Proračun elemenata prilaženja primjenom metode vertikalne navigacije

Sužnjević, Matija

Master's thesis / Diplomski rad

2016

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Transport and Traffic Sciences / Sveučilište u Zagrebu, Fakultet prometnih znanosti**

Permanent link / Trajna poveznica: https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:119:575771

Rights / Prava: In copyright / Zaštićeno autorskim pravom.

Download date / Datum preuzimanja: **2024-03-29**



Repository / Repozitorij:

Faculty of Transport and Traffic Sciences - Institutional Repository







Sveučilište u Zagrebu

Fakultet prometnih znanosti

Matija Sužnjević

PRORAČUN ELEMENATA PRILAŽENJA PRIMJENOM METODE VERTIKALNE NAVIGACIJE

Diplomski rad

Zagreb, 2016.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET PROMETNIH ZNANOSTI
POVJERENSTVO ZA DIPLOMSKI ISPIT

Zagreb, 19. travnja 2016.

Zavod: **Zavod za aeronautiku**
Predmet: **Avionika i IFR letenje**

DIPLOMSKI ZADATAK br. 3368

Pristupnik: **Matija Sužnjević (0135216709)**
Studij: Aeronautika

Zadatak: **Proračun elemenata prilaženja primjenom metode vertikalne navigacije**

Opis zadatka:

Teorijski obraditi pojmove točnosti i preciznosti pri vođenju zrakoplova u prostoru. Čimbenici koji utječu na točnost i preciznost. Provedba mjerenja točnosti i preciznosti tijekom različitih uvjeta leta. Simulacija utjecaja promjene temperature vanjskog zraka na pokazivanje visinomjera. Analiza utjecaja promjena temperature na putanju leta zrakoplova tijekom prilaženja. Određivanje vrijednosti točnosti i preciznosti tijekom prilaženja. Interpretacija rezultata i zaključna razmatranja

Zadatak uručen pristupniku: 4. ožujka 2016.

Mentor:

izv. prof. dr. sc. Doris Novak

Predsjednik povjerenstva za diplomski ispit:

Sveučilište u Zagrebu

Fakultet prometnih znanosti

Diplomski rad

PRORAČUN ELEMENATA PRILAŽENJA PRIMJENOM METODE VERTIKALNE NAVIGACIJE

APPROACH PATH CALCULATION USING METHOD OF VERTICAL NAVIGATION

Mentor: Izv. prof. dr. sc. Doris Novak

Student: Matija Sužnjević, univ. bacc. ing. aeronaut.

Zagreb, rujan 2016.

Sažetak

PRORAČUN ELEMENATA PRILAŽENJA PRIMJENOM METODE VERTIKALNE NAVIGACIJE

Prilazi za slijetanje u zrakoplovnoj navigaciji odvijaju se pomoću raznih sredstava sa zemlje i na zrakoplovu te se uglavnom odvijaju instrumentalno. Dok su zemaljski sustavi u uporabi godinama te su dokazani i provjereni, zadnjih se godina sve više upotrebljavaju samostalni sustavi na zrakoplovu jer je implementacija takvih prilaza jeftinija i ne zahtijeva dodatnu infrastrukturu na zemlji. Upotreba satelitskih sustava pozicioniranja sve se više primjenjuje, te se postavlja pitanje točnosti pozicioniranja u najkritičnijim fazama leta. U ovom radu kroz teoriju i praktična mjerenja na zrakoplovu postavljena je razlika između točnosti i preciznosti u pozicioniranju te je izmjerena točnost pozicioniranja na primjeru za slijetanje Međunarodne zračne luke Zagreb.

KLJUČNE RIJEČI: točnost; preciznost; globalni navigacijski sustavi; vertikalna navigacija

Summary

APPROACH PATH CALCULATION USING METHOD OF VERTICAL NAVIGATION

Approach for landing in air navigation takes place using a variety of equipment from the ground and onboard the aircraft and is generally instrumental. While terrestrial systems have been in use for years and have been proven and tested, in recent years the use of the standalone systems on the aircraft is becoming more and more popular since the implementation of such approach procedures is cheaper and does not require additional terrestrial infrastructure. The use of satellite positioning systems is becoming a popular approach method, and the question of the accuracy of the positioning in the most critical phases of flight is questioned. In this paper, the theory and practical measurements on the aircraft define the difference between accuracy and precision in satellite navigation and positioning accuracy is measured using the example of Zagreb International Airport approach.

KEYWORDS: accuracy; precision; global navigation systems; vertical navigation

Sadržaj

Sažetak **3**

Summary **4**

Sadržaj **5**

Popis kratica **7**

Uvod **8**

2. Glabalni navigacijski satelitski sustavi (GNSS) **9**

2.1 Razvoj globalnih navigacijskih sustava 9

2.2. Segmenti GPS sustava 12

2.2.1.Svemirski segment 13

2.2.2. Kontrolni segment 14

2.2.3. Korisnički segment 15

2.3. Princip rada 16

2.3.1. Pseudo - udaljenost 16

2.3.2. Dopplerov pomak 17

2.3.3. RAIM algoritam 18

2.3.4. GLONASS 18

2.4. Greške i faktori utjecaja na točnost i preciznost 20

2.4.1 Utjecaj ionosfere 20

2.4.2. Mjera preciznosti - DoP 20

2.4.3. Greška satelitskog sata 21

2.4.4. Varijacije orbitalne putanje 21

2.4.5. Greške višestazja 21

2.4.6. Interferencije i ometanje 22

2.5. Sustavi za poboljšanje točnosti pozicioniranja 23

2.5.1. Zemaljski sustav dopune - GBAS 23

2.5.2. Satelitski sustav dopune - SBAS 24

2.5.3. Zrakoplovni sustav dopune - ABAS 25

3. Oprema korištena za mjerenje **27**

3.1. Programska oprema 27

3.1.1. VisualGPS 27

3.1.2. Microsoft Excel 29

3.2. Uređaji korišteni za mjerenje 30

3.2.1. Garmin GPSmap 76CS 30

3.2.2. iPad 2 32

3.2.3. Garmin GPSmap 196 33
3.2.4. Garmin GPSmap 496 35
4. Opis mjerenja 37
4.1. Mjerenja na zemlji 37
4.2. Mjerenja iz zraka 38
5. Točnost i preciznost GNSS-a 41
6. Rezultati mjerenja i analiza 54
6.1. Horizontalna točnost 55
6.2. Vertikalna točnost 66
7. Zaključak 70
Popis literature 72
Popis slika 73

Popis kratica

A-GPS - Assisted GPS

GLONASS - GLObal NAvigation Satellite System (*rus. Global'naya Navigatsionnaya Sputnikovaya Sistema*)

GPS - Global Positioning System

ILS - Instrumental Landing System

MLS - Microwave Landing System

WAAS - Wide Area Augmentation System

DGPS - Differential Global Positioning System

EGNOS - European Geostationary Navigation Overlay Service

NAVSTAR-GPS

BPSK - Binary Phase Shift Keying

PRN - Pseudo Random Noise

UTC - Universal Time Coordinated

MCS - Master Control Station

MS - Monitoring Station

IFR - Instrumental Flight Rules

FMS - Flight Management System

DoP - Dilution o Precision

GBAS - Ground-based Augmentation System

ABAS - Airborne-based Augmentation System

SBAS - Space-based Augmentation System

LAAS - Local Area Augmentation System

MSAS - Metsat Satellite Based Augmentation System

PR - Pseudo Range

AAIM - Aircraft Autonomous Integrity Monitoring

RAIM - Receiver Autonomus Integrity Monitoring

NMEA - National Marine Electronics Association

RNP - Required navigation performance

1. Uvod

U teoriji navigacije i vođenja zrakoplova u prostoru spominju se određeni zahtjevi za točnost pozicioniranja. Iako je pojam točnosti često korišten kod navigacijskih zahtjeva, on je prilično nejasno definiran i u praksi nedostaje dovoljno informacija o tome kolika je zapravo točnost, a kolika preciznost. Također je prilično nejasno definirana razlika između tih pojmova, te je potrebno teorijski istražiti razliku a zatim i u praksi provesti mjerenja kojima bi se utvrdili parametri preciznosti i točnosti pozicioniranja.

Sljedeći navigacijski element odnosi se na točnost mjerenja visine i odstupanje od vertikalnog profila leta kod prilaza za slijetanje. Iako se kod GNSS prilaza za slijetanje koristi barometarski visinomjer za vođenje prema vertikalnom profilu, cilj istraživanja je i utvrditi koliko je zapravo odstupanje odnosno točnost vertikalnog vođenja prema satelitskim sustavima.

Kako se u današnje vrijeme sve više koriste tablet računala u navigaciji u zrakoplovima generalne avijacije, jedan od ciljeva istraživanja bio bi odrediti točnost takvih uređaja u odnosu na komercijalne profesionalne navigacijske sustave zrakoplova, te ispunjavaju li oni definirane zahtjeve za točnost pozicioniranja.

U dosadašnjim istraživanjima nedovoljno jasno je definirana točnost i praktično značenje definiranja točnosti. Također nije postavljena jasna razlika između točnosti u preciznosti u pozicioniranju. Dosadašnja istraživanja bila su bazirana na pojedinim dijelovima i elementima navigacijskih parametara, no potrebna je detaljna analiza kako bi se dobila cjelokupna slika na primjeru statičkih i dinamičkih mjerenja, kao i u prilazu za slijetanje.

Od ovog istraživanja očekuje se da se mjerenjima u realnim uvjetima dobije podatak o točnosti i preciznosti navigacijskih sustava zrakoplova, GPS-a te tablet računala (mobitela) koji se sve više koriste u navigaciji. Isto tako želi se ustanoviti točnost vertikalnog vođenja u prilazu za slijetanje satelitskim sustavima.

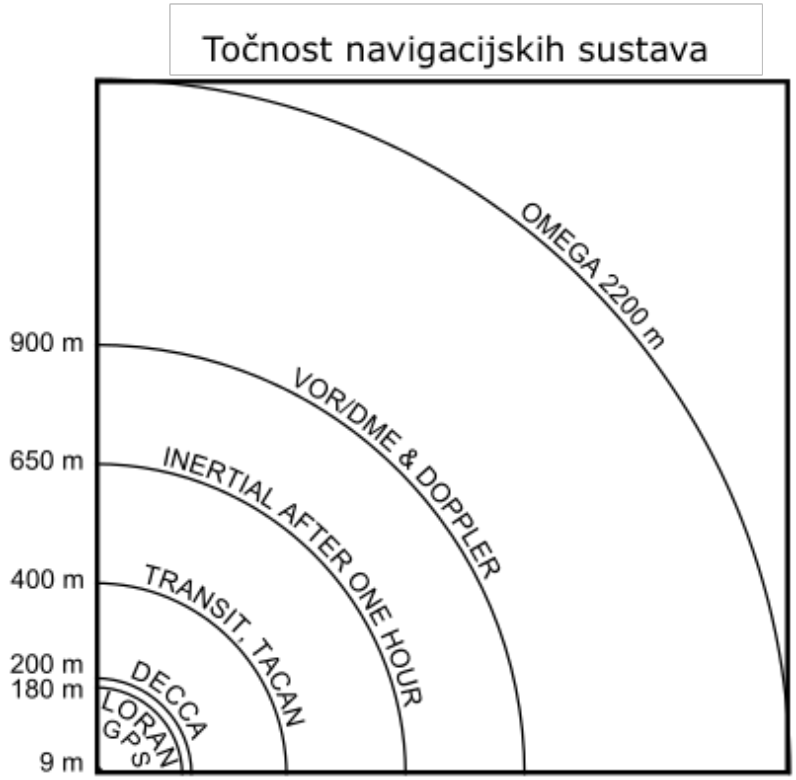
2. Glabalni navigacijski satelitski sustavi (GNSS)

U ovom diplomskom radu koristit će se uređaji namijenjeni GPS sustavu pozicioniranja, te iPad koji koristi i GPS i GLONASS. U svrhu pripreme istraživanja i boljeg razumijevanja istraživanja i rezultata, u ovom će poglavlju biti ukratko objašnjeni osnovni principi rada i pojmovi GPS sustava, te spomenuti ostali GNSS sustavi.

2.1 Razvoj globalnih navigacijskih sustava

Globalni navigacijski sustavi su sustavi navigacije koji koriste vanjske umjetno stvorene signale za određivanje pozicije na globalnom nivou (cijela zemlja ili veliko područje zemlje). Samim početcima globalne navigacije mogu se smatrati sustavi za čiji rad su se koristili signali odašiljani sa zemlje (npr. LORAN). U današnje vrijeme globalnim navigacijskim sustavima podrazumijevaju se globalni satelitski navigacijski sustavi čiji je razvoj započeo nakon razvoja tehnologije letova u svemir i postavljanja satelita u zemljinu orbitu.

Navigacijski sustavi kroz povijest svojim su razvojem iz generacije u generaciju postajali sve točniji i precizniji te je njihova primjena bila sukladna tome. Na slici 2.1. je grafički prikazana preciznost pojedinih sustava kroz povijest, te je evidentno da su neki od prvih sustava bili korisni u nekoj vrsti globalne navigacije na dugim rutama, te su se koristili prvenstveno u moreplovstvu gdje za prelazak nekog oceana nije toliko presudna velika točnost. U zrakoplovstvu bi takvi sustavi također mogli biti primjenjivi na većim udaljenostima u nekakvoj općoj navigaciji, ali za bilo kakvu vrstu precizne navigacije koja se u zrakoplovstvu koristi takvi sustavi nisu adekvatni. Povećanjem točnosti navigacijskih sustava (tek uvođenjem satelitskih sustava) pred takve su sustave stavljani sve veći zahtjevi, pa je tako u današnje vrijeme točnost navigacije takva da omogućuje i prilaz za slijetanje, koji predstavlja fazu leta kod koje se zahtijeva najveća točnost i preciznost. [1]



Slika 2.1. Točnost navigacijskih sustava [11]

S obzirom na rasprostranjenost, a i činjenicu da se u ovom radu za mjerenja najviše koristi američki GPS sustav, na njegovom primjeru biti će objašnjen način rada samog sustava, a razlike između GPS-a i ostalih sustava biti će naglašene kasnije.

GPS je GNSS sustav razvijen od strane američkog Ministarstva obrane prvenstveno u svrhu vojne primjene i određivanja pozicije bilo gdje na Zemlji, u bilo koje doba dana i u bilo kakvim vremenskim uvjetima. Prvotni naziv sustava bio je NAVSTAR-GPS (Navigation Satellite Timing and Ranging-Global Positioning System), ali je naziv kasnije skraćen samo u GPS (Global Positioning System). Sam sustav korišten je u vojne svrhe, ali je ubrzo prepoznata njegova korist u civilnim aplikacijama, te je nakon dovršetka razvoja sustav pušten u civilnu upotrebu. Korištenje sustava je besplatno, jedini preduvjet je posjedovanje odgovarajućeg prijamnika, koji su u početcima bili jako skupi te je njihova preciznost i brzina bila dosta ograničena. Lansiranje satelita počelo je 1989. godine, a svih 24 satelita, koliko je predviđeno za

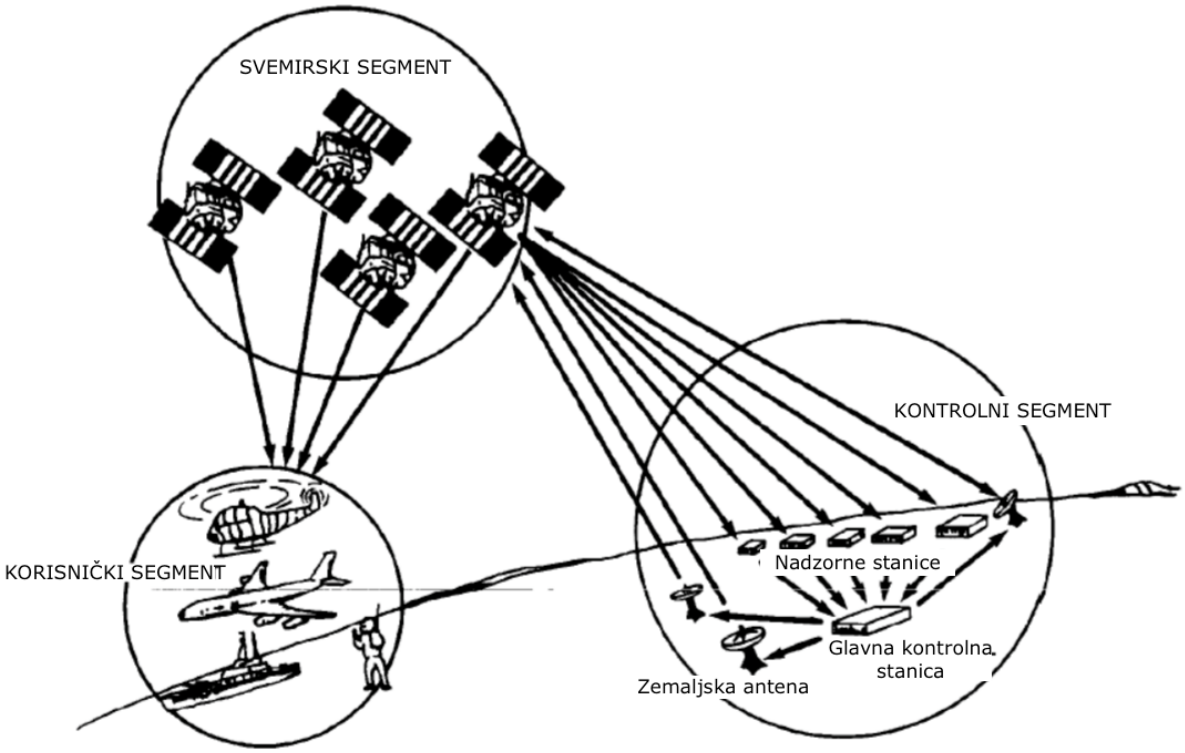
kompletan sustav, u orbiti je postalo funkcionalno 1994. godine. Civilnoj upotrebi dostupan je bio signal u koji je namjerno ugrađena greška, te je određivanje pozicije bilo moguće uz odstupanje od minimalno 100 metara. Taj princip selektivne dostupnosti (eng. SA - Selective Availability) održao se sve do 2000. godine, a vojska je u to vrijeme imala pristup signalu bez greške te je posjedovala puno veće mogućnosti u vidu točnosti pozicioniranja. [2]

Korištenje GPS-a u današnje vrijeme postalo je jedan od osnovnih i sve više korištenih navigacijskih sustava. Kako je zrakoplovstvo kroz povijest uvijek bilo neka vrsta vučne sile za razvoj novih tehnologija, ali isto tako i ostaje vrlo konzervativno u pogledu prihvaćanja istih, u ovom radu cilj je definirati određene segmente GPS-a koji su možda još uvijek pomalo nejasni, ili nisu jasno definirani.

2.2. Segmenti GPS sustava

GPS sustav sastoji se od tri osnovna segmenta od kojih će svaki detaljnije biti opisan u nastavku: (Slika 2.2)

1. Svemirski segment - sastoji se od Satelitskih Vozila smještenih u zemljinu orbitu
2. Kontrolni segment - predstavlja kontrolne stanice smještene na Zemlji koje nadziru rad sustava i upravljaju radom sustava, a u vlasništvu su Ministarstva obrane SAD-a
3. Korisnički segment - sastoji se od svih prijamnika GPS signala u vlasništvu korisnika sustava



Slika 2.2. Segmenti GPS sustava

Izvor: [10]

2.2.1.Svemirski segment

Svemirski segment GPS sustava sastoji se od 24 satelita koji tvore takozvano "sazviježđe" (eng. constellation) i odašilju signal potreban za određivanje pozicije. Sateliti ili satelitska vozila (eng. SV-Satellite Vehicle) raspoređena su u šest orbitalnih putanja, po četiri satelita u svakoj. Orbitalne putanje su sinkrone i pod kutem inklinacije 55 stupnjeva u odnosu na ekvator.

Svaka orbitalna putanja je od susjedne odvojena za 60 stupnjeva geografske širine (na ekvatoru), nalaze se na visini 20 200 km iznad zemljine površine, a svaki satelit orbitira oko Zemlje za 11 sati i 58 minuta. Sateliti su raspoređeni tako da promatrač na Zemlji u svakom trenutku i na bilo kojoj poziciji ima minimalno 5 "vidljivih" satelita (onih satelita od kojih prima signal).

Sateliti odašilju signal na dvije frekvencije, L1 i L2, od kojih frekvencija L1 na 1575.42 MHz predstavlja onu koja je primarno namijenjena civilnoj upotrebi, te je u njoj sadržan C/A kod (eng. Coarse Acquisition). Poruka se odašilje pomoću PRN (eng. Pseudo Random Noise), načina kodiranja poruke koji je predvidljiv i počinje u točno određeno vrijeme, što ga čini prepoznatljivim prijamnicima (signal se "izvlači" iz šuma, jer je odnos signal-šum u korist šuma). Modulacija koja se koristi je BPSK. Svaki satelit odašilje vlastiti C/A kod čiji početak je određen atomskim satom na satelitu, a vrijeme koje se koristi je GPS vrijeme, a ne UTC.

Navigacijska poruka koju odašilje satelit sastoji se od 25 slogova podataka, od kojih svaki pojedini slog sadrži 1500 bita podataka strukturiranih u 5 pod-slogova po 300 bita. Za odašiljanje svakog sloga potrebno je 30 sekundi, pa je tako za odašiljanje cijele poruke potrebno 12.5 minuta.

Poruka sadrži :

- GPS vrijeme odašiljanja
- signal prijenosa s P na C/A kod
- podatke o orbitalnoj putanji satelita
- podatak o korekciji sata satelita
- almanah podataka o statusu svih satelita u sazvježđu
- koeficijenti za preračunavanje GPS vremena u UTC
- ionosferski model

GPS pozicija računa se u prijamniku, a referentni sustav za izračun pozicije je WGS84. Kako je Zemlja geoid, koji je nemoguće matematički opisati, koristi se matematička aproksimacija zemlje u obliku referentnog elipsoida - WGS84, sa središtem u središtu zemlje (Earth-Centered-Earth-Fixed). Zbog toga se na nekim mjestima stvarna površina zemlje poklapa upravo s površinom elipsoida, dok je na većini mjesta na zemlji primjetno odstupanje.

2.2.2. Kontrolni segment

Kontrolni segment GPS-a je sustav podrške i kontrole sustava satelita. Sastoji se od glavne kontrolne stanice smještene u Coloradu, SAD te 5 nadzornih stanica i 3 komunikacijske stanice. Uz taj osnovni sustav, 2005. godine dodano je još 5 nadzornih stanica što sada omogućuju da se svaki satelit prati s barem 3 različite lokacije.

Uloga glavne kontrolne stanice (eng. Master Control station - MCS) je praćenje i kontrola sazviježđa satelita te sustav osvježavanja navigacijskih poruka satelita. Glavna kontrolna stanica prima podatke od nadzornih stanica (eng. monitoring stations - MS) koje su razmještene na različitim pozicijama na površini zemlje, na odgovarajućim geografskim lokacijama koje im omogućuju prijam signala barem tri satelitska vozila istovremeno. Stanice su

opremljene vrlo preciznim prijamnicima i antenama te "slušaju" signale satelita, izračunavaju udaljenost, visinu satelita, poziciju i brzinu te prikupljaju navigacijske poruke od svakog od njih. Ti podaci šalju se glavnoj kontrolnoj stanici koja analizira i procesira podatke te ih koristi u svrhu nadzora integriteta sustava i generiranja novih navigacijskih poruka. Tako, preko komunikacijskih stanica, MCS odašilje osvježene podatke o putanjama satelita, greškama atomskih satova te ostale relevantne podatke sadržane u navigacijskoj poruci. Odašiljanje i osvježenje navigacijske poruke odvija se najmanje jednom dnevno.

2.2.3. Korisnički segment

Korisnički segment GPS sustava predstavlja prijamnike i procesore GPS signala. Za prijam GPS signala potreban je adekvatan uređaj koji sadrži procesor signala GPS-a. Prvi uređaji bili su veliki i jako skupi, ali su razvojem potrošačke elektronike u današnje vrijeme svedeni na jako precizne i brze uređaje koji mogu biti veličine kovanice od pet kuna. Naravno, profesionalni uređaji su veći i precizniji, a cijena im je i dalje visoka, ali prihvatljiva u odnosu na prve uređaje. Sam prijamnik i dalje daje iste podatke, geografsku širinu i dužinu, vrijeme, brzinu i slično, ali se način prikaza bitno promijenio (grafička sučelja, karte za podlogu i slično…).

2.3. Princip rada

Princip rada GPS-a svodi se na triangulaciju signala satelita i određivanje pozicije na zemlji, a u nastavku će biti dodatno objašnjen u svrhu lakšeg razumijevanja faktora koji mogu utjecati na preciznost i utjecaje koji mogu utjecati na preciznost i rezultate istraživanja.

2.3.1. Pseudo - udaljenost

Korisnički uređaj prima signal satelita te ga preko antenskog pretpojačala i pojačala signala dovodi do faznog demodulatora. Bitno je napomenuti da je signal satelita iznimno slab, te ga je potrebno "izvući" ispod razine šuma (eng. cocktail party effect). To je omogućeno tako da prijamnik predviđa signal satelita te uspijeva pročitati poruku koja je "maskirana" u šum. Princip se može pojasniti efektom koktel zabave, gdje u okolnom žamoru slušatelj jasno može čuti samo sugovornika na kojega se fokusirao, zanemarujući sav okolni žamor (šum).

Fazi demodulator demodulira signal i osigurava PRN kod, identificira satelit i prikuplja navigacijsku poruku. Prijemnik koristi podatak o vremenu koji je sadržan u navigacijskoj poruci kako bi replicirao prethodno objašnjene sekvence koda. Usporedbom vremena odašiljanja signala i prijama signala moguće je odrediti vrijeme potrebno signalu da od satelita dospije do prijamnika. Množenjem vremena putovanja signala s brzinom rasprostiranja svjetla dobiva se udaljenost do satelita. Ta udaljenost nije prava udaljenost jer nije uračunata mogućnost utjecaja ionosfere, refleksija, greške satelitskog atomskog sata ili grešaka u almanahu. Za korekciju podatka koriste se podaci sadržani u navigacijskoj poruci te se takav podatak o udaljenosti naziva pseudo-udaljenost (eng. Pseudo Range - PR). Pseudo udaljenost je korigirana za grešku atomskog sata satelita i greške vremena putovanja signala.

Podatak o pseudo udaljenosti se zatim obrađuje u procesoru signala gdje se korigira za:

- greške satelitskih satova
- ionosfersko kašnjenje signala
- efekt Einsteinove teorije relativnosti

Nakon što procesor primjeni korekcije, tada je u mogućnosti odrediti vlastito vrijeme. Određivanjem vlastitog vremena prijamnik tek tada može odrediti:

- X koordinatu prijamnika
- Y koordinatu prijamnika
- Z koordinatu prijamnika
- Vrijeme

2.3.2. Dopplerov pomak

Prijamnik unutar procesora generira signal na istoj frekvenciji kao L1 signal satelita te se taj signal uspoređuje sa signalom pristiglim od satelita. Razlika koja se javlja uzrokovana je Dopplerovim pomakom uslijed relativnog gibanja između satelita i prijamnika. Iz podatka o relativnoj brzini satelita može se izračunati brzina zrakoplova, kao i iz promjene pozicije prijamnika u određenom vremenu. Procesor se dakle bavi trima osnovnim stvarima; pozicijom, brzinom i vremenom.

2.3.3. RAIM algoritam

RAIM je način kontrole ispravnosti rada sustava od strane korisnika (*eng. Receiver Autonomus Integrity Monitoring*). Princip rada je jednostavan, prijamnik detektira da je neka pseudo udaljenost abnormalna u odnosu na ostale te ju zanemaruje iz daljnjeg proračuna. Sam proces odvija se potpuno unutar korisničkog segmenta (prijamnika). Za korištenje funkcije potrebno je minimalno 6 vidljivih satelita i to:

- 4 satelita koji osiguracaju 3D poziciju
- 1 satelit za usporedbu signala i detektiranje neispravnog signala
- 1 satelit kao zamjena ako jedan od detektiranih signala (najlošiji) bude isključen

U iznimnim slučajevima kada prijamnik koristi barometarsku visinu kao dopunu RAIM-u, moguće je koristiti samo 5 satelita. Letovi u IFR uvjetima na kojima je GPS primarno navigacijsko sredstvo moraju ili koristiti RAIM ili integrirani navigacijski sustav poput FMS-a za nadzor integriteta.

2.3.4. GLONASS

GLONASS (*rus. Global'naya Navigatsionnaya Sputnikovaya Sistema*) je ruski ekvivalent američkom GPS-u. Princip rada je vrlo sličan GPS-u, s nekim tehničkim iznimkama. Sustav se planirano sastoji od minimalno 24 satelita razmještenih u 3 orbitalne putanje na visini 19 140 km iznad površine Zemlje. Period orbite iznosi 11 sati i 15 minuta, te svaki satelit također emitira na dvije različite frekvencije. Ovdje se sustav ponešto razlikuje od GPS-a. Identifikacija satelita se odvija na temelju odašiljačke frekvencije, jer je odašiljačka frekvencija satelita jedinstvena za pojedini satelit i služi za identifikaciju.

Navigacijska poruka traje otprilike dvije sekunde i sadrži slične podatke kao i kod GPS-a. Sadrži trenutne podatke o satelitu koji je poslao poruke i podatke o ostalim satelitima u sazviježđu.

Sustav također čine tri segmenta; zemaljski, svemirski i korisnički. Zemaljski sustav je u cijelosti smješten na prostoru Ruske Federacije, sa sjedištem u Moskvi. Zemaljski sustav također pruža kontrolu integriteta, a također kontrola se odvija i u samom korisničkom segmentu, unutar prijamnika.

Jedna od bitnijih razlika između ova dva sustava je u korištenju različitog referentnog elipsoida za potrebe navigacije. Ruski sustav koristi i njihov elipsoid PZ-90 (*rus. Parametry Zemli 1990*). Unatoč nekim razlikama, pretvaranje pozicije iz jednog u drugi sustav je lako ostvarivo unutar prijamnika.

Kompatibilnost GPS-a i GLONASS-a je sve bolja u današnje vrijeme, pa tako čak i iPhone i iPad koji su američke proizvodnje i namijenjeni za masovnu upotrebu u sebi sadrže prijamnik za GPS i GLONASS. Upravo zbog toga što se iPad koristi u diplomskom radu i u HZNS-u dio pažnje u diplomskom radu je posvećen i ovom sustavu. Promatrajući širu sliku, uporaba i jednog i drugog sustava uz GBAS čini zaista globalni navigacijski sustav, koji ima globalnu pokrivenost i visoku razinu redundancije koja je potrebna za RNP zahtjeve koji bi GNASS učinili primarnim navigacijskim sredstvom.

2.4. Greške i faktori utjecaja na točnost i preciznost

Standard koji se koristi za većinu GPS prijamnika navodi da je standardna točnost pozicije unutar 95% vremena unutar kruga radijusa manjeg ili jednakog 13 metara za horizontalnu točnost te 22 metra za vertikalnu. Taj standard ne uzima u obzir greške vremena uzrokovane refleksijama signala ili interferencije koji mogu uzrokovati bitno lošije rezultate. Svrha ovog istraživanja je ustanoviti realnu točnost i preciznost komercijalno dostupnih uređaja koje koristi i HZNS, te utvrditi udovoljavaju li zahtjevima navigacijskih performansi. Za bolje razumijevanje istraživanja i rezultata treba spomenuti osnovne faktore koji mogu utjecati na preciznost.

2.4.1 Utjecaj ionosfere

Utjecaj propagacija ionosfere je jedan od značajnijih faktora koji utječu na preciznost GPS pozicije. Ionosfera može imati utjecaja na brzinu propagacije signala, usporavajući signal te uzrokujući netočno vrijeme (prije je spomenuto da je osnovni princip navigacije mjerenje vremena koje je potrebno signalu da od satelita stigne do prijamnika). Korištenjem zasebnih frekvencija L1 i L2 ovaj utjecaj može biti gotovo u potpunosti eliminiran, jer se u procesoru uspoređuje vrijeme dolaska signala L1 i L2 (ionosfera nema jednak utjecaj na sve frekvencije). Problem je u tome što se za civilnu upotrebu koristi samo L1 koji prenosi C/A kod. Tako se u slučaju korištenja samo L1 signala koristi prognozirani model ionosfere sadržan u navigacijskoj poruci koji umanjuje problem, ali samo do 50%.

2.4.2. Mjera preciznosti - DoP

DoP je pojava "razrjeđenja preciznosti" (*eng. Dilution of Precision*). Radi se o utjecaju položaja satelita na preciznost određivanja pozicije, a pogoršava i utjecaje ostalih grešaka. Radi se o geometrijskoj pogrešci, odnosno smanjenoj

mogućnosti postizanja veće preciznosti. Kada su sateliti koji se koriste za pozicioniranje blizu jedni u odnosu na druge, zamišljene linije signala satelita se križaju pod nepovoljnim kutevima koji ne osiguravaju veliku preciznost. Idealno bi bilo da su 3 satelita na horizontu, pod kutem 120 stupnjeva jedan u odnosu na drugog, a treći direktno iznad.

2.4.3. Greška satelitskog sata

Satelitski satovi iako su jako precizni vremenom počinju prikazivati netočno vrijeme. Iako se radi o malom odstupanju, ono je bitno za određivanje pozicije, pa se točnost satelitskih satova mjeri i podatak o grešci se uključuje u navigacijsku poruku.

2.4.4. Varijacije orbitalne putanje

Putanje satelita se mogu poremetiti pod utjecajem:

- asimetrija zemljinog gravitacijskog polja
- gravitacija sunca i mjeseca
- otpor u atmosferi
- elekro-magnetske sile
- solarni vjetrovi

2.4.5. Greške višestazja

Signali do satelita mogu doći preko više različitih puteva zbog refleksija od površina blizu prijamnika (zgrade, objekti, vozila). Grešku je gotovo nemoguće predvidjeti i eliminirati unutar prijamnika.

2.4.6. Interferencije i ometanje

GPS signal je iznimno slab kada dođe do zemlje, jer je proputovao već 20-ak tisuća kilometara. Snaga satelita i GPS signala se laički može usporediti s promatranjem žarulje snage 25 Wata s udaljenosti 10 000 milja. Uz to, signal je i vrlo podložan interferencijama od strane mobilnih uređaja, odašiljačkih stanica, iskrenja i slično. Moguće je naravno i namjerno ometanje, jer je tako slabi signal vrlo lako "pregaziti" nekim uređajem za ometanje.

2.5. Sustavi za poboljšanje točnosti pozicioniranja

Sustavi za poboljšanje točnosti pozicioniranja dijele se na zemaljski, satelitski i zračni. Svrha svakog sustava je utvrditi greške pozicioniranja i pokušati ih svesti na što manju moguću mjeru. Detaljan princip rada svakog pojedinog sustava nije tema ovog diplomskog rada, pa će biti objašnjen samo u kratkim crtama.

2.5.1. Zemaljski sustav dopune - GBAS

GBAS (eng. Ground Based Augmentation Systems) je sustav smješten na zemlji. Princip rada generalno se temelji na mjerenju grešaka na zemlji i prenošenju podataka o tim greškama korisničkom segmentu kako bi ih mogao koristiti za poboljšanje točnosti pozicioniranja. GBAS može pružiti točnost potrebnu za precizni prilaz za završne segmente instrumentalnog prilaza te LNAV/RNAV operacije u aerodromskoj terminalnoj zoni. Dva su osnovna načina poboljšanja signala sa zemlje; diferencijalna tehnika i uporaba pseudolita.

Diferencijalni GPS radi na principu referentne stanice na zemlji. Stanica je fiksna i ima poznatu poziciju, te prima signale od satelita. No, za razliku od normalnog prijamnika, ta stanica na temelju svoje poznate pozicije računa koliko stvarno signalu satelita treba da stigne do nje. Na temelju usporedbe svojih rezultata sa stvarnim izmjerenim vremenom od druge stanice, moguće je izračunati grešku. Informacija o grešci prenosti se korisničkom segmentu putem data linka te se koristi za smanjenje pogreške u pozicioniranju. Na taj način može se značajno popraviti točnost pozicioniranja.

Pseudolit radi na principu satelita, ali je smješten na zemlji. Također je fiksne pozicije, a odašilje kodiranu poruku poput satelita. Tu poruku nadzire referentna stanica, kao i signale dostupnih satelita, generira diferencijalnu popravku greške i šalje pseudolitu. Pseudolit odašilje popravku korisničkom segmentu koji ju može koristiti za određivanje diferencijalne popravke ili za dodatni podatak o udaljenosti od pseudolita.

2.5.2. Satelitski sustav dopune - SBAS

SBAS (eng. Space Based Augmentation Systems) predstavlja satelitski bazirani sustav za poboljšanje točnosti. Prethodno opisani sustav je ograničen na, za zrakoplovstvo, relativno malo lokalno područje (LAAS - eng. Local Area Augmentation Systems), te je relativno neupotrebljiv za udaljenosti veće od 100-tinjak kilometara. Sustav koji se također bazira na DGPS-u, ali je primjenjiv na širokom području naziva se SBAS. Greška se također utvrđuje stanicama na zemlji, ali se odašilje preko geostacionarnih satelita korisničkom segmentu. Satelit također raspolaže i navigacijskim kanalom kako bi služio kao dodatni satelit u sazviježđu. SBAS može pružiti točnost potrebnu za prilaz i slijetanje s vertikalnim vođenjem (precizni prilaz).

Postoje četiri sustava, ali se svi baziraju na istom principu, razlika je u području koje pokrivaju:

- WAAS - Wide Area Augmentation System - područje SAD-a
- EGNOS - European Geostationary Navigation Overlay System - područje Europe
- MSAS - Metsat Satellite Based Augmentation System - Japan
- GAGAN - Indija

Svi sustavi rade na istom principu; niz zemaljskih kontrolnih stanica prati satelite te podatke šalje kontrolnoj stanici. Kontrolna stanica računa pogrešku u pozicioniranju, kodira ju u format prihvatljiv prenošenju korisničkom segmentu, te se putem geostacionarnih satelita prenosi korisniku.

Cijeli sustav značajno poboljšava točnost pozicioniranja, teoretski na 1 - 2 m horizontalno i 3 - 5 metara vertikalno, no još je bitnije da su integritet i sigurnost značajno poboljšani jer sustav alarmira korisnika o kvaru GPS-a unutar 6 sekundi, dok samom GPS-u za to treba čak 3 sata.

Sve ove značajke dovode do toga da GPS bude dovoljno točan i precizan za korištenje u preciznim prilazima kategorije I, dakle s vertikalnim vođenjem. U nastavku rada nešto više o preciznim prilazima i minimumima za njihovo izvođenje.

2.5.3. Zrakoplovni sustav dopune - ABAS

S obzirom na to da GBAS i SBAS mogu biti nedostupni na određenom području, što zbog lošeg prijama signala ili slabe (nikakve) pokrivenosti signalom, na ta dva sustava ne može se računati u svakoj situaciji i na svakom području. Unatoč tome, ne smije se zanemariti potreba za nadzorom točnosti sustava te dovoljnoj pouzdanosti za obavljanje operacija. U tu svrhu, na područjima gdje nije moguće primjenjivati GBAS ili SBAS, koristi se ABAS (eng. Airborne Based Augmentation System). Princip rada ABAS-a temelji se na korištenju senzora u zrakoplovu koji pružaju dopunsku sigurnosnu podršku sustavu i kontrolu integriteta. Jedan od već spomenutih sustava je RAIM.

RAIM je način kontrole ispravnosti rada sustava od strane korisnika (eng. Receiver Autonomus Integrity Monitoring). Princip rada je jednostavan, prijamnik detektira da je neka pseudo udaljenost abnormalna u odnosu na ostale te ju zanemaruje iz daljnjeg proračuna. Sam proces odvija se potpuno unutar korisničkog segmenta (prijamnika). Za korištenje funkcije potrebno je minimalno 6 vidljivih satelita. Naziv za takav način kontrole integriteta je AAIM (eng. Aircraft Autonomous Integrity Monitoring).

U svemirskom segmentu GPS i GLONASS sustava standardno se nalazi 21 satelitsko vozilo, ali postoje i dodatna rezervna koja mogu poslužiti za kontrolu integriteta. Na prekooceanskim letovima je kontrola integriteta GNSS-a jedini način kontrole integriteta jer osim LORAN-a koji je ograničenog dometa nema drugih radio navigacijskih sredstava na zemlji. Senzori na zrakoplovu poput INS-a, barometarskog visinomjera i sata jedini mogu pružiti dodatnu potporu podatcima dobivenim od GNSS-a. Bitno je napomenuti da ABAS, za razliku od GBAS-a i SBAS-a ni na koji način ne poboljšava točnost sustava. [3]

3. Oprema korištena za mjerenje

Za potrebe diplomskog rada korišteno je više GPS prijamnika različitih karakteristika kako bi se pokušala utvrditi razlika među njima, ispunjava li svaki od njih zahtjevanu točnost za korištenje u instumentalnom prilazu i razlika između točnosti i preciznosti, ako postoji.

3.1. Programska oprema

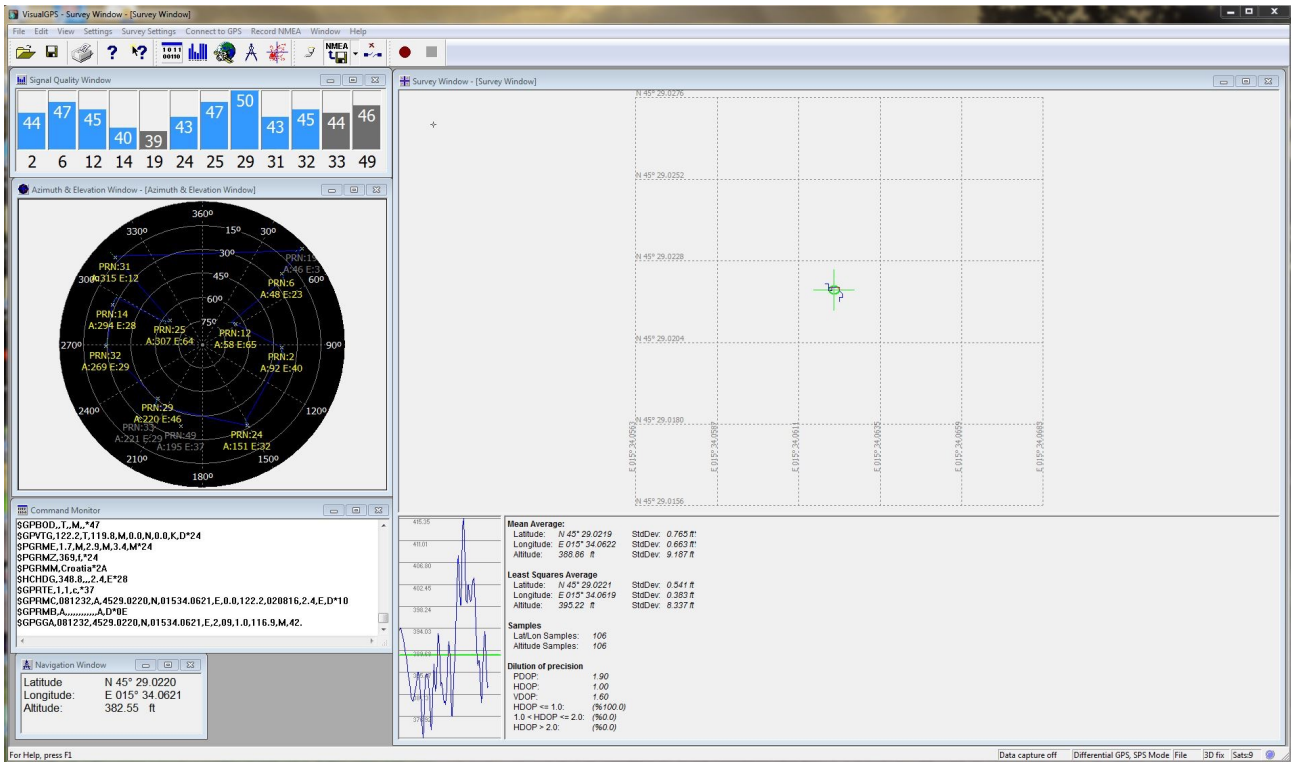
3.1.1. VisualGPS

VisualGPS je besplatan programski alat prikazan na slici 3.1. koji je primjeren upravo za ovo istraživanje zbog automatskih funkcija za praćenje kvalitete točnosti pozicioniranja te sadrži više funkcija koje se inače nalaze u profesionalnim programima. Osnovna funkcija programa je dekodiranje i prikazivanje takozvanih NMEA rečenica, što omogućava identičan prikaz sa više različitih GPS uređaja. Od ostalih funkcija valjalo bi spomenuti sljedeće:

- **Grafikon elevacije i azimuta** - prikaz svih "vidljivih" satelita. Za svaki satelit je prikazan PRN broj te azimut i elevacija.
- **Istraživački prozor** - prikazuje poziciju i HDOP/VDOP. Korisnik može odrediti granične vrijednosti za HDOP/VDOP boje prikaza te je rezultate moguće grafički isprintati
- **Navigacijski prozor** - praćenje geografske širine i dužine te visine
- **NMEA monitor** - prikaz NMEA rečenica onako kako su primljene

Program NMEA rečenice sprema u tekstualni (.txt) format te je jedom snimljene rečenice moguće pokrenuti te se pri tome odvija simulacija njihovog prijama. To je vrlo korisna funkcija za istraživanja jer se snimljene rečenice mogu pustiti naknadno, te se njihova analiza odvija nakon mjerenja, što je od iznimne važnosti s obzirom na uvjete u kojima se provode mjerenja.

NMEA 0183 je komunikacijski protokol za komunikaciju između uređaja poput GPS prijamnika, autopilota, sonara i ostalih sličnih instrumenata. Dizajniran je i održavan od strane američke organizacije National Marine Electronics Association (NMEA). Sva tri Garmin uređaja korištena u istraživanju imaju mogućnost podešavanja podatkovnog priključka na NMEA ulaz/izlaz na 4800 Bauda. Budući da se protokol bazira na serijskom protokolu, potrebno je posjedovati računalo s COM portom ili pribaviti odgovarajući adapter. Kako Garmin 196 ne posjeduje USB nego komunicira samo putem svojeg COM porta, adapteri su posuđeni od Hrvatskog Zrakoplovnog Nastavnog Središta. Po dva uređaja su istovremeno priključena na prijenosno računalo te su snimane NMEA rečenice za kasniju analizu i usporedbu dvaju uređaja.

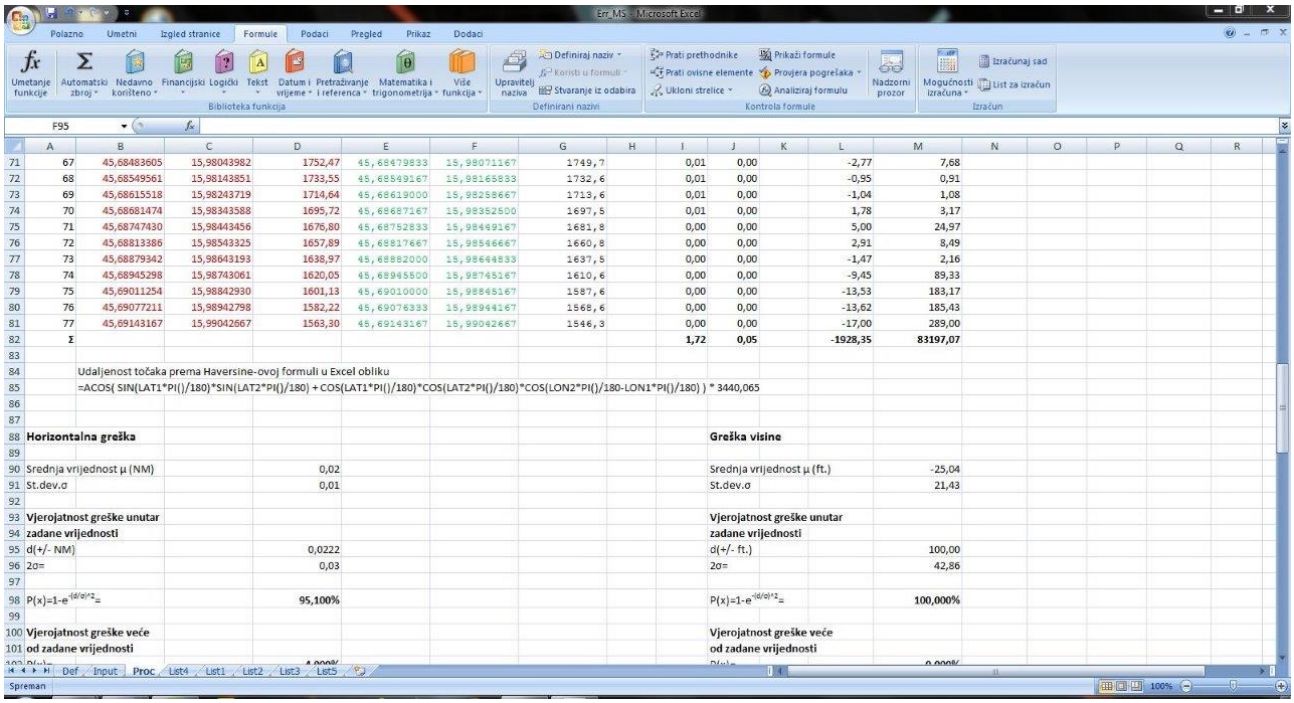


Slika 3.1. Sučelje programa VisualGPS

3.1.2. Microsoft Excel

Microsoft Excel je dio programskog paketa Microsoft Office koji služi za obradu tabličnih podataka. Program je namijenjen radu s tablicama, ali posjeduje brojne funkcije poput izrada grafikona, matematičkih funkcija, vjerojatnosti, statistike i slično.

Za potrebe diplomskog rada podaci NMEA rečenica izvezeni su u Excel tablicu te su dalje obrađivani. Podatke je na taj način bilo moguće prikazati u tablici, tj. prikazani su podatci za svaku pojedinu točku (pozicija, visina, brzina, broj satelita…).



	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R
71	67	45,68483605	15,98043982	1752,47	45,68479833	15,98071167	1749,7		0,01	0,00		-2,77	7,68					
72	68	45,68549561	15,98143851	1733,55	45,68549167	15,98165833	1732,6		0,01	0,00		-0,95	0,91					
73	69	45,68615518	15,98243719	1714,64	45,68619000	15,98258667	1713,6		0,01	0,00		-1,04	1,08					
74	70	45,68681474	15,98343588	1695,72	45,68687167	15,98352500	1697,5		0,01	0,00		1,78	3,17					
75	71	45,68747430	15,98443456	1676,80	45,68752833	15,98449167	1681,8		0,00	0,00		5,00	24,97					
76	72	45,68813386	15,98543325	1657,89	45,68817667	15,98546667	1660,8		0,00	0,00		2,91	8,49					
77	73	45,68879342	15,98643193	1638,97	45,68882000	15,98644833	1637,5		0,00	0,00		-1,47	2,16					
78	74	45,68945298	15,98743061	1620,05	45,68945500	15,98745167	1610,6		0,00	0,00		-9,45	89,33					
79	75	45,69011254	15,98842930	1601,13	45,69010000	15,98845167	1587,6		0,00	0,00		-13,53	183,17					
80	76	45,69077211	15,98942798	1582,22	45,69076333	15,98944167	1568,6		0,00	0,00		-13,62	185,43					
81	77	45,69143167	15,99042667	1563,30	45,69143167	15,99042667	1546,3		0,00	0,00		-17,00	289,00					
82	Σ								1,72	0,05		-1928,35	83197,07					
83																		
84		Udaljenost točaka prema Haversine-ovoj formuli u Excel obliku																
85		=ACOS(SIN(LAT1*PI()/180)*SIN(LAT2*PI()/180) + COS(LAT1*PI()/180)*COS(LAT2*PI()/180)*COS(LON2*PI()/180-LON1*PI()/180)) * 3440,065																
86																		
87																		
88	**Horizontalna greška**									**Greška visine**								
89																		
90	Srednja vrijednost μ (NM)			0,02						Srednja vrijednost μ (ft.)			-25,04					
91	St.dev.σ			0,01						St.dev.σ			21,43					
92																		
93	**Vjerojatnost greške unutar**									**Vjerojatnost greške unutar**								
94	**zadane vrijednosti**									**zadane vrijednosti**								
95	d(+/- NM)			0,0222						d(+/- ft.)			100,00					
96	2σ=			0,03						2σ=			42,86					
97																		
98	$P(x)=1-e^{-(d/\sigma)^2}=$			**95,100%**						$P(x)=1-e^{-(d/\sigma)^2}=$			**100,000%**					
99																		
100	**Vjerojatnost greške veće**									**Vjerojatnost greške veće**								
101	**od zadane vrijednosti**									**od zadane vrijednosti**								

Slika 3.2. Sučelje programa Excel

3.2. Uređaji korišteni za mjerenje

U svrhu praktičnog mjerenja na avionu korišteno je više GPS (GLONASS) prijamnika kako bi se mogle ustanoviti eventualne razlike među njima.

3.2.1. Garmin GPSmap 76CS

Uređaj Garmin GPSmap 76CS je GPS uređaj tvrtke Garmin koji je predviđen za različite namjene (Slika 3.3.). Uređaj je prvenstveno namjenjen kao mobilni GPS uređaj za navigaciju na nepristupačnom terenu, za potrebe planinara, moreplovaca i slično. Identične uređaje koristila je i Hrvatska gorska služba spašavanja zbog odličnog prijama signala na raznim terenima te šumama. Bitno je napomenuti da uređaj podržava WAAS te je u svrhu istraživanja korišten uz vanjsku antenu kako bi se poboljšale karakteristike prijama, a time i očekivana točnost i preciznost. Na slici su prikazane specifikacije u kojima Garmin navodi očekivanu točnost manju od 15 metara (95%) za GPS, te 3-5 metara (95%) za DGPS.



Slika 3.3. Garmin GPSmap 76CS [13]

Specifikacije uređaja:

- Prijamnik : Omogućen WAAS, 12 odvojenih kanala
- Vrijeme određivanja pozicije : Topao - 15-ak sekundi / hladan - 45 sekundi. Autolociranje - oko 5 minuta
- Antena : ugrađena quad helix
- Kompas : točnost +/- 5 stupnjeva, rezolucija 1 stupanj
- Brzina odziva : jednom u sekundi, kontinuirano
- GPS točnost :
  - pozicija <15 metara
  - brzina 0.05 m/s
- DGPS točnost :
  - pozicija: 3 - 5 metara
  - brzina 0.05 m/s
- Povezivost : NMEA 0183 verzija 2.3, RS-232 i USB za povezivanje s računalom

3.2.2. iPad 2

iPad 2 je tablet računalo tvrtke Apple koje je u istraživanju korišteno zbog sve raširenije primjene u zrakoplovstvu (Slika 3.4.). Isto tako, HZNS u školovanju pilota koristi navedene uređaje (iPad Air) kao dopunsko navigacijsko sredstvo. Bitno je napomenuti da navedeni uređaj osim GPS sustava podržava i sustav GLONASS. Ovaj uređaj je u istraživanju posebno zanimljiv jer zbog osebujne politike tvrtke Apple službeni podatci o točnosti nisu pronađeni. Također uređaj koristi AGPS (Assisted GPS) koji se oslanja na prijam signala od baznih stanica mobilnih operatera za određivanje početne pozicije. Iz iskustava pilota, signal baznih stanica mobilnih uređaja postaje nedostupan na visini većoj od otprilike 1 kilometar (ili preko približno 3000ft).



Slika 3.4. Apple iPad 2

3.2.3. Garmin GPSmap 196

Garmin GPSmap 196 je prijenosni navigacijski uređaj tvrtke Garmin namjenjen prvenstveno upotrebi u avijaciji (Slika 3.5.). Uređaj ima brojne funkcije te je sposoban služiti kao dopunsko navigacijsko sredstvo u zrakoplovu. Od brojnih funkcija, ona najbitnija je WAAS podrška, Jeppesen baza podataka s prilaznim točkama, radio sredstvima, aerodromima i slično. Za razliku od Garmina GPSmap 76CS, koji je univerzalne primjene, ovaj uređaj se se koristi u zrakoplovstvu. Unatoč tome, usporedbom karakteristika prijamnika iz službenih uputa za uporabu, vidljivo je da su karakteristike prijamnika gotovo identične, te je zanimljivo koristiti oba uređaja kako bi se ustanovilo postoji li razlika u točnosti ili je razlika isključivo u sučelju.



Slika 3.5. Garmin GPSmap 196 [12]

Specifikacije uređaja:

- Prijamnik : Omogućen WAAS, 12 odvojenih kanala, kontinuirano praćenje
- Vrijeme određivanja pozicije : Topao - 15-ak sekundi / hladan - 45 sekundi. Autolociranje - oko 2 minute
- Antena : odvojena quad helix
- Kompas : n/a
- Brzina odziva : jednom u sekundi, kontinuirano
- GPS točnost :
  - pozicija <15 metara
  - brzina 0.05 m/s
- DGPS (USCG) točnost :
  - pozicija: 3 - 5 metara
  - brzina 0.05 m/s
- DGPS (WASS) točnost :
  - pozicija: < 3 metra
  - brzina 0.05 m/s
- Povezivost : NMEA 0183, RS-232 za povezivanje s računalom

3.2.4. Garmin GPSmap 496

Garmin GPSmap 496 je naprednija verzija Garmina 196. Izgledom gotovo identični (slika 3.5. i 3.6.), ovi se uređaji razlikuju po tome što 496 ima ekran u boji te neke naprednije funkcije. Dodano je USB sučelje za spajanje s računalom, posjeduje napredniju zrakoplovnu navigacijsku bazu, automobilsku navigaciju i slično. Osim prvih primjetnih promjena poput ekrana u boji, ono što je najinteresantnije za istraživanje su karakteristike prijamnika. One su navedene u nastavku i vidljivo je da unatoč tome što oba prijamnika imaju prilično različitu namjenu od Garmina 76CS, te je 496 znatno noviji uređaj, karakteristike prijamnika se, barem na papiru, ne razlikuju osobito.



Slika 3.6. Garmin GPSmap 496 [12]

Specifikacije uređaja:

- Prijamnik : Omogućen WAAS, 12 odvojenih kanala, kontinuirano praćenje
- Vrijeme određivanja pozicije : Topao - 15-ak sekundi / hladan - 45 sekundi. Autolociranje - oko 2 minute
- Antena : odvojena quad helix
- Kompas : n/a
- Brzina odziva : 5 u sekundi, kontinuirano
- GPS točnost :
  - pozicija <15 metara
  - brzina 0.05 m/s
- DGPS (USCG) točnost :
  - pozicija: 3 - 5 metara
  - brzina 0.05 m/s
- DGPS (WASS) točnost :
  - pozicija: < 3 metra
  - brzina 0.05 m/s
- Povezivost : NMEA 0183, RS-232 za povezivanje s računalom, USB

4. Opis mjerenja

Mjerenje je izvedeno u dvije faze, prvi dio mjerenja na zemlji, a drugi iz aviona u zraku. Cilj prvog dijela mjerenja je bio pokušati ustanoviti početno stanje GPS prijamnika, ustanoviti eventualne razlike i greške te se upoznati s radom sustava u okolnostima koje nisu toliko dinamične kao letenje prilaza za slijetanje zrakoplovom.

4.1. Mjerenja na zemlji

Za mjerenja na zemlji odabrana lokacija je bila poligon autoškole. Odabrani prostor je širok i udaljen od grada, te nije zaklonjen nikakvim objektima. Radi se o otvorenom prostoru na kojem je smatrano da će utjecaj interferencije, refleksije i slično biti sveden na minimum. Kako na navedenom prostoru nema objekata koji bi poslužili montiranju opreme, korišteno je osobno vozilo na čiji krov su bile montirane antene i GPS prijamnici, dok je prijenosno računalo bilo smješteno u vozilu i bilježilo rezultate mjerenja. GPS prijamnici bili su spojeni s računalom preko kabla (COM > USB) te su bilježene NMEA 0183 rečenice.

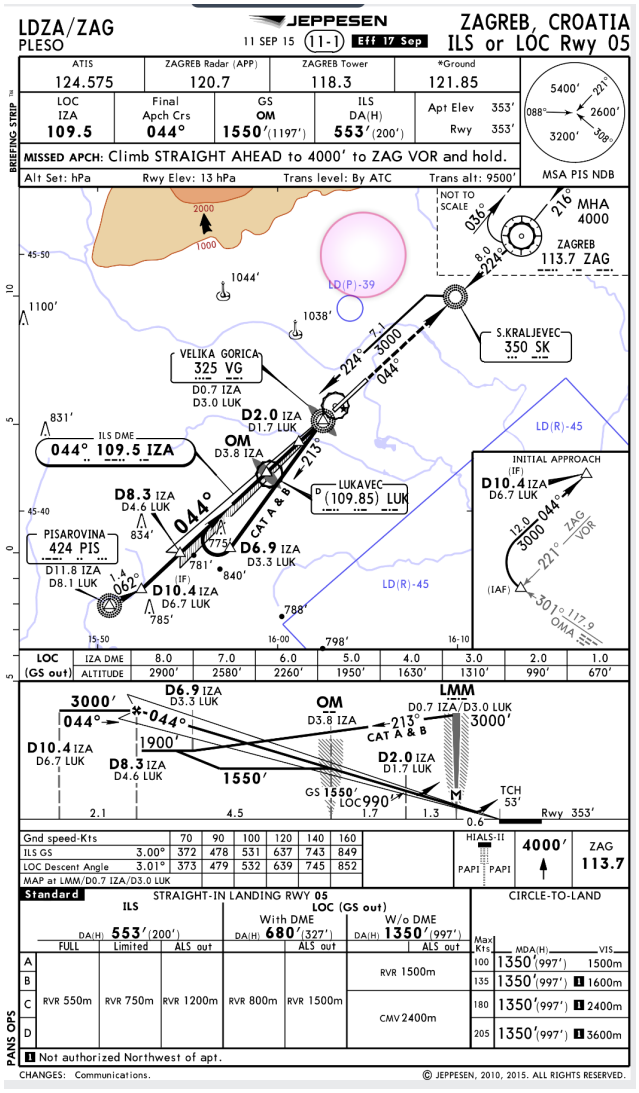
U prvom dijelu mjerenje je bilo statičko. Vozilo je bilo parkirano i oprema postavljena, ali nije bilo uključeno spremanje podataka. Praćene su vrijednosti signala satelita i cijeli je sustav pušten oko pola sata da se stabilizira te da se osvježe navigacijske poruke i almanah. Nakon otprilike pola sata, za pretpostaviti je da je sustav stabilan i osvježen novim porukama te je pokrenuto bilježenje rezultata na računalu. Program VisualGPS može se pokrenuti više puta, te se u svakom prozoru namjesti primanje podataka s drugog COM porta. Mjerenje je trajalo pola sata.

Drugi dio mjerenja odvijao se također na poligonu. Još jedna prednost ovog poligona je što je površina asfaltirana te su iscrtane ravne linije na asfaltu koje se koriste za potrebe školovanja vozača kamiona. Te ravne linije poslužile

su za mjerenje po pravcu. Zadržana je ista konfiguracija prijamnika, ali se vozilo kretalo po toj ravnoj liniji i podaci su bilježeni na računalo. Iako je dionica relativno kratka, ovdje je bila namjera stvoriti početne uvjete za mjerenje prilaza za slijetanje iz zraka, koji je također ravna linija, ali nema mogućnosti ovakve direktne usporedbe s linijom na zemlji.

4.2. Mjerenja iz zraka

Za mjerenje iz zraka korišten je avion Cessna 172N, 9A-DAS. Zrakoplov je opremljen opremom potrebom za IFR letenje, dva visinomjera, dva NAV prijamnika i CDI prikaznika (za ILS prilaz). Mjerenje je provedeno na prilazu za stazu 05 Međunarodne zračne luke Zagreb. Promatrani segment je od početne točke prilaza na 8.3 NM prema IZA DME do visine odluke (DH) kod MM na 0.7 NM prema IZA DME. Dodatni podaci vidljivi su iz slike 4.1. Početna točka prilaza (točka presretanja ILS signala) nalazi se na visini 3000 ft, a visina odluke je 553 ft. Visina na OM je 1550 ft, a završni kurs prilaza je 044 stupnja.



Slika 4.1. Karta ILS/LOC prilaza na LDZA [14]

Za mjerenje korišten je ILS prilaz, dakle ILS snop je korišten kao "fiksna" linija u prostoru koja je praćena pomoću opreme na zrakoplovu, a GPS prijamnici su snimali poziciju, odnosno track. Prilaz su snimala dva GPS prijamnika i iPad-ov GPS/GLONASS prijamnik. Ploča s instrumentima u zrakoplovu snimana je fiksno montiranom kamerom za kasniju usporedbu odstupanja od ILS-a i odstupanja zabilježenog GPS-om. Prilaz je bio vrlo točan prema prikaznicima na zrakoplovu te je za pretpostaviti da je fiksan i da

idealno odgovara zamišljenoj putanji ILS prilaza. S tom pretpostavkom, mjerena su i analizirana odstupanja prikazivanja GPS-a od stvarne putanje leta, odnosno ILS putanje prilaza.

Naglasak je stavljen na točnost letenja po localizeru, odnosno horizontalnu točnost. Kod GPS prilaza, odnosno RNAV prilaza, navigacijska točnost treba ispunjavati zahtjeve za navigacijsku točnost (RNP - required navigation performance). Primjerice, RNP 0.1 označava točnost od 0.1 NM u 95% vremena. Zahtjev je dan za horizontalnu navigaciju odnosno LNAV. Vertikalno vođenje se izvodi pomoću barometarskog visinomjera pa tako GPS prilaz spada u neprecizne prilaze.

Mjerenje je također provedeno u različita doba dana i pri različitim temperaturama. Kod nepreciznog prilaza, vertikalno vođenje izvodi se pomoću barometarskog visinomjera koji je podložan greškama uzrokovanim nestandardnom temperaturom zraka. Kako nije bilo uvjeta za provjeru odstupanja visinomjera pri vrlo hladnom vremenu, pokušaj određivanja odstupanja zamišljen je tako da se jedan set mjerenja izvede po vrlo toplom vremenu pri kojemu temperatura odstupa barem +15 stupnjeva od ISA, a drugo mjerenje pri kojem je temperatura što manja.

Prvo mjerenje tako je izvedeno kada je u trenutnu mjerenja službena temperatura zraka na LDZA iznosila 28 stupnjeva, dok je u drugom mjerenju iznosila 14 stupnjeva.

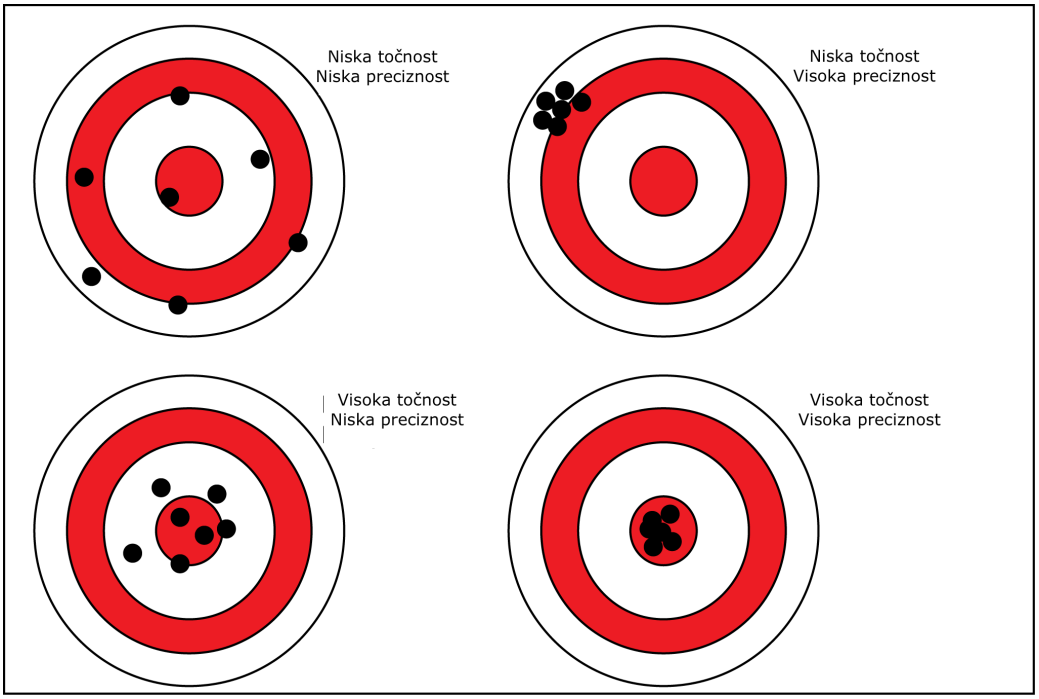
5. Točnost i preciznost GNSS-a

Pozicija dobivena putem bilo kojeg GNSS sustava svodi se na mjerenje. Konkretno, u slučaju GNSS-a, kao i više manje svakom navigacijskom slučaju, svodi se na mjerenje vremena. Još u doba kada se pozicija određivala sekstantom, osnovni problem s koji su se susretali mornari bilo je koliko toliko točno mjerenje vremena. Razvojem satova greška se svela na prihvatljivu razinu, dovoljnu za određivanje približne pozicije. U današnje vrijeme, sateliti koriste atomske satove koji imaju odstupanje od svega jednog milijuntog dijela sekunde godišnje. Unatoč tome, kao i svako mjerenje, i mjerenje vremena kod GNSS-a nije savršeno. O razlozima grešaka nešto više je navedeno ranije. Kako bi se iz mjerenja dobilo što više korisnih informacija, ona moraju biti pravilno analizirana.

Greške se mogu u grubo svrstati u dvije kategorije; greške sustava i slučajne greške. Greške sustava su sistemske greške koje se mogu opisati i modelirati jednadžbama koje opisuju mjerenje te tako njihov utjecaj eliminirati ili svesti na najmanju moguću mjeru. Slučajne greške su one čiji se utjecaj ne može jasno definirati i modelirati, ali se njihove statističke osobine mogu koristiti kako bi se optimizirao rezultat analize.

Ove greške mogu se usporediti s primjerima iz prethodnog poglavlja. Primjerice, kontrolna stanica mjeri i bilježi grešku sustava, grešku satelitskog sata i slično. Ta pogreška primjenjuje se u novim jednadžbama i sadržana je u navigacijskoj poruci. To je osnovni princip funkcioniranja GBAS-a. Te greške biti će zajedničke za sve prijamnike u području pokrivanja dotičnih satelita, te ako prijamnik dobije informaciju o tim greškama, uspješno će ih smanjiti ili u potpunosti eliminirati. Za razliku od toga, slučajne greške u mjerenju poput primjerice termalnog šuma u prijamniku ili greške refleksije signala ne mogu se jasno definirati i opisati nekim univerzalnim modelom. Pozicija prijamnika se može procijeniti u trenutku mjerenja, a udaljenost od prave pozicije ovisi o slučajnoj grešci u mjerenju. Proučavanjem većeg broja mjerenja, može se doći do rezultata da su mjerene pozicije blizu jedna drugoj, što se definira kao

visoka preciznost. Visoka preciznost međutim ne garantira da težište tih mjerenja u stvarnosti nije za neku vrijednost udaljeno od stvarne vrijednosti, što bi značilo nižu točnost. Ono što se u današnjoj literaturi ne spominje previše, a u ovom radu će biti posebno naglašeno je razlika između preciznosti i točnosti GNSS sustava. Prije nego se stvari malo zakompliciraju, razliku između ova dva pojma najbolje opisuje slika 5.1.



Slika 5.1. Razlika između točnosti i preciznosti

Slika jasno ilustrira razliku između točnosti i preciznosti. Prva meta prikazuje slučaj niske točnosti i preciznosti - pogodci su i udaljeni od središta i jedan od drugoga. U drugom slučaju grupirani su blizu jedan drugome, ali su udaljeni od središta što označava visoku preciznost, ali nisku točnost. Treći slučaj je slučaj visoke preciznosti ali niske točnosti, dok posljednji slučaj jasno opisuje visoku točnost i visoku preciznost - svi su pogodci u središtu mete i blizu jedan drugome.

Još jedan praktičan primjer je primjer sata koji u trajanju od mjesec dana odstupa od stvarnog vremena za primjerice točno 60 sekundi unaprijed.

Taj sat je iznimno precizan jer se odstupanje od stvarnog vremena ne mijenja cijeli mjesec, ali nije točan jer ne pokazuje točno vrijeme.

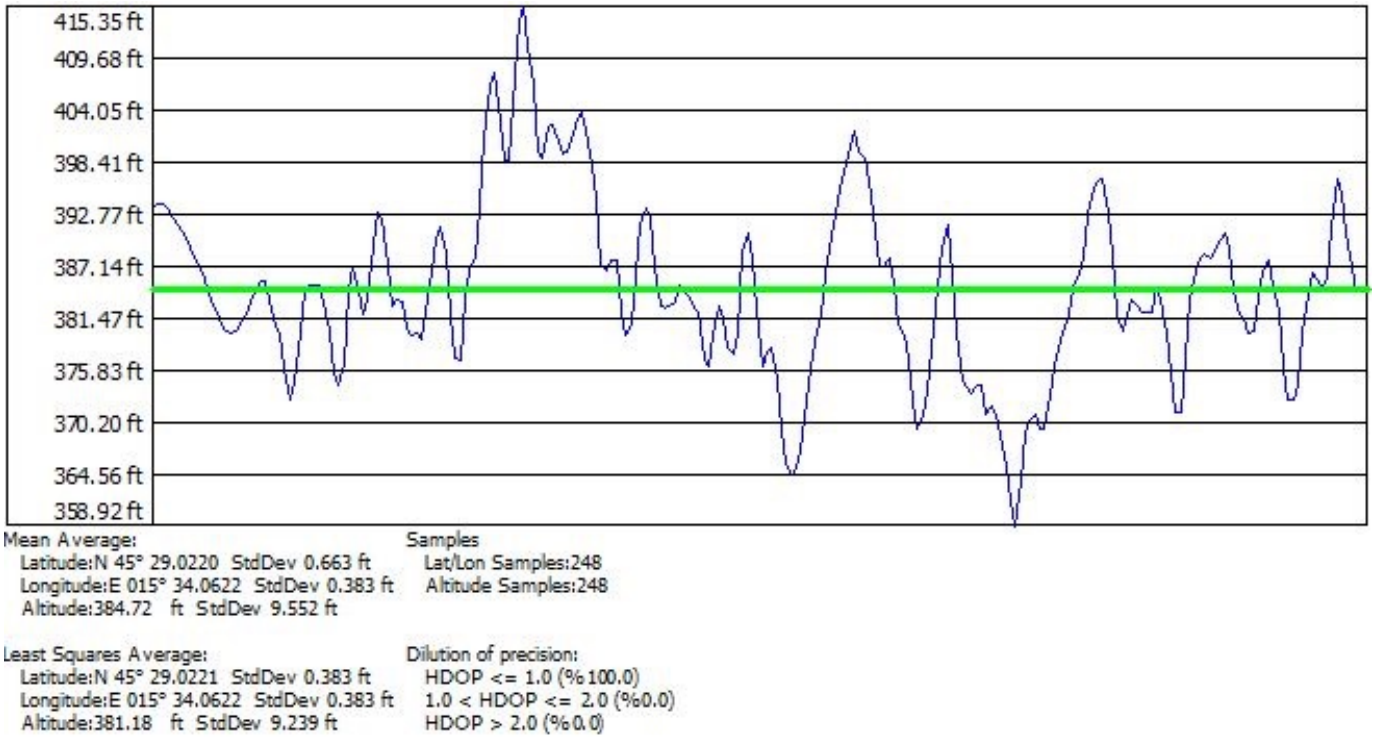
U prethodnom poglavlju su opisani uređaji kojima se provodilo mjerenje kako bi pokušali pokazati što teorija o točnosti i preciznost zapravo znači u praksi, konkretno za stazu 05 Međunarodne zračne luke Zagreb. Za svaki uređaj navedene su specifikacije proizvođača koje same za sebe ne govore puno te će u ovom poglavlju nastojati biti bolje pojašnjene. Isto tako, proizvođači mogu prikazati karakteristike svog uređaja na razne načine, ni jedan od kojih nije pogrešan, ali može bitno "uljepšati" rezultate u odnosu na ostale. Cilj je u ovom poglavlju na što jednostavniji način, uporabom osnova statistike i jednostavne matematike objasniti razliku između pojmova točnosti i preciznosti te analizirati greške pozicioniranja.

Alati koji se danas koriste nisu novost već su izumljeni prije više od 350 godina kada su znanstvenici pokušali kvantificirati grešku u mjerenju i razumjeti neke prirodne obrasce (primjerice Gauss-ova krivulja).

Za opis sustava i metoda koje mjere ili procjenjuju grešku koristit ćemo pojmove preciznost i točnost (eng. precision and accuracy), pojmove koji opisuju odnos između mjerenja. U literaturi i u govoru se oba pojma koriste prilično slobodno ili još gore, u svojstvu sinonima, unatoč njihovom specifičnom značenju. Zabuni dodatno pridonosi to što je točnost za potpuno razumijevanje potrebno podijeliti na unutarnju i vanjsku točnost.

Mjerenja u GNSS sustavima imaju karakteristiku da s dovoljno prikupljenih uzoraka dobivamo distribuciju vjerojatnosti u obliku zvona, poznatiju kao Gaussovu ili normalnu distribuciju. Prikupljanjem dovoljnog uzorka dobiva se normalna distribucija koja predstavlja moćno oružje u borbi za svođenje pogreške na minimum.

Zanimljivost kod GNSS-a je što prikupljanjem podataka u kratkom vremenu, podaci nemaju normalnu distribuciju, što je vrlo važno jer brojne primjene baziraju svoj rad na malom skupu podataka. Za kraće periode, prednost uzimanja prosjeka je upitna te ne mora popraviti točnost, dok kod dužih perioda ima velik značaj i formira se normalna distribucija. Još jedan od uzroka zabuna je olako shvaćanje koncepta točnosti.



Slika 5.2. Rezultati mjerenja visine - Garmin 76CS

Promatranje GNSS mjerenja kao signala ima prednost što mjerenje možemo obrađivati kao kod obrade signala, stoga se riječ mjerenje koristi kao zamjena za poziciju, a ne mjereni radio val i pseudo udaljenost. Promatranje jednog mjerenja, odnosno niza izmjerenih pozicija kao signala, poput primjerice istosmjernog napona, može se obradom signala dobiti značajniji digitalni izlaz. Signal je način usporedbe dvije vrijednosti, odnosno jedne u odnosu na drugu.

Na slici 5.2. je prikazan GPS signal, odnosno izmjerene vrijednosti visine za prvo, statičko mjerenje dok je GPS prijamnik bio montiran na krov automobila. Automobil je bio parkiran na otvorenom prostoru poligona autoškole, a GPS antene postavljene na krov automobila. Statičko mjerenje trajalo je pola sata te je sa oba korištena GPS-a prikupljeno ukupno 415 uzoraka visine.

Na grafu je prikazana visina u stopama (ft) na vertikalnoj osi koja predstavlja zavisnu varijablu. Horizontalna os obično se naziva domena ili

nezavisna varijabla. U slučaju ispisa iz programa VisualGPS na njoj se nalazi podatak o vremenu, odnosno broju snimljenih uzoraka.

Podaci na grafu prikazani su u vremenskoj domeni jer je kod mjerenja spreman podatak o visini u jednakim vremenskim razmacima, u ovom slučaju prikupljeno je 248 uzoraka, dok je mjerenje trajalo otprilike pola sata. Prvi korak kod računanja bilo kakve greške i analize grešaka je računanje prosjeka. Prosjek je lako izračunati, i kao što je navedeno na početku poglavlja potrebno je samo osnovno znanje matematike. Prosjek je označen s Xprosjek, a za izračun je potrebno zbrojiti sve vrijednosti mjerenja (sve visine Xi), te podijeliti s brojem uzoraka *N*. Formula za prosjek dakle glasi :

$$x_{prosjek} = \frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N\text{-}1} x_i \qquad (1)$$

Računanje prosjeka znatno olakšava program VisualGPS koji automatski računa prosjek, a formula služi boljem razumijevanju materije. Kao što je i vidljivo ispod samog grafa, prosjek je u ovom slučaju 384.72 ft. Ovaj broj predstavlja "središte" signala, odnosno prosječnu visinu kada se u obzir uzmu sva mjerenja. Na grafu je ta visina jasno prikazana zelenom linijom te je odmah vidljivo odstupanje od te vrijednosti i koliko je zapravo malo puta ta konkretna vrijednost izmjerena. Prosjek sam po sebi ne pruža nikakvu informaciju o ukupnoj grešci u mjerenju, a koja je očita iz grafa. Sljedeći korak koji pruža taj podatak je računanje koliko je svako pojedino mjerenje udaljeno od prosjeka, odnosno koliko je rasipanje rezultata. Matematičkim izrazom prikazano $|x_i\text{-}x_{prosjek}|$ označava koliko pojedini uzorak odstupa od prosjeka. Kao primjer, dok je odstupanje na samom kraju mjerenja otprilike 0, maksimalno odstupanje od 30,63 ft zabilježeno je u prvoj trećini mjerenja. Prosječna greška, odnosno standardna devijacija je još jedan od podataka koji VisualGPS računa automatski, a princip zbrajanje svih grešaka i dijeljenje brojem uzoraka N. U slučaju ovog mjerenja, standardna devijacija iznosi 9.552 ft.

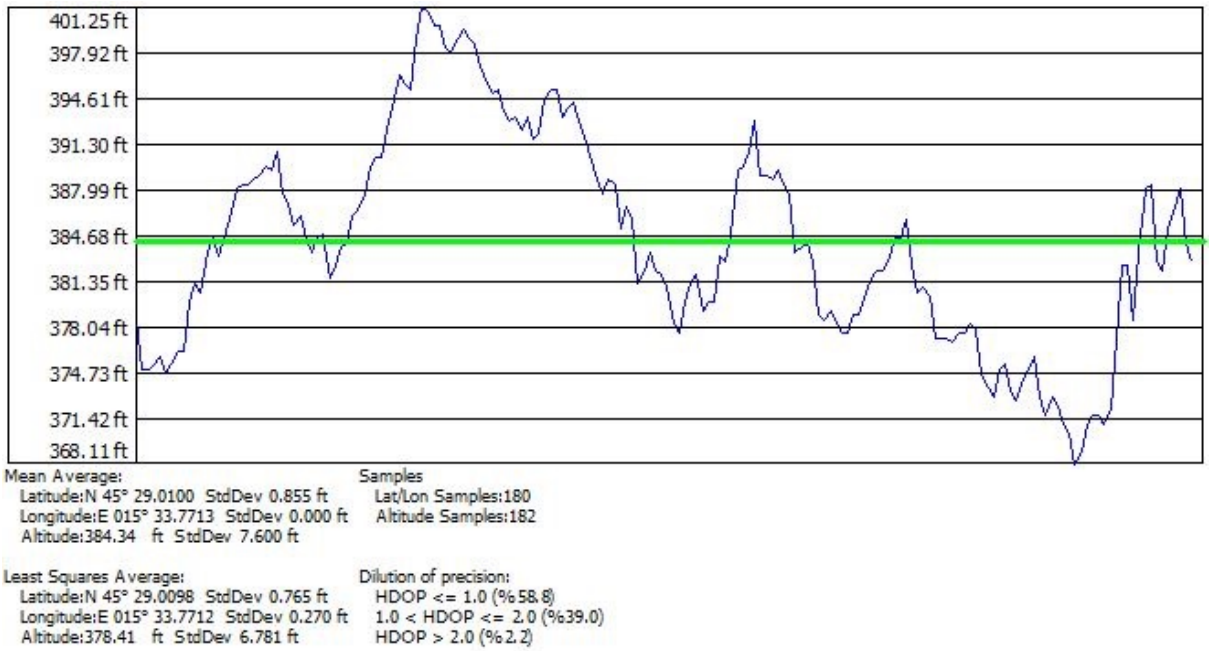
Standardna devijacija pruža podatak o raspršenju rezultata od prosjeka, što je ranije definirano kao preciznost. U slučaju male devijacije govori se o visokoj preciznosti i obratno, velika devijacija znači malu preciznost.

Kod usporedbe rezultata devijacije i raspršenja raširenij je pristup preko kvadratnog prosjeka kod kojega se svaki $|x_i\text{-}x_{prosjek}|$ kvadrira : $|x_i\text{-}x_{prosjek}|^2$. U tom slučaju konačni rezultat potrebno je korjenovati, a jednadžba za standardnu devijaciju poprima sljedeći oblik :

$$s^2=\frac{1}{N\text{-}1}\sum_{i=0}^{N\text{-}1}(x_i\text{-}x_{prosjek}) \qquad (2)$$

Primjenom nove jednadžbe standardna devijacija iz prvog mjerenja iznosi 9.239 ft.

Ranije je spomenuto da su prilikom početnog stacionarnog mjerenja korištena dva GPS uređaja, Garmin GPSmap 76CS i Garmin GPSmap 196. Oba su puštena da snimaju u isto vrijeme. Rezultati drugog GPS-a prikazani su na slici 5.3.



Slika 5.3. Rezultati mjerenja visine - Garmin 196

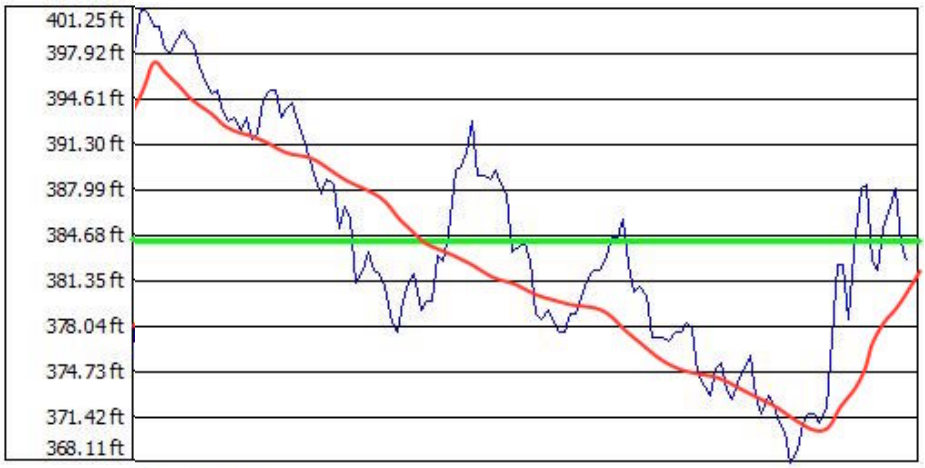
U ovom drugom slučaju uzeta su 182 uzorka i izmjerena je prosječna vrijednost visine od 384.34 ft uz standardnu devijaciju 7.6 ft, ili metodom kvadrata visina od 378.41 ft i standardna devijacija 6.781 ft.

Na ovom drugom grafu puno je bolje uočljiva karakteristika GPS signala kod koje je ranije spomenuto da se normalna distribucija ne ponaša kako bi se moglo očekivati. I ovdje je kroz cijelo mjerenje zelenom linijom prikazana vrijednost prosjeka. No pažljivijim promatranjem može se uočiti da bi mjerenjem samo pojedinog dijela grafa, ili uzimanjem u obzir samo dijela mjerenja dobili bitno drugačije rezultate. Ovdje je uočljiva i razlika između slučajne greške (buke) koja je više manje konstantna tijekom mjerenja, dok vrijednost prosjeka varira u vremenu. Vidljivo je naime da nakon početnog porasta visine (a time i prosjeka), u nastavku prosjek pada prema kraju mjerenja. Slučajna greška na grafu se uočava kao poremećaj više frekvencije, odnosno oscilacija oko vrijednosti prosjeka koja se ponaša više-manje u skladu s Gaussovom razdiobom. Analizom manjeg dijela grafa dobiva se prilično točna vrijednost standardne devijacije, dok se s velikom vjerojatnošću u tom slučaju dobiva pogrešna vrijednost prosjeka. Uzrok te pojave treba tražiti u pomičnom prosjeku, budući da prosjek, zajedno sa visokofrekventnom greškom, varira oko stvarne vrijednosti. Budući da je kretanje prosjeka oko stvarne vrijednosti relativno dugotrajno (za potrebe navigacije), uzimanjem manjih segmenata ne može se znati koji je u zapravo bliži istini, odnosno stvarnoj vrijednosti.

Za očekivati je da bi analizom cijelog (duljeg) mjerenja rezultat bio točniji, ali to nije uvijek istina. Prosjek se može približavati ili udaljavati od stvarne vrijednosti unutar vremena mjerenja, ali ne može se uočiti obrazac koji bi potvrdio da prosjek teži stabilnom variranju oko neke vrijednosti, što je posebno uočljivo na drugom grafu.

Ranije je navedeno da na grafovima možemo uočiti dvije komponente signala. Signal više frekvencije može se nazvati bukom i ima karakteristiku slučajne buke koja varira oko vrijenosti pomičnog prosjeka. Pomični prosjek je niže frekvencije i varira oko vrijednosti prosjeka odnosno stvarne vrijednosti (koja nije poznata). Činjenica da je signal sastavljen od ove dvije komponente

predstavlja glavni problem. Nije moguće pouzdano povećati točnost prikupljanjem i analizom veće količine podataka sve dok signal niže frekvencije ne poprimi karakteristike slučajnog procesa. To je upravo situacija na kojoj se temelji ovo poglavlje; prikupljanjem veće količine podataka u velikom broju slučaja može udaljiti prosjek od stvarne vrijednosti, umjesto da ga približi. Ilustracija pomičnog prosjeka i varijacije prikazana je crvenom linijom na slici 5.4.

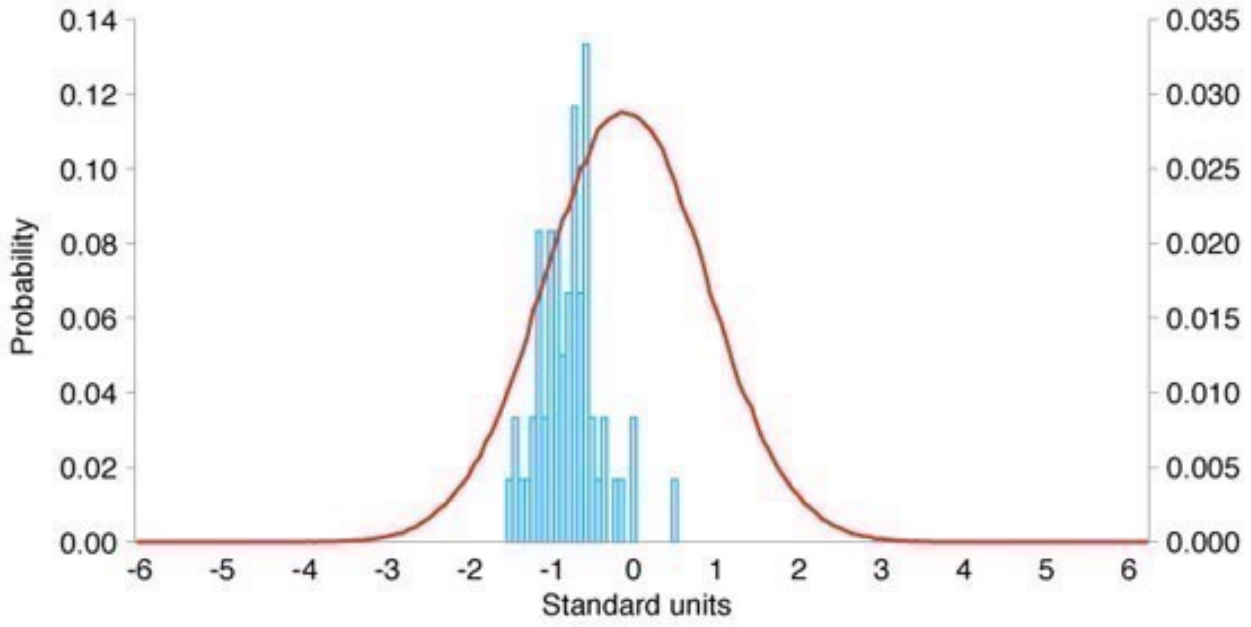


Slika 5.4. Pomični prosjek

Idealno bi bilo kada bi GPS podaci imali oblik Gaussove distribucije i kod kratkog i kod dugog mjerenja. To međutim nije slučaj zbog kombinacije grešaka visokih i niskih frekvencija. Da bi proces bio prema Gaussovom on mora biti slučajan, što nije slučaj na drugom grafu. Gaussova distribucija dakle nije pravilo kod raspodjele GPS signala, ali sve ovisi o trajanju mjerenja.

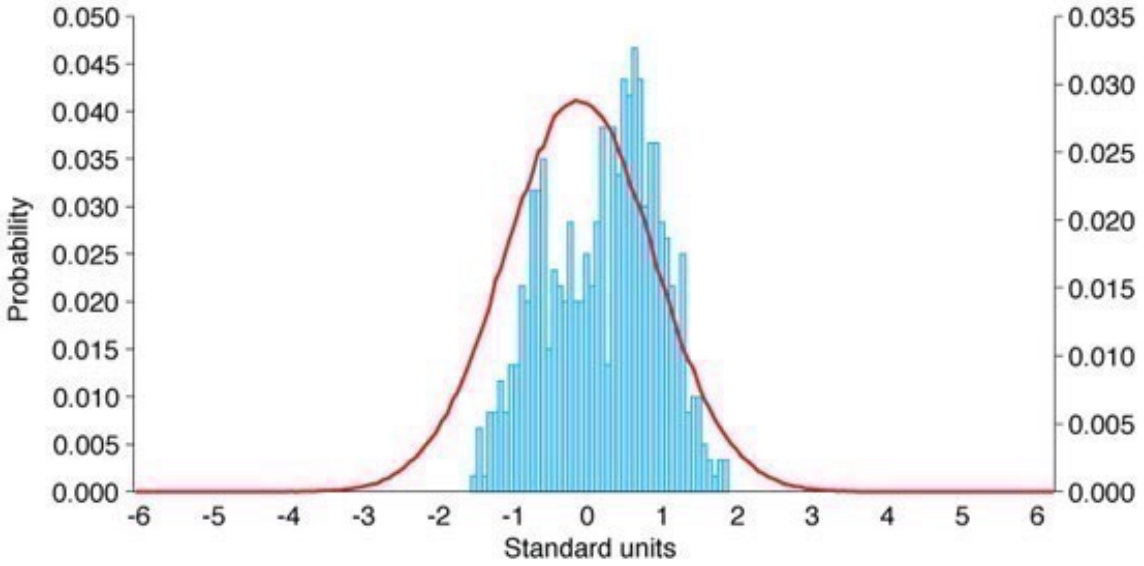
Mjerenje koje je obavljeno u ovom radu trajalo je pola sata, i u njemu se primjećuju ranije spomenute anomalije. Istraživanja s kanadskog sveučilišta New Brunswick pokazuju ponašanje kod prikupljenih čak 96 sati podataka. U nastavku su prezentirani njihovi rezultati kod mjerenja u trajanju od jedne minute, 10 minuta, jednog sata i 12 sati, u usporedbi s krivuljom normalne distribucije nastalom nakon statističke obrade podataka prikupljanih 96 sati. Cilj istraživanja je bio utvrditi kada otprilike prikupljani podaci počinju poprimati oblik Gaussove krivulje, popularno zvani “oblik zvona”.

Podaci nakon 1 minute prikazani su na slici 5.5. u obliku frekvencijske distribucije, jer je tako puno lakše uočiti “oblik zvona”.



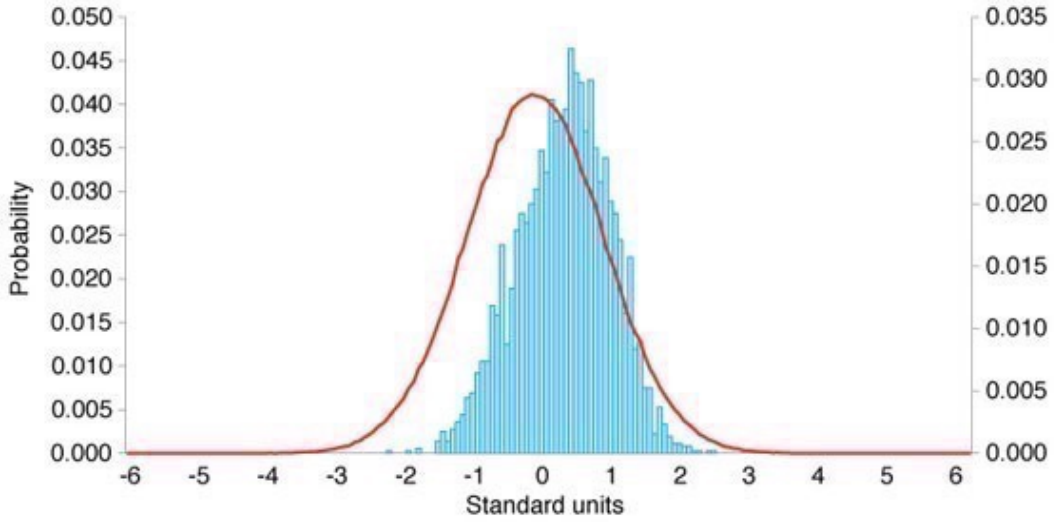
Slika 5.5. Frekvencijska distribucija 1 minute GPS signala [4]

Crvena krivulja predstavlja normalnu Gaussovu razdiobu dobivenu statističkom obradom 96 sati prikupljenih podataka, dok su plave linije frekvencijska distribucija GPS signala. Lijeva vertikalna os predstavlja vjerojatnost distribucije GPS signala, dok desna prikazuje vjerojatnost za normalnu razdiobu. Ovdje je jasno uočljivo ono što potvrđuju i mjerenja u ovom radu, kratka mjerenja nemaju oblik normalne razdiobe. Također, u nastavku na slici 5.6 vidi se da također još ne postoji naglašeni “oblik zvona”, odnosno normalna razdioba.



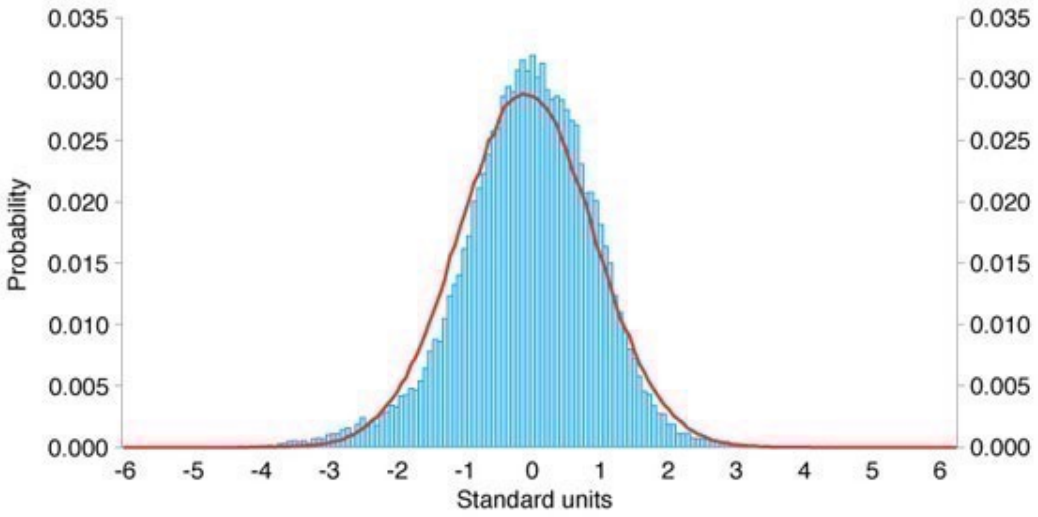
Slika 5.6. Frekvencijska distribucija 10 minuta GPS signala [4]

Iduća slika (slika 5.7.) prokazuje podatke za sat vremena mjerenih GPS podataka. Ovdje se počinje jasno nazirati oblik normalne razdiobe, ali isto tako je uočljivo da je cijelo "zvono" izmaknuto za neku vrijednost od crvene krivulje.



Slika 5.7. Frekvencijska distribucija 1 sata GPS signala [4]

Pojava normalne distribucije kod 1 sata mjerenja (slika 5.7.) znači da se može početi koristiti standardni model greške ili Gaussov model. Definicija kaže : Prosjek većeg broja mjerenja je točniji od svakog pojedinog mjerenja za faktor jednak korijenu broja mjerenja, pod uvjetom da podaci slijede Gaussov model i normalnu razdiobu. [4] To je ilustrirano na slici 5.8. koja prikazuje podatke nakon 12 sati mjerenja.



Slika 5.8. Frekvencijska distribucija 12 sati GPS signala [4]

Na slici 5.8. krivulja normalne razdiobe i GPS podatci se gotovo savršeno poklapaju, što dokazuje povećanje točnosti prema ranijoj definiciji.

Nakon svih grafova može se analizirati više stvari spomenutih ranije. Pomični prosjek postaje Gaussova krivulja nakon otprilike sat vremena mjerenja. To je pretpostavka na kojoj počiva GNSS navigacija, prelazak procesa u Gaussov proces nakon nekog vremena je nužno da bi proces funkcionirao. U protivnom, od pomičnog prosjeka ne bi bilo previše koristi kao pouzdanog navigacijskog sustava. Zbunjujuća je činjenica da se za većinu primjena pomični prosjek smatra normalnim. Prikupljanje veće količine podataka u nekim slučajevima može dovesti do obrnutog efekta od željenog, odnosno do smanjenja točnosti.

Krivulja GPS podataka poprima oblik standardnog modela nakon 12 sati što odgovara jednom prolasku GPS sazviježđa, odnosno potvrđuje utjecaj geometrijske greške (GDOP). Ne treba ni napomenuti kako je 12 sati iznimno dug period, pogotovo u zrakoplovnoj navigaciji kod koje važnost igraju minute, pa čak i sekunde.

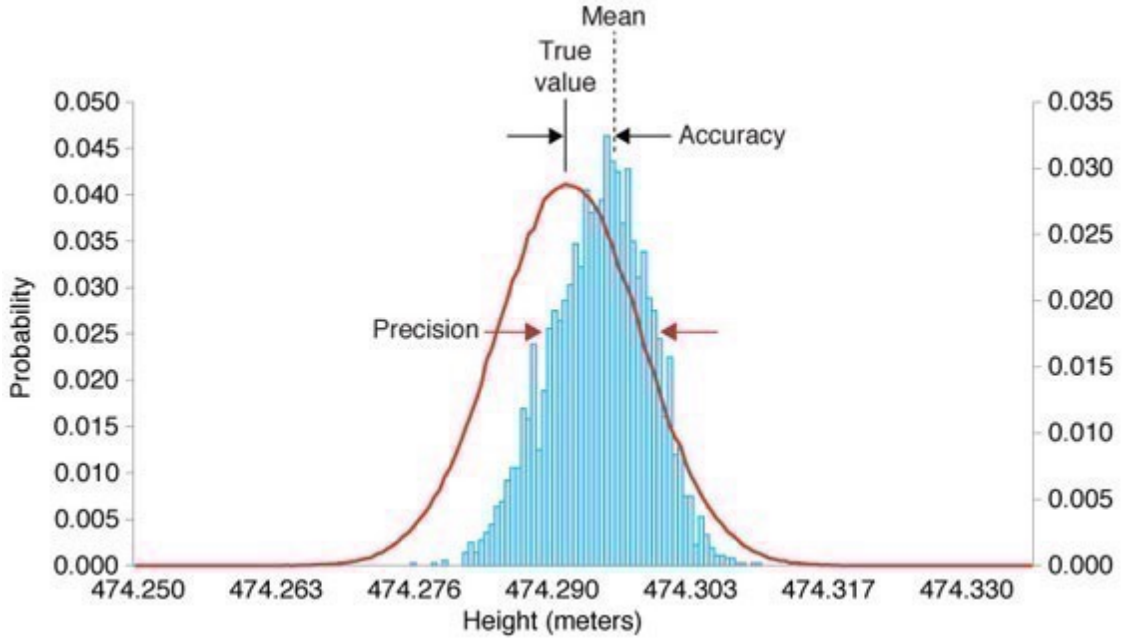
Na slici 5.9. prikazan je na istom primjeru odnos između točnosti i preciznosti. Isprekidana vertikalna linija označava prosjek mjerenog skupa podataka (signala), odnosno točku infleksije na histogramu. Crvenim je strelicama označena standardna devijacija od prosjeka (preciznost), dok je crnim strelicama označen pomak mjerene vrijednosti od stvarne poznate vrijednosti (točnost).

Točnost je razlika između stvarne vrijednosti i najbolje procjene te vrijednosti, što u teoriji zvuči jednostavno, iako u praksi za pravo nije. U ovom primjeru prikupljani su podaci u, za navigacijske pojmove, jako dugom vremenu (96 sati) te je statističkom analizom i formiranjem savršene distribucije dobivena crvena krivulja za koju se smatra da je istinita. Ovakav način pronalaženja istine naziva se unutarnja preciznost jer ne ovisi o vanjskom mjerenju ili izvoru. Pronalazak točne pozicije ili istinite tvrdnje odvija se u potpunosti unutar sustava, koristeći mjerene podatke i statističkom analizom istih. Problem kod točnosti je da nikakvom analizom i prosjecima ne možemo popraviti točnost ako prosjek ima pomak od stvarne vrijednosti, kao što je ranije prikazano. Za pretpostaviti je da na dovoljno dugom mjerenju prosjek poprima stvarnu vrijednost i da se statistička analiza može primijeniti i na mjerenjima kraćih perioda (poput ostalih kratkih primjera).

Drugi način provjere točnosti je korištenje nekog referentnog sustava izvan granica sustava jednog GPS prijamnika. Primjerice, može se koristiti više GPS prijamnika kako bi se utvrdila međusobna točnost jednog u odnosu na drugog. Usporedba rezultata s nekim vanjskim mjerenjem naziva se vanjska točnost.

U ovom diplomskom radu korištena je kombinacija unutarnjeg i vanjskog sustava. Korišteno je i više GPS prijamnika te se njihovi rezultati mogu uspoređivati, a isto tako korišten je i vanjski referentni sustav. U letu

zrakoplovom korišten je sustav instrumentalnog prilaza za slijetanje (ILS), za koji ako se pretpostavi da je ravna linija poznatih koordinata u prostoru, može se u odnosu na njega analizirati točnost određivanja pozicije svakog pojedinog GPS-a i usporedbe s iPad-om. Usporedba s iPad-om je zanimljiva zato što proizvođač ne navodi podatke o točnosti i preciznosti uređaja, a on se sve više koristi u zrakoplovnoj navigaciji, uz uporabu nekih aplikacija.



Slika 5.9. Odnos točnosti i preciznosti [4]

6. Rezultati mjerenja i analiza

Rezultati mjerenja prikupljeni su na prethodno opisan način. Kako se radi o velikoj količini podataka, moguće su brojne analize, no u sklopu ovog diplomskog rada ograničene su samo na određeni dio, dok su ostali podaci raspoloživi za buduća istraživanja i analize.

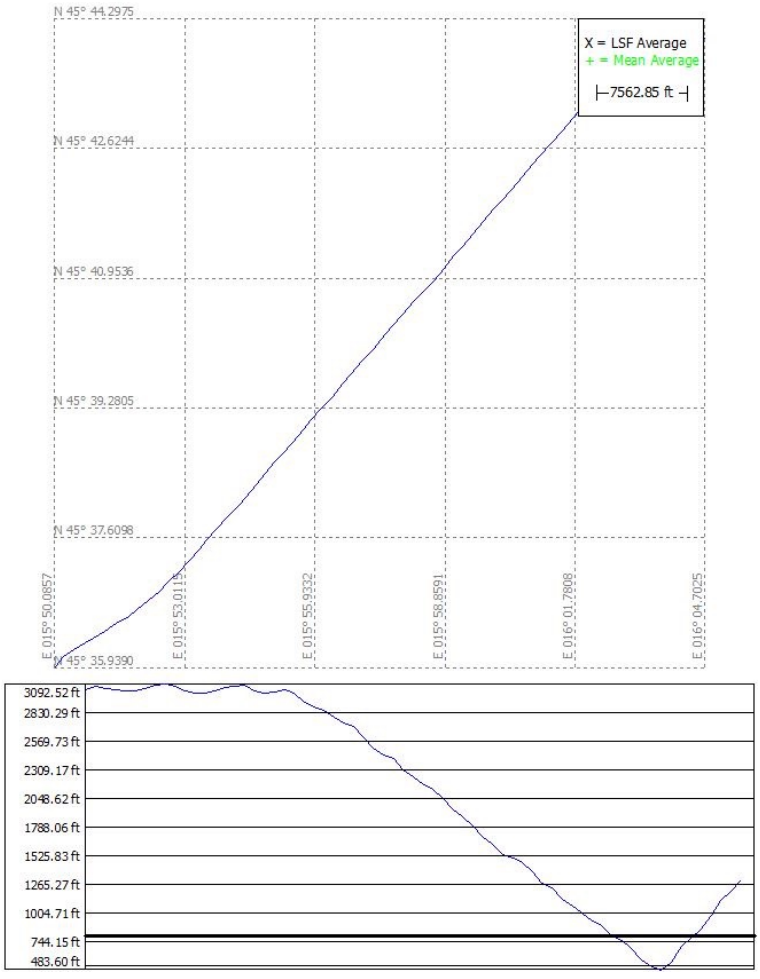
Osnovni cilj istraživanja bio je utvrditi postoji li razlika između točnosti i preciznosti te što ona predstavlja. Razlika je utvrđena u prethodnom poglavlju koje se također dijelom temelji na vlastitim mjerenjima, tako da nema potrebe za ponovnom analizom. Utvrđena je karakteristika GPS signala da ga se može podijeliti na slučajni šum i grešku uzrokovanu pomičnim prosjekom koju je teško ispraviti koristeći standardne statističke metode i normalnu razdiobu.

U nastavku će se ta znanja primijeniti na utvrđivanje odstupanja GPS-a od idealne putanje prilaza za slijetanje, te zadovoljava li točnost GPS-a zahtjeve za prilaz za slijetanje (RNP). Također, drugi vrlo bitan segment je utvrđivanje ispunjava li iPad zahtijevanu točnost, budući da jedini od korištenih uređaja nije primarno navigacijski uređaj, a pogotovo ne certificiran za zrakoplovstvo. Podatak o njegovoj točnosti je interesantan jer se iPad sve više koristi za zrakoplovnu navigaciju, pa tako i školovanje civilnih pilota u Hrvatskom zrakoplovnom nastavnom središtu koje je dio Fakulteta prometnih znanosti.

6.1. Horizontalna točnost

Horizontalna točnost GPS-a je značajna kod prilaza za slijetanje jer se kod GNSS prilaza koristi upravo podatak o horizontalnoj poziciji (LNAV) dok se za vertikalno vođenje koristi barometarski visinomjer o čemu nešto više u idućem poglavlju.

Za potrebe diplomskog rada mjerenje je obavljeno na primjeru prilaza za stazu 05 MZLZ (LDZA). Mjerenje je provedeno više puta, a GPS pozicija spremana je na prijenosno računalo u ranije spomenutom obliku NMEA rečenica. Podaci su zatim analizirani u programu VisualGPS. Analizirano je nekoliko reprezentativnih primjera prilaza kod kojih nije primijećeno odstupanje od ILS-a, tako da se može pretpostaviti da je prilaz bio po idealnoj putanji ILS-a te da je brzina konstantna. Na slici 6.1. prikazani su rezultati jednog od mjerenja u programu VisualGPS.

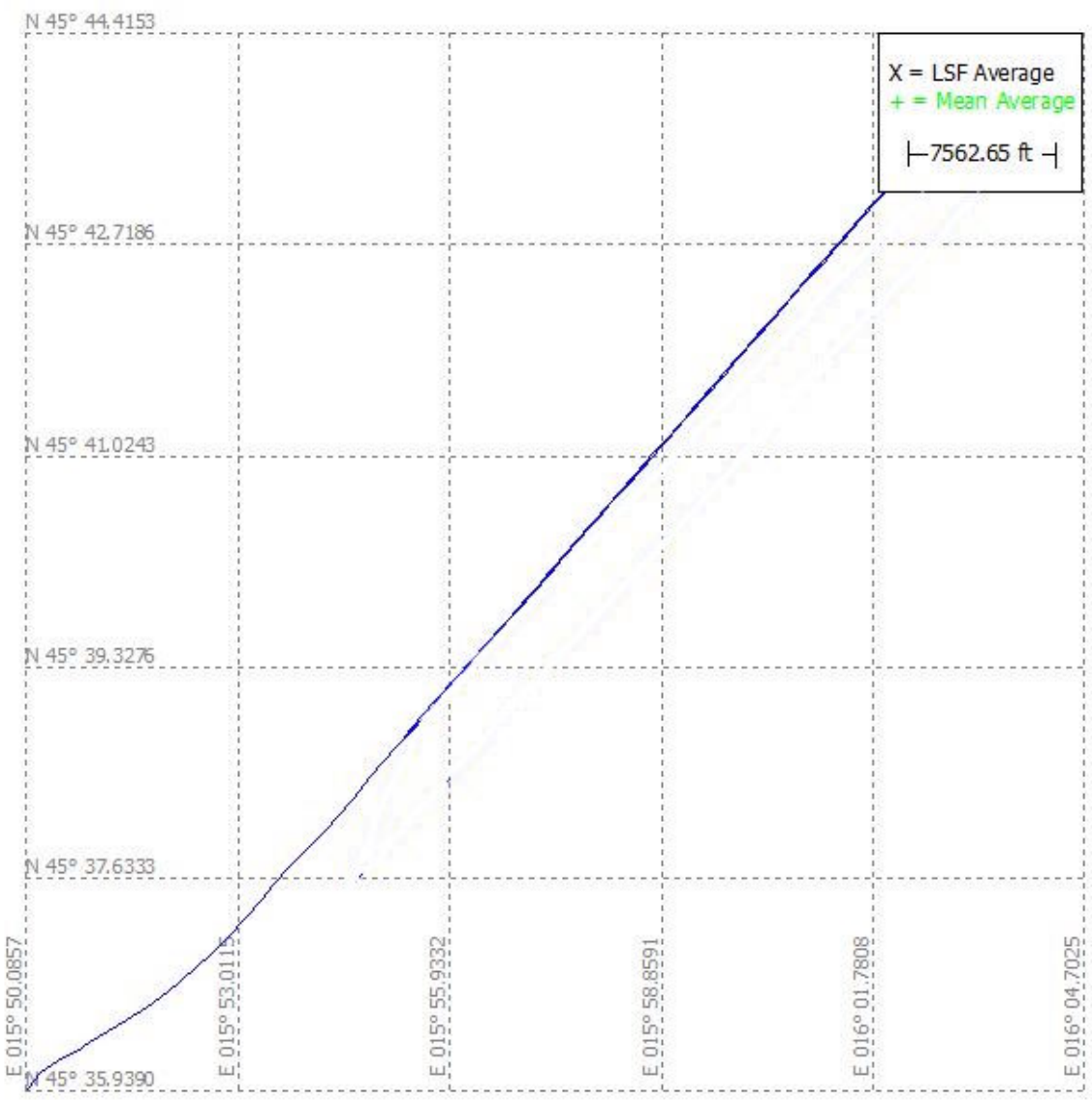


Slika 6.1. Horizontalni i vertikalni profil prilaza za stazu 05 LDZA

Na slici 6.1. je vidljiva prilazna putanja u horizontalnoj i vertikalnoj ravnini. Vertikalni profil je prikazan više kao informativni prikaz budući da se ne koristi GPS vertikalno vođenje kod prilaza. Unatoč tome, vidljive su puno veće oscilacije kod vertikalnog profila nego horizontalnog.

Sam horizontalni profil je potpuno ravna linija, što odgovara ILS snopu, osim samog početka koji predstavlja trenutak presretanja ILS snopa.

Na idućoj slici (slika 6.2.) prikazana su 3 mjerenja na istom grafu.



Slika 6.2. Prikaz 3 mjerenja na istom grafu

Na slici 6.2. je vidljivo da i nakon više prilaza linije odgovaraju ILS snopu odnosno preklapaju se. Vidljivo je zadebljanje linije koje predstavlja određeno raspršenje rezultata odnosno smanjenje preciznosti, ako pretpostavimo da su sve putanje bile identične (što je u realnim uvjetima teško postići). Unatoč tome, maksimalno izmjereno odstupanje od profila je 7 metara u završnom segmentu prilaza.

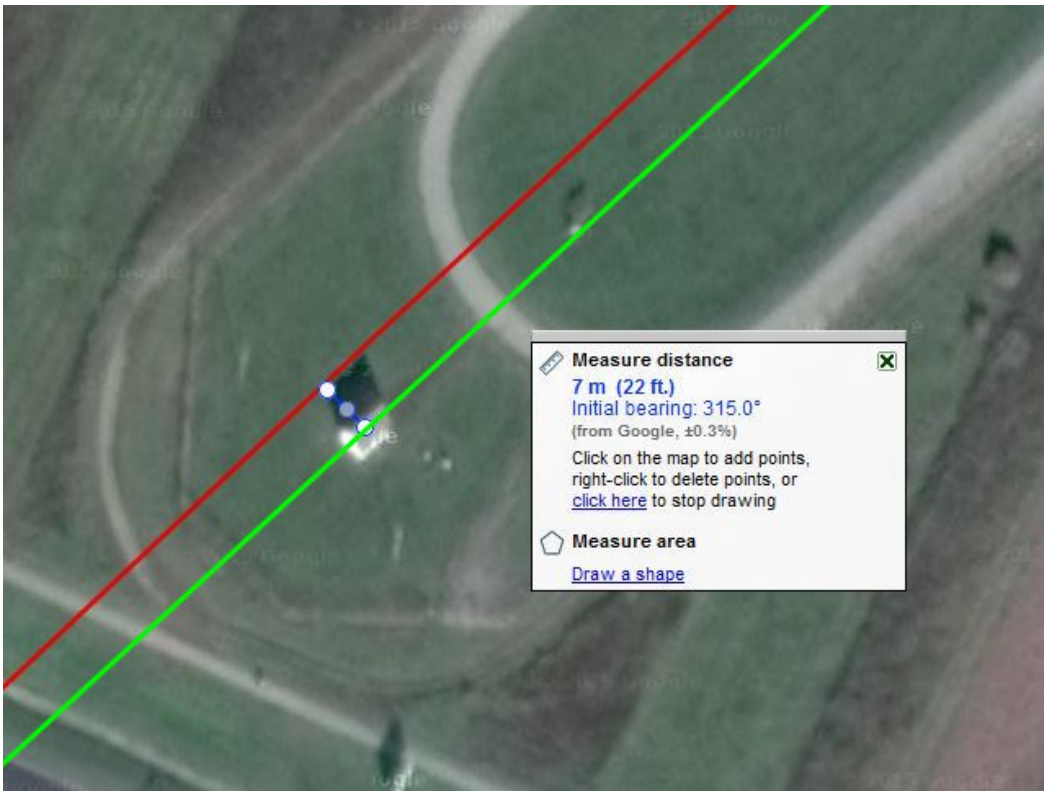
GPS prijamnici su u trenutku mjerenja koristili više od 8 satelita, te je funkcija EGNOS bila uključena. Sam prijamnik očitavao je preciznost +/- 1m. Sama preciznost je od ranije poznata iz prijašnjih istraživanja, i za očekivati je da će se za normalni GPS poklapati i biti unutar zahtjeva u 95% vremena. No ono što je interesantnije je ustanoviti koliko je prikazana pozicija zapravo točna.

Za tu analizu može se koristiti program VisualGPS, ali puno je vizualno jednostavnije koristiti kartu kao podlogu te uspoređivati s poznatom putanjom prilaza. Isti prilaz prikazan je na taj način na slici 6.3.



Slika 6.3. Putanja prilaza na karti

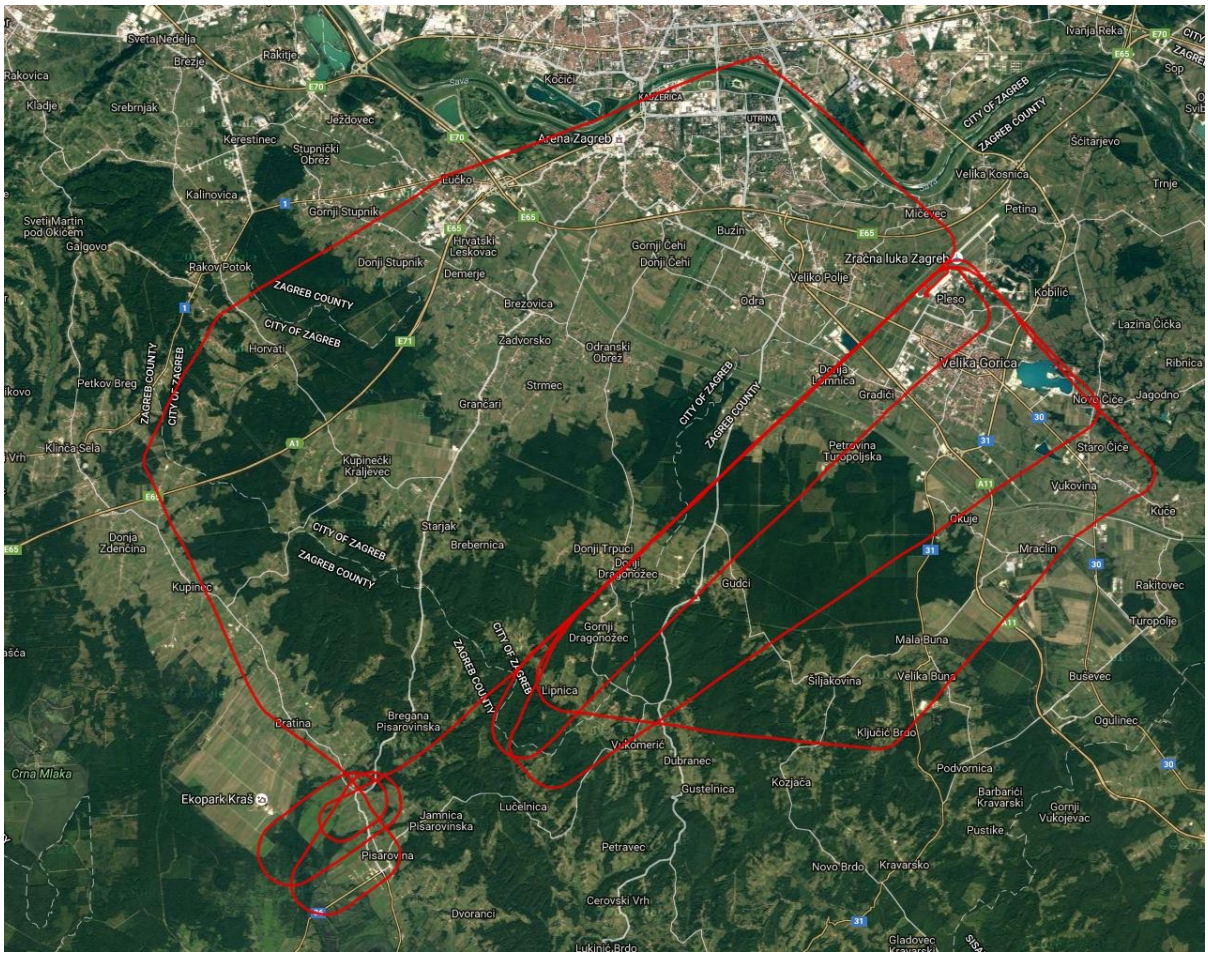
Podaci su preklopljeni preko Google Maps satelitske snimke. Budući da je o preciznosti puno toga rečeno, ovdje će više biti govora o točnosti. Ranije je navedeno da je ovakav primjer utvrđivanja točnosti poznatiji kao vanjska točnost. U ovom primjeru, najlakše je utvrditi točnost na poznatom segmentu prilaza. Na idućoj slici uvećan je segment prilaza u samom finalnom prilazu.



Slika 6.4. Odstupanje od pravca prilaza

Na slici 6.4. je vizualno prikazano odstupanje od pravca prilaza u završnom segmentu gdje je izmjereno odstupanje od 7 metara. Crvena linija prikazuje mjerenje, dok je zelenom prikazana idealna putanja. I na ovoj slici se može primijetiti da je linija koja prikazuje putanju prilaza gotovo idealno ravna, što bi se opet moglo protumačiti kao precizno mjerenje uz malo slučajnog šuma o kojem je riječi bilo u prethodnom poglavlju. Opet se može povući i paralela s prethodnim poglavljem u smislu odstupanja. Ovdje je odstupanje točnost, a pomanjkanje krivudavosti linije visoka preciznost.

Sljedeća stvar je utvrditi što je izmjerio iPad. Na slici 6.5. su prikazana četiri mjerenja iPad-om.



Slika 6.5. Četiri mjerenja iPad-om

Usporedba s Garminom 196 ne pokazuje bitna odstupanja što se može vidjeti na idućoj slici (slika 6.6.). Jedna pored druge, prikazane su putanje mjerenja iPad-om i Garminom. Na lijevoj slici prikazana je putanja koju je zabilježio iPad, a na desnoj ona koju je zabilježio Garmin. Na obje je odstupanje od idealne putanje oko 2 metra, u istu stranu, dakle podjednako, te oba udovoljavaju zahtjevima za točnost u završnom prilazu za slijetanje.



Slika 6.6. Putanja bilježena iPad-om i Garminom 196



Slika 6.7. Prikaz četiri prilaza snimana iPad-om

Rezultati mjerenja matematički su obrađeni u programu Excel. Tablica 1. prikazuje prvi korak pri utvrđivanju vjerojatnosti odstupanja. Referentna vrijednost dobivena je uzimajući u obzir segment mjerenja od početne točke prilaza (8.3NM IZA DME) do pozicije OM (3.8NM IZA DME). Pretpostavka je da je let bio po savršenoj putanji koja je određena ILS prilazom te da je brzina leta bila konstantna (zbog jednakog razmaka među točkama). Referentna vrijednost je pravac prilaza koji je određen točkama prikazanim crvenom bojom u tablici. Svaka pojedina točka definirana je vrijednošću po X i Y osi, odnosno geografskom širinom i dužinom. Vrijednost visine određena je na sličan način, ali je postupak još jednostavniji zbog samo jedne vrijednosti koja se uspoređuje.

Zelenom bojom u tablici prikazane su stvarne izmjerene vrijednosti za geografsku širinu, dužinu i visinu. Udaljenost između točaka računa se prema Haversine-ovoj formuli te je odstupanje prikazano u nautičkim miljama. Za visinu, odstupanje se dobiva jednostavnim oduzimanjem mjerene vrijednosti od referentne vrijednsoti i prikazano je u stopama (ft).

Pojednostavljena formula za izračun udaljenosti između dvije točke glasi:

$$d = \operatorname{acos}(\sin \varphi 1 \cdot \sin \varphi 2 + \cos \varphi 1 \cdot \cos \varphi 2 \cdot \cos \Delta\lambda) \cdot R \qquad (3)$$

gdje je d=udaljenost, φ1=koordinate prve točke, φ2=koordinate druge točke, a R=zemljin radijus (NM). [8]

Tablica 1. Proračun odstupanja (greške) između referentne vrijednosti i vrijednosti dobivenih mjerenjem

	Ref			GPS			Greška Lat/long		Greška Visine	
	Sirina1	Duzina1	Visina1	Sirina2	Duzina2	Visina2	$Err_{Long/Lat}$	$Err_{Long/lat}^2$	Err_{Alt}	Err_{Alt}^2
n	(dec. deg.)	(dec. deg.)	(ft.)	(dec. deg.)	(dec. deg.)	(ft.)	(NM)		(ft)	
1	45,64130500	15,91452667	3001,00	45,64130500	15,91452667	3001,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2	45,64196456	15,91552535	2982,08	45,64193167	15,91542667	2982,00	0,00	0,00	-0,08	0,01
3	45,64262412	15,91652404	2963,17	45,64253333	15,91635500	2953,10	0,01	0,00	-10,07	101,32
4	45,64328368	15,91752272	2944,25	45,64313000	15,91730000	2926,50	0,01	0,00	-17,75	315,02
5	45,64394325	15,91852140	2925,33	45,64371833	15,91827167	2903,50	0,02	0,00	-21,83	476,62
6	45,64460281	15,91952009	2906,41	45,64430667	15,91926167	2889,40	0,02	0,00	-17,01	289,49
7	45,64526237	15,92051877	2887,50	45,64488833	15,92026000	2885,50	0,02	0,00	-2,00	3,99
8	45,64592193	15,92151746	2868,58	45,64547333	15,92126000	2877,30	0,03	0,00	8,72	76,03
9	45,64658149	15,92251614	2849,66	45,64605833	15,92226167	2869,80	0,03	0,00	20,14	405,49
10	45,64724105	15,92351482	2830,75	45,64664333	15,92326333	2864,80	0,04	0,00	34,05	1159,67
11	45,64790061	15,92451351	2811,83	45,64727500	15,92423833	2849,70	0,04	0,00	37,87	1434,22
12	45,64856018	15,92551219	2792,91	45,64795167	15,92519167	2825,10	0,04	0,00	32,19	1036,08
13	45,64921974	15,92651088	2773,99	45,64864000	15,92614333	2807,40	0,04	0,00	33,41	1115,91
14	45,64987930	15,92750956	2755,08	45,64934000	15,92709167	2798,90	0,04	0,00	43,82	1920,40
15	45,65053886	15,92850825	2736,16	45,65004000	15,92805000	2788,40	0,04	0,00	52,24	2728,96
16	45,65119842	15,92950693	2717,24	45,65073833	15,92901500	2772,30	0,03	0,00	55,06	3031,23
17	45,65185798	15,93050561	2698,33	45,65143500	15,92999500	2751,30	0,03	0,00	52,97	2806,21
18	45,65251754	15,93150430	2679,41	45,65212333	15,93098667	2734,60	0,03	0,00	55,19	3046,02
19	45,65317711	15,93250298	2660,49	45,65281167	15,93197833	2724,10	0,03	0,00	63,61	4045,96
20	45,65383667	15,93350167	2641,58	45,65348500	15,93294833	2715,60	0,03	0,00	74,02	5479,70
21	45,65449623	15,93450035	2622,66	45,65413000	15,93389500	2711,30	0,03	0,00	88,64	7857,42
22	45,65515579	15,93549904	2603,74	45,65477500	15,93484167	2708,70	0,04	0,00	104,96	11016,44
23	45,65581535	15,93649772	2584,82	45,65539667	15,93584667	2688,30	0,04	0,00	103,48	10707,35
24	45,65647491	15,93749640	2565,91	45,65600667	15,93689333	2658,80	0,04	0,00	92,89	8629,19
25	45,65713447	15,93849509	2546,99	45,65662500	15,93793833	2631,20	0,04	0,00	84,21	7091,41
26	45,65779404	15,93949377	2528,07	45,65725500	15,93897500	2601,00	0,04	0,00	72,93	5318,44
27	45,65845360	15,94049246	2509,16	45,65790333	15,93999333	2571,50	0,04	0,00	62,34	3886,87
28	45,65911316	15,94149114	2490,24	45,65857333	15,94099000	2548,60	0,04	0,00	58,36	3406,10
29	45,65977272	15,94248982	2471,32	45,65926167	15,94196000	2530,20	0,04	0,00	58,88	3466,73
30	45,66043228	15,94348851	2452,40	45,65996000	15,94291167	2509,50	0,04	0,00	57,10	3259,96
31	45,66109184	15,94448719	2433,49	45,66065167	15,94388333	2481,60	0,04	0,00	48,11	2314,88
32	45,66175140	15,94548588	2414,57	45,66133333	15,94488333	2459,30	0,04	0,00	44,73	2000,80
33	45,66241097	15,94648456	2395,65	45,66201500	15,94588000	2445,50	0,03	0,00	49,85	2484,76
34	45,66307053	15,94748325	2376,74	45,66269667	15,94687833	2436,40	0,03	0,00	59,66	3559,85
35	45,66373009	15,94848193	2357,82	45,66335833	15,94789667	2430,10	0,03	0,00	72,28	5224,63
36	45,66438965	15,94948061	2338,90	45,66399500	15,94893000	2420,60	0,03	0,00	81,70	6674,68
37	45,66504921	15,95047930	2319,98	45,66462833	15,94996667	2409,40	0,03	0,00	89,42	7995,18
38	45,66570877	15,95147798	2301,07	45,66526000	15,95101167	2391,40	0,03	0,00	90,33	8160,03
39	45,66636833	15,95247667	2282,15	45,66591500	15,95205167	2364,80	0,03	0,00	82,65	6831,02
40	45,66702789	15,95347535	2263,23	45,66659667	15,95307333	2339,90	0,03	0,00	76,67	5877,85
41	45,66768746	15,95447404	2244,32	45,66730333	15,95406833	2312,70	0,03	0,00	68,38	4676,40
42	45,66834702	15,95547272	2225,40	45,66801000	15,95505833	2289,40	0,03	0,00	64,00	4096,17
43	45,66900658	15,95647140	2206,48	45,66872000	15,95603833	2270,00	0,03	0,00	63,52	4034,59
44	45,66966614	15,95747009	2187,56	45,66942000	15,95702167	2250,70	0,02	0,00	63,14	3986,09
45	45,67032570	15,95846877	2168,65	45,67011500	15,95800833	2231,60	0,02	0,00	62,95	3963,03
46	45,67098526	15,95946746	2149,73	45,67080667	15,95901000	2213,90	0,02	0,00	64,17	4117,76
47	45,67164482	15,96046614	2130,81	45,67149000	15,96002833	2191,90	0,02	0,00	61,09	3731,60
48	45,67230439	15,96146482	2111,90	45,67217167	15,96104667	2174,50	0,02	0,00	62,60	3919,25
49	45,67296395	15,96246351	2092,98	45,67285333	15,96206500	2163,40	0,02	0,00	70,42	4959,12
50	45,67362351	15,96346219	2074,06	45,67353333	15,96308833	2151,20	0,02	0,00	77,14	5950,30
51	45,67428307	15,96446088	2055,14	45,67421167	15,96410833	2141,40	0,02	0,00	86,26	7439,97
52	45,67494263	15,96545956	2036,23	45,67489000	15,96512667	2134,80	0,01	0,00	98,57	9716,51
53	45,67560219	15,96645825	2017,31	45,67554833	15,96615667	2125,00	0,01	0,00	107,69	11597,02
54	45,67626175	15,96745693	1998,39	45,67618833	15,96718833	2107,60	0,01	0,00	109,21	11926,08
55	45,67692132	15,96845561	1979,48	45,67682167	15,96822667	2081,70	0,01	0,00	102,22	10449,68
56	45,67758088	15,96945430	1960,56	45,67745500	15,96927833	2052,80	0,01	0,00	92,24	8508,36
57	45,67824044	15,97045298	1941,64	45,67809833	15,97032500	2015,70	0,01	0,00	74,06	5484,57
58	45,67890000	15,97145167	1922,73	45,67875167	15,97138333	1980,60	0,01	0,00	57,87	3349,52
59	45,67955956	15,97245035	1903,81	45,67941000	15,97245500	1949,80	0,01	0,00	45,99	2115,27
60	45,68021912	15,97344904	1884,89	45,68006833	15,97353000	1924,50	0,01	0,00	39,61	1568,89
61	45,68087868	15,97444772	1865,97	45,68072667	15,97460500	1908,10	0,01	0,00	42,13	1774,63
62	45,68153825	15,97544640	1847,06	45,68138500	15,97567833	1892,40	0,01	0,00	45,34	2056,03
63	45,68219781	15,97644509	1828,14	45,68204667	15,97674000	1877,00	0,02	0,00	48,86	2387,35
64	45,68285737	15,97744377	1809,22	45,68270833	15,97780167	1867,10	0,02	0,00	57,88	3349,82
65	45,68351693	15,97844246	1790,31	45,68339500	15,97881000	1850,70	0,02	0,00	60,39	3647,52
66	45,68417649	15,97944114	1771,39	45,68410333	15,97975833	1824,50	0,01	0,00	53,11	2820,87
67	45,68483605	15,98043982	1752,47	45,68479833	15,98071167	1798,60	0,01	0,00	46,13	2127,88
68	45,68549561	15,98143851	1733,55	45,68549167	15,98165833	1771,00	0,01	0,00	37,45	1402,21
69	45,68615518	15,98243719	1714,64	45,68619000	15,98258667	1743,80	0,01	0,00	29,16	850,49
70	45,68681474	15,98343588	1695,72	45,68687167	15,98352500	1718,50	0,01	0,00	22,78	518,94
71	45,68747430	15,98443456	1676,80	45,68752833	15,98449167	1693,20	0,00	0,00	16,40	268,87
72	45,68813386	15,98543325	1657,89	45,68817667	15,98546667	1666,30	0,00	0,00	8,41	70,80
73	45,68879342	15,98643193	1638,97	45,68882000	15,98644833	1640,70	0,00	0,00	1,73	3,00
74	45,68945298	15,98743061	1620,05	45,68945500	15,98745167	1626,60	0,00	0,00	6,55	42,89
75	45,69011254	15,98842930	1601,13	45,69010000	15,98845167	1613,20	0,00	0,00	12,07	145,58
76	45,69077211	15,98942798	1582,22	45,69076333	15,98944167	1589,20	0,00	0,00	6,98	48,76
77	45,69143167	15,99042667	1563,30	45,69143167	15,99042667	1563,30	0,00	0,00	0,00	0,00
Σ							1,72	0,05	3940,25	282341,74

U zrakoplovstvu su zahtjevi točnosti postavljeni na razinu 95% vjerojatnosti, koja odgovara standardnoj devijaciji razdiobe od 2δ. Vjerojatnost (P) da će se pozicija zrakoplova naći unutar kruga definiranog radijusom (d), a čija je vrijednost određena navigacijskim specifikcijama izražava se kao:

$$P=1-e^{-\left(\frac{d}{\delta}\right)\wedge 2} \tag{4}$$

Vjerojatnost pojave greške izvan kruga definiranog radijusom (d) je: [15]

$$P=1-\left(1-e^{-\left(\frac{d}{\delta}\right)\wedge 2}\right) \tag{5}$$

U Tablici 2. prikazani su dobiveni rezultati. Srednja vrijednost odstupanja iznosi 0.02NM, a standardna devijacija 0.01. Traženi podatak je vjerojatnost da se mjerena točka nalazi unutar granica RNP.02 (+/- 0.1 NM od referentne vrijednosti). U ovom slučaju, vjerojatnost je 100%, dok je zahtjev RNP.02 da bude minimalno 95%. Iz toga slijedi da je vjerojatnost da točka bude izvan dopuštenih granica 0%.

Tablica 2. Vrijednost horizontalne greške za +/- 0.1NM

Horizontalna greška			
Srednja vrijednost μ (NM)			0,02
St.dev.σ			0,01
Vjerojatnost greške unutar			
zadane vrijednosti			
d(+/- NM)			0,10
2σ=			0,03
$P(x)=1-e^{-(d/\sigma)^2}=$			**100,000%**
Vjerojatnost greške veće			
od zadane vrijednosti			
P(x)=			**0,000%**

U Tablici 3. prikazani su rezultati ako se odstupanje uzme +/- 0.05NM, što ukupno iznosi 0.1NM iz zahtjeva RNP.01. I u ovom je slučaju također tražena vrijednost unutar zahtjeva, i to vjerojatnost da se nalazi unutar +/- 0.05NM iznosi 100%, dok je također vrijednost greške veće od zadane vrijednosti 0%.

Tablica 3. Vjerojatnost horizontalne greške za +/- 0.05NM

Horizontalna greška			
Srednja vrijednost μ (NM)			0,02
St.dev.σ			0,01
Vjerojatnost greške unutar			
zadane vrijednosti			
d(+/- NM)			0,05
2σ=			0,03
$P(x)=1-e^{-(d/\sigma)^2}=$			**100,000%**
Vjerojatnost greške veće			
od zadane vrijednosti			
P(x)=			**0,000%**

Sljedeće za utvrditi je za koliku će vrijednost odstupanja od referentne vrijednosti vjerojatnost biti 95% kao što stoji u zahtjevu RNP.01. Rezultati su prikazani u Tablici 4. gdje je utvrđeno da je vrijednost odstupanja pri kojoj dolazi do vjerojatnosti da je pozicija unutar zadanih vrijednosti odstupanja u 95% vremena iznosi 0.0222NM. Već pri 0.0221 vjerojatnost pada ispod 95%.

Iz svega navedenog očito je da je točnost prilikom mjerenja uvelike premašila zahtjeve za točnost prilaza, te vjerojatnost da je pogreška veća od zadane vrijednosti premašuje 5% tek kod vrijednosti odstupanja od svega 0.0222NM.

Tablica 4. Vrijednost greške pri kojoj je vjerojatnost 95%

Horizontalna greška			
Srednja vrijednost μ (NM)			0,02
St.dev.σ			0,01
Vjerojatnost greške unutar			
zadane vrijednosti			
d(+/- NM)			0,0222
2σ=			0,03
$P(x)=1-e^{-(d/\sigma)^2}=$			**95,100%**
Vjerojatnost greške veće			
od zadane vrijednosti			
P(x)=			**4,900%**

6.2. Vertikalna točnost

Prethodno je obrađena horizontalna točnost za jedan od prilaza na Zračnoj luci Zagreb, staza 05. Mjerenjem je utvrđeno da točnost zadovoljava i nadmašuje zahtjeve točnosti za prilaz, odnosno RNP.01. Kako je i ranije spomenuto, GNSS prilaz odgovara nepreciznom prilazu, te se u skladu s time vertikalno vođenje zrakoplova provodi korištenjem barometarskog visinomjera, a ne GNSS-a.

U ovom poglavlju pažnja će biti usmjerena prema vertikalnoj točnosti, odnosno, pokušat će se utvrditi koliko je stvarno odstupanje, standardna devijacija i širina pojasa vjerojatnosti za 95% točnosti. Tablica 1. također prikazuje i podatke prvog mjerenja, kako za horizontalnu tako i za vertikalnu točnost. Brojčano su prikazane vrijednosti odstupanja za svaki od 77 uzoraka prikupljenih od početne točke prilaza (visina 3000 ft QNH) do OM (visina 1550 ft QNH). Maksimalna zabilježena vrijednost odstupanja iznosi 109 ft. U tablici 5. obrađeni su podaci te srednja vrijednost odstupanja od idealnog profila leta iznosi 51,17 ft, dok je vrijednost standardne devijacije 32.59 ft.

Tablica 5. Greška visine za odstupanje +/- 100 ft

Greška visine			
Srednja vrijednost μ (ft.)			51,17
St.dev.σ			32,59
Vjerojatnost greške unutar			
zadane vrijednosti			
d(+/- ft.)			100,00
2σ=			65,18
$P(x)=1-e^{-(d/\sigma)^2}=$			**99,992%**
Vjerojatnost greške veće			
od zadane vrijednosti			
P(x)=			**0,008%**

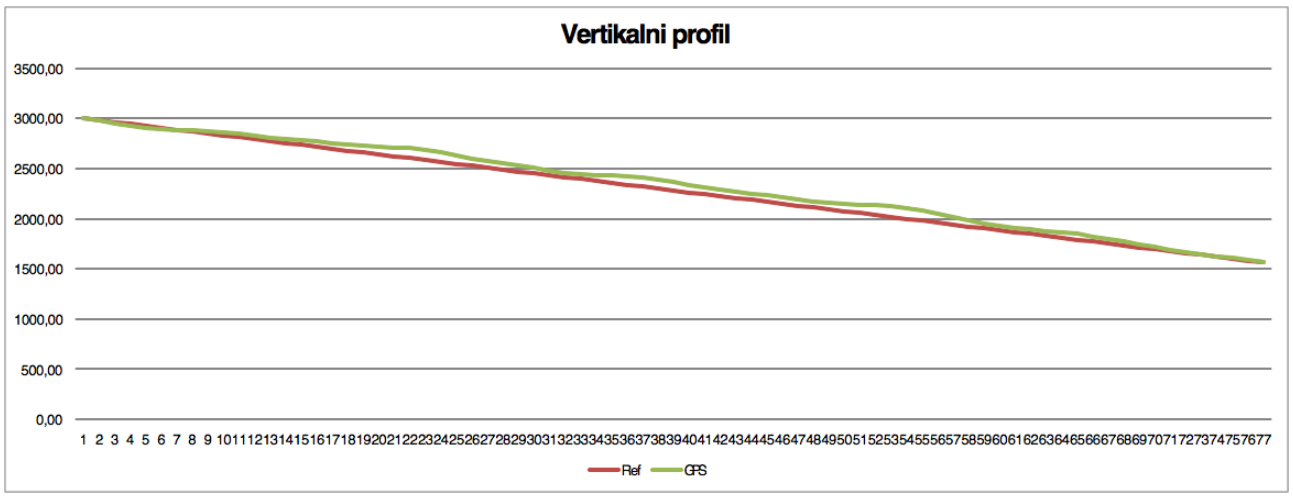
U tablici 5. prikazana je vjerojatnost pozicije točke unutar pojasa širine +/- 100 ft od referentne vrijednosti (idealnog profila leta). Vjerojatnost da je pozicija unutar tog pojasa iznosi 99.992%, dok je vjerojatnost da se nalazi izvan granica, odnosno da je odstupanje veće od 100 ft iznosi svega 0.008%.

U tablici 6. napravljen je proračun vrijednosti širine odstupanja od referentne vrijednosti pri kojoj je vjerojatnost da je pozicija unutar dozvoljenih granica 95%. Širina pojasa u kojem se nalazi 95% svih pozicija iznosi 57 ft.

Tablica 6. Greška visine za vjerojatnost 95%

Greška visine			
Srednja vrijednost μ (ft.)			51,17
St.dev.σ			32,59
Vjerojatnost greške unutar			
zadane vrijednosti			
d(+/- ft.)			57,00
2σ=			65,18
$P(x)=1-e^{-(d/\sigma)^2}=$			**95,308%**
Vjerojatnost greške veće			
od zadane vrijednosti			
P(x)=			**4,692%**

U nastavku je grafički prikazan vertikalni profil prilaza te odstupanje od referentne vrijednosti na slici 6.8. Crvenom linijom prikazana je referentna vrijednost, odnosno proračunata idealna putanja prilaza, dok je zelenom bojom prikazana putanja prilaza zabilježena mjerenjem.



Slika 6.8. Vertikalni profil za prvo mjerenje

U drugom mjerenju, dobivene vrijednosti odstupanja su manje. Srednja vrijednost odstupanja je -25 ft, a ta razlika vidljiva je i u grafičkom prikazu profila leta na slici 6.9. Dok u prvom prilazu zelena linija većinom leži iznad crvene, u drugom prilazu je obratno, i zelena je uglavnom ispod crvene. Tablica 7. izrađena je na temelju pojasa odstupanja od +/- 100 ft kao i u prvom slučaju. Dobivena srednja vrijednost odstupanja iznosi -25 ft, dok je standardna devijacija također manja i iznosi 21,43 ft. Vjerojatnost da se pozicija nalazi unutar granica od +/- 100 ft iznosi 100%.

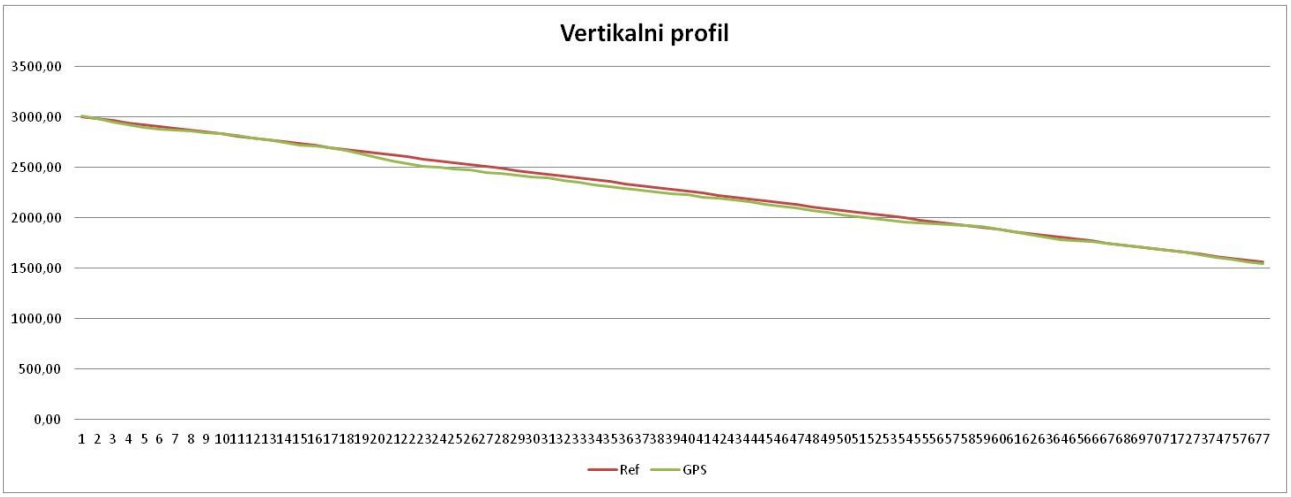
Tablica 7. Greška visine za odstupanje +/- 100 ft - drugo mjerenje

Greška visine	
Srednja vrijednost μ (ft.)	-25,04
St.dev.σ	21,43
Vjerojatnost greške unutar zadane vrijednosti	
d(+/- ft.)	100,00
2σ=	42,86
$P(x)=1-e^{-(d/\sigma)^2}$=	**100,000%**
Vjerojatnost greške veće od zadane vrijednosti	
P(x)=	**0,000%**

U tablici 8. napravljen je proračun vrijednosti širine odstupanja od referentne vrijednosti pri kojoj je vjerojatnost da je pozicija unutar dozvoljenih granica 95%. Širina pojasa u kojem se nalazi 95% svih pozicija iznosi 38 ft. Slika 6.9. grafički prikazuje vertikalni profil za drugo mjerenje.

Tablica 8. Greška visine za vjerojatnost 95% - drugo mjerenje

Greška visine			
Srednja vrijednost μ (ft.)			-25,04
St.dev.σ			21,43
Vjerojatnost greške unutar			
zadane vrijednosti			
d(+/- ft.)			38,00
2σ=			42,86
$P(x)=1-e^{-(d/\sigma)^2}=$			**95,690%**
Vjerojatnost greške veće			
od zadane vrijednosti			
P(x)=			**4,310%**



Slika 6.9. Vertikalni profil za drugo mjerenje

7. Zaključak

Razvoj zrakoplovstva uvjetovan je razvojem tehnologije i implementacijom u zrakoplovstvo. Zrakoplovna navigacija spada u najvažnije segmente letenja i sigurnosti leta, te se nove tehnologije ponekad testiraju i usavršavaju desetljećima dok se ne dokaže njihova pouzdanost i sigurnost korištenja. Današnjim naglim razvojem potrošačke elektronike navigacijski sustavi dostupni su na mobitelima, tabletima i jeftinim GPS prijamnicima te se sve više koriste u zrakoplovnoj navigaciji, pa tako i na Fakultetu prometnih znanosti.

Sposobnost uređaja za pružanje navigacijskih zahtjeva definira se kroz RNP zahtjeve, a neki od parametara koje proizvođači navode su točnost i preciznost. U ovom diplomskom radu je na primjerima iz prakse teorijski obrađena **razlika između pojmova točnosti i preciznosti** jer se pokazalo, čak i u literaturi, da se ova dva potpuno različita pojma često pogrešno upotrebljavaju. Definiranjem ovih pojmova moglo se pristupiti praktičnom dijelu i mjerenju stvarnih parametara točnosti i preciznosti u statičkim i dinamičkim uvjetima te na primjeru prilaza za slijetanje Međunarodne zračne luke Zagreb.

U statičkom mjerenju na praktičnom je primjeru pokazana karakteristika GPS signala da se suprotno očekivanju ne ponaša prema zakonima standardne razdiobe, odnosno da ovisi o trajanju mjerenja, te da se ponekad prikupljanjem većeg broja podataka ne postiže željeni cilj - povećanje točnosti.

Mjerenja iz zraka podijeljena su u dva dijela, mjerenje horizontalne točnosti i vertikalne točnosti. Kod GNSS prilaza koristi se horizontalno vođenje putem GNSS sustava, dok se za vertikalno koristi barometarski visinomjer.

Mjerenjem **horizontalne točnosti** ustanovljeno je da mjerena točnost uvelike **nadmašuje zahtjeve postavljene za točnost u prilazu za slijetanje**. Dok je zahtjev da pozicija u 95% vremena bude unutar zadanog pojasa, mjerenjem je ustanovljeno da je pozicija bila unutar zadanog pojasa u

100% slučajeva, odnosno da mjerena točnost udovoljava i nadmašuje zahtjeve za navigacijsku točnost.

U slučaju **vertikalne točnosti**, ustanovljeno je da **pojas u kojem se nalazi 95% svih podataka o visini odstupa +/- 57 ft** od idealnog profila leta. Budući da se vertikalni profil leta određuje prema barometarskom visinomjeru, a dobiveni podatak o visini je u odnosu na referentni elipsoid, u budućim istraživanjima trebali bi ustanoviti povezanost između barometarske visine i one mjerene GPS sustavom.

Također, ustanovljeno je da mjerenja iPad-om ne odstupaju primjetno od mjerenja GPS uređajima namijenjenim primjeni u zrakoplovstvu, te se može zaključiti da na temelju mjerenja **iPad također ispunjava postavljene zahtjeve za navigacijskom točnosti.**

Popis literature

[1] Groves P; Principles of GNSS, *Inertial and Multi Sensor integrated Navigation Systems;* Boston 2008.

[2] Hoffman-Wellenhof, Legat, Wieser; *Navigation;* Wien 2003.

[3] *Radio Navigation*; Nordian AS 2010.

[4] http://gpsworld.com/gnss-systemalgorithms-methodsinnovation-accuracy-versus-precision-9889/ 11.8.2016.

[5] http://www.gpsinformation.org/dale/nmea.htm 28. 04. 2016.

[6] http://www.diffen.com/difference/A-GPS_vs_GPS 10. 08. 2016.

[7] http://www.navipedia.net/index.php/Reference_Frames_in_GNSS 10.8.2016.

[8] http://www.movable-type.co.uk/scripts/latlong.html 29. 08. 2016.

[9] https://products.office.com/hr-hr/excel 05. 09. 2016.

[10] http://www.atc-network.com/atc-news/jeppesen-flitedeck-pro-efb-solution-for-apple-ipad-now-available-for-airlines-and-other-large-operators 30.8.2016.

[11]http://spvp.zesoi.fer.hr/seminari/2006/TomislavGracin_DifferentialGPS.pdf 4.8.2016.

[12] http://www.hitechavionics.com/cat12_1.htm 20.8.2016.

[13] http://www.microcruising.com/Graphics/csx.jpg 20.8.2016.

[14] Jeppesen FlightDeck

[15] Novak D.; *Zrakoplovna prostorna navigacija*. Sveučilište u Zagrebu, Zagreb, 2015.

[16] Marvin M.; *Calculating navigation elements in flight segments during non–precision approach*. Salon–de–Provence; 2014.

Popis slika

Slika 2.1. Točnost navigacijskih sustava [11]
Slika 2.2. Segmenti GPS sustava Izvor: [10]
Slika 3.1. Sučelje programa VisualGPS
Slika 3.2. Sučelje programa Excel
Slika 3.3. Garmin GPSmap 76CS [13]
Slika 3.4. Apple iPad 2
Slika 3.5. Garmin GPSmap 196 [12]
Slika 3.6. Garmin GPSmap 496 [12]
Slika 4.1. Karta ILS/LOC prilaza na LDZA [14]
Slika 5.1. Razlika između točnosti i preciznosti
Slika 5.2. Rezultati mjerenja visine - Garmin 76CS
Slika 5.3. Rezultati mjerenja visine - Garmin 196
Slika 5.4. Pomični prosjek
Slika 5.5. Frekvencijska distribucija 1 minute GPS signala [4]
Slika 5.6. Frekvencijska distribucija 10 minuta GPS signala [4]
Slika 5.7. Frekvencijska distribucija 1 sata GPS signala [4]
Slika 5.8. Frekvencijska distribucija 12 sati GPS signala [4]
Slika 5.9. Odnos točnosti i preciznosti [4]
Slika 6.1. Horizontalni i vertikalni profil prilaza za stazu 05 LDZA
Slika 6.2. Prikaz 3 mjerenja na istom grafu
Slika 6.3. Putanja prilaza na karti
Slika 6.4. Odstupanje od pravca prilaza
Slika 6.5. Četiri mjerenja iPad-om
Slika 6.6. Putanja bilježena iPad-om i Garminom 196
Slika 6.7. Prikaz četiri prilaza snimana iPad-om
Slika 6.8. Vertikalni profil za prvo mjerenje
Slika 6.9. Vertikalni profil za drugo mjerenje

METAPODACI

Naslov rada: **Proračun elemenata prilaženja metodom vertikalne navigacije**

Student: **Matija Sužnjević**

Mentor: **Izv. prof. dr. sc. Doris Novak**

Naslov na drugom jeziku (engleski):

APPROACH PATH CALCULATION USING METHOD OF VERTICAL NAVIGATION

Povjerenstvo za obranu:

- **doc. dr. sc. Biljana Juričić** predsjednik
- **izv. prof. dr. sc. Doris Novak** mentor
- **dr. sc. Tomislav Radišić** član
- **prof. dr. sc. Tino Bucak** zamjena

Ustanova koja je dodijelila akademski stupanj: Fakultet prometnih znanosti Sveučilišta u Zagrebu

Zavod: **Zavod za Aeronautiku**

Vrsta studija: diplomski

Studij: Aeronautika

Datum obrane diplomskog rada: **27. rujna 2016.**

Napomena: pod datum obrane diplomskog rada navodi se prvi definirani datum roka obrane.

Sveučilište u Zagrebu
Fakultet prometnih znanosti
10000 Zagreb
Vukelićeva 4

IZJAVA O AKADEMSKOJ ČESTITOSTI I SUGLASNOSTI

Izjavljujem i svojim potpisom potvrđujem da je ovaj diplomski rad isključivo rezultat mog vlastitog rada koji se temelji na mojim istraživanjima i oslanja se na objavljenu literaturu, a što pokazuju korištene bilješke i bibliografija.

Izjavljujem da nijedan dio rada nije napisan na nedozvoljen način, odnosno da je prepisan iz necitiranog rada, te da nijedan dio rada ne krši bilo čija autorska prava.

Izjavljujem, također, da nijedan dio rada nije iskorišten za bilo koji drugi rad u bilo kojoj drugoj visokoškolskoj, znanstvenoj ili obrazovnoj ustanovi.

Svojim potpisom potvrđujem i dajem suglasnost za javnu objavu diplomskog rada pod naslovom Proračun elemenata prilaženja metodom vertikalne navigacije

na internetskim stranicama i repozitoriju Fakulteta prometnih znanosti, Digitalnom akademskom repozitoriju (DAR) pri Nacionalnoj i sveučilišnoj knjižnici u Zagrebu.

Student/ica:

U Zagrebu, 19. 9. 2016.



(potpis)