

UDK 629.052.9:629.056.8  
Pregledni znanstveni članak / Review

# Razvoj i modernizacija GNSS-a

**Mladen ZRINJSKI<sup>1</sup>, Đuro BARKOVIĆ<sup>2</sup>, Kristina MATIKA<sup>3</sup> – Zagreb**

*SAŽETAK. Rad opisuje trenutačan status i planirani razvoj četiriju globalnih navigacijskih satelitskih sustava, američkoga GPS-a, ruskoga GLONASS-a, europskog sustava Galileo i kineskog sustava BeiDou. Za svaki sustav iznesen je koncept, sažet kronološki pregled s ključnim povijesnim događajima koji su obilježili njihov razvoj, kao i ostvarenu i planiranu točnost apsolutnog pozicioniranja. Suvremenija tehnologija i novi civilni signali sustava Galileo i BeiDou potaknuli su GPS i GLONASS na modernizaciju. Pregledno su opisane glavne karakteristike modernizacije i poboljšanja koja one donose u pozicioniranju, navigaciji i određivanju vremena. Uz globalne sustave, Indija i Japan razvili su regionalne navigacijske satelitske sustave NavIC i QZSS, kojih je koncept i razvoj također iznesen u ovom radu. Na kraju je dana usporedna analiza osnovnih parametara svih GNSS-a s osvrtom na njihovu nezaobilaznu primjenu u različitim aspektima ljudskog života.*

*Ključne riječi: GPS, GLONASS, Galileo, BeiDou, NavIC, QZSS.*

## 1. Uvod

Značajan korak u povijesti pozicioniranja i navigacije započet je s razvojem globalnih navigacijskih satelitskih sustava (Global Navigation Satellite System – GNSS), početak kojih je obilježen uspostavom američkoga GPS-a (Global Positioning System) u kasnim 1970-ima. Od prvobitne ideje o isključivo vojnoj primjeni do današnje dominantno civilne upotrebe, broj i raznovrsnost GPS aplikacija ubrzano se širi. Povijesni pregled, princip rada i planirana modernizacija GPS-a detaljno su izloženi u radu Zrinjski i dr. (2005). Gotovo istodobno s razvojem GPS-a započinje razvoj ruskog, u prvom redu vojnoga globalnog navigacijskog satelitskog sustava pod nazivom GLONASS (rus. ГЛОбальная НАвигационная Спутниковая Система). Rastući zahtjevi naveli su druge države na razvoj vlastitih sustava kao i na modernizaciju postojećih. Sustavi Galileo i BeiDou započinju svoj razvoj potkraj 1990-ih te su za razliku od GPS-a i GLONASS-a opremljeni suvremenijom tehnologijom koja će dovesti do naprednijih rješenja.

<sup>1</sup> Izv. prof. dr. sc. Mladen Zrinjski, Geodetski fakultet Sveučilišta u Zagrebu, Kačićeva 26, HR-10000 Zagreb, Hrvatska, e-mail: mzrinjski@geof.hr,

<sup>2</sup> Prof. dr. sc. Đuro Barković, Geodetski fakultet Sveučilišta u Zagrebu, Kačićeva 26, HR-10000 Zagreb, Hrvatska, e-mail: barkovic@geof.hr,

<sup>3</sup> Kristina Matika, mag. ing. geod. et geoinf., Geodetski fakultet Sveučilišta u Zagrebu, Kačićeva 26, HR-10000 Zagreb, Hrvatska, e-mail: kmatika@geof.hr.

Sveprisutan je razvoj regionalnih navigacijskih satelitskih sustava (Regional Navigation Satellite System – RNSS), kao i sustava koji služe kao regionalna nadopuna GNSS-a, odnosno SBAS-a (Satellite Based Augmentation Systems) (tablica 1). SBAS pruža informacije o točnosti, integritetu i dostupnosti navigacijskih rezultata dobivenih GNSS-om. Međusobna interoperabilnost svih tih sustava omogućit će veću pouzdanost i dostupnost sustava uvođenjem novih poboljšanih signala i servisa namijenjenih ponajprije civilnim korisnicima.

Tablica 1. *Postojeći i planirani satelitski navigacijski sustavi.*

Država	GNSS	RNSS	SBAS
SAD	GPS		WAAS (Wide Area Augmentation System)
Rusija	GLONASS		SDCM (System for Differential Corrections and Monitoring) – u razvoju
Europa	Galileo		EGNOS (European Geostationary Navigation Overlay Service)
Kina	BeiDou		SNAS (Satellite Navigation Augmentation System) – u razvoju
Indija		NavIC	GAGAN (GPS and GEO Augmented Navigation)
Japan		QZSS	MSAS (Multi-functional Satellite Augmentation System)

## 2. Razvoj i modernizacija GPS-a

Navigation Satellite Time and Ranging – Global Positioning System (NAVSTAR – GPS) prvi je globalni navigacijski satelitski sustav koji je prema Wooden (1985) definiran kao svezemenski, u svemiru stacionirani sustav što ga je Ministarstvo obrane SAD-a kako bi zadovoljilo potrebe vojnih snaga da precizno odrede svoju poziciju, brzinu i vrijeme u jedinstvenom referentnom sustavu, bilo gdje na Zemlji ili blizu Zemljine površine na permanentnoj osnovi. U vrijeme Hladnog rata Ratno zrakoplovstvo i Ratna mornarica SAD-a paralelno su razvijali vlastitu tehnologiju za preciznu navigaciju te su ih 1973. ujedinili u sustav pod nazivom NAVSTAR – GPS.

### 2.1. Koncept i razvoj GPS-a

GPS se sastoji od svemirskog, kontrolnog i korisničkog segmenta koji omogućuju emitiranje vojnih i civilnih signala za pozicioniranje, navigaciju i određivanje vremena. Svemirski segment sastoji se od 24 operativna i tri rezervna satelita koji su raspoređeni unutar šest orbitalnih ravnina međusobno razmaknutih za 60° u srednjoj Zemljinoj orbiti (Medium Earth Orbit – MEO) na visini od oko 20 200 km iznad Zemljine površine. Orbite su kružne s inklinacijskim kutom od 55° i vremenom oplođenja od 11 sati i 56 minuta. Takav raspored omogućuje vidljivost najmanje četiriju satelita s gotovo bilo kojeg mjesta na Zemlji (URL 1).

Zemaljski kontrolni segment sastoji se od glavne kontrolne postaje smještene u vojnoj zračnoj bazi Schriever u Coloradu, koja na temelju prikupljenih podataka sa 16 nadzornih postaja optimalno razmještenih po cijelom svijetu određuje položaj satelita u svemiru i te podatke dalje prosljeđuje satelitima preko 11 zemaljskih

antena. Odabrane frekvencije za odašiljanje pseudoslučajnih (Pseudorandom Noise – PRN) kodova su L1 (1575,42 MHz) i L2 (1227,60 MHz). Javno dostupan civilni C/A kod moduliran je na L1 nosaču, a zaštićeni precizni P(Y) kod na oba nosača (Hofmann-Wellenhof i dr. 2008). Terestrički referentni koordinatni sustav GPS-a je WGS 84 (World Geodetic System 1984), a efemeride GPS-a dane su u ITRF2014 (International Terrestrial Reference Frame 2014). ITRF2014 posljednja je realizacija ITRS-a (International Terrestrial Reference System).

Korisnicima GPS-a na raspolaganju su besplatan standardni pozicijski servis (Standard Positioning Service – SPS), namijenjen civilnim korisnicima, i precizni pozicijski servis (Precise Positioning Service – PPS), dostupan vojsci i autoriziranim korisnicima. Prvi GPS prijamnici bili su analogni uređaji velikih dimenzija i velike mase namijenjeni ponajprije za potrebe vojske. Danas su, ovisno o namjeni (navigacija, geodezija, svemirska istraživanja, poljoprivreda, meteorologija i dr.), prijamnici realizirani u različitim oblicima (čipovi, mikroprocesori, antene i dr.).

Prvi GPS satelit lansiran je u veljači 1978. godine, a do danas je lansirano nekoliko generacija satelita: Blok I, Blok II, Blok IIA (Advanced), Blok IIR (Replenishment), Blok IIR-M (Modernized), Blok IIF (Follow On), Blok IIIA, a planira se i Blok IIIF. Sustav je inicijalno bio dostupan samo za potrebe vojske, a od 1983. godine nakon što je sovjetski lovac oborio civilni putnički avion KAL 007 koji je zalutao u zabranjeni zračni prostor SSSR-a zbog navigacijskih pogrešaka, američki predsjednik Ronald W. Reagan objavljuje da će GPS postati dostupan za civilnu uporabu nakon što bude dovršen.

Prva generacija od 11 prototip satelita pod nazivom Blok I poslužila je za testiranje sustava i njihovo je lansiranje provedeno u razdoblju od 1978. do 1985. godine. Inicijalna operativna sposobnost (Initial Operational Capability – IOC) GPS-a postignuta je 8. prosinca 1993. godine (Zrinjski i dr. 2005). Do proglašenja potpune operativne sposobnosti (Full Operational Capability – FOC) 25. travnja 1995. godine (Zrinjski i dr. 2005), prva generacija satelita zamijenjena je s novih 24 satelita (9 Blok II, 15 Blok IIA). Tijekom sljedećih deset godina potpuna konstelacija održavana je lansiranjem još četiriju dodatnih satelita Blok IIA i novih 13 Blok IIR.

Nakon pokretanja projekta za razvoj europskoga globalnog navigacijskog satelit-skog sustava Galileo 1999. godine, Ministarstvo obrane SAD-a počelo je uvidati da bi GPS mogao s vremenom izgubiti status jedinoga pravoga globalnog sustava za pozicioniranje i navigaciju koji uspješno drži više od dva desetljeća (Zrinjski i dr. 2005), te ga je to potaknulo da provede modernizaciju sustava. Prvi i najvažniji korak u poboljšanju točnosti sustava bila je odluka američkog predsjednika Billa Clintona o ukidanju namjerne degradacije SA (Selective Availability) navigacijske točnosti civilnog signala L1 C/A, koja je donesena 2. svibnja 2000. godine (Zrinjski i dr. 2005). Sljedeći korak u modernizaciji bio je uvođenje novoga civilnog signala L2C na osam satelita Blok IIR-M i trećega civilnog signala L5 na 12 satelita Blok IIF. Najnovija generacija GPS satelita Blok IIIA i Blok IIIF emitirat će i četvrti civilni signal L1C. Dana 23. prosinca 2018. godine uspješno je lansiran prvi satelit Blok IIIA te je u fazi testiranja i puštanja u rad, a planira se lansirati još 9 Blok IIIA i 22 Blok IIIF satelita (URL 1). Trenutačno (1. ožujka 2019.) operativan je 31 satelit, od toga 1 Blok IIA, 11 Blok IIR, 7 Blok IIR-M i 12 Blok IIF (URL 1).

## 2.2. Modernizacija GPS-a

Modernizacijom su obuhvaćeni svi segmenti GPS-a. Civilnim korisnicima bit će dostupna tri nova civilna signala L2C, L5 i L1C uz zadržavanje dosadašnjeg L1 C/A, a za vojne korisnike uvodi se snažniji M (Military) kod (tablica 2). Lansirat će se novi GPS sateliti Blok III, koji će zamijeniti satelite Blok IIA, Blok IIR i Blok IIR-M kojih je predviđeno planirano vrijeme trajanja od 7,5 godina isteklo, a 19 od ukupno 40 lansiranih satelita još uvijek je u funkciji. Implementirat će se poboljšani operativni kontrolni sustav (Operational Control System OCX), razvit će se novi vojni GPS korisnički prijamnici (Military GPS User Equipment – MGUE) osposobljeni za prijam M kodnih signala te modernizirani civilni prijamnici. Nova rješenja trebala bi omogućiti poboljšanje točnosti pozicioniranja, navigacije i određivanja vremena civilnim i vojnim korisnicima, poboljšanje integriteta i zaštite od neprijateljskog ometanja, pojačanu snagu signala i dulji radni vijek satelita (15 godina) koji više neće imati mogućnost uključivanja mjere zaštite SA. Prva planiranja modernizacije GPS-a započeta su još 1996. godine (Zrinjski i dr. 2005), a razlozi su njezine usporene provedbe dugotrajnost postojećih satelita, usporen razvoj sustava Galileo, ali i financije.

Civilni signal L2C odašilje se na satelitima Blok IIR-M od 2005. te je namijenjen ponajprije za komercijalne potrebe. Signal se sastoji od podatkovnog (*data*) kanala koji sadrži navigacijsku poruku i *pilot* kanala koji ne nosi podatke te time omogućuje bolju detekciju signala u prijamniku (Moran 2014). Zbog povećane snage signala u odnosu na L1 C/A kojim se služi većina dostupnih GPS prijamnika, L2C je dostupniji u urbanim sredinama, područjima pokrivenim gustom vegetacijom i u zatvorenim prostorima. Simultano korištenje signala L2C i L1 C/A omogućuje odgovarajuće opremljenim dvofrekvencijskim prijamnicima uklanjanje ionosferskoga kašnjenja na osnovi usporedbe kašnjenja tih dvaju signala na dvije frekvencije, bez potrebe za čekanjem diferencijalnih popravaka ili izračuna pogreške primjenom modela.

Civilni signal L5 posebno je pogodan za sigurnosni servis *Safety of Life* jer je smješten unutar radiofrekvencijskog pojasa rezerviranog za ARNS (Aeronautical Radio Navigation Service) te je otporniji na interferencije. Snažniji je od signala L2C što omogućuje bolji prijam, veću propusnost i veću otpornost na *multipath* (detaljnije vidi u Zrinjski 2010). Nova poboljšana struktura signala sa širim frekvencijskim opsegom dovodi do bolje pouzdanosti sustava. Odašiljanjem tog signala na nižoj frekvenciji poboljšan je njegov prijam u zatvorenim prostorima. U kombinaciji s L1 C/A, L2C i tehnikom *trilaning*, odnosno korištenjem triju frekvencija, moguće je postići točnost apsolutnog pozicioniranja bolju od jednog metra bez potrebe za korištenjem sustava koji služe kao nadopuna, npr. WAAS (URL 4).

Četvrti civilni signal L1C odašilje se na istoj frekvenciji kao i L1 C/A, ali s odvojenim *pilot* i podatkovnim signalom. Primijenjena je modulacija BOC (Binary Offset Carrier) koja omogućuje interoperabilnost s drugim GNSS-ima, a istovremeno štiti interese nacionalne sigurnosti SAD-a (URL 4). Signal L1C izvorno je razvijen kao zajednički signal za GPS i Galileo, ali su ga prihvatili i drugi sustavi (BeiDou, QZSS). Poboljšani dizajn signala omogućit će bolji mobilni prijam signala GPS satelita u gradovima i drugim nedostupnim okruženjima, a nova modulacija MBOC (Multiplexed BOC) omogućit će poboljšanu otpornost na *multipath* efekte. Sateliti Blok III prvi će odašiljati taj signal.

Tablica 2. *Modernizacija GPS signala (URL 1).*

Frekvencija	I, II, IIA, IIR	IIR-M	IIF	IIIA, IIIF
	1978. – 2004.	2005. – 2009.	2010. – 2016.	od 2018.
L1 (1575,42 MHz)	L1 C/A	L1 C/A	L1 C/A	L1 C/A
	L1 P(Y)	L1 P(Y)	L1 P(Y)	L1 P(Y)
		L1M	L1M	L1M
				L1C
L2 (1227,60 MHz)	L2 P(Y)	L2 P(Y)	L2 P(Y)	L2 P(Y)
		L2C	L2C	L2C
		L2M	L2M	L2M
L5 (1176,45 MHz)			L5	L5

Zračne snage SAD-a počele su odašiljati nove civilne navigacijske (Civil Navigation – CNAV) poruke na L2C i L5 u travnju 2014. godine (URL 4). CNAV prenosi slične podatke kao i poruka NAV (Navigation) na C/A kodu, ali ima fleksibilniju strukturu podataka s promjenjivim duljinama paketa i varijabilnim intervalima odašiljanja kako bi bila pogodna i za buduća proširenja sustava. Svaki paket sastoji se od 300 bita koji se odašilje svakih 12 sekundi (Kaplan i Hegarty 2017). Uvedena je mogućnost kodiranja navigacijske poruke upotrebom FEC-a (Forward Error Correction) kako bi se kontrolirale eventualne pogreške nastale prilikom prijenosa podataka sa satelita (Moran 2014), čime se omogućuje veća propusnost i skraćuje vrijeme odašiljanja što je vrlo korisno za sigurnosne servise. Civilnim korisnicima u toj fazi razvoja sustava dostupna je osnovna poruka (Message Type 0), koja sadrži samo podatke o broju satelita (PRN) i podatke o vremenu. Poruka CNAV bit će potpuno spremna za odašiljanje nakon što se primijeni novi operativni kontrolni sustav OCX, koji će upravljati svim postojećim te novim civilnim i vojnim signalima.

Signali L2C i L5 bit će potpuno operativni kada u orbiti budu 24 operativna satelita koja će odašiljati te signale. Kada to bude postignuto, bezkodne i pseudobezkodne tehnike, koje se primjenjuju u prijamnicima za rekonstrukciju vojnog P(Y) koda na L2 frekvenciji kako bi se postigla što veća točnost, bit će zamijenjene. Američka vlada obvezala se zadržati postojeće karakteristike GPS signala L1 C/A, L1 P(Y), L2C i L2 P(Y) minimalno dvije godine nakon što će u orbiti biti 24 operativna satelita koja odašilju na frekvenciji L5 (planirano do 2024. godine), što će omogućiti postupnu tranziciju s bezkodnih i pseudobezkodnih prijamnika na prijammike koji podržavaju modernizirane civilne kodirane signale (URL 6).

Od proglašenja FOC-a 1995. godine stvarne performanse GPS-a neprekidno ispunjavaju ili premašuju minimalne razine performansi SPS-a određene s 95%-tnom vjerojatnosti (URL 2), a koje garantira Vlada SAD-a (tablica 3). Federal Aviation Administration (FAA) objavila je 2017. godine ostvarene performanse SPS-a za opažanja provedena potkraj 2016. godine (URL 3), a novi civilni signali donijet će dodatna poboljšanja prikazana u tablici 3 (URL 4, URL 5). GPS sateliti odašilju signal s određenom točnošću koja se mijenja zbog utjecaja različitih čimbenika na rasprostiranje tog signala kroz atmosferu do Zemljine površine. Vlada SAD-a se

obvezala emitirati GPS signal s globalnom prosječnom pogreškom URE (User Range Error) prikazanom u tablici 3, koja je rezultat orbitalnih pogrešaka i pogrešaka sata satelita, zanemarujući pritom pogreške vezane uz rasprostiranje signala i pogreške prijavnika (Wang i Li 2013). Točnost koju ostvaruje korisnik na Zemlji ovisi o geometriji satelita, URE i drugim čimbenicima kao što je višestruka refleksija signala (detaljnije vidi u Zrinjski 2010), atmosferski uvjeti i kvaliteta prijavnika.

Tablica 3. Točnost apsolutnog pozicioniranja GPS-om (URL 2, URL 3, URL 4, URL 5).

Točnost sustava	Garantirana točnost (2008.)	Postignuta točnost (2016.)	Planirana točnost (od 2024.)
Horizontalna točnost (2D) (95%)	≤ 9 m	≤ 1,9 m	do 1 m
Vertikalna točnost (1D) (95%)	≤ 15 m	≤ 3,9 m	
URE (95%)	≤ 7,8 m	≤ 3,8 m	0,8 m

### 3. Razvoj i modernizacija GLONASS-a

Sedamdesetih godina 20. stoljeća GPS nije bio jedini predstavnik globalnih navigacijskih satelitskih sustava. SSSR 1976. godine, gotovo istovremeno kada i SAD, započinje razvoj sustava pod nazivom GLONASS kao eksperimentalnog vojnog komunikacijskog sustava. Nakon završetka Hladnog rata, SSSR je prepoznao novu upotrebu GLONASS-a kao komercijalne aplikacije za pozicioniranje i navigaciju. GLONASS-om upravlja ruska svemirska agencija Roscosmos u ime Vlade Ruske Federacije.

#### 3.1. Koncept i razvoj GLONASS-a

Svemirski segment GLONASS-a sastoji se od 24 satelita (21 aktivan i 3 rezervna) raspoređena u tri srednje Zemljine orbitalne ravnine (MEO) s razmakom od 120°, a sateliti su u orbitalnoj ravnini raspoređeni s razmakom od 45°. Orbite se nalaze na visini od 19 100 km iznad Zemljine površine s inklinacijom od 64,8°, a svakom satelitu treba 11 sati i 15 minuta da obiđe Zemlju. Takva konstelacija osigurava kontinuiranu globalnu pokrivenost na Zemljinoj površini i iznad nje do visine od 2000 km. Orbitalnu konstelaciju moguće je proširiti dodavanjem satelita (do 64 satelita) unutar ili između orbitalnih ravnina, kao i izgradnju MEO, geosinkroniziranih orbita (Geosynchronous Orbits – GSO) i visokoeliptičnih orbitalnih (Highly Elliptical Orbit – HEO) proširenja (Interface Control Document 2016).

GLONASS sateliti odašilju isti PRN kod, ali svaki satelit na različitoj frekvenciji. Tehnika koja se primjenjuje za razlikovanje emitiranih signala s različitih satelita naziva se tehnika višestrukog pristupa s frekvencijskom raspodjelom (Frequency Division Multiple Access – FDMA). Svi ostali GNSS-i (GPS, Galileo, BeiDou) primjenjuju kodnu tehniku CDMA (Code Division Multiple Access), kojom sateliti simultano odašilju signale na jednoj frekvenciji bez njihove međusobne

interferencije. Signali se prenose unutar dvaju pojasa: L1 sa središnjom frekvencijom od 1602 MHz i L2 sa središnjom frekvencijom od 1246 MHz. Frekvencije su međusobno razmaknute za 0,5625 MHz na L1 i 0,4375 MHz na L2, odnosno  $L1 = 1602,0 + 0,5625k$  (MHz) i  $L2 = 1246,0 + 0,4375k$  (MHz), gdje je  $k$  (od  $-7$  do  $+6$ ) broj kanala frekvencije satelita (Groves 2013). Takvim rasporedom konstelacija od 24 satelita smještena je unutar samo 14 kanala. Taj problem riješen je tako da parovi satelita koji se nalaze na dijametralno suprotnim stranama u orbiti upotrebljavaju identične frekvencijske kanale s obzirom na to da oba satelita nikada nisu vidljiva korisniku na Zemlji u isto vrijeme.

Zemaljski kontrolni segment sastoji se od glavnoga kontrolnog centra smještenog u Krasnoznamenisku u blizini Moskve i mreže postaja za praćenje većinom smještenih na teritoriju Rusije, te je trenutačno u fazi modernizacije. GLONASS osigurava korisnicima besplatan civilni servis i autorizirani vojni servis emitiranjem triju otvorenih signala L1OF, L2OF od 2004. i L3OC od 2014., te dvaju zaštićenih signala L1SF i L2SF (URL 8). Proizvodnja prvih GPS/GLONASS prijamnika započela je 2007. godine, a od 2011. započinje njihova masovna upotreba. Zbog korištenja tehnike FDMA, GLONASS prijamnici imaju složeniji hardver što je rezultiralo i većom cijenom samog prijamnika, ali postupan prijelaz na CDMA donosi i smanjenje troškova.

Prvi testni satelit lansiran je u listopadu 1982. godine zajedno s dva balastna satelita s približno istom masom jer je SSSR već planirao istovremeno lansiranje tri satelita raketom Proton-K kako bi uštedio na troškovima lansiranja. Zbog kratkoga radnog vijeka satelita i neuspješnih lansiranja, do uspostavljanja potpune konstelacije od 24 operativna satelita lansirano je čak 70 satelita, a FOC je proglašen u veljači 1996. godine (Kaplan i Hegarty 2017). Loše gospodarsko stanje nakon raspada SSSR-a utjecalo je i na GLONASS, koji je zastao s razvojem te je nastupilo razdoblje propadanja unutar kojeg je konstelacija do 2002. godine pala na samo sedam satelita. Sustav se od tada polako obnavlja lansiranjem dugovječnijih satelita i ponovni FOC proglašen je 8. prosinca 2011. godine (Kaplan i Hegarty 2017).

GLONASS sateliti podijeljeni su po blokovima i do danas je lansirano šest modela satelita poznatih i pod nazivom Uragan. Prototip ili nulta generacija satelita Blok I lansirana je u razdoblju od 1982. do 1985. godine, a projektirani su da rade samo godinu dana. Prva generacija satelita lansirana je između 1985. i 1990. godine i obuhvaća tri različita modela satelita Blok IIa, Blok IIb i Blok IIv, a odlikuje se duljim radnim vijekom (do 4,5 godina). GLONASS-M druga je generacija satelita koji su razvijani od 1990., a prvi satelit lansiran je 2003. godine. Karakterizira ih radni vijek od sedam godina i poboljšana stabilnost atomskih satova. Najznačajnija im je karakteristika da su opremljeni drugim civilnim signalom L2OF, koji je omogućio civilnim korisnicima eliminaciju ionosferskoga kašnjenja. Noviji sateliti GLONASS-M, lansirani od 2014. godine, opremljeni su i CDMA signalom na L3 frekvenciji (1202,025 MHz). Treća generacija satelita GLONASS-K (Blok K1, Blok K2 i Blok KM) ima vrijeme trajanja od 10 godina. Sateliti GLONASS-K1 osiguravaju usluge pozicioniranja i navigacije za sve kategorije korisnika koristeći FDMA signale na L1 i L2, kao i CDMA na L3 (Kaplan i Hegarty 2017), a lansirana su dva prototip satelita. Trenutačno (1. ožujka 2019.) je u orbiti 26 satelita, od kojih su 24 operativna (URL 7).

### 3.2. Modernizacija GLONASS-a

Nakon ponovne uspostave FOC-a, održavanje i modernizacija GLONASS-a financira se programom nazvanim „*Maintenance, Development, and Use of GLONASS 2012 – 2020*“, koji obuhvaća nadogradnju svemirskoga, kontrolnog i korisničkog segmenta (Kaplan i Hegarty 2017). Novi sateliti treće generacije GLONASS-K1 predstavljaju tranziciju između postojećih GLONASS-M i budućih satelita GLONASS-K2 koji će odašiljati nove CDMA signale na postojećim L1 i L2 frekvencijama (tablica 4). Lansiranje prototip satelita GLONASS-K2 očekuje se potkraj 2019. godine (URL 9). Roscosmos planira lansirati i šest satelita GLONASS-B u tri visokoeliptične Zemljine orbite (HEO) koji će povećati točnost pozicioniranja u urbanim sredinama (URL 9). U fazi su definiranja satelita GLONASS-KM, koji će nositi dodatne civilne signale na istim frekvencijama L1 i L5 kao i GPS, Galileo i BeiDou sateliti (Groves 2013).

Modernizira se i zemaljski kontrolni segment kojega se gotovo sve postaje nalaze na teritoriju bivšeg SSSR-a zbog čega postoje razdoblja kada se ne može provoditi praćenje i ažuriranje satelita podacima. Izgradit će se nove referentne kontrolne postaje na teritoriju Rusije, ali i izvan nje, te su dvije postaje već postavljene u Brazilu (2014.) i Južnoafričkoj Republici (2017.), a sljedeća će se izgraditi u Indiji. Proširenje svemirskog i kontrolnog segmenta GLONASS-a ima pozitivan utjecaj na točnost orbita, satova satelita i na bolju globalnu pokrivenost Zemlje.

Efemeride GLONASS-a dane su u terestričkom referentnom koordinatnom okviru PZ-90 (Parametry Zemli 1990), a u nastojanju da se PZ-90 približi ITRF-u provedena su dva ažuriranja: PZ-90.02 i PZ-90.11. Najnoviju realizaciju PZ-90.11 odobrio je ministar obrane Ruske Federacije u siječnju 2014. godine, a s ITRF2014 usklađena je na centimetarskoj razini što je omogućilo poboljšanu interoperabilnost s drugim GNSS-ima (URL 11).

Tablica 4. Modernizacija GLONASS signala (URL 8).

GLONASS satelit	FDMA		CDMA		
	1602 + 0,5625k MHz	1246 + 0,4375k MHz	1600,995 MHz	1248,060 MHz	1202,025 MHz
GLONASS (1982. – 2005.)	L1OF, L1SF	L2SF			
GLONASS-M (2003. – danas)	L1OF, L1SF	L2OF, L2SF			L3OC (od 2014.)
GLONASS-K1 (2011. – danas)	L1OF, L1SF	L2OF, L2SF			L3OC
GLONASS-K2 (2019. – danas)	L1OF, L1SF	L2OF, L2SF	L1OC, L1SC	L2OC, L2SC	L3OC
GLONASS-B (2023. – 2025.)			L1OC, L1SC	L2OC, L2SC	L3OC

Značenje: O – otvoreni signal, S – zaštićeni signal, F – tehnika FDMA, C – tehnika CDMA



Uvođenje novih signala proširuje mogućnost poboljšanja konfiguracije konstelacije GLONASS-a, poboljšanje strukture i sastava navigacijske poruke, kao i poboljšanje točnosti, pouzdanosti i integriteta navigacijskih rješenja u različitim uvjetima. Trenutačna i planirana točnost GLONASS-a prikazana je u tablici 5.

Tablica 5. *Točnost apsolutnog pozicioniranja GLONASS-om (URL 8, URL 9, URL 10, URL 21).*

Točnost sustava	Trenutačno ostvarena točnost	Planirana točnost
Horizontalna točnost (2D) (95%)	4 m do 7 m	do 1 m
Vertikalna točnost (1D) (95%)	10 m do 15 m	
URE (95%)	≤ 2,6 m	1,4 m

#### 4. Koncept i razvoj sustava Galileo

Galileo je autonoman europski globalni navigacijski satelitski sustav koji pruža visokoprecizan globalni servis pozicioniranja. Prvi je sustav za globalno satelitsko pozicioniranje, navigaciju i određivanje vremena kojim upravljaju civilne službe i zajednica država, a pokrenula ga je Europska komisija i razvijen je zajedno s Europskom svemirskom agencijom (European Space Agency – ESA).

Nakon što će svi sateliti biti razmješteni unutar orbita, sustav će se sastojati od 24 operativna satelita i šest rezervnih. Sateliti kruže na visini od oko 23 222 km iznad Zemljine površine u tri srednje Zemljine orbite s inklinacijom od 56° u odnosu na ekvator. Sateliti su ravnomjerno raspoređeni tako da u svakoj orbiti bude po osam satelita s međusobnim razmakom od 45°, a period rotacije satelita oko Zemlje iznosi 14 sati i 5 minuta (URL 12). Inklinacija orbita odabrana je tako da osigura dobru pokrivenost na polarnim širinama koje su od GPS-a zapostavljene.

Razvoj sustava započeo je 1999. godine, kada je stvoren inženjerski tim na čelu kojega su bile Njemačka, Francuska i Italija. Uslijedile su poteškoće u razvoju sustava zbog problema financiranja, ali i zbog suprotstavljanja Vlade SAD-a zbog nemogućnosti isključivanja Galileo signala u vrijeme vojnih operacija. Godine 2003. Europska unija (EU) i ESA dogovorile su se oko sufinanciranja projekta, a 2004. postignut je dogovor s SAD-om o sigurnosnim pitanjima. Prvi testni satelit GIOVE-A lansiran je u prosincu 2005. godine, nakon čega je opet uslijedila financijska kriza. Sredinom 2005. godine osnovan je konzorcij nekoliko tvrtki za razvoj projekta, no godinama je trajao dogovor o pravnoj strukturi tvrtke koja će upravljati sustavom Galileo, te sredinom 2007. godine EU preuzima upravljanje projektom. Galileo se ponovno počinje razvijati u travnju 2008. godine, kada su odobrena sredstva za izgradnju sustava te je istog mjeseca lansiran drugi testni satelit GIOVE-B s višegodišnjim zakašnjenjem.

Program za razvoj sustava Galileo sastoji se od tri razvojne i implementacijske faze. Prva faza IOV (In-Orbit Validation) obuhvaćala je lansiranje dva testna satelita (GIOVE-A i GIOVE-B), svrha kojih je bila testiranje performansi atomskih satova i otpornosti digitalne tehnologije na radijaciju. Dobiveni rezultati pomogli su u poboljšanju dizajna nove generacije satelita IOV, te su danas oba satelita u

fazi mirovanja. Srce Galileo satelita čine atomski satovi. Svaki satelit nosi po četiri atomska sata: dva pasivna hidrogenska masera (Passive Hydrogen Maser – PHM) sa stabilnošću od 0,45 nanosekundi u 12 sati, odnosno jedne sekunde u tri milijuna godina, i dva rubidijska sata sa stabilnošću od tri sekunde u milijun godina (Lisi 2017). To čini PHM satove trenutačno najstabilnijim atomskim satovima koji su lansirani u svemir. Četiri satelita IOV lansirana su tijekom 2011. i 2012. godine, a svrha im je bila provjera funkcioniranja svemirskog i zemaljskoga kontrolnog segmenta sustava Galileo.

Druga faza IOC započeta je lansiranjem petog i šestog satelita u kolovozu 2014. godine u ekscentričnu orbitu, nakon čega su sateliti premješteni u stabilniju kružnu orbitu, ali zbog nemogućnosti upotrebe u navigacijske svrhe, upotrebljavaju se za znanstvena istraživanja Einsteinove teorije relativnosti. Proglašenjem *Initial Services* 15. prosinca 2016. godine (Lisi 2017), Galileo je službeno postao spreman za pružanje usluga te tako korisnicima omogućio upotrebu signala za pozicioniranje, navigaciju i određivanje vremena. Konstelacija se tada sastojala od 18 satelita, od toga 12 operativnih. Faza FOC trebala bi biti postignuta do 2020. godine i obuhvaćat će svih 30 satelita, kontrolne centre raspoređene unutar Europe, mreže senzornih postaja i mreže odašiljačkih postaja diljem cijelog svijeta (Lisi 2017). Trenutačno (1. ožujka 2019.) sustav Galileo ima 26 lansiranih satelita, od kojih su 22 operativna (dva u krivoj orbiti, dva nisu u funkciji) (URL 13).

ESA je upravljala fazom definiranja razvoja sustava i fazom IOV koje je sufinancirala s EU. Fazu FOC u potpunosti financira EU i njome upravlja Europska komisija, koja je s ESA-om potpisala delegacijski sporazum prema kojem ESA postaje zadužena za projektiranje i nabavu u ime Komisije. Europska GNSS agencija (European GNSS Agency – GSA) od 2017. godine osigurava da se Galileo komercijalizira i eksploatira, da zadovoljava sve sigurnosne kriterije te promiče njegove aplikacije i servise.

Galileo sateliti emitiraju 10 navigacijskih signala i jedan signal SAR (Search and Rescue). Galileovi navigacijski signali emitiraju se u dodijeljenim radiofrekvencijskim pojasevima: E1, E5a, E5b i E6 (tablica 7), dok se signal SAR emitira u jednom od radiofrekvencijskih pojaseva rezerviranih za hitne službe (1544 MHz – 1545 MHz). Galileo posjeduje signale u sličnom frekvencijskom rasponu kao i GPS, a interferencija s drugim satelitima unutar pojedinih frekvencijskih područja (npr. L1) riješena je posebnom modulacijom BOC. Širokopojasni signal E5 centriran je na frekvenciji 1191,795 MHz, a nova modulacija AltBOC (Alternative BOC) omogućuje i njegovu demodulaciju na dva signala E5a i E5b (Groves 2013). Mogućnost zajedničke obrade E5a i E5b omogućuje i veću otpornost na *multipath* efekte i lakšu detekciju ometanja signala.

Galileovi navigacijski signali nude krajnjim korisnicima različite usluge, odnosno servise koji su dostupni u punoj preciznosti za civilne i vojne svrhe.

*Open Service* (OS) besplatan je otvoreni servis namijenjen širokom tržištu, ponajprije za navigacijske sustave u automobilima i pametnim telefonima. Dostupan je svakom korisniku opremljenom Galileo prijammnikom bilo gdje u svijetu pružajući mogućnost točnog pozicioniranja (tablica 6).

Tablica 6. *Specifikacije otvorenog servisa sustava Galileo (Hofmann-Wellenhof i dr. 2008).*

Točnost sustava	Jednofrekventni uređaji	Dvofrekventni uređaji
Horizontalna točnost (2D) (95%)	15 m	4 m
Vertikalna točnost (1D) (95%)	35 m	8 m

*High Accuracy Service* (HAS) je servis zatvorenoga karaktera korištenje kojeg se plaća. Ima pristup i trećoj frekvenciji E6 spektralno odijeljenoj od signala OS, na kojoj se odašilju dva signala zaštićena komercijalnom kriptografskom zaštitom.

*Public Regulated Service* (PRS) namijenjen je javnim vladinim autoriziranim službama kao što su policija, carina, vatrogasci. Signali se odašilju na odvojenim frekvencijama (E6 i E1) kao širokopojasni signali kako bi bili otporni na nenamjerne ili namjerne smetnje i tako pružili veću kvalitetu usluge u hitnim ili kriznim situacijama (teroristički napadi).

*Search and Rescue* (SAR) *Service* europski je doprinos međunarodnoj Cospas-Sarsat humanitarnoj organizaciji za pronalazak i spašavanje unesrećenih osoba bilo gdje u svijetu, a omogućuje lociranje unesrećene osobe unutar 10 minuta s točnošću od pet kilometara (URL 14). Također, bit će uveden povratni signal unesrećenoj osobi koji će ju obavijestiti da je njezin signal zaprimljen i lokaliziran.

Tablica 7. *Signali i servisi sustava Galileo (Hofmann-Wellenhof i dr. 2008).*

Parametar	E5a		E5b		E6			E2-L1-E1		
Frekvencija [MHz]	1176,45		1207,14		1278,75			1575,42		
Servis	OS/HAS		OS/HAS		PRS	HAS		PRS	OS/HAS	
Kanal	<i>data</i>	<i>pilot</i>	<i>data</i>	<i>pilot</i>		<i>data</i>	<i>pilot</i>		<i>data</i>	<i>pilot</i>
Modulacija signala	AltBOC (15,10)				BOC (10,5)	BPSK (5)	BPSK (5)	BOC (15,2,5)	MBOC (6,1,1/11)	MBOC (6,1,1/11)

Zemaljski segment sustava Galileo sastoji se od kontrolnog i korisničkog segmenta. Postaje za praćenje satelita i obradu podataka raspoređene su po cijelom svijetu te tako omogućuju dobivanje pouzdanih informacija o pozicioniranju, navigaciji i vremenu sa satelita u orbiti. Ipak, većina postaja smještena je unutar europskog teritorija zbog ispunjavanja strogih uvjeta sigurnosti i zaštite. Terestrički referentni okvir sustava Galileo razvija se od 2007. godine pod nazivom GTRF (Galileo Terrestrial Reference Frame) kao nezavisna realizacija međunarodnoga terestričkog referentnog sustava ITRS (Kaplan i Hegarty 2017).

Korisnički segment obuhvaća različite tipove Galileo prijammnika, glavna zadaća kojih je prijam signala s Galileo satelita te pozicioniranje i navigacija u realnom vremenu. Galileo prijammnici prisutni su na tržištu već nekoliko godina, a dovoljan broj satelita u orbiti i operativan zemaljski kontrolni segment omogućili su da 15. prosinca 2016. godine budu pušteni u rad OS, SAR i PRS, što je dovelo do veće proizvodnje GNSS/Galileo čipova i prijammnika, a time je omogućeno korištenje sustava Galileo u mobilnim uređajima, uređajima za navigaciju u automobilima, u GNSS prijammnicima za visokoprecizne radove i u različitim drugim primjenama.

## 5. Koncept i razvoj sustava BeiDou

Prva dva desetljeća 21. stoljeća obilježena su ubrzanim razvojem kineskoga navigacijskog satelitskog sustava poznatog pod nazivom BeiDou Navigation Satellite System (skraćeno BeiDou System – BDS). Sastoji se od regionalnoga komunikacijskog navigacijskog sustava i globalnoga navigacijskog satelitskog sustava. Program su inicijalno pokrenule kineske vojne snage, a danas je dvojnoga karaktera, razvijen da zadovolji potrebe civilnih i vojnih korisnika.

Svemirski segment, za razliku od GPS-a, GLONASS-a i sustava Galileo, imat će satelite raspoređene u tri različite Zemljine orbite. Od ukupno 35 satelita, njih 27 (24 operativna i 3 rezervna) bit će ravnomjerno raspoređeno u tri srednje Zemljine orbite (MEO) međusobno razmaknute za 120°. Sateliti će se nalaziti na visini od 21 528 km s inklinacijom od 55° i periodom revolucije od 12 sati i 35 minuta. Pet satelita nalazit će se u geostacionarjoj orbiti (Geostationary Orbit – GEO) na visini od 35 786 km. Preostala tri satelita bit će raspoređena u tri inklinirane geosinkronizirane orbite (Inclined GSO – IGSO) međusobno razmaknute za 120° s inklinacijskim kutom 55° (Kaplan i Hegarty 2017). GEO i IGSO satelitima bit će prekriven teritorij Kine i rubna područja Azije, a MEO sateliti omogućit će potpunu globalnu pokrivenost Zemlje.

Kina je imala jasnu viziju razvoja i implementacije sustava BeiDou. Glavni su joj ciljevi bili gospodarski i društveni razvoj države, nacionalna sigurnost, pružanje kontinuiranih, stabilnih i pouzdanih usluga globalnim korisnicima, razvoj svemirske industrije, poboljšanje životnog standarda ljudi i jačanje međunarodne suradnje. Glavno načelo bilo je postupna izgradnja neovisnoga globalnog satelitskog sustava koji će pružati besplatne usluge korisnicima, a ujedno će biti kompatibilan i interoperabilan s drugim GNSS-ima kako bi se potaknula međunarodna suradnja i razmjena te tako korisnicima omogućilo bolje pružanje usluga.

Godine 1983. osmišljen je koncept s dva geostacionarna satelita iznad Kine koji je uspješno testiran u orbiti 1989. godine, čime je započeo razvoj kineskoga satelitskog sustava. Postupna izgradnja globalnoga navigacijskog satelitskog sustava BeiDou obuhvaća tri faze razvoja. Prvi korak bio je razvoj eksperimentalnog sustava BDS-1 koji je započeo 1994. godine, a dovršen je i pušten u upotrebu 2000. godine lansiranjem dva satelita u geostacionarnu Zemljinu orbitu. BDS-1 pružio je korisnicima u Kini sustav pozicioniranja i komunikacije preko kratkih poruka (Kaplan i Hegarty 2017). Treći, rezervni GEO satelit lansirani je 2003. godine te je dodatno poboljšao performanse sustava.

BDS-2 je regionalni satelitski sustav koji se počeo izgrađivati 2004., a od 27. prosinca 2012. godine korisnicima na azijsko-pacifičkim područjima pruža usluge besplatnog pozicioniranja, navigacije i uslugu točnog vremena (Kaplan i Hegarty 2017). Konstelacija se tada sastojala od ukupno 14 satelita (5 GEO, 5 IGSO i 4 MEO) koji odašilju signale na tri frekvencije B1, B2 i B3 (tablica 8).

Posljednja je faza izgradnja globalnoga navigacijskog satelitskog sustava BDS-3. U razdoblju od ožujka 2015. do veljače 2016. lansirana su dva IGSO i tri MEO eksperimentalna satelita koja su poslužila za testiranje novih signala koji se odašilju na frekvencijama B1, B2 i B3 (tablica 8) u L pojasu i Bs (2492,028 MHz) u S pojasu. Šest godina nakon proglašenja regionalnog FOC-a, sustav se 27. prosinca 2018. godine (URL 15) uzdiže na globalnu razinu pružanja svojih usluga s 18 MEO i jednim GEO satelitom, a do 2020. godine konstelacija bi trebala biti

kompletirana. Dana 1. ožujka 2019. sustav BeiDou sastoji se od 15 BDS-2 satelita (5 GEO, 7 IGSO, 3 MEO) i 18 BDS-3 MEO satelita (URL 18).

Novi civilni signal B1C odašilje se na novoj frekvenciji 1575,420 MHz kao i signali na L1 u GPS-u i E1 u sustavu Galileo, stoga je primijenjena modulacija BOC. Otvoreni signali B2a (1176,450 MHz) i B2b (1207,140 MHz) odašilju se na frekvencijama identičnima s Galileo signala E5a i E5b, te postoji mogućnost njihove zajedničke obrade (1191,795 MHz). Novi BDS-3 signali omogućuju bolju kompatibilnost i interoperabilnost s drugim GNSS-ima.

Tablica 8. *Signali i servisi BDS-2 i BDS-3 (URL 17).*

Parametar	B1				B2				B3		
	B1I	B1Q	B1C	B1A	B2I	B2Q	B2a	B2b	B3I	B3Q	B3A
Kanal			<i>d</i>   <i>p</i>				<i>d</i>   <i>p</i>	<i>d</i>   <i>p</i>			<i>d</i>   <i>p</i>
Frekvencija [MHz]	1561,098		1575,420		1207,140		1191,795		1268,520		
Modulacija signala	QPSK		MBOC (6,1,1/11)	BOC (14,2)	QPSK		AltBOC (15,10)		QPSK		BOC (15,2.5)
Servis	O	A	O	A	O	A	O		O	A	A
Sustav	BDS-2		BDS-3	BDS-3	BDS-2	BDS-3		BDS-2/ BDS-3		BDS-3	

Značenje: O – otvoreni servis, A – autorizirani servis, *d* – data kanal, *p* – pilot kanal

Sustav omogućuje dvije vrste usluga: otvoreni i autorizirani servis. Otvoreni servis za civilnu upotrebu je besplatan, a osigurava točnost apsolutnog pozicioniranja navedenu u tablici 9. Autorizirani servis omogućuje pouzdanije određivanje pozicije, brzine i vremena, te komunikacijski servis i viši stupanj integriteta. Trenutačno je kontrolni segment BDS-a znatno ograničen jer se sve postaje nalaze na teritoriju Kine. Terestrički referentni okvir sustava BeiDou pod nazivom CGCS2000 (Chinese Geodetic Coordinate System 2000) uveden je 2008. godine kao nezavisna realizacija ITRS-a (Kaplan i Hegarty 2017).

Povijesna je godina u razvoju BDS-a 2018., kada je lansirano 19 satelita s 10 raketa, od kojih su dva rezervna satelita koja služe za održavanje regionalnog BDS-2. Uspostavljen je i prvi prekomorski BDS/GNSS kontrolni centar u Tunisu, a tehnologija i prijamnici bazirani na BDS-u već se upotrebljavaju diljem svijeta (URL 15).

Tablica 9. *Specifikacije otvorenog servisa sustava BeiDou (URL 16).*

Točnost sustava	Globalna pokrivenost	Regionalna pokrivenost (azijsko-pacifičko područje)
Horizontalna točnost (2D) (95%)	10 m	5 m
Vertikalna točnost (1D) (95%)		

## 6. Razvoj regionalnih navigacijskih satelitskih sustava IRNSS/NavIC i QZSS

Regionalni navigacijski satelitski sustavi su navigacijski satelitski sustavi sateliti kojih prekrivaju samo regionalna područja pojedinih država. Služe kao nadopuna globalnim sustavima koristeći se geostacionarnim Zemljinim orbitama čime omogućuju dostupnost većeg broja satelita u područjima sa zaklonjenim horizontom, a samim time i veću točnost pozicioniranja i navigacije. Kina je prva razvila regionalni sustav BDS-2, nakon nje Indija je razvila IRNSS koji je preimenovan u NavIC, dok je Japan razvio sustav QZSS.

### 6.1. IRNSS/NavIC

Indian Regional Navigation Satellite System (IRNSS) autonoman je regionalni navigacijski satelitski sustav koji je u potpunosti isplanirala i uspostavila indijska svemirska agencija (Indian Space Research Organisation – ISRO). Njegove usluge pozicioniranja i navigacije dostupne su na cijelom teritoriju Indije kao i na pojasu od oko 1500 kilometara od teritorija Indije.

Indija razvija svoju svemirsku tehnologiju već nekoliko desetljeća. Samostalno, ali i u suradnji s drugim državama, do sada su lansirali više desetaka različitih satelita. Potreba za razvojem vlastitoga autonomnog satelitskog sustava javlja se s gospodarskim i vojnim rastom Indije. Ovisnosti indijske vojske o stranim navigacijskim satelitskim sustavima poput GPS-a u vrijeme oružanih sukoba, kada im je upotreba tih sustava bila ograničena, potaknula je Indiju na razvoj IRNSS-a. Prijemna sustava daleko nadilazi vojnu upotrebu jer je važan komercijalni segment kao i bitan čimbenik za razvoj svemirske industrije. Indijska vlada odobrila je projekt za razvoj IRNSS-a 2006. godine s namjerom da postane važan geopolitički subjekt prije svega u regiji, ali i šire.

Svemirski segment sastoji se od ukupno sedam satelita, od kojih se tri nalaze u geostacionarnim orbitama na visini od približno 36 000 km iznad Zemljine površine, a preostalih četiri u geosinkroniziranim orbitama s inklinacijom od 29° u odnosu na ekvatorijalnu ravninu (Kaplan i Hegarty 2017). Takav raspored omogućuje da svih sedam satelita kontinuirano prate kontrolni centri na teritoriju Indije.

Prvi satelit IRNSS-1A planirane konstelacije lansirani je u srpnju 2013. godine, a do travnja 2016. lansirano je preostalih šest satelita (IRNSS-1B, IRNSS-1C, IRNSS-1D, IRNSS-1E, IRNSS-1F, IRNSS-1G). Nakon lansiranja posljednjeg satelita IRNSS-1G sustav je preimenovan u NavIC (Navigation Indian Constellation). Na satelitu IRNSS-1A 2017. godine prestala su raditi sva tri rubidijska atomska sata pa je taj satelit trebao biti zamijenjen kako bi se uspostavila potpuna konstelacija. Nakon prve neuspješne zamjene satelita IRNSS-1A satelitom IRNSS-1H u kolovozu 2017. godine, novi satelit IRNSS-1I uspješno je lansirani u travnju 2018. godine (URL 23).

NavIC pruža korisnicima dvije vrste usluga: besplatan standardni servis pozicioniranja (Standard Positioning Service – SPS) s točnošću prikazanom u tablici 10 i precizni servis (Restricted Service – RS) namijenjen autoriziranim korisnicima i vojsci. Oba servisa odašilju na dvije frekvencije: L5 (1176,450 MHz) i u S pojasu na 2492,028 MHz što omogućuje korištenje jednofrekventnih i dvofrekventnih

prijamnika (Kaplan i Hegarty 2017). Navigacijski signal u S pojasu emitira se kroz fazni antenski niz kako bi se održala potrebna pokrivenost i jačina signala. Od 2018. godine započela je proizvodnja GNSS prijamnika u koje je integriran NavIC.

Tablica 10. *Točnost apsolutnog pozicioniranja sustavom NavIC (Kaplan i Hegarty 2017, URL 5).*

Točnost sustava	Područje Indije	Područje 1500 km od Indije
Položajna točnost (3D) (95%)	≤ 10 m	≤ 20 m
URE (95%)	2,1 m	

## 6.2. QZSS

Japanska vlada također je razvila svoj regionalni navigacijski satelitski sustav pod nazivom QZSS (Quasi-Zenith Satellite System). Cilj je QZSS-a da u kombinaciji s GPS-om pruži visokotočne i stabilne usluge pozicioniranja, navigacije i vremena na području istočne Azije i Oceanije s fokusom na Japan.

Sustav se sastoji od tri satelita smještena u kvazi geostacionarnoj orbiti (Quasi-Zenith Orbit – QZO) i jednog GEO satelita iznad ekvatora. Najmanje jedan satelit smješten je u blizini zenita u Japanu s kutom elevacije od 70° ili više. Međutim, neće uvijek stajati izravno u zenitu, odakle i dolazi naziv kvazi-zenitni sustav. Prvi QZO satelit Michibiki lansiran je 11. rujna 2010. godine, a preostala tri satelita lansirana su 2017. godine i nakon toga sustav postaje potpuno operativan 1. studenoga 2018. godine (URL 19). Planira se i proširenje sustava na sedam satelita (URL 19). Zemaljski segment sastoji se od dvije glavne kontrolne postaje u Japanu i mreže postaja za praćenje raspoređenih na teritoriju istočne Azije i Oceanije.

Primarna je svrha QZSS-a povećati dostupnost GPS-a u mnogobrojnim urbanim područjima i planinskim kanjonima gdje se mogu opažati samo sateliti na visokim elevacijama. Sekundarna je svrha poboljšanje performansi, točnosti i pouzdanosti GPS navigacijskih rješenja. QZSS sateliti odašilju signale kompatibilne s GPS L1 C/A, L1C, L2C i L5. Kombinacija GPS-a i QZSS-a pruža poboljšane performanse pozicioniranja odašiljanjem dodatnih signala L1S (L1-SAIF, 1575,42 MHz), L6 (LEX, 1278,75 MHz) i L5S (1176,45 MHz) (URL 8). Sustav trenutačno odašilje usluge za sljedeće servise pozicioniranja: *Satellite Positioning, Navigation and Timing Service* (PNT), *Sub-meter Level Augmentation Service* (SLAS) i *Centi-meter Level Augmentation Service* (CLAS) s točnošću prikazanom u tablici 11 (URL 19).

QZSS je dizajniran kako bi omogućio korištenje različitih civilnih aplikacija. Od 2015. godine serijski se proizvode QZSS prijamnici i GNSS prijamnici u koje je integriran QZSS. Taj sustav ima mogućnost odašiljanja informacija korisnicima o prirodnim katastrofama i o drugim kriznim situacijama kao što su potres, tsunami i teroristički napadi. Na taj će se način smanjiti broj neinformiranih ljudi u kriznim situacijama tijekom kojih su prometne i komunikacijske mreže prekinute što onemogućuje informiranje ljudi.

Tablica 11. *Točnost apsolutnog pozicioniranja servisa QZSS-a (URL 19).*

Točnost sustava	PNT	SLAS	CLAS
Horizontalna točnost (2D) (95%)		1 m	6 cm
Vertikalna točnost (1D) (95%)		2 m	12 cm
URE (95%)	≤ 2,6 m		

## 7. Usporedna analiza parametara GNSS-a

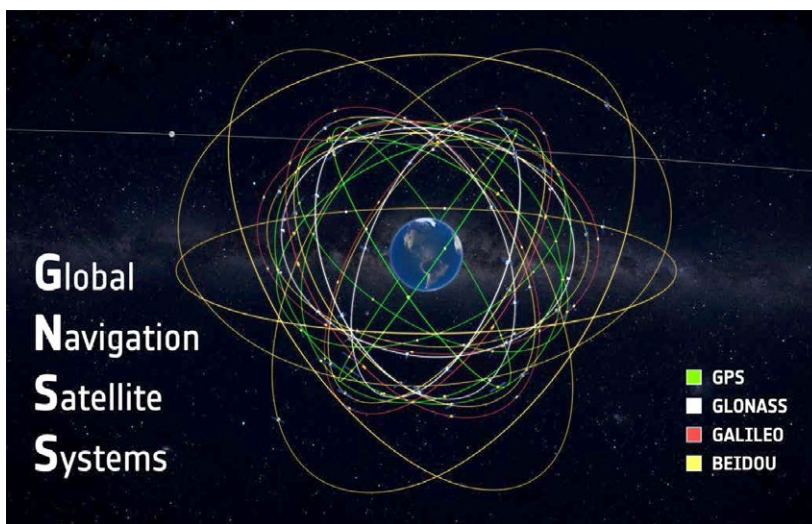
Potreba za razvojem satelitskih sustava rezultirala je gomilanjem satelita u svemiru i gužvom u radiofrekvencijskim područjima. Države koje su bile u mogućnosti razviti takve sustave prepoznale su prednosti koje oni donose i zauzele svoje mjesto u svemiru. Svaka država prilagodila je konstelaciju kako bi omogućila što bolju regionalnu i globalnu pokrivenost. Orbitalna konstelacija sustava Galileo postavljena je tako da pokriva polarna područja koja su od drugih, ponajprije vojnih, sustava zapostavljena s obzirom na to da im ta područja nisu bila od interesa. Najveći broj satelita nalazi se u srednjim Zemljinim orbitama (MEO) jer su troškovi lansiranja umjereno visoki, a kriterij globalne pokrivenosti ispunjava konstelacija od 24 do 36 satelita. Međutim, zbog nemogućnosti pozicioniranja u urbanim sredinama, lansiraju se i GEO sateliti koji to bitno poboljšavaju (GLONASS, BeiDou). Tablica 12 i slika 1 usporedno prikazuju trenutačno postojeće globalne navigacijske satelitske sustave i one u razvoju.

Tablica 12. *Usporedan prikaz osnovnih parametara GNSS-a.*

Parametar	GPS	GLONASS	Galileo	BeiDou
Prvo lansiranje	veljača 1978.	listopad 1982.	prosinac 2005.	ožujak 2015.
FOC	25. travnja 1995.	veljača 1996., 8. prosinca 2011.	do 2020.	do 2020.
Konstelacija	24 + 3 (MEO)	21 + 3 (MEO)	24 + 6 (MEO)	24 + 3 (MEO), 5 GEO, 3 IGSO
Orbitalna ravnina	6	3	3	3 MEO, 3 IGSO, 1 GEO
Inklinacija	55°	64,8°	56°	55°
Orbitalna visina	20 200 km	19 100 km	23 222 km	21 528 km (MEO), 35 786 km (GEO, IGSO)
Period revolucije	11 h 56 min	11 h 15 min	14 h 5 min	12 h 35 min (MEO)
Modulacija signala	CDMA	FDMA/CDMA	CDMA	CDMA
Broj operativnih satelita (1.3.2019.)	31	24	22	18

Svi sustavi odašilju ili planiraju odašiljati navigacijske signale u dva zajednička frekvencijska područja: L5/E5/B2/L3 u donjem L pojasu (1164 MHz – 1215 MHz) i L1/E1/B1 u gornjem L pojasu (1559 MHz – 1610 MHz) (tablica 13). Ti pojasevi dodijeljeni su primarno GNSS-u i dijele ih s ARNS-om. Neki sustavi emitiraju





Slika 1. Konstelacije GNSS-a (URL 5).

dodatne signale u radiofrekvencijskim pojasevima u rasponu od 1215 MHz do 1300 MHz (L2 i E6) bez interferencija s drugim servisima i zato se uglavnom upotrebljavaju za autorizirane komercijalne servise. Zbog velikog broja satelita, zagušenje je postalo ozbiljan problem u nižim frekvencijskim područjima, stoga pojedini sustavi (BeiDou, NavIC) istražuju nove tehnologije kako bi se mogla upotrebljavati i viša frekvencijska S područja (od 2 GHz do 4 GHz) gdje su prisutnije veće degradacije signala.

Tablica 13. Popis korištenih i planiranih frekvencija globalnih i regionalnih navigacijskih satelitskih sustava.

Pojas	Frekvencija [MHz]	GPS	GLONASS	Galileo	BDS-2	BDS-3	NavIC	QZSS
S	2492,028					Bs	Bs	
L	1600,995		L1					
	1575,420	L1		E1		B1		L1
	1561,098				B1			
	1278,750			E6				L6
	1268,520				B3	B3		
	1248,060		L2					
	1227,600	L2						L2
	1207,140			E5b	B2	B2b		
	1202,025		L3					
	1191,795			E5		B2		
1176,450	L5		E5a		B2a	L5	L5	

Do kraja 2020. godine broj operativnih satelita u svemiru prelazit će 100, što će rezultirati boljom geometrijom satelita, većim brojem raspoloživih signala koji nose nemodulirane *pilot* signale. Minimalna je snaga odašiljanja signala povećana, što je popraćeno i povećanom brzinom odašiljanja kodova i lakšim praćenjem signala. Umjesto fazne digitalne modulacije PSK (Phase Shift Keying) prihvaćena je nova modulacija BOC, koja omogućuje širi frekvencijski opseg signala i time smanjuje višestruku refleksiju signala. Sva ta poboljšanja dovest će do ispunjavanja ili u većini slučajeva premašivanja minimalnih garantiranih razina točnosti pojedinih sustava (tablica 14).

Tablica 14. *Popis otvorenih signala i procijenjeni URE nakon što će biti postignuta njihova potpuna operativnost (URL 5).*

Parametar	GPS	GLONASS	Galileo	BeiDou	NavIC	QZSS
Otvoreni signal	L1 C/A	L1OF	E1	B1C	L5	L1 C/A
	L1C	L1OC	Ea	B2a		L1C
	L2C	L2OF	Eb	B2b		L2C
	L5	L2OC		B3I		L5
		L3OC				
URE (95%)	0,8 m	1,4 m	1,1 m	2,5 m	2,1 m	2,6 m

## 8. Zaključak

Era razvoja tehnologije, automatizacije i umjetne inteligencije donosi modernizaciju u svemirskoj industriji. Krajnjim korisnicima GNSS-a to omogućuje znatna poboljšanja u pozicioniranju, navigaciji i određivanju vremena, još veću raznovrsnost korištenja i razvoja novih aplikacija, različitih senzora, prijaimnika i autonomnih vozila koji se oslanjaju na geoprostorne podatke koje može pružiti jedino GNSS.

Minijaturizacija senzora omogućila je kombiniranje GNSS-a s različitim senzori- ma, što je uvelo velike inovacije u industriji. Prema GNSS *Market Report* iz 2017., pretpostavlja se da će 2020. godine biti oko osam milijardi GNSS prijaimnika, a daleko najveća implementacija bit će u pametnim telefonima, automobilima i bes- pilotnim letjelicama (URL 20). Umjesto postojeće točnosti od pet metara, novi dvofrekvencijski pametni telefoni omogućuju točnost apsolutnog pozicioniranja na decimetarskoj razini zahvaljujući novim signalima L5, E1 i E5 (URL 22).

Integracija GPS-a i sustava Galileo donijela je znatna poboljšanja pozicioniranja i navigacije u urbanim sredinama zbog otpornosti na višestruku refleksiju signala, *multipath* (Zrinjski 2010), a simultanim korištenjem dviju frekvencija smanjuju se izvori drugih pogrešaka kao što su ionosfersko kašnjenje signala i otpornost signala na namjerna ili slučajna ometanja. Modernizacija i potpuna implementacija svih GNSS-a upućuje na dodatna poboljšanja koja nam nosi budućnost.

Rastuća primjena GNSS-a sa sobom donosi i neke izazove kao što su slučajna ili namjerna interferencija signala GNSS-a koji su jako osjetljivi zbog izrazito male snage odašiljanja te svaki prekid signala dovodi do ozbiljnih posljedica u različitim

sigurnosnim uslugama. Znatni naponi ulažu se u razvoj tehnologija koje će biti otporne na takve smetnje.

Potreba za preciznim pozicioniranjem u realnom vremenu postala je imperativ u današnjem svijetu, pa postoji mogućnost i za razvoj novih globalnih navigacijskih satelitskih sustava. Ujedinjeno Kraljevstvo trenutačno razmatra opciju razvoja vlastitoga navigacijskog satelitskog sustava jer bi 12. travnja 2019. godine trebalo izaći iz EU. Prestanak članstva Ujedinjenog Kraljevstva u EU imat će značajan utjecaj na njihovo korištenje sustava Galileo čiji će zaštićeni *Public Regulated Service* postati nedostupan njihovoj vladi i vojsci.

## Literatura

- Groves, D. P. (2013): *Principles of GNSS, Inertial, and Multisensor Integrated Navigation Systems*, Artech House, Boston.
- Hofmann-Wellenhof, B., Lichtenegger, H., Wasle, E. (2008): *GNSS – Global Navigation Satellite Systems – GPS, GLONASS, Galileo and more*, Springer-Verlag, Wien–New York.
- Interface Control Document (2016): *General Description of Code Division Multiple Access Signal System*, Russian Space System, Moscow.
- Kaplan, D. E., Hegarty J. C. (2017): *Understanding GPS/GNSS: Principles and applications*, Artech House, Boston.
- Lisi, M. (2017): *Initial Services, the new phase of the Galileo program*, My Coordinates, Vol. XIII, 7–12.
- Moran, M. G. (2014): *Future GNSS: Improved Signals and Constellations*, 34th European Telemetry and Test Conference, June 3–5, Nuremberg, 166–171.
- Wang, Y., Li, R. (2013): *The Analysis of Character of User Range Accuracy*, China Satellite Navigation Conference (CSNC) 2013 Proceedings, Springer, Berlin, Heidelberg, Vol. 244, 267–277.
- Wooden, W. H. (1985): *Navstar Global Positioning System*, First International Symposium on Precise Positioning with Global Positioning System, April 15–19, Rockville, Maryland, Vol. 1, 23–32.
- Zrinjski, M. (2010): *Definiranje mjerila kalibracijske baze Geodetskog fakulteta primjenom preciznog elektrooptičkog daljinomjera i GPS-a*, doktorski rad, Geodetski fakultet Sveučilišta u Zagrebu, Zagreb.
- Zrinjski, M., Bačić, Ž., Barković, Đ. (2005): *Modernizacija GPS-a (GNSS-2)*, Geodetski list, Vol. 59 (82), No. 1, 45–61.

## Mrežne adrese

- URL 1: GPS Space Segment, <https://www.gps.gov/systems/gps/space/>, (1.3.2019.).
- URL 2: GPS Performance, <https://www.gps.gov/systems/gps/performance/>, (12.2.2019.).
- URL 3: Global Positioning System (GPS) – Standard Positioning Service (SPS) – Performance Analysis Report, [http://www.nstb.tc.faa.gov/reports/PAN96\\_0117.pdf#page=22](http://www.nstb.tc.faa.gov/reports/PAN96_0117.pdf#page=22), (12.2.2019.).
- URL 4: GPS New Civil Signals, <https://www.gps.gov/systems/gps/modernization/civilsignals/>, (4.2.2019.).

- URL 5: The Interoperable Global Navigation Satellite Systems Space Service Volume, [http://www.unoosa.org/res/oosadoc/data/documents/2018/stspace/stspace75\\_0.html/st\\_space\\_75E.pdf](http://www.unoosa.org/res/oosadoc/data/documents/2018/stspace/stspace75_0.html/st_space_75E.pdf), (9.2.2019.).
- URL 6: Codeless/Semi-Codeless GPS Access Commitments, <https://www.gps.gov/technical/codeless/>, (11.2.2019.).
- URL 7: GLONASS Constellation Status, <https://www.glonass-iac.ru/en/GLONASS/>, (1.3.2019.).
- URL 8: The Way Forward – 10 Years of Achievement 2005–2015, [http://www.unoosa.org/res/oosadoc/data/documents/2016/stspace/stspace67\\_0.html/st\\_space\\_67E.pdf](http://www.unoosa.org/res/oosadoc/data/documents/2016/stspace/stspace67_0.html/st_space_67E.pdf), (12.2.2019.).
- URL 9: Directions 2019: High-orbit GLONASS and CDMA signal, <https://www.gpsworld.com/directions-2019-high-orbit-glonass-and-cdma-signal/>, (10.2.2019.).
- URL 10: Precision of GLONASS Navigation Definitions, <http://www.sdm.ru/smglo/stparam?version=eng&repdate&site=extern>, (10.2.2019.).
- URL 11: PZ-90.11, [https://eng.mil.ru/files/PZ-90.11\\_final-v8.pdf](https://eng.mil.ru/files/PZ-90.11_final-v8.pdf), (8.2.2019.).
- URL 12: Galileo: A Constellation of Navigation Satellites, [http://www.esa.int/Our\\_Activities/Navigation/Galileo/Galileo\\_a\\_constellation\\_of\\_navigation\\_satellites](http://www.esa.int/Our_Activities/Navigation/Galileo/Galileo_a_constellation_of_navigation_satellites), (8.2.2019.).
- URL 13: Galileo Constellation Information, <https://www.gsc-europa.eu/system-status/Constellation-Information>, (1.3.2019.).
- URL 14: Galileo Search and Rescue (SAR) Service, <https://www.gsa.europa.eu/european-gnss/galileo/services/galileo-search-and-rescue-sar-service>, (1.2.2019.).
- URL 15: The BDS-3 Preliminary System is Completed to Provide Global Services, [http://en.beidou.gov.cn/WHATSNEWS/201812/t20181227\\_16837.html](http://en.beidou.gov.cn/WHATSNEWS/201812/t20181227_16837.html), (10.2.2019.).
- URL 16: BeiDou Navigation Satellite System Open Service Performance Standard, <http://en.beidou.gov.cn/SYSTEMS/Officialdocument/201812/P020181227424526837905.pdf>, (5.2.2019.).
- URL 17: GNSS Signal Structures, [http://www.unoosa.org/documents/pdf/icg/2018/ait-gnss/03\\_gnss.pdf](http://www.unoosa.org/documents/pdf/icg/2018/ait-gnss/03_gnss.pdf), (5.2.2019.).
- URL 18: BeiDou Constellation Status, <https://www.glonass-iac.ru/en/BEIDOU/>, (1.3.2019.).
- URL 19: QZSS Update, <http://www.unoosa.org/documents/pdf/icg/2018/icg13/06.pdf>, (8.2.2019.).
- URL 20: GNSS Market Report, [https://www.gsa.europa.eu/system/files/reports/gnss\\_mr\\_2017.pdf](https://www.gsa.europa.eu/system/files/reports/gnss_mr_2017.pdf), (4.2.2019.).
- URL 21: GLONASS – Evaluation of Characteristics, [https://www.glonass-iac.ru/en/GLONASS/technical\\_characteristics.php](https://www.glonass-iac.ru/en/GLONASS/technical_characteristics.php), (7.2.2019.).
- URL 22: World's first dual-frequency GNSS smartphone hits the market, <https://www.gsa.europa.eu/newsroom/news/world-s-first-dual-frequency-gnss-smartphone-hits-market>, (1.2.2019.).
- URL 23: India successfully launches IRNSS-1I navigation satellite, <https://www.gpsworld.com/india-successfully-launches-irnss-1i-navigation-satellite/>, (11.2.2019.).

# Development and Modernization of GNSS

*ABSTRACT. This paper reviews the current status and planned development of four global navigation satellite systems – the American GPS, Russian GLONASS, European Galileo and Chinese BeiDou. The concept and short chronological overview of key historical events that marked their development are given for each system, as well as the achieved and planned accuracy of absolute positioning. Modern technology and new civilian signals of Galileo and BeiDou have prompted GPS and GLONASS to begin modernization. The main features of modernization, as well as the improvements in positioning, navigation and timing are described. Along with the aforementioned global systems, India and Japan have developed regional navigation satellite systems NavIC and QZSS whose concept and development are also presented in this paper. At the end a comparative analysis of the basic parameters of all GNSS with reference to their ever-growing application in different aspects of human life is given.*

*Keywords: GPS, GLONASS, Galileo, BeiDou, NavIC, QZSS.*

*Primljeno / Received: 2019-02-15*

*Prihvaćeno / Accepted: 2019-03-15*