

Co-funded by the
Erasmus+ Programme
of the European Union



Navigation



Medžida Mulić

UNIVERZITET U SARAJEVU - GRAĐEVINSKI FAKULTET

This publication has been produced with financial support from the Erasmus+ Programme of the European Union, under the GEOWEB project: 561902-EPP-1-2015-1-SE-EPPKA2-CBHE-JP *Modernising geodesy education in Western Balkan with focus on competences and learning outcomes (GEOWEB)*

The European Commission support for the production of this publication does not constitute an endorsement of the contents which reflects the views only of the authors, and the Commission cannot be held responsible for any use which may be made of the information contained therein.

Navigation

SADRŽAJ

Popis slika	6
Popis tablica	10
Glava 1	11
1 UVOD	11
1.1 Osnovni pojmovi i definicije.....	11
1.2 Vrste navigacije	15
1.3 Određivanje položaja	18
1.4 Dead Reckoning.....	20
1.5 Tehnike pozicioniranja i navigacije	22
1.6 Tehnike navigacije zasnovane na satelitskim opažanjima	23
1.7 Osnovni pojmovi u navigaciji	27
1.8 Tačnost navigacije	27
1.9 Vrste i faze navigacije.....	29
1.10 Zahtjevi korisnika navigacije	30
1.11 Međunarodne organizacije za navigaciju.....	31
Glava 2	34
2 HISTORIJSKI RAZVOJ NAVIGACIJE	34
2.1 Navigacija drevnih naprednih civilizacija.....	36
2.2 Navigacija starih Kineza	36
2.3 Navigacija starih naroda Bliskog istoka.....	37
2.4 Mjerni instrumenti za navigaciju kod starih naroda.....	43
2.5 Navigacija u starih Grka i Rimljana.....	49
2.6 Navigacija u srednjem stoljeću	54
Glava 3	55
3 PRINCIPI SATELITSKE NAVIGACIJE	55

3.1	Satelitski navigacijski sistemi	55
3.2	Različiti terestrički navigacijski sistemi	56
3.3	Kriteriji za usporedbu navigacijskih sistema	57
3.4	Principi satelitske navigacije.....	58
3.5	Navigacijsko rješenje	60
3.6	Referentni koordinatni sistemi za satelitsku navigaciju.....	61
3.6.1	Satelitski referentni sistem	62
3.6.2	Geocentrički koordinatni sistem	64
3.6.3	Geodetski koordinatni sistem.....	65
Glava 4		68
4	RADIO NAVIGACIJSKI SATELITSKI SISTEMI	68
4.1	Transit navigacijski sistem.....	69
4.1.1	Timation.....	72
4.1.2	Projekt 621B	72
4.2	GPS navigacijski sistem.....	73
4.2.1	Kontrolni segment.....	73
4.2.2	Svemirski GPS segment.....	76
4.2.3	Karakteristike GPS signala	79
4.2.4	Frekvencije i struktura GPS signala.....	91
4.2.5	Korisnički segment	99
4.3	Ruski satelitski navigacijski sistemi	101
4.3.1	Razvoj sovjetskih navigacijskih sistema.....	102
4.3.2	GLONASS	104
Glava 5		112
5	NAVIGACIJSKI SATELITSKI SISTEMI U RAZVOJU.....	112
5.1	Evropski satelitski navigacijski sistem – Galileo.....	114
5.1.1	Galileo svemirski segment	118
5.1.2	Galileo Kontrolni segment	131
5.1.3	Korisnički segment	133
5.2	Prednost korištenja multi GNSS	134

6	Popis literature	135
6.1	Lista referenci za 1. poglavlje	135
6.2	Lista referenci za 2. poglavlje	135
6.3	Lista referenci za 3.poglavlje	139
6.4	Lista referenci za 4. poglavlje	139
6.5	Lista referenci za 5. poglavlje	142

Popis slika

Slika 1.1: Određivanje položaja objekta mjerenjem dužina i uglova.....	18
Slika 1.2: Metoda „dead reckoning“	20
Slika 2.1a: Teritorije na kojima su živjele stare napredne civilizacije u dolinama velikih rijeka: Nil, Ind, Tigris i Eufrat, Žute rijeke. (izvor URL16).....	35
Slika 2.2: Sunčani brod ili Khufu brod, rekonstruiran. Osim jedara, pokretala ga je snaga mišića 30 robova veslača. Brod je izložen u muzeju sagrađenom kraj Velike piramide u Gizi u blizini mjesta gdje je pronađen. Muzej je prikazan za slici desno, bijeli objekat. (URL 2.2)	40
Slika 2.3: Hram kraljice Hatshepsut u Luksoru (u blizini Tebe) na čijim zidovima je crtežima i hijeroglifima prikazano putovanje u Punt. (URL 2.9).....	41
Slika 2.4a: Lijevo je originalni crtež (na zidu hrama u Luksoru) broda u Crvenom moru na putu za Punt, s veslačima u punom zamahu i kapetanom koji izdaje naredbe. Desno je prikaz s istog zida, koji prikazuje scenu istovaranja živih stabala mirisnog miska (URL 2.9).	42
Slika 2.5: Instrument iz starog Egipta za određivanje geografske širine-kamal, lijevo i u sredini. Desno: Udica za širinu (hook latitude), napravljena od razrezane bambusove trske i školjke. Poravnava se s horizontom i zvijezdom Sjevernjačom da pokaže da se osmatrač nalazi na željenoj geografskoj širini.....	43
Slika 2.6: Drevni kineski instrument „si-nan“ za pokazivanje pravca sjever/jug, (lijevo). Radi na principu magneta - ovdje magnetnu iglu predstavlja kašika. Si-nan je preteča kompasa, koji su Kinezi uveli u navigaciju mnogo kasnije, za vrijeme perioda velikih ratova. U sredini je kineski sunčani sat-	44
Slika 2.7: Jug pokazujuća kočija, replika. (lijevo). Ruka lutke pokazuje jug bez obzira u kom pravcu se kreće kočija, zahvaljujući sklopu ručno izrađenih diferencijalnih zubčanika pokazanih desno. Značajno je napomenuti da je bilo potrebno poznavati orijentaciju polazišne tačke. URL 2.7 i 2.8.....	46
Slika 2.8: Stari kineski brod „Fu-chuan junk“, lijevo. Desno je karta Kine iz 5 i 6. stoljeća. (URL 2.18).....	46
Slika 2.9: Karta stare Kine iz perioda 2000-200.g.p.n.e. (URL 2.20).....	47
Slika 2.10: Država Feničana-Kanaan, locirana na istočnoj obali Mediterana, i trgovačke rute u Sredozemlju, slika lijevo. Desno je pokazan feničanski brod iz Kartagine prikazan u mozaiku. Čuva se u najvećem muzeju mozaika na svijetu, u gradu Tunisu. izvori: https://en.wikipedia.org/wiki/Bardo_National_Museum_(Tunis)	48
Slika 2.11: Tipična fenička trirema, (lijevo) najbrži brod svog vremena, s kojim su Feničani prelazili velike udaljenosti. U sredini je „zaobljeni“ feničanski trgovački brod za prevoz tereta, koji se smatra najvećim doprinosom navigaciji svog vremena. Desno je feničanski ratni brod –galija iz perioda 1500-1000 g. p.n.e. Glava ovna je	

metalna i služila je da propije trup neprijateljskog broda u ratnim sukobima. (URL 2.23)	49
Slika 2.12: Gnomon, astronomski instrument starih naroda. Spominje se kod starih Kineza, Mesopotamaca, Egipćana, Grka i Rimljana. Služio je za mjerenje vremena, za određivanje geografske širine, određivanje pravca sjevera, početak godišnjeg doba, trajanje tropske godine, nagib ekliptike, itd. Desno je kineska arheološka iskopina, za koju su arheolozi zaključili da je gnomom s podloškom (šablonom, zadnji datira iz oko 200 g.p.n.e http://www.scinews.com/archaeology/article00292.html). Principi rada gnomona opisani na URL 2.24.	51
Slika 2.13: Karta svijeta koju je sastavio Eratosten oko 220, g. p.n.e. (URL 2.30).	52
Slika 2.14: Ptolomejeva karta svijeta, nacrtana oko 13. stoljeća. URL 2.26	53
Slika 3.1: GPS sateliti smješteni u šest orbitalnih ravnina koje imaju inklinaciju 55° u odnosu na ekvator, a na ekvatoru su razmaknute za 60° rektascenzije (slika prilagođena iz Grewal i dr., 2008).	59
Slika 3.2: Parametri koji definiraju geometriju orbite GPS satelita (slika prilagođena iz Grewal i dr., 2008).	59
Slika 3.3: Elementi Keplerove elipse i pridruženi koordinatni sistem u kojem se određuje položaj satelita u odnosu na geocentar. (izvor: ESA, URL 3.1)	60
Slika 3.4: Geometrijsko rješenje 2D položaja korisnika, koje se procijeni na osnovu tri pseudoudaljenosti. (prilagođeno iz Hofmann-Wellenhof, i dr., 2003 str. 37)	61
Slika 3.5: Satelitski referentni koordinatni sistem.	63
Slika 3.6: Veza satelitskog i terestričkog referentnog koordinatnog sistema. (izvor: Ghilani i Wolf, 2012)	65
Slika 3.7: Geodetski globalni terestrički sistem. Položaj tačke P izražen koordinatama XYZ ili geodetskim koordinatama: g. širinom, g. dužinom i g. visinom. (izvor: Ghilani i Wolf, 2012)	67
Slika 4.1: Prototip satelita Transit -1A, (lijevo, izvor: URL 4.1) Transit satelit u orbiti sa četiri sunčana panela (u sredini; izvor: GPS World, 2010). Prijemnik i antena tipa Magnavox MX1502 Satellite Surveyor, desno (izvor: Stansel, 1978, str. 25).	70
Slika 4.2: Karta postrojenja i stanica GPS kontrolnog segmenta. (URL2a)	74
Slika 4.3: Kontrolna „master“ stanica u Koloradu: vojnici američkih zračnih snaga nadziru svemirski segment (lijevo). Antena za komunikaciju s GPS satelitima za slanje komandi i podataka, te za kontrolu sistema (desno). (URL2b)	74
Slika 4.4: Konstelacija GPS satelita (URL4.3)	77
Slika 4.5: Struktura „in-fazne“ komponente na L1 signalu (Grewal, i dr., 2007, str. 55)	81
Slika 4.6: Struktura „kvadrature-fazne“ komponente na L1 signalu (izvor: Grewal, i dr., 2007, str. 56)	81
Slika 4.7: Struktura okvira i pod-okvira GPS navigacijske poruke (URL 4.11)	84

Slika 4.8: Odnosi između HOW zbira i TOW zbira (Grewal, 2007, str. 58).....	85
Slika 4.9: Struktura (modernizirane) L2-CNAV poruke (URL 4.12).....	87
Slika 4.10: Struktura (modernizirane) L5-CNAV poruke. (URL 4.13).....	88
Slika 4.11: Struktura (modernizirane) CNAV poruke. (URL 4.13).....	88
Slika 4.12: Dijagram GPS signala prije modernizacije sistema.....	92
Slika 4.13: Određivanje vremena putovanja signala pomoću uspoređivanja kodova.	94
Slika 4.14: Spektar signala na nosaču L1 (URL 4.7).....	96
Slika 4.15: Planirani raspored programa modernizacije GPS sistema.	97
Slika 4.16: Samo mali broj primjera primjene GPS za pozicioniranja i navigaciju: građevinarstvo, transport ljudi i roba, turizam, poljoprivreda. (URL 4.8).....	101
Slika 4.17: Ciklon (Tsyklon/Parus) navigacijski sateliti. Slika lijevo pokazuje ekspozat na Sajmu ekonomskih postignuća u Moskvi, između 1970. i 1980-tih godina (izvor: URL 4.15)......	103
Slika 4.18: Satelit Cikada (eng. Tsikada), razvijen na osnovu Parus i Ciklon satelita. izvor: URL4.16	103
Slika 4.19: Model geodetskog pasivnog satelita Etalon za SLR tehniku mjerenja (URL4.17).....	105
Slika 4.20: Model modificiranog satelita GLONASS–M, izložen na CEBIT 2011. izvor: URL4.18	106
Slika 4.21: Najmoderniji model satelita GLONASS-K, rok trajanja 12 godina	107
Slika 4.22: GLONASS konstelacija. izvor: URL 4.21.....	108
Slika 4.23: GLONASS Kontrolni segment (izvor: URL 4.22)	110
Slika 4.24: SLR stanica u Schelkovu, (lijevo) gdje se rade geodetska opažanja. Intuitivno zaključite o dimenzijama geodetskih instrumenata prema čovjeku na vratima. (izvor: URL4.23). Desno je kontrolna stanica u Komsomolsku, a SLR observatorija locirana na krovu. (izvor: URL 4.24).....	110
Slika 4.25: Karta pokazuje dostupnost GLONASS signala i faktor pozicionirajućeg geometrijskog rasporeda satelita (PDOP faktor), za korisnike na površini Zemlje, pri elevacijskom uglu signala od 5°, za 3. septembar 2018. godine u trenutku 17:10:19 Moskovskog vremena. (izvor: URL 4.25)	111
Slika 5.1: Plan implementacije Galileo sistema (izvor: Lisi, 2014).....	115
Slika 5.2: Princip navigacije i sinhronizacije vremena nekog korisnika na površini Zemlje, korištenjem samo Galileo sistema (izvor: EC Memo, 2012).....	116
Slika 5.3: FOC Arhitektura Galileo sistema (izvor: URL 5.10)	117
Slika 5.4: Rubidijum atomski satovi koji se ugrađuju u nove Galileo satelite, lijevo (URL 5.13). Slika desno pokazuje elektroniku u unutrašnjosti rubidijum atomskog sata, koji se koristi za monitoring satova. (URL5.14).....	119
Slika 5.5: Pasivni hidrogenski maser, visoko-precizni atomski sat Galileo satelita Izvor: ESA, URL 5.15	120

Slika 5.6: Unutrašnjost jednog satelita Galileo M, koji se nalazi u laboratoriji za testiranje. Vidljivi su atomski satovi: dva pasivna hidrogenska masera i dva atomska rubidijumska sata. Izvor ESA, URL 5.16	121
Slika 5.7: Galileo satelit u laboratoriji na testiranju glavne navigacijske antene pomoću baterijske lampe, lijevo. (URL 5.21) Desno, Satelit u specijalnoj Maxwell komori za testiranje, gdje se vidi da je glavna navigacijska antena pokrivena folijom, kao u svemiru. (URL 5.22)	122
Slika 5.8: Galileo satelit izlazi iz „Phenix komore“, lijevo. (URL 5.23) Desno, satelit u Maxwell komori pri simuliranju vibracija. (URL 5.24).....	123
Slika 5.9: Galileo satelit postavljen za ispitivanje u komori HERTZ. (URL 5.25), lijevo. Desno, tri od četiri Galileo satelita prije postavljanja u položaj za zajedničko lansiranja u decembru 2017. godine. (URL 5.26).....	124
Slika 5.10: Četiri Galileo satelita (23-26) pričvršćena za raketu Ariana 5 i spremjeni za lansiranje izvedeno u julu 2018., lijevo (URL 5.27); Crtež četiri satelita unutar rakete, desno. (URL 5.28).....	124
Slika 5.11: Raketa Ariana 5 spuštена da se instaliraju povezana četiri satelita Galileo 2017. godine, lijevo. (URL 5.30). Rakete Ariana 5 na lansirnoj rampi, u ESA bazi za lansiranje u Francuskoj Gvajani, desno. (URL 5.31).....	125
Slika 5.12: Galileo frekvencijski spektar signala (URL 5.37)	129
Slika 5.13: Frekvencijski opseg za RNSS sisteme (URL5.39)	130
Slika 5.14: Globalni raspored kontrolnog segmenta Galileo sistema (izvor: ESA, URL 5.40)	131
Slika 5.15: ESA Kontrolna Galileo stanica Fucino u centralnoj Italiji, jedna od najvećih kontrolnih GNSS stanica na svijetu. (izvor: ESA, URL 5.41)	132
Slika 5.16: ESA Kontrolni Galileo centar u Njemačkoj, Oberpfaffenhofen. Ovaj centar nadgleda rad satelita. (izvor: ESA, DLR, URL 5.42).....	132
Slika 5.17: lijevo, ESA „uplink stanica“ Papette na Tahitiju, Francuska Polinezija. Zadatak ove stanice je da šalje podatke za sadržaj navigacijske poruke koje Galileo sateliti emitiraju korisnicima. (ESA, URL 5.543) Desno, antene na ESA kontrolnoj stanici Redu, lociranoj u Belgijskoj oblasti Ardennes. (izvor: ESA - D. Galardini, URL 5.44)	132
Slika 5.18: Frekvencijski spektar GNSS sistema.....	134

Popis tablica

Tablica 1.1: Tačnost odabranih vrsta navigacije. (Hofmann-Wellenhof, i dr. 2003, str. 6)	31
Tablica 4.1: Pregled osnovnih karakteristika GPS satelita. (URL 4.4).....	77
Tablica 4.2: Pregled satelita koji su aktivni u orbiti ili se planiraju lansirati (URL4.2)	78
Tablica 4.3: Komponente podataka o efemeridama.....	89
Tablica 4.4: Algoritmi za računanje položaja satelita.....	90
Tablica 4.5: Pregled signala na L1 nosećem valu. (URL 4.5)	97
Tablica 4.6: Pregled signala na L2 nosećem valu. (URL 4.6)	98

Glava 1

1 UVOD

Ne postoji univerzalna definicija navigacije. Pojam navigacije prema (Hofmann-Wellenhof, i dr. 2003; Oxford, 1995) navodi da je to „bilo koja od nekoliko metoda određivanja ili planiranja položaja i kursa broda ili aviona, pomoću geometrije, astronomije, radio signalima, itd.“

Grewal, i dr. (2013 str.1) navodi da su Evropljani u eri najvećih otkrića u periodu od 15. do 17. stoljeća, pojam *navigacija* izveli iz dvije latinske riječi: imenice *navis* (brod) i glagola *agare* (raditi, voziti, voditi, upravljati). Dakle, navigacija je označavala umijeće upravljanja brodom od tačke A do tačke B. Pojam navigacija ima porijeklo vezano za pomorstvo ali je termin navigacija u širokoj primjeni.

Prema Hofmann-Wellenhof i dr., (2003) postoje dva koncepta navigacije. Prvi je određivanje položaja i brzina kretanja tijela u odnosu na poznatu referentnu tačku. Drugi koncept je planiranje i održavanje kursa od jedne do druge lokacije, uz izbjegavanje prepreka i sudara. Ovo se ponekad naziva navođenje, pilotiranje ili traženje rute, ovisno o vrsti pokretnog objekta.

Međutim, Grewal, i dr. (2013 str.1-2) navode da je upravljanje vozilom podijeljeno na tri međusobno povezane operacije: navigacije, navođenja i kontrole.

1.1 Osnovni pojmovi i definicije

Navigacija se odnosi na umijeće određivanja trenutnog položaja objekta, tj. neke određene vrste vozila, koje se kreće u svemiru, u zraku, na kopnu, na ili ispod vodene površine, ili pak ispod površine zemlje. Pokretni objekt kojem se određuje položaj može također biti kometa, projektil, pješak ili bilo koji predmet ili pokretna platforma kojoj je potrebno odrediti trenutni položaj ili je potrebno njegovo praćenje. U modernim primjenama, A i B se mogu posmatrati kao trenutno i namjeravano dinamičko *stanje* objekta. Definiranje *stanja* objekta može uključivati njegovu brzinu, *stav* (orijentaciju) ili promjenu orijentacije u odnosu na druge objekte. Praktična primjena navigacije općeniti zahtijeva opažanja, mjerenja, ili senzore koji mjere relevantne varijable, kao i metode procjenjivanja stanja objekta iz mjerenih vrijednosti.

Navođenje se odnosi na umijeće određivanja pogodne trajektorije za dolazak objekta u željeno *stanje*, što može uključivati položaj, brzinu, stav (orijentaciju) ili promjenu orijentacije. „Pogodna“ trajektorija može također sadržavati faktore kao što su: troškovi, zahtijevano vrijeme, uključeni rizici, uvjeti postavljeni postojećim transportnim koridorima i geopolitičkim granicama, itd.

Kontrola se odnosi na umijeće određivanja radnji (tj. primijenjenih sila ili torzija) koje su zahtijevane da bi objekt pratio željenu trajektoriju. Tokom kontrole generira se signal za aktuator¹ koji omogućuje da se prati odabrana trajektorija. Često se koristi npr. kod mobilnih robota.

Navedene razlike mogu postati nejasne-posebno u primjenama kad se koriste isti hardver i softver. Ovo se dešava u navođenju projektila, kad je fokus na tački B, što može biti primijenjeno bez zahtijevanih među-lokacija. Razlike su jasnije kod GNSS navigacije, za vozila na autocesti, te se u toj situacije ove aktivnosti opisuju kao što slijedi:

Navigacija se npr. postiže pomoću GNSS prijemnika, koji daje korisniku procjenu trenutnog položaja vozila (tačka A).

Navođenje je primijenjeno kao *planiranje rute*, što znači pronalaženje rute (trajektorije) od A do ciljane destinacije B, koristeći sistem spojenih puteva i primjenjuje specificirane mjere pogodnosti rute koju daje korisnik (tj. dužinu putovanja ili ukupno vrijeme, itd.).

Kontrola se primjenjuje kao niz aktivnosti koje se zahtijevaju od vozača da bi se pratila planirana ruta.

Navigacijska tehnika je metoda za određivanje položaja i brzine, bilo da se radi o „ručnom“ ili automatskom postupku. *Navigacijski sistem* (ponekad se naziva i navigacijskim pomagalom) je uređaj koji određuje položaj i brzinu automatski. Neki navigacijski sistemi daju također neke (ili sve) od sljedećih parametara: stav pokretnog objekta (ili orijentaciju, uključujući azimut), ubrzanje i uglovne promjene. Navigacijski sistem može biti samostalan, postavljen u vozilu, kao što je npr. INS (inercijalni navigacijski sistem). Druga vrsta navigacijskog sistema može zahtijevati dodatnu eksternu infrastrukturu. Primjer za ovu vrstu su obično radio navigacijski sistemi: GNSS, DGNS, eLoran, Omega, pseudoliti, itd. Međutim, zadnjih godina

¹ aktuator je tip motora koji odgovoran za kretanje ili kontrolu nekog mehanizma ili sistema. To je dakle mehanizam pomoću kojeg kontrolni sistem u nekom okruženju. Kontrola sistema može biti jednostavna (mehanički ili električni sistem) ili kompleksna kad se kontrola zasniva na softveru (robotizirani kontrolni sistem) ili pak kontrolu radi čovjek.

razvijen je široki spektar uređaja, koji za navigaciju trebaju eksternu podršku²: „klasični“ mobilni telefoni, različiti personalni digitalni uređaji (Ipod, Smartphone, WiFi³, BT⁴, RFID⁵, itd.) kojima se može raditi navigacija u zatvorenim i otvorenim prostorima. Navigacijski sistemi ili tehnike obezbjeđuju *navigacijsko rješenje*.

Navigacijski senzor je uređaj koji se koristi za mjerenje veličina ili svojstava iz kojih navigacijski sistem računa svoje navigacijsko rješenje. Senzori koji se često koriste su: žiroskopi, akcelerometri, odometri, magnetometri, radio navigacijski prijemnici (kao GPS), digitalne kamere, itd.

Navigacijsko rješenje predstavlja koordinatni okvir navigirajućeg tijela (aviona, broda, automobila, pješaka) u odnosu na geodetski referentni koordinatni okvir. Uobičajena referenca je Zemlja. Komponente vektora koji predstavljaju navigacijsko rješenje mogu biti rješavani oko osi koordinatnog okvira (npr., u smjeru sjevera, istoka, ka dole ili gore, itd.).

Navigacijski sistemi često koriste referentni okvir koji rotira zajedno sa Zemljom. Ovo zahtijeva pažljivo definiranje brzine i ubrzanja. Također je neophodno pažljivo definiranje **stava** pokretnog objekta. Ovo se obično radi pomoću Ojlerovih uglova, koordinatnih transformacijskih matrica, i rotacijskih vektora.

Pozicioniranje je određivanje položaja tijela (tačke), ali ne podrazumijeva određivanje brzine ili stava, tj. orijentacije tijela. Međutim, neke moderne navigacijske tehnologije, tačnije, pozicionirajući sistemi, daju dovoljno visoku tačnost pozicioniranja da se iz promjena položaja može izvesti brzina kretanja objekta.

Praćenje ili *nadzor* se razlikuje od navigacije, na način da se informacije o položaju i brzini dobiju od treće strane, a da se ne mora neophodno koristiti oprema u

² Eksterna infrastruktura često je već razvijena za druge namjene i za navigaciju nije uvijek neophodno skupa nadogradnja infrastrukture.

³ Wi-Fi je skraćeni izraz za bežičnu lokalnu kompjutersku mrežu (WLAN-wireless local area network), koja povezuje dva ili više naprava pomoću metode bežične raspodjele, ali unutar ograničenog područja: sobe, kuće, škole, kompjuterske laboratorije, poslovne zgrade...Omogućuje mobilnom korisniku da bude povezan s mrežom (i dalje s internetom) uz kretanje unutar područja lokalne mreže.

⁴ BT se ovdje koristi kao skraćena za engleski izraz „blue tooth“, a predstavlja standardiziranu bežičnu tehnologiju za prenos podataka na kratke udaljenosti. U početku su uređaji radili na udaljenosti do 1 m ali danas se ova udaljenost kreće i do 100 m.

⁵ RFID- (eng. radio frequency identification) je bežična korištenje elektromagnetnih polja za prenos podataka, a u svrhu automatske identifikacije i praćenja roba. Ova se tehnologija primjenjuje u navigaciji a u novije vrijeme i za geodeziju i katastar.

pokretnom objektu koji se prati. Međutim, sistem za praćenje se može koristiti za navigaciju jednostavno emitiranjem signala koji prenosi informaciju o položaju i brzini objekta koji se prati. Navigacijski sistem može biti na sličan način korišten za praćenje, pomoću emitiranja navigacijskog rješenja u pratećoj stanici.

Većina navigacijskih tehnika zasniva se ipak na dvije osnovne metode:

- navigacija pomoću određivanja položaja (eng. position fixing) i
- povezana navigacija ili „dead reckoning⁶“-DR.

Zadatak navigacije

Zadatak navigacije je da odredi položaj, brzinu i orijentaciju pokretnog objekta (korisnika). Međutim, kao što se može iz naprijed iznesenog zaključiti, ovaj zadatak može biti proširen na određivanje sljedećih parametara: promjene brzine (ubrzanje), promjena parametara orijentacije, itd.

Navigacijska pitanja

Navigacija pomaže u odgovaranju na specifična pitanja kao što su: Gdje sam? Kuda idem? Kojim putem idem? Kad ću stići na željeni cilj/destinaciju? itd.

Položaj i lokacija

U današnjoj terminologiji o geoprostornim informacijama susrećemo često pojmove položaj (pozicija) i lokacija. Pozicija odnosno položaj (korisnika) je određen skupom koordinata u nekom dobro definiranom koordinatnom referentnom okviru, pri čemu svaki referentni okvir treba imati definirano ishodište i orijentaciju koordinatnih osi.

Postupak određivanja položaja ili pozicije u modernoj terminologiji često se naziva pozicioniranjem. Pri tom se razlikuju dvije osnovne metode pozicioniranja: apsolutno i relativno.

Lokacija je obično opis položaja u odnosu na topološke odrednice, tj. položaj „korisnika“ u odnosu na okolne objekte. Postupak dobivanja lokacije naziva se „lokalizacija“.

Rute i navođenje

Položaj daje odgovor na pitanje „gdje sam“. Ruta odgovora na pitanje „gdje ići“ i „kojim putem ići“. Navođenje ili vođenje rute odnosi se na vođenje pokretnog objekta

⁶ vjerovatno izvedenica iz eng. *deduced reckoning*, što bi značilo izvedeno računanje.

duž unaprijed isplanirane rute. Dakle, aktivnost vođenja rute dala bi odgovor na pitanje „šta uraditi sljedeće“, tj. „koji je sljedeći korak⁷“.

Definicija navigacije

Riječ navigacija potječe iz latinskog jezika. Izvedena je iz dvije riječi: „navis“ što znači brod, te riječi „agare“ što znači voditi. Slično značenje ima grčka riječ „nautics“. Treba imati na umu da se navigacija odnosi na objekt koji ima tri dimenzije dok se pozicioniranje uglavnom odnosi na određivanje položaja tačke.

Kao što je na početku rečeno, moguće je u literaturi pronaći puno definicija navigacije. Ovdje će se navesti definicija koju navodi (NIMA⁸, 95): „Navigacija je postupak planiranja, bilježenja i kontrole kretanja pokretnog objekta od jednog do drugog mjesta.“

Navigacija razmatra pokretne objekte, tj. određuje njihovu trajektoriju i vođenje (upravljanje). Trajektoriju pokretnog objekta (automobila, broda, aviona, pješaka, građevinskog ili poljoprivrednog stroja, robota, itd.) moguće je odrediti pomoću **vektora stanja** (eng. state vector) objekta u nekom trenutku.

Vektor stanja definira se obično **pozicijom** (položajem), **brzinom** i **stavom** (orijentacijom) objekta u izabranom referentnom sistemu. Kad se određuje⁹ trajektorija pokretnog objekta onda se parametri vektora stanja izvode iz karakterističnog kretanja objekta a da se ne utječe na kretanje. Navođenje pokretnog objekta podrazumijeva upravljanje pokretnog objekta prema unaprijed određenoj ruti ka zadanoj destinaciji.

Moguće je primijeniti različite tehnike za pozicioniranje i navigaciju. Te tehnike i postupci imaju sličnosti i razlike koje će biti ukratko opisane. Međutim, nabrojat će se prvo vrste navigacije.

1.2 Vrste navigacije

U svjetlu aktuelnog razvoja industrije, graditeljstva, urbanizma, saobraćaja i tehnologije uopće, može se reći da se navigacija općenito dijeli na navigaciju na otvorenom i zatvorenom prostoru. Često to nazivamo „indoor“ i „outdoor“¹⁰ navigacija.

⁷ u postupku upravljanja pokretnim objektom.

⁸ NIMA (National Imagery and Mapping Agency-USA)

⁹ Obično se trajektorija unaprijed bira-određuje, prati i bilježi.

¹⁰ Navigacija u zatvorenim prostorima (unutar velikih poslovnih zgrada, aerodroma, ž. stanica, tržnih centara, rudnika, tunela, podzemnoj željeznici..) razvija se nevjerojatnom brzinom, te su razvijene ili se razvijaju mnogobrojne metode koje često ne zahtijevaju velike dodatne investicije. Kombinacijom

Postoji puno oblika (vanjske) navigacije, a očekivati je da će se razvojem tehnologije pojaviti još dosta varijacija. Podjela na pet osnovnih grupa prema hronološkom redu otkrivanja metode, navedene su prema Grewal i dr. (2013, str. 2-3):

1. Vidna navigacija (pilotiranje), kod koje se uglavnom oslanja na prepoznavanje oznaka da bi korisnik spoznao gdje se nalazi (A) i kako je orijentiran u odnosu na destinaciju (B). Ova navigacija je vjerovatno najstarija metoda.
2. Nebeska navigacija, koja koristi vrijeme i uglove između lokalnog vertikalna i poznatog nebeskog tijela (Sunca, Mjeseca, zvijezda, itd.), da bi se procijenila orijentacija i po mogućnosti lokacija na površini Zemlje. Neki autori smatraju da ptice koriste vrstu nebeske navigacije pri sezonskim migracijama¹¹. Postoji međutim poteškoća primjene nebeske navigacije, jer Zemlja i nebeska tijela mijenjaju međusobni položaj (uglavnom zbog Zemljine rotacije), te je potrebno mjeriti vrijeme. Otkriće sata koji bi zadovoljavao tačnost navigacije (posebno određivanje geografske dužine) postignuto je tek sredinom osamnaestog stoljeća. Otkriće atomskog sata u dvadesetom stoljeću je veoma značajno u razvoju satelitske navigacije.
3. Povezana navigacija (eng. dead reckoning) oslanja se na poznatu početnu poziciju, na koju se dodaju neke informacije o uglu (azimutu) kretanja korisnika i nekih procjena brzine kretanja, i proteklog vremena putovanja iz koje se izvodi dužina pređenog puta. Azimut može biti određen iz nebeskih/astronomskih opažanja ili pak uz pomoć magnetnog kompasa. Povezana navigacija se općenito primjenjivana crtanjem linija koje spajaju sukcesivne lokacije na kartama. Ovaj način navigacije je vjerovatno star skoro devetnaest stoljeća. Procjenjuje se da je ova metoda poznata još od vremena Ptolomeja¹².

različitih relativno jeftinih senzora u mobilnim telefonima ili drugim mobilnim personalnim uređajima (npr.: iPad, notebook, WiFi, BT, RFID, digitalne kamere,...)

¹¹ Treba imati na umu da postoje naučni dokazi za ovo, jer neke ptice (npr. grmuša) putuje samo noću. Ipak, postoje pretpostavke da neke ptice vjerovatno za navigaciju koriste i magnetno polje Zemlje. Ipak, migracija ptica još uvijek predstavlja zagonetku za čovjeka jer ne postoje objašnjenja za sva pitanja u vezi s ovim prirodnim ponašanjima živog svijeta.

¹² Claudius Ptolomey (85-168 g), poznati grčki matematičar, astronom, geograf i pjesnik, koji je živio u Aleksandriji u Egiptu, tadašnjoj rimskoj koloniji. Objavio poznato djelo Geografija oko 150. g. Knjiga opisuje više hiljada referentnih tačaka (oko 4530 gradova i preko 200 planina) širom tada poznatog svijeta, s koordinatama nekih referenci. Karta pod nazivom Ptolomejeva, je veoma poznata, iako originalna karta nikad nije pronađena. Ptolomejeva karta nacrtana je tek u 13. stoljeću na osnovu opisa u knjizi Geografija. Naime, u devetom stoljeću je njegova Geografija prevedena s grčkog na arapski jezik. Zahvaljujući visoko razvijenom interesu srednjovjekovnog islamskog društva za astronomiju i geografiju Ptolomejev akarta nacrtana je u 13 stoljeću, čiji se original danas čuva u muzeju Topkapi u Ustanbulu. Ideja globalnog koordinatnog sistema revolucionarizirala je srednjovjekovnu islamsku i evropsku geografiju, budući je zasnovana na numeričkim i znanstvenim podacima.

4. Radio navigacije, koja se oslanja na izvore radio-frekvencija na poznatim položajima, koji mogu biti terestrički ili satelitski sistemi (ovdje spadaju GNSS sistemi ali i mnogi drugi moderni mobilni sistemi za navigaciju). Za radio navigaciju je potrebno imati odgovarajuće prijemnike, strukturu signala iz predajnika, te konačno dostupne signale za prijemnike. Radio navigacija poznata je skoro cijelo stoljeće, ali su se u početku koristili predajnici signala fiksirani za kopno. Satelitska navigacija počela se razvijati nakon što je 1957. godine bivši Sovjetski Savez lansirao prvi vještački satelit. Ipak, prvi Globalni pozicionirajući sistem je proglašen potpuno operabilnim tek 1993. godine. Prvi radio navigacijski sistemi su se oslanjali na elektroničku tehnologiju, ali Globalni navigacijski satelitski sistemi se oslanjaju na modernu kompjutersku tehnologiju i satove veoma visoke tačnosti.
5. Inercijalna navigacija, koja se oslanja na poznatu početnu poziciju, brzinu i stav (orijentaciju) i kasnije izvršena mjerenja promjene stava i ubrzanja korisnika, da bi se omogućila procjena brzine, položaja i stava. Ovo je jedina vrsta navigacije gdje se korisnik ne oslanja na vanjske reference. Inercijalna navigacija bi se mogla smatrati automatiziranim oblikom povezane navigacije (dead reckoning). Ova metoda ima zato potencijal da se koristi za vojne svrhe, ali tačnost senzora bi morala biti veoma visoka. Adekvatni senzori razvijeni su tek u drugoj polovini dvadesetog stoljeća, ali su prvi modeli bili veoma skupi. U to vrijeme su se inercijalni navigacijski sistemi primjenjivali i u geodeziji, zbog svoje osobine da su po prvi put mogli odrediti položaj u geocentričnom referentnom sistemu, ali nisu naišli na široku primjenu zbog uglavnom veoma visoke cijene instrumenta.

Nabrojane metode navigacije se također mogu i kombinirati. Kod kombiniranja različitih metoda i sistema mjerenja pokazala se veoma korisna primjena *Kalman filtera*¹³. Ovaj filter koristi snažnu sinergiju između Globalnog pozicionirajućeg sistema - GPS i inercijalnih navigacijskih sistema - INS. Ovo je moguće jer su iskustvo i teorija pokazali da ova dva sistema imaju komplementarne osobine pogrešaka mjerenja.

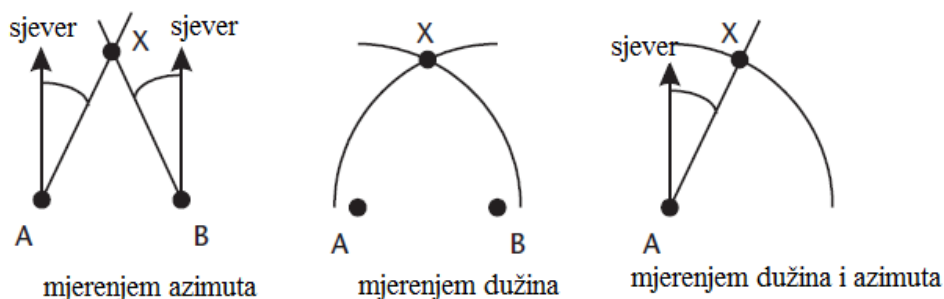
¹³ Kalman filter je rekurzivni algoritam koji koristi serije mjerenja koja su napravljena tokom određenog vremenskog perioda. Mjerenja su opterećena slučajnim pogreškama (šum). Algoritam računa procjenu nepoznatih varijabli s boljom tačnošću nego što bi se dobilo na osnovu samo jednog mjerenja. Filter je nazvan po istraživaču Rudolfu Kalmanu, koji je rođen 1930. u Mađarskoj, emigrirao 1943. u SAD, gdje je diplomirao i doktorirao elektrotehniku. Dobitnik je niza nagrada za svoj rad. Kalma filter je objavio 1960. godine. Više detalja o Kalma filteru na linku: <http://www.cs.unc.edu/~welch/kalman/>

Tako se generalno može reći da su u početku navigiranja pogreške pozicioniranja pomoću INS relativno male, ali da tačnost opada kako se putovanje nastavlja. Nasuprot tome, pogreške položaja GPS sistema nisu male u kratkom vremenu od početka navigacije, ali s vremenom se tačnost povećava. Kalman filter ima sposobnost da koristi prednosti osobina rasprostiranja pogrešaka pozicioniranja s ove dvije metode, te da kao rezultat daje superiorno rješenje integrirane navigacije. Naravno, mogu se kombinirati i sve druge metode i senzori, a takva metoda navigacije naziva se **integriranom navigacijom**.

Tempo tehnološkog razvoja u navigaciji je brz i ima tendenciju ubrzanja. Tokom posljednjih dekada tačnost navigacije je dramatično porasla dok su troškovi korisnika višestruko opali. Kao posljedica ovog broj aplikacija je sve veći. Usprkos planetarnoj recesiji navigacija bilježi stalni porast prihoda i čini da je to grana veoma zanimljiva kako za korisnike tako i za investitore.

1.3 Određivanje položaja

Postoji veliki broj metoda za određivanje položaja¹⁴. Uspoređivanjem oblika na karti s oblicima na trenutnoj lokaciji (kao što su orijentiri, karakteristični objekti, putne oznake, saobraćajni znaci, visine terena), moguće je određivanje trenutnog položaja. To je generalno govoreći mnogo jednostavnije za čovjeka nego za stroj. Određivanje položaja također može biti urađeno mjerenjima dužina i/ili uglova prema poznatim objektima. Slika 1.1 pokazuje određivanje 2D položaja. X predstavlja nepoznato mjesto korisnika, A i B su poznati položaji referentnih objekata.



Slika 1.1: Određivanje položaja objekta mjerenjem dužina i uglova.

Položaj u ravnini (dvije dimenzije) može se odrediti mjerenjem azimuta ka dva poznata objekta. Pri tom se azimutom smatra ugao između pravca sjevera (bilo

¹⁴ U engleskoj literaturi se određivanje položaja naziva fiksiranje položaja (eng. position fixing).

pravog ili magnetnog) i pravca tj. „vizuri“ ka objektu. Korisnik tada leži u presjeku linija ka referentnim objektima i u pravcu mjerenih azimuta.

Određivanje položaja može biti u tri dimenzije, ali tada je potrebno mjeriti vertikalni ugao do jednog referentnog objekta. Za datu tačnost mjerenih uglova, tačnost određivanja položaja se smanjuje s povećanjem dužine od referentnih objekata.

Ako su mjerene udaljenosti od dva poznata objekta, približno u istoj ravnini korisnika, tada će položaj korisnika ležati na presjeku dva kruga čiji su centri u referentnim objektima, a radijus odgovara mjerenoj udaljenosti. Međutim, općenito postoji i druga tačka presjeka. Često je za ispravno određivanje položaja potrebna informacija poznata unaprijed. Ako takva informacija nije poznata potrebno je mjeriti treću dužinu da se dobije jednoznačno rješenje. Ako je tačnost mjerenja dužina konstantna, tačnost određivanja položaja neovisna je o udaljenosti od referentnih objekata. Za određivanje položaja u tri dimenzije, općenito je potrebno mjeriti tri dužine. Ipak, tada postoje dvije tačke presjeka, ali je jedna obično izvan dosega korisnika. Međutim, kad su korisnik i referentni objekti u istoj ravnini moguće je dobiti samo dvodimenzionalno određivanje položaja. Zbog ovoga je otežano dobivanje vertikalnog položaja iz sistema za terestričko mjerenje dužina.

Ako se mjere dužine i azimuti, određivanje položaja dobije se i kad postoji samo jedan referentni objekat. Za mjerenje azimuta i vertikalnih uglova postoje relativno jednostavne tehnologije s kojima su geodeti dobro upoznati. Dakle, mogu poslužiti teodoliti i magnetni kompasi. Kao referentni objekti mogu poslužiti terestrički orijentiri, Sunce, Mjesec, zvijezde, itd. Npr., poznato je bilo čak i starim naprednim civilizacijama da visina Sunca iznad horizonta, kad se ono nalazi u zenitu, definira geografsku širinu, dok mjerenje vremena izlaska i zalaska Sunca u odnosu na vrijeme tih događanja u poznatoj lokaciji definira razliku geografskih dužina. Praktično mjerenje geografske dužine na prekookeanskim putovanjima postalo je moguće tek 1760-tih godina, zahvaljujući napretku u povećanju tačnosti sata kojeg je izumio Harison. Mjerenje azimuta je također moguće uz korištenje nekih radio navigacijskih sistema.

Mjerenje dužina je moguće, kao što je geodetima također dobro poznato, korištenjem radio signala, lasera i radara. U pasivnim sistemima za mjerenje dužina, korisnik prima signal iz navigacijske stanice, koja emitira radio signal. U aktivnim sistemima za mjerenje dužina, korisnik emitira signal do referentnog objekta i prima reflektirani signal.

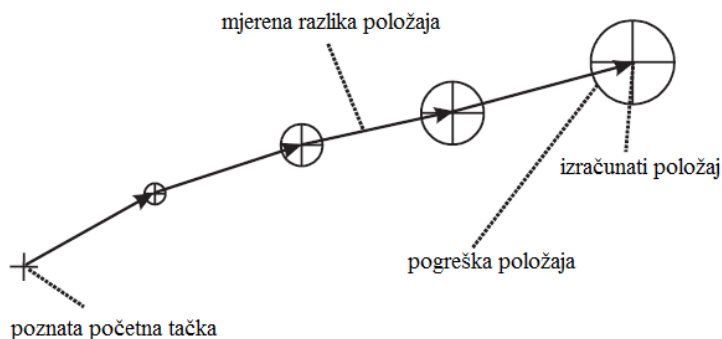
Komponenta sistema za određivanje položaja, koja se nalazi izvan opreme korisnika, naziva se navigacijsko pomagalo (aid to navigation-**AtoN**). AtoN uključuje putne

oznake (kao što su svjetla) i radio navigacijski signale. Da bi se dobio položaj korisnika, nakon što se izmjeri udaljenost i/ili izmjeri azimut, potrebno je poznavati položaj referentnog objekta. Radio navigacijski predajnici signala (transmiteri) emitiraju direktno informaciju o svom položaju, ili je moguće identificirati pomoću pozivnog znaka ili njihove frekvencije. U slučaju da referentni objekt nije transmitter, položaj se mora identificirati, manualno ili preko uređaja koji koriste tehnike automatiziranog čitanja karakteristika. Primjer je tehnika navigacije prema referentnom terenu.

1.4 Dead Reckoning

Vezana navigacija (eng. *dead reckoning*-DR) mjeri promjene položaja ili mjeri brzinu, te ih integrira. Znači, da bi se dobio trenutni položaj objekta, razlika položaja se dodaje na položaj prethodne tačke. Brzina ili dužina putovanja mjeri se u koordinatnom okviru koji je čvrsto vezan za tijelo u pokretu (eng. *body coordinate frame*). Tako je potrebno odvojeno mjerenje za određivanje orijentacije-stava, da bi se dobio pravac putovanja u referentnom okviru. Za dvodimenzionalnu navigaciju, dovoljno je mjerenje azimuta, dok je za 3D navigaciju neophodno mjerenje sve tri komponente orijentacije.

Slika 1.2. pokazuje koncept DR navigacije. Tačnost navigacijskog rješenja će biti veća kad se pri promjeni stava/orijentacije napravi manji korak. U početku se računanje radilo ručno, što je ozbiljno ograničavalo brzinu dobivanja podataka. Naravno, danas računanja obavlja kompjuter.



Slika 1.2: Metoda „dead reckoning“

Stare, tradicionalne metode mjerenja dužina i brzina uključuju brojanje koraka, korištenje štapa za hodanje, odmotavanje konopca s čvorovima od kraja broda. Dakle, u moreplovstvu se koristio čvor konopca kao jedinice brzine. Danas se brojanje

koraka može automatizirati uz korištenje naprave nazvane *pedometar*¹⁵. Postoji sofisticiran uređaj za pješačku „dead reckoning“ tehniku. Ovaj uređaj koristi akcelerometre pomoću kojih određuje dužinu koraka. Uređaj nazvan odometar mjeri dužine pomoću zbrajanja rotacija točka. Danas je to standardna oprema u svim automobilima, ali ova tehnika datira iz doba starih Rimljana.

Ekvivalent za aplikacije u moreplovstvu je uređaj nazvan brodski dnevnik, koji se sastoji od turbine ispod broda, koja rotira za iznos direktno proporcionalan brzini broda. Savremene metode mjerenja brzine koriste Doppler radar ili integriraju mjerenja akcelerometra unutar inercijalnog navigacijskog sistema INS. Obje tehnologije su ustanovljene za vojne aplikacije u 50-tim godinama dvadesetog stoljeća. Njihova primjena u civilnim projektima počela je desetak godina kasnije. Zanimljivo je da je prva primjena INS-a primijenjena za njemačke V2 rakete koje su razvijene u drugom svjetskom ratu. Za primjenu u moreplovstvu se mogu koristiti sonari¹⁶.

Visine se mogu izračunati iz mjerenja atmosferskog tlaka uz upotrebu barometrijskog visinomjera ili altimetra. Radarski altimetar mjeri visine iznad terena, tako da se može koristiti za određivanje visine aviona kad je poznata visina terena. Azimuti se mogu mjeriti pomoću magnetnih kompasa, starog kineskog izuma. Današnji magnetni kompas i magnetometri imaju elektronička očitavanja.

Sunce, Mjesec i zvijezde se također mogu koristiti za određivanje stava/orijentacije objekta kad su poznato vrijeme i približni položaji ovih nebeskih tijela. INS određuje stav integriranjem uglovnih promjena izmjerenih pomoću žiroskopa. Žirokompas je senzor koji mjeri azimute na bazi kompasa. Razvijen je početkom dvadesetog stoljeća. Detaljni opisi INS i drugih DR navigacijskih tehnika bit će izneseni kasnije.

Pozicioniranje pomoću DR postiže se sumiranjem mjerenja niza relativnih položaja. Svaki relativni položaj ili koordinatna razlika je opterećen nekom pogreškom mjerenja. Zbog ovoga pogreška određenih položaja raste s vremenom. Pogreške kod metode „fiksiranja pozicije“ ne rastu na isti način. Oslanja se na komponente izvan korisnika, što općenito nije kontinuirano i univerzalno dostupno. DR zahtijeva

¹⁵ *pedometar* je uređaj koji se koristi za brojanje koraka, određivanje dužine prepješačenog puta i ponekad računanje potrošenih kalorija. Primjenjuje se u sportu ili za navigaciju pješaka.

¹⁶ *Sonar* ili podvodni električni lokator je elektroakustični uređaj za traženje i otkrivanjem određivanje daljine, dubine, smjera i za identifikaciju podvodnih pokretnih i nepokretnih objekata (podmornica, mina, potopljenih brodova, podvodnih hridi, jata riba). Služi i za navigaciju, oceanografska istraživanja i podvodnu vezu. Rad se zasniva na osobinama prostiranja ultrazvučnih i zvučnih valova kroz vodu. On šalje zvučne impulse i odbijenu energiju prima kao jeku. Na osnovi izmjerenog vremenskog intervala određuje se istovremeno daljina, smjer, a kod nekih i dubina cilja.

poznatu početnu poziciju, ali poslije daje neisprekidano navigacijsko rješenje osim u slučaju da se oprema pokvari.

Prema tome, karakteristike DR metode i metode „fiksiranja položaja“ su komplementarne. Da bi se dobili benefiti obje metode DR tehnika se može kombinirati s jednom ili više tehnika fiksiranja položaja u *integriranim navigacijskim sistemima*.

1.5 Tehnike pozicioniranja i navigacije

Postoje kao što je rečeno različite tehnike pozicioniranja (Hofmann Wellenhoff i dr., 2003):

1. „samo-pozicioniranje“ kad sam objekat aktivno određuje vlastiti položaj.
2. „udaljeno pozicioniranje“ kad položaj biva određen pomoću udaljenih uređaja a objekat nije direktno involviran tj. pasivan je.
3. „autonomno“ pozicioniranje kad nisu potrebni predajnici (satelitski ili terestrički) signala.
4. „neautonomne“ tehnike pozicioniranja zahtijevaju prijem određenih signala. Primjer su radio-navigacijski sistemi.

Kod tehnika pozicioniranja, kao što je to čest slučaj u geodetskim primjenama, pozicioniranje se može uraditi u postupcima naknadne obrade podataka mjerenja, i nije uvijek neophodno odrediti položaj u realnom vremenu. Nasuprot tome, u navigaciji je uglavnom neophodno imati informacije o trajektoriji pokretnog objekta u realnom vremenu. Dakle, mjerenja i računanja se izvode u realnom vremenu, i zato se kaže da je navigacija aktivan proces, koji se sastoji od pozicioniranja i vođenja objekta. Često je u praksi potrebno imati „nadzor“ nad pokretnim objektom, kao što je čest slučaj u avio-navigaciji. Ovaj nadzor odvija se kao složen postupak, tj. izvodi se „pozicioniranje iz daljine“ plus navođenje pokretnih objekata. Postupak je poznat kao kontrola leta¹⁷.

Autonomne navigacijske tehnike su također poznate. Ovdje nisu potrebni nikakvi komunikacijski linkovi s eksternim navigacijskim uređajima. Postoji međutim razlika u odnosu na autonomno pozicioniranje, jer autonomna navigacija može uključivati neautonomne metode pozicioniranja.

Neautonomne navigacijske tehnike su međutim funkcionalno ovisne o operabilnim komunikacijskim linkovima s eksternim navigacijskim sredstvima, tj. objektima ili vozilima koji se oslanjaju na informacije koje obezbjeđuju navigacijski uređaji za podršku.

¹⁷ eng. surveillance.

Dakle, postoje razlike u postupcima pozicioniranja koje se primjenjuju u geodetskoj praksi i navigaciji, iako generalno postoji njihova velika međusobna povezanost. Sličnosti i razlike se mogu klasificirati po: tačnosti, utrošenom vremenu za postupke mjerenja i računanja, latentnost-realno vrijeme, itd.

Tradicionalno, geodetska mjerenja se izvode s velikom tačnošću položaja, koja kod navigacije često nije neophodna. Da bi se dobila visoka tačnost pozicioniranja tradicionalno se izvode statička mjerenja u geodeziji, dok je u navigaciji potrebni imati položaj u (skoro) realnom vremenu. Poznato je da se u geodetskim postupcima također rade mjerenja s pokretnih platformi, gdje se u kratkom vremenu prikupi veliki broj geoprostornih informacija o položaju tačaka:

1. avio-fotogrametrija, koja u zadnjim desetljećima integrira podatke fotogrametrijskih kamera s drugim senzorima kao: laserskim skenerima, GNSS, INS, visinomjerima, itd.
2. hidrološko snimanje i pozicioniranje koja se čvrsto izvode s čamaca ili specijalnih brodova uz korištenje sonara, laserskih skenera, GNSS, INS, itd.
3. brze metode premjera rade se pomoću automobila opremljenih skupom različitih senzora kao što su GNSS, INS, laserski skeneri, kamere, odometri, magnetometri, itd...)
4. GNSS pozicioniranje u realnom vremenu..

U većini nabrojanih geodetskih postupaka neophodno je pozicioniranje kombinirati s navigacijom. Općenito se može reći da razlike između geodetskog pozicioniranja i navigacije vremenom postaju sve manje.

1.6 Tehnike navigacije zasnovane na satelitskim opažanjima

Postoji široka lepeza različitih postupaka pozicioniranja i/ili navigacije koje primjenjuju tehnike zasnovane na opažanju GNSS satelita. Ti postupci se mogu razvrstati u nekoliko osnovnih grupa, kao što slijedi (Hofman-Wellenhof, i dr., 2010, str. 11):

- kodna ili fazna mjerenja pseudoudaljenosti,
- apsolutno ili relativno pozicioniranje,
- pozicioniranje u realnom vremenu ili naknadna obrada podataka,
- statička ili kinematička mjerenja,
- pozicioniranje ili navigacija.

1.6.1.1 Određivanje kodnih ili faznih pseudoudaljenosti

Određivanje položaja/navigacije na osnovu GNSS satelitskih signala zasniva se na principima prostorne trilateracije. Prostorne dužine, odnosno pseudoudaljenosti

(između antene prijemnika i tačke težišta satelita) računaju se iz vremena koje je potrebno da kodirani satelitski signal pređe put od satelita do prijemnika. Drugi način računanja pseudoudaljenosti zasniva se na mjerenju fazne razlike nosećeg signala.

Tačnost kodnog načina određivanja pseudoudaljenosti nije visoka, te se općeniti može reći da se postiže metarska tačnost. Za razliku od kodnih mjerenja moguće je kod faznih mjerenja postići visoku tačnost koja doseže nivo od nekoliko milimetara. Međutim, treba istaći nepogodnost: fazna mjerenja su virtualno neodređena. Drugim riječima, neophodno je u postupku određivanja faznih pseudoudaljenosti odrediti cijeli broj valnih dužina, što je često kritičan problem kod satelitskih metoda navigacije i preciznog pozicioniranja.

U drugu ruku, tačnost određivanja kodnih pseudoudaljenosti se može povećati specifičnom tehnologijom izrade prijemnika.

1.6.1.2 Apsolutno ili relativno pozicioniranje

Kad se za određivanje položaja jedne tačke (izraženog koordinatama u određenom koordinatnom okviru) koristi samo jedan GNSS prijemnik, onda tu metodu nazivamo apsolutnim pozicioniranjem. Također se za istu metodu koristi naziv PP (point positioning) ili SPP (single point positioning). Izraz „apsolutna“ koristi se kao suprotnost od „relativna“ metoda. Ova metoda pozicioniranja/navigacije je najstarija metoda satelitskog pozicioniranja i razvijena je 70-tih godina dvadesetog stoljeća. Za određivanje položaja jedne tačke, iz jedne epohe mjerenja, neophodno je simultano opažati najmanje četiri satelita (za određivanje 4 nepoznanice: 3 koordinate i 1 popravka sata prijemnika). Tačnost apsolutnog pozicioniranja je uvijek manja od tačnosti relativne metode pozicioniranja.

Relativna metoda pozicioniranja indicira da su za određivanje položaja tačaka neophodna najmanje dva prijemnika. Često se umjesto izraza „relativno pozicioniranje“ koristi izraz „diferencirano pozicioniranje“ iako se, teoretski razmatrano, radi o dvije različite metode. Diferencirano pozicioniranje je ustvari tehnika gdje se za postizanje više tačnosti od PP metode, određuje položaj (jedne) nepoznate tačke, primjenjujući korekciju¹⁸ za određivanje pseudoudaljenosti. Ova korekcija se računa na osnovu mjerenja na poznatoj stanici ili mreži stanica, a primjenjuje se za popravljavanje pseudoudaljenosti¹⁹ na nepoznatoj tački. Diferencirana tehnika pozicioniranja se može primijeniti i za niz tačaka koje predstavljaju trajektoriju pokretnog prijemnika, pa je dakle isti princip primjenljiv za navigaciju. Diferencirano pozicioniranje se često naziva diferencirani GNSS ili skraćeno

¹⁸ Obično ovu korekciju nazivamo RTK (real time kinematic).

¹⁹ Ponekad se umjesto korekcije za određivanje pseudoudaljenosti ka satelitu, primjenjuje korekcija za koordinate nepoznate tačke.

DGNSS. Prednost DGNSS tehnike je da omogućuje pozicioniranje centimetarskom tačnošću u realnom vremenu.

Relativno pozicioniranje zahtijeva najmanje dva prijemnika, kao i kod DGNSS metode. Moguće je primijeniti kodno ili fazno mjerenje²⁰. Mjerenja se izvode simultano na (najmanje) dvije tačke i opažaju se isti sateliti²¹. Mjerenja napravljena na obje²² stanice se direktno kombiniraju, za razliku od DGNSS metode. Direktno kombiniranje mjerenja (tj. primjenjuje se računanje jednostrukih, dvostrukih (ili trostrukih) razlika jednačina opažanja između dviju stanica i dva satelita) omogućuje povećanje tačnosti položaja, jer se mnoge sistematske pogreške reduciraju ili eliminiraju (kao: pogreške sata prijemnika i satelita, pogreške orbita, dio jonosferske i troposferske refrakcije,..). Obično je kod relativnog pozicioniranja najmanje jedna stanica ima unaprijed poznat položaj, te se određuje vektor između poznate i nepoznatih stanica. Općenito, prijemnik na poznatoj stanici je nepokretan, dok prijemnik na nepoznatoj stanici može biti pokretan i nepokretan. Međutim, relativna metoda u principu ne omogućuje pozicioniranje u realnom vremenu.

U ranim godinama primjene GPS sistema, apsolutna metoda pozicioniranja primjenjivala se uglavnom za navigaciju, dok se relativna metoda primjenjivala za opažanja geodetskih kontrolnih mreža. Također se općenito može reći da su se fazna mjerenja primjenjivala u relativnom pozicioniranju i često se podrazumijevalo da su fazna mjerenja geodetska satelitska mjerenja. Diferencirana mjerenja su generalno bila korištena za kodna opažanja pseudoudaljenosti.

Razvojem tehnika, algoritama, hardvera i softvera, može se reći da zadnja podjela nije sveprisutna. Tako se danas za preciznu navigaciju primjenjuju fazna mjerenja kao i DGNSS.

1.6.1.3 Statičko ili kinematičko pozicioniranje

Statičko pozicioniranje podrazumijeva da je prijemnik postavljen (centrisan i horizontisan) na geodetskoj tački i miruje tokom mjerenja. Kinematička metoda podrazumijeva da se prijemnik pomjera tokom mjerenja. Ako tokom statičkog mjerenja, iz bilo kojeg razloga dođe do prekida prijema signala, to nije tako kritična situacija kao kod kinematičke metode pozicioniranja. Također treba razlikovati „kinematičku“ od „dinamičke“ metode. Kinematička metoda podrazumijeva kretanje

²⁰ Zavisno od kvaliteta prijemnika kojim se opaža. Kod jeftinih prijemnika ponekad je moguće primijeniti samo kodna mjerenja.

²¹ Ako se na nekoj od opažanih stanica registriraju mjerenja sa satelita koji nisu opažani na drugim stanicama, ta registrirana mjerenja neće biti iskorištena u obradi podataka.

²² Također je moguće opažati mrežu stanica po istom principu.

u čisto geometrijskom smislu, dok dinamičko implicira da se kretanje izvodi pod djelovanjem nekih sila.

Određivanje orbita satelita naziva se dinamičkom metodom. Određivanje položaja nekog pokretnog objekta, kao npr., automobila, aviona ili broda, na osnovu poznatih položaja satelita, naziva se kinematičkom metodom pozicioniranja.

1.6.1.4 Real-time metode ili naknadna obrada podataka

Kod metoda pozicioniranja u realnom vremenu (real time - RT) rezultati moraju biti poznati odmah na terenu. Ovi rezultati se nazivaju „trenutnim“ ako su za računanje položaja korišteni podaci mjerenja iz samo jedne epohe, a vrijeme obrade je veoma kratko, tj. zanemarivo. Koncept modernih operativnih satelitskih tehnika teži trenutnoj navigaciji pokretnih objekata uz primjenu kodnih pseudo-udaljenosti. Manje stroga definicija je „kvazi (ili skoro) realno vrijeme“ što implicira da se rezultati računaju s malim zakašnjenjem. Današnja napredna tehnologija prenosa podataka (posebnim telekomunikacijskim mrežama za brzi i sigurni prenos podataka, internetom, radio vezom, itd.) omogućava da se mjerenja s različitih stanica kombiniraju u skoro realnom vremenu.

Naknadna obrada podataka (često nazivana post-procesiranje) odnosi se generalno na situacije kad se podaci obrađuju naknadno, tj. poslije prikupljanja opažanja, obično u uredima. Tehnološki nas razvoj računala ne ograničava na neophodnu obradu podataka u uredu, nego se gruba obrada podataka mjerenja može uraditi i na laptopu još na terenu, u cilju provjere podataka i otkrivanja grubih pogrešaka. Takva provjera zatvaranja poligona na terenu može uštedjeti vrijeme i trud ukoliko se odmah na terenu pronađu grube pogreške, npr. pogrešno izmjerena visina antene, pogrešno ime tačke, itd.

1.6.1.5 Geodetska mjerenja ili navigacija

Moderna tehnologija čini da se razlike između geodetskih mjerenja i navigacije sve više smanjuju. Ipak, cilj geodetskih mjerenja je obično određivanje položaja tačaka, dok navigacija uključuje određivanje položaja, brzine i orijentacije (stava) pokretnog objekta. U prošlosti su geodetska mjerenja obično bila opisivana kao: visoko precizna, statička opažanja, uz primjenu naknadne obrade podataka. Navigacija je za razliku od geodetskih mjerenja ranije zahtijevala manju tačnost, kinematička mjerenja u (skoro) realnom vremenu. Razlike između geodetskih mjerenja i navigacije sve više se smanjuju.

1.7 Osnovni pojmovi u navigaciji

Neophodno je definirati nove pojmove za navigaciju. Mnoštvo je novih pojmova, izraza, skraćenica, standarda, jedinica mjere, procedura, itd. Detaljni navodi svih pojmova specifičnih za sve vrste navigacije mogu se naći u (DoD²³ and DoT²⁴, 2001), a pojmovi vezani za civilnu avijaciju u (Eurocontrol²⁵, 1998). Ovdje se navode samo osnovni pojmovi navedeni u (Hofmann-Wellenhof, i dr., 2003, str. 3):

Trajektorija: niz povezanih položaja pokretnog objekta određenih pomoću navigacijskog sistema.

Ruta: detaljna lista manevara koje objekt u pokretu (vozilo) treba izvesti da bi stigao do odredište.

Etapa (korak): Dio rute između dva uzastopna manevara.

Međutačke: istaknute tačke na ruti koje obično odgovaraju promjenama pravca kretanja.

1.8 Tačnost navigacije

Navigacija pokretnih platformi se obavlja uz primjenu različitih tehnika mjerenja, metoda računanja, primjenom različitih navigacijskih sistema, te tačnost navigacije može biti različita. Osim tačnosti postoje i drugi parametri kojim se definira kvalitet navigacije. Ovdje će se iznijeti definicije parametara kvaliteta moderne satelitske navigacije, a u skladu s objavljenim dokumentacijom od strane i Ministarstvo odbrane i Ministarstvo transporta SAD-a (vidjeti DoD_DoT, 2001) i/ili Eurocontrol²⁶ (1998).

Tačnost je usaglašenost između procijenjenog ili izmjerenog parametra (tj. položaja ili brzine) pokretnog objekta u nekom trenutku i istinite vrijednosti tog parametra.

Tačnost navigacijskog sistema je obično izražena kao statistička mjera pogreške sistema zajedno s nivoom povjerenja koja pokazuje vjerovatnoću date vrijednosti. U navigaciji se, kao i u geodetskom pozicioniranju, često koristi nivo pouzdanosti od 95%. Ipak, treba naglasiti da se u modernoj navigaciji često zahtijeva veći nivo pouzdanosti, posebno u civilnoj avijaciji.

Postoje tri načina izražavanja mjere tačnosti u navigaciji:

²³ DoD (Department of Defense USA)

²⁴ DoT (Department of Transport USA)

²⁵ Eurocontrol (European Organisation for the Safety of Air Navigation) je međunarodna organizacija za upravljanje civilnom avijacijom u Evropi i šire. Osnovana je 1960., i trenutno ima 41 zemlju članicu. Bosna i Hercegovina je također član EUROCONTROL-a. <http://www.eurocontrol.int>

²⁶ European organisation for the safety of air navigation: Eurocontrol standard document- str. 7

- *Predvidljiva* (ili apsolutna) tačnost. To je tačnost dobivenog rješenja navigacijskog sistema u odnosu na istiniti položaj ili u odnosu geodetske koordinate na Zemlji.
- *Ponovljiva* tačnost²⁷, koja označava tačnost s kojom se korisnik može vratiti na položaj koristeći isti navigacijski sistem. Kao sinonim za ponovljivost često se koristi izraz preciznost.
- *Relativna* tačnost je ona tačnost s kojom korisnik može odrediti položaj u odnosu na drugog korisnika istog navigacijskog sistema u istom trenutku.

Dostupnost navigacijskog sistema je procent vremena kad je servis sistema upotrebljiv. Dostupnost je indikator sposobnosti sistema da osigura upotrebljiv servis unutar specificiranog prostora (područja koje pokriva). Dostupnost signala je procent vremena kad je signal emitiran iz vanjskog izvora dostupan za upotrebu. Dostupnost je funkcija fizičkih karakteristika okruženja kao i tehničkih sposobnosti opreme za emitiranje/prijenos signala.

Kapacitet je broj korisnika koji simultano mogu koristiti navigacijski sistem.

Kontinuitet je sposobnost sistema da neometano izvodi funkcije za vrijeme namjeravane operacije. Drugim riječima, kontinuitet je vjerovatnoća da će performanse specificiranog sistema biti održavane tokom faze operacije, a uz pretpostavku da je sistem bio dostupan na početku te faze operacije.

Pokrivenost navigacijskog sistema je površina ili prostor gdje su performanse sistema adekvatne da omoguće korisniku određivanje položaja sa specificiranom tačnošću. U slučaju radio-navigacije, pokrivenost je pod utjecajem različitih faktora: geometrije sistema, jačine signala, osjetljivosti prijemnika, uvjeta u atmosferi, itd.

Dimenzija definira da li navigacijski sistem osigurava pozicioniranje u 1, 2, ili 3 dimenzije, ili su pak sposobni izvesti i četvrtu dimenziju, tj. vrijeme.

Integritet je sposobnost navigacijskog sistema da korisnicima na vrijeme osigura upozorenje kad se sistem ne bi trebao koristiti. Integritet uključuje nekoliko parametara: vrijeme alarma, granice alarma (koji reflektira maksimalnu toleranciju pogreške sistema) i maksimalnu frekvenciju alarma.

Pouzdanost navigacijskog sistema opisuje vjerovatnoću za izvođenje specificirane funkcije bez kvara pod danim uvjetima, a za specificirani vremenski period.

²⁷ eng. repeatability

Stopa ažuriranja (ili određivanje položaja) je definirana brojem nezavisnih rješenja položaja (ili određivanjem položaja) po jedinici vremena.

Pored navedenih parametara kvaliteta navigacijskih sistema Međunarodni komitet za GNSS (ICG, 2008) daje parametre nazvane kompatibilnost i inter-operabilnost navigacijskih sistema.

Kompatibilnost se odnosi na sposobnost globalnih i regionalnih navigacijskih sistema i njihovih proširenja, da budu korišteni odvojeno ili zajedno ali da to ne prouzrokuje neprihvatljivu interferenciju i/ili druge štete za individualni sistem i/ili servis.

Inter-operabilnost se odnosi na sposobnost globalnih i regionalnih satelitskih navigacijskih sistema i njihovih proširenja, kao i servisa koje pružaju, da bi se signali sistema koristili zajedno i tako osigurali bolju sposobnost na nivou korisnika, nego u slučaju da se oslanjaju na “open” (otvorene ili besplatne) signale samo jednog sistema.

1.9 Vrste i faze navigacije

Općenito se može reći da postoji više vrsta „konvencionalne“ navigacije: pomorska navigacija, aeronautička navigacija, navigacija na kopnu, navigacija u svemiru. Korisnici u navigaciji se također mogu podijeliti na više grupa. Ipak, osnovna podjela korisnika je na dvije grupe: vojni i civilni korisnici.

Civilni korisnici se nadalje mogu podijeliti na one koji koriste komercijalne ili rekreativne primjene navigacijskih tehnika.

Osnovni ciljevi vojnih korisnika je navigacija i praćenje vozila i oružja. Vojne primjene navigacije ovdje nisu razmatrane.

Primjene navigacije su klasificirane u različite faze koje su okarakterizirane različitim zahtjevima.

Navigacija na kopnu može se podijeliti u dvije grupe:

1. navigaciju u saobraćaju/transportu
2. ne-transportnu navigaciju.

Saobraćaj na kopnu također se razmatra u dvije skupine: cestovni i željeznički. Osim navedenih podjela, razlikuje se također navigacija u transportu putnika i transportu roba.

Ne-transportna navigacija svakim danom povećava svoju primjenu, pa tako se ovdje navodi samo mali broj primjera: navigacija u poljoprivredi, zaštiti okoliša, navigacija

u hitnim i vanrednim situacijama, navigacija vozila službe državne sigurnosti, navigacija pješaka, rekreativna navigacija, navigacija u sportu, navigacija i praćenje starih i bolesnih osoba, navigacija građevinske mehanizacije, robota, navigacija u kinematičkim geodetskim mjerenjima, mjerenju vremena, praćenje životinja, navigacija pomoću specijalnih dodataka odjeći i obući za turističke aplikacije, službu spašavanja, itd.

U *pomorskoj navigaciji* razlikuju se četiri faze (Hoffmann-Wellenhof, i dr., 2003 str. 5):

- navigacija na okeanu (otvorenom moru),
- priobalnu navigaciju,
- ulazak u luku,
- navigacija na rijekama i kanalima.

Aeronautička navigacija razlikuje četiri osnovne faze:

- en-rute navigacija (na otvorenom: iznad okeana, iznad udaljenih oblasti)
- navigacija u terminalnim oblastima,
- približavanje i spuštanje,
- površinske operacije (polijetanja).

Približavanja i spuštanja se dalje dijele na neprecizno i precizno prilaženje. Precizno prilaženje se također dijeli na tri kategorije: CAT I, II, III, od kojih posljednja zahtijeva najviše zahtijevane performanse.

Svemirska navigacija također ima različite faze:

- lansiranje sa Zemlje,
- orbitalna faza,
- (ponovni) ulazak u atmosferu i slijetanje.

Također su moguće kombinacije različitih vrsta navigacija: aeronautičke, pomorske, svemirske i kopnene. Faza kombiniranih oblika navigacije odgovara fazi vrste transporta koji je uključen u podokvir.

1.10 Zahtjevi korisnika navigacije

Zahtjevi korisnika ovise od tipa navigacije koji se primjenjuje, kao i o fazi navigacije. Tačnosti navigacije za različite vrste i faze navigacije pokazane su tablici 1.1, ali su zavisno od specifičnosti primjena moguća i odstupanja od navedenih tačnosti. Zavisno od faze navigacije zahtijeva se dostupnost od 99,0 do 99,999%. Kontinuitet se zahtijeva uglavnom za aeronautičku navigaciju, i različiti su zahtjevi za različite faze leta. Zahtjevi za pokrivenost mogu biti globalni, regionalni ili lokalni.

Zahtijevana dimenzija (položaja) zavisi od tipa primjene i faze navigacije. Integritet je uglavnom karakteriziran pomoću vremena alarma, od oko 1 do 15 sekundi. Naravno, 1 sekunda se potrebna kod aplikacija kod koje je zahtijevana visoka sigurnost života putnika/učesnika u saobraćaju, kao što je recimo slučaj u civilnoj avijaciji ili u navigaciji vozila u hitnim slučajevima (kola hitne pomoći, vatrogasci, službe spašavanja pri prirodnim katastrofama). Zahtjevi za pouzdanost su obično definirani s vjerovatnoćom na nivou od 95%. Zahtijevana stopa ažuriranja (položaja) obično je definirana oko 1 Hz.

Detaljne specifikacije zahtijevanih tačnosti i definicije brojnih dodatnih pojmova vezanih za navigaciju mogu se naći u dokumentima koje su izdali Eurocontrol (1998) kao i DoD/DoT (2001).

Tablica 1.1: Tačnost odabranih vrsta navigacije. (Hofmann-Wellenhof, i dr. 2003, str. 6)

Primjena	Tačnost (m)
Kopnena navigacija	
privatni transport	50-200
javni transport	20-50
kola hitne pomoći	5-20
Pomorska navigacija	
okeanska	≥ 100
priobalna	20-100
u luci	5-20
Aeronautička navigacija	
na ruti	≥ 100
slijetanje(horiz. položaj)	5-20
slijetanje (visina)	0.5-5

1.11 Međunarodne organizacije za navigaciju

Postoji mnogo međunarodnih organizacija, asocijacija, institucija i međunarodnih komiteta koje se bave definicijama procedura koje se primjenjuju u navigaciji, kao i ustanovljavanjem međunarodno prihvaćenih standarda i zakonske regulative.

Opći standardi su definirani od strane Internacionalne organizacije za standardizaciju –ISO (URL <http://www.iso.org/iso/home.html>; <http://www.iso.org/iso/home/search.htm?qt=navigation+&sort=rel&type=simple&published=on>), Značajan doprinos daju Američki nacionalni institut za standardizaciju (ANSI) (URL http://www.ansi.org/search_results.aspx?menuid=search_results&cx=016411134356970301196:ufdyk3moz48&cof=FORID:11&q=Navigation&sa=Search),

Evropski komitet za normiranje (CEN) URL
<http://www.cen.eu/Pages/resultsearch.aspx?k=navigation>

Važno je spomenuti sljedeće međunarodne organizacije:

Internacionalna organizacija za civilnu avijaciju (ICAO) -URL
<http://www.icao.int/Pages/default.aspx>)

Internacionalna organizacija za moreplovstvo (IMO) -URL
<http://www.imo.org/pages/home.aspx>)

Internacionalna organizacija za hidrografiju (IHO) -URL
<http://www.iho.int/srv1/index.php?lang=en>;
http://iho.int/srv1/index.php?option=com_content&view=article&id=448&Itemid=345&lang=en)

Svemirsku navigaciju reguliraju sljedeće organizacije:

NASA (National Aeronautics and Space Administration) u SAD-u (URL
<http://www.nasa.gov/>)

ESA (European Space Agency) in EU. (URL <http://www.esa.int/ESA>)

Ruska svemirska agencija-Roskosmos ili RKA (ruski: Федеральное космическое агентство России)

(URL <http://www.federspace.ru/>).

Za kopnenu navigaciju još ne postoji odgovarajuća ekvivalentna institucija. Međutim, navode se još nekoliko značajnih institucija koje rade na nacionalnom ili internacionalnom nivo ili su pak tijela ili podorganizacije Ujedinjenih Nacija:

Internacionalna asocijacija instituta za navigaciju (IAIN) URL
<http://www.iainav.org/>

Internacionalna asocijacija za pomoć u moreplovstvu, navigaciju i upravljanje svjetionicima (IALA) URL <http://www.iala-aism.org/>

Internacionalna telekomunikacijska unija (ITU) URL
<http://www.itu.int/en/about/Pages/default.aspx>

Federalna administracija za avijaciju SAD-a (FAA) URL <http://www.faa.gov/>

Evropska organizacija za sigurnost avionske (civilne) navigacije-Eurocontrol

URL <https://www.eurocontrol.int/>

Internacionalni komitet za GNSS- (ICG) URL
<http://www.unoosa.org/oosa/SAP/gnss/icg.html>

Ured za poslove vanjskog svemirskog prostora Ujedinjenih Nacija – (UNOOSA)
(<http://www.unoosa.org/oosa/en/OOSA/index.html>),

itd.

Glava 2

2 HISTORIJSKI RAZVOJ NAVIGACIJE

Potreba pra-čovjeka za istraživanjem novih teritorija navela ga je da osmisli način određivanja svog položaja i lokaciju svog staništa, ali i lokaciju ciljanog odredišta svog putovanja. Logična je pretpostavka da je čovjek u početku razmatrao samo kretanje u bližoj okolini svoga staništa i lovnog područja. Problem je uvijek naravno bio vratiti se „kući“. Funkciju „putovanja nazad“ postizao je korištenjem specijalnih „oznaka“ koje je prepoznavao u pejzažima ili obliku reljefa u daljini. Te su se oznake morale zapamtiti i kasnije koristiti kao markantne tačke za pronalaženje puta „kući“.

Kasnije, zbog mogućnosti lakšeg prenosa tereta plovilima, transport rijekama i morima postao je veoma popularan i unosan posao. Plodno tlo u dolinama oko velikih rijeka pogodovalo je razvoju drevnih civilizacija²⁸. Današnjem čovjeku su poznate četiri napredne civilizacije²⁹ koje su se razvile u dolinama velikih plodnih rijeka. Razvoj ovih civilizacija nije bio vremenski sinhroniziran. U dolinama rijeka Tigris i Eufrat razvile su se države drevne Mesopotamije: Sumer, Babilon, Asirija, Akad, itd. Oko rijeke Nila razvila se država Stari Egipat, a u okolici Žute i Duge rijeke (Huang He i Yuangetze) na teritoriji današnje Kine, razvile su se drevne civilizacije, čiji su se žitelji još u neolitsko doba³⁰ služili jednostavnim kanuima i veslima na rijekama i moru. U dolini rijeke Indus uvjeti su pogodovali razvoju drevne Indijske civilizacije³¹. Historijski udžbenici uglavnom opisuju stare civilizacije iz

²⁸ definicija civilizacije: napredno društveno uređenje i organizacija. Za detalje vidjeti <https://en.wikipedia.org/wiki/Civilization>

²⁹ Teritorije četiri drevne civilizacije pokazane na karti svijeta preuzeto s <http://mrprice2.blogspot.com/p/unit-maps.html>

³⁰ U vremenu oko 5 000 g.p.n.e, URL 2.16

³¹ Postoje predaje i legende o naprednim civilizacijama prije Velikog potopa (npr. Atlantida) ali se ovdje opisuju samo podaci oficijelno prihvaćene historije.

Euroazijskih oblasti i naznačavaju Mesopotamiju kao kolijevku civilizacije, te se i ovaj tekst usmjerava ka naučno utvrđenim poznatim činjenicama u vrijeme pisanja³².



Slika 2.1a: Teritorije na kojima su živjele stare napredne civilizacije u dolinama velikih rijeka: Nil, Ind, Tigris i Eufrat, Žute rijeke. (izvor URL16)

Međutim, važno je naglasiti da upotrebom moderne tehnologije, kao što su npr. LIDAR (Light Detection and Ranging) i satelitskih snimaka, čovječanstvo svakodnevno saznaje o historiji starih civilizacija o kojima „do jučer“ ništa nije znalo. Tako o historiji starih civilizacija na teritoriju ostalih kontinenata, nažalost, nema toliko utvrđenih činjenica, te se očekuje da će moderne tehnologije osvijetliti historiju čovječanstva širom planete.

Obećavajuće su najnovije vijesti iz 2018. godine o arheološkim nalazištima u Južnoj, Srednjoj i Sjevernoj Americi. LIDAR tehnologijom su otkrivena potpuno arheologiji nepoznata naselja, ili su pak otkrivani novi detalji o poznatim naseljima, npr. starih Maja u Gvatemali (Cozzens, 2018³³). „izgubljene gradove“, s urbanističkim rješenjima i pokazateljima naprednog znanja i kulture starog naroda Purépecha na teritoriji Zapadnog Meksika. Ova arheološka nalazišta po prvim procjenama stara oko

³² Februar 2018, iako su dijelovi tekst napisani tokom 2015. i 2016. godine

³³ GPS Word, Februar 2018, http://gpsworld.com/lidar-and-uav-reveal-maya-megalopolis-below-guatemalan-jungle/?utm_source=gps_navigate&utm_medium=email&utm_campaign=gps_navigate_02272018&eid=376810068&bid=2017824

hiljadu godina, ali su zarasli i bili su nedostupni modernom čovjeku. Očekivati je da će na osnovu novih arheoloških nalazišta trebati ponovo pisati historija ili bar neki njeni dijelovi. Tako, očekivati je da će se i o navigaciji i historiji navigacije trebati pisati nova poglavlja i zbog novih spoznaja o starim (ponekad izumrlim) civilizacijama na prostorima američkih kontinenata, ali i drugih dijelova svijeta.

Generalno govoreći, poznati artefakti pokazuju da su putovanja starih naroda, vremenom postala sve duža, bilo da su ciljevi putovanja bili komercijalni, ili pak iz želje za vojnim osvajanjima. Tako se, vremenom, pojavila potreba za otkrivanjem novog načina određivanja položaja. Naravno, prve plovidbe bile su niz rijeke. Kasnije se plovilo morima, ali uz obalu da bi se mogli pratiti karakteristični oblici reljefa. Razvile su se metode³⁴ za određivanje položaja kad obale nisu bile vidljive, te su se stari navigatori počeli oslanjati na opažanje nebeskih tijela.

2.1 Navigacija drevnih naprednih civilizacija

Porijeklo navigacije je staro, moglo bi se reći, koliko i čovječanstvo³⁵. Prema navodima Pomorskog muzeja SAD-a, (URL 2.15) najranije pomorsko prekookeansko putovanje organizirali su pripadnici naroda poznatog pod imenom Baiyue, koji su živjeli na teritoriji današnje jugoistočne Kine. Stara Kina ima dugu i dominantnu historiju navigacije u Jugoistočnoj Aziji. (Quipeng, 2002 str. 496).

2.2 Navigacija starih Kineza

Drevni Kinezi su kao prva plovila koristili bambusove splavove. Kasnije su razvili drveni brod Fu s jedrima, s više paluba i zasebnim kabinama za posadu i putnike. Stari Kinezi su počeli vrlo rano kolonizirati Pacifik. Putovali su do Nove Gvineje i Australije. Kasnije su žitelji teritorija sjeverno od rijeke Yangtze putovali do Amerike. U periodu između 14 000. g.p.n.e. do 4000. g. p.n.e., stanovnici jugoistočne Azije putovali su do Indonezije i Polinezije. Pretpostavlja se da su stanovnici jugoistočne Azije bili sposobni preploviti Indijski okean i doći do Afrike, a kasnije i do Amerike. Arheološki ostaci pokazuju da je Kina zajedno s Mediteranskim zemljama, kolijevka globalne pomorske kulture. (URL 2.16) Ipak, pronađeni artefakti

³⁴ vidjeti sljedeću fusnotu.

1.1 ³⁵ Zanimljivo štivo, koje povezuje tekstove Talmuda i Biblije s vlastitim istraživanjem, predstavlja knjiga Patai, (1998): *The Children of Noah: Jewish Seafaring in Ancient Times*. Izgradnja brodova po ovom autoru nije vještina koju su ljudi intuitivno otkrili. Potreba za brodovima i sposobnost da ih napravi darovani su čovječanstvu s višeg nivoa. Noa je jedini graditelj broda u Bibliji, i on je također dobio uputstvo od Boga: „Napravi brod od od (gopher) drveta; Arku načini sa sobama i obloži iznuta i s vama smolom. I evo kako ćeš je napraviti: dužina arke je 300 lakata, širina 50 lakata a visina 30 lakata.

svjedoče da se kineska pomorska ekonomija počela značajnije razvijati u periodu dinastije Zhou, tj. između 1030-221. g.p.n.e.

Kroz periode starokineskih dinastija: Xia (21-16. stoljeća p.n.e.), Shang (16-11. stoljeća p.n.e.) i Zhou (11. stoljeće do 256. g.p.n.e.) razvili su vještine izgradnje drvenih brodova s jedrima. Tako su započeli putovanja do poluotoka današnje Koreje i Japanskih otoka. Brojne turbulencije i tranzicije u historiji stare Kine provedene su tokom perioda „proljeća i jeseni“ (770-446. g.p.n.e), kad su postignute brojne reforme u političkom, sociološkom, kulturnom i obrazovnom sistemu. (URL 2.17) Slijedio je dugi period ratova između starokineskih država (475-221. g.p.n.e). Do tada se akumuliralo dosta znanja o: izgradnji brodova, navigacijskim vještinama, orijentaciji astronomskim metodama, određivanju geografskog položaja i poznavanja okeanskih klimatskih uvjeta. Sve je ovo omogućilo još brži razvoj navigacijskih vještina i spoznaja. Tako su putovanja starokineskih navigatora postajala sve duža i uspješnija.

2.3 Navigacija starih naroda Bliskog istoka

Prva poznata plovila pronađena na Bliskom istoku stara su oko 10 000 godina, ali ih ne bi mogli nazvati brodovima. Oblici splavova i čamaca varirali su kod različitih naroda. Prvi navigatori su počeli vjerovatno koristiti životinjsku kožu kao jedra.

Tragovi navigacije nađeni u neolitskim grobnicama stare napredne civilizacije na Bliskom istoku, poznate kao Sumeri³⁶ ubrajaju se u najstarije. Ti artefakti datiraju iz perioda oko 4000. godina p.n.e. (Samama, 2008 str. 1) Ipak, ne postoje pouzdani izvori koji izvještavaju direktno o navigaciji ovog vremena. Civilizacije drevne Mesopotamije (države: Babilonija, Asirija, Akad, itd.) koje su naslijedili kulturu i znanja Sumeraca ostavili su pisane dokumente³⁷, kao što su: kalendari³⁸ katalog položaja zvijezda (koji datira oko 1200. god. p.n.e), dnevnik opažanja kometa³⁹,

³⁶ Sumer predstavlja teritoriju jugoistočne Mesopotamije, prostor između rijeka Tigris i Eufrat koji južno izlazi na Perzijski zaliv. Teritorij sumerske države danas pripada Iraku i Kuvajtu. Sumerka civilizacija predstavlja najstariju poznatu naprednu civilizaciju. Cijeni se da je razvijena oko 4000 godina p.n.e., a nestala je oko 2000 godina p.n.e. Sumerke zajednice su bile države-gradovi, koji su bili organizirani oko hrama, a državom je upravljalo svećenstvo. Bili su razvijena civilizacija, koja se smatrala starom civilizacijom i u starom Babilonu. Od Sumeraca smo vjerovatno naslijedili podjelu dana na 24 sata i sata na 60 minuta. Također, prema oficijelnoj historiji, čvječanstvo od sumeraca baštini: prva kola s točkovima, prvo pismo (klinasto), prvi pisani zakonik, kalendar, točak za izradu glinenog posuda, sisteme kanala za navodnjavanje, itd. Slike sumerskog pisma, mozaikom ukrašenih stubova, zlatnog nakita iz raznih svjetskih muzeja mogu se vidjeti na URL 2.6

³⁷ dokumente koji su zadržali nazive iz Sumerke kulture i jezika.

³⁸ lunisolarni kalendar u kojem je godina podijeljena na 12 mjeseci, s početkom mjeseca na mlad mjesec, s početkom dana u sumrak. Sličnost s islamskim kalendarom.

³⁹ Poznati dokumenti zapisani na glinenim pločama iz Babilonske kulture su astronomski dnevnik koji pokazuju da su se opažala nebeska tijela (Mjesec, planete) na dnevnoj bazi. Zabilježena su opažanja Halejeve komete. Slika glinenih ploča koje se čuvaju u Državnom muzeju Velike Britanije:

Sunca, Mjeseca i planeta, koji datiraju iz perioda od 7. stoljeća p.n.e. pa sve do 2. stoljeća p.n.e. Sve je zabilježeno na glinenim pločama klinastim pismom (slika 2.1). Osim podataka o opažanju nebeskih tijela i prirodnih pojava, spominju se: cijene živežnih namirnica za mjesec ili dane (kao ječma, datula, susama), meteorološke prilike, informacije o vodostajima rijeka, političke, socijalne, vojne prilike i značajni događaji. Više detalja u Sachs i Hunger (1998).



Slika 2.1b: Lijevo je najstarija poznata karta svijeta-Babilonska ploča, koja datira iz oko 600. g. p.n.e. Slijedi veoma poznata Asirska glinena ploča na kojoj su opisana dnevna opažanja planete Venere. Ova ploča je poznata pod imenom Ammisaduqa, a datira oko 7. stoljeća p.n.e. U sredini desno je babilonska glinena ploča na kojoj su spomenuta opažanja Helijeve komete. Desno je ploča nazvana babilonski almanah u kojoj se spominju budući položaji nebeskih tijela. Sve ploče su izložene u Britanskom nacionalnom muzeju. Slike preuzete s URL 2.4

Najstariji pisani dokumenti koji opisuju navigaciju i brodove napisani su hijeroglifima⁴⁰. U skladu s arheološkim artifaktima⁴¹ prva plovila koja se mogu nazvati brodovima pojavljuju se dakle u starom Egiptu. Datiraju iz perioda od prije približno 6 000 godina. Prvi staroegipatski brodovi su građeni od papirusa, a kasnije se drveni brodovi grade od cedrovine⁴². Najstariji zapis o jedru pravouglog oblika datiran je u 3200. god. p.n.e. Kasnije su se razvili brodovi s pogonom na vesla, uz snagu 30 veslača. Najstariji pronađeni drveni brodovi stari su oko 5 000 godina, a

http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/3/38/Babylonian_tablet_recording_Halley%27s_comet.jpg ; http://en.wikipedia.org/wiki/Venus_tablet_of_Ammisaduqa; UNESCO je protestirao zbog avionskog bombardiranja Iračke teritorije, jer se tako uništavaju neotkrivena arheološka nalazišta, te se uništavaju artefakti iz kojih bi se proučavala kultura i način života i rada starih naprednih civilizacija Bliskog istoka-kolijevke čovječanstva.

⁴⁰ Hijeroglifi su staroegipatsko pismo koje kombinira slike i

⁴¹ Ovdje treba naglasiti da se izlaganje odnosi isključivo na materijalne dokaze kojima čovječanstvo raspolaže. Postoje mnoge legende i pretpostavke o starim navigacijskim poduhvatima, ali za mnoge ne postoje materijalni dokazi.

⁴² U Starom Egiptu nije bilo puno drveta, a cedrovina za brodove uvezena je iz današnjeg Libanona.

predstavljaju pronalazak flote koja sadrži 14 brodova dužine oko 23 m. (URL 2.1 i URL 2.3)

Prva opsežna putovanja egipatskih faraona po Mediteranu pripisuju se faraonu Snefru⁴³. Najraniji hijeroglifski dokumenti⁴⁴ navode da je oko 2600. g. p.n.e. poslao četrdeset brodova u grad Byblos u Feniciji (ili zemlju Kanaan na istočnoj obali Mediterana, današnji Libanon), odakle su se brodovi vratili s vrijednim tovarom cedrovog drveta. Vjerovatno je to bila građa za flotu koju je poslao u Punt⁴⁵, s kojim je ustanovio trgovačke odnose. Dokumenti opisuju brod nazvan⁴⁶ „Slava dvije zemlje“, koji je po dimenzijama i dizajnu sličan brodu Kufu pokazanom na slici 2.2. (URL 2.12)

Međutim, najstariji, dobro očuvan i obnovljen brod je teglenica Khufu ili Solarna teglenica⁴⁷. Starost broda je oko 4500 god. Radi se o kraljevskom ili možda pogrebnom brodu faraona Khufu (kod nas poznat pod imenom Keops). To je 45 m dugačak brod izrađen od cedrovine koji je rekonstruiran uz dodatak samo 5% materijala koji nije originalni (slika 2.2). Brod Khufu pronađen je zakopan u kompleksu Velike piramide u Gizi, koja se počela graditi za vladavine faraona Keopsa⁴⁸.

Hijeroglifski natpisi dakle sadrže najstarije pisane dokumente, koji izravno opisuju vještine navigacije i izrade brodova. Vesla i kvadratna jedra koja su montirana na sklopivi jarbol pokazuju način pokretanja plovila na moru. Detaljni slikovni opisi indiciraju neka graditeljska umijeća koja nisu bila poznata sve do modernog doba. Upravljanje brodom postizalo se veslom, koje se koristi kao kormilo, a nalazi na zadnjoj strani broda i stoji vertikalno. Ova konfiguracija nije dozvoljavala jedrenje u svim pravcima kad je bilo vjetro.

⁴³ Snefru (neki ga nazivaju i Sneferu, Snofru ili Soris) je bio prvi faraon četvrte dinstije. Zna se da je umro u 2589. g. p.n.e. Za svoje vladavine započeo trgovinu s mediteranskim državama.

⁴⁴ Raniji faraoni su uvozili sa Sinaja bakar, tirkiz i malahit, a s juga slonovaču, ebonovinu i aromatične biljke.

⁴⁵ Zemlja Punt se u dokumentima naziva i Božija zemlja, a ponekad Zemlja zlata.

⁴⁶ Prvi put u pisanoj historiji brod ima ime.

⁴⁷ Teglenica je plovni objekt za prevoz tereta. Njegovo dno je obično ravno. Uglavnom se koristio za vođeni saobraćaj po rijekama i kanalima.

⁴⁸ Prema napisima hijeroglifa Keops se na staroegipatskom zvao Khufu, živio je od oko 2589. p.n.e. do 2566. p.n.e. i bio je sin faraona Sefru.



Slika 2.2: Sunčani brod ili Khufu brod, rekonstruiran. Osim jedara, pokretala ga je snaga mišića 30 robova veslača. Brod je izložen u muzeju sagrađenom kraj Velike piramide u Gizi u blizini mjesta gdje je pronađen. Muzej je prikazan za slici desno, bijeli objekat. (URL 2.2)

Slikoviti prikaz dopunjen hijeroglifskim tekstovima na zidovima hrama u Luksoru (Deir el-Bahri) govore o podvizima pomorske navigacije Staroegipćana. Dokumenti su vezani za ženu koja je bila peti faraon u osamnaestoj dinastiji, kraljici Hatshepsut⁴⁹ (1508–1458. g.p.n.e), koja se smatra prvom velikom ženom poznate historije. U nastojanju da ponovno uspostavi trgovačku mrežu sa „Zemljom Punt“, sama je nadgledala pripreme za putovanje pet brodova dužine 21 m, opremljenih s nekoliko jedara. Brodovi su mogli primiti 210 ljudi ukuljučujući mornare i 30 veslača. Slike i tekstovi na muralima hrama kraljice Hatshepsut u Luksoru (slika 2.3) kazuju da su mnoge dragocjene robe kupljene u Puntu: zlato, timijan⁵⁰ i aromatične smole, kao i žive egzotične biljke, hrana, životinje, itd.⁵¹ Ipak, ovo putovanje u „zemlju zlata“ predstavlja svojevrsnu zagonetku! Naime, danas se još ne može sa sigurnošću reći gdje je bila ta primamljiva destinacije. Dakle, egiptolozi se ne slažu gdje se nalazi kraljevstvo Punt⁵², veoma bogata i misteriozna zemlja⁵³, trgovački partner staroegipćana kroz višemilenijumski period. Potencijalne lokacije Punta su ili južni dio Arabijskog poluotoka-današnji Jemen (možda drevna Saba⁵⁴) ili Nubija koja je

⁴⁹ Značenje imena Hatshepsut je Najistaknutija među plemkinjama.

⁵⁰ Zapisi govore da ga je kraljica stavljala samljeveni ugljenisani timijan u kozmetičke preparate, tj. u ajlajner.

⁵¹ Kraljičina delegacija se vratila iz Punta s tridesetijednim živim aromatičnim drvetom (arab. mirisni misk) što je pokazano na zidovima Hatshepsut hrama (slika 2.3). Ovo je bio prvi zabilježeni pokušaj presađivanja stranog drveća. Hijeroglifski prikazi izvještavaju da je kraljica Hatshepsut imala to drveće posađeno u saksijama unutar kompleksa svog hrama namijenjenog mrtvačnici.

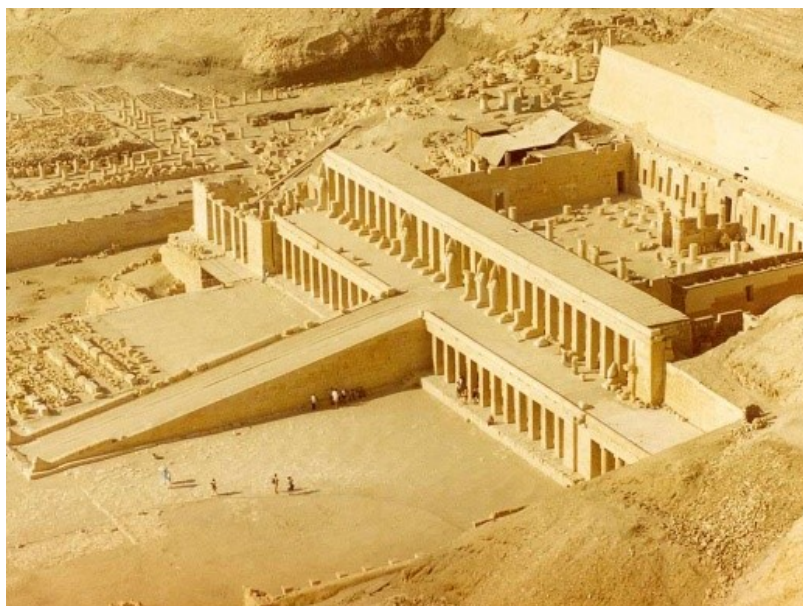
⁵² Do Punta su Egipćani putovali kopnenim putem.

⁵³ Hijeroglifi dokumentiraju da iz Punta je dolazilo zlato, ebonovina (skupocjeno, tamno, gusto drvo kojim se ukrašavala unutrašnjosti faraonovih odaja), začini, mirisne biljke korištene za kozmetiku te pri religijskim obredima, životinje, aromatične smole, kozmetika, leopardovo krzno, slonovača, hrana, te na kraju sluge i njihova djeca.

⁵⁴ Dinastija Saba poznata po kraljici od Sabe, koja se spominje u Bibliji i Kuranu kao kraljica Belkisa od Sabe.

bila locirana na afričkoj obali Crvenog mora⁵⁵. Neki izvori tvrde da je „Zemlja Punt“ potencijalno na lokacijama današnjih država Etiopija, Somalija ili Madagaskar pa čak i Uganda (Wicker, 1998).

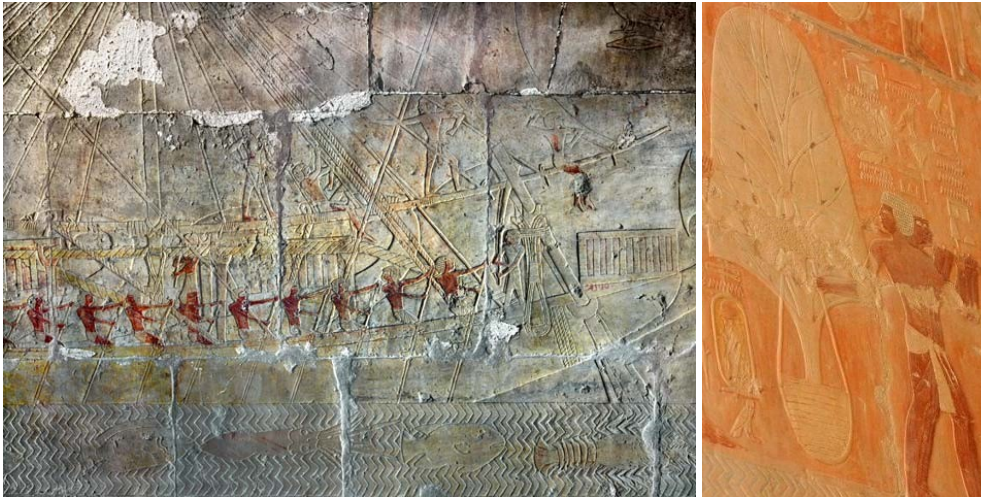
Smatra se da su brodovi za Punt pravljeni na obalama Nila, pa su kroz pustinju transportirani kao građa do luke na Crvenom moru, gdje su ponovo sastavljeni. Slično tome, smatra se da su Egipćani po povratku s putovanja, istovarili brodove na obali Crvenog mora, te transportovali egzotičnu robu karavanima magaraca, putem dugim oko 180 km kroz pustinju. Potom su robu natovarili na druge brodove i plovili južno do tadašnje prijestolnice, grada Tebe. (Slika 2.3)



Slika 2.3: Hram kraljice Hatshepsut u Luksoru (u blizini Tebe) na čijim zidovima je crtežima i hijeroglifima prikazano putovanje u Punt. (URL 2.9).

Ubrzo nakon putovanja u Punt, kraljica Hatshepsut je organizirala pomorska putovanja na istočnu Mediteransku obalu u Kanaanski grad Biblos i Sinaj.

⁵⁵ Neki izvori čak tvrde da je Zemlja Punt daleko na jugoistočnoj obali Afrike, pa postoje izvori koji tvrde da je Punt u današnjoj državi Mozambik.



Slika 2.4a: Lijevo je originalni crtež (na zidu hrama u Luksoru) broda u Crvenom moru na putu za Punt, s veslačima u punom zamahu i kapetanom koji izdaje naredbe. Desno je prikaz s istog zida, koji prikazuje scenu istovaranja živih stabala mirisnog miska (URL 2.9).

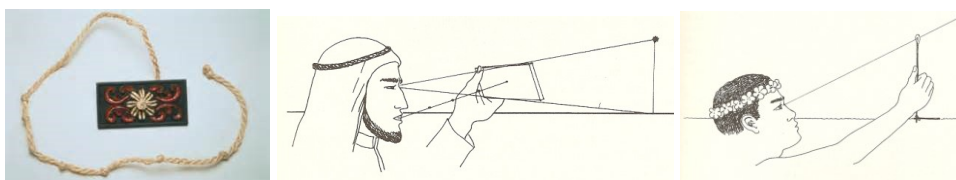


Slika 2.4b: Karta starog Egipta koja pokazuje neke moguće lokacije zemlje Punt. (URL 2.10)

2.4 Mjerni instrumenti za navigaciju kod starih naroda

Historija navigacija je naravno usko povezana s historijom razvoja mjernih instrumenata⁵⁶. Razvoj instrumenata u sprezi je s razvojem teorije iz oblasti matematike, astronomije, fizike, geodezije, geografije, kartografije, mehanike, itd.

Kad je Hiparkus⁵⁷ predložio geografski koordinatni sistem (širinu i dužinu), približna vrijednost geografske širine se mogla tada poznatim instrumentima, kao što je *kamal*, izmjeriti na kopnu, iz opažanja visine zvijezde sjevernjače (slika 2.5). Kamal⁵⁸ je drvena pločica koja se treba držati na unaprijed određenom odstojanju od očiju. Odstojanje se mjeri pomoću čvorova vezanih na kanapi. Kad se kamal nalazi između sjevernjače i horizonta opažatelj zna da se nalazi na geografskoj širini svoje destinacije.



Slika 2.5: Instrument iz starog Egipta za određivanje geografske širine-kamal, lijevo i u sredini. Desno: Ulica za širinu (hook latitude), napravljena od razrezane bambusove trske i školjke. Poravnava se s horizontom i zvijezdom Sjevernjačom da pokaže da se osmatrač nalazi na željenoj geografskoj širini⁵⁹.

Za različite lokacije (gradove) dužina čvorova na kanapi bila je unaprijed definirana. Međutim, metoda određivanja geografske dužine prema pronađenim pisanim dokumentima nije bila poznata starim narodima. Prošlo je oko 2 000 godina dok se pomoću Harisonovog brodskog hronometra, geografska dužina nije mogla odrediti

⁵⁶ Tačnost navigacije značajno se povećala tek u osamnaestom stoljeću, kad je Harison izumio brodski hronometar.

⁵⁷ Hiparkus je bio najpoznatiji grčki astronom, matematičar, geograf. Naziva se osnivačem trigonometrije. U svom radu naslanja se na radove iz stare Mesopotamije. Živio je približno u periodu od 190 do 120. g. p.n.e. Smatra se najboljim drevnim astronomom. Prvi je odredio model kretanja sunca i mjeseca, za što je čini se koristio stoljećima prikupljana opažanja i matematičke tehnike starih Babilonaca. Prvi je sastavio trigonometrijske tablice i riješio neke probleme sferne trigonometrije. Također se smatra njegovim doprinosom sastavljanje prvog zvjezdanog kataloga zapadnog svijeta i otkriće Zemljine precesije. Smatra se da je Klaudije Ptolomej oko tri stoljeća kasnije napisao „Astronomiju“ baštineći znanje Hiperkusa. Čini se da je prvi izračunao heliocentrični sistem ali je odustao od tog rada jer izračunate orbite nisu bile idealne kružnice. Po vjerovanju tog vremena očekivao je da orbite planeta imaju „idealni“ kružni oblik. Ta ideja je morala čekati oko 2000 godina dok Kopernik nije ustanovio heliocentrični model.

⁵⁸ Kamal u prevodu *vodič*, instrument poznat starim Egipćanima.

⁵⁹ Više detalja na link:

http://www.phisicalpsience.com/public/Taosi_Observatory/Taosi_Observatory.html

na moru. Sunčani sat, instrument za mjerenje vremena po položaju i dužini sunčeve sjene izmislili su u Mesopotamiji prije oko 6 000 godina.

Stara kineska civilizacija dala je ogroman doprinos navigaciji i tehnološkom napretku općenito. Zapanjujući izumi (neki su pokazani na slikama 2.6, 2.7, 2.8) svakako preteča odometra, na jug pokazujuće vozilo, instrument za određivanje pravca sjever-jug, gnomon, magnetni kompasa, papir, štamparija, nautičke karte, itd... Starokineski sunčani sat-„rigui“ pokazan na slici 2.6. kao i preteča magnetnog kompasa si-nan, bili su fiksirani za mjesto i stoga nepodesni za navigaciju.

Najstariji gnomon pronađen oko 2000. godine u sjeveroistočnoj Kini, datira iz perioda oko 2 300 g.p.n.e. a nalazi se u „solarnoj astronomskoj observatoriji“ Taosi. (Liu, 2009; Li, 2014; Sun, 2015). Astronomska opservatorija je pod zaštitom UNESCO. Ova arheološka iskopina indicira da su narodi Taosi znali da se Zemlja kreće oko Sunca po eliptičnoj putanji! Poslije drugog stoljeća p.n.e. gnomon je bio u širokoj upotrebi u Kini. Stari Kinezi su gnomon koristili za opažanja i određivanje promjena godišnjih doba, za orijentaciju u prostoru, geografsku širinu, itd. Dužinu sjenke štapa su koristili za izradu kalendara „rigui“. Desno je pokazan astronomski instrument gnomon. (URL 2.25)



Slika 2.6: Drevni kineski instrument „si-nan“ za pokazivanje pravca⁶⁰ sjever/jug, (lijevo). Radi na principu magneta - ovdje magnetnu iglu predstavlja kašika. Si-nan je preteča kompasa, koji su Kinezi uveli u navigaciju mnogo kasnije, za vrijeme perioda velikih ratova. U sredini je kineski sunčani sat-

Izumili su prototip za opremu kojom se mjeri udaljenost, koju nazivamo *odometar* (grčki *oδός* „hodos“- put + *μέτρον* „metron“-mjeriti). Svaki današnji automobil ima odometar kojeg obično nazivamo kilometarsat.

⁶⁰ Ovaj instrument se koristio za davanje orjentacije pri izgradnji objekata u staroj kinsekoj arhitekturi. Zgrade su često imale preciznu orjentaciju u pravcu sjever/jug, da bi zadovoljili zahtjeve i danas popularne kineske filozofije načina života nazvane „Feng Shui“, što bi trebalo da znači usklađenost prostora (i vremena) u kojem živimo sa svemirom, a sve za postizanje sreće i osjećaja mira i zadovoljstva.

Kinezi su odometar realizirali pomoću kočije na dva točka, koja je imala bubanj. Pomoću zubčanika povezanih s točkovima bubanj je služio za registriranje broja obrtaja točka. Mjerna jedinica za izražavanje izmjerene dužinu zvala se *li*, a iznosila je približno pola kilometra. Brojanje obrtaja točka izvodilo se pomoću skupa zubčanika koji su bili povezani s točkovima i figurom postavljenom na kočiju. Figura (često u obliku lutke) je udarala u bubanj nakon svakog pređenog *li*, dok je druga figura udarala u gong svakog desetog pređenog *li*.

Mehanička naprava nazvana „jug-pokazujuće kočija“ (bojno vozilo) je drugi genijalni izum drevne kineske kulture. Lutka postavljena na rotirajućoj platformi na kočiji, uvijek je pokazivala pravac juga bez obzira na smjer kretanja kočije.

Treba imati na umu da je „jug-pokazujuća kočija“ prvi put napravljeno početkom prvog milenijuma p.n.e.⁶¹ a za njenu realizaciju nije korišten magnetni kompas, kojeg su također izumili Kinezi, ali tek u 11. stoljeću naše ere⁶². Zabilježeni su opisi različitih tipova „jug-pokazujuće kočije“. Često se opisuje u literaturi mehanizam koji je koristio princip zubčanika, te je ideja diferenciranog odometra za određivanje pravca pomogla da se izradi mehanizam koji je kombinirao oba uređaja. Detaljniji opis različitih principa drevnih kineskih mehanizama dostupni su na URL 2.7. Originalne kočije nisu sačuvane, ali postoji nekoliko replika ovog uređaja. (Slika 2.7)

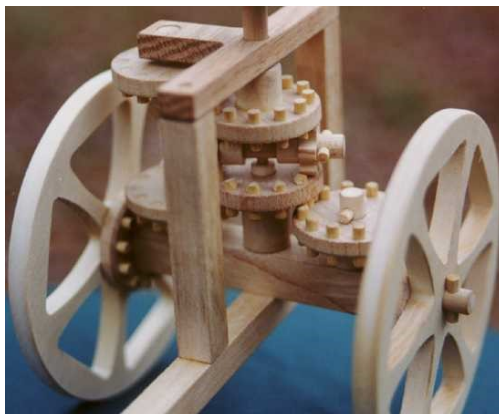
Prema Hofmann-Wellenhof (2003, str. 10) najstarija poznata nautička karta⁶³ priobalnog morskog pojasa i tokova rijeka datira iz perioda oko 2000 g.p.n.e. na kojoj su naznačeni pravci plovidbe. Stari Kinezi razvili su brod pod nazivom Fu⁶⁴, koji više milenijuma bio omiljeni tip broda ne samo među kineskim navigatorima. Njegova konstrukcija s više paluba i jedara, kormilom i veslima, davala mu je čvrstinu, dobru plovnost, sigurnost i komfor. Brod Fu je imao zasebne kabine za putnike i posadu, te dovoljno prostora za više stotina tona tereta.

⁶¹ Ovaj uređaj je čini se bio osmišljavan neovisno više puta tokom drevne kineske historije. Potom je padao u zaborav. Navodi se da je bio poznat oko 2600. g. p.n.e., potom oko 1000. g. p.n.e., potom oko 200–265. g.p.n.e. U prilog ovome ide činjenica da postoji više vrsta mehaničkih rješenja jug-pokazujuće kočije. Zanimljivo je da se u pisanim dokumentima spominje na jug pokazujući brod! (URL 2. 7)

⁶² Kompas kojeg su u 11. stoljeću izumili kinezi nije prva upotreba magneta za orijentaciju u staroj Kini. Nekoliko stoljeća prije nove ere naprava za pokazivanje sjevera/juga koristila se kao fiksiran instrument za poravnanje građevina u pravcu sjever-jug. Stare kinseke piramide (vjerovatno najstarije na svijetu) su orjentirane vjerovatno na ovaj način.

⁶³ Usprkos istraživanjima na ovu temu, potvrda ovog navoda u drugim dostupnim izvorima nažalost nije pronađena.

⁶⁴ Ime Fu dobio po nazivu provincije u kojoj je bilo brodogradilište.



Slika 2.7: Jug pokazujuća kočija, replika. (lijevo). Ruka lutke pokazuje jug bez obzira u kom pravcu se kreće kočija, zahvaljujući sklopu ručno izrađenih diferencijalnih zubčanika pokazanih desno. Značajno je napomenuti da je bilo potrebno poznavati orijentaciju polazišne tačke. URL 2.7 i 2.8.



Slika 2.8: Stari kineski brod „Fu-chuan junk“, lijevo. Desno je karta Kine iz 5 i 6. stoljeća. (URL 2.18)

Prvi „Fu-chuan junk“ brodovi su obično bili visoki kao zgrade, a svaki je brod imao oštro dno, veliku palubu, prema gore zakrivljen pramac i krmu, te zaštitnu ogradu s obje strane, kao što pokazuje slika 2.8. Cijeli brod je imao četiri kata. Prvi kat je bio ispunjen kamenjem i zemljom za stabilnost broda. Drugi kat je služio kao odmoriste vojnika, a treći za kontrolu broda. Četvrti kat su obično zauzimali vojnici da strijelama gađaju neprijatelja. S četiri metra dubokim prostorom za teret, Fu-chuan je bio odličan vojni brod za plovidbu u dubokom moru, sposoban da potopi protivnički brod. (URL 2.18)



Slika 2.9: Karta stare Kine iz perioda 2000-200.g.p.n.e. (URL 2.20)

Sasvim je moguće da su i Kinezi i Arapi u isto vrijeme znali graditi brodove, ali taj podatak nije provjeren. Prema podacima o povijesti i ljudima Dalekog istoka i Perzijskog zaljeva vidi se da su u isto doba kineska džunka i arapski „dhow“ (dau) isto tako bili prikladni za određene svrhe kao i lađe Sredozemlja. Džunka je bila prikladna za prijevoz tereta priobalnim putovima, a „dhow“ za putovanje okeanom.

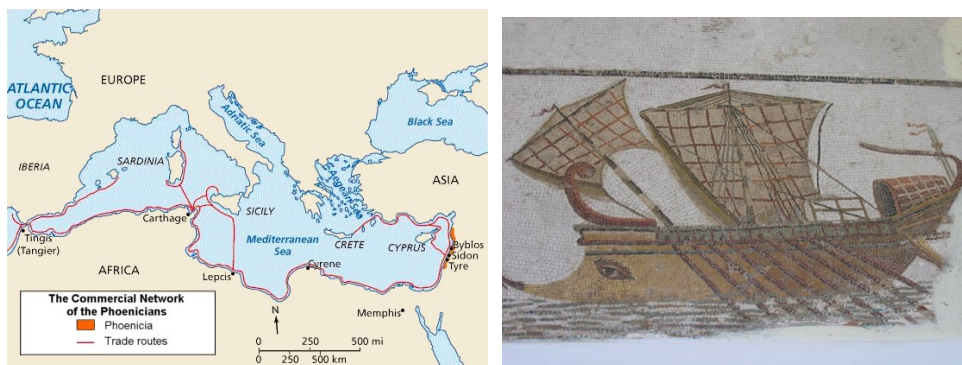
Feničani su, kao stari semitski narod Bliskog istoka⁶⁵, imali napredno znanje o izradi brodova i navigaciji. Zapamćeni su kao najbolji brodograditelji i najveći trgovci u historiji svog vremena. Zsigurno značajan doprinos kvalitetu njihovih brodova dalo je drvo cedrovina, koje uspijeva i danas u njihovoj domovini koja se nazivala Kanaan (današnji Libanon i šire). Trgovali su drvenom građom za izradu brodova s ostalim narodima Mediterana. Feničani su poboljšali rane egipatske modele brodova tako što su povećali brodsku nosivost i sposobnost za plovidbu morem. Skoro cijeli milenijum su bili vodeća pomorska sila Sredozemlja i u tom je razdoblju došlo do velike promjene u izradi broda. Pramac svakog broda opremali su kljunom koji je često imao oblik ovna, a upotrebljavao se da, po potrebi, probije trup neprijateljskog broda u bitkama. Kljun su gradili i na trgovačkim brodovima, jer su njime štitili teret od mnogih gusara u Egejskom moru.

Tek kada su se počeli graditi veliki jedrenjaci, vesla su se prestala upotrebljavati osim za tiha vremena ili kad su ulazili u usku luku.⁶⁶ Veoma poznati brodovi pod nazivom „trireme“ bili su dizajnirani za 170 ljudi za veslima na tri palube, bili su brzi i sigurni

⁶⁵ Feničani su bili potomci misterioznog „naroda mora“ koji su napustili Arabijski poluotoko oko 1200. g.p.n.e., nastanili se na istočnoj obali Mediterana, u zemlji Kanaan, što danas odgovara Libanonu (slika 2.10). Smatraju se starim hebrejskim narodom. Nisu uspjeli ustrojiti jedinstvenu državu nego mnogobrojne male gradove države bez većeg političkog utjecaja, ali su bili znatne gospodarske moći. Najpoznatiji gradovi: Biblos, Sidon, Arad i najveći od svih Tir. Priobalna područja cijelog Mediterana su postala važne trgovačke oblasti za Feničane.

⁶⁶ Grci i Rimljani su kasnije, kao novost uveli dva i tri reda vesala i takve su se galije održale dugo godina.

(slika 2.10), tako da ne čudi što su Feničani prvi pomorci koji su oplovili Afriku⁶⁷ u 6. st. p.n.e. Feničani su izveli prvu trgovačku plovidbu do Britanije (u 5. st. p.n.e.), a neki istraživači tvrde da su doplovili čak i do Brazila. Svoje sjajne pomorske sposobnosti⁶⁸ znali su i dobro naplatiti kao plaćenici u perzijskoj ratnoj floti. (URL 2.22)



Slika 2.10: Država Feničana-Kanaan, locirana na istočnoj obali Mediterana, i trgovačke rute u Sredozemlju, slika lijevo. Desno je pokazan feničanski brod iz Kartagine prikazan u mozaiku. Čuva se u najvećem muzeju mozaika na svijetu, u gradu Tunisu. izvor: [https://en.wikipedia.org/wiki/Bardo_National_Museum_\(Tunis\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Bardo_National_Museum_(Tunis))

Najtrajnije feničansko postignuće u pomorstvu bilo je uspostavljanje trgovačkih kolonija širom Mediterana (na Kipru, u Italiji, u južnoj Francuskoj i Španjolskoj, u sjevernoj Africi, na Malti, Baleari...), gdje su fenički gradovi naseljavali svoje stanovništvo, koje je sa sobom donosilo svoj jezik i običaje. Na taj način se feničanska kultura i civilizacija širila Mediteranom. Mnoge feničke kolonije s vremenom su postale samostalne, a najslavnija i najmoćnija od njih bila je Kartaga (koju je utemeljio grad Tir u 8. st. p.n.e., a nalazila se u blizini današnjeg grada Tunisa). Kartaga je bila najutjecajniji grad zapadnog Mediterana, sve do sukoba s Rimljanima nekoliko stoljeća kasnije.

Oko polovine 8. st. p.n.e. fenički gradovi-države na obali Zapadnog Mediterana, izgubili su svoju samostalnost od Asiraca, zatim od Neo-Babilonaca, Perzijanaca i ostalih osvajača koji su slijedili, ali fenička kultura je preživjela. Zbog njihovog velikog i raširenog utjecaja, *ugaritski alfabet*, koji su preuzeli i usavršili, prihvaćen

⁶⁷ Feničani su oplovili Afriku oko 9 stoljeća prije portugalcu Vasko de Gama (1460-1524.) koji je bio prvi Evropljanin koji je dospio do Indije (1498.) povezujući tako po prvi put u pisanoj historiji Evropu i Aziju okeanskim putem, i tako osigurao Portugalu dugi period kolonija u Aziji.

⁶⁸ Za vrijeme kralja Hiram I (dosaio na vlast 969. godine p.n.e) uspostavljen je savez Feničana sa vladarima Davidom i njegovim sinom Solomonom (po Kuranu Davud a.s. i Sulejman a.s.). Prema ugovoru koji su sklopili sa Salomonom Feničani su izgradili hram u Jerusalemu.

je i od starih Grka. Feničanski trgovački i ratni brodovi detaljno su opisani na (URL2.21).



Slika 2.11: Tipična fenička trirema, (lijevo) najbrži brod svog vremena, s kojim su Feničani prelazili velike udaljenosti. U sredini je „zaobljeni“⁶⁹ feničanski trgovački brod za prevoz tereta, koji se smatra najvećim doprinosom navigaciji svog vremena. Desno je feničanski ratni brod –galija iz perioda 1500-1000 g. p.n.e. Glava ovna je metalna i služila je da propije trup neprijateljskog broda u ratnim sukobima. (URL 2.23)

Sposobnost orijentacije prema nebeskim tijelima omogućila je Feničanima da se otisnu dalje od obale i plove otvorenim morem. Grci su zato zvijezdu Sjevernjaču, koju su Feničani najviše koristili u svojoj noćnoj navigaciji zvali *Feničanska zvijezda*.

2.5 Navigacija u starih Grka i Rimljana

Ovo poglavlje opisuje navigaciju i teorijska i praktična dostignuća koja su pomogla napretku navigacije u helenističkoj eri, tj. u razdoblju između 4. i 1. stoljeća p.n.e., kao i u periodu ranog i kasnog Rimskog carstva (27 g. p.n.e. do 284. g) i (284-476.g).

Stari Grci dali su značajan doprinos navigaciji uglavnom u unapređenjem teorije u polju astronomije i matematike. Kao navigatori nisu imali veliki napredak u izgradnji brodova i razvojem tehnika navigacije. Uglavnom su svoje brodove i flote koristili za ratovanje.

Teorijski doprinos starih Grka bio je kao što je naprijed rečeno na polju ustanovljavanju matematičkih i astronomskih principa koji se baziraju na bogatim praktičnim rješenjima problema iz Starog Egipta i Mesopotamije. Tako se pripisuje Heraklidu⁷⁰ (živio oko 550-480. g. p.n.e.) da je uočio da se unutarne planete našeg

⁶⁹ Zaobljen u smislu da je poprečni presjek kroz tijelo broda zaobljen. Takav oblik broda omogućavao je veliku zapreminu tereta, što je pogodovalo trgovini. Trgovina je bila osnovni cilj feničanske plovidbe. Posebno su bili poznati po specijalnoj veoma skupoj ljubičastoj boji za tkanine. Po toj boji su i dobili ime (grčki, Phoiniki – Φοίνικες- ljubičasti).

⁷⁰ Neki znanstvenici smatraju da je Heraklid svoja opažanja zasnivao na opažanju planeta koja su stoljećima redovno izvodili i zapisivali u opservatorijama stare Mesopotamije, od kojih je samo jedna opservatorija u Babilonu, čije su ploče sa zabilježenim opažanjima pokazane ranije. URL 2.27

sunčevog sistema kreću oko Sunca a Zemlja oko svoje osi⁷¹. Oko sto godina kasnije je Aristarhus⁷² (oko 310-230. g. p. n. e.) zaključio da, ne samo da Zemlja rotira oko svoje osi, nego i rotira oko Sunca, kao i ostale planete. Jedini do sada poznati astronom iz helenističke ere koji je podržavao njegovu heliocentričnu teoriju bio je Seleuk iz Seleukije⁷³, koji se rodio oko 40 godina poslije Aristahove smrti u Mesopotamiji.

Ranije su ova opažanja opisana kao zapisi na glinenim pločama. Pretpostavlja se da Hiparkos nikad nije posjetio Mesopotamiju, niti vidio babilonske ploče. Kako su podaci dospjeli u Grčku? Izgleda da je se Aleksandar Makedonski pri svojim vojnim osvajanjima Istoka dao prevesti zapise babilonskih ploča i poslao ih svom učitelju Aristotelu. Oko 150 godina kasnije je Hiparkos iz prevedenih tekstova na grčki izveo modele za kretanje Mjeseca i Sunca, sastavio trigonometrijske tablice, model predviđanja pomračenja Sunca, te sastavljanje zvjezdanog kataloga.

Najnovija arheološka istraživanja pokazuju da je Hiparkos svoje istraživanje zasnivao na višestoljetnim opažanjima nebeskih tijela, koja su svakodnevno prikupljali i bilježili kaldejski astronomi iz stare Mesopotamije.

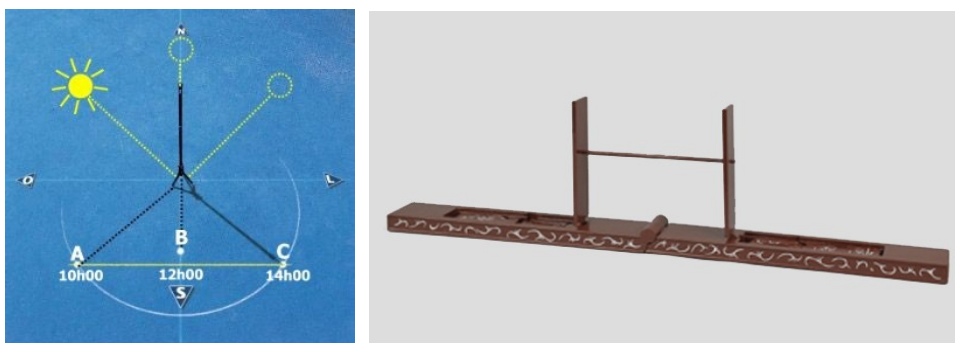
⁷¹ Heraklidov učenik je bio poznati filozof Sokrat. Sokrat je bio učitelj Platonu koji je osnivač prve organizirane škole u Atini, koja se nazivala akademija, a smatra se prvim univerzitetom zapadnog svijeta. Aristotel je pohađao Platonovu akademiju, a on je bio učitelj poznatog vojskovođe Aleksandra Makedonskog.

⁷² Aristarh (grčki: Ἀρίσταρχος, latinski: Aristarchus; 310. pne. - oko 230. pne.) - grčki astronom i matematičar, rođen na ostrvu Samos. Bio je prvi čovek koji je izričito argumentovao heliocentrički model Sunčevog sistema, koji u središte tada poznatog svemira postavlja Sunce, a ne Zemlju. U ovome je bio pod uticajem pitagorejca Filolaja iz Krotona, ali je, nasuprot njemu, "centralnu vatru" poistovetio sa Suncem, osim što je ostale planete ispravno poredao u odnosu na Sunce. Međutim, njegove astronomske ideje su odbačene u korist geocentričkih teorija Aristotela i Ptolomeja, dok ih skoro 1 800 godina kasnije nije uspešno oživio Nikola Kopernik i razradili i proširili Johanes Kepler i Isak Njutn.

⁷³ Seleuk iz Seleukije (grčki: Σέλευκος ο Σελεύκειος, latinski: Seleucus); rođen oko 190. p.n.e. bio aktivan u 150-tim p.n.e. Bio je helenistički astronom i filozof iz okoline Seleukije u Mesopotamiji, značajan po tome što je podržavao heliocentričku teoriju planetarnih kretanja. Budući je bio savremenik Hiparha, koristio se trigonometrijom, kojom je mogao dokazati heliocentrični sistem.

Današnja Evropa smatra Hiparkosa⁷⁴ najvećim astronomom helenističke ere. Smatra se da je upravo Hiparkos prvi predložio predstavljanje geografskog položaja tačaka pomoću sistema geografske širine i dužine na sferi.

Navigacijske karte zauzimaju veoma važnu ulogu kroz historiju navigacije, kao što je to slučaj i danas. Pravljenje navigacijskih karata je uvijek bio izazov. Eratosten je⁷⁵ oko 225. g. p.n.e. sastavio kartu tada poznatog svijeta.



Slika 2.12: Gnomon, astronomski instrument starih naroda. Spominje se kod starih Kineza, Mesopotamaca, Egipćana, Grka i Rimljana. Služio je za mjerenje vremena, za određivanje geografske širine, određivanje pravca sjevera, početak godišnjeg doba, trajanje tropske godine, nagib ekliptike, itd. Desno je kineska arheološka iskopina, za koju su arheolozi zaključili da je gnomom s podloškom (šablonom, zadnji datira iz oko 200 g.p.n.e <http://www.scinews.com/archaeology/article00292.html>). Principi rada gnomona opisani na URL 2.24.

⁷⁴Hiparkus (grčki Ἰππάρχος; oko 190 – oko 120.

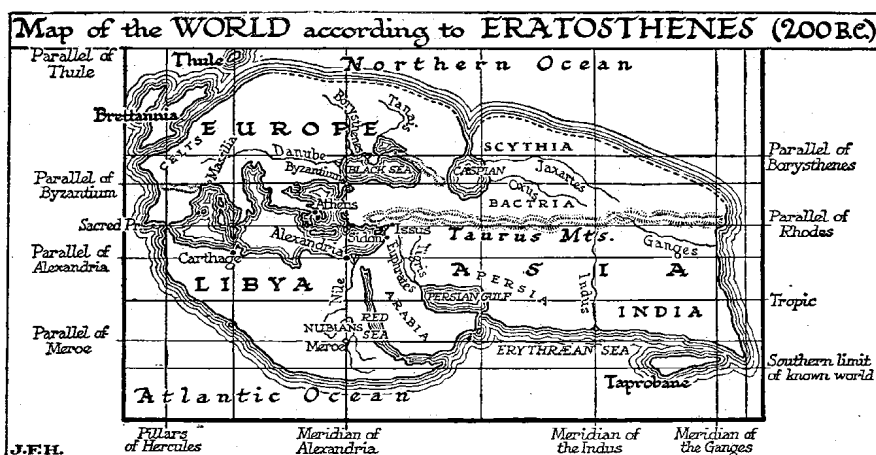
pne.), grčki astronom, geograf i matematičar. ESA je jedno svoje istraživanje, Hipparcos Space Astrometry Mission, nazvala upravo po njemu <http://science.nasa.gov/missions/hipparcos/>

Hiparh se rodio u Niceji (danas Izmir u Turskoj), a umro vjerojatno na otoku Rodu. Poznato je da je djelovao najranije od 147. pne. do 127. pne. Smatra se najvećim astronomskim opažačem, a po nekima i najvećim antičkim astronomom. Bio je prvi Grk koji je razvio kvantitativne i pouzdane modele Sunčeva i Mjesečeva kretanja koristeći promatranja i znanja koja su stoljećima skupljali Kaldeji iz Babilonije. Prvi je sastavio trigonometrijske tablice, koje su mu omogućavale rješavanje svakog trokuta. Sa svojim teorijama o kretanju Sunca i Mjeseca, te svojom brojčanom trigonometrijom, bio je vjerojatno prvi koji je razvio pouzdanu metodu predviđanja pomrčina Sunca. Ostala njegova postignuća uključuju otkriće precesije ekvinocija, sastavljanje prvog zvjezdanog kataloga te vjerojatno otkriće astrolaba. Klaudije Ptolomej se, tri stoljeća kasnije, mnogo oslanjao na Hiparha.

⁷⁵Eratosten je prvi u pisanoj historiji odredio poluprečnik Zemlje. Za detalje o Eratostenu vidjeti URL2.28

Smatra se da je pri izradi svoje karte, Eratosten koristio opažanja Piteja⁷⁶, kojem se pripisuje da je prvi osmislio određivanje geografske širine na osnovu mjerenja dužine sjenke astronomskog instrumenta gnomona⁷⁷, (slika 2.12). Pitej je i sam bio moreplovac. Oplovio je Britaniju, Island i Skandinaviju. (URL2.29). Eratostenova karta je prva imala ucrtane meridijane i paralele, kao što pokazuje slika 2.13. Smatra se da je nazive mjesta vjerovatno upisao prema opisima Aleksandra Makedonskog.

Heron⁷⁸ je u prvom stoljeću prvi na zapadu detaljno opisao odojmar. Uglavnom, dužina se računala iz izbrojanih obrtaja točka kojem je poznat poluprečnik.



Slika 2.13: Karta svijeta koju je sastavio Eratosten oko 220, g. p.n.e. (URL 2.30)

Klaudije Ptolomej⁷⁹ (100-160. g), poznat kao kartograf, napravio je prvu kartu svijeta, oslanjajući se na radove Hiparkosa, oko tri stoljeća poslije njegove smrti. Ptolemejeva originalna karta nikad nije pronađena, ali su napravljene brojne replike, koje se zasnivaju na poznatom djelu *Geografija*. Ovo poznato djelo je kompilacija svega

⁷⁶ Pitej je grčki istraživač koji je živio u feničanskoj koloniji Masalia, danas poznatom francuskom gradu Marseju.

⁷⁷ Nije sa sigurnošću utvrđeno koji je stari narod prvi izumio gnomon, Grci, Kinezi ili pak narodi Mezopotamije.

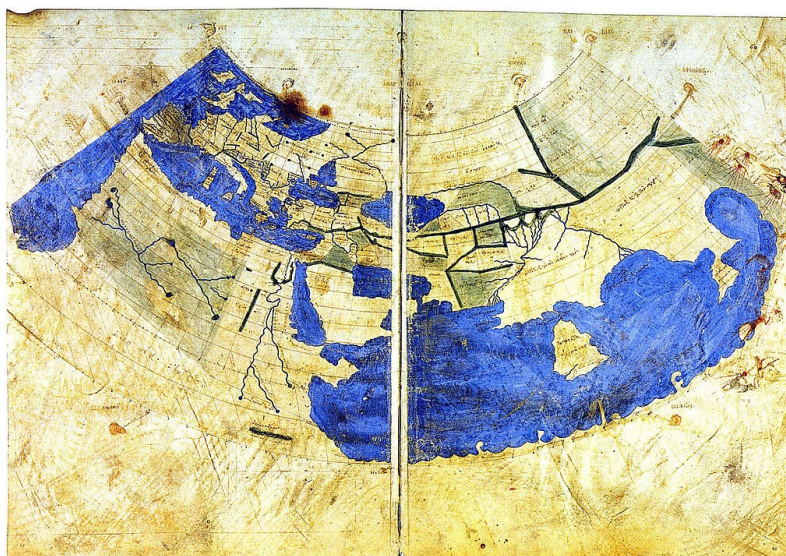
⁷⁸ Heron od Aleksandrije (oko 10 -70. g) je poznati grčki matematičar i inovator. Geodetima poznat po „Heronovom pravilu“ računanja površine trokuta na osnovu poznatih dužina strana trikuta. Neki smatraju da je opis baziran na Arhimedovim radovima. <http://hr.wikipedia.org/wiki/Heron>

⁷⁹ Klaudije Ptolomej ili Claudius Ptolemaeus (grčki: Κλαύδιος Πτολεμαῖος; iza 83 – 161. g. p.n.e.), Staroegipatski matematičar, geograf, astronom, i astrolog koji je živio u Rimskom Egiptu, vjerojatno rođen u Tebaidi u gradu zvanom Ptolemais Hermiasov, a umro u Aleksandriji. Pisao je na grčkom jeziku. U svojoj knjizi *Almagest* je zabilježio položaj 1080 zvijezda i podijelio ih u 48 sazviježđa. Njegov geocentrični sistem je pošao od Aristotelovih vjerovanja i održao se 1400 godina. Također je objavio i velik broj astronomskih karata, koje su u razdoblju renesanse imale velik utjecaj na razvoj evropske geografije i kartografije. Detaljno je razradio geocentrični sistem, koji je po njemu nazvan *Ptolomejev sistem*.

poznatog u drugom stoljeću naše ere, iz oblasti geografije, iz perioda Rimskog carstva. Ptolomej se donekle oslanjao na radove ranijeg geografa Marina⁸⁰ iz Tira⁸¹ te na geografske leksikone Rimskog i Perzijskog Carstva, kao i raspoloživih popisa geografskih naziva mjesta. Većina njegovih izvora izvan granica Carstva bila je ipak, nepouzdana.

Kao što je rečeno naprijed, originalne Ptolomejeve karte svijeta nisu do danas pronađene. Najstarija nacrtana karta na osnovu *Atlasa*, napravljena je oko 1300. godine, a pokazana je na slici 2.14.

Najpoznatije Ptolomejevo pisano djelo je ipak *Almagest*. Knjiga se izvorno zvala *Velika/matematička rasprava*. Ptolomeju se pripisuje zasluga opisa principa sfernih trokutova. Ipak, Ptolomej je u *Almagestu* opisao geocentrični sistem, zanemarujući Hiparkosov heliocentrični sistem, iako je koristio vjerovatno njegov katalog zvijezda, koji sadrži 1080 zvijezda razvrstanih u 48 sazviježđa, s njihovim položajima i zvjezdanim veličinama.



Slika 2.14: Ptolomejeva karta svijeta, nacrtana oko 13. stoljeća. URL 2.26

⁸⁰ Marin iz Tira (današnja Sirija) je geograf iz prvog stoljeća naše ere, čija je djela (karte) kritikovao Ptolomej u svojoj geografiji. Više detalja na internet stranama: <http://www.encyclopedia.com/doc/1G2-2830905894.html> i http://en.wikipedia.org/wiki/Marinus_of_Tyre

2.6 Navigacija u srednjem stoljeću

Srednjim stoljećem se obično smatra period između 500. godine pa sve do 1350/1450 /1500. (Hofman-Welenhof, 2003 str. 11).

Tokom osmog i devetog stoljeća, pomorska putovanja zabilježena na navigacijskim kartama, rasprostranjena su od Koreje do istočne Afrike. Magnetni kompas, prenosivi instrument⁸², kojeg su Kinezi izumili u 11. stoljeću, u navigaciji je uvedena u 12. ili 13. stoljeću. Neki izvori govore da su Italijani razvili kompas u isto vrijeme kad i Kinezi, ali

Pisani dokumenti govore da je *kvadrant*, instrument za mjerenje visine (elevacijskog ugla) nebeskih tijela, u Evropu donio poznati talijanski matematičar Leonardo Fibonacci iz Pize. On je vrlo mlad putovao u arapske države Sjeverne Afrike i tamo naučio matematiku⁸³, a

⁸² Ranije je navedeno da su stari Kinezi „statični kopas“ koristili za astronomiju i astrologiju mnogo ranije.

⁸³ Leonardo Fibonacci iz Pize je najpoznatiji po tome što je u Evropu donio arapske brojeve.

Glava 3

3 PRINCIPI SATELITSKE NAVIGACIJE

Satelitska navigacija predstavlja navigaciju koja se oslanja na dostupne radio signale koje emitiraju vještački sateliti, dok se kreću u orbitama na različitim visinama iznad Zemlje. Studenti geodezije su upoznati s osnovnim principima određivanja položaja geodetskih tačaka uz pomoć GNSS satelita. Zbog čitalaca koji nisu familijarni s principima satelitskog pozicioniranja osnovni detalji iz ove oblasti će ipak biti opisani.

3.1 Satelitski navigacijski sistemi

Satelitski sistemi koji su planirani ili izvedeni kao globalni navigacijski satelitski sistemi-GNSS, su kao što slijedi:

1. Globalnog pozicionirajućeg sistema-GPS, u vlasništvu Ministarstva odbrane SAD-a.
2. Globalnog navigacijskog satelitskog sistema-GLONASS, u vlasništvu Ruske Federacije.
3. Galileo, evropskog navigacijskog sistema, razvija se u kooperaciji Evropske Komisije i Evropske svemirske agencije-ESA.
4. BeiDou ili Compass, kineski navigacijski sistem.

Osim ovih globalnih navigacijskih sistema, u toku je razvijanje regionalnih navigacijski satelitski sistemi, kao što su:

5. Japanski kvazi-zenitni satelitski sistem-QZSS,
6. Indijski regionalni navigacijski satelitski sistem-IRNSS.

Kao potpora u prvom redu navigaciji civilne avijacije, pored ovih globalnih ili regionalnih navigacijskih sistema razvijeni su ili su različitim fazama implementacije posebni sistemi koji povećavaju tačnost satelitske navigacije. Ovi satelitski bazirani satelitski navigacijski sistemi zasnivaju se na principima diferenciranog GNSS-a, ili skraćeno DGNSS. U početku su bili namijenjeni samo za potporu civilnoj avijaciji ali se njihova primjena danas proširila na različite grupe korisnika.

Ovi satelitski sistemi predstavljaju svojevrsna proširenja globalnih ili regionalnih navigacijskih sistema. Zajednički naziv ovih sistema je SBAS (Satellite Based Augmentation Systems). SBAS sistemi su razvijeni u SAD-u (WAAS), Evropi (EGNOS). U različitim fazama razvoja su SBAS sistemi u Rusiji (SDCM), u Japanu (MSAS), Indiji (GAGAN), itd. Detaljno će biti opisani kasnije.

3.2 Različiti terestrički navigacijski sistemi

Navigaciju je također moguće raditi pomoću različitih radio signala koje emitiraju ne-satelitski sistemi za navigaciju, kao LORAN⁸⁴, OMEGA, Tacan, itd.

Loran navigacija se oslanja na signal koji emitiraju tri ili više Loran predajnika koji su fiksirani na stanicama s poznatim položajima. Sistem se dakle oslanja na mrežu predajnika koji su smješteni na visokim tornjevima ili posebno izgrađenim stupovima koji nose antene. Predajnici Loran sistema su raspoređeni na međusobnom odstojanjima od nekoliko stotina kilometara. Signal je značajno jači od GNSS signala, što ovom sistemu daje prednost i jedini je terestrički navigacijski sistem koji je opstao unatoč popularnosti GPS sistema. Loran C koristi frekvenciju od 100 kHz za noseći val. Zahvaljujući ovom, Loran signal može biti korišten za navigaciju u unutrašnjosti zgrada pa čak i u podzemlju, što ga čini primjenjivim i za „indoor“ navigaciju.

Radio navigacija je međutim, danas moguća primjenom sistema koji su razvijeni za druge svrhe, ali su vremenom razvijene njihove aplikacije i za navigaciju. Tipičan predstavnik takvih sistem su mobilni telefoni ili druga moderna mobilna digitalna osobna pomagala, koje obično nazivamo PDA (personal digital assistant), npr. prenosivi personalni računar-PC, tablovnik, kamera, itd. Osim spomenutog, moguće

⁸⁴ LORAN (LOng-range Aid to Navigation)

je za navigaciju koristiti signal digitalne TV, RFID čitače⁸⁵, BT uređaje⁸⁶, različite sisteme prenosa tekstualnih poruka SMTP⁸⁷, WiFi⁸⁸, itd. Ovi uređaji su naročito popularni za navigaciju u zatvorenim prostorima, tj. u okolnostima kad je prijem GNSS signala onemogućen ili otežan. Također se za navigaciju koriste različite računarske mreže kao LAN, MAN, WAN⁸⁹, itd.

Inercijski navigacijski sistemi-INS, mehanički ili elektronički sistemi, su potpuno autonomne naprave za navigaciju. Ipak, najbolji efekti se postižu ako se integriraju s drugim sistemima.

Postoji još veliki broj različitih terestrički-baziranih navigacijskih sistema (npr. TACAN), koji se često primjenjuju na i u okruženju aerodroma, luka i slično.

3.3 Kriteriji za usporedbu navigacijskih sistema

Postoje različiti kriteriji za usporedbu i odabir pogodnog navigacijskog sistema za primjenu u specifičnim projektima. Grawel i dr. u (2013 str. 36) navodi sljedeće kriterije:

1. korištene metode navigacije,
2. pouzdanost sistema,
3. tačnost navigacije,
4. dostupnost/pokrivenost u specifičnom regionu,
5. zahtijevane frekvencije prenosa signala,
6. interval vremena za popravljavanje navigacijskog položaja,
7. cijena korisničke opreme,

⁸⁵ Radio frekvencijska identifikacija-RFID je metoda automatske identifikacije, koja je u posljednjih nekoliko godina pronašla široku primjenu u navigaciji. Radi se o beskontaktnoj komunikacijskoj tehnici koja prenosi informacije za identifikaciju vozila, ali je primjenjiva za identifikaciju osoba, životinja, dobara i roba. Korištenje RFID-a omogućuje nam razne primjene koje s dosadašnjim identifikacijskim sistemima nismo mogli ostvariti. Jedan RFID sustav sastoji se s jedne strane od jednog nosača podataka (zvan Transponder ili TAG) i s druge strane od jednog pisača/čitača s antenom. RFID radi sa slabim elektromagnetskim valovima koji se očitavaju pomoću čitača. Ukoliko se transponder donese u područje dohvata antene onda se mogu očitati ili pohraniti podaci s transpondera bez ikakvog dodira. Postoje dvije vrste transpondera: aktivni i pasivni. Tipična upotreba RFID čitača sreće se svakodnevno: čitanjem bar koda koji sadrži informacije o izabranim artiklima na blagajni samoposluge. <http://www.tagnology.com/hr/rfid/sto-je-rfid.html>

⁸⁶ Bluetooth je tehnologija bežične komunikacije kratkog dometa za komunikaciju među uređajima na udaljenosti do približno 8 metara.

⁸⁷ SMTP (Simple Mail Transfer Protocol)

⁸⁸ Wi-Fi je Skraćenica za eng. „wireless fidelity“, što znači mogućnost bežičnog prenosa podataka.

⁸⁹ LAN, MAN, WAN su skraćenice za Local (Metropolis, Wide, respektivno) Area Network. Postoje i PAN (Personal), GAN (Global) ili ..

8. status razvijenosti sistema i spremnosti za upotrebu.

Na osnovu vlastitih zahtjeva i mogućnost, svaki korisnik treba donijeti odluku koji će sistem primjenjivati za specifični projekta, a na osnovu naprijed navedenih kriterija.

3.4 Principi satelitske navigacije

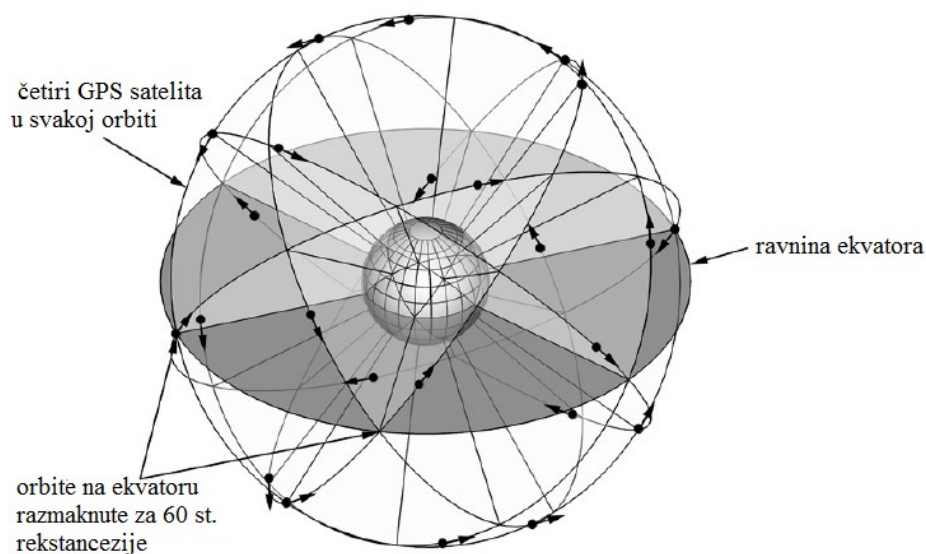
Globalni navigacijski satelitski sistemi-GNSS, zajedno s njihovim satelitski baziranim proširenim sistemima-SBAS, kao i njihova integracija sa širokim spektrom različitih senzora, zasigurno predstavljaju sadašnjost i budućnost navigacije na planeti Zemlji i njenom bližem okruženju. Budući najstariji GNSS, GPS sistem, ima najrašireniju primjenu, opis osnovnih principa satelitske navigacije zasnivat će se u ovom tekstu, upravo na ovom sistemu.

GPS sateliti su raspoređeni u šest orbitalnih ravnina, koje su u odnosu na ekvatorsku ravninu nagnute za 55°. U svakoj orbiti je nominalno raspoređeno po četiri satelita. Slika 3.1 pokazuje međusoban položaj šest orbitalnih ravnina, raspoređenih tako da su na ekvatoru razmaknute za 60° rektascenzije.

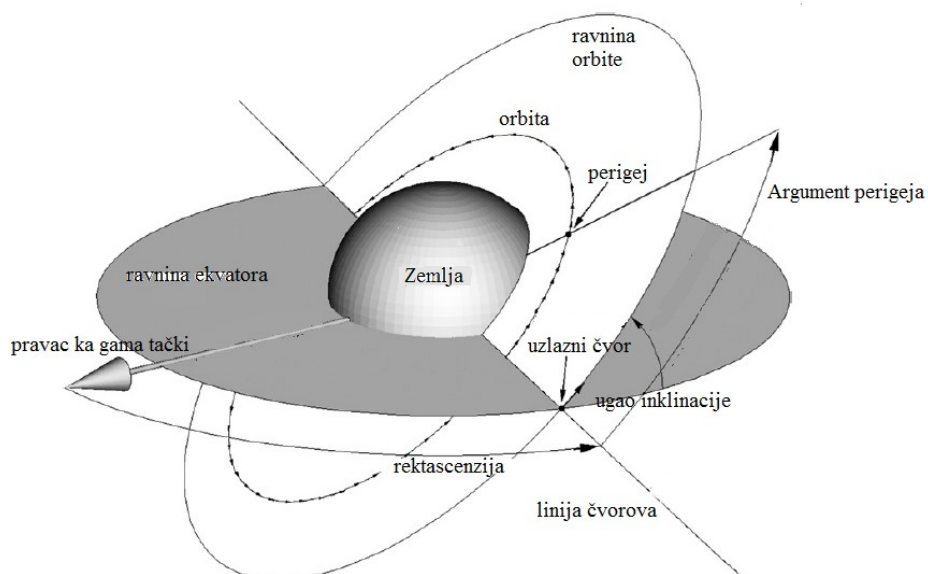
Slika 3.2 pokazuje parametre koji definišu geometriju orbitalne ravnine: ekvatorska ravnina, pravac ka tački proljetne ravnodnevnicke ili gama tački, liniji čvorova koja spaja ulazni i silazni čvor, inklinaciju orbite u odnosu na ekvatorsku ravninu, linija apsida koja spaja perigej⁹⁰ i apogej, te argument perigeja. Argument perigeja predstavlja ugao kojeg zaklapa linija apsida s ekvatorskom ravninom. U svakoj orbitalnoj ravnini je, nominalno⁹¹, smješteno po četiri GPS satelita.

⁹⁰ kad se satelit nalazi u perigeju onda je najbliže Zemlji, a kad se nalazi u apogeju onda je najviše udaljen od Zemljine površine.

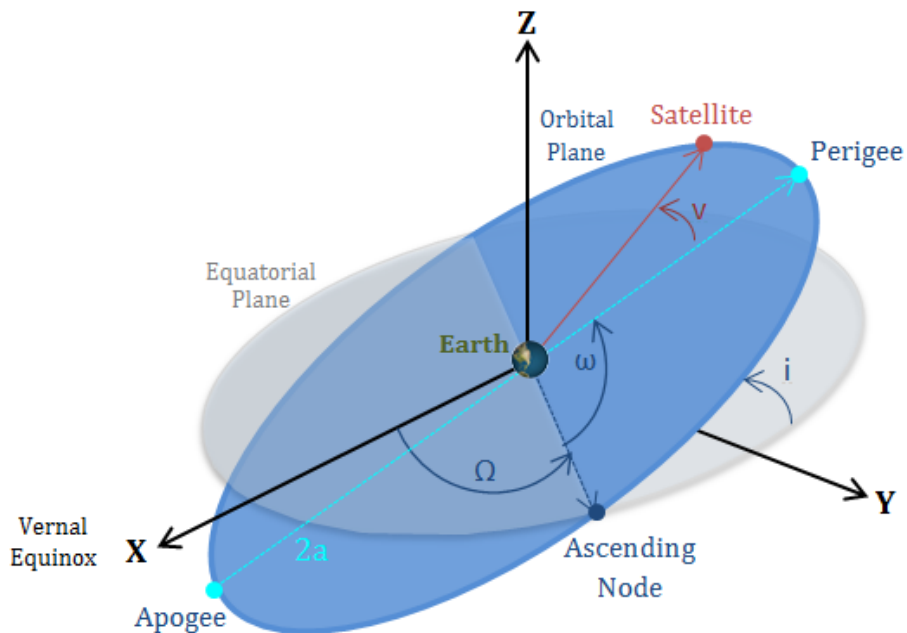
⁹¹ Razvojem i modernizacijom GPS sistema broj satelita je veći od nominalnih 24 satelita u 6 orbita. Trenutno u orbiti postoji 32 satelita. „Prekobrojni sateliti“ su dodani u orbite. Više informacija na (<http://cgls.uscg.mil>)



Slika 3.1: GPS sateliti smješteni u šest orbitalnih ravnina koje imaju inklinaciju 55° u odnosu na ekvator, a na ekvatoru su razmaknute za 60° rektascenzije (slika prilagođena iz Grewal i dr., 2008).



Slika 3.2: Parametri koji definiraju geometriju orbite GPS satelita (slika prilagođena iz Grewal i dr., 2008).



Slika 3.3: Elementi Keplerove elipse i pridruženi koordinatni sistem u kojem se određuje položaj satelita u odnosu na geocentar. (izvor: ESA, URL 3.1)

3.5 Navigacijsko rješenje

Dizajneri GPS sistema⁹² su imali za početni cilj određivanje položaja američkih podmornica sa zahtijevanom 2D tačnošću od oko 2 km. Dakle, visine⁹³ podmornica nisu bile relevantne. Kasnije se u primjeni sistema shvatilo da je GPS sposoban nuditi informacije o položaju u 3D prostoru.

Da bi se u nekom trenutku odredile tri nepoznanice koje definiraju položaj GPS prijemnika u 3D prostoru, (tj. X , Y , Z ili ϕ , λ , h) neophodno je, teorijski gledano, napraviti simultano mjerenje tri pseudoudaljenosti između satelita u orbitama i antene GPS prijemnika. Međutim, ranije je rečeno da su satovi u prijemniku male tačnosti. Izmjerene pseudoudaljenosti uz korištenjem kvarcnih satova u prijemniku imaju značajan sistematski utjecaj zbog spomenute pogreške sata prijemnika, te ne omogućavaju određivanje položaja prijemnika sa zahtijevanom tačnošću⁹⁴. Problem je principijelno riješen na sljedeći način: za određivanje 3D položaja simultano se

⁹² Ustvari, ovo je bio početni cilj dizajnera prvog satelitskog navigacijskog sistema nazvanog TRANSIT sistema koji je bio preteča GPS-a.

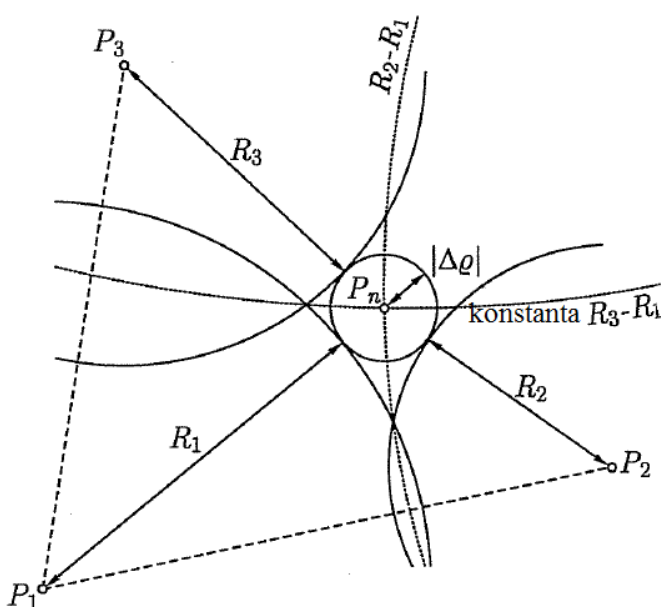
⁹³ Visine se obično određuju u odnosu na razinu mora, pa je u slučaju podmornice suvišno određivati visinu.

⁹⁴ Čak ni kad je ta tačnost niska, tj. zahtijevano oko 2 km.

mjere pseudoudaljenosti do četiri satelita, a sistematska pogreška sata prijemnika se u jednačine opažanja uvodi kao četvrta nepoznanica.

Geometrijsko rješenje problema pozicioniranja je upisana sfera, koja tangira tri sfere koje su definirane pomoću pseudoudaljenosti, kao što pokazuje slika 3.4. Centar sfere odgovara nepoznatom položaju antene prijemnika, a radijus sfere jednak je korekciji dužine, koju treba uvesti da bi se eliminirao utjecaj pogreške sata prijemnika.

U slučaju da se traži 2D položaj, broj nepoznanica se smanjuje na tri, te je neophodno simultano mjeriti pseudoudaljenosti R do tri satelita.



Slika 3.4: Geometrijsko rješenje 2D položaja korisnika, koje se procijeni na osnovu tri pseudoudaljenosti. (prilagođeno iz Hofmann-Wellenhof, i dr., 2003 str. 37)

3.6 Referentni koordinatni sistemi za satelitsku navigaciju

Da bi se metodama satelitske geodezije odredile koordinate tačaka na Zemljinoj površini potrebno je poznavati **najmanje tri** vrste referentnih koordinatnih sistema. Da bi se izrazio trenutni položaji satelita u njihovim orbitama u svemiru, neophodno je specificirati „referentni koordinatni sistem satelita“ koji je povezan s nebeskim

koordinatnim sistemom, preko tačke proljetne ravnodnevnicke koja se često naziva gama tačka⁹⁵.

Satelitski referentni sistem je tro-dimenzionalni pravougli koordinatni sistem koji je definiran pomoću satelitskih orbita. Položaje satelita je moguće transformirati u tro-dimenzionalni pravougli geocentrični sistem, koji je fizički povezan s tijelom Zemlje. Takav sistem se obično naziva „terestrički geocentrični referentni sistem“⁹⁶. Položaji novoodređenih stanica na Zemljinoj površini koji su rezultat satelitskih opažanja izražavaju se upravo u ovom koordinatnom sistemu. Međutim, zbog lakše orijentiranosti u prostoru opažača, geocentrične koordinate transformiraju se u „lokalni geodetski koordinatni sistem“⁹⁷. Ova tri koordinatna sistema su ovdje veoma kratko opisana zbog razumijevanja materije. Više detalja o koordinatnim sistemima u (Mulić, 2018)⁹⁸.

3.6.1 Satelitski referentni sistem

Kad se satelit lansira u svemir i nakon što uz pomoć telekomunikacijskih komandi odaslanih iz kontrolnog segmenta, satelit konačno zauzme svoj ciljani položaj u predviđenoj orbiti oko Zemlje, njegov položaj u orbiti uglavnom je upravljao gravitacijskom silom⁹⁹ Zemlje. Postoji međutim znatan broj drugih faktora koji utječu na kretanje satelita. Ovdje će biti navedene samo neke od tih sila: sile privlačenja Sunca i Mjeseca, kao i sile uzrokovane solarnom radijacijom. Zbog stalnog mijenjanja međusobnog položaja ovih nebeskih tijela kao i zbog stalnih varijacija solarne radijacije, sile koje djeluju na satelit nisu uniformne. Zbog ovoga kretanje satelita u orbiti varira u odnosu na njegovu idealnu (dizajniranu, izračunatu) putanju. Varijacije, tj. odstupanja od predviđene orbite (ili nekih dijelova orbite), koje satelit u svom kretanju oko Zemlje trpi, nazivaju se perturbacijama¹⁰⁰.

⁹⁵ Gama tačka predstavlja tačku presjeka srednjeg Zemljinog ekvatora s ekliptičkom ravninom (ravninom po kojoj se Zemlja reće u svojom godišnjem kretanju oko Sunca. Ovo se godišnje kretanje Zemlje naziva revolucija. Ekvatorska i ekliptička ravnina se sijeku pod uglom oko 23,5°. Sunce se u gama tački nađe trenutku proljetne ravnodnevnicke, tj. trenutku kad se „srednje“ Sunce nalazi u ravnini „srednjeg“ ekvatora, tj. kad u svojoj revoluciji prelazi iz južne u sjevernu hemisferu.

⁹⁶ osnovna ravnina terrestričkog geocentričnog sistema je ekvatorska, dok je osnovna ravnina satelitskog referentnog sistema ravnina orbite.

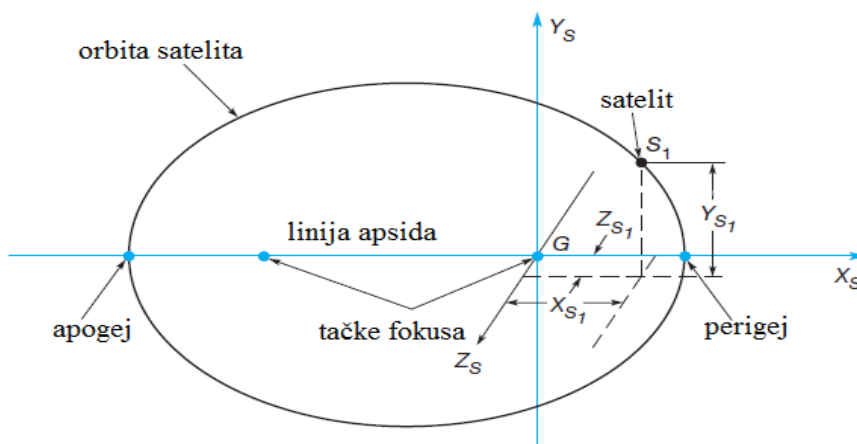
⁹⁷ Osnovna ravnina lokalnog geodetskog sistema je ravnina horizonta kroz opažanu geodetsku tačku.

⁹⁸ Detaljniji opisi koordinatnih sistema mogu se naći u udžbeniku Geodetski referentni sistemi iz 2018.

⁹⁹ Gravitacijsku silu Zemlje (silu Zemljinog privlačenja) treba posmatrati kao jednu od komponenti sile Zemljine težee, jer na satelit ne djeluje druga komponenta sile težee-centrifugalna sila, koja djeluje na predmete koji se nalaze na Zemljinoj površini, i rotiraju oko Zemljine osi zajedno s planetom.

¹⁰⁰ Perturbacija (lat. *perturbatio*: poremećaj). Općenito ovo znači narušavanje ustaljenoga reda, poremećaj, ili pomutnja. U astronomiji: poremećenje, odn. mala promjena pravilnog kretanja svemirskoga tijela. Razmatra se kao promjena staze svemirskoga tijela u dvojnomo

U cilju pojednostavljenja u razmatranju teorijskog pristupa definiranja referentnog sistema satelita, perturbacije se ovdje zanemaruju. Slika 3.5. predstavlja predodžbu idealne orbite satelita koja ima oblik elipse, a formira se samo pod djelovanjem sile privlačenja Zemljinih masa¹⁰¹, skoncentriranih u jednu tačku-geocentar. Slika također pokazuje satelitski referentni sistem u kojem se položaji izražavaju pomoću Dekartovih pravouglanih koordinata X_s , Y_s , Z_s .



Slika 3.5: Satelitski referentni koordinatni sistem.

Tačka orbitalne elipse u kojoj je satelit najbliže geocentru G naziva se *perigej*. Tačka orbitalne elipse u kojoj je satelit najviše udaljen od geocentra naziva se *apogej*. Linija koja spaja ove dvije karakteristične tačke orbite naziva se *linija apsida*. Ova linija također prolazi kroz dvije tačke žarišta elipse¹⁰². Linija apsida se smatra referentnom osi orbitalne elipse i poravnata je s osi X_s . Ishodište satelitskog koordinatnog sistema smješteno je u geocentar G. Z_s os ovog referentnog sistema okomita je na srednju orbitalnu ravninu. Os Y_s leže u srednjoj orbitalnoj ravnini i okomita je na os X_s . Veličina Z_s predstavlja odstupanje satelita od orbitalne ravnine, i obično je veoma mala. Kad se satelit nalazi u nekoj tački S_1 ima koordinate X_{s1} , Y_{s1} i Z_{s1} .

Za bilo koji trenutak opažanja, položaj satelita se može izračunati iz parametara orbite koji su sadržani u navigacijskoj poruci satelitskog GPS signala ili općenito, u

sistemu zbog djelovanja gravitacijske sile trećega tijela (problem triju tijela), ili se pak razmatra utjecaj više tijela. Tačna trajektorija može se proračunati samo numerički.

¹⁰¹ Ovu silu često nazivamo gravitacijskom silom.

¹⁰² Prema Keplerovim zakonima, geocentar G smješten je u jednu tačku fokusa/žarišta orbitalne elipse.

navigacijskim porukama GNSS sistema, ruskog GLONASS, evropskog Galileo ili kineskog BeiDou (Compass).

Cilj satelitskog pozicioniranja je odrediti položaj tačke na površini Zemlje. Zbog toga je pogodno te položaje izražavati u koordinatnom sistemu koji je vezan za Zemlju. Takav sistem zove se terestrički geocentrički referentni sistem.

3.6.2 Geocentrički koordinatni sistem

Ishodište geocentričkog sistema smješteno je u centar mase Zemlje. Slika 3.6 pokazuje takav geocentrički terestrički koordinatni sistem, povezan s referentnim elipsoidom. X_e os takvog koordinatnog sistema leži u ekvatorskoj ravnini i prolazi kroz srednji Grinvički meridijan, Y_e os je također u ekvatorskoj ravnini i okomita je na X_e os, dok Z_e os koincidira sa srednjim položajem Zemljine rotacijske osi.

Da bi se napravila transformacija koordinata iz satelitskog referentnog sistema u terestrički geocentrički referentni sistem, potrebno je poznavati četiri uglovna parametra koji definiraju odnos između satelitskog orbitalnog referentnog sistema i osnovnih ravnina i linija na Zemlji.

Slika 3.6. pokazuje odnos ovih parametra, koji predstavljaju samo dio elemenata Keplerove elipse:

1. ugla inklinacije¹⁰³ i ,
2. argumenta perigeja¹⁰⁴ ω ,
3. rektascenzija uzlaznog čvora¹⁰⁵ Ω ,
4. Grinvički satni ugao¹⁰⁶ tačke proljetne ravnodnevnice, GHA_γ .

Ovi parametri su uvijek poznati u realnom vremenu, za svaki satelit, a na osnovu prediktivnog matematičkog modela orbita. Emitiraju se u navigacijskoj poruci, te na osnovu ovih emitiranih informacija prijemnik na opažanoj stanici na Zemljinoj površini računa trenutni položaj svakog opažanog satelita.

Da bi se izračunale preturbacije GPS i Galileo satelita u njihovim orbitama navigacijska poruka sadrži elemente Keplerove elipse, a perturbacije se tretiraju kao temporalne varijacije ovih parametara orbita.

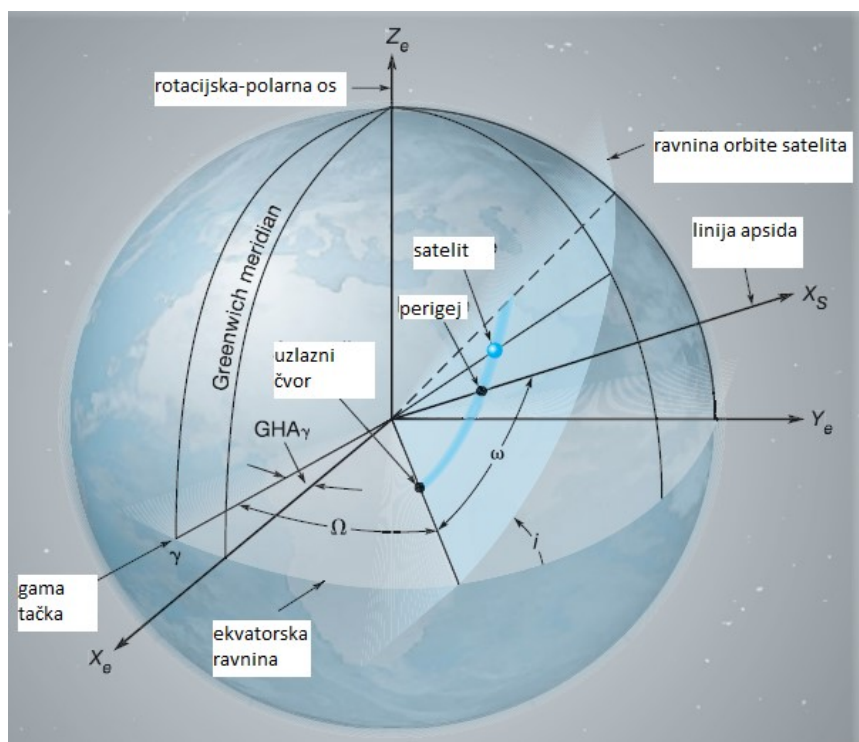
¹⁰³ inklinacija je ugao između orbitalne ravnine i ravnine Zemljinog ekvatora.

¹⁰⁴ argument perigeja je ugao u orbitalnoj ravni između ekvatora i linije apsida.

¹⁰⁵ ugao u ravnini ekvatora od tačke proljetne ravnodnevnice do presjeka orbitalne i ekvatorse ravnine.

¹⁰⁶ ugao u ekvatorskoj ravnini između Grinvičkog meridijana i tačke proljetne ravnodnevnice ili gama tačke.

Kad projekat zahtijeva postizanje visoke tačnosti položaja opažanih GNSS stanica, onda je pri obradi podataka opažanja potrebno koristiti precizne efemeride, koje se dobiju iz opažanja satelita na permanentnim stanicama globalnih mreža. Precizne efemeride se publiciraju u globalnom terestričkom geocentričnom referentnom sistemu i dostupne su 12 do 18 dana poslije datuma kad su izvršena GNSS opažanja.



Slika 3.6: Veza satelitskog i terestričkog referentnog koordinatnog sistema. (izvor: Ghilani i Wolf, 2012)

3.6.3 Geodetski koordinatni sistem

Položaji geodetskih tačaka dobijeni metodama satelitskog premjera izračunati su u terestričkom globalnom geocentričnom referentnom sistemu. Predstavljanje koordinata u ovom sistemu ima prednosti i nedostatke. Nedostaci bi se mogli definirati kao što slijedi:

Ishodište globalnog geocentričkog sistema nalazi se u centru Zemlje, te su geocentrične Dekartove koordinate za položaje tačaka na površini Zemlje (ili u njenom okruženju-npr. položaji aviona) veoma velike vrijednosti. Zbog ovoga ih je komplicirano koristiti u svakodnevnoj geodetskoj praksi.

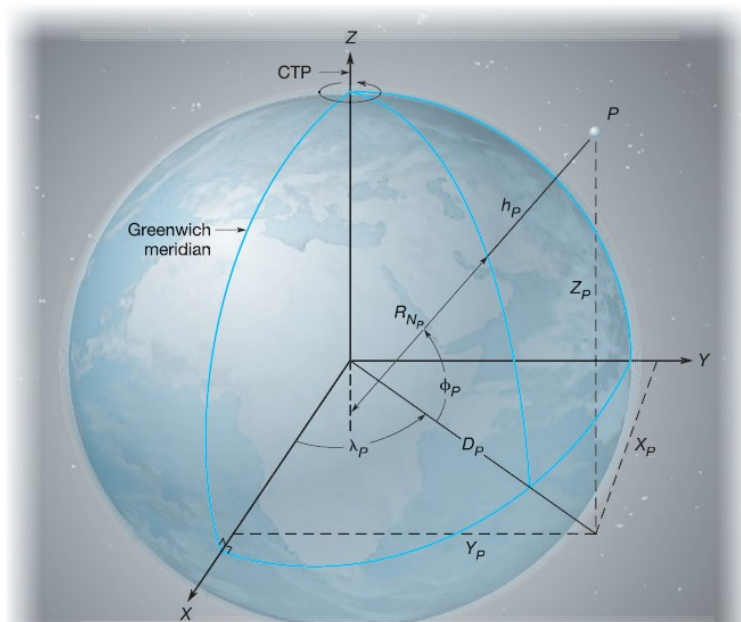
Osnovna ravnina sistema je ekvatorska, u kojoj leže osi X i Y. Zbog ovoga se geodeti teško orijentirati u prostoru, tj. nemaju očiglednu vezu s konvencionalnim pravcima u prirodi i na površini Zemlje: sjever-jug, istok-zapad.

Geocentričke koordinate ne daju nikakve pokazatelje o relativnoj visini između tačaka na terenu.

Zbog navedenih razloga, Dekartove pravougle koordinate iz globalnog geocentričkog terestričkog sistema se prevode u *geodetske koordinate* koje se odnose na *referentni elipsoid*. Dakle, X, Y, Z se prevode u geodetsku širinu (latitudu) ϕ , geodetsku dužinu (longitudu) λ , i geodetsku¹⁰⁷ visinu h . Ovakav način predstavljanja položaja stanica za geodete tradicionalno ima više pogodnosti daje mogućnost bolje orijentacije u prostoru.

Međutim, važno je napomenuti da se globalne geocentrične koordinate zbog bolje predodžbe često transformiraju u „lokalni geodetski referentni koordinatni sistem“ NEU. Takav lokalni koordinatni sistem je trodimenzionalan, ishodište sistema nalazi se u geodetskoj tački na površini Zemlje. Njegova glavna ravnina je horizontalna ravnina. Orjenatcija koordinatnih osi u prostoru definirana je kao što slijedi: treća os U okomita je na horizontalnu ravninu i podudara se s normalom u geodetskoj tački. Pozitivan smjer treće osi usmjeren je ka tački *geodetskog zenita*. Pozitivan smjere prve osi, N, usmjeren je ka sjeveru. Druga os E usmjerena je ka istoku, okomita je na prvu i treću os, i formira lijevo orijentirani koordinatni sistem.

¹⁰⁷ geodetskom visinom naziva se visina tačke iznad elipsoida.



Slika 3.7: Geodetski globalni terestrički sistem. Položaj tačke P izražen koordinatama XYZ ili geodetskim koordinatama: g. širinom, g. dužinom i g. visinom. (izvor: Ghilani i Wolf, 2012)

Glava 4

4 RADIO NAVIGACIJSKI SATELITSKI SISTEMI

Radio navigacijski satelitski sistemi-RNSS razvijeni su kao logičan slijed napretka u tehnologije tokom polovine dvadesetog stoljeća. Do tada su razvijeni radarski i sistemi za elektro-optičko mjerenje dužina (eng. electro-distance measurement - EDM), koji su primjenjivani za geodetski premjer metodom trilateracije ili za navigaciju brodova i aviona tokom drugog svjetskog rata i kasnije u doba „hladnog rata“. Ustanovljeni su, kao što je ranije opisano, hiperbolički navigacijski radio sistemi Decca, Omega i LORAN. Za njihovu primjenu bilo je neophodno imati razvijenu mrežu predajnika niskofrekvencijskih radio signala. Predajnici su bivali postavljeni na visokim stubovima, negdje na kopnu, uglavnom blizu obala okeana i na otocima. Prijemnik signala je bivao postavljen na avionima, brodovima ili podmornicama.

Međutim, da bi se ubrzao geodetski premjer i kartografisanje većih površina, razvijeni su vojni hiperbolički sistemi, koji su koristili avione kao platforme za predajnike radio signala, dok su prijemnici bili postavljeni na kopnu, moru ili zraku, statični ili na pokretnim objektima. Iz tog vremena su poznati sistemi kao: HIRAN (High frequency Ranging and Navigation), SHORAN (Short-RANGE navigation) SHIRAN ("S" band HIRAN). Geodeti i geofizičari su počeli primjenjivati ove navigacijske hiperboličke sisteme šezdesetih godina dvadesetog stoljeća za geodetski premjer i kartografisanje teritorija velikih¹⁰⁸ država kao što su SAD, Kanade i Australije. Prema pisanju Paul Wise, objavljenom na web strani Australijske Nacionalne Agencije za Kartografiju - NATMAP (The Division of National

¹⁰⁸ Ovdje se pod izrazom „velika država“ misli na državu s velikih površinama teritorija. U ovim državama klasična geodetska terestrička mjerenja nisu bila ekonomski isplativa jer bi mjerenja trajala predugo. To je vjerovatno jedan od razloga zašto ove države nisu imale do tog vremena geodetski premjer (matematički zasnovan) cijele teritorije, kao što je to bio slučaj u većini evropskih država, uključujući Bosnu i Hercegovinu.

Mapping) dužine strana trilateracijskih mreža mjerenih pomoću ovih navigacijskih radio sistemima bile su u prosjeku duge oko 550 km, najduža strana iznosila je 880 km, a najkraća 135 km. (NATMAP, 2018). dostupno online na linku: <https://www.xnatmap.org/cpng/docs/hiran4web.htm>)

Nakon ovih tehnološkim dostignuća, razvijali su se kompjuteri, a u oktobru 1957. godine stručnjaci iz Sovjetskog Saveza lansirali su prvi vještački satelit Sputnik¹⁰⁹. Satelit u orbiti je emitirao radio signal koji su amerikanci špijunirali uz pomoć specijalno razvijenog radio prijemnika. Na osnovu poznatog položaja svog radio prijemnika i Dopplerovog efekta primljenog satelitskog radio signala, izračunali su putanju satelita. Iz ovog se rodila ideja da se u inverznom postupku, kad je poznat položaj satelita u orbiti, može odrediti položaj prijemnika na Zemlji. Prednost navigacije uz korištenje satelitskih sistema je navigacija na globalnom nivou, tako da se trenutni položaji, orijentacija i brzina kretanja svih objekata izražavaju u jedinstvenom globalnom koordinatnom sistemu. Ovo je za Ministarstvo odbrane (Department of Defense - DoD) Sjedinjenih Američkih Država bila glavna ideja vodilja za investiranje u razvoj satelitskih navigacijskih sistema. Prvi satelitski navigacijski sistem razvili su dakle amerikanci i nazvali ga **Transit** satelitski sistem.

4.1 Transit navigacijski sistem

Transit, prvi američki satelitski sistem za navigaciju, također poznat i kao NAVSAT. Međutim, korišten je i formalniji naziv, Mornarički navigacijski satelitski sistem ili skraćeno NNSS (Navy Navigation Satellite System). Prvi uspješno lansirani američki satelit Transit-1B¹¹⁰ poslan je u orbitu 1960. godine. Slijedile su četiri godine različitih problema u razvoju sistema i konačno je 1964. godine, Transit sistem bio kompletiran sa šest satelita u orbiti i predat na upotrebu američkoj mornarici. Prva namjena sistema je bila određivanje položaja/navigacije američkih podmornica Polaris¹¹¹, sa zahtijevanom 2D tačnošću od oko 2 km. Preciznije rečeno, Transit je omogućavao Polaris podmornicama da tokom patroliranja, periodično „popravljaју“ položaj određen inercijalnim navigacijskim sistemom – INS, a u cilju održavanja tačnosti sistema raketnog nuklearnog naoružanja.

Geodeti su transit sistem primjenjivali za određivanje položaja geodetskih tačaka. Antena povezana s prijemnikom bivala je postavljena iznad geodetske tačke. Slika 4.1 desno pokazuje Transit prijemnik najviše tačnosti, koji se u to vrijeme smatrao veoma laganim, a podaci opažanja su bilježeni na magnetnu vrpcu u kaseti. Kasete

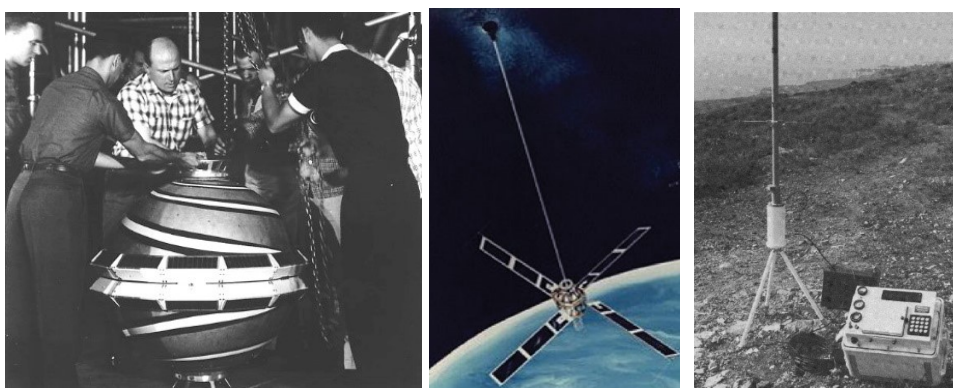
¹⁰⁹ Sputnik na ruskom jeziku znači pratilac ili satelit.

¹¹⁰ Lansiranje satelita Transit -1A nije uspjelo.

¹¹¹ Podmornice Polaris su nosile interkontinentalne nuklearne rakete razvijene u doba „hladnog rata“ sa tadašnjim Sovjetskim Savezom.

su se mijenjale tokom sesija opažanja, a prikupljeni podaci na kasetama su se obrađivali u specijaliziranim računskim centrima.

Prototip satelita Transit-1A pokazuje slika 4.1 lijevo. Transit Sateliti su bili veoma lagani, težili su oko 61 kg, te njihovo lansiranje nije iziskivalo skupe rakete kao što je slučaj s modernim navigacijskim satelitima. Sateliti su se kretali po kružnim, polarnim orbitama, na visini oko 1 075 km (Stansel, 1978, str. 4), a orbitalni period bio je oko 107 minuta. U orbiti je bilo šest satelita, što je bilo nedovoljno za postizanje tačnosti navigacije u realnom vremenu, kakvu pružaju aktuelni GNSS (Globalni navigacijski satelitski sistemi) jer se na prolaz pojedinog satelita trebalo čekati u prosjeku od 35 do 100 minuta, ali je čekanje ponekad trajalo i po 4 h (za satelita čija je elevacija bila između 15° i 75°), a na lokacijama s velikim geodetskim širinama i po 24 h.



Slika 4.1: Prototip satelita Transit -1A, (lijevo, izvor: URL 4.1) Transit satelit u orbiti sa četiri sunčana panela (u sredini; izvor: GPS World, 2010). Prijemnik i antena tipa Magnavox MX1502 Satellite Surveyor, desno (izvor: Stansel, 1978, str. 25).

Tačnost pozicioniranja statičkih (geodetskih i geofizičkih) mjerenja Transit sistema, nakon niza poboljšanja tokom godina razvoja i upotrebe, bila je ispod jednog metra, što je bilo zadovoljavajuća tačnost za to vrijeme, ali su prijemnici bili skupi, opažanje je bilo dugotrajno. Najveća prednost, kao što je već konstatirano naprijed, je bila ta što su položaji opažanih tačaka bili izraženi u jedinstvenom geocentričnom sistemu. Ovu prednost iskoristili su geodeti za određivanje geodetskih mreža i definiranje globalnog geodetskog geocentričnog referentnog sistema. Osim globalnog pozicioniranja uočene su i sljedeće prednosti:

1. Opažanja radio signalima moguće je po svim vremenskim uvjetima, po danu i noći,

2. Za opažanje nisu bili potrebni predajnici na kopnu, što je za vojsku bilo od presudnog značaja jer prije nisu mogli imati svoj sistem na globalnoj razini. Ovo je davalo do tada besprimjenu neovisnost od drugih država i sistema.
3. Tačnost je bila bliska onoj koju su postizali drugi radio sistemi za navigaciju tog vremena: Loran, HIRAN, SHIRAN.

Položaj antene radio-prijemnika se dobivao na osnovu Dopplerovog efekta radiofrekvencijskog signala, satelita u pokretu. Mjerenje je trajalo oko 15 minuta dok se satelit približavao i udaljavao od antene prijemnika. Kad bi se satelit udaljio od opažačke stanice prijemnik je, u cilju uštede energije u bateriji, prelazio u mirovanje, a na osnovu podataka almanaha, uključivao se ponovo u vremenu kad se predviđao dolazak sljedećeg satelita.

Pri obradi podataka računata su srednje vrijednosti određenih (fiksiranih) položaja iz većeg broja¹¹² prolaza satelita iznad opažane stanice. Sistem se stalno unaprjeđivao tokom vremena, a kasnijim poboljšanjima sistema Transit tačnost položaja izračunatog iz jednog prolaza satelita bila je oko 200 m, a iz usrednjavanja više satelita mogla se dobiti tačnost od oko 20 metara. Iz usrednjavanja se ostvarivala tačnost bolja od jednog metra (Stansel, 1978; Kramer, 2013). U to doba je to bilo najtačniji sistem za navigaciju. Poznati globalni geodetski referentni sistem WGS84 (World Geodetic System) je određen iz opažanja satelitskog navigacijskog sistema Transit.

Iskustva stečena u nizu istraživačkih projekata u oblasti satelitske tehnologije omogućili i istraživanja Zemlje primijenjena su za dizajniranje i razvoj modernih Globalnih navigacijskih satelitskih sistema – GNSS, a ovdje se samo spominju najvažnije:

- Istraživanje globalnog Zemljinog gravitacijskog polja te ustanovljavanje globalnog gravitacijskog modela¹¹³, modela globalnog geoida, modela plimnih valova okeana, model morskih struja, struktura i dinamika „čvrste“ Zemljine kore, itd.
- Istraživanje globalnog modela Zemljinog magnetnog polja i njegovih vremenskih i prostornih varijacija.

¹¹² Ne tako velikog broj aprolaz akao kod modernih sistema. Ovdje se misli na više desetina prolaza satelita iznad radio prijemnika tokom dužih sesija opažanja.

¹¹³ Prvi globalni gravitacijski modeli Zemlje razvijeni su na osnovu opažanja satelitskih misija GEOS (Geodetic Orbiting Earth Satellite) 1, 2, 3. Prvi takav satelit lansiran je 1965. godine. Danas postoji niz globalnih gravitacijskih modela koje su rezultat različitih satelitskih misija ili kombinacije podataka iz satelitskih i terestričkih gravimetrijskih mjerenja. Primjer Zemljinog globalnog gravitacijskog modela su npr. EGM 2008 (Earth Gravitational Model) ili EGM 2020.

- Istraživanja atmosfere kao sistema, uključujući istraživanja i ustanovljavanje modela jonosfere, modela sunčeve i kosmičke radijacije, globalnog modela troposfere, itd.

Pored naprijed navedenog, navode se u najkraćem važniji detalji iz samo dva najistaknutija projekta koja su dala osnove za razvoj modernom američkom satelitskom navigacijskom sistemu GPS: sistemu Timation i Projektu Američke avijacije poznatom pod nazivom 621B.

4.1.1 Timation

Satelitski sistem **Timation**, započet je u Washingtonu 1964. godine, imao je zadatak da osmisli, razvije i lansira sistem koji je sposoban da emitira referentno vrijeme visoke preciznosti, a sve s ciljem određivanja udaljenosti od satelita do prijemnika na Zemlji. Prvi, Timation 1 satelit, lansiran je 1967. godine, a imao je ugrađen visoko stabilni kvarcni sat. Težio je samo 38,5 kg. Pokazalo se da ovaj kvarcni sat u svemiru nije imao zadovoljavajuću stabilnost, vjerovatno zbog djelovanja kosmičkog zračenja i temperature. Drugi Timation 2 satelit, lansiran 1969. godine, emitirao je signal na dvije frekvencije, s ciljem kalibriranja jonosferskog grupnog kašnjenja. Kvarcni sat opet nije pokazivao očekivanu stabilnost. Posljednji satelit u nizu ovog programa, lansiran je 1974. godine, pod promijenjenim nazivom Timation NTS-1 (Navigation Technology Satellite). Nosio je dva modificirana komercijalna rubidijumska sata, koja se nisu pokazala stabilna zbog tehničkih problema s održavanjem visine te varijacija temperature uvjetovane ovim tehničkim problemom. Težio je oko 295 kg, orbitirao na visini 13 890 km. Iako je ovaj satelit zabilježen kao prvi koji je u historiji satelitskih istraživanja nosio atomski sat u svemiru, testiranja nisu dala zadovoljavajuće rezultate. Sat se pokazao veoma osjetljiv na temperaturne varijacije (GPS World, 2010).

4.1.2 Projekt 621B

Neizostavno se ovdje treba spomenuti tkz. Projekt 621B¹¹⁴ koji je u tajnosti provodila Avijacija SAD-a. Zadatak projekta je bio dizajnirati i testirati novu vrstu signala, moduliranog sa pseudoslučajnim kodom PRN (Pseudo Random Noise). Cilj ovog projekta je bio omogućiti precizno mjerenje udaljenosti (eng. *ranging*) između radioprijemnika i radiopredajnika (na satelitu), te osigurati precizno mjerenje i sinhronizaciju vremena. Tehnika moduliranja je primijenila ponavljanje digitalnih nizova slučajnih bita. Ovo omogućuje da korisnik s navigacijskim uređajem odredi početak („fazu“) ponovljenog niza (kodirane sekvence).

¹¹⁴ Projekt 621B je bio projekt Američkih zračnih snaga i razvijan je u tajnosti.

Iskustava stečena u razvoju i primjeni navigacijskog Transit sistema u sinergiji s iskustvima iz projekata Timation i 621B, te razvoj elektronike, omogućili su da se razvije danas najviše primjenjivani američki navigacijski satelitski sistem GPS (Global Positioning System).

4.2 GPS navigacijski sistem

Najstariji, najpoznatiji i najčešće korišteni Globalni navigacijski satelitski sistem (GNSS) današnjice je američki Globalni pozicionirajući sistem - GPS. Sistem nudi besplatan signal za pozicioniranje i mjerenje vremena za korisnike koji se nalaze bilo gdje na planeti ili u bližem svemiru. GPS prijemnici računaju svoj položaj u referentnom koordinatnom sistemu nazvanom WGS84 (World Geodetic System) uz korištenje satelitske tehnologije koja se zasniva na principu prostorne-3D trilateracije.

Sistem je naravno dizajniran za američku vojsku, ali je već tokom eksperimentalne faze implementacije sistema, američka vlada odlučila da sistem učini dostupnim i za civilne korisnike. Raznolikost i brojnost različitih kreativnih primjena GPS sistema proistekli su upravo iz činjenice da korisnici sistema dolaze iz različitih zajednica. Moglo bi se reći da je odluka vlade da sistem učini dostupnim civilnom sektoru dao zamah brojnosti aplikacija.

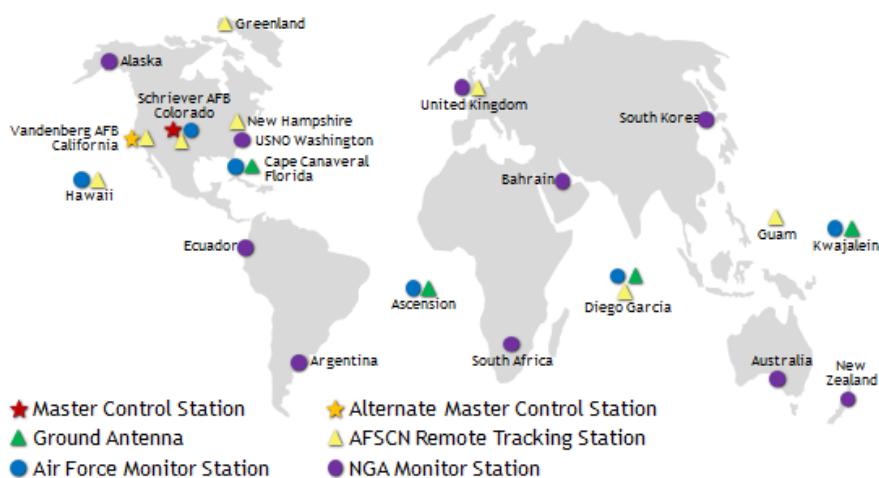
Prvi satelit iz Blok I lansiran je 22. februara 1978. godine, ali je tek u decembru 1993. godine proglašena inicijalna faza operativne sposobnosti sistema, kad je u orbiti bilo 24 satelita. Konačno, u junu 1995. proglašena je potpuna operativna sposobnost sistema. Puna odgovornost za implementaciju i održavanje sistema u domenu je Ministarstva odbrane SAD (DoD).

GPS sistem, kao i GNSS sistemi općenito, sastoji se od tri segmenta: svemirskog, kontrolnog i korisničkog. Osnovni segmenti i principi rada su slični za sve satelitske navigacijske sisteme. Stoga je ovdje detaljno opisan GPS sistem kao najpopularniji predstavnik grupe. Kasnije se kod opisa drugih GNSS sistema navode značajne informacije i podaci po kojima se ti sistemi razlikuju od GPS sistema.

4.2.1 Kontrolni segment

Kontrolni GPS segment sačinjen je od globalne mreže kompleksnih infrastrukturnih postrojenja i stanica na površini Zemlje. Stanice su opremljene specijalnim radio prijemnicima i prate sve GPS satelite u vidnom polju, nadgledaju prenos svih GPS satelitskih signala L opsega, provode analize opažanja, obrađuju podatke opažanja, a po potrebi šalju komande i podatke svim GPS satelitima, osvježavaju podatke navigacijske poruke, više puta u toku dana. Također, prate „zdravstveno“ stanje

satelita, provode i nadgledaju manevre satelita, i rade mnoge druge aktivnosti uključujući dopunjavanje baterija. Sve ove aktivnosti moraju biti sinhronizirane.



Slika 4.2: Karta postrojenja i stanica GPS kontrolnog segmenta. (URL2a)

Trenutni operativni kontrolni segment uključuje glavnu/master kontrolnu stanicu (locirana u Schriever, Colorado), alternativnu „master“ kontrolnu stanicu (locirana u vojnoj bazi američke avijacije u Vanderbegu, California), te 12 komandnih i kontrolnih antena i 16 monitor stanica, globalno raspoređenih, kao što pokazuje Slika 4.2. Slika 4.3 pokazuje (lijevo) unutrašnjost glavne (master) stanice pod kontrolom američkih zračnih snaga, a slika desno pokazuje antenu za komunikaciju sa satelitima.



Slika 4.3: Kontrolna „master“ stanica u Koloradu: vojnici američkih zračnih snaga nadziru svemirski segment (lijevo). Antena za komunikaciju s GPS satelitima za slanje komandi i podataka, te za kontrolu sistema (desno). (URL2b)

U procesu modernizacije GPS sistema kontrolni segment zahtijeva najveća financijska ulaganja, a budžet namijenjen za modernizaciju kontrolnog sistema više je puta prekoračen, što je naravno bio predmet rasprava u Kongresu SAD. Modernizacija kontrolnog GPS segmenta je kasnije razmatrana s više detalja.

Glavna kontrolna stanica MCS (The Master Control Station) između ostalih zadataka kontrolira orbite satelita. Vojnici provode manevre tek lansiranih satelita i pomjeraju ih iz visokoekscentrične orbite u koju novi sateliti bivaju „izbačeni“ te ih smještaju u planirani položaj i orijentaciju tijela satelita. Vojska također nadgleda stanje svakog pojedinog satelita, uključujući kontrolu stanja baterija, solarnih panela i pogonskog sistema. Oni rješavaju probleme i otklanjaju anomalije na satelitima, po potrebi aktiviraju pomoćne satelite, itd.

Oni obrađuju i analiziraju sve podatke opažanja te uz pomoć Kalman filtera procjenjuju pogreške u podacima, računaju parametre za navigacijsku poruku i šalju ih satelitima pomoću telekomunikacijskih uređaja. Upravo su ovi vojnici odgovorni za stalno korigovanje podataka koji se emitiraju kao dijelovi *broadcast efemerida*, *almanaha*, te korekcija satova u satelitima. Nadgledaju tačnost i pouzdanost ovih podataka, te paze da ne se ne prekorače zadane granice tačnosti parametara na osnovu kojih GPS korisnici računaju položaj. Ovo je moguće samo uz neprekidnu dvosmjernu komunikaciju sa satelitima.

Opažanja svih GPS satelita u vidnom polju prikupljaju se na svim monitoring stanicama: prvobitno ustanovljenih šest monitoring stanica kontrolnog segmenta, plus dodatnih jedanaest stanica agencije NGA (National Geospatial Intelligence Agency) s kojima se kontrolni segment proširio godine 2005 (Slika 4.1). Ova mreža od 6+11 stanica je dovoljna da se kontinuirano opažaju svi sateliti GPS sistema. Svaki satelit iznad elevacije iznad horizonta od 5° , neprekidno je nadgledan sa najmanje tri stanice (Van Sickle, 2008).

Na svim monitoring stanicama se prikupljaju sljedeći podaci: mjerene dužine do satelita, podaci faznih mjerenja i pseudoudaljenosti do svih satelita iznad horizonta, informacije o stanju atmosfere, informacije o orbitama satelita, pogreške sata, brzine satelita, rektascenzija i deklinacija satelita, tj. koordinate u inercijalnom koordinatnom sistemu. Svi ovi podaci se prosljeđuju kontrolnoj stanici gdje se obrađuju, analiziraju i računaju parametri za redovno ažuriranje navigacijske poruke.

Kad su podaci izračunati potrebno ih je poslati satelitima. Za tu svrhu, na četiri stanice su postavljene specijalne antene za slanje navigacijskih i drugih programskih podataka satelitima. To su stanice Ascension Island, Cape Canaveral, Diego Garcia i Kwajalein, (Slika 4.2). Monitoring stanica Cape Canaveral ima mogućnosti testiranja satelita prije lansiranja.

4.2.2 Svemirski GPS segment

Osnovna funkcija svemirskog segmenta je da emitira radio-navigacijske signale (kodirane kao i nosač faze), kao i da primi i pohrani te ponovo emitira navigacijsku poruku, koju je poslao kontrolni segment. Emitiranje signala kontrolira atomski sat visoke stabilnosti: cezijumski, rubidijumski i hidrogenski vodonički atomski satovi. Više atomskih satova ugrađuju se u svaki satelit i predstavlja njegov najskuplji dio¹¹⁵. Kao najkritičniji dio satelitske opreme, satovi koriste rubidijum, cezijum ili vodonik, a imaju ekstremno visoku tačnost. Rubidijumski sat zakasni 1 sekundu za 30 000 godina, dok cezijumski sat može kasniti jednu sekundu za 300 000 godina. Satovi koji su predviđeni za najnovije familije satelita, tj. budućeg Bloka III, nazvani su hidrogenskim¹¹⁶ maserima, a mogu izgubiti 1 sekundu za 30 000 000 godina. Za usporedbu treba reći da kvarcni satovi koji se ugrađuju u prijemnike mogu kasniti 1 sekundu za 30 godina. Ovi satovi u prijemnicima napravljeni su od relativno jeftinih kvarcnih kristala što omogućava da prijemnici budu relativno jeftini i dostupni¹¹⁷.

GPS svemirski segment čine svi sateliti u konstelaciji. Puna konstelacija dizajnirana je tako da osigura dovoljan broj satelita za određivanje položaja korisnika. To znači da sistem omogućava korisnicima da mogu simultano opažati najmanje 4 satelita “u vidnom polju” s bilo koje tačke na Zemljinoj površini, u bilo kojem trenutku, 24 sata na dan, sedam dana u sedmici, pod bilo kojim meteorološkim uvjetima.

Pojedini sateliti se identificiraju pomoću svojih pseudo-slučajnih kodova (eng. Pseudo Random Noise - PRN) ili pomoću broja koji označava pojedine satelite (SVN-satellite vehicle number).

4.2.2.1 Konstelacija GPS satelita

Trenutnu konstelaciju GPS satelita čine sateliti različitih blokova i različite starosti. Tablica 4.1 pokazuje pregled i karakteristike sadašnjih i budućih satelita. (URL2b)

Nominalnu konstelaciju GPS satelita čini 24 svemirska vozila¹¹⁸ (SV) koji su raspoređeni u šest orbitalnih ravnina. Inklinacija tih ravnina u odnosu na ekvatorsku ravninu je 55°. Orbite po kojima se sateliti kreću su skoro kružnog oblika, s ekscentričnošću manjom od 0.02. Veća polu-os orbite iznosi 26 560 km. Drugim riječima, sateliti kruže na visini iznad Zemljine površine od oko 20 200 km. Orbite ovih visina nazivaju se orbitama srednje visine (eng. *medium earth orbit* - MEO).

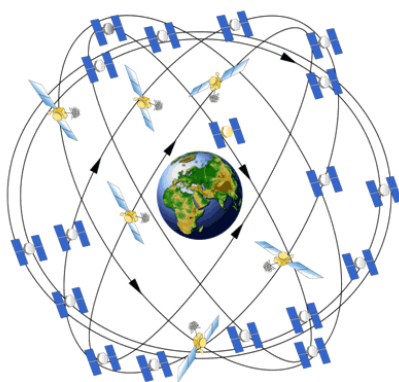
¹¹⁵ Kad bi prijemnici koristili iste satove bili bi neprihvatljivo skupi a korisnici bi trebali posebnu obuku za korištenje opreme i korištenje opasnih materija.

¹¹⁶ hidrogenskim maserima nazvani po hidrogenu ili vodoniku.

¹¹⁷ Kad bi u prijemnike bili ugrađeni satovi sličnog kvaliteta kao u satelitima cijena prijemnika bi očigledno bila tako visoka da bi bili nedostupni korisnicima bilo kog nivoa.

¹¹⁸ eng. space vehicles

Brzina kretanja satelita je 3.9 km/sec. Nominalni period za koji se ponovi geometrijski položaj svakog satelita je 12 h sideričkog vremena¹¹⁹ (11 h 58 m 2 s). GPS sateliti su raspoređeni u šest ravnina, u kojoj se nominalno nalaze najmanje po četiri satelita. Postoji mjesto u svakoj orbitalnoj ravnini za rezervni satelit, što sistem čini osposobljenim da podrži 30 satelita u orbitama. Trenutna konstelacija dozvoljava korisniku da pri elevacijskoj maski od 15° opaža najmanje 4 satelita bez obzira na geografski¹²⁰ položaj prijemnika. Svemirski segment je u fazi modernizacije, koja se odražava u zamjeni satelita. Sateliti novijih generacije (ili budući Blok III) opremljeni tako da emitiraju više signala na tri frekvencije za razliku od satelita starije generacije koji emitiraju signale na dvije frekvencije.



Slika 4.4: Konstelacija GPS satelita (URL4.3)

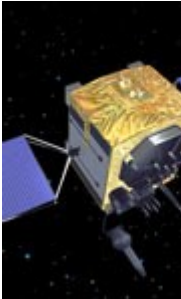
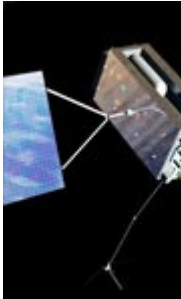
Tablica 4.1: Pregled osnovnih karakteristika GPS satelita. (URL 4.4)

	Block II/IIA	Block IIR	Block IIR-M	Block IIF
Glavni proizvođač	Rockwell International (Boeing North American)	Lockheed Martin	Lockheed Martin	Boeing North American
Snaga solarnih panela	800 wati	800 wati	800 wati	2450 wati
težina	1,816 kg	2,217 kg	2,217 kg	1,705 kg
visina	3.4 metara	1.7 metara	1.7 metara	2.4 metara
širina	5.3 metara	11.4 metara	11.4 metara	35.5 metara
Vijek trajanja	7.5 godina	10 godina	10 godina	12 godina

¹¹⁹ sideričko vrijeme je drugi naziv za zvjezdanu skalu vremena. Siderički dan ili zvjezdani dan je period rotacije planeta u odnosu na udaljene zvijezde. Zemljin siderički dan definiran je kao vrijeme između dva prolaska proljetne tačke (gama tačka) kroz nebeski meridijan i iznosi 23 sata 56 minuta i 4 sekunde.

¹²⁰ ipak, ovo važi za prijemnike koji se nalaze na širinama ispod 80 stepeni sjeverne ili južne širine.

Tablica 4.2: Pregled satelita koji su aktivni u orbiti ili se planiraju lansirati (URL4.2)

Sateliti starije generacije		Modernizirani Sateliti		
				
Blok IIA	Blok IIR	Blok IIR(M)	Blok IIF	Blok GPS III
operabilno 5	operabilno 12	operabilno 7	operabilno 7	u fazi testiranja
▪ C/A kod na L1 za civilne korisnike ▪ Precizni P(Y) kod na L1 & L2 ▪ frekvencije za vojne korisnike ▪ predviđeno trajanje 7.5 god. ▪ Lansirani ▪ 1990-1997.	▪ C/A kode ▪ L1 ▪ P(Y) kod na L1 & L2 ▪ monitoring satelitskog sata ▪ predviđeno trajanje 7.5 god. ▪ Lansirani 1997-2004.	▪ svi naslijeđeni signali ▪ 2. civilni signal na L2 (L2C) ▪ novi vojni M kod signali za veću otpornost na „jamming“ ▪ Fleksibilan nivo struje za vojni signal ▪ predviđeno trajanje 7.5 god. ▪ Lansirani 2005-2009.	▪ svi signali Blok IIR(M) ▪ 3. civilni signal na L5 frekvenciji (L5) ▪ napredni atomski ▪ Povećana tačnost, jačina i kvalitet signala ▪ predviđeno trajanje 12 god. ▪ Lansirani poslije 2010.	▪ svi signali Blok IIF ▪ 4. civilni signal na L1 (L1C) ▪ Povećana pouzdanost, tačnost i integritet ▪ Nema SA ▪ Satelitski laserski reflektori ▪ predviđeno trajanje 15 god. ▪ Previđeno prvo lansiranje 2018.

4.2.3 Karakteristike GPS signala

Poznato je da GPS sateliti emitiraju signale, koje primaju prijemnici tj. korisnički segment. Signali se dekodiraju i tako osiguravaju potrebne informacije prijemniku. Zbog ograničene količine električne energije u satelitu, signal je relativno slabe snage. Zato se koriste tehnike multipleksiranja da se osigura pristup svim dostupnim signalima. Dakle, GPS signal je dizajniran da bude dostupan milionima vojnih i civilnih korisnika. GPS predstavlja pasivni sistem za pozicioniranje, jer prijemnici u cilju određivanja svog položaja samo primaju, ali ne i emitiraju signal. Broj korisnika koji istovremeno, simultano mogu primiti signal je neograničen.

U osnovi, GPS kao i svi drugi GNSS sistemi, koristi tri vrste signala:

1. noseći signal (noseći val ili jednostavno nosač),
2. pseudo-slučajni kod ili skraćeno PRN (pseudo random noise),
3. navigacijske podatke.

GPS¹²¹ se zasniva na tehnici CDMA (Code Division Multiple Access). Pojednostavljeno, ovo znači da svi sateliti emitiraju signal na istoj frekvenciji, ali predajnici na satelitima imaju dodijeljene različite PRN kodove, te se ih prijemnik po tim kodovima identificira. GNSS signali su modulirani po šemi BPSK (Binary Phase Shift Keying) i raznih verzija BOC (Binary Offset Carrier). Može se reći da je noseći signal digitalno moduliran da bi se omogućio prenos informacija. BPSK modulacija predstavlja najjednostavniji oblik fazne modulacije ili PSK (phase shift keying). Primjenjuju se dvije faze koje su pomaknute za 180°, te se može nazvati 2-PSK metodom. U slučaju GPS signala, to znači da je faza osnovnog sinusoidnog signala pomjerena uvođenjem slabijeg signala, da bi se predstavio signal podataka. Da bi se podaci „pročitali“ potrebno je da se primljeni signal usporedi s nekim dostupnim referentnim signalom. U slučaju GPS/GNSS signala referentni signal se generira u prijemniku.

Dakle, GPS signal ima veoma kompleksnu strukturu. Posljedica toga je da postoji kompleksan niz operacija koje GPS prijemnik mora da izvrši u cilju izdvajanja željenih informacija iz signala. Sljedeće podpoglavlje govori o matematičkim karakteristikama signala, opisuje svrhu i osobine važnih komponenti signala, te se razmatraju generičke metode za izvlačenja informacija iz tih komponenti.

¹²¹ GPS sistem kao i svi ostali GNSS osim ruskog GLONASS sistema, koji koristi FDMA (Frequency Division Multiple Access) tehniku. Međutim, najmoderniji GLONASS sateliti koriste također CDMA tehniku. Plan je da i svi budući sateliti ruskog sistema primjenjuju CDMA.

4.2.3.1 Matematički modeli signala

Svaki GPS satelit simultano prenosi signale na frekvencijama L opsega. Ove frekvencije označavaju se kao L1 i L2, a iznose respektivno 1575.42 i 1227.60 MHz. Nosač L1 signala sadrži dvije komponente: „in-faznu“ komponentu i komponentu „kvadraturne faze“. „In fazna“ komponenta je bifazno modulirana pomoću 50-bps¹²² podataka i pseudo-slučajnog koda C/A. Ovaj kod čine nizovi od 1023 čipova¹²³ koje imaju period od 1 ms i brzinu „chipiranja“ od 1.023 MHz. Komponenta kvadraturne faze je također bifazno modulirana pomoću istog 50-bps niza podataka ali s različitim pseudo-slučajnim kodom koji se zove P kod. P kod ima 10.23 MHz iznos „chipiranja“, a period ponavljanja cijelog niza je jedna sedmica (između ponoći sa subote na nedjelju). Matematički model za kreiranje vala na L1 frekvenciji prema (Grewal, i dr., 2007) ima oblik kao što slijedi:

$$s(t) = \sqrt{2P_I}d(t)c(t)\cos(\omega t + \theta) \quad (4.1)$$

gdje su:

P_I i P_Q snage odgovarajućih nosećih valova za komponente „in-faznog“ i „kvadraturnog“ nosača.

$d(t)$ su 50-bps modulirani podaci (navigacijska poruka),

$c(t)$ i $p(t)$ su valni oblici pseudoslučajnih C/A i P kodova,

ω je frekvencija nosećeg L1 vala (u radijanima po sekundi),

θ je zajednički fazni pomak u radijanima.

Kvadraturna snaga nosača P_Q je oko 3 dB manja od P_I .

Za razliku od L1 signala, L2 signal je moduliran samo s 50-bps podacima i P kodom, iako postoji opcija da se ne prenose podaci navigacijske poruke. Matematički model valnog oblika na L2 je:

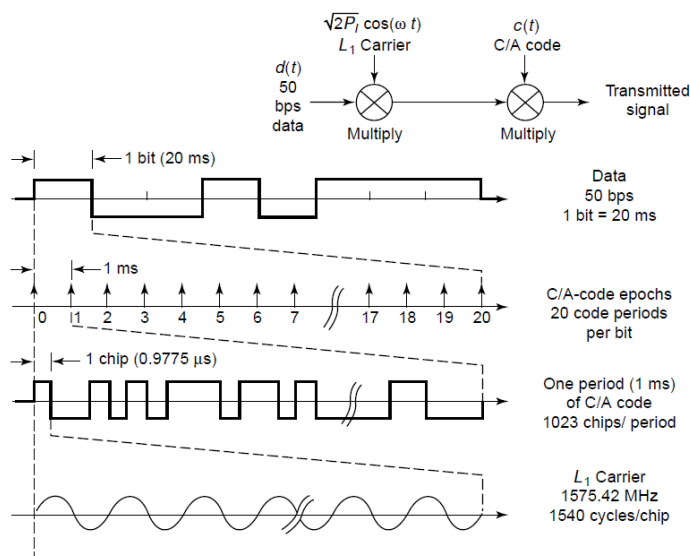
$$s(t) = \sqrt{2P_Q}d(t)p(t)\cos(\omega t + \theta) \quad (4.2)$$

Slike 4.4 i 4.5 pokazuju strukturu komponenti (in-fazne i kvadraturne-fazne), za L1 signal. Granice bita navigacijske poruke na 50-bps uvijek se dešavaju u epohi C/A koda. Epohe C/A koda obilježavaju početak perioda C/A koda, i one su tačno 20

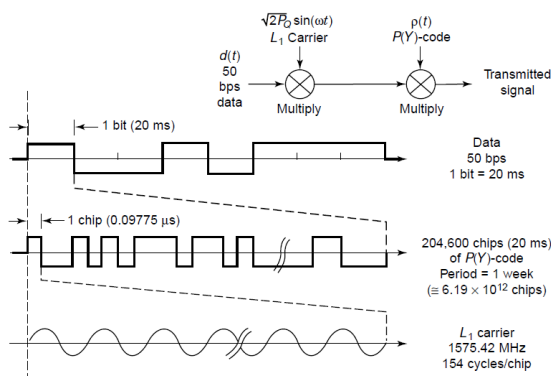
¹²² bps - (eng. bits per second) bita u sekundi, jedinica za izražavanja brzine prenosa informacija.

¹²³ chip – eng. chiping- sitni odlomci, mala parčad.

epoha po bit podataka, ili 20 460 C/A kodnih čipova. Unutar svakog C/A kodnog čipa postoji tačno 1540 krugova nosača L1. U kvadraturno-faznoj komponenti L1 signala postoji tačno 204 600 P kodnih čipova unutar svakog 50-bps data bita. Granice data bita uvijek koincidiraju s početkom P kodnog čipa.



Slika 4.5: Struktura „in-fazne“ komponente na L1 signalu (Grewal, i dr., 2007, str. 55)



Slika 4.6: Struktura „kvadraturne-fazne“ komponente na L1 signalu (izvor: Grewal, i dr., 2007, str. 56)

4.2.3.2 Komponente GPS signala

Početno, GPS signali su bili sačinjeni od dva noseća vala, nazvana L1 i L2. Za standardni GPS pozicionirajući servis-SPS bio je osiguran civilni C/A kod na L1 frekvenciji. Istovremeno, za precizni pozicionirajući servis-PPS bio je osiguran

precizni P(Y) kod na L1 i L2 frekvencijama. Pored nosećih frekvencija, signal je sadržavao navigacijsku poruku (eng. navigation message). Iako su ovi servisi imali relativno dobar kvalitet, Vlada SAD-a je 2005. godine odlučila provesti modernizaciju GPS sistema u cilju poboljšanja kvaliteta i zaštite kako vojnih, tako i civilnih korisnika. O modernizaciji satelitskog signala bit će riječi kasnije.

4.2.3.3 Navigacijska poruka

Navigacijska poruka osigurava neophodne informacije koje služe korisnicima da provedu pozicioniranje. Kontrolni segment šalje svakom satelitu neophodne podatke uz pomoć telekomunikacijskih antena kontrolnog segmenta, dva puta dnevno, a sateliti te podatke odašilju korisnicima.

Podaci koji se prenose u GPS signalu su podijeljeni i organizirani u strukturu koja prijemniku pomaže da zna gdje je početak i kraj poruke. Tako se prijemnik sinhronizira s dolazećim signalom i dekodira na pravilan način.

Niz 50 bps podataka prenosi navigacijsku poruku, koja uključuje, ali se ne ograničava na njih, sljedeće informacije:

1. *Almanah*: Svaki satelit prenosi podatke o orbitama koji se nazivaju almanah. Ovi podaci omogućavaju korisniku da izračuna približne položaje u kojima se bilo koji GPS satelit nalazi u bilo kojem trenutku. Međutim podaci u almanahu nemaju dovoljnu tačnost (1-2 km) da izračunaju položaj korisnika, ali se podaci pohranjuju u prijemnik i tamo se mogu koristiti mjesecima. Podaci za almanah se satelitima obično šalju svakih šest dana. Ove se informacije o približnim položaju satelita u orbitama (s tačnošću oko 1-2 km) primarno koriste za planiranje sesija opažanja, tj. daju informaciju o tome koji su sateliti „vidljivi“ na određenoj lokaciji, te prijemnik može „tražiti“ te satelite kad se prvi put uključi. Također se može koristiti za određivanje približne vrijednosti Doppler pomaka. Ova informacija ubrzava dobivanje signala sa satelita u „vidnom polju“.
2. *Efemeride*: Efemeride su slični podacima u almanahu, ali omogućavaju mnogo tačnije određivanje položaje satelita, jer kontrolni segment šalje svježije podatke satelitima svaka 2 sata. Tačniji položaji satelita su neophodni ako se želi kašnjenje u rasprostiranju signala primijeniti za računanje položaja prijemnika. Za razliku od almanah podataka, efemeride za pojedine satelite prenose samo ti sateliti i važe samo nekoliko sati¹²⁴.

¹²⁴ Novi sateliti imaju mogućnost pohranjivanja više podataka te u tom smislu imaju sposobnost čuvanja efemerida za duži period.

3. *Podaci o vremenu.* Navigacijska poruka sadrži informacije o vremenu. Ove se informacije koriste prijemniku da odredi trenutak emitiranja specifičnih tačaka na GPS signalu. Ova informacija je neophodna za određivanje kašnjenja signala, odnosno vremena putovanja signala, a što je dalje neophodno za određivanje udaljenosti između satelita i antene prijemnika.
4. *Podaci o jonosferskom kašnjenju.* U navigacijskoj poruci sadržani su podaci o procijenjenom kašnjenju GPS signala zbog utjecaja jonosfere. Uz korištenje ovih informacija se pri određivanju dužine između satelita i prijemnika djelimično mogu otkloniti utjecaji jonosferskog kašnjenja.
5. *Poruka o stanju satelita.* Navigacijska poruka sadrži informacije o trenutnom statusu tj. ispravnosti satelita. Na osnovu tog primljenog podatka, GNSS prijemnik korisnika može eventualno ignorirati satelit koji ne operira pravilno. Često se ovi podaci nazivaju podaci o „zdravlju“ satelita.

4.2.3.4 Struktura navigacijske poruke

Ovdje se navodi samo pregled osnovnih elemenata navigacijske poruke. U procesu modernizacije GPS sistema predviđena su i djelimično realizirana poboljšanja navigacijske poruke.

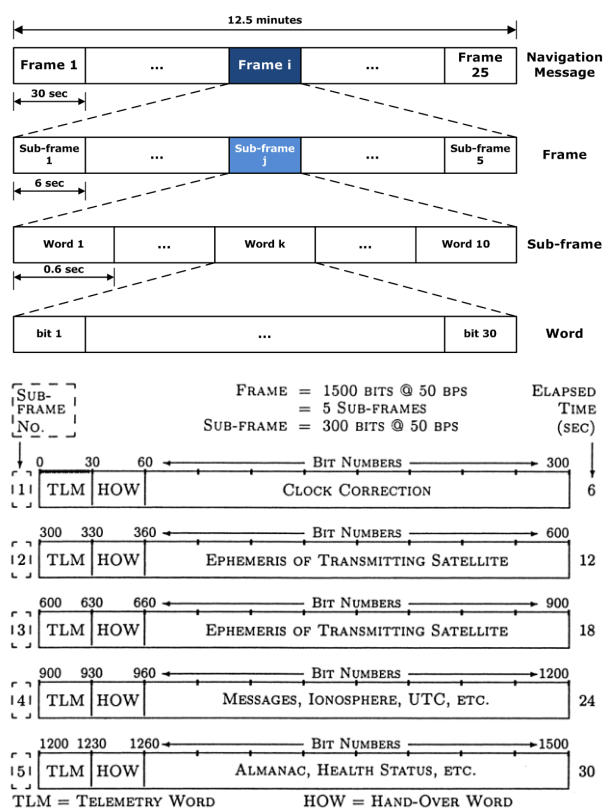
Tako, osim C/A navigacijske („klasične“) poruke na L1, u programu modernizacije sistema uvode se četiri dodatne poruke: L2-CNAV, CNAV-2, L5-CNAV i MNAV. „Klasična“ navigacijska poruka (koja je emitirana na L1 i L2), kao i prve tri „modernizirane“ poruke su civilne poruke, dok je MNAV namijenjena za vojnu upotrebu. U moderniziranim porukama su sadržani isti podaci kao u „klasičnoj“ ali imaju povećanu pouzdanost. (URL 4.10)

Poruke L2-CNAV, L5-CNAV i MNAV imaju sličnu strukturu i (moderniziran) format. Novi format omogućava više fleksibilnosti, bolju kontrolu i poboljšan sadržaj. Osim ovog MNAV uključuje poboljšanja za sigurnost i pouzdanost vojne poruke. CNAV-2 poruka je modulirana na L1CD signalu, a dijeli isti opseg s „klasičnom“ navigacijskom porukom.

Ovdje se nadalje opisuje organizacija „klasične“ navigacijske poruke, kao što pokazuje slika 4.7.

Informacije u GPS navigacijskoj poruci organizirane su u strukturu okvira (eng. frame). Kompletna poruka sadrži 25 okvira, a svaki okvir sadrži 1500 bita. Svaki okvir podijeljen je na 5 podokvira (eng. subframe) od po 300 bita. Svaki podokvir sadrži 10 riječi (eng. word) od po 30 bita, s najznačajnijim bitom riječi koji se prvi

prenosi (eng. most significant bit-MSB). Potrebno je 6 sekundi da se prenese jedan podokvir, a 30 sekundi da se završi prenos jednog cijelog okvira. Prenos kompletne navigacijske poruke od 25 okvira traje 750 sekundi ili 12,5 minuta. Podokviri 1, 2 i 3 se ponavljaju u svakom okviru, svakih 30 sekundi. Podokviri 4 i 5 su podkomutirani 25 puta. Dakle, postoji 25 verzija ovih (4 i 5) podokvira i označavaju se kao strane (eng. page) od 1-25. Znači, svaka strana se ponavlja svakih 750 sekundi, odnosno 12,5 minuta. Međutim, za neka izuzetna dopunjavanja poruke može se desiti drugačiji slijed.



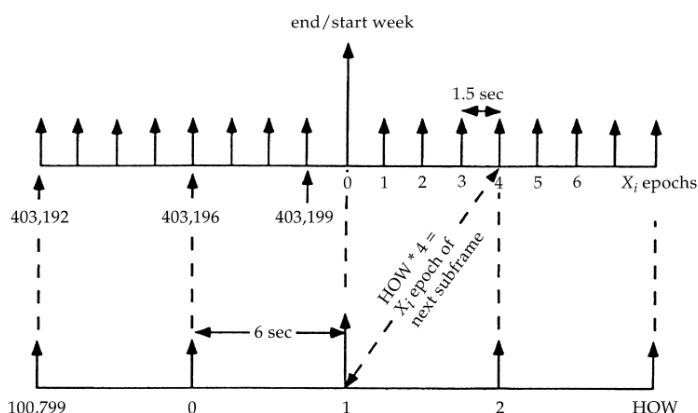
Slika 4.7: Struktura okvira i pod-okvira GPS navigacijske poruke (URL 4.11)

4.2.3.5 Z zbir

Informacija sadržana u HOW izvedena je iz 29-bitne vrijednosti koja se zove *Z zbir* (eng. Z-count). Z zbir se ne prenosi kao jedna riječ, nego se dio prenosi unutar HOW. Z zbir zbraja *epohe* koje su generirane pomoću X_1 registra generatora P koda u satelitu, što se dešava svake 1,5 sekundi. 19 LSBs Z zbira, koji se zove zbir vremena u sedmici (time of week-TOW) pokazuje broj X_1 epoha, koje su se desile poslije početka tekuće sedmice. Početak tekuće sedmice počinje u epohi X_1 , što se dešava (približno) u ponoć između subote i nedjelje.

Zbir TOW raste od nule u trenutku početka sedmice do 403.199 i potom prelazi ponovo u nulu u trenutku početka sljedeće sedmice. Na početku podokvira 1 prvog okvira (okvir sadrži stranu 1 podkomutiranih podokvira 4 i 5) javlja se uvijek TOW zbir jednak nuli. Zaokružena verzija TOW zbira, koja sadrži svoj 17 MSBs, sadrži prvih 17 bita HOW. Množenjem ovog zaokruženog zbira sa 4 dobije se zbir TOW na početku sljedećeg podokvira. Prijemnik može koristiti preambulu da bi precizno odredio vrijeme u kojem počinje svaki podokvir, te je time ustanovljena metoda za određivanje vremena prenosa (emitiranja) bilo kojeg dijela GPS signala.

Relacije između zbirova HOW i TOW pokazana je na slici 4.8.



Slika 4.8: Odnosi između HOW zbira i TOW zbira (Grewal, 2007, str. 58)

4.2.3.6 Broj GPS sedmice

10 MSBs zbira Z sadrži broj GPS sedmice (eng. week number-WN) što je modulo - 1024 sedmičnog zbira. Nula je, po definiciji, stavljena da bude početak sedmice u X_1 epohi, koja se približno desila u ponoć između 5. i 6. januara 1980. godine. Kako je WN modulo od 1 024 zbira, svakih 1 024 sedmice (za nekoliko sedmica manje od 20 godina¹²⁵) javlja se događaj koji se zove prelazna sedmica, te GPS prijemnik mora biti dizajniran tako da se tome prilagodi. WN nije dio HOW ali umjesto toga javlja se kao 10 bita treće riječi u podokviru 1.

4.2.3.7 Identificiranje okvira i pod-okvira

Tri bita od HOW koriste se za identifikaciju okvira i podokvira. Okvir koji se prenosi (u skladu s brojem strane od 1-25) može odmah biti identificiran iz TOW zbira, koji je izračunat iz HOW iz podokvira 5. Ovaj TOW zbir je TOW u početku sljedećeg

¹²⁵ Zadnji prelazak desio se 22. avgusta 1999. godine, a sljedeći treba da se desi 2019. godine.

okvira. Postoji 20 TOW zbirova po okviru, pa je prema tome broj tog okvira jednostavno $(TOW/20)(\text{mod } 25)$.

4.2.3.8 Informacije iz podokvira

Osim TLM i HOW, koji se pojavljuju u svakom podokviru, sljedeće informacije su sadržane u ostalih 8 riječi podokvira 1-5.¹²⁶

1. *Podokvir 1.* Dio WN iz Z zbira je dio od 3 riječi u ovom podokviru. Podokvir 1 također sadrži podatke za korekcije GPS sata u satelitu, a javlja se u formi koeficijenata polinoma koji definira kako korekcija varira kroz vrijeme. Vrijeme definirano pomoću sata u satelitu je obično nazvano SV vrijeme (space vehicle time). Vrijeme nastalo nakon što se uvedu korekcije, zove se GPS vrijeme. Prema tome, pojedini sateliti možda nemaju perfektно sinhronizirano SV vremena. Oni ipak dijele zajedničko GPS vrijeme. Dodatne informacije uključene u podokviru 1 su sljedeće:
 - a. Referentno vrijeme sata t_{0c} , koristi se kao početno vrijeme za računanje pogreške satelitskog sata.
 - b. Jonosfersko grupno kašnjenje¹²⁷ T_{GD} , koristi se za korekciju pogreške kašnjenja putovanja signala kroz jonosferu.
 - c. IODC (issue of data) pokazuje broj objave (ISSUE number) skupa podataka o satu, u cilju upozorenja korisnika da provede promjene u parametrima sata.
2. *Podokviri 2 i 3:* Ovi podokviri sadrže podatke efemerida, koji se koriste za određivanje položaja i brzina satelita, potrebnih za navigacijsko rješenje. Za razliku od almanah podataka, ovi podaci su precizni, vrijede za period od nekoliko sati, i primjenjuju se za satelitski prenos. Komponente efemerida pokazane su u tablici 4.3. Algoritam koji je se treba primijeniti za računanje položaja satelita u WGS84 koordinatama pokazan je u tablici 4.4. Datoteka IODE (issue of data ephemerides) daje korisniku informacije o tome kad su se desile promjene u parametrima efemerida. Svaki put kad su efemeride „učitane“¹²⁸ iz GPS kontrolnog segmenta, mijenja se IODE broj.
3. *Podokvir 4:* Svih 25 stranica podokvira sadrži almanah za satelite s PRN brojevima 25¹²⁹ i više, kao i specijalne poruke, članove jonosferske korekcije, koeficijente za prevođenje GPS vremena u UTC vrijeme. Postoje također

¹²⁶ Ovdje su opisane samo osnovne informacije.

¹²⁷ eng. group delay

¹²⁸ eng. uploaded

¹²⁹ 24 satelita + 1 rezervni, međutim modernizacijom GPS sistema broj satelita u orbitama je veći i prelazi 30. (20. novembar, 2014. godine broj GPS satelita je 31).

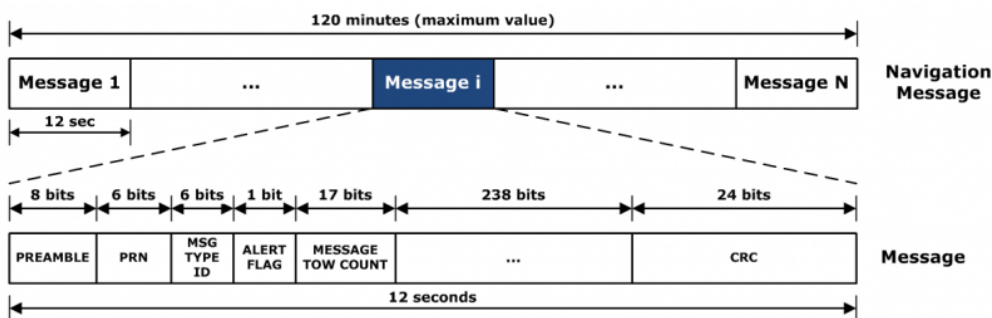
rezervne riječi za moguće buduće aplikacije. Komponente almanaha su vrlo slične komponentama efemerida, a računanja položaja satelita izvodi se uglavnom na sličan način.

4. *Podokvir 5*: Svaki satelit u svih 25 stranica ovog podokvira sadrži almanah za sve satelite s PRN brojevima od 1 do 24 (i više).

Za razliku od efemerida, almanah podaci vrijede za duži period (nekoliko mjeseci), ali su kao što je naprijed naglašeno, mnogo manje tačnosti. Dodatni podaci sadržani u navigacijskoj poruci su:

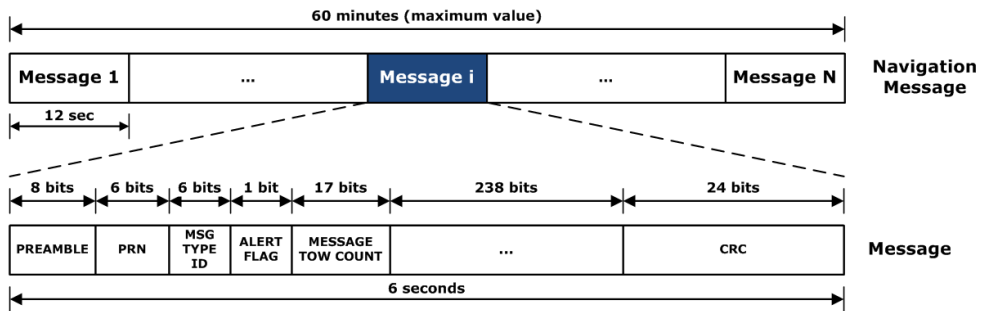
- pogreška dužine do korisnika (eng. user range error-URE), podatak koji omogućuje računanje pogreške dužine zbog pogreške efemerida,
- pogrešaka u mjerenju vremena,
- selektivne dostupnosti (SA)¹³⁰ i oznaka, te
- oznaka koja indicira „zdravstveni“ status satelita.

Ranije su spomenute navigacijske poruke L2-CNAV, CNAV-2, L5-CNAV and MNAV, koje su rezultat programa modernizacije GPS sistema. Tokom 2014. godine, počelo se s emitiranjem, kao eksperimentalnih servisa L2-CNAV, L5-CNAV, čija je struktura pokazana na slikama 4.9 i 4.10 i 4.11.

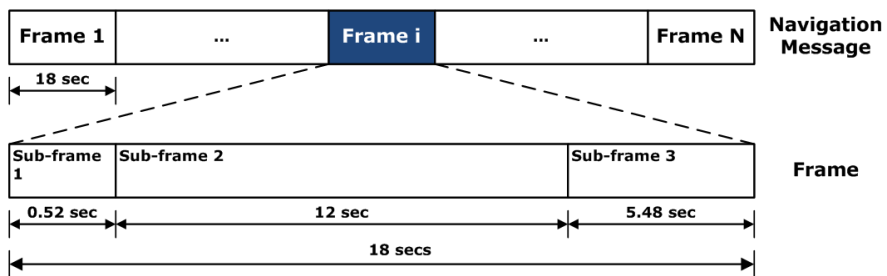


Slika 4.9: Struktura (modernizirane) L2-CNAV poruke (URL 4.12)

¹³⁰ SA je Kongres SAD-a, na prijedlog predsjednika Bila Klintonu, ukinuo 1. maja 2000.



Slika 4.10: Struktura (modernizirane) L5-CNAV poruke. (URL 4.13)



Slika 4.11: Struktura (modernizirane) CNAV poruke. (URL 4.13)

Tablica 4.3: Komponente podataka o efemeridama.

Naziv parametra	Opis parametra	jedinice
M_0	Srednja anomalija u referentnom vremenu	polukrug
Δn	Srednja razlika kretanja od izračunate vrijednosti	Polukrug/sec
e	Ekscentricitet	bezdimenzionalan
$\sqrt{a}$	Kvadratni korijen veće poluosi	$m^{\frac{1}{2}}$
Ω_0	Longituda uzlaznog čvora orbitalne ravnine u epohi sedmice	polukrug
i_0	Inklinacija u referentnom vremenu	polukrug
ω	Argument perigeja	polukrug
$\dot{\Omega}$	Promjena rektascenzije	Polukrug/sec
IDOT	Promjena inklinacijskog ugla	Polukrug/sec
C_{UC}	Korekcijski član za argument latitude: amplituda kosinusne harmonijske funkcije	radijani
C_{US}	Korekcijski član za argument latitude: amplituda sinusoidne harmonijske funkcije	radijani
C_{rc}	Korekcijski član za radijus orbite: amplituda kosinusne harmonijske funkcije	m
C_{rs}	Korekcijski član za radijus orbite: amplituda sinusoidne harmonijske funkcije	m
C_{ic}	Korekcijski član za inklinacijski ugao: amplituda kosinusne harmonijske funkcije	radijani
C_{is}	Korekcijski član za inklinacijski ugao: amplituda sinusoidne harmonijske funkcije	radijani
t_{0e}	Referentno vrijeme efemerida	sec
IODE	Podaci o izdavanju efemerida	bezdimenzionalno

Tablica 4.4: Algoritmi za računanje položaja satelita

$\mu = 3,986005 \times 10^{14} \text{ m}^3/\text{s}^2$	Vrijednost univerzalne gravitacijske konstante Zemlje usvojene za WGS84
$\dot{\Omega} = 7,292115167 \times 10^{-5} \text{ rad/s}$	Usvojena vrijednost (WGS84) za promjenu rotacije Zemlje
$a = (\sqrt{a})^2$	Glavna polu-os
$n_0 = \sqrt{(\mu/a^3)}$	Izračunato srednje kretanje, rad/s
$t_k = t - t_{0e}$	Vrijeme od referentne epohe efemerida
$n = n_0 + \Delta n$	Korigirano srednje kretanje
$M_k = M_0 + nt_k$	Srednja anomalija
$M_k = E_k - e \sin E_k$	Keplerova jednačina za ekscentričnu anomaliju
$f_k = \cos^{-1} \left(\frac{\cos E_k - 1}{1 - e \cos E_k} \right)$	Prava anomalija iz kosinusa
$f_k = \sin^{-1} \left(\frac{\sqrt{1 - e^2} \sin E_k}{1 - e \cos E_k} \right)$	Prava anomalija iz sinusa
$E_k = \cos^{-1} \left(\frac{e + \cos f_k}{1 + e \cos f_k} \right)$	Ekscentrična anomalija iz kosinusa
$\phi_k = f_k + \omega$	Argument širine
$\delta_{\mu k} = C_{\mu C} \cos 2 \phi_k + C_{\mu S} \sin 2 \phi_k$	Druga harmonijska korekcija za argument ..
$\delta_{rk} = C_{rC} \cos 2 \phi_k + C_{rS} \sin 2 \phi_k$	Druga harmonijska korekcija
$\delta_{ik} = C_{iC} \cos 2 \phi_k + C_{iS} \sin 2 \phi_k$	Druga harmonijska korekcija
$\mu_k = \phi_k + \delta_{\mu k}$	Korigirani argument širine
$r_k = a(1 - e \cos E_k) + \delta_{rk}$	Korigirani radijus
$i_k = i_0 + \delta_{ik} + (IODT)t_k$	Korigirana inklinacija
$x'_k = r_k \cos \mu_k$	X koordinata u ravno orbite
$y'_k = r_k \sin \mu_k$	Y koordinata u ravno orbite
$\Omega_k = \Omega_0 + (\dot{\Omega} - \dot{\Omega}_0)t_k - \dot{\Omega}_e t_{0e}$	Korigirana dužina uzlaznog čvora
$X_k = x'_k \cos \Omega_k - y'_k \cos i_k \sin \Omega_k$	Geocentrična X koordinata
$Y_k = x'_k \sin \Omega_k + y'_k \cos i_k \cos \Omega_k$	Geocentrična Y koordinata
$Z_k = y'_k \sin i_k$	Geocentrična Z koordinata

t je u GPS sistemu vremena u vremenu transmisije, tj. GPS vrijeme korigirano za vrijeme putovanja signala (dužina/brzinu svjetlosti). Nadalje, t_k će biti aktualna ukupna razlika vremena t i vrijeme epohe t_{0e} , te se mora izračunati za početak ili kraj sedmice. To znači, ako je t_k veće od 302.400 sekundi, oduzeti 604.800 sec od t_k . Ako je t_k manje od - 302.400 sec treba na t_k dodati 604.800 sec.

4.2.4 Frekvencije i struktura GPS signala

Ranija pod-poglavlja su već donekle opisala strukturu signala. Ukratko, GPS sateliti prenose (emitiraju) desno-polarizirane cirkularne radio signale L opsega (Right Hand Circularly Polarized-RHCP) do prijemnika GPS signala koji se nalazi na Zemlji (ili njenom okruženju, npr. u avionu ili pak na satelitima koji se kreću u niskim orbitama¹³¹), i to na dvije frekvencije označene kao L1 i L2. Blok III¹³² sateliti i IIF sateliti osim ova dva signala prenose L5 signal (na frekvenciji 1176.45 MHz) koji je prvenstveno namijenjen za civilnu avijaciju, ali ga koriste svi koji imaju adekvatan prijemnik.

Osnovni i najvažniji GPS noseći signal za navigaciju je L1, a ima frekvenciju 1575.42 MHz. U početku je bio moduliran pomoću dva koda: civilni¹³³ (C/A) i precizni/sigurnosni (P/Y). Ovaj zadnji je prvobitno bio rezerviran za vojne i autorizirane civilne korisnike, uz pomoć kriptografske tehnike. Poslije 2015. godine, na L1 valu se emitiraju sljedeći kodovi: C/A, L1C, P(Y) i vojni M-kod. Detaljnije o kodovima na linku: http://www.navipedia.net/index.php/GPS_Signal_Plan

Drugi GPS signal, nazvan L2, centriran je na 1227.6 MHz, a u početku je sadržavao samo precizni kod. Ustanovljen je da osigura drugu frekvenciju za korekciju pogreške koju uzrokuje jonosfera, što predstavlja izvor najvećih pogrešaka pri određivanja udaljenosti između satelita i prijemnika. Modernizacijom GPS sistema L2 signal prenosi također modernizirani civilni L2C, zajedno s P(Y) i vojnim M kodovima.

Poput signala kojeg emitiraju radio stanice, tako je na satelitskom signalu modulirano nekoliko tipova informacija (poruka) na nosećim valovima uz pomoć tehnike fazne modulacije. Neke od informacija koje su uvrštene u emitiranu poruku su: almanah, „broadcast“ efemeride, koeficijenti korekcija satelitskog sata, koeficijenti korekcija jonosferske refrakcije, (zdravstveno) stanje satelita, itd.

Da bi prijemnici neovisno odredili položaje stanica na površini Zemlje koje zauzimaju, u realnom vremenu, bilo je neophodno osmisliti sistem za tačno mjerenje vremena putovanja signala od predajnika na satelitu do antene prijemnika. U GPS

¹³¹ Veliki skup satelita u niskim orbitama obilježava se kao LEO (Low Earth Orbiting). Visina njihovih orbita iznad Zemlje kreće se između 200 i 2.000 km. Lansirani su za veoma različite misije. Za određivanje njihovog položaja u realnom vremenu služe upravo GNSS prijemnici ugrađeni u satelite. U LEO satelite se ubrajaju sateliti iz gravitacijskih satelitskih misija: CHANCE, GOCE, GRACE, ali i hiljade drugih, uključujući satelite za daljinska istraživanja koja na sebi nose aktivne ili pasivne senzore, a za obradu podataka prikupljenih tim sensorima neophodno je da se poznaje položaj satelita/senzora u trenutku opažanja. Ogromnoj familiji takvih satelita pripadaju sistemi kao npr. Sentinel, Landsat, Terra, Aqua, ASTER, SWARM, AVHRR, itd.

¹³² Lansiranje satelita GPS Blok III planirani za kraj 2018. godine

¹³³ C/A - the coarse/acquisition code.

sistemu je to ostvareno moduliranjem nosećih valova s kodovima pseudo slučajnog šuma – PRN (pseudo random noise). PRN kodovi su sačinjeni od jedinstvenih nizova binarnih vrijednosti (nula i jedinica), koji se čine slučajni, ali ustvari su generirani u skladu sa specijalnim matematičkim algoritmom uz pomoć naprava koje se zovu „registri za odabrani povratni pomak“¹³⁴.

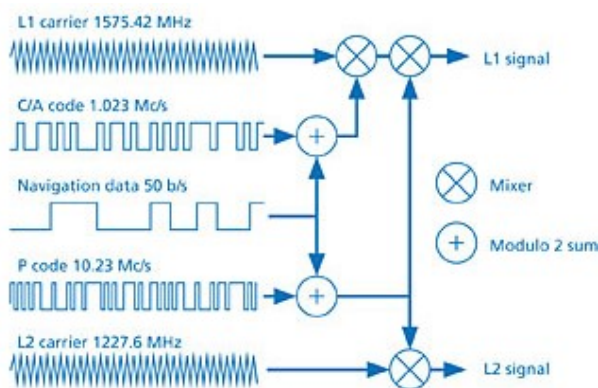
Svaki satelit prenosi dva različita PRN koda. Prvobitno je signal na L1 frekvenciji bio moduliran s dva koda:

1. Preciznim kodom, označenim kao P, prvobitno namijenjen isključivo za vojne korisnike.
2. Civilnim kodom nazvanim C/A. Oznaka C/A u literaturi ima dvojako značenje: *Civilian Acquisition* ili *Access Code*.

L2 je bio moduliran samo P kodom kod starih satelita, ali modernizacijom GPS satelita, civilni kodovi se emitiraju na obje frekvencije. Svaki satelit emitira jedinstveni set kodova pod nazivom GOLD¹³⁵ kodovi, koji dozvoljavaju prijemniku da prepozna s kojeg satelita dolazi signal. Ova identifikacija je veoma važna kad se simultano prati nekoliko različitih satelita.

4.2.4.1 Struktura signala

Svaki GPS satelit ima svoj jedinstven spektar Gold kodova, tako da prijemnik može razlikovati signale sa različitih satelita, iako simultano emitiraju signal na istim frekvencijama. Ovaj pristup se zove CDMA (code division multiple access) a sličan je principu primijenjenom u nekim mobilnim telefonima.



Slika 4.12: Dijagram GPS signala prije modernizacije sistema.

¹³⁴ eng. tapped feedback shift registers.

¹³⁵ Nazvani tako po Robert Goldu. Jedan skup Gold kodnih nizova sačinjen je od $2^n - 1$ nizova, od kojih svaki ima period $2^n - 1$.

Kao što je navedeno, svaki satelit (označen odabranim arapskim brojem poslije akronima SV, što je skraćenica od eng. *satellite vehicle*) ima svoj specifičan PRN P-kod, koji predstavlja kod za određivanje dužina (eng. *rang*), a obilježava se kao $P_i(t)$. Ovaj PRN kod je dug 7 dana, a dužina jednog je čipa je 10.23 Mbps. Sedmodnevni niz je suma napravljena po principu "Modulo-2" što predstavlja sumu od dvije podsekvence, nazvane X_1 i X_{2i} . Dužina podsekvenci iznosi 15.345.000 čipova i 15.345.037 čipova, respektivno. Sekvenca X_{2i} je X_2 sekvenca selektivno zakašnjela za 1 do 37 čipova. Na taj način se dozvoljava da osnovna tehnika generiranja koda sačini skup od 37 međusobno ekskluzivnih sekvenci P kodova koji su dugi (traju) 7 dana.

Naprijed je rečeno da GPS signal sadrži i veoma važne navigacijske podatke o položajima satelita u orbiti, koje se obično nazivaju efemeridama. Također, navigacijska poruka sadrži almanah za sve GPS satelite, kao i korekcije za jonosfersko kašnjenje, za prijemnike koji primaju signal samo jedne frekvencije. Navigacijska poruka se emitira brzinom od 50 b/sec. Dužina čipa C/A koda je 1.023.

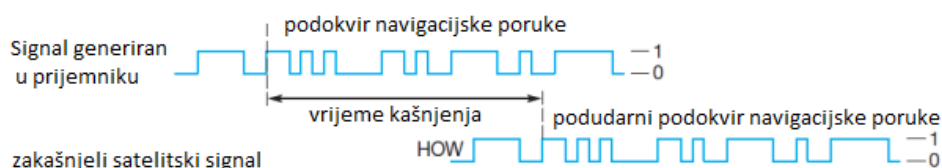
Civilni kod je generiran tako da je deset puta sporiji od preciznog koda. Uglavnom, važno je istaći da osnovni GPS sat radi na frekvenciji od 10.23 MHz. Dakle, C/A kod je generiran na brzini od 1,023 MH u sekundi.

Zbog potrebe za „jednosmjernim sistemom“ komuniciranja, GPS zavisi od preciznog mjerenja vremena prenosa signala. Da bi se razumio koncept „jednosmjernog sistema“ treba razmotriti sljedeću situaciju.

Pretpostavka je da satelit prenosi niz zvučnih signala, i da su signali emitirani po poznatom nepravilnom uzorku. Druga pretpostavka je da je ovaj uzorak sinhronizirano dupliciran (ali nije emitiran) u tački u kojoj je postavljen GPS prijemnik. Pošto satelitski signal mora putovati do prijemnika, njegov prijem će kasniti u odnosu na signal generiran u prijemniku. Međutim, ovo se kašnjenje može izmjeriti i prevesti u vremensku razliku. GPS sistem koristi sličan postupak.

Naime, u GPS sistemu, čipovi PRN kodova mijenjaju zvučne signale u naprijed opisanom postupku, a precizno vrijeme emitiranja satelitskog koda smješteno je u navigacijsku poruku, a startno vrijeme indicirano je pomoću krajnje ivice jednog čipa. Prijemnik simultano generira duplicirani PRN kod. Uspoređivanjem dolazećeg signala s identičnim signalom generiranim u prijemniku, prijemnik računa vrijeme potrebno signalu da proputuje od satelita do prijemnika. Ovo daje kašnjenje signala što se prevodi u vrijeme putovanja. Iz vremena putovanja i poznate brzine signala može se izračunati dužina između prijemnika i satelita.

Navigacijska poruka sa svakog satelita sadrži „pomoćnu riječ“- HOW (Hand-Over Word), koja je sačinjena od nekoliko identifikacijskih bitova, znakova i brojeva. Ovaj broj, pomnožen s četiri, daje vrijeme u sedmici (time of week - TOW), što označava vodeću ivicu sljedećeg dijela poruke. HOW i TOW pomažu da prijemnik uradi usporedbu primljenog satelitskog signala s onim generiranim u prijemniku i tako da se kašnjenje može brzo odrediti. Ovaj proces uspoređivanja signala prikazan je na slici 4.13.



Slika 4.13: Određivanje vremena putovanja signala pomoću uspoređivanja kodova.

4.2.4.2 Modernizacija GPS signala

Modernizacija GPS sistema postala je moguća zahvaljujući postignutom napretku u tehnologijama koje se primjenjuju za izradu i korištenje satelita i prijemnika. Program modernizacije započeo je 2005. godine. Prva faza modernizacija¹³⁶ započela je lansiranjem prvog satelita BLOK IIR-M. Naprijed je spomenuto da su novi sateliti sposobni emitirati dva nova signala: L2C za civilne korisnike i novi vojni signal (M kod) na oba signala L1 i L2. Cilj je osiguranje bolje otpornosti sistema na namjerno zagušenje¹³⁷ GPS signala nego je to bio slučaj s Y kodom. Također se očekuje skraćivanje vremena potrebnog za prvo određivanje položaja (eng. time to first fix-TFF). Modernizacijom je uveden L5 civilni signal, s namjenom „za sigurnost života“ u civilnoj avijaciji. Također se očekuje da će drugi civilni kod omogućiti bolje pozicioniranje i praćenje u unutrašnjosti zgrada i šumovitim oblastima. (Leick, 2004, str. 83)

Dakle, uključena je nova radio frekvencija pod nazivom L5 na 1176.45 MHz, namijenjena civilnim korisnicima. Ovaj signal postao je dostupan nakon lansiranja novog bloka satelita pod nazivom BLOK IIF. Prvi takav satelit lansiran je 28. maja 2010. godine. Signal L5 treba biti kompatibilan sa signalima drugih GNSS sistema. Novi signali uvode se korak po korak. Novi sateliti Blok III¹³⁸ se lansiraju da zamijene

¹³⁶ Ustvari, može se smatrati da je prva faza modernizacije sistema počela 1. maja 2000. godine, ukidanjem selektivne dostupnosti (Selective Availability-SA).

¹³⁷ zagušenje signala ili eng. jamming.

¹³⁸ Sateliti BLOC III bili su planirani su za lansiranje u 2016. godini. Prvi sateliti su testirani u laboratoriji u 2015. Međutim, lansiranje prvog takvog satelita predviđa se za decembar 2018.

stare satelite. Većina novih signala će imati ograničenu upotrebu sve dok broj satelita koji prenose signal na tri frekvencije ne dostigne broj 18 do 24.

U cilju modernizacije i performansi sistema za civilne korisnike predviđeno je i djelomično provedeno uvođenje sljedećih signala specijalno dizajniranih za civilne korisnike: L2C, L5, i L1C. Civilni signali na L1 pod nazivom C/A će i dalje biti emitiran, te će u budućnosti postojati četiri signala za civile.

- L2C (1227.6 MHz): Omogućava razvoj dvofrekventnog civilnog GPS prijemnika koji može eliminirati jonosfersko grupno kašnjenje signala. Za profesionalne (geodetske) korisnike koji već imaju dvofrekventne uređaje, L2C omogućava brže pronalaženje signala, povećanu pouzdanost te veći radni opseg. L2C emitira s većom snagom nego stari C/A signal na L1 frekvenciji. U dostupnoj literaturi se navodi da ovaj novi signal omogućuje i olakšava prijem signala za antenu ispod krošnje drveća i čak u zatvorenim prostorima. Kao što je rečeno signal je dostupan od 2005. godine, kad je lansiran prvi IIR-M satelit. Predviđa se da će puna dostupnost i efikasnost ovog signala postići s 24 satelita s ovim signalom, u 2016. godini.
- L5 (1176.45 MHz): L5 signal se emitira na frekvencijskom opsegu namijenjenom ekskluzivno za servis posvećen sigurnosti civilne avijacije. U budućuće će avioni koristiti L5 u kombinaciji s L1 C/A u cilju povećanja tačnosti (eliminiranjem jonosferskog kašnjenja) i povećanja sigurnosti (preko povećanja pouzdanosti signala). Osim transporta, L5 će pružati svim korisnicima napredniji civilni signal, jer je snažniji od civilnog GPS signala i ima širi opseg. Niža frekvencija može proširiti prijem signala za korisnike u zatvorenom prostoru¹³⁹. L5 će biti kompatibilna s drugim GNSS sistemima, s ciljem da postane interoperativna. Ovaj signal je, kao što je naprijed rečeno, postao dostupan lansiranjem¹⁴⁰ satelita Blok IIF.
- L1C (1575.42 MHz): Ovaj signal je dizajniran za interoperabilnost s Galileo sistemom. Također će biti kompatibilan s aktuelnim civilnim signalom na L1. Signal će biti snažniji, te će uključivati napredniji dizajn za proširene performanse. Bolji dizajn će popraviti prijem kod mobilnih GPS korisnika u gradu i drugih zahtjevnijih okruženja. Ostali provajderi GNSS usvojili su L1C kao standard za međunarodnu interoperabilnost. Dakle, japanski Quasi-Zenith Satellite System (QZSS), indijski Regional Navigation Satellite System (IRNSS) kao i kineski BeiDou sistem planiraju emitirati L1C. SAD je prvobitno planirao lansirati prvi satelit Blok III koji će emitirati sve modernizirane signale,

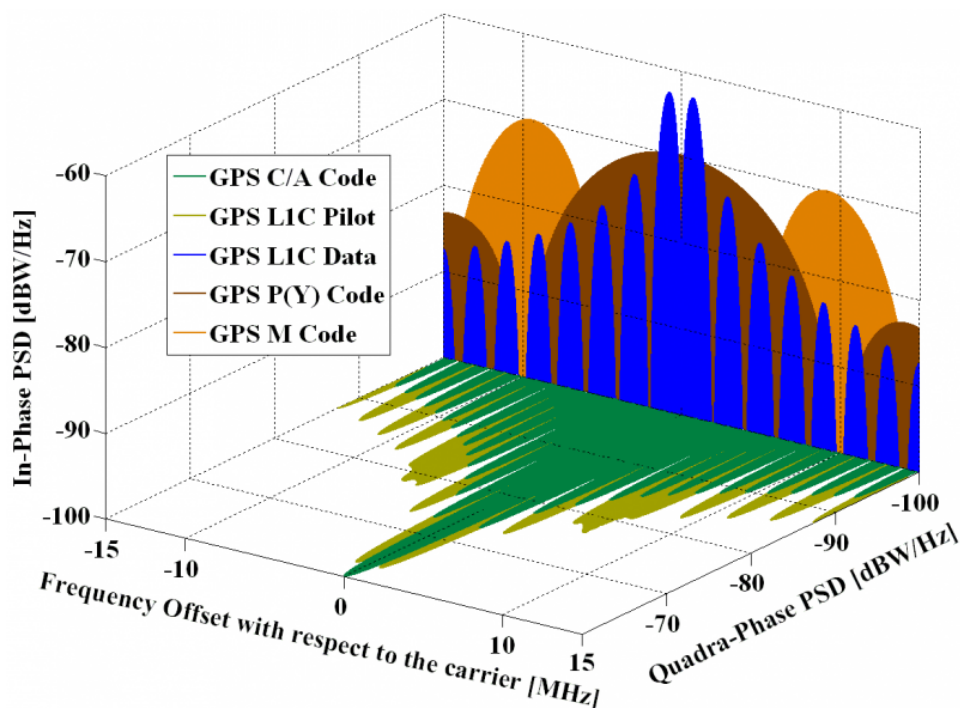
¹³⁹ „In door“ navigacija je najmoderniji trend i veliki broj aktualnih istraživanja se obavlja baš u ovoj oblasti.

¹⁴⁰ 28. maja 2010. godine.

(uključujući L1C) do aprila 2016. godine. Nažalost do danas nijedan satelit bloka III nije lansiran ali su prvi sateliti proizvedeni i na njima se provode testiranja.

Kad signali L2C i L5 budu u potpunosti operativni neće biti potrebe da se za navigaciju koriste beskodni ili polukodni GPS prijemnici, što mnogi profesionalci, uključujući geodete, danas koriste da dobiju visoku tačnost položaja. Takvi prijemnici rade pomoću korištenja karakteristika za dešifrovanje šifriranih vojnih P(Y) signala na L2 frekvenciji te tako imaju mogućnost da se približe tačnosti koja se postiže pomoću dvofrekventnih GPS prijemnika.

Američka vlada ohrabruje sve korisnike beskodne ili polukodne GPS tehnologije da planira korištenje moderniziranih civilnih signala do kraja decembra 2020. godine, jer će P(Y) kod poslije možda biti promijenjen. Osim civilnih signala program modernizacije obuhvata emitiranje vojnog signala M-kod na L1 i L2 frekvenciji. Svi sateliti bloka IIF emitiraju modernizirane signale, uključujući vojni M kod na obje frekvencije.



Slika 4.14: Spektar signala na nosaču L1 (URL 4.7)

Tablica 4.5: Pregled signala na L1 nosećem valu. (URL 4.5)

GNSS System	GPS	GPS		GPS	GPS
Service Name	C/A	L1C		P(Y) Code	M-Code
Centre Frequency	1575.42 MHz	1575.42 MHz		1575.42 MHz	1575.42 MHz
Frequency Band	L1	L1		L1	L1
Access Technique	CDMA	CDMA		CDMA	CDMA
Signal Component	Data	Data	Pilot	Data	N.A.
Modulation	BPSK(1)	TMBOC(6,1,1/11)		BPSK(10)	BOC _{sin} (10,5)
Sub-carrier frequency [MHz]	-	1.023	1.023 & 6.138	-	10.23
Code frequency	1.023 MHz	1.023 MHz		10.23 MHz	5.115 MHz
Primary PRN Code length	1023	10230		$6.19 \cdot 10^{12}$	N.A.
Code Family	Gold Codes	Weil Codes		Combination and short-cycling of M-sequences	N.A.
Secondary PRN Code length	-	-	1800	-	N.A.
Data rate	50 bps / 50 sps	50 bps / 100 sps	-	50 bps / 50 sps	N.A.
Minimum Received Power [dBW]	-158.5	-157		-161.5	N.A.
Elevation	5°	5°		5°	5°



Slika 4.15: Planirani raspored programa modernizacije GPS sistema.

Tablica 4.6: Pregled signala na L2 nosećem valu. (URL 4.6)

GNSS System	GPS	GPS	GPS	GPS
Service Name	L2 CM	L2 CL	P(Y) Code	M-Code
Centre Frequency	1227.60 MHz	1227.60 MHz	1227.60 MHz	1227.60 MHz
Frequency Band	L2	L2	L2	L2
Access Technique	CDMA	CDMA	CDMA	CDMA
Spreading modulation	BPSK(1) result of multiplexing 2 streams at 511.5 kHz		BPSK(10)	<u>BOCsin(10,5)</u>
Sub-carrier frequency	-	-	-	10.23 MHz
Code frequency	511.5 kHz	511.5 kHz	10.23 MHz	5.115 MHz
Signal Component	Data	Pilot	Data	N.A.
Primary PRN Code length	10,230 (20 <u>ms</u>)	767,250 (1.5 seconds)	6.19 x 10 ¹²	N.A.
Code Family	M-sequence from a maximal polynomial of degree 27		Combination and short-cycling of M-sequences	N.A.
Secondary PRN Code length	-	-	-	N.A.
Data rate	IIF 50 bps / 50 <u>sps</u> IIR-M Also 25 bps 50 <u>sps</u> with FEC	-	50 bps / 50 <u>sps</u>	N.A.
Minimum Received Power [dBW]	II/IIA/IIR -164.5 <u>dBW</u> IIR-M -161.5 <u>dBW</u> IIF -161.5 <u>dBW</u>		II/IIA/IIR -164.5 <u>dBW</u> IIR-M -161.4 <u>dBW</u> IIF -160.0 <u>dBW</u>	N.A.
Elevation	5°		5°	5°

4.2.4.3 Modernizacija kontrolnog segmenta

Program modernizacije GPS sistema, također uključuje modernizaciju Kontrolnog segmenta. Naziv novog Operativnog kontrolnog segmenta je OCX (Operational Control System of next generation) treba zamijeniti postojeći operativni kontrolni sistem. Modernizacija kontrolnog sistema se smatra kritičnim elementom

modernizacije GPS programa i procjenjuje se da će američka vlada investirati puno više od prvobitno planiranih 1.6 milijardi US dolara. OCX treba biti sposoban da sastavlja, formatizira, generira, šifrira i nadzire navigacijske poruke svih signala sa satelita Bloka III. Dakle, OCX treba biti u potpunosti sposoban da iskoristi napredne mogućnosti satelita Bloka III, ali i održavati kompatibilnost sa satelitima Blok IIR i IIR-M, osiguravajući komande i kontrolu novijih satelita iz familija GPS IIF. Također, OCX treba omogućiti nove modernizirane civilne signale. OCX treba da osigura sigurnu, tačnu i pouzdanu navigaciju i određivanje vremena za efikasnu podršku vojnim, komercijalnim¹⁴¹ i civilnim korisnicima. Trebalo bi da uključuje proširenu podršku za svemirska lansiranja, povećanu svijest o situacijama za GPS operatore i podršku za buduće satelitske blokove s naprednim mogućnostima kao što su novi signali, i veoma važan aspekt „cyber“ sigurnosti“, itd.

Majsko izdanje popularnog časopisa GPS World-a iz 2016. na strani 10 izvještava da je prvi test OCX prošao 4. marta 2016., ali da u ljeto 2016. godine slijedi drugi test. Ovo je samo početak u implementaciji novog operativnog sistema za modernizirani kontrolni GPS segment koji treba da osigura povećanu dostupnost, tačnost i sigurnost cijelog sistema.

4.2.5 Korisnički segment

Korisnički segment sastoji se od stotina hiljada u prvom redu američkih vojnih prijemnika i njihovih saveznika, koji su korisnici sigurne usluge preciznog pozicioniranja GPS-a. Najveću grupu korisnika od nekoliko **desetina miliona** civilnih, komercijalnih i istraživačkih korisnika predstavljaju civili, koji koriste usluge standardnog pozicionirajućeg servisa - SPS. Svi ovi korisnici koriste signal za prikazivanje ili određivanje trodimenzionalne lokacije (latitude, longitude i altitude ili geodetske širine, dužine i visine iznad referentnog elipsoida¹⁴²) i preciznog vremena ili se pak služe signalom za navođenje ili vođenje ka određenom cilju.

Nemoguće je ovdje nabrojati sve mogućnosti primjene GNSS signala. Korisnici bi se također mogli razvrstati u različite načine: korisnike servisa za masovno tržište nasuprot profesionalnim korisnicima, komercijalnim nasuprot znanstvenim, itd.

Specifičnu grupu predstavljaju korisnici iz domena različitih profesija kao što su geodezije, građevinarstva, zaštite okoliša, agrikulture, turizma, rudarstva, bankarstva, najrazličitijih transportnih servisa, organizatora sportskih događaja, itd.

Sistem uspješno koriste istraživači iz različitih oblasti istraživanja: atmosfere, jonosfere i svemirskog vremena, troposfere, vremenske prognoze u skoro realnom

¹⁴¹ Ranije ova kategorija komercijalnih GPS korisnika nije postojala!

¹⁴² Referentni elipsoid usvojen za GPS sistem je GRS80 (Global Reference System 1980).

vremenu, geodinamike, seizmologije, okeanologije, robotike, prirodnih znanosti (praćenje divljih i domaćih životinja), itd.

Posebnu grupu čine korisnici koje bi mogli nazvati javni službenici: policajci, graničari, zaštitari, vozači kola hitne pomoći, vatrogasci, itd. Sistem je uspješno implementiran za praćenje kretanja individua, npr. zatvorenika, ali se primjenjuje i za praćenja kretanja starih i/ili bolesnih osoba, te kućnih ljubimaca i drugih životinja.

Praćenje transporta roba je uveliko uznapredovao primjenom satelitske navigacije.

Razvijen je dakle širok spektar aplikacija o kojima dizajneri prvotnog GPS sistema nisu mogli ni sanjati, ali se svakodnevno pojavljuju nove ideje i moguće primjene sistema. U literaturi se mogu naći publikacije o istraživačkim projektima koje imaju za cilj pronaći nove načine korištenja satelitskih navigacijskih sistema.

Automobilska industrija razvija automobile bez vozača, putarina se naplaćuje automatski, na tržištu su dostupne bespilotne letjelice za mnoštvo različitih primjena (aerofotogrametrija, snimanje filmova, traženje nestalih osoba, kućna dostava porudžbina, itd.), sistemi za izbjegavanje sudara na raskrsnicama, pomagala za vožnju noću i/ili po magli, smanjenje potrošnje goriva, sistem za upozorenje prekoračenja brzine. Proizvedeni su automatski „turistički vodiči“ koji na osnovu lokacije određene pomoću nalijepljenog GPS uređaja na odijelu „govore“ o lokalnim turističkim znamenitostima.

„Precizna agronomija“ je novi pojam uveden nakon razvijanja sistema za upravljanje i praćenje čitavog niza operacija u poljoprivredi, zahvaljujući navigaciji poljoprivrednih strojeva uz pomoć GNSS tehnologije. Uz integraciju s GIS (Geo-informacijski sistem) tehnologijom moderna poljoprivredna proizvodnja ne samo da štedi na vremenu, nego povećava iskorištenost površine zasijanih parcela, optimizira potrošnju goriva, sjemena, pesticida, nego se omogućuje visok stepen automatizacije evidentiranja posijanih površina, s evidencijom datuma sjetve ili žetve, vrstom usjeva, omogućuje lakši monitoring raznih parametara relevantnih za agronomiju. Novi Zeland je prvi razvio sistem koji omogućava automatsko navodnjavanje usjeva.

Slika 4.16 pokazuje samo mali broj korisnika GPS/GNSS sistema: precizni geodetski premjer, transport, građevinarstvo i agronomija.



Slika 4.16: Samo mali broj primjera primjene GPS za pozicioniranje i navigaciju: građevinarstvo, transport ljudi i roba, turizam, poljoprivreda. (URL 4.8)

Zadaća za studente: pogledati video zapise o principima rada GPS sistema i o njegovoj modernizaciji na službenoj web strani SAD vlade o GPS-u na linku URL4.14 <http://www.gps.gov/multimedia/videos/>.

4.3 Ruski satelitski navigacijski sistemi

Danas je širokoj populaciji vjerovatno poznat ruski sistem GLONASS, što predstavlja akronim za navigacijski satelitski sistem kojeg je 1976. godine počeo razvijati bivši Sovjetski Savez, a nazvan je Globalni navigacijski satelitski sistem. Na ruskom jeziku

je to „Globalnaya Navigazionnaya Sputnikovaya Sistema“, ili pak, napisano ćirilničnim pismom „ГЛОБАЛЬНАЯ НАВИГАЦИОННАЯ СПУТНИКОВАЯ СИСТЕМА“. Poslije raspada Sovjetskog Saveza razvoj ruskog navigacijskog sistema preuzela je Ruska Federacija. Slično američkom sistemu GPS, ruski navigacijski sistem GLONASS je razvijen kao vojni. Međutim, slično situaciji u SAD, aktuelni ruski navigacijski sistem GLONASS je imao svoje prethodnike.

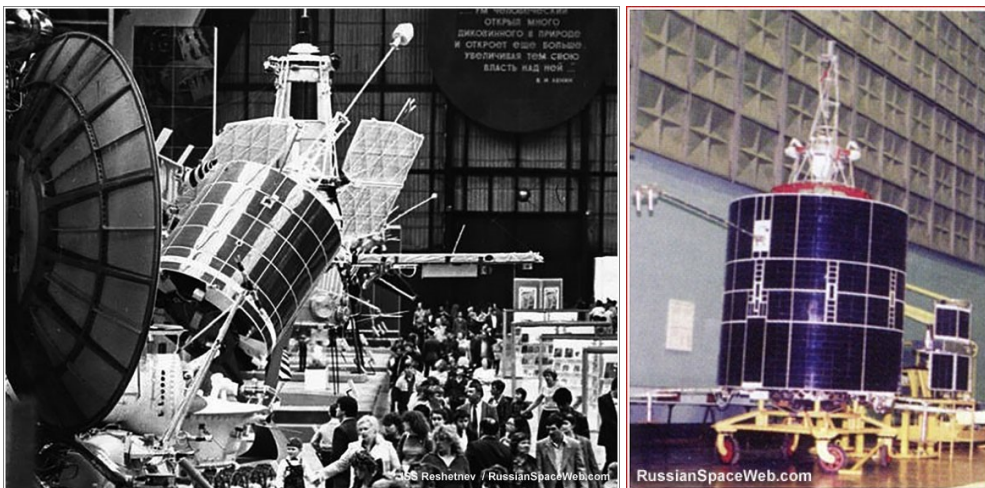
4.3.1 Razvoj sovjetskih navigacijskih sistema

Prva preteča GLONASS sistema bio je sistem Ciklon (ruski ЦИКЛОН; eng. Tsiklon ili Tsyklon), koji je za određivanje položaja korisnika primjenjivao princip Doppler efekta. Iako je ovaj projekt predložen 1962. godine, prvi satelit lansiran je 1967. godine (Solarić, 2007, str. 9). Ciklon sateliti kretali su se u orbitama nagnutim prema ekvatoru pod uglom 74° do 83° , a na visini 800 do 1000 km. Sovjeti su ovaj sistem usvojili za svoju vojsku tek 1972. godine, a do 1978. godine lansirano je 20 satelita, pokazanih na slici 4.17.

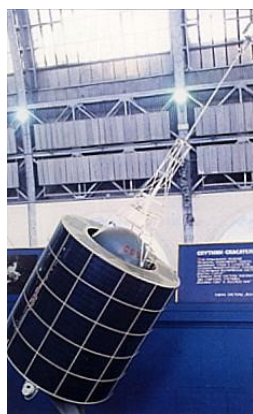
Već 1971. počeo se razvijati drugi vojni sovjetski navigacijski satelitski pod nazivom Parus (rus. Парус) što znači jedro. Razvijen je na osnovu Ciklona, bio je namijenjen za sovjetsku mornaricu, a posebno za navigaciju nuklearnih podmornica. Ovaj sistem je također poznat pod imenom Ciklon-B. Od 1974. do 2010. godine lansirano je čak 96 Parus satelita odnosno, ukupno 99, ako se uzmu u obzir i neuspjela lansiranja. Sistem se poput Transita sastojao od šest satelita na visini oko 1000 km, a inklinacija orbita bila je $82,6^{\circ}$. Za određivanje položaja bilo je neophodno imati dostupan signal sa samo jednog satelita, ali je tačnost vjerovatno bila značajno slabija. Tačnost položaja određenog pomoću ovog sistema, na osnovu podatak opažanja više satelita, u periodu 5 do 15 minuta bila je 100 do 300 m (URL 4.15). Najveći nedostatak je bio što signal nije bio kontinuirano dostupan, a opažanje je bilo moguće u intervalima od 30 minuta do 1,5 sati. Vjeruje se da su neke od osobina i funkcija Parus satelita naslijedili sateliti sistema GLONASS.

Osim navedenih sovjetskih satelitskih navigacijskih sistema vrijedno je spomenuti sistem Cikada, koji se počeo razvijati davne 1974. godine, a sateliti su lansirani u različite orbite sve do godine 1995. godine. Cikada (rus. Цикада; eng. Tsikada). sistem je dizajniran da emitira signal na dvije frekvencija kao i Transit, a u niskim (LEO) orbitama je bilo deset satelita. Za određivanje položaja bilo je potrebno imati dostupan signal s četiri satelita. Ovaj sistem je također bio namijenjen za vojnu mornaricu, ali su i civilni brodovi također koristili signal Cikada sistema. (URL 4.15)

Svi sovjetski sateliti su imali kratak životni vijek, oko dvije godine, što je za posljedicu imalo velike troškove održavanja sistema, ne samo zbog izrade satelita nego i zbog ogromnih troškova lansiranja satelita u orbitu.



Slika 4.17: Ciklon (Tsyklon/Parus) navigacijski sateliti. Slika lijevo pokazuje eksponat na Sajmu ekonomskih postignuća u Moskvi, između 1970. i 1980-tih godina (izvor: URL 4.15)



Slika 4.18: Satelit Cikada (eng. Tsikada), razvijen na osnovu Parus i Ciklon satelita. izvor: URL4.16

Kao osnovni nedostatak navedenih satelitskih navigacijskih sistema, slično američkom Transitu, bila je nemogućnost određivanja položaja i trajektorije za sve objekte u realnom vremenu, a zbog malog broja satelita i niske orbite. Tako su savremeni satelitski sistemi za navigaciju dizajnirani na iskustvu prethodnih sistema. Dakle, sovjetski navigacijski satelitski sistemi Parus i Cikada su zamijenjeni aktuelnim sistemom GLONASS.

4.3.2 GLONASS

Slični američkom GPS sistemu, savremeni ruski navigacijski satelitski sistem GLONASS je dizajniran tako da osigura precizno i pouzdano pozicioniranje i navigaciju svakog korisnika, opremljenog odgovarajućim prijemnikom radio signala, u realnom vremenu, za sve korisnike na planeti i bližem svemiru, bez obzira na vremenske uvjete, doba dana, geografski položaj ukoliko se nalazi na lokaciji bez zapreka ka nebu. Za pozicioniranje je potrebno simultano primiti signal s najmanje četiri satelita, ako se želi u realnom vremenu izračunati položaj i brzina, s tačnošću horizontalnog položaja od oko 6 m i 10 m za visine. Arhitektura GLONASS sistema, slično GPS sistemu, sačinjena je od tri segmenta: Satelitskog/svemirskog, kontrolnog i korisničkog.

4.3.2.1 *Satelitski segment*

Kao i ostali GNSS sateliti, GLONASS sateliti imaju zadatak da emitiraju signale: kodirane i nosač faze, te da prime navigacijsku poruku koju redovno šalje kontrolni segment, nakon prijema poruku pohranjuju i emitiraju je.

Prvi satelit GLONASS sistema lansiran je 12. oktobra 1982. godine. Bio je to prototip satelita, a drugo ime ovih satelita je Uragan. Konstelacija je upotpunjena do 1993. godine. Prvi (prototip) sateliti ovog sistema (Blok I) su bili dizajnirani da traju samo jednu godinu. Lansiranje satelita prve stvarne generacije GLONASS satelita (Blok II) počelo je 1985. a trajalo je do 1990. godine. Težina ovih satelita bila je oko 1.200 kg. Vijek trajanja je produžen ali je bio različit za grupe satelita. Kako je vijek trajanja satelita bio produžen na dvije, tri i četiri i po godine, prema tome su sateliti bili grupisani i nazvani respektivno, Blok IIa, Blok IIb, Blok IIv. Činjenica da su sateliti imali kratak vijek trajanja, kao i političko-ekonomska situacija, doprinijeli su da je krajem devedesetih godina prošlog stoljeća GLONASS sistem bio skoro u kolapsu.

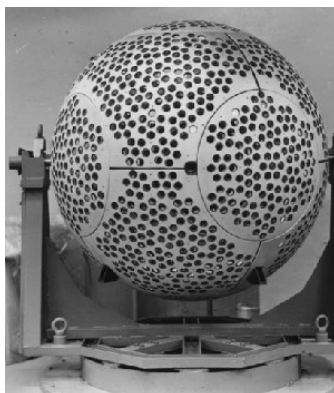
Sateliti su smješteni u orbitama srednjih visina (Medium Earth Orbiting-MEO), ali nešto ispod američkih GPS satelita, na visini od oko 19 100 km. Sateliti su raspoređeni u tri orbitalne ravnine. Dakle, rektascenzija orbitalnih ravnina razlikuje se za 120°. Svaka ravnina sadrži osam satelita. Orbite su u odnosu na ekvator nagnute za 64,8° što omogućuje da se signali mogu primiti i na visokim geografskim širinama, a što je veoma danas važno, jer se zbog klimatskog zatopljenja na planeti brodovi sve češće plove kroz sjeverne oblasti.

GLONASS sateliti običu Zemlju i nađu se u istom položaju nakon 11 sati i 15 minuta sideričkog vremena. Tačnost određivanja položaja GLONASS sistema je slična tačnosti američkog sistema.

Napajanje kompjutera i druge satelitske opreme električnom energijom, osigurava se pomoću dva solarna panela koji su pričvršćeni za centralni modul satelita. Antene su orijentirane ka Zemlji.

Za definiranje i popravljivanje geodetskog referentnog sistema u kojem treba određivati položaj korisničkog prijemnika pomoću radio signala GLONASS sistema, 10. januara godine 1989. godine u orbitu je poslan (na mjesto jednog GLONASS satelita) pasivni geodetski satelit pod nazivom Etalon 1. Iste godine, 31. maja lansiran je Etalon 2.

Dakle, Etalon je satelitska misija koja je imala geodetski zadatak. Sateliti su pasivni, tj. ne emitiraju signale. Satelit je opremljen samo reflektorskim prizmama u pravilnom rasporedu (Slika 4.19). Satelit je ustvari namijenjen za SLR (satellite laser ranging) satelitsku tehniku mjerenja. Cilj Etalon satelitske misije je bio da se s visokom tačnošću odredi: terestrički referentni okvir i Zemljini rotacijski parametri, te da se popravi poznavanje gravitacijskog polja i poznavanje gravitacijske konstante. Satelit je bio težak 1.415 kg, sadržavao je čak 2.146 reflektirajuće prizme, radijus satelita samo 1,294 m. Period obilaska Etalon satelita bio je 675 minuta, kretao se po kružnoj orbiti na visini oko 19.100 km kao i GLONASS sateliti, inklinacija orbite je bila $65,5^\circ$ (URL 4.16)



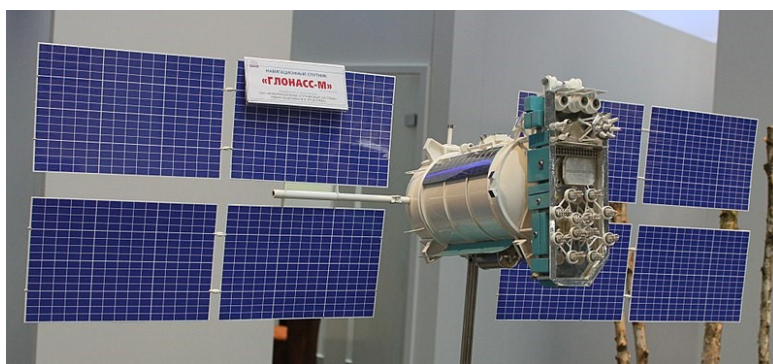
Slika 4.19: Model geodetskog pasivnog satelita Etalon za SLR tehniku mjerenja (URL4.17)

Početkom 21. stoljeća Ruska Federacija je obnovu svog navigacijskog satelitskog sistema usvojila za prioritet, te je u 2010. godini, čak jednu trećinu ukupnog budžeta usmjerila na ovaj projekt¹⁴³. Prvi satelit druge generacije, modificiranih satelita

¹⁴³ Za izgradnju infrastrukturnog projekta GLONASS, iz budžeta Ruske Federacije odvojeno je 181 miliona dolara za godinu 2006., dok je 2007. godine uloženo 380 miliona dolara. <https://sptnkne.ws/eZsD> (URL419)

GLONASS-M lansiran je 2001. godine. Model satelita GLONASS-M (također nazivan Uragan-M) pokazan je na slici 4.20 kao eksponat na sajmu CeBIT¹⁴⁴ 2011.

U oktobru 2011. godine, satelitska konstelacija je bila upotpunjena, tj. u orbiti je bilo operativno 24 satelita druge generacije. Rok trajanja modificiranih satelita bio je produžen na sedam godina, zahvaljujući modernizaciji pogonskog sistema i satelitskih satova. Težina ovih modificiranih satelita bila je oko 1 480 kg, dijametra 2,4 m i visine 3,7 m. Ovi sateliti su također nosili reflektorske prizme za precizno određivanje orbita i geodetska mjerenja. Značajno poboljšanje GLONASS-M tipa satelita je dodatak drugog civilnog koda na G2 što je dalo mogućnost civilnim korisnicima da eliminiraju utjecaj jonosferske refrakcije.

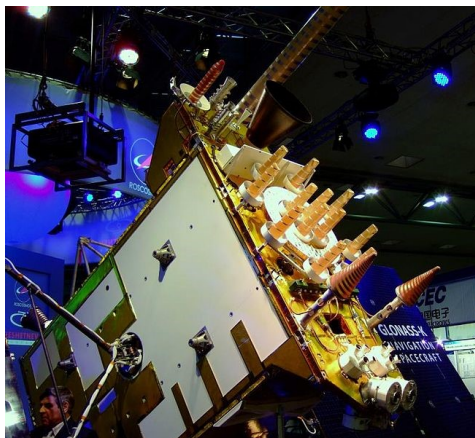


*Slika 4.20: Model modificiranog satelita GLONASS-M, izložen na CEBIT 2011.
izvor: URL4.18*

Treća generacija satelita nazvana je GLONASS-K ili Uragan-K. Prvo lansiranje ovog tipa satelita bilo je 26. februara 2011. Vijek trajanja ovim satelitima je produžen na 10 do 12 godina a težina smanjena na oko 750 kg, što je omogućilo lansiranje po dva satelita jednom raketom. Najmoderniji GLONASS-K sateliti pored emitiranja signala na valovima G1 i G2, primjenjujući tehniku FDMA (Frequency Division Multiple Access), a koja se koristi za sve GLONASS satelite, na trećem signalu G3 emitira signal uz primjenu tehnike CDMA (Code Division Multiple Access) za sve civilne korisnike.

¹⁴⁴CeBIT(ger.Centrum

für Büroautomation, Informationstechnologieund Telekommunikation; eng. Center for Office Automation, Information Technology and Telecommunication) je u svijetu najpoznatija izložba informatičke tehnologije koji se svake godine organizira u Hanoveru, Njemačka.



Slika 4.21: Najmoderniji model satelita GLONASS-K, rok trajanja 12 godina

izvor: URL 4.20

Važno je naglasiti da svi GLONASS sateliti emitiraju isti kod, ali na različitim frekvencijama. Upravo obrnuto od američkog GPS, gdje su frekvencije zajedničke za sve satelite ali svaki satelit emitira različit kod. Ustvari, neki GLONASS sateliti emitiraju na istim frekvencijama, ali se ti sateliti nalaze na dijametralno različitim položajima u orbiti, tj. na suprotnim stranama Zemlje. Nije moguće da prijemnik istovremeno primi signal emitiran s oba satelita koji emitiraju na istoj frekvenciji.

GLONASS sateliti, slično američkom sistemu, osiguravaju dva nivoa tačnosti. Dakle, emitiraju visoko-precizni signal za vojne korisnike, ali i signal standardne preciznosti za određivanje položaja civilnih korisnika. Signali se emitiraju na dvije frekvencije, koje su centrirane na 1.602 i 1.246 GHz.

U novembru 2011. lansiran je prvi GLONASS-K satelit, kad je u orbiti bilo 24 satelita (Slika 4.22). Samo oko mjesec dana poslije, 8. decembra, predsjednik Ruske Federacije Vladimir Putin je proglasio potpunu operabilnost sistema, uz besplatno korištenje signala za civilne korisnike, širom planete. Sistem je bio sposoban da u realnom vremenu odredi položaj i brzinu kretanja prijemnika u odnosu na globalni referentni sistem.



Slika 4.22: GLONASS konstelacija. izvor: URL 4.21

Signal kojeg emitiraju sateliti GLONASS (sl.4.21) su desno orijentirani cirkularno polarizirani signali koji su centrirani na dvije radio frekvencije L opsega. Obično se obilježavaju kao G1 i G2. Dostupne su dvije vrste GLONASS servisa: standardni i precizni.

Standardni pozicionirajući servis, SPS (Standard Positioning Service/Standard Accuracy Signal Service) je besplatni servis dostupan svim korisnicima širom svijeta. Navigacijski signal (civilni) je do lansiranja GLONASS-M satelita bio emitiran samo na G1 ali od 2004. godine se civilni signal emitira i na G2 valu. Precizni pozicionirajući servis, PPS (Precise Positioning Service/ High-Accuracy Signal Service) mogu koristiti samo autorizirani korisnici i vojska. Dva navigacijska signala emitiraju se na G1 i G2, (Subirana i dr. 2013). Ranije je konstatirano da sateliti ruskog navigacijskog sistema ne emitiraju na istoj frekvenciji i da koriste FDMA tehniku za identifikaciju satelita. Modernizacijom GLONASS sistema, predviđeno je da sateliti primjenjuju također CDMA tehniku na G1, G2 i G3 (L3) opsegu kao i na GPS L5.

Frekvencija naslijeđenog GLONASS signala emitira na G1 i G3 se može izvući iz broja kanala k ako se primijene obrasci prema (Subirana i dr., 2013 str. 25):

Za frekvencijski opseg G1:

$$f_1(k) = 1602 + k \times 9/16 = (2848 + k) \times 9/16 \text{ MHz}$$

Za frekvencijski opseg G2:

$$f_2(k) = 1246 + k \times 7/16 = (2848 + k) \times 7/16 \text{ MHz}$$

Na navedenim frekvencijama su modulirani C/A (civilni) i precizni P (vojni) kod, kao i navigacijska poruka D, uz korištenje BPSK tehnike. Civilni i precizni kodovi imaju periode od 1 ms i 1 sekunde, a dužina čipova iznosi 586.7 i 58.67 m.

Detaljnije o GLONASS signalima čitalac može naći u (Subirana i dr., 2013 str. 25-30).

4.3.2.2 Kontrolni segment

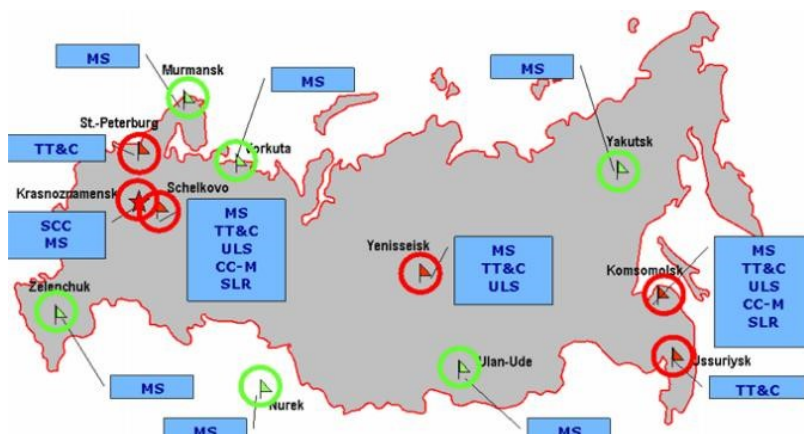
Slično svim GNSS sistemima, tako i GNSS kontrolni segment ima najveću odgovornost. Zadaci kontrolnog¹⁴⁵ segmenta bi se mogli sažeti u nekoliko grupa:

- kontrolira i održava status svih satelita u sistemu,
 - računa (predviđa) parametre efemerida i korekcije sata satelita u odnosu na referentnu skalu sistema,
 - održava vremensku skalu GLONASS sistema,
 - redovno (dva puta na dan) dopunjava podatke navigacijske poruke za sve satelite u sistemu.
-
- Kontrolni sistem čine: Kontrolni centar u blizini Moskve u mjestu Krasnoznamensk, mreža komandnih i pratećih stanica, koje su locirane na teritoriju država koje su bile dio Sovjetskog Saveza¹⁴⁶. Raspored stanica kontrolnog segmenta pokazan je na slici 4.23.¹⁴⁷ Jedan od najvažnijih zadataka dodijeljen je Centru za sinhronizaciju vremena, lociranom u blizini Moskve u blizini mjesta Schelkovo.
 - Pored navedenog kontrolni segment ruskog sistema ima dvije SLR opservatorije (slika 4.24), locirane u mjestima Schelkovo i Komsomolsk (Daleki istok).

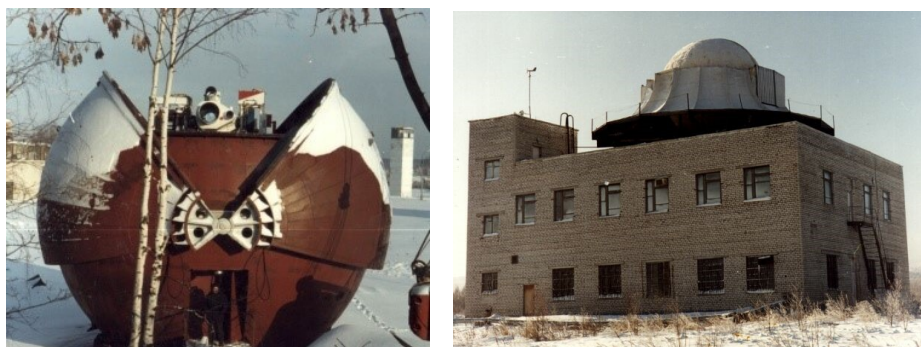
¹⁴⁵ Kontrolni segment se ponekad naziva i Zemaljski segment.

¹⁴⁶ Službeni naziv Sovjetskog Saveza: Savez Sovjetskih Socijalističkih Republika – SSSR.

¹⁴⁷ U novije vrijeme Ruska Federacija nastoji kontrolne stanice GLONASS kontrolnog segmenta rasporediti i na druge dijelove planete, o čemu javno ne govori. p.a.



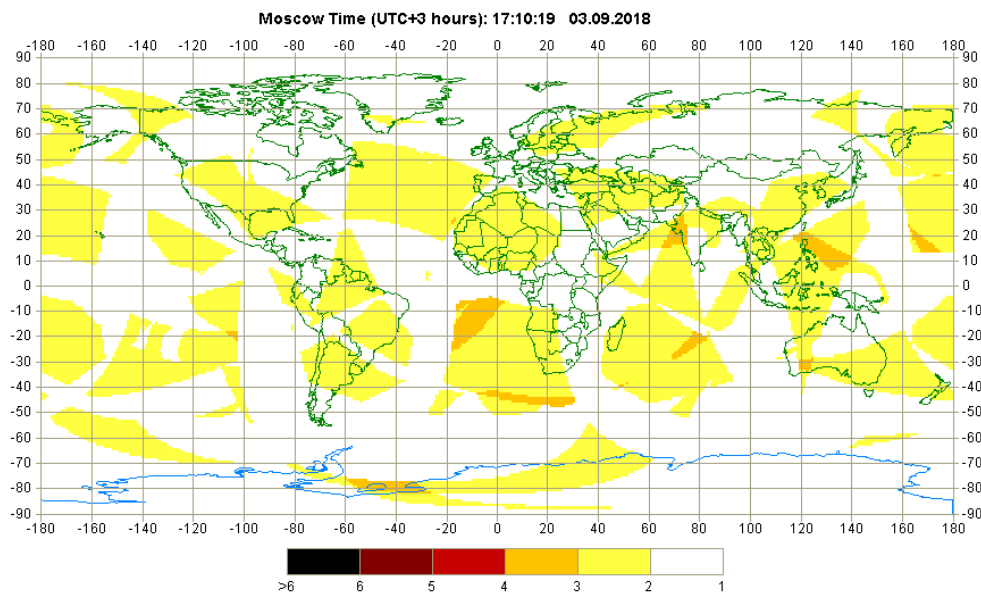
Slika 4.23: GLONASS Kontrolni segment (izvor: URL 4.22)



Slika 4.24: SLR stanica u Schelkovu, (lijevo) gdje se rade geodetska opažanja. Intuitivno zaključite o dimenzijama geodetskih instrumenata prema čovjeku na vratima. (izvor: URL4.23). Desno je kontrolna stanica u Komsomolsku, a SLR observatorija locirana na krovu. (izvor: URL 4.24)

Kontrolni segment između ostalog radi stalni monitoring dostupnosti signala. Slika 4.25 pokazuje trenutnu situaciju ako se posmatra PDOP faktor, za dan 3. septembra 2018. godine u 17 sati 10 minuta i 19 sekundi, po skali Moskovskog vremena, tj. UTC+3 sata. Pri tom se smatra da se korisnik nalazi na površini Zemlje, a za elevacijsku masku korisnika uzme 5° . Karta jasno pokazuje da je na velikoj površini planete PDOP faktor 1 ili 2, a samo na malim površinama je 3. Slika jasno pokazuje da korisnici na otvorenom prostoru mogu imati dobru položajnu tačnost ukoliko nemaju zapreka signala, kao npr. šuma, urbani ili prirodni kanjoni i sl. Polarne oblasti također imaju veoma dobru dostupnost signala, što u novije vrijeme ima veliki značaj ne samo zbog intenziviranih istraživanja u polarnim oblastima nego i ima ekonomski

efekat jer u doba otopljanja lednika brodovi sve češće biraju kraći put kroz polarne oblasti.



Slika 4.25: Karta pokazuje dostupnost GLONASS signala i faktor pozicionirajućeg geometrijskog rasporeda satelita (PDOP faktor), za korisnike na površini Zemlje, pri elevacijskom uglu signala od 5°, za 3. septembar 2018. godine u trenutku 17:10:19 Moskovskog vremena. (izvor: URL 4.25)

Budući da GLONASS sistem, kao i svi drugi GNSS sistemi stalno evoluiraju i osavremenjavaju, iznesene činjenice mogu postati neažurne i zahtijevati dopunjavanje te se čitalac za više informacija upućuje na online izvore, ka npr. službenu web stranu sistema, odnosno, Informacioni i analitički centar za pozicioniranje, navigaciju i mjerenje vremena, na linku <https://www.glonass-iac.ru/en/> tj. URL 4.26; ESA Navipedia; Subirana i dr., 2013;

Četvrto poglavlje opisuje navigacijske sisteme koji su u vrijeme pisanja teksta bili u potpuno operativni i u procesu modernizacije sistema: GPS i GLONASS. Završetak ove faze modernizacije najavljuje se do 2020. godine.

Ekonomski jake države svoju snagu i suverenitet pokazuju na različite načine, pa i razvijanjem vlastitih navigacijskih satelitskih sistema. U tu skupinu država trenutno se ubrajaju: Evropska Unija, Kina, Japan, Indija, ali i neke druge države planiraju u budućnosti razviti svoju državnu infrastrukturu u vidu satelitskih navigacijskih sistema. Ovu temu razmatra sljedeće poglavlje.

Glava 5

5 NAVIGACIJSKI SATELITSKI SISTEMI U RAZVOJU

Najstariji radio navigacijski satelitski sistem pokazao se kao veoma važna državna infrastruktura SAD-a jer autonomno pozicionira specijalno izrađene radio prijemnike na globalnoj razini. Prva namjena satelitskih navigacijskih sistema bila primjena u vojne svrhe: pozicioniranje, praćenje, te navođenje podmornica, brodova, aviona, vojnih vozila i pješaka. Magla je prestala biti problem u planiranju i provođenju vojnih akcija, jer za GPS pozicioniranje i navigaciju nije neophodna optičko dogledanje ciljeva. Satelitska navigacija omogućila ranije nezamislivu tačnost u „isporuci“ oružja na ciljeve.

Budući GPS omogućava besplatno korištenje signala bilo gdje na površini Zemlje, korisnici iz drugih država počeli su vrlo brzo rutinski primjenjivati satelitsku tehnologiju, ne samo za precizni geodetski premjer i navigaciju svih vidova transporta, nego u industriji i uslugama. Satelitska navigacija je revolucionarno promijenila (i nastaviti će mijenjati) način rada u industriji i poslovnom svijetu općenito. Pored toga ističe se globalne promjene načina rada svih vladinih organizacija ali i načina djelovanja svakog pojedinca.

U međuvremenu su se pod utjecajem satelitske navigacije razvile mnoge nove aplikacije, o kojima stručnjaci koji su ustanovili GPS nisu mogli ni sanjati. Danas se slobodno može reći da, bez satelitskog pozicioniranja i navigacije, život i rad modernog čovjeka nije moguće ni zamisliti. Zahvaljujući GNSS tehnologiji danas su na tržištu dostupne nevjerovatne inovativne i efektivne aplikacije, servise (usluge) i oprema. Paralelni razvoj informatičke tehnologije, telekomunikacija i interneta, omogućili su i postali katalizatori razvoja tehnologije. Ovdje se navedi primjer nove obećavajuće tehnologije, tkz. „*internet stvari*“ - IoT (eng. *Internet of Things*). Internet stvari predstavlja tehnologiju budućnosti i daje jedinstvenu priliku za pokretanje novih malih kompanija i zapošljavanje velikog broja stručnjaka iz informatičkog i GNSS sektora.

Internet stvari, pojednostavljeno opisano, predstavlja povezivanje uređaja putem interneta. Povezivanje i međusobnu komunikaciju uređaja (ili predmeta kojim su se dodali uređaji za komunikaciju) danas je omogućeno i pojednostavljeno uz pomoć bežične tehnologije. Ovako se osigurava međusobna interakcija između različitih sistema, a omogućuje se međusobna kontrola, praćenje i pružanje naprednih usluga.

Za implementaciju ovakvih sistema potrebno je imati dovoljno jeftine senzore koji međusobno komuniciraju. Dakle, IoT povezuje stalan tok informacija između procesa koji ojačavaju svijet oko nas. U tom procesu GNSS daje kritično važne informacije o položaju/lokaciji i vremenu, što je neophodno za svakodnevno međusobno komuniciranje i operiranje „naprava“.

Druga zanimljiva inovacija i aplikacija razvijena od kompanije u Grazu, Austrija, a može poslužiti kao primjer humanih upotreba GPS i Galileo sistema. Ova aplikacija podržava i popravljiva mobilnosti starijih osoba. Poznato je da se stari ljudi ponekad zbog demencije izgube u gradu, te je razvijen uređaj za automatsko određivanje položaja i davanje instrukcija za povratak kući (EC Memo, 2012).

Moderni servisi koji ovise o radio navigaciji i preciznom mjerenju vremena su odavno postali okosnica globalnog ekonomskog razvoja¹⁴⁸. Pored toga što sistemi za radio navigaciju igraju veoma važnu ulogu u mnogim sektorima privrednog razvoja, civilnog i komercijalnog, imaju sve veću ulogu u aktivnostima odbrane, bezbjednosti i zaštite života građana.

Razmatrajući ranije iznesene činjenice, razumljivo je da su političko-ekonomski jake države shvatile da se ne trebaju u potpunosti osloniti na postojeće satelitske navigacijske sisteme GPS i GLONASS, koji su u vlasništvu dvije svjetske velesile, budući uvijek postoji rizik da se bez najave smanji tačnost ili potpuno ukine prijem satelitskog signala. Zato su Evropska Unija, Kina, Japan, Indija u želji da zaštite svoj suverenitet i postignu „svemirski orijentiranu političku neovisnost“ započeli razvijati vlastite satelitske navigacijske sisteme. Osnovni cilj je da se izbjegne eventualni monopol ili osigura sigurnost u prijemu signala za široku lepezu svojih korisnika, civilne avijacije, oružanih snaga, državnih struktura (državne bezbjednosti i granične službe, policije, službe spašavanje, institucija i organizacija za preventivu i saniranje prirodnih nepogoda, itd.), pa sve do aplikacija u mobilnim telefonima i bankovnih transakcija.

¹⁴⁸ Analiza iz 2016. godine indicira da preko 10% EU ekonomije se zasniva na GNSS sektoru, a trend pokazuje da će se ovaj procent povećati. (Analysis of GNSS impact on EU economy, VVA Consulting for the European Commission, 2016)

5.1 Evropski satelitski navigacijski sistem – Galileo

Evropska Unija razvija svoj satelitski navigacijski sistem pod imenom Galileo, u znak sjećanja na oca moderne astronomije i moderne fizike, Galileo Galileia¹⁴⁹. Ovaj naziv sistema pojavio se prvi put u dokumentu Evropske Komisije – EC (European Commission) od februara 1999. godine, (URL5.1). Galileo je globalni navigacijski sistem koji predstavlja zajednički projekt EU i Evropske svemirske agencije - ESA (European Space Agency). Osnovana je Evropska GNSS agencija - GSA (European Global Navigation Satellite Agency) sa sjedištem u Pragu (URL5.2), koja zajedno s Evropskom Komisijom i agencijom ESA provode neophodne organizacijske i inženjerske zadatke da bi se osigurali kontinuirani i pouzdani servisi za EU i sve korisnike sistema širom planete.

Ono po čemu se Galileo razlikuje od svih drugih RNSS¹⁵⁰ je da je to **civilni sistem**. Možda će baš ova činjenica dati budućem razvoju cijele GNSS zajednice snažan utjecaj, a moguće su značajne promjene politike u donošenja odluka na nivou svih GNSS provajdera.

Početna ideja je bila da sistem razvijaju privatne kompanije ali implementacija ove ideje nije bila bez problema. Osnovni razlog poteškoća treba tražiti u činjenici što razvoj sistema zahtijeva enormno visoka dugotrajna finansijska ulaganja bez brzog povrata investiranih sredstava. Zato je početkom 21. stoljeća Vijeće Evrope preuzelo financiranje sistema iz EU fondova za istraživanje i razvoj. Situacija nastala izlaskom Velike Britanije iz EU (Brexit) dala je nove poteškoće implementaciji Galileo programa, kako finansijske tako i organizacijske. Važno je u napomenuti da je EU skorijoj prošlosti usvojila važne strateške dokumente:

- Svemirsku strategiju za Evropu, u oktobru 2016. godine (URL 5.3) i
- Evropski plan za radio navigaciju, u martu 2018. godine (URL5.4).

Galileo program je strukturiran u dvije osnovne faze:

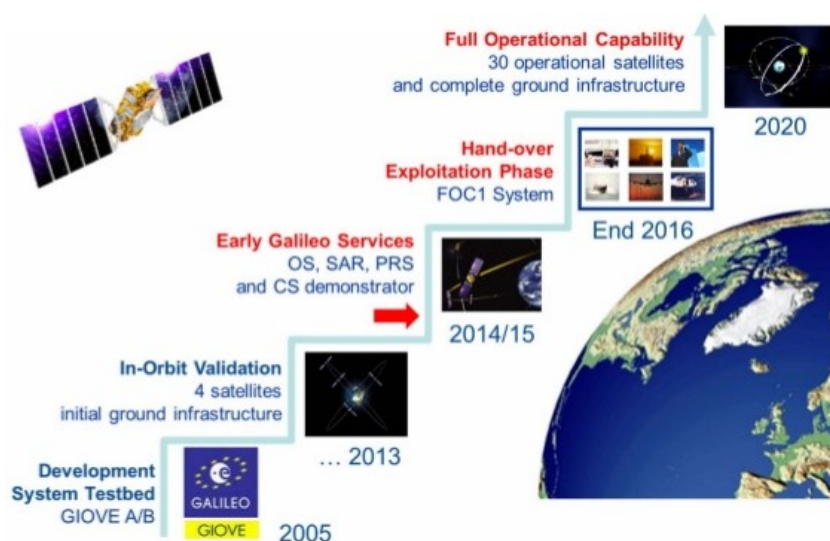
1. Provjeravanje u orbiti – IOV (eng. In Orbit Validation phase)
2. Potpuna operativna sposobnost – FOC (Full Operational Capacity phase)

¹⁴⁹ Galileo di Vincenzo Bonaiuti de' Galilei, (Pisa, 15.02.1564. – Arcetri, 08. 01.), talijanski matematičar, fizičar, astronom i filozof. Konstruisao je durbin i prvi je Evropljanin koji je koristeći durbin sistematično posmatrao nebo, te je prvi opažao i opisao Jupiterove mjesece, Mliječni put, Sunčeve pjege, kratere na Mjesecu, mijene planete Venere. Posmatrao je planete i zato podržao Kopernikov heliocentrični koordinatni sistem, zbog čega je dugi niz godina radio i pisao u „ilegali“ jer je bio pod sankcijama crke zbog svojih stavova.

¹⁵⁰ RNSS ili radio navigacijski satelitski sistemi

IOV faza predstavljala je kvalifikaciju sistema kroz niz različitih testova i opažanja ponašanja dva eksperimentalna satelita, a poslije opažanja reduciranu konstelaciju od samo četiri operabilna satelita. IOV faza je također uključivala testiranje i monitoring neophodne infrastrukturne opreme kontrolnog segmenta. Ova faza je završena 2013. godine s dobrim rezultatima.

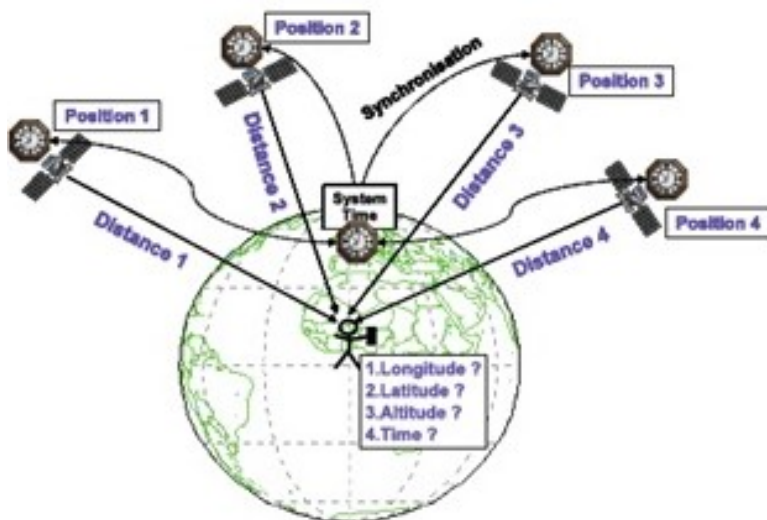
Druga faza, FOC, započela je 2013. godine, a sastoji se od raspoređivanja ostale infrastrukture na površini Zemlje i u svemiru. Ovo uključuje i srednju fazu inicijalne operativne sposobnosti sa 18 satelita u orbitama, tj. četiri IOV satelita, plus 14 drugih. Puni sistem je dizajniran da sadrži ukupno 30 satelita u MEO orbitama, kontrolne centre locirane na različitim mjestima u Evropi, te konačno, mrežu opažачkih stanica i „uplink“ stanica koje su postavljene širom planete, (URL 5.5) Slika 5.1 detaljnije ilustrira razvoj Galileo programa na vremenskoj skali, a pokazuje kako su podijeljene dvije osnovne faze razvoja, počevši od definiranja do pune operabilnosti sistema, koja se planira do 2020. Prema izvještajima GSA (URL 5.6), nakon lansiranja dana 25. jula 2018. godine Galileo je imao 26 satelita u orbitama, od kojih je 18 operabilno. Zbog velikih temperaturnih varijacija satelita, čija se vijek trajanja predviđa na deset godina, EU i ESA u svojim planovima zacrtali su 2023. godinu kao početak zamjene satelita.



Slika 5.1: Plan implementacije Galileo sistema (izvor: Lisi, 2014)

Predračun budžeta za razvoj Galileo sistema početno je previđen na oko 3.4 milijardi eura: oko 80 miliona eura za fazu definiranja sistema, 1,25 milijardi eura za dizajniranje i IOV fazu, oko 2,15 milijardi eura za fazu raspoređivanja svih satelita i

infrastrukture za kontrolu, te 220 miliona eura za dovođenje u punu operabilnost. Međutim, već 2011. godine je EU izvijestila da je predviđena cijena izgradnje sistema narasla na 5.4 milijardi eura, (URL 5.7), ali izvještaji govore da je Galileo do ljeta 2018. koštao EU porezne obveznika oko 10 milijardi eura (URL 5.8), ali da se ulaganje isplati jer se predviđa da će se vrijednost servisa Galileo sistema do 2020. godine udvostručiti i narasti na 220 milijardi eura. Isti izvor navodi da EU planira dalja ulaganja u Galileo program koja prevazilaze dosadašnja: čak 16 milijardi eura između 2021. i 2027. godine. Izvještaji kažu da čak 80% mobilnih telefona već u 2018. primaju signal Galileo sistema. Nakon usvajanja neophodnih pravnih i regulatornih dokumenata, sva vozila na evropskim cestama će biti opremljena navigacijskim uređajima koje koriste Galileo signal, a što vodi uspostavi sistema „pametnog upravljanja saobraćajem“ i uvođenje autonomnih vozila, koji se upravljaju pomoću radio satelitske navigacije uz integraciju drugih senzora za navigaciju, npr., inercijalni navigacijski sistemi -INS.



Slika 5.2: Princip navigacije i sinhronizacije vremena nekog korisnika na površini Zemlje, korištenjem samo Galileo sistema (izvor: EC Memo, 2012)

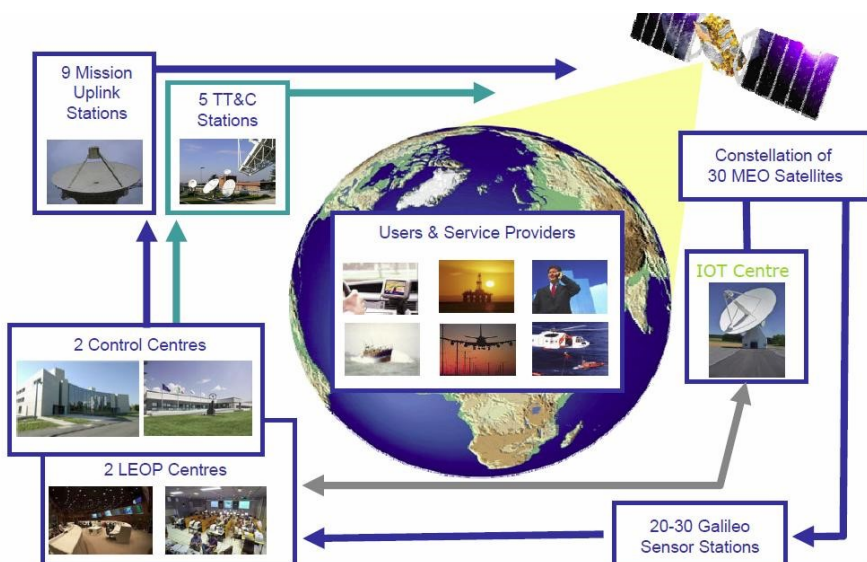
Ilustrirani princip globalne navigacije i sinhronizacije vremena uz primjenu globalnog satelitskog navigacijskog sistema, pokazan je na slici 5.2. Korisnik za trenutno određivanja položaja (širine, dužine i visine) treba odrediti udaljenosti od četiri satelita¹⁵¹ (referentne tačke u svemiru, tj. poznat im je trenutni položaj) dok

¹⁵¹ Neophodne su najmanje četiri dužine da se odrede četiri nepoznate, tj. tri koordinate i korekcija sata prijemnika.

satelitski satovi sinhroniziraju svoje skale vremena sa glavnim satom na Zemlji, koji je jedan od osnovnih dijelova kontrolnog segmenta sistema.

Mnogo važnih informacija o Galileo sistemu moguće je naći u javno dostupnim dokumentima na web strani GSA na linku (URL5.9).

Arhitekturu evropskog satelitskog navigacijskog sistema također čine tri segmenta: svemirski, kontrolni (zemaljski) i korisnički. Slika 5.3. pokazuje arhitekturu sistema nakon postignute pune operativne sposobnosti - FOC.



Slika 5.3: FOC Arhitektura Galileo sistema (izvor: URL 5.10)

Potpuni izgrađen sistem predviđa izgrađenu i funkcionalnu slijedeću infrastrukturu: (URL5.10):

- 30 satelita u MEO orbitama
- globalnu mrežu stanica opremljenih Galileo senzorima – GSS (Galileo Sensor Stations). GSS stanice osiguravaju globalnu pokrivenost za sinhronizaciju sata i mjerenja orbite,
- dva kontrolna centra – CC (Control Centers) i dva centra LEOP (Launch Early Operations Centers),
- mrežu stanica za „uplink“ (Mission Uplink stations),
- Nekoliko stanica za telemetriju kao i stanice za praćenje i kontrolu – TT&C (Telemetry, Tracking and Control).

Zainteresirani čitalac se usmjerava da pogleda video zapis o Galileo na ESA službenoj web strani (URL 5.11), a za više informacija o razvoju i budućnosti Galileo programa na online izvoru ESA navipedia, URL 5.12.

5.1.1 Galileo svemirski segment

Svemirski segment Galileo sistema je dizajniran po principu familije GNSS-a, a to znači da sateliti služe kao „nebeske“ referentne tačke. Sateliti (referentne tačke) emitiraju precizno vremenski kodirane navigacijske signale. Nominalnu Galileo konstelaciju čini 27 satelita, koji su raspoređeni u tri orbitalne ravnine, pod uglom od 56° u odnosu na ekvator. U svakoj orbiti treba biti raspoređeno po devet operabilnih satelita, a u svakoj ravnini po jedan rezervni, što čini ukupnu konstelaciju od 30 satelita, (ICG, 2010, str. 19). Galileo sateliti se kreću po kružnoj orbiti oko Zemlje, s nominalnim polu-prečnikom od 30 000 km, dok njihov period obilaska oko Zemlje približno iznosi 14 sata.

5.1.1.1 Galileo sateliti

U eksperimentalnoj fazi Galileo sistema lansirana su dva GIOVE (Galileo In-Orbit Validation) satelita između 2005. i 2008. godine: GIOVE – A i GIOVE –B. Ovi eksperimentalni Galileo sateliti i zemaljska infrastruktura su imali slijedeće zadatke (Subirana, 2013, str. 12):

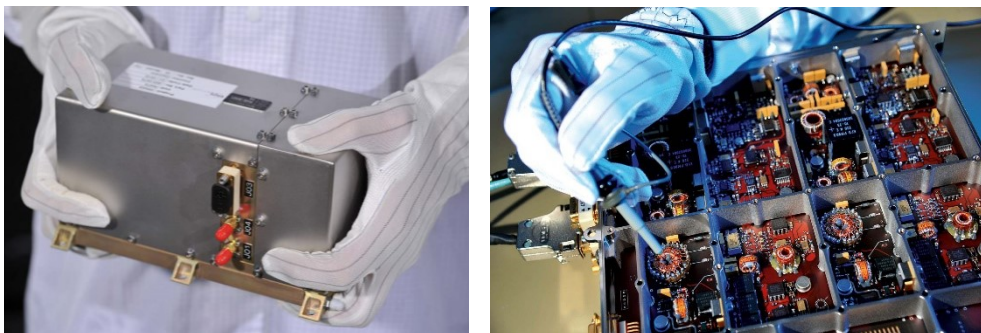
1. Osigurati i održavati Galileo frekvencije u skladu s Međunarodnom telekomunikacijskom unijom – ITC (International Telecommunications Union)
2. Testirati tehnologiju koja bi se koristila za operativni Galileo sistem.
3. Nadgledati okruženje u kojem bi funkcionirali sateliti u MEO orbitama.
4. Generirati signale tako da bi se razvila oprema za korisnički segment.

Izrađena su dva GIOVE satelita da bi se osigurala pouzdanost rada u orbiti i osigurao cilj misije. GIOVE - A lansiran je 28. decembra 2005., a imao je ugrađena dva mala rubidijum atomska sata, čija je stabilnost iznosila 10ns/dan. Težina satelita bila je oko 500 kg, a nominalni vijek trajanja bio je 27 mjeseci ali je produžen. GIOVE – B satelit je lansiran 27. aprila 2008. godine. Ovaj satelit imao je pored dva mala rubidijum atomska sata, ugrađena dva dodatna atomska sata čija je tačnost (stabilnost frekvencije) čak deset puta veća od rubidijumskih satova. Ovi najsavremeniji frekvencijski standardi nazivaju se pasivni hidrogenski maseri¹⁵², a koriste fizičke

¹⁵² Maser je uređaj koji proizvodi koherentne elektromagnetne valove kroz amplificiranje stimuliranih emisija radijacije.

osobine vodonika¹⁵³ kao izvor referentne frekvencije, koja je stabilna do na 2×10^{-16} sekundi/dan.

Rubidijum atomski sat koji se ugrađuju u nove Galileo satelite pokazan je na slici 5.4. Ovi satovi služe za ugradnju u navigacijske satelite Galileo i indijski IRNSS, kao i za istraživačke projekte uspostavljanja rubidijum standardne frekvencije - RAFS (Rubidium Atomic Frequency Standard) te monitoring atomskih satova za održavanje skala vremena.



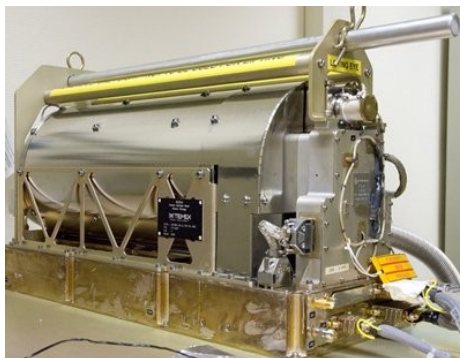
Slika 5.4: Rubidijum atomski satovi koji se ugrađuju u nove Galileo satelite, lijevo (URL 5.13). Slika desno pokazuje elektroniku u unutrašnjosti rubidijum atomskog sata, koji se koristi za monitoring satova. (URL5.14)

Preliminarni izvještaji o postignutoj tačnosti pozicioniranja uz pomoć samo Galileo sistema, koji nije dostigao punu operativnost, navode da tačnost prevazilazi predviđanja. Značajan doprinos za dobre početne rezultate zasigurno osigurava visoka tačnost Galileo skale vremena, uz korištenje pasivnih hidrogenskih maserima, koji su sposobni održavati frekvencije sistema visoko-stabilnim¹⁵⁴. Prvi maser proizveden je 1953. godine na Columbia Univerzitetu. Postoje aktivni i pasivni maseri. Hidrogenski maseri ili hidrogenski frekvencijski standardi, su naprave koje koriste fizičke osobine atoma vodonika kao izvor referentne frekvencije.

Pasivni hidrogenski maser (PHM) koji se ugrađuje u Galileo satelite pokazan je na slici 5.5, a tačnost mu je 1 sekunda u tri miliona godina. Prvi put je ugrađen u eksperimentalni GIOVE – B satelit. Danas se redovno ugrađuje u sve Galileo satelite ali i u satelite drugih navigacijskih sistema, npr. u indijski IRNSS.

¹⁵³ Vodonik, (latin. hydrogenium; engl. hydrogen;) hemijski element koji je najzastupljeniji element u svemiru, hemijskog simbola H, s atomskim brojem 1. U periodnom sistemu elemenata nalazi se u 1. periodu i 1. grupi.

¹⁵⁴ Drugi značajan faktor dobre tačnosti pozicioniranja i navigacije, Galileo dužuje tačnom jonosferskom modelu nazvanom NQuick.



Slika 5.5: Pasivni hidrogenski maser, visoko-precizni atomski sat Galileo satelita
 Izvor: ESA, URL 5.15

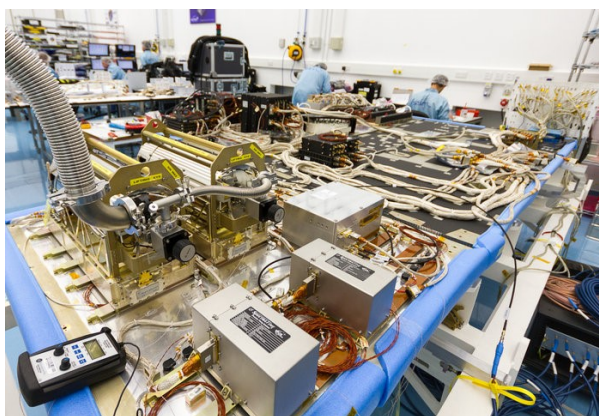
Nakon što su GIOVE sateliti pokazali funkcionalnost sistema, ESA je pristupila drugoj fazi projekta, izradi, testiranju i lansiranju FOC satelita. Tokom implementacije Galileo projekta desilo se nekoliko incidentnih situacija. Jedan od ozbiljnijih incidenata dogodio se u januaru 2017. godine, kad je se desilo iznenadno zakazivanje atomskih satova, i to u isto vrijeme. ESA je objavila da tri rubidijumska sata i šest hidrogenskih masera nisu radili, a u jednom satelitu su bila pokvarena dva sata. To ipak nije ugrozilo misiju, jer je za rad satelita dovoljno da jedan sat radi ispravno. Zbog nastale situacije ESA je odložila sljedeće lansiranje za oko četiri mjeseca, da bi se satovi ponovo testirali u laboratoriji. ESA tim stručnjaka, zajedno s inženjerima iz švicarske kompanije **SpectraTime**, koja proizvodi atomske satove za Galileo, proveli su opsežna istraživanja, i nisu publicirali sve detalje ispitivanja. U svakom slučaju moglo bi se zaključiti da uzroci nisu bili isti za sve kvarove, ali mogući problemi su nastali ne zbog izrade satova nego problema u spojevima i teških uvjeta koji se javljaju u svemiru. Međutim, impresivno je da su inženjeri iz kontrolnog segmenta uspjeli reaktivirati rubidijumski atomski sat na GIOVE – A satelitu, koji je u tom momentu bio star 12 godina.

Drugi problem s Galileo satelitima desio se nakon lansiranja satelita 5 i 6 dana 22. avgusta 2014. godine. Dva satelita nisu dostigli željenu visinu orbite, zbog pogreške ruske rakete koja je nosila satelite u orbitu, te su se sateliti kretali u ekscentričnoj orbiti. Uslijedile su različite modifikacije procedura u kontrolnom segmentu Galileo sistema, koje su vodile do djelimičnog korigiranja orbita ta dva satelita. Međutim, stručnjaci iz ESA i drugih istraživačkih institucija, svemirskih agencija i partnera iz industrije, su ovaj problem iskoristili za značajan naučni eksperiment na temu dokazivanja Einsteinove teorije opće relativnosti. (Sirikan, i dr., 2018)

Sateliti su veoma skupi, i kad se lansiraju onda ne postoji mogućnost popravke. Zato se sateliti moraju pažljivo testirati prije lansiranja. Tokom izrade satelita, a posebno

kod izrade i sklapanja pojedinih komponenti i modula, provode se opsežna testiraju u ESA laboratorijama. ESA ima specijalni centar za testiranje (ESTEC Test Centre) koji se nalazi se u mjestu Noordwijk u Holandiji. Galileo projekt se oslanja na izvještaje o procjeni kvaliteta prototipa, te na verifikaciju instrumenata i opreme, koje daje ESA ESTEC testni centar.

Laboratorije u kojima se proizvode dijelovi satelita, izvodi montaža i testiranja komponenti ili cijelog satelita je obično organizirana kao „čista soba“. Čistom sobom se naziva objekat ili prostorija koja se obično koristi za specijalizovanu industrijsku proizvodnju ili naučna istraživanja. Zrak koji ulazi u čistu sobu se filtrira da se osigura veoma nizak nivo prašine, mikroorganizama u zraku i isparenja. Zrak unutar prostorije se stalno prečišćava specijalnim HEPA (high-efficiency particulate air) filterima da bi se odstranile nečistoće nastale unutar čiste sobe. Osoblje ulazi kroz specijalizirani hodnik „zračni tuš“, koji minimiziraju kontaminaciju čiste sobe. Osoblje mora nositi zaštitnu odjeću: zaštitne mantile ili kombinezone, kape, maske za lice, čizme i rukavice, kao što je vidljivo na svim slikama koji pokazuju osoblje u specijaliziranim laboratorijama za testiranje Galileo satelita.



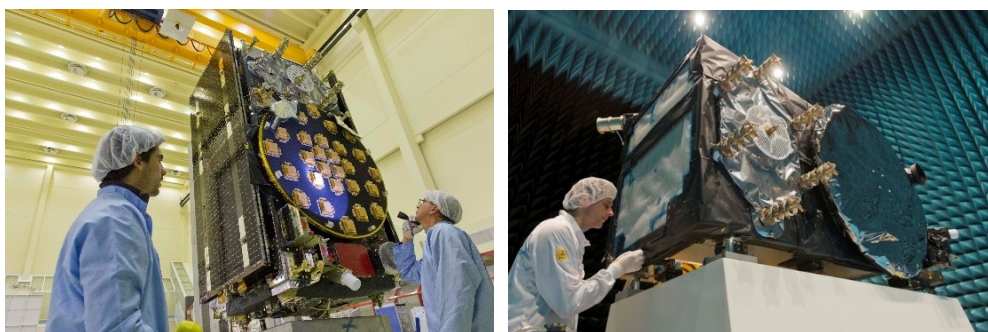
Slika 5.6: Unutrašnjost jednog satelita Galileo M, koji se nalazi u laboratoriji za testiranje. Vidljivi su atomski satovi: dva pasivna hidrogenska masera i dva atomska rubidijumska sata. Izvor ESA, URL 5.16

Budući su atomski satovi najskuplji i od kritične važnosti, posebna pažnja se poklanja njihovom testiranju. Slika 5.6 pokazuje unutrašnjost jednog satelita Galileo M, gdje se vide dva pasivna hidrogenska masera i dva rubidijum atomska sata. Dakle, svi sateliti prolaze niz posebnih testova, bilo da se radi o ispitivanju antena, satova, procesora, komunikacijskih instrumenata, ili pak da se testovi provode nad sklopljenim satelitima, simulirajući različite situacije i teške svemirske uvjete. Za više detalja o satelitskim satovima Galileo sistema, čitalac se upućuje na publikacije u GPS World od oktobra 2013. i maja 2018. godine, a dostupne su online na URL

5.17 i URL 5.18, kao i na ESA web strani na temu Galileo satova, dostupno na URL 5.19, te na web strani Društva švicarskih fizičara, dostupno na URL 5.20.

Kao što je navedeno ranije, gotov sateliti se testira na različite situacije u svemiru. Obično se prvo određuje težište satelita, te se ispituje da li je masa raspoređena u skladu s projektom. Ovo je važno znati zbog kontrole orijentacije satelita u orbiti. Ako je raspored mase precizno poznat, kontrolni segment pri manevriranju može uštedjeti pogonsko gorivo i tako produžiti vijek trajanja satelita. Poslije ispitivanja rasporeda mase provodi se niz testova, koji se provode u laboratorijama i specijalnim komorama.

Slika 5.7 pokazuje dvije situacije testiranja Galileo satelit. Slika lijevo pokazuje kako laborant pomoću baterijske lampe osvjetljava komponente glavne navigacijske antene. Slika desno pokazuje testiranje satelita unutar specijalno izrađene Maxwell komore, u ESA testnom centru. U Maxwell komori provodi se više vrsta testiranja. Kada se glavna vrata Maxwell komore zatvore, metalni zidovi komore oblikuju tkz. *Faradayev kavez*, koji zaustavlja spoljašnje elektromagnetne signale. Piramide koje pokrivaju unutrašnjost izrađene su od specijalne pjene i imaju ulogu da apsorbiraju unutrašnje signale i zvuk, kako bi se spriječila bilo kakva refleksija. Kad je satelit tako izoliran od vanjskih i unutarnjih elektromagnetnih i zvučnih signala, uključuju se sistemi satelita, da bi se otkrile bilo kakve štetne smetnje dok različiti elementi funkcioniraju zajedno.



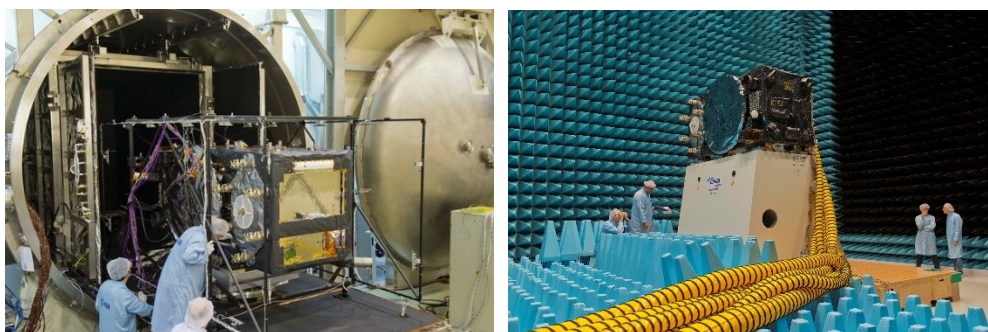
Slika 5.7: Galileo satelit u laboratoriji na testiranju glavne navigacijske antene pomoću baterijske lampe, lijevo. (URL 5.21) Desno, Satelit u specijalnoj Maxwell komori za testiranje, gdje se vidi da je glavna navigacijska antena pokrivena folijom, kao u svemiru. (URL 5.22)

Sateliti se također testiraju u termo-vakuum specijaliziranim Phenix komorama, izrađenim od nehrđajućeg čelika. Slika 5.8 lijevo ilustrira situaciju izlaska Galileo satelita iz ove komore nakon testiranja. Komora ima oblik tunela s kružnim presjekom, radijusa 4,5 metra u kojoj su napravljeni uvjeti „čiste sobe“. Kad se satelit

smjesti u komoru, izvuče se zrak da bi se stvorio vakuum-okruženje kao u svemiru. Istovremeno se simuliraju ekstremni termalni uvjeti u kojima se satelit može naći dok je u orbiti. Komora sadrži i unutarnje kutije nazvane „termalni šator“. Ova kutija ima strane koje se zagrijevaju da simuliraju sunčevu radijaciju ili se hlade uz pomoću tečnog azota, da bi se postigla hladnoća kao u svemiru, u kojoj se satelit nađe kad se nalazi u sjeni, tj. na suprotnoj strani Zemlje. Komora sadrži šest ovakvih zidova ili termalnih šatora, koji se neovisno hlade dok se u komori ne postigne temperatura - 180°C. Pošto u komori nema zraka da prenosi toplotu, suprotne strane satelita mogu biti veoma vruće ili veoma hladne. Ovako se simulira situaciju kad je satelit na jednoj strani osunčan a druga strana je u sjeni. Bez obzira na situaciju u kojoj se satelit nalazi, neophodno je da funkcioniра perfektno, uključujući rad atomskih satova.

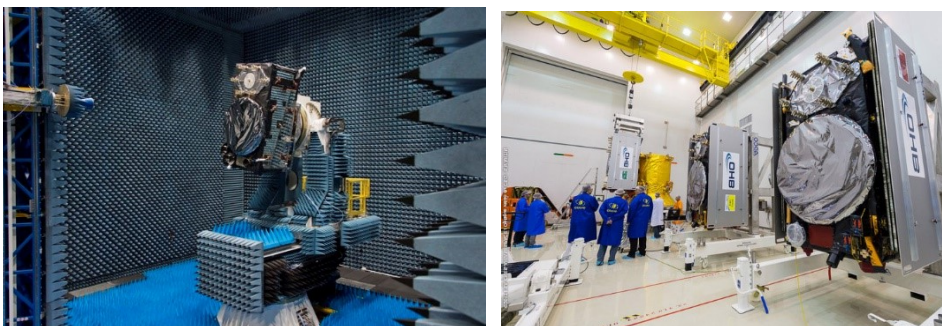
Termalna komora je od kritične važnosti, jer se tako ispituje temperatura u unutrašnjosti satelita, na kojoj satovi i druga oprema rade normalno. Zato se neke strane Galileo satelita prekrivene reflektivnim ogledalima a druge crnim višeslojnim izolirajućim materijalom. Ispitivanje u termalnim komorama traje pet sedmica, tokom svih 24 sata dnevno, dok se unutrašnja temperatura satelita kontinuirano nadgleda, a rad satova i drugih uređaja se stalno prati.

Također se ispituje rad satelita pri simulaciji djelovanja sila tokom lansiranja i provjerava elektromagnetna kompatibilnost da bi se osiguralo da različite elementi ne smetaju ostalim dijelovima satelita. Dakle, neophodno je provjeriti da satelit neće biti oštećen tokom lansiranja, te se izlaže snažnim vibracijama, u vertikalnom i horizontalnom pravcu. Intenzitet vibracija odgovara onim kojim je satelit izložen tokom polijetanja rakete koja nosi satelit u orbitu. Za ova testiranja služe specijalni stolovi koji se tresu. Priprema satelita na testiranje vibracijama pokazana je na slici 5.8 desno.



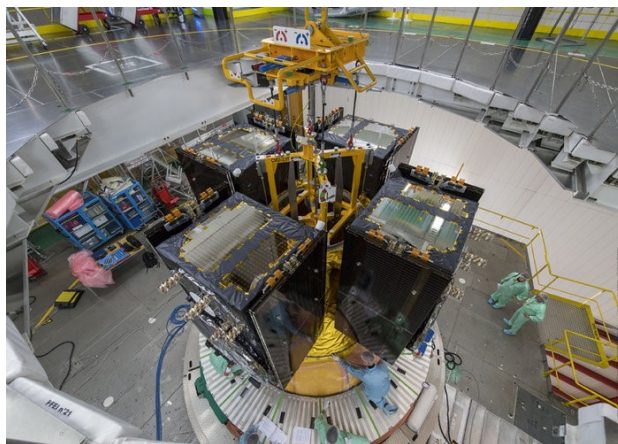
Slika 5.8: Galileo satelit izlazi iz „Phenix komore“, lijevo. (URL 5.23) Desno, satelit u Maxwell komori pri simuliranju vibracija. (URL 5.24)

Satelitske antene se također testiraju, na više načina. Određuje se odstupanje faznog centra antene od geometrijskog centra satelita kao i varijacije faznog centra antena, ali se također testiraju na efekat „blizu“ ili „daleko“, u specijaliziranim komorama HERTZ (Hybrid European RF and Antenna Test Zone), kao što to pokazuje slika 5.9 lijevo.



Slika 5.9: Galileo satelit postavljen za ispitivanje u komori HERTZ. (URL 5.25), lijevo. Desno, tri od četiri Galileo satelita prije postavljanja u položaj za zajedničko lansiranja u decembru 2017. godine. (URL 5.26)

Također se provode akustički testovi, tako što se simulira buka koju proizvode motori pri lansiranju. Pri zadnjim testiranjima satelit se spaja s držačima (eng. *dispenser*), kao što pokazuje slika 5.9 desno, kojim se satelit stabilizira tokom lansiranja, vertikalnog leta i nagnjanja ka orbiti.



Slika 5.10: Četiri Galileo satelita (23-26) pričvršćena za raketu Ariana 5 i spremljeni za lansiranje izvedeno u julu 2018., lijevo (URL 5.27); Crtež četiri satelita unutar rakete, desno. (URL 5.28)

Slika 5.10 lijevo pokazuje četiri Galileo satelita, 23-26 pričvršćena na raketu Ariana 5, nekoliko dana prije lansiranja u julu 2018. godine, dok je slika 5.10 desno crtež

šematskog rasporeda četiri satelita unutar rakete. Da bi se instalirala pripremljena i uvezana Galileo četvorka raketa se spušta na donji nivo, kao što pokazuje slika 5.11, lijevo, gdje se Ariana 5 priprema za lansiranje Galileo satelita 19-22, u decembru 2017. Slika na desnoj strani pokazuje lansirnu rampu s raketom Ariana 5 spremnom za lansiranje.

Moderni Galileo sateliti lansiraju se po četiri odjednom. Raketa koja nosi ESA moderne satelite u orbitu zove se Ariana 5, visoka je 47,4 metra. Lansirna rampa postavljena je u Francuskoj Gvajani, u Južnoj Americi, u blizini Kouroua, u bazi za lansiranje, nazvana naziva Svemirski Centar Gvajana (Guiana Space Center). Lokacija je strateški locirana za izgradnju infrastrukture za ESA programe. Nalazi se na izuzetno povoljnom položaju za lansiranje, kako zbog blizine ekvatora, tako i zbog blizine obale koja omogućuje obavljanje procesa lansiranja iznad mora. Lansirna baza se nalazi oko 500 km sjeverno od ekvatora, na 5°3' geografske širine. Lansiranje s ove lokacije puno je lakše jer Zemljina rotacija daje dodatnih 500 m/s ubrzanja kada se lansiranje obavlja u smjeru istoka. (URL 29).

Osim Evropske svemirske agencije istu infrastrukturu koristi Francuska svemirska agencija (CNES), kao i komercijalna kompanija Arianespace, jer imaju zajednička ulaganja. Smatra se najmodernijom svemirskom lukom koja opslužuje tri različite kategorije raketa: teške, Ariana 5, srednje Soyuz, i za lagane Vega.



Slika 5.11: Raketa Ariana 5 spuštена da se instaliraju povezana četiri satelita Galileo 2017. godine, lijevo. (URL 5.30). Rakete Ariana 5 na lansirnoj rampi, u ESA bazi za lansiranje u Francuskoj Gvajani, desno. (URL 5.31)

Galileo sateliti kreću u orbitama visine 23 222 kilometra, u orbitama koje su u odnosu na ekvator nagnute za inklinacijski ugao od 56°, za razliku od GPS satelita, čija je orbita nagnuta za 55°. Ova činjenica omogućava korisnicima u polarnim oblastima

da imaju dobru pokrivenost satelitskim signalom s Galileo satelita, što ima daje prednost nad GPS sistemom.

ESA predviđa da će za 90% korisnika, na bilo kojoj lokaciji, imati uvijek u vidnom polju šest do osam satelita, što ima osigurava pozicioniranje s tačnošću od nekoliko centimetara. Postoji šansa da će korisnici navigacije na putevima, čak i u modernim gradovima s visokim zgradama, imati dovoljno satelita na nebu (direktno iznad glava) za određivanje položaja, posebno zato što je Galileo sistem inter-operabilan s GPS sistemom. (ESA, 2016, URL 5.32)

U historiji razvoja Galileo sistema bit će zabilježen datum 15. decembar 2016. godine kao dan kad je objavljena Deklaracija o inicijalnom servisu¹⁵⁵. U orbitama je tada bilo 18 satelita, a ESA je tog dana zvanično oglasila da Galileo sateliti zajedno sa infrastrukturom na površini Zemlje koja podržava njihov rad, nude tri različite vrste inicijalnog servisa, koji su besplatni za korištenje: građanima, poslovnim ljudima i organizacijama, te javnim institucijama. Vrste servisa su opisane u slijedećem podpoglavlju.

Prema informacijama Evropske GNSS agencije (GSA) u Pragu, Češka Republika, Deklaracija o inicijalnom servisu je prvi korak ka postizanju pune operativne sposobnosti (FOC) sistema. U ovoj fazi signal Galileo sistema nudi visoku preciznost, ali signal nije stalno dostupan. Zato se Galileo signal (za korisnike koji imaju prijemnike prilagođene za prijem) tokom ove inicijalne faze koristi u kombinaciji s drugim navigacijskim sistemima. U vrijeme pisanja ovog teksta (septembar, 2018.) Galileo ima u orbiti 26 satelita, a do 2020. godine se očekuje da će postići potpunu operabilnost s 24 satelita plus šest rezervnih.

Očigledno je da su se planovi o dizajnu Galileo konstelacije promijenili, vjerovatno zbog problema s lansiranjem dva satelita u orbitu, jer GSA navodi punu konstelaciju od 24 satelita plus šest rezervnih, umjesto prvobitno planiranih 27 satelita plus tri rezervna. Za više informacija o status Galileo sistema čitalac se upućuje na web stranu Evropskog GNSS servisnog centra (European GNSS Service Center, URL 5.33). Tamo se između ostalih informacija mogu naći relevantne publikacije i izvještaji o postignutim rezultatima i tačnostima pozicioniranja, dostupno na URL 5.34.

¹⁵⁵ Declaration of Initial Services

5.1.1.2 Galileo signali i servisi

Planirano je da Galileo signal emitira radio-navigacijske signale na četiri različite operativna frekvencijska opsega. Galileo signali se obično obilježavaju slovom E¹⁵⁶. Dakle, Galileo signali su: E1 (1559~1594 MHz), E6 (1260~1300 MHz), E5a (1164~1188 MHz) i E5b (1195~1219 MHz). Na ovim frekvencijama Galileo pruža i garantira svojim korisnicima, koji su opremljeni prijemnicima kompatibilnim za Galileo signale, brojne servise, kako što se navodi ESA (Navipedia, URL 5.35):

1. GALILEO servisi koje samostalno osiguravaju Galileo sateliti. Ovi servisi će biti dostupni globalno, neovisno od drugih sistema, a dovoljno je da se kombiniraju signali primjeni samo s Galileo satelita. Postoji veliki broj mogućih primjena koji se mogu grupisati oko sljedećih pet referentnih servisa:
 - a. Galileo otvoreni servis – OS (Galileo Open Service)
 - b. Galileo servis za sigurnost života – SoL (Galileo Safety of Life)
 - c. Galileo komercijalni servis – CS (Galileo Commercial Service)
 - d. Galileo javno regulirani servis – PRS (Galileo Public Regulated Service)
 - e. Galileo servis za podršku potragama i spašavanju - SAR (Galileo Support to Search and Rescue Service)
2. Galileo servis uz lokalnu pomoć. Ovaj servis oslanja se samo na Galileo satelitske signale, ali može biti kombiniran sa servisima ili infrastrukturom koja postoji na nekom lokalnom području. Rezultat će biti pružanje lokalnih usluga.
3. EGNOS¹⁵⁷ servis: EGNOS će iznad Evropskog prostora osiguravati proširenje Galileo servisa. Ovaj servis će se dozvoliti za ranu fazu stjecanja iskustva u razvoju aplikacija koje koriste Galileo. Predloženo je da EGNOS sistem bude usvojen da popravljaju tačnost otvorenog servisa, osiguravajući tako da služi Galileu kao što danas popravljaju tačnost GPS sistema. Ovo će pružiti šansu da se zadovolje više razine usluga uz korištenje različitih izvora integriteta i navigacijskih informacija.
4. Galileo kombinirani servisi: svi ranije nabrojani servisi će se kombinirati sa servisima koji pružaju drugi navigacijski ili komunikacijski sistemi. Ovo će vjerovatno dati korisnicima kvalitetnije postojeće dostupne GNSS servise. Rezultat ovog servisa će biti pružanje kombiniranih usluga.

Pet navedenih servisa koje pruža samostalno Galileo satelitski sistem u najkraćem se mogu opisati kao što navodi ESA: (URL 5.36)

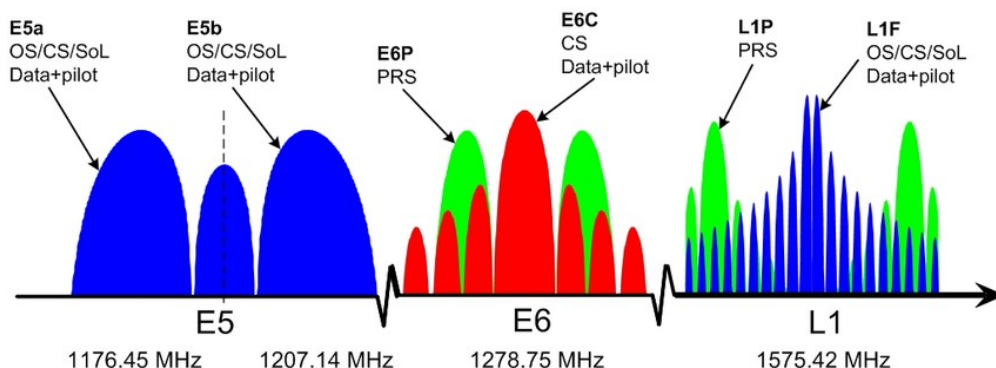
¹⁵⁶ Čitaoci koji koriste GNSS prijemnike i softvere za obradu podataka opažanja su vjerovatno uočili da važe sljedeće oznake: G za GPS, E za Galileo, R za GLONASS, te B za BeiDou signale/satelite.

¹⁵⁷ EGNOS (European Geostationary Navigation Overlay Service) je evropski SBAS ili satelitski sistem koji služi kao proširenje Galileo sistema u prvom redu za civilnu avijaciju.

1. **Galileo otvoreni servis - OS:** rezultat je kombiniranja otvorenih (besplatnih) signala, a daje položaje i mjeri vrijeme, s takvim kvalitetom da je konkurentan drugim sistemima.
2. **Galileo servis za sigurnost života – SoL:** popravljajući performanse otvorenog servisa, na način da će se blagovremeno slati upozorenja korisniku kada sistem ne uspije da ispuniti određene marže tačnosti (integritet). Predviđeno je da se za ovu uslugu daje garancija za usluge. Ova usluga će biti dostupna za sigurnosno kritične aplikacije, poput upravljanja vozovima, automobilima, te za navigacija brodova i konačno za avijacija;
3. **Galileo komercijalni servis – CS:** Ovaj servis osigurava dva dodatna signala kako bi dao više podataka i omogućio da korisnik poveća tačnost. Signal je kodiran. Važno je napomenuti da je za komercijalni servis predviđeno da se garancija za usluge. Komercijalna služba omogućava razvoj aplikacija za profesionalnu ili komercijalnu upotrebu, zahvaljujući poboljšanim performansama i podacima sa većom dodanom vrijednošću od onih dobivenih putem otvorenog servisa;
4. **Galileo javno regulirani servis – PRS:** Ovaj servis namijenjen je specijaliziranim korisnicima koji imaju potrebu za preciznim određivanjem položaja ili preciznog mjerenja vremena, a koji trebaju visok kontinuitet usluge, sa kontroliranim pristupom. Na raspolaganju su dva PRS navigaciona signala sa šifrovanim kodovima i podacima. PRS je ograničen je za vladine i ovlaštene korisnike države, za osjetljive aplikacije koje zahtijevaju visok nivo kontinuiteta usluge. Ova usluga je namenjena sigurnosti i strateškoj infrastrukturi (npr. energetici, telekomunikacijama i financijama);
5. **Galileo servis za podršku potragama i spašavanju – SAR:** Ovaj servis predstavlja doprinos Evrope međunarodnoj saradnji pod nazivom COSPAS-SARSAT na humanitarnim akcijama potrage i spašavanja. Galileo će imati važnu ulogu u sistemu nazvanom MEOSAR (Medium Earth Orbit Search and Rescue system). Galileo sateliti će moći da prikupe signale iz vatrenog oružja na brodovima, avionima ili ljudima, te prikupljene podatke poslati u nacionalne centre za spašavanje. Iz ovih podataka centar za spašavanje može saznati preciznu lokaciju eventualne nesreće. Najmanje jedan Galileo satelit će biti vidljiv sa bilo koje tačke na Zemlji, tako da će biti omogućeno poslati poziv u pomoć u realnom vremenu. U nekim slučajevima, povratne informacije se mogu vratiti ka predajniku, a ovu mogućnost ima samo Galileo.

Više informacija o servisima i tačnostima pozicioniranja koje nudi Galileo, čitalac može pronaći online na URL 5.36.

Prije nego se opišu svi Galileo signali važno je istaći drugu činjenicu po kojoj se Galileo razlikuje od drugih sistema. Naime, Galileo je dizajniran da pruža pet različitih servisa,¹⁵⁸ s ciljem potpunog ispunjavanja potreba korisnika ali i neprekidnog popravljivanja svojih servisa kroz popravljanje Galileo infrastrukture.



Slika 5.12: Galileo frekvencijski spektar signala (URL 5.37)

Slika 5.12 pokazuje frekvencijski spektar Galileo signala na kojem se emitiraju satelitski signali. Pažljiv čitalac može uočiti sličnost i djelimično preklapanje frekvencijskog spektra s frekvencijskim opsegom GPS i GLONASS sistema. Zbog spomenutog nastaje problem za precizno pozicioniranje, jer se javlja interferencija između signala različitih satelitskih navigacijskih sistema i servisa, ali i između nekih terestričkih sistema i operatera iz drugih oblasti djelovanja¹⁵⁹.

Da se pojasni ovaj problem treba naglasiti da je dodjela frekvencijskog opsega veoma kompleksan zadatak jer različiti servisi i korisnici mogu biti u istom rangu. Drugim riječima, ista frekvencija može biti dodijeljena za različite svrhe u različitim državama. Koliko je to kompleksno pitanje govori činjenica da je su Ujedinjene Nacije – UN formirale specijaliziranu agenciju pod imenom Međunarodna telekomunikacijska unija - ITU (International Telecommunication Union¹⁶⁰, URL 5.38) koja ima zadatak da koordinira raspodjelu i globalno korištenje radio spektra. Ovo uključuje radio signale za različite oblasti ljudske djelatnosti: radio, televiziju, mobilne telefone, satelitsko radarske emisije, pa čak i mikrovalne rerne. (Subarin,

¹⁵⁸ Svi ostali GNSS pružaju dva servisa, standardni SPS i precizni PPS.

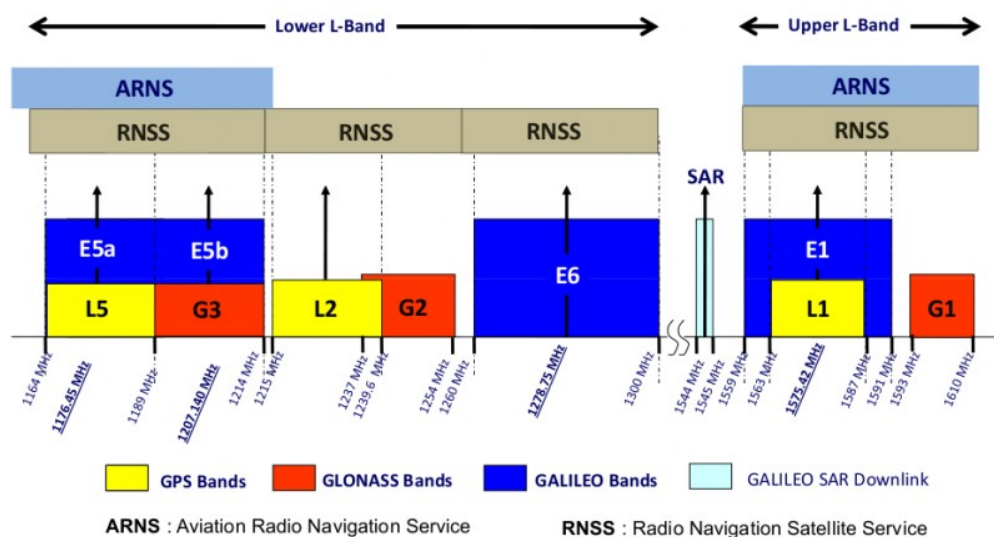
¹⁵⁹ Kao primjer može poslužiti informacija da radio amateri imaju sličan frekvencijski opseg kao GPS signal, te ukoliko se antena prijemnika nalazi u blizini aktivnog radio amatera, tačnost pozicioniranja je smanjena. Opažatelj (geodeta) će uočiti kod obrade podataka da je standardna devijacija opažane stanice veća od ostalih ali neće znati uzrok smanjene tačnosti opažanja.

¹⁶⁰ Osnovana je na IV. Međunarodnoj konferenciji o radiokomunikacijama u Madridu 1932., a 1934. naslijedila je Međunarodnu telegrafsku uniju osnovanu 1865. Sjedište joj je u Ženevi od 1948. Wikipedia

2013, str. 18.). Dakle, ITU dijeli elektromagnetni spektar u frekvencijske opsege, s različitim radio servisima koji se dodjeljuju odabranom opsegu.

Jedan od važnih zadataka ITU je dodjela radio-frekvencijskih opsega za radio navigacijske satelitske sisteme – RNSS (eng. Radio Navigation Satellite Services). Na svjetskim konferencijama za radiokomunikaciju koje su održane u godinama 2000. i 2003., potpisan je Sporazum o dodjeli frekvencija. O kakvoj gustoći raspodjeli opsega se radi pokazuje slika 5.13, na kojoj su šematski prezentirani frekvencijski opseg za RNSS. Uočava se da postoje dva opsega u regionu dodijeljenom aeronautičkim radio navigacijskim servisima - ARNS (Aeronautical Radio Navigation Service) na svjetskoj osnovnoj bazi. Ova dva opsega su pogodni za primjenu servisa za zaštitu ljudskih života (eng. Safety-of-Life) jer nema drugih korisnika kojima je dozvoljeno da djeluju i koriste signale na ovom frekvencijama.

Dodijeljeni frekvencijski opseg odgovara gornjem L opsegu (1 559 - 1 610 MHz), koje koriste slijedeći signali: GPS L1, Galileo E1 te GLONASS G1, do nižeg opsega L (1 151 - 1 214 MHz) što je dodijeljeno za GPS L5 i Galileo E5, te ko-egzistiraju s E5a i L5 na istim frekvencijama. Preostali opseg frekvencija dodijeljen je za signale: GPS L2, GLONASS G2 te Galileo E6, u rasponu 1 215.6 - 1 350 MHz. Ovi opsezi su dodijeljeni za radio-lokacijske servise (radare na površini zemlje) i RNSS na primarnoj osnovi, pa su signali u ovom opsegu više osjetljivi na interferenciju, a obično se kaže da su signali „ranjivi“.



Slika 5.13: Frekvencijski opseg za RNSS sisteme (URL5.39)

5.1.2 Galileo Kontrolni segment

Galileo kontrolni segment sastoji se od opažачkih stanica i kontrolnih centara širom planete (slika 5.14), a zadatak mu je da kontrolira konstelaciju Galileo satelita, nadzire ispravnost („zdravstveni status“) satelita, osigurava osnovne funkcije navigacijskih funkcija, kao što su npr. određivanje satelitskih orbita i sinhronizacije satova, određivanje parametara navigacijske poruke, te osiguravanje informacija o integritetu (upozoravajuće poruke u zadanom vremenskom razmaku) na globalnom nivou i konačno slanje navigacijskih podataka satelitima koji će ih potom prenositi korisnicima.

Galileo kontrolni ili zemaljski segment se sastoji od dva kontrolna centra – GCC (Galileo Control Centres), a locirani su mjestima Oberpfaffenhofen u Njemačkoj (slika 5.16) i Fucino u Italiji (slika 5.15). Jedna od stanica za slanje podataka satelitima pokazana je na slici 5.17, lijevo.



Slika 5.14: Globalni raspored kontrolnog segmenta Galileo sistema (izvor: ESA, URL 5.40)

Više detalja o kontrolnom segmentu zainteresirani čitalac može naći na web strani GNSS servisnom centru.



Slika 5.15: ESA Kontrolna Galileo stanica Fucino u centralnoj Italiji, jedna od najvećih kontrolnih GNSS stanica na svijetu. (izvor: ESA, URL 5.41)



Slika 5.16: ESA Kontrolni Galileo centar u Njemačkoj, Oberpfaffenhofen. Ovaj centar nadgleda rad satelita. (izvor: ESA, DLR, URL 5.42)



Slika 5.17: lijevo, ESA „uplink stanica“ Papette na Tahitiju, Francuska Polinezija. Zadatak ove stanice je da šalje podatke za sadržaj navigacijske poruke koje Galileo sateliti emitiraju korisnicima. (ESA, URL 5.543) Desno, antene na ESA kontrolnoj stanici Redu, lociranoj u Belgijskoj oblasti Ardennes. (izvor: ESA - D. Galardini, URL 5.44)

5.1.3 Korisnički segment

Korisnički segment Galileo sistema je raznolik kao što su i ostali GNSS sistemi. Razvijaju se ili su razvijene mnoge aplikacije za Galileo pozicioniranje, navigaciju i brzo djelovanje. Navode se samo neki aspekti primjena Galileo sistema: IoT, LBS (location based services), servisi za hitne, sigurnosne i humanitarne aktivnosti, primjena naučne, okolišne aplikacije kao i za predviđanje vremenskih prilika u skoro - bliskom vremenu, te za monitoring i zaštitu prirodnog okruženja biljnog i životinjskog svijeta. teško je nabrojati sve aplikacije za transport, poljoprivredu i ribolov, građevinarstvo. Posebno važne aplikacije razvijene su za sve korisnike sistema preciznog mjerenja vremena.

Zanimljiva aplikacija razvijena od kompanije u Grazu, Austrija kao jedna od humanih upotreba GPS i Galileo sistema je popravljjanje mobilnosti starijih osoba. Poznato je da stari ljudi ponekad zbog demencije izgube u gradu te je razvijen uređaj za automatsko određivanje položaja i davanje instrukcija za povratak kući.

Zanimljiva aplikacija razvijena od kompanije u Grazu, Austrija kao jedna od humanih upotreba GPS i Galileo sistema je popravljjanje mobilnosti starijih osoba. Poznato je da stari ljudi ponekad zbog demencije izgube u gradu te je razvijen uređaj za automatsko određivanje položaja i davanje instrukcija za povratak kući.

5.2 Prednost korištenja multi GNSS



Slika 5.18: Frekvencijski spektar GNSS sistema
(izvor; URL5.45)

6 Popis literature

6.1 Lista referenci za 1. poglavlje

Concise Oxford Dictionary, (1995): 9th ed., Oxford, U.K.: Oxford University Press

Department of Defense and Department of Transport (2002): 2001 Federal Radionavigation Plan. Washington DC.

Eurocontrol, (1998): Eurocontrol standard document for area navigation equipment, operational requirements and functional requirements, Reference Number: 003-93; Edition: 2.2; European organisation for the safety of air navigation. <http://www.seguridadaerea.gob.es/media/migracion/pdf/90888/2221.pdf>

Grewal, M.S., Weill, L. R., and Andrews, A.P., (2013): Global Positioning System, Inertial Navigation, and Integration. John Wiley & Sons, Inc. Publication. New York/Chichester/Weinheim/Brisbane/Singapore/Toronto.

Hofmann-Wellenhof, B., Legat, K., Wieser, M. (2003): Navigation, Principles of Positioning and Guidance. Springer-Verlag, Wien.

Hofmann-Wellenhof, B., Lichtenegger, H., Wasle, E. (2008): GNSS Global Navigation Satellite Systems, GPS, GLONASS, Galileo & more., Springer

6.2 Lista referenci za 2. poglavlje

Chan, A. K.L., Clancey, G.K. & Loy, H.C., eds. (2002): Historical Perspectives on East Asian Science, Technology and Medicine. Singapore University Press, Yusof Ishak Hous NUS Singapore and World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd. Singapore.

Cozzens, T., (2018): Lidar and UAV reveal Mayan 'megapolis' below Guatemalan jungle. GPS Word, februar 2018, Dostupno na: http://gpsworld.com/lidar-and-uav-reveal-maya-megalopolis-below-guatemalanjungle/?utm_source=gps_navigate&utm_medium=email&utm_campaign=gps_navigate_02272018&eid=376810068&bid=2017824 zadnji pristup 28.02.2018.

Diks, R. (2008): "Eratosthenes." Complete Dictionary of Scientific Biography. Enciclopedia.com (April 9, 2015). URL 2.28

Hofmann-Wellenhof, B., Legat, Klaus, Wieser, M. (2003): Navigation- Principles of Positioning and Guidance. Springer

Liu, C.Y., (2009): Astronomical analysis of the taosi observatory site. *Acta Astronomica Sinica*, vol. 50, no. 1, p.107-116.

Li, G., (2014): Gnomons in Ancient China, in Ruggles, Clive, (ed.), *Handbook of Archaeoastronomy and Ethnoastronomy*. Springer New York (published July 7, 2014). p. 2095. ISBN 978-1-4614-6141-8.

Sun, X., (2015): Taosi Observatory. In: Ruggles C. (eds) *Handbook of Archaeoastronomy and Ethnoastronomy*. Springer, New York, NY

Patai, R. (1998): *The Children of Noah: Jewish Seafaring in Ancient Times*. Princeton University Press.

Sachs, A.J. and Hunger, H. (1998): *Astronomical Diaries and Related Texts From Babylonia. Volume I, Diaries from 652 B.C. to 262 B.C.* Verlag Der Österreichischen Akademie Der Wissenschaften, Wien 1988. VAT 4956 (No. -567) Nebukadnezar II year 37. I II III [] X XI XII

Sumama, N., (2008): *Global positioning-Technologies and Performance*. John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey.

Wicker, F.D.P. (1998): The Road to Punt. *Geographical Journal*, Vol. 164, No 2, July 1998, p. 155-167.

URL 2.1: Arheolozi pronašli brod star 5000 godina.

<http://www.sciencedaily.com/releases/2000/11/001101065713.htm> pristup 12.03.2015. (Pristup 12-03-2015.)

URL 2.2: Muzej keopsovog broda-Khufu Boat Museum

http://www.sca-egypt.org/eng/MUS_Khufu-Boat.htm (Pristup 12-03-2015.)

URL 2.3: Brodogradnja u starom Egiptu

http://en.wikipedia.org/wiki/Ancient_Egypt (Pristup 12-03-2015.)

URL 2.4: Babilonski astronomski dnevnic.

http://www.livius.org/di-dn/diaries/astronomical_diaries.html (Pristup 13-03-2015.)

URL 2.5: Dnevnik Hrvatske RTV: Amerikanci uništili ostatke Babilona

<http://dnevnik.hr/vijesti/svijet/amerikanci-unistili-ostatke-babilona.html> (Pristup 13-03-2015.)

URL 2.6: Artifakti sumerske kulture u muzeju Luvr-Pariz

<http://www.britannica.com/EBchecked/media/2079/Columns-decorated-by-the-Sumerians-in-a-mosaic-like-technique?topicId=573176> (Pristup 13-03-2015.)

URL 2.7: Jug pokazujuća kočija

http://en.wikipedia.org/wiki/South-pointing_chariot (Pristup 13-03-2015.)

URL 2.8: Jug-pokazujuća kočija

<http://www.stirlingsouth.com/richard/Chariot.htm> (Pristup 13-03-2015.)

URL 2.9: Ekspedicija u Punt

<http://www.pbs.org/wgbh/nova/ancient/expedition-punt.html> (Pristup 13-03-2015.)

URL 2.10: Karta starog Egipta i potencijalne lokacije države Punt

<http://www.pbs.org/wgbh/nova/ancient/egypt-punt.html> (Pristup 13-03-2015.)

URL 2.12: Faraon Sufru- Pomorski muzej US

<http://ageofex.marinersmuseum.org/index.php?type=explorer&id=45> (Pristup 18-03-2015.)

URL 2.13: Punt

<http://www.britannica.com/EBchecked/topic/483652/Punt> (Pristup 18-03-2015.)

URL 2.14: Put u Punt

<http://www.jstor.org/discover/10.2307/3060367?sid=21106150207203&uid=4&uid=3737568&uid=2> (Pristup 21-03-2015.)

URL 2.15: Rana kineska istraživanja

<http://ageofex.marinersmuseum.org/index.php?type=webpage&id=11> (Pristup 21-03-2015.)

URL 2.16: Kratka povijest kineske navigacije

http://www1.chinaculture.org/created/2005-06/21/content_69874.htm (Pristup 21-03- 2015.)

URL 2.17: Period „proljeća i jeseni“ stare Kineske historije.

http://www1.chinaculture.org/gb/en_aboutchina/2003-09/24/content_22709.htm (Pristup 21-03- 2015.)

URL 2.18: Tipičan model starog kineskog broda

http://www.chinaculture.org/gb/en_madeinchina/2005-06/21/content_69875_2.htm (Pristup 22-03- 2015.)

URL 2.19: Karta drevne Kine iz perioda 2000-200. g.p.n.e.

http://images.classwell.com/mcd_xhtml_ebooks/2005_world_history/images/mcd_a_wh2005_0618376798_P51_fl.jpg (Pristup 22-03- 2015.)

URL 2.20: Karta: Drevne civilizacije razvijene u četiri doline velikih rijeka.

http://images.classwell.com/mcd_xhtml_ebooks/2005_world_history/images/mcd_a_wh2005_0618376798_P27_fl.jpg (Pristup 22-03- 2015.)

URL 2.21: Pomorski muzej SAD-Feničanski brodovi

<http://ageofex.marinersmuseum.org/index.php?type=shiptype&id=14> (Pristup 22-03- 2015.)

URL 2.22: Povijest: Feničani

<http://povijesni.blogger.index.hr/post/lekcija-04-fenicani-i-zidovi/18008393.aspx#.VQ86gU13OM9> (Pristup 23-03- 2015.)

URL 2.23: Feničanski brodovi

<http://hladnooruzje.hostei.com/fenicanskibrodovi.htm> (Pristup 23-03- 2015.)

URL 2.24: Gnomon-princip rada.

<http://static.astronomija.co.rs/instrumenti/gnomon.htm> (Pristup 23-03- 2015.)

URL 2.25: Astronomski instrumenti drevne Kine.

<http://kaleidoscope.cultural-china.com/en/136K2K9.html> (Pristup 24-03- 2015.)

URL 2.26: Ptolomejeva karta svijeta

http://en.wikipedia.org/wiki/Early_world_maps#/media/File:Ptolemy-World_Vat_Urb_82.jpg

URL 2.27: Astrologija i astronomija u Iranu i staroj Mesopotamiji

http://www.iranchamber.com/calendar/articles/astrology_astronomy_iran_mesopotamia.php (Pristup 07.04. 2015.)

URL 2.28: Eratosten

<http://www.encyclopedia.com/topic/Eratosthenes.aspx#1-1G2:2830901330-full> (Pristup 09.04. 2015.)

URL 2.29: Pitej, grčki znanstvenik i navigator.

<http://www.encyclopedia.com/topic/Pytheas.aspx> (Pristup 09.04. 2015.)

6.3 Lista referenci za 3.poglavlje

URL 3.1: Elementi Keplerove elipse

<https://www.gsc-europa.eu/system-status/orbital-and-technical-parameters> (Pristup 19.09.2018)

6.4 Lista referenci za 4. poglavlje

Ghilani, C.D. and Wolf, P.R., (2012): Elementary surveying: an introduction to geomatics, 13Th edition. Pearson Education, Inc. New Jersey.

GPS World, (2010): Part 1: The Origins of GPS, and the Pioneers Who Launched the System. GPS Word, May 1, 2010. Dostupno online na: <http://gpsworld.com/origins-gps-part-1/>

Grewal, S. M., Weill, L.R., Andrews, A.P., (2007): Global Positioning Systems, Inertial Navigation and Integration. Second ed. Jone Wiley&Sons, New Jersey.

Grewal, S. M., Andrews, A.P., Bartone, C.G., (2013): Global Positioning Systems, Inertial Navigation and Integration. Third ed. Jone Wiley&Sons, New Jersey.

Kramer, H.J, (2013): Observation of the Earth and Its Environment: Survey of Missions and Sensors. Second edition. Springer Science & Business Media, 2013. – p. 581

Leick, A., (2004): GPS satellite surveying, 3rd ed. John and Wiley and Sons, inc., Hoboken, New Jersey.

Subirana, J. Sanz, JM. Juan Zornoza and M. Hernández-Pajares, (2013): Global Navigation Satellite Systems: Volume I: Fundamentals and Algorithms, ESA Communication, Noordwijk, the Netherlands

Van Sickle, J. (2008): GPS for land surveyor. 3rd. ed. CRC Press, Taylor & Francis Group, LLC, Boca Raton.

URL 4.1: Satelit Transit 1A na testiranju u laboratoriji.

<https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/3/39/Transit-1A.jpg> (Pristup: 25.07.2018.)

URL 4.2a: Oficijelne informacije Vlade SAD o GPS sistemu. Kontrolni segment.

<http://www.gps.gov/systems/gps/control/> (Pristup 29. 11. 2014.)

URL 4.2b: Oficijelne informacije Vlade SAD o GPS sistemu. Svemirski segment.

<http://www.gps.gov/systems/gps/space/> (Pristup 29. 11. 2014.)

URL4.3: Navipedia. GPS konstelacija.

http://www.navipedia.net/index.php/File:GPS_constellation.gif (Pristup 29. 11. 2014.)

URL 4.4: Navipedia. Svemirski segment.

http://www.navipedia.net/index.php/GPS_Space_Segment (Pristup 29. 11. 2014.)

URL 4.5: Navipedia. GPS signal

http://www.navipedia.net/index.php/File:Chapter_2_Table_1.png (Pristup 29. 11. 2014.)

URL 4.6: Navipedia. GPS signal

http://www.navipedia.net/index.php/File:Chapter_2_Table_2.png (Pristup 29. 11. 2014.)

URL 4.7: Navipedia. Spektar signala na nosaču L1.

http://www.navipedia.net/index.php/File:Chapter_2_Spectra_GPS_Signals_L1.png

(Pristup 29. 11. 2014.)

URL 4.8: Oficijelne informacije Vlade SAD o GPS sistemu. Primjene.

<http://www.gps.gov/applications/> (Pristup 29. 11. 2014.)

URL 4.9: Ključna odluka o GPS OCX programu

<http://www.insidegnss.com/node/4417> (Pristup 23. 04. 2015.)

URL 4.10: Navipedia GPS signali.

http://www.navipedia.net/index.php/GPS_Signal_Plan (Pristup 23. 04. 2015.)

URL4.11: Navipedia. Navigacijska poruka.

http://www.navipedia.net/index.php/File:Navigation_Message.png (Pristup 23. 04. 2015.)

URL 4.12: Navipedia. Navigacijska poruka C2NAV

<http://www.navipedia.net/index.php/File:L2c.png> (Pristup 23. 04. 2015.)

URL 4.13: Navipedia. Navigacijska poruka L5NAV

<http://www.navipedia.net/index.php/File:L5c.png> (Pristup 23. 04. 2015.)

URL4.14: Video zapisi o GPS. US gov.

<https://www.gps.gov/multimedia/videos/> (Pristup 23. 04. 2015.)

URL 4.15: Rusija u svemiru. Sateliti Tsiklon i Parus.

<http://www.russianspaceweb.com/parus.html> (Pristup 27.08. 2018.)

URL 4.16: Američko astronomsko društvo. Tsikada.

<http://www.astronautix.com/t/tsikada.html> (Pristup 27.08. 2018.)

URL 4.17: ILRS servis.

https://ilrs.cddis.eosdis.nasa.gov/missions/satellite_missions/current_missions/etal_general.html (Pristup 28.08. 2018.)

URL 4.18:Wikimedia. Model satelita GLONASS-M na CeBIT-u 2011.

https://commons.wikimedia.org/wiki/File:CeBIT_2011_Samstag_PD_110.JPG)
(Pristup 28.08. 2018.)

URL4.19: Sputnik news, 18. 05. 2007. Putin Proglasio GLONASS besplatnim za korisnike.

https://sputniknews.com/science/2007051865725503/?utm_source=short_direct&utm_medium=short_url&utm_content=eZsD&utm_campaign=URL_shortening
(Pristup 28.08. 2018.)

URL 4.20: ESA Navipedia. Model satelita GLONASS-M na CeBIT-u 2011.

https://gssc.esa.int/navipedia/index.php/File:K_model_at_Cebit_2011_Satellite.jpg
(Pristup 28.08. 2018.)

URL 4.21: ESA Navipedia. Konstelacija GLONASS sistema.
<https://gssc.esa.int/navipedia/index.php/File:GlonassConstellation.JPG>
(Pristup 29.08. 2018.)

URL 4.22: ESA Navipedia. Kontrolni segment GLONASS sistema.
https://gssc.esa.int/navipedia/index.php/GLONASS_Ground_Segment
(Pristup 30.08. 2018.)

URL 4.23: ESA Navipedia. SLR stanica Shelkovo, u regiji Moskva.
https://gssc.esa.int/navipedia/images/1/10/SLR_Shelkovo.jpg (Pristup 30.08. 2018.)

URL 4.24: ILRS servis. SLR stanica Komsomolska, regija daleki istok Rusije.
https://ilrs.cddis.eosdis.nasa.gov/network/stations/active/KOML_general.html
(Pristup 30.08. 2018.)

URL 4.25: Informacioni i analitički centar za pozicioniranje, navigaciju i mjerenje vremena. Roskosmos
<https://www.glonass-iac.ru/en/GLONASS/MomentaryAvailability.php>
(Pristup 30.08. 2018.)

URL 4.26: Informacioni i analitički centar za pozicioniranje, navigaciju i mjerenje vremena. <https://www.glonass-iac.ru/en/>
(pristup 03.09. 2018.)

6.5 Lista referenci za 5. poglavlje

EC Memo, (2012): Galileo will boost economy and make life of citizens easier, European Commission MEMO, Brussels, 11 October 2012. Dostupno online: http://europa.eu/rapid/press-release_MEMO-11-717_en.htm (Pristup 7.09.2018)

ICG, (2010): Current and planned global and regional navigation satellite systems and satellite-based augmentation systems, International Committee on Global Navigation Satellite Systems Providers' Forum, United Nations Office For Outer Space Affairs, UN New York, 2010. dostupno online: http://www.unoosa.org/pdf/publications/icg_ebook.pdf (Pristup 7.09.2018)

Lisi, M., (2014): Galileo, the European GNSS: Status, Challenges and a Glance at the Future. ICL-GNSS, Helsinki, Finland June 25, 2014. Dostupno online: <https://www.slideshare.net/MarcoLisi/icl-gnss-helsinki2014lisiv02> (Pristup 5.09.2018)

Rantakokko, J., Händel, P., Eklöf, F., Boberg, B., Junered, M., Akos, D., Skog, I., Bohlin, H., Neregård, F., Hoffmann, F., Andersson, D., Jansson, M., Stenumgaard, P. (2007): Positioning of emergency personnel in rescue operations—Possibilities and vulnerabilities with existing techniques and identification of needs for future R&D (KTH Royal Institute of Technology Report). Dostupno online: (Pristup 7.09.2018)

Sirikan, N., Come, H., Stojković, I., Ventura-traveset, J., Lucas, R., Falcone, M., 82018): Galileo 5 and 6 Eccentric Satellites, Mission Recovery and Exploitation, part I. Inside GNSS, July/August 2018. pp 38-47

Subirana, J. Sanz, JM. Juan Zornoza and M. Hernández-Pajares, (2013): Global Navigation Satellite Systems: Volume I: Fundamentals and Algorithms, ESA Communication, Noordwijk, the Netherlands. Dostupno online: https://gssc.esa.int/navipedia/GNSS_Book/ESA_GNSS-Book_TM-23_Vol_I.pdf (Pristup 7.09.2018)

URL51. Komisija EU: Galileo
<https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:51999DC0054&from=EN> (Pristup: 05.09.2018)

URL5.2: Evropska GNSS agencija – GSA
<https://www.gsa.europa.eu/> (Pristup: 05.09.2018)

URL 5.3: Svemirska strategija za Evropu
<http://ec.europa.eu/docsroom/documents/19442>

URL5.4: Evropski plan za radio navigaciju
<http://ec.europa.eu/DocsRoom/documents/28325> (Pristup: 05.09.2018)

URL 5.5: Historija Galileo sistema
https://ec.europa.eu/growth/sectors/space/galileo/history_en (Pristup: 04.09.2018)

URL 5.6: GSA – Referentna konstelacija, tehnički parametri i orbite.
<https://www.gsc-europa.eu/system-status/orbital-and-technical-parameters> (Pristup 06.09.2018)

URL5.7: Daily Mail Reporter - Science &Tech, od 19. januara 2011.
<http://www.dailymail.co.uk/sciencetech/article-1348599/Galileo-satellite-cost-Europe-extra-1-6bn-fully-operational.html> (Pristup: 06.09.2018)

URL 5.8: BBC News - Europe's Galileo: Britain's blast-off, od 16. juna 2018.

<https://www.bbc.co.uk/news/uk-scotland-scotland-business-44508725#>

(Pristup: 06.09.2018)

URL 5.9: GSA – Referentni dokumenti

<https://www.gsc-europa.eu/electronic-library/programme-reference-documents>

(Pristup: 06.09.2018)

URL 5.10: FOC Arhitektura Galileo sistema

<https://www.slideshare.net/MarcoLisi/icl-gnss-helsinki2014lisiv02>

(Pristup: 06.09.2018)

URL 5.11: Galileo Inicijalni otvoreni servis – video

https://www.esa.int/spaceinvideos/Videos/2016/12/Galileo_Initial_Services

(Pristup: 07.09.2018)

URL5.12: ESA Navipedija: Budućnost i razvoj Galilea

https://gssc.esa.int/navipedia/index.php/GALILEO_Future_and_Evolutions

(Pristup: 07.09.2018)

URL 5.13: Rubidium atomski sat/oscilator

<https://spaceequipment.airbusdefenceandspace.com/payload-products/navigation-clock-electronics/rubidium-atomic-frequency-standard/> (Pristup: 8.09.2018)

URL5.14: Elektronika rubidium atomskog sata za navigaciju: unutrašnjost sata

<https://spaceequipment.airbusdefenceandspace.com/payload-products/navigation-clock-electronics/clock-monitoring-and-control-uni/> (Pristup: 8.09.2018)

URL5.15: Pasivni hidrogenski maser za Galileo satelite

http://www.esa.int/spaceinimages/Images/2011/08/Passive_hydrogen_maser

(Pristup: 7.09.2018)

URL5.16: Laboratorijsko testiranje Galileo satelitskih satova.

http://www.esa.int/spaceinimages/Images/2015/07/Inside_Galileo_s_navigation_payload

(Pristup: 7.09.2018)

URL5.17: GPS World: Orolia proizvodi atomske satove za Galileo

<http://gpsworld.com/orolia-to-supply-atomic-clocks-for-galileo-satellites/> (Pristup: 7.09.2018)

URL5.18: GPS World: Orolia će proizvesti atomske satove za novih 12 Galileo satelita

<http://gpsworld.com/orolia-to-supply-clocks-for-12-more-galileo-satellites/>

(Pristup: 7.09.2018)

URL5.19: ESA: Galileo satovi

http://www.esa.int/Our_Activities/Navigation/Galileo/Galileo_s_clocks (Pristup: 12.09.2018)

URL 5.20: Društvo švicarskih fizičara – (Swiss Physical Society): Vrijeme, frekvencija i atomski satovi

<https://www.sps.ch/en/articles/progresses/time-frequency-and-atomic-clocks-7/>

(Pristup: 12.09.2018)

URL 5.21: Testiranje glavne navigacijske antene Galileo satelita pod svjetlom baterijske lampe.

<https://3c1703fe8d.site.internapcdn.net/newman/gfx/news/hires/2013/atestingtime.jpg> (Pristup13.9.2018.)

URL 5.22: Galileo satelit u specijaliziranoj Maxwell komori.

https://www.esa.int/spaceinimages/Images/2017/07/Galileo_in_Maxwell_chamber

(Pristup13.9.2018.)

URL 5.23: Galileo satelita izlazi iz specijalne Phenix komore.

http://gpsworld.com/wp-content/uploads/2017/11/Satellites_and_dispenser_node_full_image_2.jpg

(Pristup13.9.2018.)

URL 5.24: Galileo satelit u pripremi za testiranje pod vibracijama.

<https://phys.org/news/2013-11-galileo-satellites-space.html> (Pristup13.9.2018.)

URL 5.25: Galileo satelit postavljen za testiranje u HERZ komori

https://www.esa.int/spaceinimages/Images/2014/04/Satellite_inside_HERTZ

(Pristup13.9.2018.)

URL 5.26: Tri od četiri Galileo satelita prije lansiranja u decembru 2017

<http://galileognss.eu/wp-content/uploads/2013/12/Removing-Galileo-from-Phenix.jpg> (Pristup13.9.2018.)

URL 5.27: Četiri Galileo satelita na raketi Ariana 5.

https://www.esa.int/spaceinimages/Images/2018/07/Galileo_quartet_placed_atop_Ariane_5 (Pristup13.9.2018.)

URL 5.28: Četiri Galileo satelita unutar rakete Ariana 5.

http://gpsworld.com/wpcontent/uploads/2017/11/Four_Galileos_on_Ariane_5_node_full_image_2.jpg (Pristup13.9.2018.)

URL 5.29: Gvajana svemirski centar

<https://geek.hr/svemir/gvajana/#ixzz5R0efAh4E> (Pristup13.9.2018.)

URL 5.30: Spuštena Ariana 5 raketa da bi se instalirali Galileo sateliti unutar rakete. ESA-CNES-Arianespace / Optique video du CSG S Martin;

https://www.esa.int/spaceinimages/Images/2017/11/Ariane_5_taking_shape

(Pristup13.9.2018.)

URL 5.31: Raketa Ariana 5 na lansirnoj rampi. ESA/CNES/Arianespace

<https://cnes.fr/en/web/CNES-en/5412--who-does-what-on-ariane-5.php>

(Pristup13.9.2018.)

URL 5.32: ESA: Galileo – Konstelacija navigacijskih satelita

https://www.esa.int/Our_Activities/Navigation/Galileo/Galileo_a_constellation_of_navigation_satellites

URL 5.33: European GNSS Service Center - GSA

<https://www.gsc-europa.eu/> (Pristup14.9.2018.)

URL 5.34: GSA - Izveštaji

<https://www.gsc-europa.eu/electronic-library/performance-reports>

(Pristup14.9.2018.)

URL 5.35: ESA Navipedia: Galileo servisi

https://gssc.esa.int/navipedia/index.php/Galileo_Services (Pristup14.9.2018.)

URL 5.36: ESA: Galileo servisi

http://www.esa.int/Our_Activities/Navigation/Galileo/Galileo_services

(Pristup14.9.2018.)

URL 5.37: ESA: Navipedia, Galileo performanse

https://gssc.esa.int/navipedia/index.php/GALILEO_Performances

(Pristup14.9.2018.)

URL 5.38: ITU – Međunarodna telekomunikacijska unija

<https://www.itu.int/en/Pages/default.aspx>

(Pristup14.9.2018.)

URL 5.39: ESA, navipedia: RNSS frekvencijski opseg

https://gssc.esa.int/navipedia/index.php/File:GNSS_navigational_frequency_bands.png

(Pristup 14.9.2018.)

URL5.41: ESA kontrolna stanica Fucina, Italija

http://www.esa.int/spaceinimages/Images/2010/12/Fucino_ground_station

(Pristup 20.09.2018)

URL5.42: ESA kontrolni centar Oberpfaffenhofen u Njemačkoj.

http://www.esa.int/spaceinimages/Images/2011/08/GCS_Control_Centre

(Pristup 20.09.2018)

URL5.43: ESA uplink kontrolna stanica Papette

http://www.esa.int/spaceinimages/Images/2015/01/Papette_uplink_station

(Pristup 20.09.2018)

URL5.44: ESA kontrolna stanica Redu u Belgiji

http://www.esa.int/spaceinimages/Images/2007/06/Antennas_at_ESA_s_Redou_ground_station

(Pristup 20.09.2018)

URL 5.45: Frekvencijski Spektar svih GNSS

<http://gpsworld.com/wp-content/uploads/2018/09/skydel-gnss-spectrum-W.jpg>

(Pristup 13.9.2018.)

CONTENT

List of figures.....	6
List of tables.....	10
Chapter 1.....	11
1 INTRODUCTION	11
1.1 Basic concepts and definitions	11
1.2 Types of navigation.....	15
1.3 Position determination	18
1.4 Dead Reckoning.....	20
1.5 The techniques of positioning and navigation	22
1.6 Navigation techniques based on satellite observations	23
1.7 Terms in navigation	27
1.8 Accuracy of the navigation	27
1.9 Types and phase of the navigation.....	29
1.10 User requirements in the navigation	30
1.11 International organisations of the navigation.....	31
Chapter 2.....	34
2 HISTORY OF NAVIGATION	34
2.1 Navigation of the ancient civilizations.....	36
2.2 Navigation of the ancient Chinese	36
2.3 Navigation of the ancient peoples at the Middle East.....	37
2.4 Instruments for the navigation of ancient civilizations	43
2.5 Navigation of the ancient Romans and Greeks	49
2.6 Navigation in the Middle Ages	54
Chapter 3.....	55
3 PRINCIPLE OF SATELLITE NAVIGATION	55
3.1 Satellite navigation systems.....	55
3.2 Terrestrial navigation systems	56
3.3 Criteria for comparing navigation systems	57
3.4 Principle of satellite navigation.....	58

3.5	Navigation solution.....	60
3.6	Reference coordinate systems for satellite navigation.....	61
3.6.1	Satellite reference system.....	62
3.6.2	Geocentric coordinate system	64
3.6.3	Geodetic coordinate system	65
Chapter 4.....		68
4	RADIO NAVIGATION SATELLITE SYSTEMS.....	68
4.1	Transit navigation system	69
4.1.1	Timation.....	72
4.1.2	Project 621B.....	72
4.2	GPS navigation system	73
4.2.1	Control segment	73
4.2.2	Space GPS segment	76
4.2.3	GPS signals	79
4.2.4	Frequency and structure of GPS signals	91
4.2.5	User segment.....	99
4.3	Russian satellite navigation systems	101
4.3.1	Development of Soviet navigation systems	102
4.3.2	GLONASS	104
Chapter 5.....		112
5	NAVIGAION SATELLITE SYSTEMS IN DEVELOPMENT	112
5.1	European satellite navigation system – Galileo	114
5.1.1	Galileo space segment.....	118
5.1.2	Galileo control segment	131
5.1.3	User segment.....	133
5.2	Benefit of multi GNSS.....	134
6	Literature.....	135
6.1	List of reference za 1. chapter.....	135
6.2	List of reference za 2. chapter.....	135
6.3	List of reference za 3. chapter.....	139

6.4	List of reference za 4. chapter	139
6.5	List of reference za 5. chapter	142