijarnik čiji je čip veličine nekoliko cm^2 koji integrira softver GPS prijarnika, mikro-elektronički akcelerometar, žiroskop (MEMS) i glavni dio minijaturnog atomskog sata (CSAC, točnosti $1 \cdot 10^{-11}$ /satu). Točni atomski sat omogućava direktni pristup Y- i M vojnom kodu te prije toga se ne mora odrediti pogreška sata prijarnika čime se dobije posebice velika točnost koordinata i sa malim brojem satelita. Osim toga, poslije gubljenja signala satelita, brzo se uspostave mjerenja, a atomski sat prijarnika povećava točnost određivanja visina.

Radi povećanja točnosti GNSS mjerenja te cijelog niza novih frekvencija satelita (posebice trenutačno kod GLONASS-a), apsolutna kalibracija antena prijamnika i satelita u budućnosti će imati veliki značaj (slika 7).

Zbog stalnih modernizacija GNSS sustava zamjena prijarnika i antena na permanentnim referentnim stanicama (što se u budućnosti odnosi i na CROPOS) treba se obavljati tzv. »kontroliranim postupkom« (Wanniger 2009) (Slika 8).

Zbog ujednačenosti i smanjenja troškova obrade GNSS mjerenja, geodetske uprave pojedinih zemalja uvode »of line« servise za obrade GNSS mjerenja, npr. »BaLiBo«, servis njemačke pokrajine Sakske. Ovaj će se trend intenzivirati u budućnosti.

> Literatura

» Benedicto, J., S. E. Dinwiddy, G. Gatti, R. Lukas, M. Lugert (2000): Satellite Design and Technology Developments: European Space Agency, Noordwijk, November 2000; http://esamultimedia.esa.int/docs/Galileo_world_paper_Dec_2000.pdf.

» Becker, M. (2009): Status i Perspektiven der Modernisierung von GPS und GLONASS. Beiträge zum 83. DVW-Seminar am 18. und 19. März in Dresden. pp. 3-20.

» Bilajbegović, A., Vierus, M. (2007): Untersuchung der Multipath-Effekte verschiedener GPS-Antennentypen und ihrer Einflüsse auf die Genauigkeit der Koordinatenbestimmung. AVN 1/2007, pp. 9-18.

» Bilajbegović, A., Leu, E., Vierus, M. (2008): Vorteile hybrider GNSS-Systeme? Allgemeine Vermessungs-Nachrichten 4/2008, Heilderberg, pp.122-129.

» Dvorkin, V., Karutin, S. (2006): GLONASS: Current status and perspectives. Allsat open conference, Hannover, 22.06.2006.

» Huang, Y.-S., Tsai, M.-L. (2008): The Impact of Compass/Beidou-2 on Future

GNSS: A Perspective From Asia, Proc. of ION GNSS 2008, pp. 2227-2238.

» Eissfeller, B., M. Irsigler, Avila-Rodriguez, J.-A., Schüler, E., T. Schüler (2007a): Das europäische Satellitennavigationssystem GALILEO-Entwicklungsstand; AVN, 2/2007, pp. 42-55, Februar 2007, Wichmann-Verlag, Heidelberg.

» Eissfeller, B., G. Ameres, Kropp, V., D. Sanroma, D. (2007b): Performance of GPS, GLONASS and Galileo; Beitrag zur 51. Photogrammetrischen Woche, 3.-7. 09. 2007, Stuttgart.

» Feldmann-Westendorff, U. (2009): Von der See bis zu den Alpen: Die GNSS-Kampagne 2008 im DHHN 2006-2011. Beiträge zum 83. DVW-Seminar am 18. und 19. März in Dresden. pp. 95-111.

» Rollo, R. (2007): Navigation nugget: new chip-scale atomic clock plus GPS receiver transforms navigation, The Department of the Navy information Technology magazine, CHIPS, April-June, 2007, <http://www.chips.navy.mil>.

» Reaser, C. R. (2006): Navstar Global Positioning System. Allsat open Conference, Hannover.

» Schüler, T., Wallner, S., Seyfert, E.: Entwicklungsstand GALILEO mit einem Ausblick auf die Kombination mit GPS für die schnelle RTK-Positionierung. Zfv, Heft 6/2009, pp. 363- 371.

» Solarić, M. (2007): Japan's Quasi-Zenith Communication and Position Satellite System.

» Journal of the Croatian Cartographic Society, Zagreb, Mai/2007

» Wanniger, L. (2009): Code - und Phasenmessungen zu SBAS-Satelliten für Positionsbestimmung. Beiträge zum 83. DVW-Seminar am 18. und 19. März in Dresden. pp. 39-50.

» Weber, T., Trautenberg, H. L., Schäfer, Chr. (2001): Galileo system Architecture - Status and Concepts, Proceedings ION GPS 2001, Salt Lake City.

» URL-1: <http://navcen.uscg.gov/pubs>

» URL-2: <http://www.glonass-ianc.rsa.ru> E