

Univerza
v Ljubljani

Fakulteta
za gradbeništvo
in geodezijo



Jamova cesta 2
1000 Ljubljana, Slovenija
<http://www3.fgg.uni-lj.si/>

DRUGG – Digitalni repozitorij UL FGG
<http://drugg.fgg.uni-lj.si/>

To je izvirna različica zaključnega dela.

Prosimo, da se pri navajanju sklicujete na bibliografske podatke, kot je navedeno:

Ambrožič, V., 2016. Osnove navigacije v GNSS. Diplomaska naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo. (mentor Stopar, B.): 31 str.

Datum arhiviranja: 05-09-2016

University
of Ljubljana

Faculty of
Civil and Geodetic
Engineering



Jamova cesta 2
SI – 1000 Ljubljana, Slovenia
<http://www3.fgg.uni-lj.si/en/>

DRUGG – The Digital Repository
<http://drugg.fgg.uni-lj.si/>

This is original version of final thesis.

When citing, please refer to the publisher's bibliographic information as follows:

Ambrožič, V., 2016. Osnove navigacije v GNSS. B.Sc. Thesis. Ljubljana, University of Ljubljana, Faculty of civil and geodetic engineering. (supervisor Stopar, B.): 31 pp.

Archiving Date: 05-09-2016

Univerza
v Ljubljani

Fakulteta za
*gradbeništvo in
geodezijo*



Jamova 2
1000 Ljubljana, Slovenija
telefon (01) 47 68 500
faks (01) 42 50 681
fgg@fgg.uni-lj.si

UNIVERZITETNI ŠTUDIJSKI
PROGRAM PRVE STOPNJE
GEODEZIJA IN
GEOINFORMATIKA

Kandidatka:

VALENTINA AMBROŽIČ

OSNOVE NAVIGACIJE V GNSS

Diplomska naloga št.: 110/GIG

BASICS OF GNSS NAVIGATION

Graduation thesis No.: 110/GIG

Mentor:

prof. dr. Bojan Stopar

Ljubljana, 08. 08. 2016

STRAN ZA POPRAVKE, ERRATA

Stran z napako

Vrstica z napako

Namesto

Naj bo

IZJAVE

Spodaj podpisana študentka Valentina Ambrožič, vpisna številka 26203579, avtorica pisnega zaključnega dela študija z naslovom: Osnove navigacije v GNSS

IZJAVLJAM

1. Obkrožite eno od variant a) ali b)
 - a) da je pisno zaključno delo študija rezultat mojega samostojnega dela;
 - b) da je pisno zaključno delo študija rezultat lastnega dela več kandidatov in izpolnjuje pogoje, ki jih Statut UL določa za skupna zaključna dela študija ter je v zahtevanem deležu rezultat mojega samostojnega dela;
2. da je tiskana oblika pisnega zaključnega dela študija istovetna elektronski obliki pisnega zaključnega dela študija;
3. da sem pridobila vsa potrebna dovoljenja za uporabo podatkov in avtorskih del v pisnem zaključnem delu študija in jih v pisnem zaključnem delu študija jasno označila;
4. da sem pri pripravi pisnega zaključnega dela ravnala v skladu z etičnimi načeli in, kjer je to potrebno, za raziskavo pridobila soglasje etične komisije;
5. soglašam, da se elektronska oblika pisnega zaključnega dela študija uporabi za preverjanje podobnosti vsebine z drugimi deli s programsko opremo za preverjanje podobnosti vsebine, ki je povezana s študijskim informacijskim sistemom članice;
6. da na UL neodplačno, neizključno, prostorsko in časovno neomejeno prenašam pravico shranitve avtorskega dela v elektronski obliki, pravico reproduciranja ter pravico dajanja pisnega zaključnega dela študija na voljo javnosti na svetovnem spletu preko Repozitorija UL;
7. da dovoljujem objavo svojih osebnih podatkov, ki so navedeni v pisnem zaključnem delu študija in tej izjavi, skupaj z objavo pisnega zaključnega dela študija.

Na: Ptuj

Datum: 12.7.2016

Podpis študentke:

BIBLIOGRAFSKO – DOKUMENTACIJSKA STRAN IN IZVLEČEK

UDK:	528.28(043.2)
Avtor:	Valentina Ambrožič
Mentor:	prof. dr. Bojan Stopar
Naslov:	Osnove navigacije v GNSS
Tip dokumenta:	Diplomska naloga –univerzitetni študij
Obseg in oprema:	31 str., 12 sl., 3 pregl.
Ključne besede:	GNSS-navigacija, satelitski sistemi, navigacija, določitev položaja GNSS-sprejemnika, GNSS-navigacija v letalstvu, GNSS-sistemi za pristajanje

Izvleček

V diplomski nalogi smo predstavili osnove navigacije v globalnih navigacijskih satelitskih sistemih ter njeno uporabo v letalski navigaciji. Predstavljeni so globalni satelitski navigacijski sistemi, ter opis določitve položaja GNSS-sprejemnika na osnovi kodnih opazovanj, ki je osnova za ostale naloge navigacije. Opisani so osnovni pojmi v splošni in letalski navigaciji ter osnovne naloge navigacije. Na koncu sledi opis uporabe GNSS-navigacije v letalstvu, kjer smo opisali osnovni princip uporabe GNSS-navigacije med letom in med prihodom na letališče ter pristajanjem in vzletanjem zračnih plovil. Uporaba GNSS-navigacije med pristajanjem in vzletom je prikazana na primeru letališča Gradec v Republiki Avstriji.

BIBLIOGRAPHIC – DOCUMENTALISTIC INFORMATION AND ABSTRACT

- UDC:** 528.28(043.2)
- Author:** Valentina Ambrožič
- Supervisor:** prof. dr. Bojan Stopar, PhD
- Title:** Basics of GNSS navigation
- Document type:** Graduation thesis - University studies
- Scope and tools:** 31 p., 12 fig., 3 tab.
- Keywords:** GNSS navigation, satellite systems, navigation, determination of position of GNSS receiver with code observations, in-flight GNSS navigation, GNSS landing systems (GLS)

Abstract

In this thesis we present basics of GNSS navigation and it's use in flight navigation. We present global satellite navigation systems and description of determination of receiver's position on base of code observations. Determination of receiver's position is base for other tasks of navigation. In next part we are describing basic terms and concepts in general navigation and in flight navigation. At the end we are describing use of GNSS navigation in aviation. Described are basic principle of GNSS navigation during all phases of flight – approach, landing and take-off. Practical use of GNSS navigation during approach, landing and take-off is illustrated with it's use at Graz International Airport.

ZAHVALA

Za vso pomoč, nasvete, razlage in usmerjanja pri izdelavi diplomske naloge, se iskreno zahvaljujem mentorju prof. dr. Bojanu Stoparju.

Iskreno se zahvaljujem tudi vsem, ki so mi kakorkoli pomagali, da je diplomska naloga nastala.

KAZALO VSEBINE

Izjave	II
Bibliografsko – dokumentacijska stran in izvleček	III
Bibliographic – documentalistic information and abstract	IV
Zahvala	V
1 UVOD	1
2 NAVIGACIJSKI SISTEMI	2
2.1 Globalni satelitski navigacijski sistemi	2
2.1.1 Global Positioning System – GPS	2
2.1.2 Globalnaja Navigacionnaja Sputnikovaja Sistema – GLONASS	4
2.1.3 Galileo	5
2.2 Satellite Based Augmentation System - SBAS	6
2.2.1 Wide-Area Augmentation System (WAAS)	7
2.2.2 European Geostationary Navigation Overlay System (EGNOS)	8
2.3 Ground Based Augmentation System - GBAS	9
2.3.1 Delovanje GBAS sistema	9
3 DOLOČITEV POLOŽAJA V GNSS	11
3.1 Osnovni algoritem določitve položaja	11
3.2 Diferencialni GNSS (DGNSS)	16
4 NAVIGACIJA	18
4.1 Osnovni pojmi v navigaciji	19
4.2 Osnovne naloge navigacije	20
5 UPORABA GNSS-NAVIGACIJE V LETALSTVU	22
5.1 Letalska navigacija – osnovni pojmi	22
5.2 Navigacija med letom – integracija INS in GNSS	24
5.3 GNSS/ GPS-sistem za pristajanje (GNSS/ GPS-landing system)	24
5.3.1 Osnovni princip GLS	24
5.3.2 Uporaba GLS	25
5.3.3 Primer iz prakse	26
6 ZAKLJUČEK	28
VIRI	29

KAZALO SLIK

Slika 1: sprememba višine IGS postaje (sprejemnika GPS) v Gradcu ob vključeni in po izključitvi motnje S/A	3
Slika 2: konstelacija GPS	4
Slika 3: konstelacija GLONASS-ovih satelitov	5
Slika 4: polna konstelacija Galileo satelitov	6
Slika 5: pokritost s sateliti WAAS	8
Slika 6: pokritost sistema EGNOS	8
Slika 7: princip delovanja GBAS postaje	10
Slika 8: relacija satelit - sprejemnik - koordinatno izhodišče	12
Slika 9: princip DGNSS	16
Slika 10: ortodroma in loksodroma na krogli	20
Slika 11: integracija DGPS in INS pri GLS	25
Slika 12: GLS procedura na Graškem letališču	27

KAZALO PREGLEDNIC

Preglednica 1: koordinate točk	21
Preglednica 2: azimut in dolžina loksodrome	21
Preglednica 3: azimut smer in dolžina ortodrome ter koordinate točke poprave smeri plovila	21

1 UVOD

Namen naloge je bil predstaviti osnovne koncepte GNSS-navigacije ter se seznaniti z njihovo uporabo v letalstvu. V nalogi tako predstavljamo globalne satelitske navigacijske sisteme ter postopek za določitev položaja v GNSS. Poleg tega predstavljamo osnovne naloge navigacije, ter uporabo GNSS-navigacije v letalstvu. Na kratko je predstavljena navigacija med letom, večji poudarek pa je na GNSS-pristajalnih sistemih. Na koncu naloge predstavljamo tudi praktični primer uporabe GNSS-pristajalnega sistema.

Naloga je sestavljena iz dveh delov. Prvi del predstavljajo poglavja o osnovah navigacije, sistemih GNSS in določitvi položaja v GNSS. Drugi del naloge je predstavitev uporabe GNSS-navigacije v letalstvu.

Satelitski navigacijski sistemi so postali nepogrešljiv del splošnega življenja in njihova uporaba ni več rezervirana samo za vojaške namene, geodezijo in druga ozko specializirana področja uporabe. Tako se danes GNSS-navigacija uporablja v aplikacijah, ki jih uporabljamo vsakodnevno, in ne služijo nujno (samo) navigaciji.

Kot omenjajo Ackland, Imrich, Murphy 2003, Prasad, Ruggieri 2005 ter Grewal, Weill, Andrews 2007 je GNSS-navigacija za letalstvo zanimiva od takrat, ko je bilo položaj premikajočega se sprejemnika mogoče določiti z dovolj visoko točnostjo in zanesljivostjo. Ko so ugotovili, da se postopki za določitev položaja s pomočjo inercialne navigacije in GNSS-navigacije »dopolnjujejo« in položaj zračnega plovila zagotavljajo z zadovoljivo kakovostjo, se je začela uporaba GNSS - navigacije in njen razcvet.

2 NAVIGACIJSKI SISTEMI

Začetek razvoja in uporabe satelitskih sistemov sega v petdeseta leta prejšnjega stoletja. Te satelite so z Zemlje najprej samo opazovali in na njihovi osnovi določali koordinate točk na Zemlji. Prva opazovanja umetnih Zemljinih satelitov so za geodezijo zelo pomembna, saj so vodila do določitve prvih globalnih Zemljinih elipsoidov in modelov geoida. Začetek vzpostavljanja satelitskih sistemov, kot jih poznamo danes pa sega v sedemdeseta leta prejšnjega stoletja, ko so ZDA začele vzpostavljati Global Positioning System (v nadaljevanju GPS).

Osnovni namen satelitskih sistemov je bilo omogočiti hitro in točno določanje položaja ter zagotavljanje podatkov o točnem času. Danes se povezujejo različne vrste radio-navigacije (od GNSS-sistemov do SBAS in GBAS sistemov) ter tako omogočajo visoko natančnost določitve položaja ter zmanjšujejo tveganje pri uporabi.

2.1 Globalni satelitski navigacijski sistemi

V nadaljevanju tega podpoglavja sledi opis za nas treh najpomembnejših satelitskih navigacijskih sistemov: GPS-a, GLONASS-a in Galilea.

2.1.1 Global Positioning System – GPS

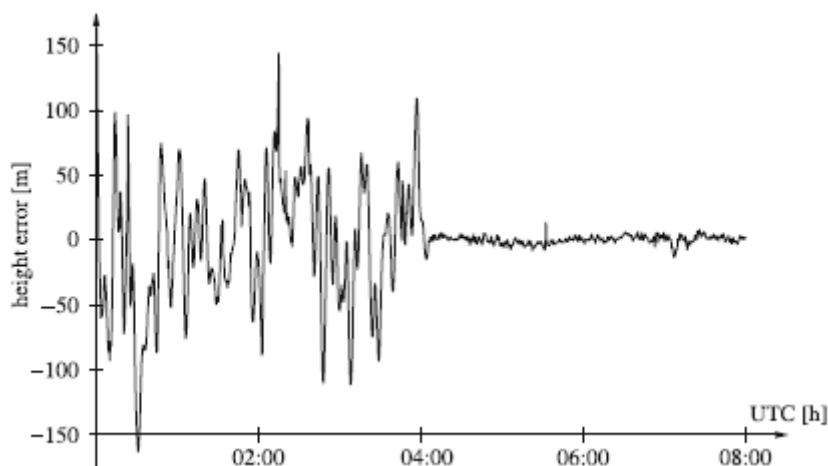
»Global Positioning System« (GPS) je danes za večino ljudi sopomenka za vso GNSS tehnologijo in navigacijo. Tako kratico GPS uporabljamo za vse satelitske sisteme za navigacijo in se ne zavedamo, da gre pravzaprav samo za enega izmed njih.

Začetek GPS-a sega v leto 1973, ko so se v ZDA odločili, da bodo zasnovali in vzpostavili sistem za navigacijo, ki bo neprekinjeno omogočal hitro in točno navigacijo ter zagotavljal podatek o času. Osnovni cilji so bili zadovoljiti potrebe vojske, vendar so uporabo sistema omogočili tudi civilnim uporabnikom – od geodetov kot številnih drugih. Glavni povod za odobritev dostopa sistema GPS civilistom je bila nesreča letala Korean Airlines let 007 leta 1983 (Hofmann - Wellenhof, Lichteneger, Wasle, 2008).

Projekt vzpostavitve sistema je potekal v več fazah. V letu 1973 so začeli sistem razvijati, leta 1978 pa je bil izstreljen prvi poskusni satelit. Temu je sledilo 11 let preizkušanj in leta 1989 so končno izstrelili prvi satelit, ki je bil namenjen navigaciji (Hofmann - Wellenhof, Lichteneger, Wasle, 2008). Danes je na 20 200 km višine in v šestih orbitalnih ravninah razporejenih 27 satelitov ter 4 rezervni sateliti (konstelacija »expandable 24«) (GPS, 2016b), kot vidimo na Sliki 2.

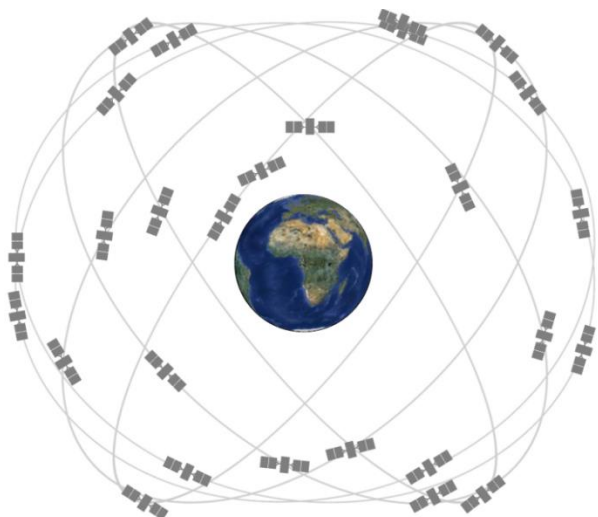
Referenčni koordinatni sistem GPS-a je World Geodetic System 1984 (WGS-84). Gre za geocentrični koordinatni sistem, ki je bil najprej realiziran s pomočjo opazovanj sistema TRANSIT, zadnja posodobitev WGS-84 pa je bila opravljena leta 2002. Poleg prostorske reference mora biti v GNSS definirana še časovna. GPS-čas je povezan z atomskim časom in UTC časom. Kot začetek GPS časa je uporabljen 6. januar 1980 (Hofmann - Wellenhof, Lichteneger, Wasle, 2008).

Posebnosti GPS-a sta »selective availability« (S/A) in »anti-spoofing«. Uvedba prve (t.j. S/A) je bila utemeljena na boljši natančnosti sistema kot je bila pričakovana. GPS je bil v teoriji zasnovan kot sistem za pozicioniranje z nekaj sto-metrsko natančnostjo. Ko se je po preizkusih izkazalo, da je natančnost v okvirih do nekaj deset metrov, so ugotovili, da bi lahko določenim uporabnikom tako »visoko« točnost onemogočili. Za ta namen so razvili dva procesa. En izmed njiju se je nanašal na napačen model teka satelitove ure (δ proces), drugi pa na napačne s satelita oddane (angl.: broadcast) efemeride (ϵ proces) posredovane uporabnikom v okviru navigacijskega sporočila. Pri procesu δ je posledica napake v teku satelitove ure napačna psevdorazdalja – gre za direkten vpliv na izračun psevdorazdalje, ki je enak za kodna in fazna opazovanja. Pri procesu ϵ pa sprejemnik zaradi napačnih efemerid napačno izračuna položaj satelita in posledično bodo določene napačne koordinate sprejemnika. S/A so po ukazu predsednika ZDA ukinili 2. maja 2000 (Hofmann - Wellenhof, Lichtenegger, Wasle, 2008). Na Sliki 1 vidimo, kako je motnja S/A vplivala na določitev višine IGS točke v Avstrijskem Gradcu ob vključeni in izključeni motnji S/A. V geodeziji se je težava ob vključeni motnji S/A rešila z določitvijo relativnega položaja, v navigaciji pa s pomočjo diferencialnega GPS-a.



Slika 1: sprememba višine IGS postaje (sprejemnika GPS) v Gradcu ob vključeni in po izključitvi motnje S/A (Hofmann – Wellenhof, Lichtenegger, Wasle, 2008).

Druga »posebnost« sistema GPS je »anti-spoofing« (A-S). Pri tej motnji P kodo (natančna koda, ki je dostopna samo vojaškim in pooblaščenim uporabnikom) izklopijo ali pa jo dodatno zakodirajo (v Y kodo). Glavna namena A-S sta onemogočanje dostopa nepooblaščenim uporabnikom do signala GNSS ter preprečitev zamenjave lažnih GPS signalov s pravimi, kar bi lahko vodilo do napačne določitve položaja. Ko je možnost A-S vključena, je P koda zamenjana z nepooblaščenim uporabnikom neznano Y kodo (Hofmann - Wellenhof, Lichtenegger, Wasle, 2008).



Slika 2: konstelacija GPS (GPS, 2016a).

2.1.2 Globalna Navigaciona Sputnikovaja Sistema – GLONASS

Zaradi tekme za prevlado v vesolju je sredi sedemdesetih let prejšnjega stoletja Sovjetska zveza vzpostavila satelitski navigacijski sistem GLONASS. Podobno kot je GPS temeljil na predhodniku, sistemu TRANSIT, je GLONASS temeljil na predhodniku, sistemu Tsikada. Prvotno je bil zasnovan za potrebe vojske, ki še danes upravlja z njim, je pa na razpolago tudi civilnim uporabnikom (Hofmann - Wellenhof, Lichteneger, Wasle, 2008).

Prve tri satelite so izstrelili 12. oktobra 1982. Šlo je za dva testna in en »pravi« satelit, vendar noben od teh satelitov ni postal operativen. Naslednji sateliti so bili izstreljeni po »paketih«, prvi že januarja 1984. Popolno konstelacijo (24 satelitov v treh ravninah) je sistem dosegel 18. januarja 1996, tri leta prej pa je bil že deklariran kot delujoč. Po začetkih uspešnega delovanja in intenzivnega razvoja sistema v devetdesetih letih prejšnjega stoletja, so se okoliščine za sistem GLONASS na začetku tega tisočletja močno poslabšale. Leta 2001, je bilo v sistemu le šest do osem delujočih satelitov. Po tem so začeli delati na modernizaciji sistema (Hofmann - Wellenhof, Lichteneger, Wasle, 2008). Danes je v konstelaciji 28 satelitov, od tega je 23 delujočih, 1 dodatni, 1 v testni fazi, 1 v fazi vzdrževanja in 2 pod nadzorom proizvajalca (GLONASS, 2016a). Na Sliki 3 vidimo konstelacijo GLONASS-a.

Referenčni koordinatni sistem GLONASS-a je Parametry Zemlj 1990 (PZ-90). Gre za geocentrični koordinatni sistem, ki temelji na Sovjetskem Geodetskem Sitemu (SGS-85), ta pa je bil kasneje preimenovan v Sovjetski Geodetski Sistem 1990 (SGS-90). PZ-90 je bil realiziran s pomočjo opazovanj do že obstoječih satelitov, Doplerskih opazovanj, tehnologije SLR (Satellite laser ranging), satelitske altimetrije in elektronskih in laserskih meritev razdalj do GLONASS in Etalon satelitov (Hofmann - Wellenhof, Lichteneger, Wasle, 2008). Etalon sateliti so pasivni sateliti, namenjeni uporabi tehnologije SLR. Uporabili so jih za določitev visoko natančnega koordinatnega sestava in parametrov vrtenja Zemlje (NASA, 2016).

GLONASS za razliko od GPS-a od začetka delovanja ni bil odprt za civilno uporabo, saj je šlo za strogo vojaški sistem.

Sistem so za civilno uporabo odprli februarja 1999 in tako omogočili dostop do signala in njegovih lastnosti tudi civilistom po vsem svetu (Hofmann - Wellenhof, Lichteneger, Wasle, 2008).



Slika 3: konstelacija GLONASS-ovih satelitov (GLONASS, 2016b).

2.1.3 Galileo

Galileo je eden izmed najmlajših satelitskih navigacijskih sistemov. Priprave na program so se sicer že začele sredi devetdesetih let prejšnjega stoletja, vendar operativno-deluje šele nekaj let. S sistemom Galileo upravljajo civilne oblasti in ne vojaške (Prasad, Ruggieri, 2005).

Strogo gledano sega začetek Galilea v leto 1994, ko je Evropski Svet od Evropske Komisije zahteval rešitev, ki bi poskrbela, da bi bila Evropska Unija v koraku z razvojem tehnologije na področju satelitske navigacije. Zahteve so se lotili v dveh delih. Prvi del je bil vzpostavitev EGNOS-a (več o njem v nadaljevanju), drugi del pa vzpostavitev satelitskega navigacijskega sistema za civilno uporabo. Evropska komisija je pri snovanju sistema sodelovala z ZDA in Rusijo, končni izdelek pa je neodvisen satelitski navigacijski sistem, ki je kompatibilen z GPS-om, dostopen po celem svetu, ki naj bi deloval ob visoki stopnji zanesljivosti in integritete (Hofmann - Wellenhof, Lichteneger, Wasle, 2008).

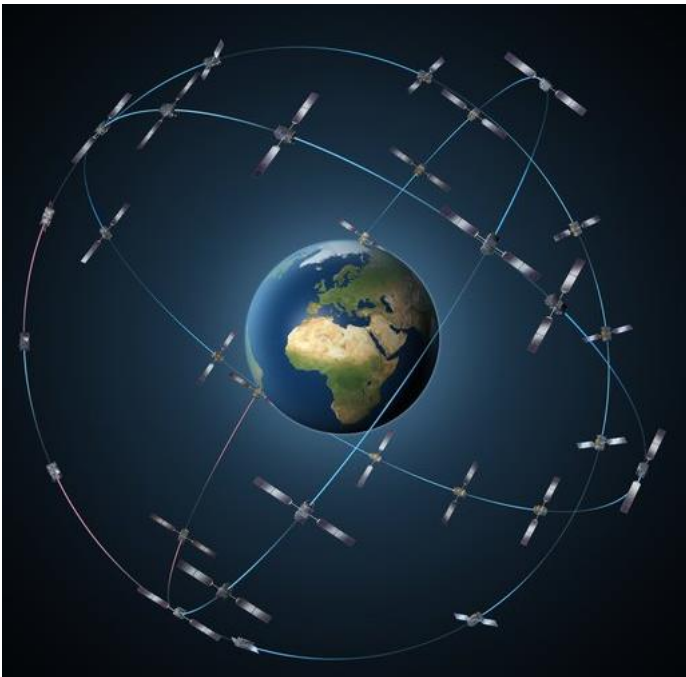
Prva izstrelitev delujočih satelitov je bila 21. 10. 2011, druga ji je pa sledila naslednje leto. Izstrelitev, ki so jo izvedli lansko leto, je bila uspešna le deloma, saj se satelita nista utirila v načrtovani orbiti. Tako so trenutno utirjeni štirje sateliti od načrtovanih tridesetih. Pomembno je tudi dejstvo, da je bila marca 2013 vzpostavljena povezava med vesoljskim in kontrolnim segmentom – določili so lokacijo Laboratorija za navigacijo Evropske vesoljske agencije (ESA, 2016a).

Referenčni koordinatni sestav Galilea je GTRF (Galileo Terrestrial Reference Frame). Je neodvisna realizacija ITRS (International Terrestrial Reference System), od zadnje različice ITRF pa se naj se ne bi razlikovala za več kot 3 cm (Navipedia, 2016).

Osnova za časovni sistem, ki ga uporablja Galileo so vodikove atomske ure. Od TAI se razlikuje za manj kot 50 ns, od UTC pa za 1 sekundo (to se lahko spreminja zaradi prestopnih sekund - »leap seconds«) (Hofmann - Wellenhof, Lichteneger, Wasle, 2008). Začetni čas je definiran na 00:00 UTC na nedeljo 22. avgusta 1999 (Unoosa, 2016).

Posebnost Galileja so storitve, ki jih ponuja. Gre za pet vrst storitve, ki se med sabo razlikujejo po tem, za kaj oziroma kdaj se lahko uporabijo in komu so na voljo (Hofmann - Wellenhof, Lichteneger, Wasle, 2008):

- Open service (OS) je prost za uporabo, lahko ga uporabljajo vsi, ne vsebuje pa informacij o zanesljivosti satelitskega signala,
- Commercial service (CS) je nadgradnja OS in je plačljiv, kodirano navigacijsko sporočilo je naneseno na vseh frekvencah in je oddajano s hitrostjo 500 bitov na sekundo,
- Safety-of-life service (SoL) deluje na enakih frekvencah kot OS, vendar je dodana še informacija o zanesljivosti signala,
- Public regulated service (PRS) zagotavlja kontinuiran, robusten in kodiran signal, ki bo/je uporaben v kriznih situacijah in
- Search and rescue service (SAR), ki se ga uporablja v reševalnih akcijah



Slika 4: polna konstelacija Galileo satelitov (ESA, 2016b).

Globalni satelitski navigacijski sistemi so močno spremenili učinkovitost in dostopnost navigacije in s tem povečali uporabnost in učinkovitost storitev v katerih je navigacija ključna kategorija.

2.2 Satellite Based Augmentation System - SBAS

»Satellite based augmentation system« (v nadaljevanju SBAS) je sistem geostacionarnih satelitov, ki zagotavljajo popravke opazovanj ter tako omogočijo povečanje natančnosti določitve položaja na osnovi GNSS-opazovanj. To je predvsem pomembno pri uporabi GNSS-navigacije v nalogah, kjer je zahtevana visoka točnost položaja, kot na primer v letalstvu (približevanje letališču in pristaneke), pomorski promet (pristaniške operacije), kopenski promet... V nadaljevanju je opisan osnovni koncept delovanja SBAS ter sistema, ki sta za naše območje najpomembnejša (WAAS in EGNOS).

SBAS temelji na stalno potekajočih GNSS-opazovanjih kontrolnih postaj, ki imajo zelo natančno določen položaj in so razporejene po kontinentih (EGNOS, 2016c). Kontrolne postaje na osnovi opazovanj ugotavljajo napake GNSS-opazovanj tako, da primerjajo dejanske vrednosti opazovanj z vrednostmi opazovanj kakršna naj bi bila na tej lokaciji (Grewal, Weill, Andrews, 2007). Pogreški vrednosti opazovanj GNSS so računani v računskem centru in posredovani na satelite SBAS. Ti potem sporočilo s pogreški posredujejo naprej uporabnikom (EGNOS, 2016c). Osnova delovanja SBAS sistemov je koncept DGNS, ki je opisan v poglavju 3.2.

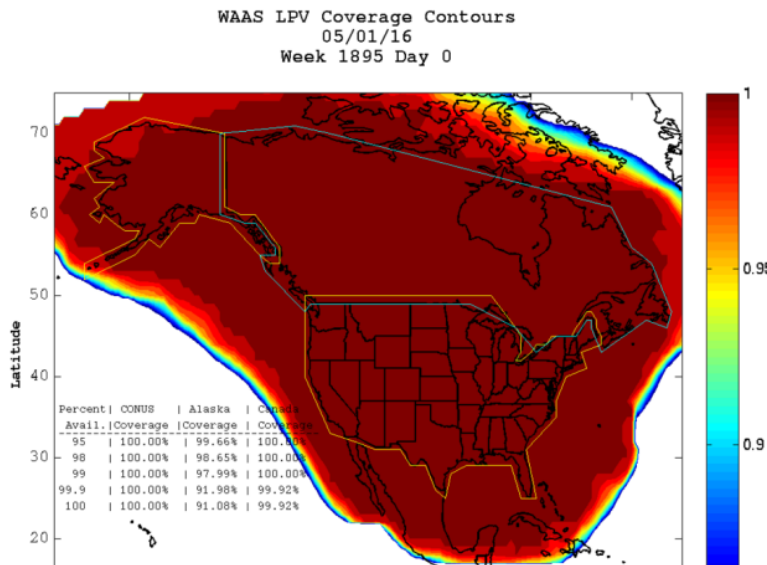
Kot že omenjeno, SBAS sistemi igrajo pomembno vlogo pri navigaciji v letalstvu. Podatki, ki jih sistemi pošiljajo uporabnikom so na voljo ves čas, brez prekinitev, vzpostavljen je nadzor nad njihovo zanesljivostjo in zadostijo natančnostim, ki so zahtevane za približevanje letališču pri kategorijah od I do III. Takšni podatki zadostijo zahtevam »RNP« (»Required Navigation Performance«) oziroma zahtevanim navigacijskim zmogljivostim (Prasad in Ruggieri, 2005).

V praksi obstaja več SBAS sistemov (WAAS – angl. Wide Area Augmentation System, EGNOS – angl. European Geostationary Navigation Overlay System, MSAS – angl. MTSAT Satellite Augmentation System, CWAAS – angl. Canadian Wide Area Augmentation System ...). V nadaljevanju bosta opisana dva, ki sta za naše območje najpomembnejša – WAAS in EGNOS.

Satelitski sistemi so osnova, na kateri sloni satelitska navigacija. Zavedati se moramo, da pa niso absolutno zanesljivi in da lahko tudi odpovejo ter da jih ima v lasti večinoma vojaška oblast (ki lahko z njimi v primeru vojne manipulira ali jih ugasne).

2.2.1 Wide-Area Augmentation System (WAAS)

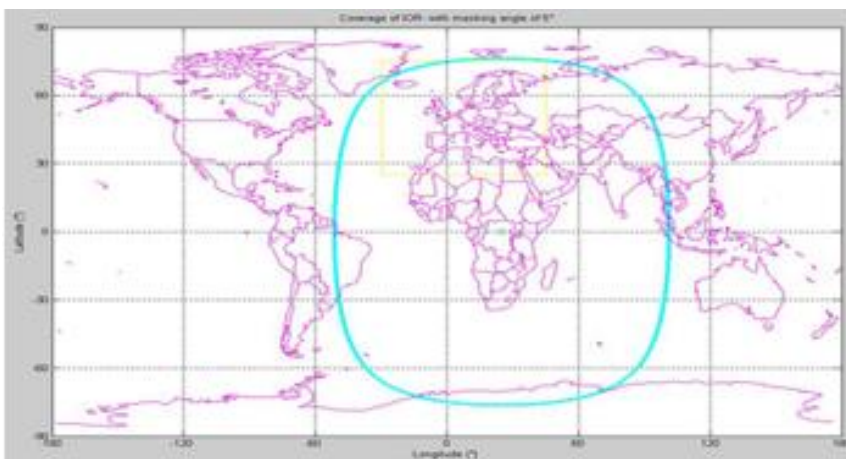
WAAS je bil razvit sredi devetdesetih let prejšnjega stoletja za potrebe civilnega letalstva, saj uporaba samo GPS-a ob vključenih motnji S/A ni zadostila potrebam po natančnosti. Signal WAAS se oddaja na L1 frekvenci GPS-a, vendar ima drugačno modulacijo, to pa omogoča, da ne pride do zamenjave oziroma motenj med njimi. Signal vsebuje diferencialne popravke za vse GPS in geostacionarne satelite ter tudi informacije o zanesljivosti signala. WAAS sateliti lahko oddajajo samo podatke o satelitih ali pa WAAS podatke in podatke o satelitih. S signalom WAAS satelitov lahko sprejemnik izvede dodatne meritve psevdorazdalje in še bolj natančno določi svoj položaj (Prasad, Ruggieri, 2005). Trenutno sta v uporabi 2 WAAS satelita, ki pokrivata severno in del srednje Amerike (Slika 5) (FAA, 2016f).



Slika 5: pokritost s sateliti WAAS (FAA, 2016e).

2.2.2 European Geostationary Navigation Overlay System (EGNOS)

Začetek EGNOS-a prav tako sega v sredino devetdesetih let dvajsetega stoletja, natančneje v leto 1994. EGNOS je »projekt« Evropske komisije, Evropske vesoljske agencije (ESA) in Eurocontrola (Prasad in Ruggieri, 2005). V konstelaciji so trenutno trije sateliti (Inmarsat III, Inmarsat IV in SES ASTRA GEO satellite SES-5) (EGNOS, 2016). Pokrivajo celotno Evropo, Afriko, dobršen del Rusije in preostale Azije, Atlantika in tudi del Brazilije (Slika 6). Glavni namen EGNOS-a je bil zagotoviti podporo pri dejavnostih, kjer je ogroženo življenje (Safety-of-Life) - eden izmed glavnih uporabnikov EGNOS-ovih storitev je letalstvo (Prasad, Ruggieri, 2005).



Slika 6: pokritost sistema EGNOS (EGNOS portal, 2016b).

2.3 Ground Based Augmentation System - GBAS

»Ground Based Augmentation System« (v nadaljevanju GBAS) je sistem postaj na tleh, ki lahko zagotavljajo večjo natančnost določitve položaja in zagotavljajo podatke o zanesljivosti satelitskega signala in sistema GNSS v celoti. Podobno kot pri SBAS je tudi tukaj osnova za delovanje sistema koncept DGNSS, ki bo opisan v poglavju 3.2 s to razliko, da satelite nadomeščajo zemeljske postaje. V nadaljevanju bo opisan koncept delovanja GBAS in njihova uporaba.

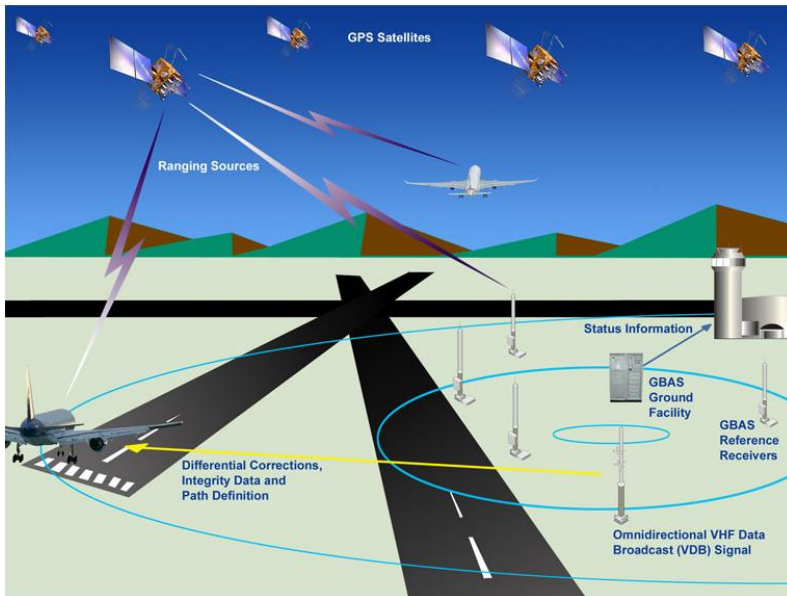
GBAS sistemi so locirani v bližini letališč, saj je njihova glavna naloga, da »pomagajo« pri pristajanju in vzletanju plovil. Oddajajo signale, ki so podobni GPS signalom in sicer na frekvenci L1. Uporabljajo drugačno PRN kodo kot sateliti, zato, da sprejemnik loči, kateri signal je oddajen s satelita in kateri s postaje na tleh. GBAS postaje vplivajo na izboljšanje geometrije oddajnikov signala in posledično na natančnost določitve sprejemnika (Prasad, Ruggieri, 2005). Poleg uporabe kot vir signala za določanje položaja se uporabljajo predvsem kot posredniki informacij o diferencialnih popravkih in podatkov o zanesljivosti signala (FAA, 2016b).

Z njihovo pomočjo se lahko doseže natančnost določitve položaja reda nekaj centimetrov (Prasad, Ruggieri, 2005).

2.3.1 Delovanje GBAS sistema

GBAS postaje so sestavljene iz vsaj treh anten GNSS, ki se nahajajo na točkah z znanimi koordinatami, glavnega računalnika in VHF oddajnika, ki posreduje podatke plovilom na oziroma v bližini letališča. Plovila, ki hočejo izkoristiti takšno vrsto navigacije pri vzletu oziroma pristanku, morajo imeti na krovu ustrezno opremo (inercialni navigacijski sistem, GNSS podatke in podatke GBAS postaj). GBAS postaje plovilom posredujejo podatke o popravkih satelitskih opazovanj, zanesljivosti signala ter podatke o približevanju letališču. Napake v sprejetih signalih (t.j. pogreški opazovanj) so ugotovljene enako kot pri SBAS sistemih, saj je kot osnova uporabljen koncept DGNSS. Poleg popravkov GBAS postaje spremljajo tudi stanje satelitov ter v primeru ne uporabnega satelita ne posredujejo popravkov zanj. Sporočilo s popravki in podatki o stanju satelitov (zanesljivosti signala) se posreduje dvakrat na sekundo preko VHF povezave (FAA, 2016d).

GBAS postaje so v uporabi predvsem na letališčih, kjer jih uporabljajo pri približevanju in pristajanju, ki se izvedejo s pomočjo GNSS-sistema za pristajanje. Shema delovanja GBAS postaj prikazuje Slika 7.



Slika 7: princip delovanja GBAS postaje (FAA, 2016c).

3 DOLOČITEV POLOŽAJA V GNSS

V navigaciji se v večini nalog uporablja način določanja položaja, ki temelji na kodnih opazovanjih. Tako določen položaj je za večino nalog osnovna kategorija, na katero se navezujejo vse naloge navigacije.

V nadaljevanju sledi opis postopka določitve koordinat na osnovi kodnih opazovanj v ECEF koordinatnem sistemu. Poleg določitve koordinat GNSS-sprejemnika v poglavju opisujemo še princip DGNSS.

3.1 Osnovni algoritem določitve položaja

Osnova za določanje položaja sprejemnika s pomočjo satelitskih navigacijskih sistemov je čas prihoda oziroma »Time Of Arrival« (TOA). TOA je določen s sprejemnikom, gre pa dejansko za čas potovanja signala od satelita (na znani lokaciji) do sprejemnika. Definiran je kot (Prasad, Ruggieri, 2005):

$$TOA = \text{čas sprejetja signala} - \text{čas oddaje signala} \quad (1)$$

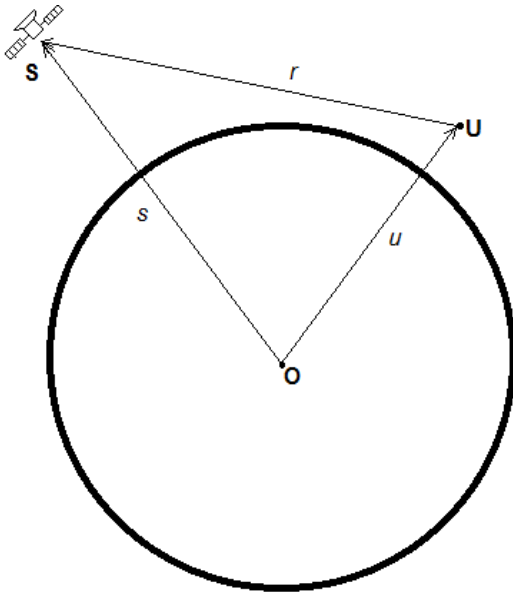
Izračun razdalje med satelitom in sprejemnikom temelji na hitrosti potovanja signala (TOA), ki je pomnožen z vrednostjo hitrosti razširjanja signala. Tako je osnovna enačba satelitske navigacije (Prasad, Ruggieri, 2005):

$$D = c \cdot TOA \quad (2)$$

Pri tem je D dolžina med oddajnikom na satelitu in sprejemnikom, c hitrost svetlobe in TOA časovni interval potovanja signala.

Iz enačbe (2) lahko vidimo, da za določitev prave oddaljenosti (geometrijske oddaljenosti) med sprejemnikom in oddajnikom potrebujemo »pravi« TOA. To pomeni, da mora sprejemnik poznati točen trenutek oddaje signala ter točen trenutek sprejema signala. Podatek o času oddaje signala sprejemnik dobi iz navigacijskega sporočila, čas o sprejemu signala pa je določen s sprejemnikovo uro. Za izračun prave razlike med obema časoma, morata biti uri satelita in sprejemnika časovno usklajeni.

Sprejemnik lahko na podlagi »izmerjenih« razdalj do posameznih satelitov določi svoj položaj. V satelitski navigaciji oddajniki (t.j. sateliti) nimajo konstantnega položaja in ga je potrebno določiti za poljuben trenutek. Rešitev problema določitve položaja satelita omogoča navigacijsko sporočilo, ki je del satelitskega signala. To med drugim vsebuje tudi efemeride satelitov, s pomočjo katerih lahko sprejemnik določi položaj satelitov v vsakem (poljubnem) trenutku. Pomembno je, da določitev položaja sprejemnika poteka v tistem koordinatnem sistemu, v katerem so podane efemeride satelita.



Slika 8: relacija satelit - sprejemnik - koordinatno izhodišče

Na Sliki 8 prikazan vektor s je znan oziroma določen na osnovi vsebine navigacijskega sporočila, za vektor r imamo le oceno njegove dolžine - razdalje satelit – sprejemnik, pridobljen s pomočjo TOA in hitrosti razširjanja elektromagnetnega valovanja, vektor u pa določamo. Iz Slike 8 vidimo da velja (Prasad, Ruggieri, 2005):

$$\mathbf{r} = \|\mathbf{r}\| = \|\mathbf{s} - \mathbf{u}\| \quad (3)$$

V idealnih pogojih bi TOA, izmerjen na sprejemniku, bil enak pravemu času, ki bi ga signal potreboval za pot med satelitom in sprejemnikom. Tako bi pravo razdaljo lahko izračunali kot (Prasad, Ruggieri, 2005):

$$r = c(t_i - t^j) \quad (4)$$

Kjer je čas t_i odčitano na sprejemniku v trenutku sprejema signala, čas t^j pa na satelitu v trenutku oddaje signala. Ker se določanje položaja sprejemnika opravlja v dejanskih pogojih, moramo upoštevati razlike med GPS-časom, ki je tudi čas ure satelita in časom ure sprejemnika. Tako je pravi čas oddaje signala enak seštevkemu časa t^j in pogreška satelitove ure Δt^j ter pravi čas sprejema signala enak seštevkemu časa t_i in pogreška sprejemnikove ure Δt_i . Če to upoštevamo ter vstavimo v enačbo (3), dobimo psevdorazdaljo (razdalja, določena na osnovi časa potovanja signala, izmerjenega z dvema urama, to je s satelitovo in sprejemnikovo uro) (Prasad, Ruggieri, 2005):

$$P_i^j = c[(t_i + \Delta t_i) - (t^j + \Delta t^j)] = c(t_i - t^j) + c(\Delta t_i - \Delta t^j) = r + c(\Delta t_i - \Delta t^j) \quad (5)$$

Zaradi upoštevanja dejstva, da je razlika med GPS časom in satelitovo uro odpravljena s popravki, ki jih vsebuje navigacijsko sporočilo, lahko enačbo (5) zapišemo kot (Prasad, Ruggieri, 2005):

$$P_i^j = \rho_i^j + c\Delta t_i \quad (6)$$

P_i^j je psevdorazdalja med satelitom in sprejemnikom. Gre za geometrijsko razdaljo, ki ji prištejemo popravek zaradi pogreška sprejemnikove ure. Zanima nas, kako geometrijska razdalja ρ_i^j povezuje koordinate satelita in sprejemnika.

V nadaljevanju sledi prikaz poteka izračuna geometrijske razdalje, njenih popravkov ter linearizacija izraza za geometrijsko razdaljo satelit-sprejemnik. Ta je nujna, saj se problem določitve položaja sprejemnika na osnovi merjenih razdalj satelit-sprejemnik rešuje kot linearni problem izravnave po metodi najmanjših kvadratov. S pomočjo geometrijske razdalje in postopka, ki sledi v nadaljevanju, lahko določimo položaj sprejemnika.

Pri določitvi položaja mirujočega GNSS-sprejemnika je skupno število opazovanj (n) enako zmnožku števila satelitov (n_s) in števila epoh opazovanj (n_t). Število neznank je enako $3 + n_t$, saj moramo določiti položaj sprejemnika (3 koordinatne neznanke) in pogrešek sprejemnikove ure v vsaki epohi. Minimalno število satelitov, ki jih potrebujemo, da določimo neznanke je 2 (n_0) v minimalno 3 (n_t) epohah, saj mora veljati, da mora biti število opazovanj večje ali enako številu neznank (Stopar, 2015).

Pri določitvi položaja premikajočega GNSS - sprejemnika je skupno število opazovanj enako kot pri določitvi položaja mirujočega sprejemnika (zmnožek števila satelitov in števila epoh). Število neznank je v tem primeru enako $4 \cdot n_t$, saj moramo določiti v vsaki epohi po tri koordinatne neznanke ($3 \cdot n_t$) in pogrešek teka sprejemnikove ure (n_t). Minimalno število satelitov v vsakem trenutku, do katerih se izvedejo opazovanja je 4 (3 koordinatne neznanke in pogrešek teka sprejemnikove ure). To vidimo v postopku, ki je opisan spodaj (Stopar, 2015).

Za izračun prave geometrijske razdalje potrebujemo prave koordinate sprejemnika, ki pa jih ne poznamo, saj jih šele določamo. Na razpolago imamo le približne koordinate sprejemnika $\mathbf{r}_{i0} = [x_{i0}, y_{i0}, z_{i0}]^T$, s pomočjo katerih izračunamo približno geometrijsko razdaljo, iz nje pa preko popravkov pravo geometrijsko razdaljo in prave koordinate (Stopar, 2015):

$$\rho_{i0}^j = \sqrt{(X^j - x_{i0})^2 + (Y^j - y_{i0})^2 + (Z^j - z_{i0})^2} \quad (7)$$

Koordinate sprejemnika $\mathbf{r}_i = [x_i, y_i, z_i]^T$ izračunamo s pomočjo približnih koordinat, ki jim prištejemo izračunan popravek (Stopar, 2015):

$$\mathbf{r}_i = \mathbf{r}_{i0} + \Delta \mathbf{r}_i \quad (8)$$

Določitev geometrijske razdalje je v osnovi funkcija pravih koordinat sprejemnika. S pomočjo enačbe (8) jo lahko opredelimo drugače: kot funkcijo približnih koordinat sprejemnika, ki jim prištejemo popravke (Stopar, 2015):

$$f(r_i) = f(x_i, y_i, z_i) \rightarrow f(\mathbf{r}_{i0} + \Delta \mathbf{r}_i) = f(x_{i0} + \Delta x_i, y_{i0} + \Delta y_i, z_{i0} + \Delta z_i) \quad (9)$$

Funkcijo lahko razvijemo v Taylorjevo vrsto v okolici približnih koordinat (Stopar, 2015):

$$\begin{aligned} f(x_i, y_i, z_i) &= f(x_{i0} + \Delta x_i, y_{i0} + \Delta y_i, z_{i0} + \Delta z_i) = \\ &= f(x_{i0}, y_{i0}, z_{i0}) + \frac{\partial f(x_{i0}, y_{i0}, z_{i0})}{\partial x_{i0}} \Delta x_i + \frac{\partial f(x_{i0}, y_{i0}, z_{i0})}{\partial y_{i0}} \Delta y_i + \frac{\partial f(x_{i0}, y_{i0}, z_{i0})}{\partial z_{i0}} \Delta z_i \end{aligned} \quad (10)$$

Uporabimo samo člene prve stopnje popravkov približnih vrednosti koordinat.

Parcialni odvodi enačb (7) so (Stopar, 2015):

$$\begin{aligned}\frac{\partial f(x_{i0}, y_{i0}, z_{i0})}{\partial x_{i0}} &= \frac{X^j - x_{i0}}{\rho_{i0}^j} \\ \frac{\partial f(x_{i0}, y_{i0}, z_{i0})}{\partial y_{i0}} &= \frac{Y^j - y_{i0}}{\rho_{i0}^j} \\ \frac{\partial f(x_{i0}, y_{i0}, z_{i0})}{\partial z_{i0}} &= \frac{Z^j - z_{i0}}{\rho_{i0}^j}\end{aligned}\quad (11)$$

Parcialne odvode (11) vstavimo v enačbo (10), dobimo linearizirano obliko enačbe geometrijske razdalje satelit – sprejemnik (Stopar, 2015):

$$\rho_i^j = \rho_{i0}^j - \frac{X^j - x_{i0}}{\rho_{i0}^j} \Delta x_i - \frac{Y^j - y_{i0}}{\rho_{i0}^j} \Delta y_i - \frac{Z^j - z_{i0}}{\rho_{i0}^j} \Delta z_i - \dots \quad (12)$$

Enačbo (12) uporabimo kot osnovo za določitev položaja sprejemnika. Kot je omejeno zgoraj, sprejemnik dejansko zračuna svoj položaj na podlagi izmerjene psevdorazdalje (enačba (6)).

Ker gre za premikajoči se sprejemnik, potrebuje za določitev svojega položaja opazovanja vsaj štirih satelitov, saj mora določiti svoj položaj (tri neznanke) ter pogrešek teka svoje ure. Če enačbo (12) vstavimo v enačbo (6), dobimo enačbo opazovanj (oziroma psevdorazdalje) (Stopar, 2015):

$$P_i^j = \rho_{i0}^j - \frac{X^j - x_{i0}}{\rho_{i0}^j} \Delta x_i - \frac{Y^j - y_{i0}}{\rho_{i0}^j} \Delta y_i - \frac{Z^j - z_{i0}}{\rho_{i0}^j} \Delta z_i + c \Delta t_i \quad (13)$$

Iz zgornje enačbe lahko sestavimo enačbe popravkov opazovanj v obliki enačb popravkov $\mathbf{v} + \mathbf{B}\Delta = \mathbf{d} - \mathbf{l} = \mathbf{f}$. Tako dobimo (Stopar, 2015):

$$v_i^j + \frac{X^j - x_{i0}}{\rho_{i0}^j} \Delta x_i + \frac{Y^j - y_{i0}}{\rho_{i0}^j} \Delta y_i + \frac{Z^j - z_{i0}}{\rho_{i0}^j} \Delta z_i - c \Delta t_i = \rho_{i0}^j - P_i^j \quad (14)$$

Kjer je v_i^j je popravek opazovane psevdorazdalje. Iz enačb za izravnavo označimo še (Stopar, 2015):

$$f^j = d_i^j - l_i^j = \rho_{i0}^j - P_i^j \quad (15)$$

in

$$a_{xi}^j = \frac{X^j - x_{i0}}{\rho_{i0}^j}, a_{yi}^j = \frac{Y^j - y_{i0}}{\rho_{i0}^j} \text{ in } a_{zi}^j = \frac{Z^j - z_{i0}}{\rho_{i0}^j} \quad (16)$$

Za opazovanja štirih psevdorazdalj sestavimo naslednje enačbe popravkov (Stopar, 2015):

$$\begin{aligned}v_i^1 + a_{xi}^1 \Delta x_i + a_{yi}^1 \Delta y_i + a_{zi}^1 \Delta z_i - c \Delta t_i &= f^1 \\ v_i^2 + a_{xi}^2 \Delta x_i + a_{yi}^2 \Delta y_i + a_{zi}^2 \Delta z_i - c \Delta t_i &= f^2 \\ v_i^3 + a_{xi}^3 \Delta x_i + a_{yi}^3 \Delta y_i + a_{zi}^3 \Delta z_i - c \Delta t_i &= f^3\end{aligned}\quad (17)$$

$$v_i^4 + a_{xi}^4 \Delta x_i + a_{yi}^4 \Delta y_i + a_{zi}^4 \Delta z_i - c \Delta t_i = f^4$$

Tako je matrična rešitev problema dana z (Stopar, 2015):

$$\Delta = \begin{bmatrix} \Delta x_i \\ \Delta y_i \\ \Delta z_i \\ \Delta t_i \end{bmatrix} \quad \mathbf{B} = \begin{bmatrix} a_{xi}^1 & a_{yi}^1 & a_{zi}^1 & -c \\ a_{xi}^2 & a_{yi}^2 & a_{zi}^2 & -c \\ a_{xi}^3 & a_{yi}^3 & a_{zi}^3 & -c \\ a_{xi}^4 & a_{yi}^4 & a_{zi}^4 & -c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{X^1 - x_{i0}}{\rho_{i0}^1} & \frac{Y^1 - y_{i0}}{\rho_{i0}^1} & \frac{Z^1 - z_{i0}}{\rho_{i0}^1} & -c \\ \frac{X^2 - x_{i0}}{\rho_{i0}^2} & \frac{Y^2 - y_{i0}}{\rho_{i0}^2} & \frac{Z^2 - z_{i0}}{\rho_{i0}^2} & -c \\ \frac{X^3 - x_{i0}}{\rho_{i0}^3} & \frac{Y^3 - y_{i0}}{\rho_{i0}^3} & \frac{Z^3 - z_{i0}}{\rho_{i0}^3} & -c \\ \frac{X^4 - x_{i0}}{\rho_{i0}^4} & \frac{Y^4 - y_{i0}}{\rho_{i0}^4} & \frac{Z^4 - z_{i0}}{\rho_{i0}^4} & -c \end{bmatrix} \quad \mathbf{f} = \begin{bmatrix} \rho_{i0}^1 - P_i^1 \\ \rho_{i0}^2 - P_i^2 \\ \rho_{i0}^3 - P_i^3 \\ \rho_{i0}^4 - P_i^4 \end{bmatrix} \quad (18)$$

$$\mathbf{d} = \begin{bmatrix} \rho_{i0}^1 \\ \rho_{i0}^2 \\ \rho_{i0}^3 \\ \rho_{i0}^4 \end{bmatrix} \quad \mathbf{l} = \begin{bmatrix} P_i^1 \\ P_i^2 \\ P_i^3 \\ P_i^4 \end{bmatrix} \quad \mathbf{v} = \begin{bmatrix} v_i^1 \\ v_i^2 \\ v_i^3 \\ v_i^4 \end{bmatrix}$$

Če imamo opazovane samo 4 psevdorazdalje, vektor neznank Δ izračunamo tako, da rešimo sistem linearnih enačb (Stopar, 2015):

$$\mathbf{B}\Delta = \mathbf{d} - \mathbf{l} = \mathbf{f} \rightarrow \Delta = \mathbf{B}^{-1}\mathbf{f} \quad (19)$$

V primeru, ko imamo opazovane psevdorazdalje od več kot štirih satelitov, približne vrednosti neznank pridobimo z rešitvijo posredne izravnave (Stopar, 2015):

$$\mathbf{N} = \mathbf{B}^T \mathbf{P} \mathbf{B} \quad \mathbf{t} = \mathbf{B}^T \mathbf{P} \mathbf{f} \quad \Delta = \mathbf{N}^{-1} \mathbf{t} \quad (20)$$

Sprejemniki za določitev svojega položaja uporabljajo iterativni postopek. Na začetni točki sprejemnik določi svoj položaj. Koordinate, ki jih je določil na začetni točki oziroma v prvem trenutku (prvi epohi) uporabi kot približne koordinate na drugi točki oziroma v drugem trenutku (drugi epohi) in postopek iterativno ponavlja, dokler rešitev ne konvergira. Na tretji točki oziroma tretjem trenutku (tretji epohi) to ponovi s koordinatami druge točke, na četrti tretje in tako dalje.

Strogo geodetsko gledano gre v tem primeru za določanje absolutnega položaja na podlagi kodnih opazovanj. Položaj sprejemnika se določa v vnaprej določenih časovnih intervalih.

Vemo, da moramo za določitev položaja premikajočega se sprejemnika imeti na voljo opazovanja psevdorazdalj vsaj štirih satelitov. Nujno je, da so sateliti, ki jih imamo na voljo čim bolj geometrijsko razporejeni, saj njihova razporeditev močno vpliva na kakovost določitve koordinat.

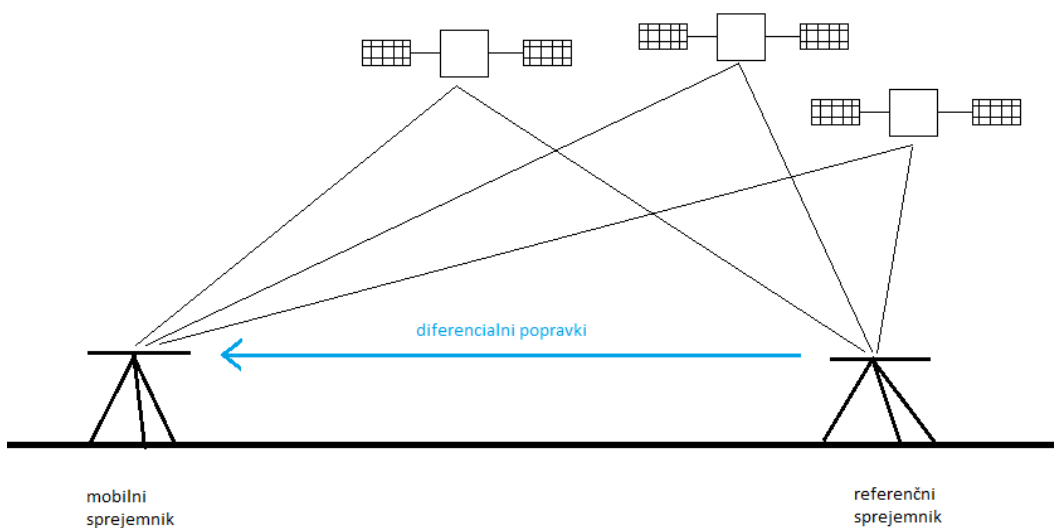
3.2 Diferencialni GNSS (DGNSS)

Ker gre pri GBAS in SBAS sistemih za uporabo DGNSS, predstavljamo še osnove tega principa določitve položaja v GNSS. DGNSS se uporablja tudi v letalstvu, in sicer pri pristajanju s pomočjo navigacije GNSS.

DGNSS se v navigaciji uporablja zaradi povečanja natančnosti in zanesljivosti določitve položaja mobilnega sprejemnika. Pomembno je, da se referenčni in mobilni sprejemnik nahajata čim bližje, saj tako na satelitski signal s satelitov delujejo podobni vplivi, natančnost določitve položaja mobilnega sprejemnika pa se tako lahko poveča (Stopar, 2015).

Pri DGNSS se določa absolutni položaj uporabnikovega sprejemnika enako kot pri GBAS sistemu. Na referenčnem sprejemniku se po enakem principu izračunajo diferencialni popravki, ki jih na to preko brezžične povezave pošlje do mobilnega sprejemnika. Ta lahko tako izračuna svoje koordinate bolj točno (Stopar, 2015).

V primerih, ki ne zahtevajo visoke natančnosti, se uporabijo kodna opazovanja. Natančnost določitve položaja uporabnikovega sprejemnika je tako med pol in enim metrom. Če je zahtevana višja natančnost, se uporabijo fazna opazovanja. Na Sliki 9 vidimo princip delovanja DGNSS.



Slika 9: princip DGNSS

V nadaljevanju sledijo osnovne enačbe DGNSS, ki jih predstavljajo enačbe za izračun popravkov psevdorazdalje (PRC, angl. pseudorange correction), časovne spremembe popravkov psevdorazdalj (RRC, angl. Range Rate Correction) in popravki psevdorazdalj, ki jih uporabi mobilni sprejemnik.

Na referenčnem sprejemniku se računa (Stopar, 2015) :

- popravek psevdorazdalje (PRC):

$$PRC^j(t_0) = \rho_A^j(t_0) - R_A^j(t_0) \quad (21)$$

- časovne spremembe popravkov psevdorazdalj RRC:

$$RRC_A^j(t_0) = \frac{PRC_A^j(t) - PRC_A^j(t_0)}{t - t_0} \quad (22)$$

$$PRC^j(t) = PRC^j(t_0) + RRC^j(t_0)(t - t_0) \quad (23)$$

- popravki psevdorazdalj, ki jih uporabi mobilni sprejemnik:

$$R_B^j(t)_{corr} = R_B^j(t) + PRC^j(t) \quad (24)$$

Mobilnemu sprejemniku se posredujejo popravki psevdorazdalj $R_B^j(t)_{corr}$. Ti popravki predstavljajo odstranjene oziroma zmanjšane vplive na opazovanja, ki so določeni za lokacijo referenčnega sprejemnika. Nekaterih vplivov se iz popravkov PRC ne more odstraniti. Ker so popravki PRC izračunani za lokacijo referenčne postaje GNSS, so v PRC prisotni vplivi na opazovanja na lokaciji mobilnega sprejemnika (vplivi ionosfere, troposfere ter tirnic satelitov) ter pogrešek ure referenčnega sprejemnika (Stopar, 2015).

4 NAVIGACIJA

V tem poglavju opisujemo začetke in osnovne metode navigacije, razložimo osnovne pojme v navigaciji ter opišemo osnovne naloge v navigaciji.

Že od časov začetka človeške civilizacije je ljudi zanimalo kje so in kako lahko najlažje pridejo do svojega cilja. Tako so razvili nize praks, instrumentov in opravil, ki so jih iz začetne točke privedli na ciljno točko (Prasad in Ruggieri, 2005).

Tem nizom opravil lahko rečemo navigacija. Gre torej za proces, ki ga nek subjekt izvaja, ker ga/jo zanima kje se nahaja v vsakem časovnem trenutku, ter kako lahko pride s svojega trenutnega položaja na želeni cilj (Prasad in Ruggieri, 2005).

Navigacija na kopnem se je tisočletja izvajala s pomočjo kart, človeškega dojemanja okolja ter značilnosti določenega okolja. Prvi instrumenti in pripomočki so bili razviti za bolj varno plovbo po morju. Tako so približno 2000 let pr.n.št. razvili svetilnike, morjeplovci pa so si pomagali tudi s posebnimi instrumenti, ki so za določitev položaja uporabljali astronomske metode. Takšen način določitve položaja ni bil najbolj točen. Smer potovanja so določali s pomočjo opazovanja nebesnih teles, kasneje tudi s pomočjo kompasa, prepotovano razdaljo pa s pomočjo ocenjene hitrosti premikanja plovila. Poleg tega so se naslanjali tudi na metodo, pri kateri se uporabijo znani podatki o lokaciji ter podatki o smeri in hitrosti premikanja (ang. »dead reckoning«). Ta metoda je predhodnica danes uporabljenih inercialnih navigacijskih sistemov (Prasad in Ruggieri, 2005).

Največja težava pri določitvi položaja je bila določitev geografske dolžine, saj je določitev te povezana z določitvijo časa, ki mora biti dovolj točna. Pri GNSS navigaciji je ta problem rešen z uporabo atomskih ur, ki zagotavljajo dolgoročno točnost in stabilnost podatka o času.

Osnovni princip GNSS navigacije izhaja iz koncepta znanih referenčnih točk. Podobno kot pri »klasičnih« astronomskih metodah, kjer je znan položaj referenčnih točk in se položaj nove točke določa s pomočjo triangulacije, GNSS navigacija uporabi znane položaje referenčnih točk (t.j. satelitov) in določi položaj stojišča (sprejemnika) s pomočjo trilateracije (Prasad in Ruggieri, 2005).

V osnovi poznamo pet vrst navigacije (Grewal, Weill, Andrews, 2007):

1. Pilotaža (angl. Pilotage) - metoda, ki sloni na prepoznavanju okolja in oblik/objektov, značilnih za okolje, v katerem se nahajamo
2. Sešteta pozicija (angl. dead reckoning) - metoda, ki temelji na tem, da vemo, kje smo začeli potovanje ter imamo informacije o smeri ter hitrosti gibanja
3. Astronomska navigacija- metoda, pri kateri uporabimo čas in kote med navpičnico na stojišču in znanimi nebesnimi objekti (sonce, luna, zvezde), za to da ocenimo geografsko širino, geografsko dolžino in smer, v katero se gibljemo
4. Radijska navigacija - metoda, ki s pomočjo izvorov radijskega valovanja, ki imajo znan položaj v prostoru ter izmerjenih razdalj do/ od teh izvorov, določa položaje ostalih objektov; sem prištevamo tudi GNSS navigacijo
5. Inercialna navigacija - metoda, ki temelji na poznavanju začetnega položaja objekta, ki omogoča določitev novega položaja objekta na osnovi določitve spremembe položaja. Pri inercialni navigaciji se merijo vrednosti pospeškov ter smeri premikanja ter nato z integracijo

izmerjenih pospeškov po času ter izmerjenih smeri premikanja lahko določimo spremembo položaja.

4.1 Osnovni pojmi v navigaciji

V tem poglavju so opisani splošni pojmi v navigaciji ter GNSS navigaciji, v poglavju 5.1 pa pojmi, ki so v uporabi v letalski navigaciji.

Z razvojem navigacije in navigacijskih instrumentov se je razvila določena terminologija, ki je v vseh področjih navigacije podobno.

Pot (angl. route): prej definirana smer in razdalja potovanja od ene do druge točke. Pri nas pogovorno t.i. »ruta«, prevajali bi lahko kot pot (Opencpn, 2016).

Točke na poti (angl. waypoint): točka, na kateri objekt/ plovilo spremeni svojo smer. Te točke so določene z lokacijami točk z določenimi koordinatami (geografska širina in dolžina). Konkretnega prevoda pri nas za to ni, vendar bi lahko prevajali kot točke na poti (Opencpn, 2016).

Kurz (angl. course): smer ki jo kaže kompas v kateri se plovilo giblje. Pri nas se uporablja beseda kurz ali pa smer (Opencpn, 2016).

Sešteta pozicija (angl. dead reckoning oziroma ded reackoning): proces določanja položaja na osnovi ocenjenih smeri in hitrosti premikanja. Lahko gre tudi za predvidevanje položaja s pomočjo ekstrapolacije ocenjene smeri gibanja plovila in hitrosti iz točke z znanim položajem (Opencpn, 2016). Konkretnega prevoda v slovenskem jeziku ni.

Smer (angl. heading): smer, ki jo kaže kompas, v katero je plovilo usmerjeno (Opencpn, 2016). V navigaciji v letalstvu in pomorski navigaciji se »heading« razlikuje od »course« zaradi vplivov vetrov in vodnih tokov. V slovenščini se spet prevaja kot usmerjenost, kurz ali smer, vendar ne pomeni isto kot »course«.

Azimut (angl. azimuth): smer proti točki, glede na meridijan na zemeljskem horizontu. Meri se ga v smeri urinega kazalca v stopinjah (Garmin, 2016). Angleška sopomenka za »azimuth« je »bearing«.

Navigacijsko sporočilo (angl. navigation message): je del vsebine signala, ki ga oddajajo navigacijski sateliti. Vsebuje podatke o sistemskem času, popravkih teka satelitove ure, efemeridah satelita, ionosferskih vplivih in stanju satelita (če je satelit uporaben ali ne) ter tudi sistema kot takega (Garmin, 2016).

Pseudorazdalja (angl. pseudorange): geometrijska razdalja satelit – sprejemnik, ki je določena na osnovi časa potovanja signala med satelitom in sprejemnikom, ki je izmerjen z dvema urama. To pomeni, da moramo izmerjenemu času prišteti popravek sprejemnikove ure.

Nadzor sprejemnikove zanesljivosti (angl. Receiver Autonomous Integrity Monitoring oziroma RAIM): algoritem v sprejemniku, ki preverja zanesljivost določanja položaja, za to pa uporablja meritve razdalj od petih ali več navigacijskih satelitov ali štirih satelitov in podatka o višini, pridobljeni s pomočjo barometra (v primeru GNSS navigacije v letalstvu) (FAA, 2016a).

Zahtevana zanesljivost navigacije (angl. Required navigation performance oziroma RNP): zagotovi, da je rezultat navigacije 95 odstotno pravilen oziroma da je znotraj postavljenih meja; če to ni, sistem o tem opozori pilota oziroma uporabnika sistema (FAA, 2016a).

Poleg teh pojmov moramo poznati tudi tiste, ki so značilni za letalsko navigacijo. Ti so opisani v poglavju o letalski navigaciji.

4.2 Osnovne naloge navigacije

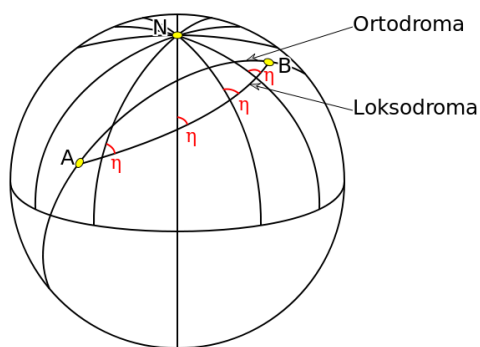
Večina nas ob besedi navigacija pomisli na določanje svojega trenutnega položaja. Vendar navigacija ni samo to. Gre tudi za določanje dolžine prepotovane poti, smeri potovanja, časa, ki ga bomo za pot porabili ter tudi določanje odstopanj od predvidene smeri ter neprekinjeno izračunavanje razdalje do cilja.

Navigacija se lahko izvaja po dveh nam dobro znanih krivuljah: ortodromi in loksodromi. Za navigacijo lahko uporabimo ortodromo in loksodromo na krogli, saj s tem ne naredimo prevelike napake v dolžini, smeri in položaju (krogla je prvi približek oblike Zemlje) (Fras, 2012). Za potrebe navigacije se v praksi uporabljata ortodroma in loksodroma na krogli s polmerom $R = 6370$ km (Švetak, 2016).

Ortodroma je najkrajša razdalja med dvema točkama na krogli. Je manjši del velikega krogelnega kroga, ki poteka skozi ti dve točki (Kuhar, 2015). Krogelni krog je ravninska krivulja, za to je računanje lažje kot če uporabimo ortodromo na elipsoidu (Stopar, 2014). Slabost navigacije po ortodromi je, da mora plovilo, ki potuje po tej krivulji na vnaprej izbranih točkah popravljati smer potovanja, da na koncu prispe na cilj (Kuhar, 2015).

Loksodroma je krivulja, ki poteka po krogli in na celotni svoji dolžini poteka pod istim azimutom. Prednost potovanja po loksodromi je, da ni potrebno spreminjanje oziroma popravljanje smeri. Slabost potovanja po loksodromi je to, da ne predstavlja najkrajše poti med dvema točkama na krogli (Kuhar, 2015).

Pri navigaciji si lahko z ortodromo pomagamo tudi tako, da z njeno pomočjo izračunamo dolžino in smer do končne točke, če imamo podano začetno točko. Omogoča nam tudi izračun dolžine in smeri potovanja, če imamo podane koordinate začetne in končne točke. Rešitev prvega problema je t.i. 1. geodetska naloga na krogli, rešitev drugega pa t.i. 2. geodetska naloga na krogli (Kuhar, 2015). Na Sliki 10 vidimo razlike med obema krivuljama.



Slika 10: ortodroma in loksodroma na krogli (Wikipedia, 2016).

Za primerjavo obeh krivulj smo izračunali pot po ortodromi in loksodromi med izbranimi točkama (t.j. letališče Edvarda Rusjana Maribor in letališče Gibraltar) s pomočjo dveh programov, ki sem jih napisala s pomočjo enačb iz Kuhar, 2015.

V preglednici 1 so prikazane koordinate vseh točk.

Preglednica 1: koordinate točk

Točka	φ	λ
Maribor	46° 28' 41.59" N	15° 41' 1.83" E
Gibraltar	36° 9' 7.73" N	5° 20' 45.65" W
Točka na poti	Izračuna se glede na izbrano λ	7° 5' 36.25" E

Preglednica 2: azimut in dolžina loksodrome

Loksodroma	
Azimut	Dolžina
236° 44' 4,98"	2093,269 km

Preglednica 3: azimut smer in dolžina ortodrome ter koordinate točke poprave smeri plovila

Ortodroma	
Azimut	Dolžina
244° 10' 17,52"	2088,064 km
Koordinate točke poprave smeri	
φ	λ
43° 06' 42,95" N	7° 5' 36.25" E

Iz preglednic 2 in 3 vidimo, kako različen je potek in dolžina obeh krivulj že na relativno majhni razdalji. Razlika v začetni smeri znaša 7° 26' 12,52", razlika v dolžini pa 5,205 km.

Na daljši potovanjih se za izračun poti uporablja loksodroma, saj ni potrebno določati točk, na katerih bi popravljali smer plovila. Če plovilo potuje po ortodromi, mora na vnaprej določenih točkah popravljati smer (ortodroma ne seka vseh meridianov pod istim kotom). Pri daljših potovanjih število teh točk narašča, med njimi pa ima plovilo konstantno smer (potuje po loksodromi).

5 UPORABA GNSS-NAVIGACIJE V LETALSTVU

V tem poglavju opisujemo osnovne pojme v letalski navigaciji, navigacijo med letom ter GNSS/GPS sisteme za prihod na letališče, pristajanje in vzletanje zračnih plovil. Dodan je tudi primer iz prakse.

Glavna značilnost letalske navigacije je, da so v vsakem trenutku potrebni točni in natančni podatki na poti. Vse skupaj še oteži dejstvo, da se plovilo premika z veliko hitrostjo. V preteklosti so problem navigacije med samo potjo reševali z uporabo za to izšolanih ljudi (navigatorjev), z razvojem GNSS-ja pa so se pojavile ideje o uporabi slednjega. Problem navigacije med prihodom na letališče, vzletanjem in pristajanjem so od iznajdbe radarja dalje reševali z njim, danes pa se uporabljajo njegovi »nasledniki« - delujejo na podobnem principu, vendar dosti bolj sofisticirano. Poleg v prejšnjem stavku omenjenih instrumentov se za prihod, vzletanje in pristajanje uporablja tako imenovani »GNSS landing system«. Gre za uporabo podobnih procedur kot pri »klasičnem« pristajanju, vendar omogoča bolj tekoč promet na letališču (več možnosti za čakanje letal v zraku, več možnosti prihoda in pristanka ipd.) (Austrocontrol, osebna komunikacija, 2016).

5.1 Letalska navigacija – osnovni pojmi

Če hočemo razumeti področje navigacije v letalstvu, moramo poznati določene pojme. V nadaljevanju so opisani nekateri pojmi, ki so značilni za letalsko navigacijo. Dosti izrazov je angleških in se jih ne prevaja, saj bi s tem povzročili večjo zmedo in posledično lahko ogrozili varnost.

Osnova za navigacijo v letalstvu so podatki o položaju in hitrosti, ki so pridobljeni s pomočjo različnih instrumentov. Trenutno »stanje« plovila je definirano s tridimenzionalnim položajem (geografska širina, geografska dolžina in višina leta), hitrostjo, hitrostjo spremembe višine (angl. altitude rate), odklikom od planirane smeri (angl. track angle), kotom odklika (angl. drift angle), ki je odvisen od vpliva vetra, podatki o vetru (smer, moč), časom in podatki o pričakovani negotovosti položaja (Walter, 2001).

Planiranje leta je narejeno na podlagi podatkov, ki jih sistem za planiranje leta pridobi iz posebne baze. Sistem te podatke poveže in pilotu omogoči njihovo uporabo. Gre za podatke o letališču, s katerega se vzleta (podatki o vzletno-pristajalni stezi in standardnih instrumentalnih odhodnih procedurah), točkah na poti in zračnih poteh ter standardnih instrumentalnih prihodnih procedurah na izbrano letališče. Izdelata se tudi prečni in višinski profil leta (Walter, 2001). Zaradi zagotavljanja varnosti v letalskem prometu so uvedene standardne procedure instrumentalnega prileta in odleta na letališče, ki so odvisne od opremljenosti letališč z navigacijskimi sredstvi (Kontrola zračnega prometa Slovenije, osebna komunikacija, 2016).

Eden izmed osnovnih pojmov v letalski navigaciji je t.i. »Area navigation (RNAV)«. Gre za metodo navigacije s pomočjo navigacijskih pripomočkov (angl. navigational aids oziroma NAV AIDS), ki so lahko locirani na tleh ali v vesolju (sateliti). Deluje znotraj omejitev navigacijskih instrumentov (radijski doseg, radijska senca za hribom ipd.), ki so vgrajen v plovilo (FAA, 2016a). V slovenskem jeziku termina za to ni, vendar bi lahko to prevajali kot področno navigacijo.

Ena izmed funkcij RNAV je tudi t.i. vodenje letala z lastnostmi naprave za določanje smeri pristajanja (angl. localizer) z dodanim višinskim vodenjem (angl. Localizer Performance with Vertical guidance oziroma LPV). Ta funkcija zahteva uporabo SBAS sistema, uporablja pa tudi podatke končnega dela pristajanja. Iz podatkov izračuna in prikaže horizontalno in odobreno višinsko navigacijo za prihod na letališče. Pri tej funkciji je natančnost podobna kot pri procedurah I. kategorije z instrumentalnim sistemom za pristajanje. Podobno kot instrumentalni sistem za pristajanje ima ta funkcija višinsko in položajno vodenje in »pripelje« pilota (plovilo) do višine odločanja ter omogoča kotno vodenje (pristajalna ravnina pri instrumentalnem sistemu za pristajanje). (FAA, 2016a).

Poleg zgoraj omenjene področne navigacije je v višinskem smislu pomembno tudi barometrično merjenje višine (angl. Barometric Aiding oziroma Baro-Aiding). To je metoda, ki »pomaga« oziroma izboljšuje GNSS določitev koordinat v višinskem smislu s pomočjo barometričnega višinomerja (FAA, 2016a).

V povezavi z višino lahko omenimo še en pojem, ki je v letalski navigaciji zelo pomemben: višina odločanja (angl. decision altitude oziroma DA). To je višina nad srednjim nivojem morja, na kateri se mora pilot odločiti, ali bo pristal ali pa ne (t.i. zgrešen pristonek - »missed approach«) . Glede na višino odločanja se določa tip procedure prihoda in pristanka (FAA, 2016a).

Za dobro razumevanje letalske navigacije moramo poznati tudi »tradicionalne« navigacijske sisteme na letališčih.

Instrumentalni sistem za pristajanje (angl. Instrumental Landing System oziroma ILS): je instrumentalni sistem za pristajanje, ki je sestavljen iz štirih naprav: »localizer«-ja (določi smer plovila glede na os steze), dveh označevalcev (»marker«; pilotu povesta na kakšni oddaljenosti od začetka steze je) in naprave, ki določi kot pristajanja plovila (angl. glide path oziroma pristajalna ravnina). Zaradi različnih zahtev so sistemi razvrščeni v več kategorij (kategorija I oziroma CAT I, kategorija II oziroma CAT II in kategorija IIIa/b/c oziroma CAT III a/b/c) (Kontrola zračnega prometa Slovenije, osebna komunikacija, 2016).

Neusmerjen radijski oddajnik (angl. Non-Direction Beacon oziroma NDB): t.i. vse smerni radijski oddajnik in deluje v paru z radijskim kompasom, ki ga ima plovilo na krovu. Plovilo tako pripelje na želeno točko v zraku (Kontrola zračnega prometa Slovenije, osebna komunikacija, 2016).

Radijski svetilnik (angl. Very high frequency Omni-directional Range oziroma VOR): deluje na principu svetilnika na morju, vendar namesto svetlobe oddaja radijske valove. Plovilo svoj položaj določi tako, da meri čas od trenutka ko je oddajnik usmerjen proti magnetnemu severu do trenutka, ko ga »zadane« s snopom. Na podlagi tega in znane obodne hitrosti lahko določi smer, pod katero je obrnjen proti oddajniku (Kontrola zračnega prometa Slovenije, osebna komunikacija, 2016).

Merilnik razdalje (angl. Distance Measuring Equipment oziroma DME): je naprava za merjenje razdalje od letala do naprave. Uporablja se v povezavi z VOR ali ILS, kjer nadomesti vse označevalce (Kontrola zračnega prometa Slovenije, osebna komunikacija, 2016).

S poznavanjem teh pojmov pridobimo osnovni vpogled v letalsko navigacijo ter njeno večplastnost in zahtevnost.

5.2 Navigacija med letom – integracija INS in GNSS

Med letom plovila se pri GNSS navigaciji pojavi »problem« slabše določenega položaja – od pol metra pa do nekaj metrov. Težave bi nastopile tudi, če bi na primer sateliti prenehali delovati, če bila prisotna motnja S/A ali bi se pojavile motnje. Kot rešitev se uporabi integracija inercialne navigacije in GNSS navigacije. Tako se zagotovi višja natančnost, imunost na motnje in tudi rešitev za primer, če bi sateliti nehali delovati – inercialna enota lahko nek čas deluje tudi samostojno, ne da bi bila napaka določitve položaja prevelika. Slednje je tudi glavni problem inercialne navigacije – z daljšanjem časa uporabe inercialne navigacije se večja tudi napaka položaja t.i. »IMU drift« (t.j. sistematična napaka inercialnega sistema v daljšem času opazovanj) (Phillips, Schmidt, 2010).

Tehnologije povezave GNSS in inercialne navigacije so različnih vrst – vse od šibko povezanih (»loosely coupled«) pa do čvrsto povezanih (»Tightly coupled«). Stopnja povezanosti je odvisna od stopnje odvisnosti rešitev enega in drugega sistema ter fizične (ne) odvisnosti sistemov (Phillips, Schmidt, 2010).

5.3 GNSS/ GPS-sistem za pristajanje (GNSS/ GPS-landing system)

V tem podglavju predstavljamo osnovni princip GNSS sistema za pristajanje, njegovo uporabo ter primer iz prakse.

»GNSS landing system« (v nadaljevanju GLS) je sistem, ki omogoča varno pristajanje brez uporabe klasičnih instrumentov za pristajanje. Kot že ime pove, računanje vzletnih in pristajalnih poti ter vseh potrebnih podatkov uporablja GNSS.

Sistem mora zadovoljiti naslednje zahteve (Petrovska, Rechkoska Shikoska, 2013):

- točnost (»accuracy«): mora biti dovolj visoka, da omogoča varen in pravilen pristanek,
- celovitost (»integrity«): pravočasno so izdana opozorila kdaj/ ko GLS ne bo/ ni na voljo za pristajanje,
- kontinuiteta (»continuity«): verjetnost, da sistem zagotavlja zahtevano natančnost in celovitost in
- dostopnost (»availability«): časovni interval, ko sistem zagotavlja zahtevano natančnost, celovitost in kontinuiteto

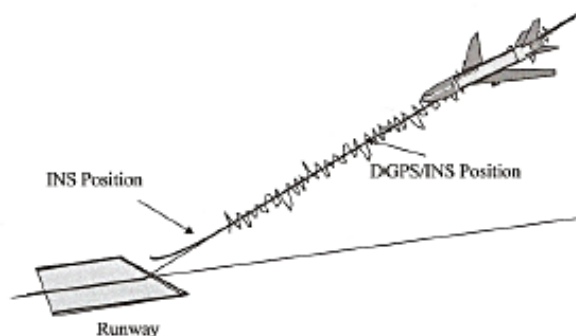
5.3.1 Osnovni princip GLS

Osnovni princip GLS je uporaba diferencialnega GNSS v različnih oblikah. V funkciji referenčnega sprejemnika se lahko uporabi GBAS postaja ali SBAS satelit.

Vemo, da za določitev položaja premikajočega se sprejemnika (t.i. roverja pri DGNS) potrebujemo opazovanja do vsaj štirih satelitov. Pri uporabi DGNS potrebujemo še podatke o lokaciji referenčne točke in diferencialnih popravkih. Napake pri DGNS se lahko pojavijo zaradi slabše geometrijske razporeditve satelitov, netočnosti pri modelu ionsferskih in troposferskih vplivov ter šuma pri izmeri psevdorazdalj. Ker pri uporabi navigacije s pomočjo GNSS ni integracije po času, se s podaljševanjem časa uporabe napaka v položaju ne povečuje. Napako v položaju sicer »vidimo« kot šum v kratkem

časovnem obdobju, vendar določitev poti (položaja) s časom ne odstopa od prave tako kot pri INS (Petrovska, Rechkoska Shikoska, 2013).

V letalstvu je v praktični uporabi integracija INS z (D)GNSS. Položaj (pri pristajanju je pomembna predvsem višina) se v kombinaciji obeh konceptov lahko določi zelo natančno in točno. Zaradi prisotnosti napak in pogreškov se mora v izračun vključiti model napak, ki so prisotne pri obeh (Petrovska, Rechkoska Shikoska, 2013). Shematski prikaz »točnosti« združene navigacije se nahaja na Sliki 11.



Slika 11: integracija DGPS in INS pri GLS (Petrovska, Rechkoska Shikoska 2013).

Za določitev položaja med prihodom na letališče, pristajanjem in vzletanjem se uporabi INS/GPS sistem, ki je na krovu letala. Ta poleg opazovanj do satelitov in podatkov iz INS enote uporabi še podatke o začetni točki in podatke DGNSS. Položaj sprejemnika je na tak način določen dovolj natančno, da zadosti postavljenim kriterijem.

5.3.2 Uporaba GLS

GNSS – sistem za pristajanje se v praksi uporabi tako, da se na določeni oddaljenosti od letališča vzpostavi GBAS postaja, ki plovilom zagotavlja potrebne podatke. Ko se plovilo približuje letališču in ima namen tam pristati (ali pa od tam vzleta), mu GBAS postaja posreduje diferencialne popravke in izračuna vse možne poti pristajanja (vzletanja) in tudi možne variante, ko letalo namesto, da bi pristalo, odleti mimo letališča (neuspeli pristane) (Ackland, Imrich, Murphy, 2003).

GNSS – sistem za pristajanje se od klasičnih načinov pristajanja razlikuje po tem, da (kot je omenjeno v prejšnjem odstavku) izračuna možne variante končnega prihoda na letališče (»final approach paths«), naklone pristajalne ravnine (kot pristajanja letala) ter tudi variante zgrešenih pristankov (Ackland, Imrich, Murphy, 2003).

Za primerjavo: klasični instrumentalni sistem za pristajanje določi položaj plovila glede na os steze in določi naklonsko ravnino (kot pristajanja; naj bi bil 3°), ne pa tudi vseh možnih prihodov in pristankov. Poleg samega instrumentalnega sistema za pristajanje sta poleg vzletno-pristajalne steze tudi (vsaj) dva označevalca (»markerja«), ki določita oddaljenost do vzletno pristajalne steze. Postavljena sta predvsem za to, da pilot ve, koliko je oddaljen od steze (točka dotika). Namesto označevalcev je lahko postavljen tudi merilnik razdalje, ki konstantno meri razdaljo do točke dotika

(točke na stezi, kjer se letalo dotakne tal) (Kontrola zračnega prometa Slovenije, osebna komunikacija, 2016).

Za vsak prihod na letališče je rezerviran enolični identifikator – tako za končni prihod, kot za pristajalno ravnino in zgrešene prihode. Uporabniški vmesnik GNSS – sistem za pristajanje je podoben uporabniškemu vmesniku za klasično pristajanje z instrumentalnim sistemom za pristajanje. Vzrok temu je manj izobraževanja pilotov (in ostalega kabinskega osebja) ter tudi krajši čas prilagajanja (Ackland, Imrich, Murphy, 2003).

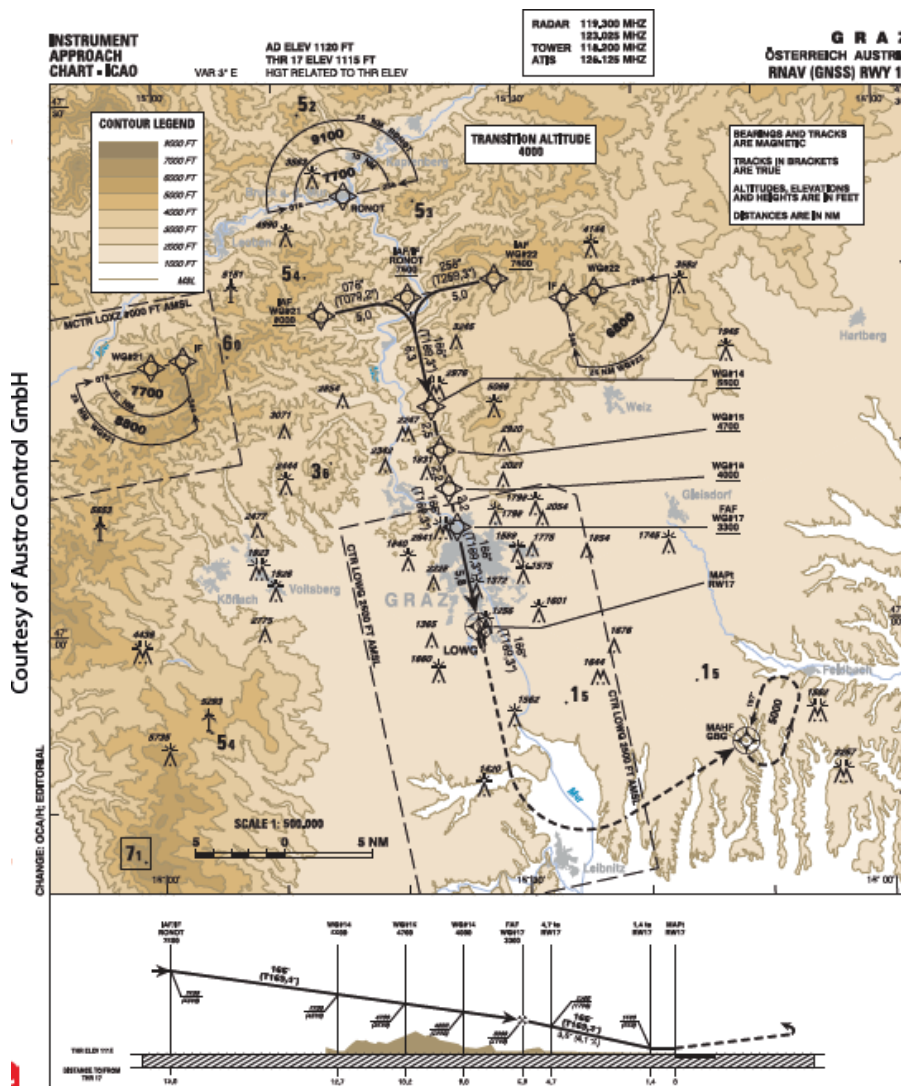
GNSS – sistem za pristajanje se lahko uporablja kot za pristajanje v I. kategoriji instrumentalnega sistema za pristajanje. To pomeni, da se ga uporablja za procedure, pri katerih je najnižja višina, na kateri se lahko pilot odloči ali bo pristal ali ne, 200 čevljev (61 metrov) (Ackland, Imrich, Murphy, 2003).

5.3.3 Primer iz prakse

V Sloveniji še ni letališča, ki bi imelo v uporabi GLS. To bi se naj v kratkem spremenilo, saj imajo za letališče Jožeta Pučnika to načrtovano že od leta 2013.

Nam najbližje letališče z vzpostavljenim GNSS-sistemom za pristajanje je v avstrijskem Gradcu. Tam sem obiskala inženirje, ki skrbijo za ustrezno delovanje navigacijske opreme na letališču. Razložili so mi, da nimajo GBAS sistema, ker je predrag. Določeno imajo točko v prostoru, glede na katero se določajo procedure, ki so namenjene prihodu na letališče, vzletanju in pristajanju. Točka ima zelo natančno določen položaj, v postopku kalibracije pa so na njo »umerili« procedure za približevanje letališču, vzletanje in pristajanje. Danes se pri teh procedurah za vsak let posebej določijo popravki s pomočjo EGNOS-a. Procedure, ki pri doseganju zahtevanih natančnosti uporabljajo diferencialne popravke EGNOS-a, zadostijo zahtevam I. kategorije ILS. Pri tej kategoriji je višina odločanja 60 metrov, vidljivost pa okrog 930 metrov. Takšne procedure so poimenovane »LPV RNAV (GNSS)« procedure. Poleg GNSS-sistema za pristajanje imajo v uporabi tudi še ostale navigacijske instrumente in procedure (Austrocontrol, osebna komunikacija, 2016). Na Sliki 12 vidimo standardni grafični prikaz GLS procedure na Graškem letališču.

GLS prihod in pristanek sta vedno bolj v uporabi po vsem svetu. GLS, ki uporablja popravke SBAS sistemov, je v uporabi pri prihodih, enakih I. kategoriji ILS. Tisti GLS sistemi, ki za izračun popravkov uporabljajo GBAS postajo, so primerni tudi za prihode, ki zahtevajo nižjo višino odločanja.



Slika 12: GLS procedura na Graškem letališču (Charts VACC Austria, 2016).

GNSS-sistemi za pristajanje bodo v prihodnosti vedno več v uporabi, saj so klasični navigacijski sistemi dražji in zahtevnejši za vzdrževanje. Ob uporabi GNSS-sistemov za pristajanje (in satelitske navigacije) se moramo zavedati, da določitev položaja na osnovi GNSS-navigacije ni absolutna ter da mora obstajati »rezervni načrt« v primeru, če sisteme ugasnejo oziroma je onemogočena njihova uporaba.

6 ZAKLJUČEK

V diplomski nalogi smo predstavili sisteme, ki jih uporabljamo pri satelitski navigaciji ter teoretično osnovo določanja položaja sprejemnika na podlagi kodnih opazovanj. Opisani algoritem za določitev položaja, je najenostavnejši algoritem, saj obravnava samo določanje položaja, smeri, hitrosti in ostalega, kar potrebujemo v navigaciji, pa ne. Pri opisu predstavljenih navigacijskih sistemov gre za opise splošnih karakteristik sistemov, njihove uporabe ter tudi njihove zgodovine oziroma vzrokov, ki so botrovali njihovem nastanku.

Tematika, ki jo predstavljamo v drugem delu, je danes zelo aktualna, saj se vedno bolj opuščajo klasični letalski navigacijski sistemi, nadomeščajo pa jih GNSS-sistemi za pristajanje. Slednji so cenejši, potrebnega je tudi manj vzdrževanja. Prihod in pristanek, ki sta izvedena na podlagi GNSS-sistema za pristajanje se uporabljata pri kategoriji »CAT I«, kjer je višina odločanja približno 60 metrov.

Cilj, ki sem si ga zadala pred začetkom pisanja diplomske naloge, je bil čim bolj spoznati samo GNSS-navigacijo in njeno uporabo v letalstvu. Med pisanjem sem ugotovila, da se ukvarjam s tematiko, ki je zelo kompleksna in globalno pomembna. Če bi hotela raziskati kaj več, bi za to potrebovala neprimerno več časa in popisanih strani.

VIRI

Ackland, J., Imrich, T., Murphy, T. 2003. Global Navigation Satellite System Landing System. Združene države Amerike, Boeing Inc.: loč. pag.

http://www.boeing.com/commercial/aeromagazine/aero_21/gnss.pdf (Pridobljeno 24. 2.2 016).

Austrocontrol. Razlaga delovanja GLS. Osebna komunikacija. 2016. (februar 2016)

Charts VACC Austria. RNAV approach chart. 2016.

http://charts.vacc-austria.org/LOWG/LOWG_Approach_RNAV%20GNSS%2017_03032016.pdf

(Pridobljeno 5.5.2016.)

EGNOS portal. 2016a. Discover EGNOS.

<http://www.egnoss-portal.eu/discover-egnoss/programme-information/status> (Pridobljeno 28.4.2016).

EGNOS portal. 2016b. EGNOS information status.

<http://www.egnoss-portal.eu/discover-egnoss/programme-information/status> (Pridobljeno 2.5.2016).

EGNOS. 2016c. SBAS.

<http://www.egnoss-portal.eu/discover-egnoss/about-egnoss/what-sbas> (Pridobljeno 24.4.2016).

ESA. 2016a. GALILEO.

http://www.esa.int/Our_Activities/Navigation/The_future_-_Galileo/First_results (Pridobljeno 28.4.2016).

ESA. 2016b. GALILEO constellation.

http://www.esa.int/spaceinimages/Images/2014/07/30-satellite_Galileo_constellation (Pridobljeno 1.6.2016).

FAA. 2016a. Advisory Circular 90 – 107.

http://www.faa.gov/documentLibrary/media/Advisory_Circular/AC%2090-107.pdf (Pridobljeno: 5.5.2016).

FAA. 2016b. LAAS.

http://www.faa.gov/about/office_org/headquarters_offices/ato/service_units/techops/navservices/gnss/laas/ (Pridobljeno 30.4. 2016).

FAA. 2016c. LAAS architecture.

http://www.faa.gov/about/office_org/headquarters_offices/ato/service_units/techops/navservices/gnss/laas/view/dspLAAS_Architecture.cfm (Pridobljeno 14.5.2016).

FAA. 2016d. LAAS – how it works.

http://www.faa.gov/about/office_org/headquarters_offices/ato/service_units/techops/navservices/gnss/laas/howitworks/ (Pridobljeno 30.4.2016).

FAA. 2016e. WAAS LPV.

http://www.nstb.tc.faa.gov/24Hr_WaasLPV.htm (Pridobljeno 2.5.2016).

FAA. 2016f. WAAS satellite status.

http://www.nstb.tc.faa.gov/rt_waassatellitestatus.htm (Pridobljeno 28.4.2016.)

Fras, M. 2012. Študija ortodrome in loksodrome na krogli, elipsoidu ter v kartografskih projekcijah. Diplomaska naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo (samozaložba M. Fras.): loč. pag.

Garmin. 2016. Osnovni pojmi v GNSS navigaciji.

<https://www8.garmin.com/aboutGPS/glossary.html> (Pridobljeno 16.5.2016).

GLONASS. 2016a. GLONASS.

<https://www.glonass-iac.ru/en/GLONASS/index.php> (Pridobljeno 3.4.2016).

GLONASS. 2016b. GLONASS constellation.

<http://www.navipedia.net/index.php/File:GlonassConstellation.JPG> (Pridobljeno: 1.6.2016).

GPS. 2016a. GPS constellation.

<http://www.gps.gov/multimedia/images/constellation.jpg> (Pridobljeno: 14.5.2016).

GPS. 2016b. GPS-space.

<http://www.gps.gov/systems/gps/space/> (Pridobljeno 2.4.2016).

Grewal, M. S., Weill, L.R., Andrews, A.P. 2007. Global Positioning Systems, Inertial Navigation, and Integration. New Jersey, John Wiley & Sons, Inc: str. 1, 200-201.

Hofmann – Wellenhopf B., Lichtenegger H., Wasle E. 2008. GNSS – Global Navigation Satellite Systems. Dunaj, Springer – Verlag Wien: str. 309-321, 341-347, 365-367, 369-373.

http://download.springer.com/static/pdf/672/bok%253A978-3-211-73017-1.pdf?originUrl=http%3A%2F%2Flink.springer.com%2Fbook%2F10.1007%2F978-3-211-73017-1&token2=exp=1456301201~acl=%2Fstatic%2Fpdf%2F672%2Fbok%25253A978-3-211-73017-1.pdf%3ForiginUrl%3Dhttp%253A%252F%252Flink.springer.com%252Fbook%252F10.1007%252F978-3-211-73017-1*~hmac=c48bfd764802206e94516e463ccede66ed0e4df2cddb3a6efe15415b31372528 (Pridobljeno 24. 2. 2016).

Kontrola zračnega prometa Slovenije. Razlaga klasičnih navigacijskih sredstev na letališču. 2016. (maj 2016)

Kuhar, M. 2015. Gradiva pri predmetu Uvod v geodezijo. Ljubljana, UL FGG: loč. pag.

http://www.fgg.uni-lj.si/~mkuhar/pouk/uvod/gradivo/14-Uvod_Geod-geod_nalogi_krogla-tisk.pdf (Pridobljeno 23. 5. 2016).

Petrovska, O., Rechkoska Shikoska, U. 2013. Aircraft precision landing using integrated GPS/INS system. Transport problems (Problemy Transportu) 8, 1: str. 17-23.

http://transportproblems.polsl.pl/pl/Archiwum/2013/zeszyt1/2013t8z1_02.pdf (Pridobljeno 24.2.2016).

Phillips, R.E., Schmidt, G.T. 2010. INS/GPS Integration Architectures. Lexington, Massachusetts, Massachusetts Institute of Technology: str. 5- 16.

<http://oai.dtic.mil/oai/oai?verb=getRecord&metadataPrefix=html&identifier=ADA581020>

(Pridobljeno 24. 2. 2016).

Prasad, R., Ruggieri, M. 2005. Applied Satellite Navigation Using GPS, GALILEO, and Augmentation Systems. Združene države Amerike, Mobile Communication Series: str. 1-4, 70-71, 76-77, 82, 91.

NASA. 2016. Satellite Missions.

http://ilrs.gsfc.nasa.gov/missions/satellite_missions/current_missions/eta1_general.html (Pridobljeno 1.7.2016).

Navipedia. 2016. Reference frames in GNSS.

http://www.navipedia.net/index.php/Reference_Frames_in_GNSS (Pridobljeno 1.7.2016).

Opencpn. 2016. Osnovni navigacijski pojmi.

<http://opencpn.org/ocpn/book/export/html/435> (Pridobljeno 5.5.2016).

Stopar, B. 2014. Gradiva pri predmetu Višja geodezija. Ljubljana, UL FGG: loč. pag.

Stopar, B. 2015. Gradiva pri predmetu GNSS v geodeziji. Ljubljana, UL FGG: loč. pag.

Švetak, J. 2016. Gradiva pri predmetu Osnove navigacije. Portorož, UL FPP: loč. pag.

Unoosa. 2016. Timescale - GALILEO.

<http://www.unoosa.org/pdf/icg/2012/Timescale-GALILEO.pdf> (Pridobljeno: 28.4.2016).

Walter, R., Dorf, R.C. (ur.). 2001. The avionics handbook: Flight management systems. Williamsburg, Virginia, AvioniCon, Inc.: loč pag.

http://www.ohio.edu/people/uijtdeha/theavionics handbook_cap_15.pdf (Pridobljeno 5. 5. 2016).

Wikipedia. 2016. Orthodrome.

https://sl.wikipedia.org/wiki/Ortodroma#/media/File:Orthodrome_globe.svg (Pridobljeno 15.5.2016).