

Izračun pozicije upotrebom principa TDOA u sustavima multilateracije

Galić, Ante

Undergraduate thesis / Završni rad

2022

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:119:517964>

Rights / Prava: [In copyright](#)/[Zaštićeno autorskim pravom.](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2025-02-20**



Repository / Repozitorij:

[Faculty of Transport and Traffic Sciences - Institutional Repository](#)



Sveučilište u Zagrebu
Fakultet prometnih znanosti

ZAVRŠNI RAD

**IZRAČUN POZICIJE UPOTREBOM PRINCIPA TDOA U SUSTAVIMA
MULTILATERACIJE**

**CALCULATION OF POSITION USING THE TDOA PRINCIPLE IN
MULTILATERATION SYSTEMS**

Mentor: izv. prof. dr. sc. Mario Muštra

Student: Ante Galić

JMBAG: 0135255793

Zagreb, rujan 2022.

Zagreb, 5. rujna 2022.

Zavod: **Zavod za aeronautiku**
Predmet: **Radio i radarski sustavi**

ZAVRŠNI ZADATAK br. 6744

Pristupnik: **Ante Galić (0135255793)**
Studij: **Aeronautika**
Smjer: **Kontrola leta**

Zadatak: **Izračun pozicije upotrebom principa TDOA u sustavima multilateracije**

Opis zadatka:

Opisati princip određivanja pozicije cilja na temelju razlike u vremenu dolaska signala od cilja do mreže prijarnika postavljenih na poznatim lokacijama. Navesti vrste sustava multilateracijskog nadzora zračnog prometa te objasniti njihove specifičnosti i zahtjeve s obzirom na preciznost u detekciji položaja. Opisati funkciju i sposobnosti sustava vođenja i upravljanja površinskim kretanjem koji je instaliran na zagrebačkoj zračnoj luci. Izraditi programsko rješenje koje omogućava izračun pozicije cilja primjenom metode računanja razlike vremena dolaska signala te analizirati dobivene rezultate u pogledu utjecaja pojedinih parametara na preciznost sustava.

Mentor:

Predsjednik povjerenstva za
završni ispit:

izv. prof. dr. sc. Mario Muštra

IZRAČUN POZICIJE UPOTREBOM PRINCIPA TDOA U SUSTAVIMA MULTILATERACIJE

SAŽETAK

Multilateracija je vrsta nadzorne tehnologije koja se koristi u zrakoplovstvu. Opisan je princip određivanja pozicije upotrebom TDOA principa. Navedeni su glavni multilateracijski sustavi, njihove prednosti i nedostatci uz način rada sustava. Izračun pozicije upotrebom TDOA principa je napravljen u programskom jeziku Matlab. Opisani su svi postupci izrade programskog rješenja u kojem se dodaje i greška vremena. Rezultati su analizirani i uspoređene su sve dobivene pozicije ovisno o grešci vremena. Tim proračunom se može uočiti prednosti i nedostatke principa TDOA u sustavima multilateracije.

KLJUČNE RIJEČI: TDOA; multilateracija; nadzor; sustav

CALCULATION OF POSITION USING THE TDOA PRINCIPLE IN MULTILATERATION SYSTEMS

SUMMARY

Multilateration is a type of surveillance technology used in aviation. The TDOA principle for determining position is described. The main multilateration systems are listed with their advantage and disadvantages in addition to the way they work. The calculation for determining position using the TDOA principle was made in the Matlab programming language. All the procedures for creating the software which provides results of positioning with the added time error were described. The results were analyzed and obtained positions, depending of the time error, were compared. This shows the advantages and disadvantages of the TDOA principle in multilateration systems.

KEYWORDS: TDOA; multilateration; surveillance; system

Sadržaj

1. UVOD	1
2. PRINCIP ODREĐIVANJA POZICIJE POMOĆU RAZLIKE U VREMENU DOLASKA SIGNALA(TDOA) 2	
2.1 PSR.....	2
2.2 SSR.....	3
2.2.1 Način rada.....	3
2.2.2 Mode A i C.....	4
2.2.3 Mode S.....	5
2.3 Način rada	6
2.4 Određivanje lokacije u 3D sustavu.....	9
3. MULTILATERACIJSKI SUSTAVI ZA NADZOR ZRAČNOG PROMETA	11
3.1 WAM	11
3.1.1 Način rada.....	12
3.1.2 Prednosti i nedostaci sustava	13
3.2 LAM	13
3.3 GPS	15
4. MULTILATERACIJSKI SUSTAVI ZA NADZOR MANEVARSKIH POVRŠINA	16
4.1 A-SMGCS.....	16
4.1.1 A-SMGCS razine po ICAO-u	17
4.1.2 A-SMGCS usluge prema EUROCONTROL-u.....	18
4.2 A-SMGCS na zračnoj luci „Franjo Tuđman“ Zagreb.....	19
4.2 ARIWS.....	20
5. IZRADA PROGRAMSKOG RJEŠENJA SUSTAVA SA IZRAČUNOM POZICIJE TEMELJENOG NA PRINCIPU TDOA.....	22
5.1 Postupak izrade programskog rješenja	22
5.2 Postupak izrade grafičkog prikaza programskog rješenja	23
6. ANALIZA REZULTATA	25
6.1 Netočnosti vremena	25
6.2 Usporedba rezultata	27
7. ZAKLJUČAK	29

1. UVOD

Najvažnije značajke zračnog prometa su osiguravanje sigurnog, brzog i efikasnog leta. Da bi se moglo ostvariti navedeno, potrebni su sustavi koji to mogu osigurati. U zrakoplovstvu imamo razne sustave koji služe navigaciji, nadzoru i sigurnosti. Svaki sustav ima svoj način rada, a jedan od principa je i određivanja pozicije pomoću razlike u vremenu dolaska signala. Njima se služe multilateracijski sustavi koji će se opisati u ovom radu.

Rad je podijeljen na 7 poglavlja.

U uvodu je kratki opis teme rada uz kratki opis svih poglavlja u radu.

U drugom poglavlju je opisan princip određivanja pozicije pomoću razlike u vremenu dolaska signala. Također, prije opisa principa, opisani su primarni nadzorni radar i sekundarni nadzorni radar, kako bi se mogao objasniti način rada ovog principa.

U trećem poglavlju je kratko opisana multilateracija i multilateracijski sustavi za nadzor zračnog prostora. U ovom poglavlju su navedeni i sustavi koji pridonose korekciji multilateracijskih sustava.

U četvrtom poglavlju se opisuje lokalna multilateracija uz multilateracijske sustave za nadzor manevarskih površina. Opisan je rad sustava A-SMGCS i ARIWS i njihov doprinos za sigurnost na manevarskim površinama. Također, u ovom poglavlju je navedena implementacija A-SMGCS sustava na zračnoj luci „Franjo Tuđman“ Zagreb.

U petom poglavlju prikazana je izrada programskog rješenja sustava za izračun pozicije temeljenog na principu razlike u vremenu dolaska signala. Opisani su postupci i kodovi, koji su se implementirali u programski jezik kako bi se dobio izračun pozicije pomoću ovog principa.

U predzadnjem poglavlju je prikazana analiza dobivenih rezultata. Prikazana je u trodimenzionalnom koordinatnom sustavu pozicija mete dobivena pomoću napisanog koda u Matlab-u. Također su analizirani dobiveni podatci s utjecajem netočnosti vremena na izračun pozicije.

U zadnjem poglavlju donesen je zaključak o dobivenim rezultatima prikazanim u radu.

2. PRINCIP ODREĐIVANJA POZICIJE POMOĆU RAZLIKE U VREMENU DOLASKA SIGNALA (TDOA)

Princip određivanja pozicije pomoću razlike u vremenu dolaska signala (TDOA¹) je jedan od načina koji sustavi mogu koristiti za određivanje pozicije zrakoplova u zračnom prostoru ili na manevarskim površinama. Ovaj princip određivanja pozicije koriste multilateracijski sustavi ili hiperbolni sustavi za navigaciju i nadzor. Prije objašnjavanja rada principa, prvo se trebaju opisati primarni i sekundarni radar kako bi se u potpunosti mogao objasniti TDOA.

2.1 PSR

PSR² ili Primarni nadzorni radar koristi refleksiju signala od zrakoplova kako bi odredio udaljenost zrakoplova od radara. Kako bi našao poziciju zrakoplova PSR koristi rotirajuću antenu koja se rotira pet do 12 puta u minuti oko svoje osi. Antena emitira signale koje se odbijaju od zrakoplova te se dio energije vraća prema anteni. Radar određuje udaljenost tako što mjeri vrijeme povratka signala nakon refleksije. Brzina širenja će biti brzina svjetlosti, a vrijeme mjeri radar. Brzina širenja se neće mijenjati pa je vrijeme odlaska i dolaska signala ista. Ukupno vrijeme podijeli se s dva kako bi dobili udaljenost zrakoplova. Bitno je naglasiti da udaljenost koja se dobije ovim radarom je kosa udaljenost [1].

$$R = c * \frac{t}{2} \quad (1)$$

R - udaljenost zrakoplova od radara

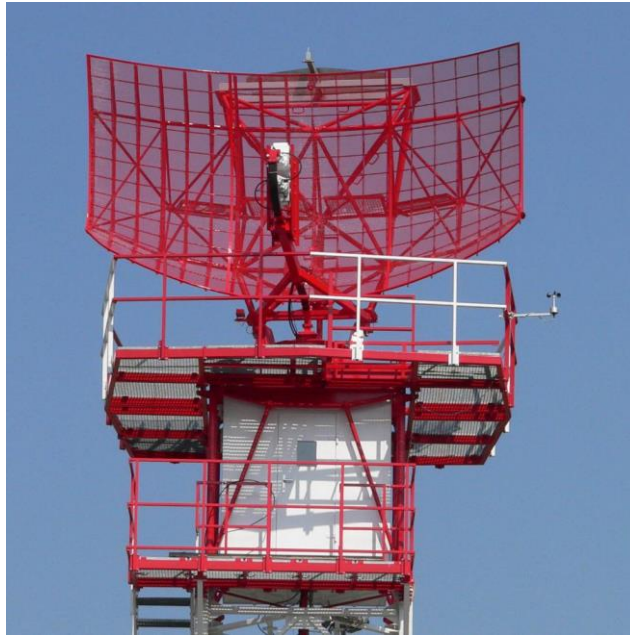
c - brzina svjetlosti

t - vrijeme odlaska i dolaska signala.

PSR ima dosta nedostataka, koje se mogu korigirati sa SSR-om, ali ima određene prednosti. Primarni nadzorni radar je jedini nadzorni uređaj u kojem nije potrebna dodatna oprema u zrakoplovu. S time postaje dobar rezervni sustav u slučaju otkaza nekih instrumenata u zrakoplovu.

¹ Time distance of arrival

² Primary Surveillance System



Slika 1. Prikaz antene koju koristi PSR [2]

2.2 SSR

SSR³ ili sekundarni nadzorni radar je samostalni kooperativni radar s aktivnim odjekom. Od primarnog nadzornog radara (PSR) se dosta razlikuje budući da je primarni nadzorni radar nekooperativni radar koji koristi odraz EM⁴ valova za detekciju. SSR ne koristi jednostavni odraz elektromagnetskih valova od zrakoplova, nego ugrađenim odgovaračem (transponder) na zrakoplovu šalje povratne impulse nakon signala upita od zemaljskih stanica (interogatora). Osim određivanja pozicije, SSR omogućuje dodatne informacije koje su korisne u kontroli zračne plovidbe [3].

2.2.1 Način rada

Na početku svoga rada SSR je bio korišten za vojne svrhe. Razlikovanje neprijateljskih zrakoplova od vlastitih (IFF⁵) je bila prvenstvena namjena ovog sustava. Prednosti ovog sustav kasnije su se implementirale u civilno zrakoplovstvo. Za rad sekundarnog nadzornog radar je potrebno je da zrakoplovi imaju transponder. Transponder je uređaj koji se sastoji od prijemnika i odašiljača. Zemaljske stanice imaju rotirajuću antenu koja se konstantno rotira i šalje signale prema zrakoplovima. Odgovor zrakoplova će biti kodiran s informacijom o identifikaciji zrakoplova, trenutnoj visini te dodatnim informacijama. Dodatne informacije će ovisiti o vrsti transpondera.

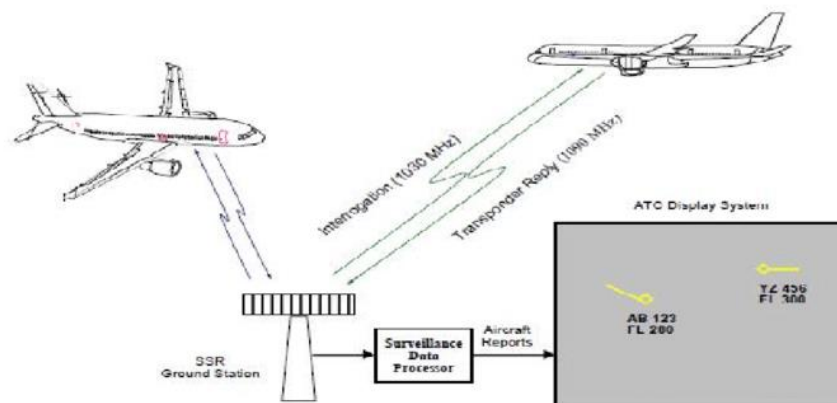
³ Secondary surveillance radar

⁴ Elektromagnetski

⁵ Identification Friend or Foe

Određivanje pozicije zrakoplova neće ovisiti o transponderu nego o refleksiji signala. Mjeri se vrijeme potrebno da signal dođe do zrakoplova te vrati do radara koje je poslalo signal upita. Zbog toga nije rijedak slučaj da se koristi primarni nadzorni radar u kolaboraciji sa sekundarnim nadzornim radarom. Sve nabrojane informacije koje omogućuje SSR će se poslati u sustav za kontrolu zračne plovidbe da pruže sigurno plovidbu kroz zračni prostor.

Sekundarni nadzorni radar radi u dvije frekvencije. Zemaljske stanice emitiraju signal od 1030 MHz (Uplink) zrakoplovu dok zrakoplov nakon obrade i kodiranja vraća signal odgovora na frekvenciji od 1090 MHz (Downlink).



Slika 2. Sekundarni nadzorni radar[7]

2.2.2 Mode A i C

Sekundarni nadzorni radar koristi tri glavna moda: Mode A, Mode C i Mode S. Ovi modovi su namijenjeni civilnom zrakoplovstvu jer postoje drugi modovi koji se koriste u vojnom zrakoplovstvu.

Mod A šalje informacije vezane za identifikaciju zrakoplova. Transponder odašilje zemaljskoj stanici četveroznamenasti kod s informacijama o identifikaciji zrakoplova. Budući da je sustav koda oktalni, imamo 4096 četveroznamenastih kodova koje možemo koristiti. Primjer ovog sustava bi bio sljedeći. Imamo zrakoplov s oznakom 9ADDF čiji kod je 2012. Taj zrakoplov će nakon signala upita modom A odgovoriti stanici slanjem koda 2012. Obradom u sustavu će se prikazati na ekranima da je zrakoplov u pitanju 9ADDF [4].

Mod C omogućuje informacije vezane za visinu na kojoj zrakoplov leti. Zrakoplovi koriste vlastite instrumente da odrede na kojoj visini lete. Mod C daje inkrement od 100 stopa što je prije bilo dosta korisno kada je separacija između zrakoplova 1000 stopa. Međutim, kako je zračni prostor postajao zagušeniji, potrebni su bili manji inkrementi koji bi davali razliku visine od par stopa. Dobivene informacije se kasnije šalju putem moda C prema zemaljskoj stanici koje se kasnije šalju kontroli leta.[8]

Iako ova dva moda daju korisne informacije, imaju dosta nedostataka. Prvi nedostatak je interferencija koja se događa kada dva ili više zrakoplova šalju signal odgovora zemaljskoj stanici. Dolazi do „garbling-a“ odnosno preklapanja signala kod radara. Sljedeći nedostatak je „fruiting“ koji se može objasniti na sljedeći način. Događa se interferencija kod zemaljske stanice (z_1) zbog odgovora transponder koji je namijenjen nekoj drugoj zemaljskoj stanici (z_2). Kod moda A se spominje da ima 4096 različitih kodova na raspolaganju. Ovaj broj je nažalost premalen budući da ima puno više zrakoplova koji imaju svoju jedinstvenu identifikaciju. Ako zemaljska stanica dobije previše odgovora od transpondera, događa se preopterećenje zemaljske stanice. Idući problem je „ghost targets“. Zbog brdovitog ili planinskog dijela u kojem zrakoplov može letjeti, dolazi do refleksije signala. Pojavljuje se dodatni zrakoplov na radarskoj slici iako nema nijedan zrakoplov na tom području. Zadnji problem se javlja prilikom kretanja zrakoplova. Ako zrakoplov bude nagnut, odnosno rotira oko x-osi, može se izgubiti signal. Budući da se antene nalaze na dnu zrakoplova, pomjeranje zrakoplova može „sakriti“ antenu te izgubiti signal [4].

2.2.3 Mode S

Mode S u sekundarnom nadzornom radaru rješava ove probleme. Sa selektivnim upitima na specifični transponder rješava preklapanje signala i „fruiting“. Osim toga rješava problem kod broja različitih kodova za identifikaciju. Budući da se radi od 24-bitnom kodu (2^{24}) omogućava da svaki zrakoplov ima svoju specifičnu identifikaciju bez potrebe za mijenjanjem. Smanjuje se inkrement visine jer za razliku od moda C, mod S daje inkrement od 25 stopa. Modom S popravljiva se mogućnost nadzora zbog boljeg prijenosa signala između zemaljskih stanica i transpondera na zrakoplovu. Ovim poboljšanje mod S podupire sustave kao ADS-B⁶ i ACAS⁷ [4].

Mod S ima dvije vrste standardne opreme: ELS i EHS. Elementary surveillance (ELS) pruža osnovne informacije leta zrakoplova, dok Enhanced surveillance (EHS) daje dodatne informacije koje mogu biti korisne kontroloru leta.

ELS transponder pruža informacije slične kao mod A i C. Osim identifikacije i visine, transponder daje podatke o statusu leta kao što su azimut⁸ i udaljenost koju zrakoplov može prijeći sa svojom količinom goriva. Izvještaj o stanju zrakoplova se šalje putem data link-a. ACAS je sustav koji je omogućen ELS transponderima. Sastoji se od TA⁹, RA¹⁰ i čisto od konflikta. Ovaj sustav prvo detektira zrakoplov u radijusu od 15 NM. Ako neki drugi zrakoplov dođe u radijusu od 3,3 NM, ulazi u TA područje tj. postaje potencijalna prijetnja. Naravno, uzima se u obzir koliko je zrakoplov vertikalno udaljen od potencijalne prijetnje. Ako je manje od 850 ft, ostaje u TA području. Zadnja granica je RA područje. Granici ovog područja je 2,1

⁶ Automatic Dependent Surveillance-Broadcast

⁷ Airborne Collision Avoidance System-sistem koji pruža još jedan sloj sigurnosti u kontroli zračne plovidbe.

⁸ Kut između pravog sjevera i pravca kretanja

⁹ Traffic advisory- savjet za promet

¹⁰ Resolution advisory- savjet za razdvajanje.

NM horizontalne udaljenost i 600 ft vertikalne udaljenost. U slučaju da neki zrakoplov dođe u ovom području, ACAS daje jednom zrakoplovu naredbu da se penje dok drugom da se spušta kako bi izbjegli sudar. Prije je bilo slučajeva u kojima su ACAS i kontrolor leta davali različite naredbe u takvim ekstremnim situacijama. Zbog velikih nesreće je trenutno pravilo da se radi po naredbama ACAS-a umjesto naredbama kontrolora leta [4].

EHS nam daje dodatne podatke koje nisu nužni za sigurnost leta ali pomažu kontroloru leta da za daljnje planiranje razdvajanja zrakoplova. EHS pruža informacije o trenutnom stanju vektora zrakoplova. Osim poznate brzine zrakoplova TAS, ovaj tip opreme omogućuje prikaz drugih brzina kao što su GS¹¹ i IAS¹² (Machov broj). Može se dobiti podatak o magnetskom smjeru leta zrakoplova koji može biti koristan u nekim uvjetima. Rotacijsko gibanje po x, y i z osi zrakoplova i njihov kut se može dobiti pomoću EHS-a. U to spadaju: kut valjanja, kut penjanja, kut spuštanja, brzinu skretanja zrakoplova i pravi kut skretanja (ovisno o vjetru). Kontrolor leta pomoću EHS ima predodžbu o namjeni pilota. Informacije o selektiranoj razini leta se također dobivaju putem EHS te kontrolor leta može stvoriti sliku o budućoj slici stanja zračnog prometa [5].

2.3 Način rada

Princip određivanja pozicije pomoću razlike u vremenu dolasku signala je način određivanja lokacije koji se temelji na definiranju razlike vremena od emitirajućeg signala odašiljača do zemaljskih stanica.

Za ovaj princip potrebni su sljedeći dijelovi:

- sustav u zrakoplovu koji će se sastojati od prijemnika i odašiljača zaduženi za slanje upita i primanje odgovora
- zemaljska stanica koji će pomoću antena primati signale i precizno odrediti vrijeme dolaska signala
- upravljački sustav.

Najjednostavniji način objašnjavanja funkcioniranja ovog principa je u Kartezijevom koordinatnom sustavu. U ovom sustavu je način rada prikazan u dvodimenzionalnom sustavu stoga nam su pozicije točaka prikazane koordinatama (x, y). Koordinate zemaljskih stanica su već poznate te je potrebno odrediti koordinate zrakoplova. Za određivanje udaljenosti između zemaljske fiksne stanice i zrakoplova će se koristiti formula za Euklidsku udaljenost¹³ (d).

$$d(x, y) = \sqrt{(y_1 - x_1)^2 + (y_2 - x_2)^2 + \dots (y_n - x_n)^2} \quad (2)$$

¹¹ Ground speed- brzina zrakoplova u odnosu na površinu Zemlje

¹² Indicated air speed- brzina zrakoplova koja se mjeri dinamičkim tlakom

¹³ Najkraći razmak dvaju točaka u nekom prostoru koja je u Kartezijevom koordinatnom sustavu definirana pomoću Pitagorinog poučka

d - Euklidska udaljenost
 x - koordinata na apscisi
 y - koordinata na ordinati
 n - broj dimenzija prostora.

U Kartezijevom dvodimenzionalnom koordinatnom sustavu zrakoplov će imati koordinate $(x_2 \text{ i } y_2)$. Budući da su ove koordinate nepoznate, trebat će se u formuli za euklidsku udaljenost koristiti koordinate i udaljenosti koje su već poznate. Zemaljska fiksna stanica će omogućiti jedan par koordinata koje su nam potrebne za jednadžbu u obliku $(x_1 \text{ i } y_1)$. Izračun koordinata zrakoplova će se dobiti iz TDOA.

$$TDOA = \Delta TOA = \frac{\Delta d}{v} \quad (3)$$

$TDOA$ - razlika u vremenu dolaska signala

TOA - vrijeme dolaska signala

Δd - ukupna udaljenost između odašiljača i prijemnika

v - brzina signala.

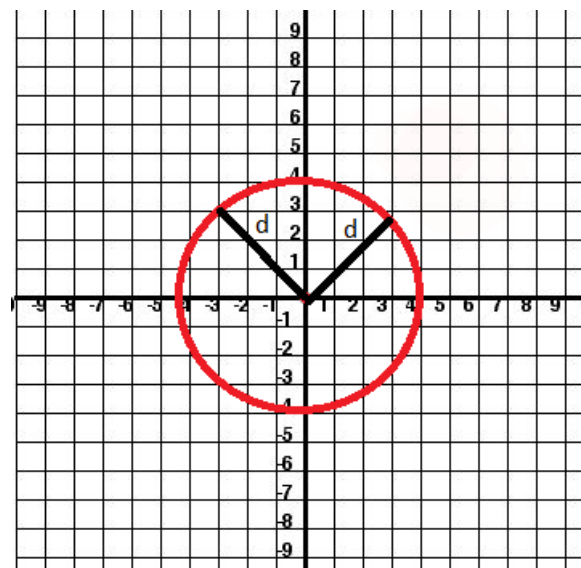
Ako je poznata brzina signala i ako se točno zna vrijeme odlaska i dolaska signala, onda se može dobiti udaljenost koja je najkraća između odašiljača i prijemnika ako se uzme u obzir da se signal širi pravocrtno. S udaljenosti i pozicijom jedne zemaljske stanice, moguće je odrediti koordinate zrakoplova. Budući da se Euklidska udaljenost u Kartezijevom koordinatnom sustavu temelji na Pitagorinom poučku, potrebno je odrediti horizontalnu i vertikalnu katetu. Horizontalna će biti $x = x_z - x_1$, a vertikalna $y = y_z - y_1$. Hipotenuza u ovom slučaju će biti najkraća duljina odnosno Euklidska udaljenost.

$$\sqrt{(x^2 + y^2)} = \sqrt{(x_z - x_1)^2 + (y_z - y_1)^2} \quad (4)$$

$$\sqrt{(x^2 + y^2)} = \Delta d \quad (5)$$

$\sqrt{(x^2 + y^2)}$ – hipotenuza

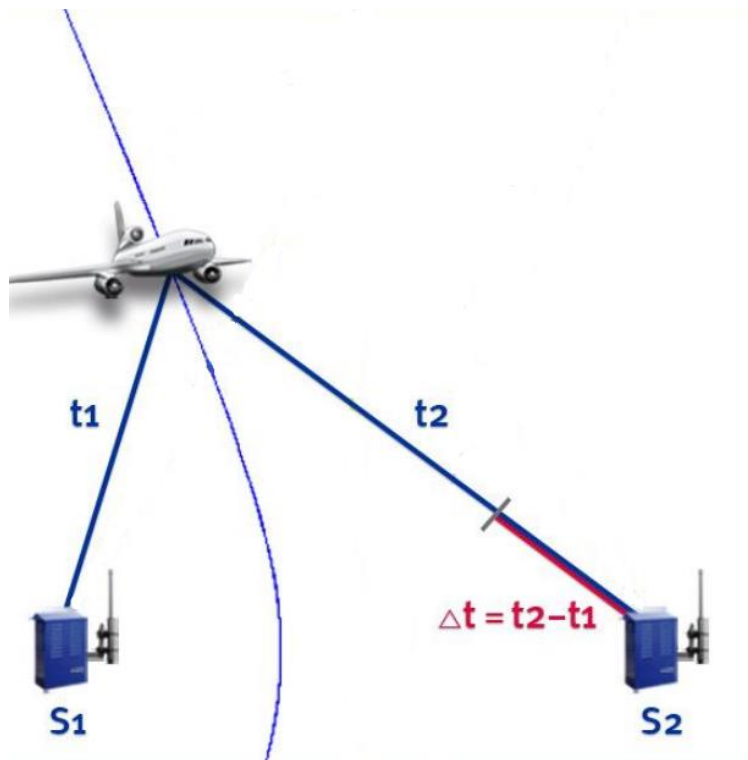
S ovom jednadžbom ipak nismo u potpunosti odredili koordinate zrakoplova. Iako imamo Euklidsku udaljenost i koordinate jedne točke, koordinate zrakoplova mogu biti različite, a da i dalje odgovaraju jednadžbi. Pomoću koordinata jedne stanice, možemo dobiti radijus u kojem se može nalaziti zrakoplov.



Slika 3. Prikaz radijusa u kojem se može nalaziti zrakoplov

U slučaju da postoji druga zemaljska stanica, s koordinatama (x_2, y_2) , može se smanjiti područje u kojem se može nalaziti zrakoplov. U napomenutoj formuli za TDOA potrebna su

barem dva vremena dolaska signala. S dvije zemaljske stanice dobit ćemo TOA_1 za zemaljsku stanicu s koordinatama (x_1, y_1) i TOA_2 sa zemaljskom stanicom koordinata (x_2, y_2) . Njihova razlika će nam dati TDOA. Nakon što se odredi TDOA, dobivaju se sve točke na koji zadovoljavaju TODA. Geometrijski prikaz tih točaka će biti hiperbola. S toga se nije u potpunosti odredila lokacija zrakoplova jer bilo koje koordinate koje leže na hiperboli mogu biti lokacija zrakoplova.



Slika 4. Prikaz hiperbole na kojoj se može nalaziti zrakoplov

Za točno određivanje lokacije zrakoplova u dvije dimenzije će trebati 3 zemaljske stanice. Uvođenjem treće zemaljske stanice s koordinatama (x_3, y_3) , može se dobiti tri TDOA. $TODA_{12}$ bit će razlika između TOA_1 i TOA_2 , $TODA_{23}$ je razlika TOA_2 i TOA_3 , dok $TODA_{13}$ daju razliku između TOA_1 i TOA_3 . Dobiju se dvije hiperbole čije sjecište nam daje točne koordinate zrakoplova u Kartezijevom dvodimenzionalnom sustavu.

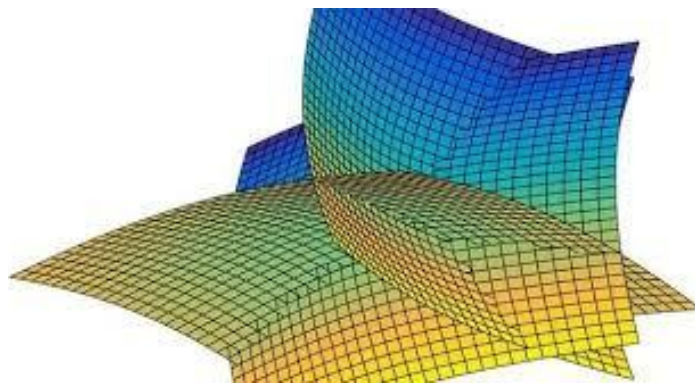
Važno je znati sljedeće informacije. U ovom primjeru se smatra da nema nikakvih netočnosti kod određivanja vremena kao što mogu biti kašnjenje satova u sustavima. 10 ns čini razliku od 3 m.

2.4 Određivanje lokacije u 3D sustavu

Za razliku od određivanja pozicije u 2D sustavu, 3D sustav se određuje na malo kompleksniji način. 2D sustav nam može dati koordinate (x, y) zrakoplova i može se to promatrati lokalno uz aproksimaciju zemljine površine kao ravnim plohom. Problem je što ne može se znati visina na kojoj leti zrakoplov koja je važan element u zrakoplovstvu pogotovo kod kontrole leta. Podatke o visini će dobiti od moda S u SSR-u.

Pravilo za određivanja pozicije kod principa određivanje pozicije pomoću vremena dolaska signala je sljedeće. Ako se traži lokacija u n -toj dimenziji, onda će biti potrebno $n+1$ broj prijelnika koji su sinkronizirani. Stoga nam je potrebno 4 prijelnika da bismo odredili poziciju zrakoplova u praksi [6].

Linije koje su korištene za određivanje pozicije kod 2D sustava su sada ravnine. Razlike vremena između prijelnika postaju plohe. S obzirom na to da imamo 4 prijelnika, imat će se 3 različite plohe od dobivenih TDOA-ova. Na presjecištu tih ploha će biti lokacija zrakoplova odnosno dobivaju se koordinate (x, y, z) . X predstavlja geografsku dužinu, y geografsku širinu te z visinu zrakoplova.



Slika 5. Prikaz sjecišta u 3D sustavu [7]

3. MULTILATERACIJSKI SUSTAVI ZA NADZOR ZRAČNOG PROMETA

Nadzor ima važnu ulogu u kontroli zračnog prometa. Određivanjem pozicije i ostalih bitnih informacija vezane za let omogućuje kontrolorima zračnog prometa sigurno upravljanje. U zrakoplovstvu su se koristili razni načini za nadziranje zračnog prometa a multilateracija će imati važnu ulogu u tome. Multilateracija je vrsta tehnologije u kojoj se korištenjem više zemaljskih stanica precizno određuje lokacija zrakoplova. Temelj ovog sustava je kooperativnost odnosno surađivanje više zemaljskih postaja i transpondera u zrakoplovu.

Prije opisa multilateracijskih sustava, objašnjena je greška koji svi sustavi imaju. Dilatacija preciznosti (DOP) odnosno geometrijska dilatacija preciznosti (GDOP) je izraz koji se koristi da bi se izrazila netočnost zbog geometrijske pozicije prijemnika. Ona uspoređuje točnost TDOA principa s pozicijom zrakoplova.

$$\sigma_{xyz} = GDOP * \sigma_{TDOA} \quad (6)$$

σ_{xyz} - točna pozicija zrakoplova

σ_{TDOA} - točnost TDOA principa

GDOP - geometrijska dilatacija preciznosti.

Budući da će zrakoplov imati fiksirane koordinate, iz ove formule se može uočiti da će GDOP određivati točnosti TDOA principa. Ako imamo veću dilataciju zbog geometrijskih pozicija prijemnika, točnost TDOA principa moramo povećati da bi dobili točnu poziciju zrakoplova.

GDOP se može podijeliti u 3 dijela:

- TDOP - vremenska dilatacija pozicije
- HDOP - horizontalna dilatacija pozicije
- VDOP - vertikalna dilatacija pozicije.

3.1 WAM

Wide Area Multilateration (WAM) je multilateracijski sustav za nadzor koji koristi frekvenciju transpondera SSR-a (1090 MHz) kako bi odredili poziciju, visinu i identifikaciju zrakoplova. Dobivene informacije se šalju kontrolorima leta ili automatiziranim sustavima koje navode zrakoplove. Za određivanje pozicije ovaj sustav koristi princip razlike u dolasku

signala (TDOA). Zemaljske stanice su udaljene 100 km jedno od druge kako bi što veće područje obuhvatile. S obzirom na područje rada, ovaj sustav se koristi za en-route letove; letove s velikim udaljenostima.

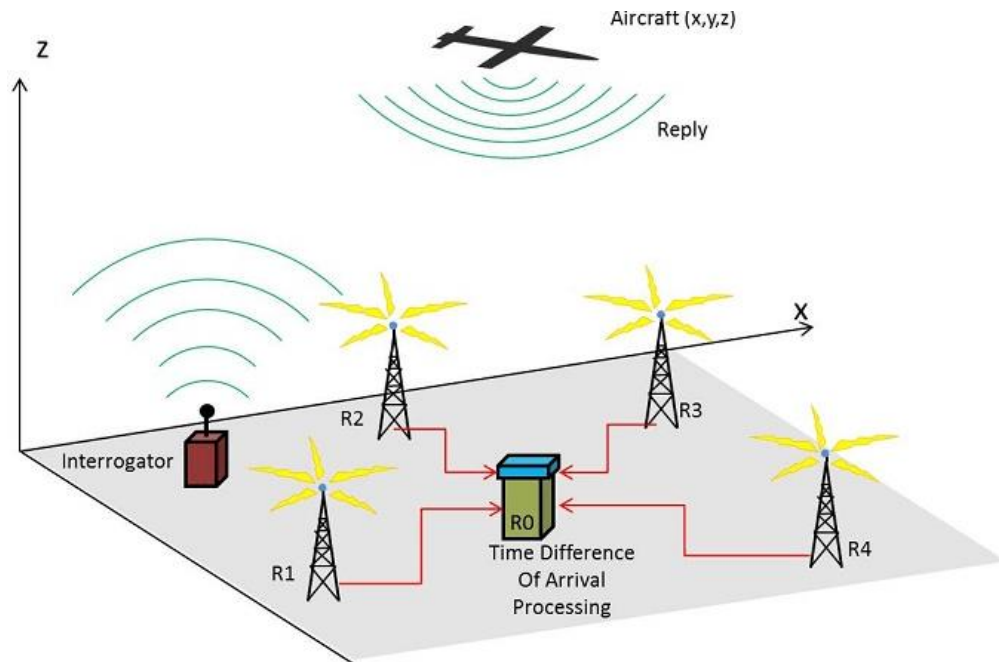
3.1.1 Način rada

Zemaljske stanice postavljene na zemlji primaju signal transpondera zrakoplova. Središnja procesna jedinica nakon što dobije od zemaljskih stanica podatke o TOA, računa razliku dolaska signala te određuje lokaciju zrakoplova. Lokacija zrakoplova obično se računa u dvodimenzionalnom sustavu, dok zrakoplov pruža informaciju o svojoj visini (Mod C). Važno je naglasiti da ovisi kako je zrakoplov odredio svoju visinu. Zrakoplov altimetrom može dobiti svoju visinu računanjem razliku gustoće na razini mora i trenutne visine na kojoj se nalazi, no ona nije geometrijska visina. Dobivena visina se ne mjeri u odnosu na tlo pa pilot treba dodatno paziti na nadvisivanje prepreka. Budući da se radi o dvodimenzionalnom sustavu, potrebne su tri zemaljske stanice koje će računati TOA. Mogu se koristiti i više stanica kako bi se smanjila pogreška mjerenja ili u slučaju provjere ispravnosti sustava [8].

WAM sustav može biti aktivan ili pasivan. Razlika među njima je što pasivan samo prima signale odgovora od transpondera zrakoplova dok aktivni može zahtijevati signale odgovora od transponera. Za pasivni sustav nije potrebna dodatna instalacija na zrakoplove. Najbolje je funkcionalan za područja gdje je gust promet zrakoplovima koji imaju ACAS sustav, području gdje postoji MSSR¹⁴ nadzor i na mjestima gdje je obavezan mod S. Na niskim visinama gdje zrakoplov koristi samo mod A/C neće kvalitetno raditi zbog malo signala odgovora od transpondera zrakoplova. Aktivni sustav zahtjeva signal odgovora. Takav način rada omogućava pogodnosti u nadzoru. U TMA¹⁵ zamjenjuje MSSR sustav. Aktivni sustav detektira zrakoplove koje MSSR sustava ne može. To je zbog dvije stvari: svesmjerne antene i razina snage. Razina snage aktivnog sustava WAM-a može smanjiti raspon signala upita. Pasivni sustav može pokriti isto područje kao MSSR, dok područje niskih visina (zrakoplov je na prilazu) pokriva aktivni sustav zbog manjeg raspona. Svesmjerne zamjenjuju rotirajuće antene što dodatno pojednostavljuje sustav. U TMA se zahtjeva veća brzina ažuriranja podataka zbog broja prometa na malom području. Češćim upitima od aktivnog sustava WAM-a modu S, ostvaruje se taj zahtjev [8].

¹⁴ Monopulse Secondary Surveillance Radar- tehnika koja rješava problem „fruiting“ i „garbling“ radara

¹⁵ Terminal Manoeuvring Area- područje kontroliranog zračnog prostora blizu aerodroma sa velikom količinom zračnog prometa



Slika 6. Prikaz načina rada WAM-a [9]

3.1.2 Prednosti i nedostatci sustava

Prednosti sustava su sljedeći:

- zemaljske stanice se mogu postaviti na mjestima je radar ograničen ili nije moguć za postaviti zbog reljefa
- povećava sigurnost, kapacitet i učinkovitost
- pokriva područja koje ne može radar
- kombinacija sa ADS-B
- dodatan nadzor bez dodatne opreme
- brzina ažuriranja podataka kod aktivnog sustava WAM-a.

Nedostatci su :

- jedna ADS-B stanica pokriva isto područje kao 3 zemaljske stanice WAM-a
- dodatni troškovi instalacije zemaljskih stanica
- visinu traži od zrakoplova
- niske nadmorske visine kod pasivnog sustava WAM-a.

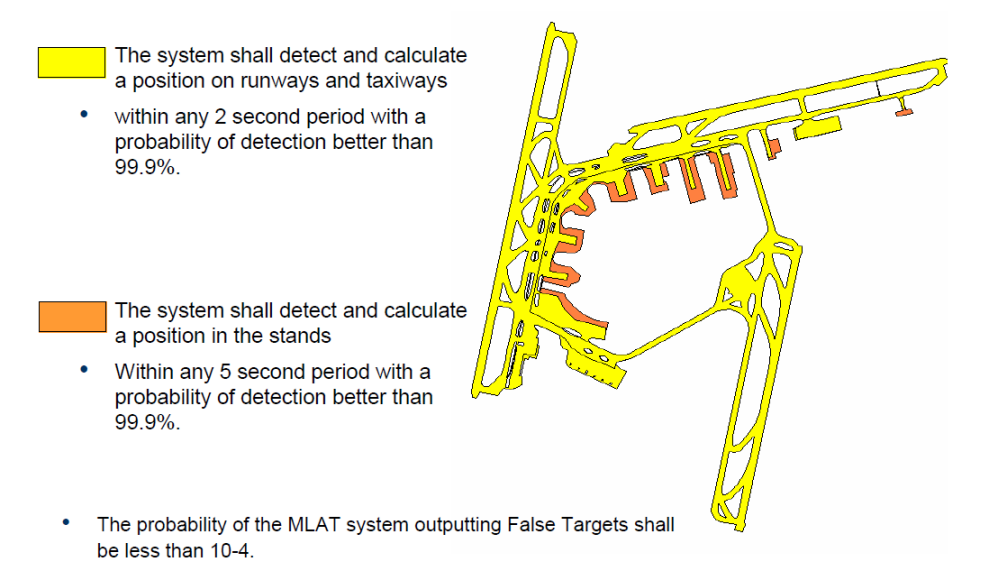
3.2 LAM

Multilateracijski sustavi koji služe za nadzor zrakoplova u TMA spadaju u LAM¹⁶ sustave. LAM ili lokalna multilateracija je vrsta multilateracije koja je dosta slična WAM sustavu.

Kao i WAM sustav, LAM koristi princip TDOA za određivanje pozicije zrakoplova te u dvodimenzionalnom sustavu potrebna su 3 prijemnika za određivanje pozicije. Razlika je u području rada sustava. Kod lokalne multilateracije je područje rada čitava zračna luka pa ima drugačije zahtjeve od WAM-a. Budući da na zračnim lukama ima dosta zgrada i zrakoplova, problem je u refleksiji signala od navedenih površina. Također, zahtjevi za točnost su veći nego u WAM jer se radi o manjim površinama. Slika bi se trebala brže osvježavati te točnost mora biti bolja od 12 m. Ovi se problemi mogu riješiti postavljanjem velikog broj prijemnika [10].

Obično se prijemnici postavljaju u odnosu na tlocrt zračne luke i na mjestima gdje su najbitniji zahtjevi za točnost sustava. Prijemnici moraju imati „*line of sight*“ zrakoplova. Stoga je bitno postaviti prijemnike na mjestima gdje osiguraju pokrivanje čitavog prostora u odnosu na prepreke na manjim visinama koji daju „*multi-path*“. Primjerice, bitnija je točnost na stajanci i manevarskim površinama nego na nekom prostoru u TMA gdje nema letnih operacija [10].

U slučaju da se pokvari ili ošteti jedan prijemnik, to neće utjecati na područje rada sustava. Točnost određivanja pozicije s identifikacijom iznosi 99,9%. Sustav omogućava podršku dvjesto pedeset zrakoplova u svom području pokrivanja. U slučaju da se sustav ponovno pokrene zbog gubitak glavnog izvora energije, potrebno je tri minute da se sustav upali. LAM sustav se sve češće implementira blizu velikih zračnih luka za pokrivanje gustog prometa u TMA. Zračne luke u Frankfurtu, Parizu, Madridu i Londonu su samo dio zračnih luka koji imaju implementaciju LAM-a [10].



Slika 7. Zahtjev točnosti na površinama zračne luke [10]

¹⁶ Local Area Multilateration

3.3 GPS

GPS ili *Global Positioning System* samo je jedan sustav u globalnom navigacijskom satelitskom sustavu (GNSS). Među njima se nalaze GLONASS (Rusija), Galileo (Europa) i Compass (Kina). Budući da se radi o vrlo sličnim sustavima, detaljnije je objašnjen samo sustav GPS.

GPS ili punim nazivom NAVSTAR/GPS (*Navigation System with Time and Ranging*) je dio GNSS-a koji se razvio u SAD-u. Prvenstveno je bio namijenjen za vojnu svrhu vojske SAD-a te se kasnije počeo koristiti u pomorskoj navigaciji. Danas se koristi u razne svakodnevne svrhe npr. u cestovnoj navigaciji, pomorskoj navigaciji, zrakoplovstvu itd.

GPS primjenjuje Keplerove zakone za putanju orbite satelita. Sateliti primjenjuju ovaj zakon da mogu izračunati svoju poziciju kroz sve točke njihovog orbita. Njihove pozicije na orbiti se nazivaju efemeride. Također je bitno naglasiti da GPS koristi Kartezijev trodimenzionalni koordinatni sustav čije je ishodište u centru Zemlje. S obzirom na to da je GPS globalni sustav, potreban je model Zemlje koji će svi koristiti. WGS84¹⁷ je izabran kao odgovarajući standardni model i primijenjen je u svim GPS uređajima [11].

GPS se sastoji od 3 segmenta:

- Svemirski segment
- Kontrolni segment
- Korisnički segment.

GPS nije multilateracijski sustav ali je bitan sustav koji šalje točne podatke o vremenu u slučaju da se pojavljuju neke netočnosti sata kod ADS-B ili WAM sustava.

¹⁷ The World Geodetic Survey of 1984

4. MULTILATERACIJSKI SUSTAVI ZA NADZOR MANEVARSKIH POVRŠINA

Cilj organizacija i tvrtki u zračnom prometu je povećanje prometa kako bi povećali svoje prihode. Budući da svi zrakoplovi moraju poletjeti i sletjeti na aerodromu, povećanje broja zrakoplova može rezultirati stvaranjem većeg opterećenja kod aerodromskih kontrolora leta. Uz povećanje broja zrakoplova na aerodromskim površinama i nepovoljnih meteoroloških uvjeta dodatno povećavaju opterećenje kod kontrolora. Za smanjenje radnog opterećenja, na aerodromima se ugrađuju razni sustavi za nadzor manevarskih površina. Multilateracijski sustavi osim za nadzor zrakoplova u zračnom prostoru su dosta korisni na manevarskim površinama na zračnim lukama. U ovom radu su opisana dva primjera ovih multilateracijskih sustava: A-SMGCS i ARIWS

4.1 A-SMGCS

Advanced-Surface Movement Guidance and Control Systems (A-SMGCS) je sustav koji pruža nadzor i navođenje zrakoplova i vozila na manevarskoj površini u svim meteorološkim uvjetima. Zadaća mu je da navođenje zrakoplova bude unutar zahtijevanih razina sigurnosti. Sistem je nastao kao naprednija verzija Surface Movement Guidance and Control Systems (SMGC) s dosta boljim značajkama. Precizniji nadzor i navođenje svih zrakoplova odnosno vozila te osiguravanje razdvojenosti zrakoplova i vozila u svim meteorološkim uvjetima su samo dio poboljšanja A-SMGCS-a u odnosu na SMGC [12].

Na aerodromima koji imaju smanjenu vidljivost zbog meteoroloških uvjeta, aerodromski kontrolor iz svog tornja ne vidi avione na manevarskim stazama. To može utjecati na kompleksnost i opterećenje rada kontrolora leta. A-SMGCS uzima u obzir sljedeće uvjete pri svom radu: kompleksnost aerodroma prema njegovoj konstrukciji, gustoću prometa te zahtijevani kapacitet u svim vizualnim uvjetima. Implementacije sustava na višim razinama pruža „sigurnosnu mrežu“ kontroloru leta. Osim što vidi konflikte i razrješava ih, otkriva koja vozila predstavljaju potencijalnu opasnost zbog neovlaštenog ulaska na manevarsku površinu ili stajanku [12].

Pomoću ovih razina ICAO opisuje koje su osnovne funkcije A-SMGCS:

- Nadzor
- Kontrola
- Planiranje (rutiranje)
- Navođenje.

4.1.2 A-SMGCS usluge prema EUROCONTROL-u

EUROCONTROL je A-SMGCS podijelio na usluge kako bi lakše objasnili ulogu ovog sustava u svojim priručnicima. Ovo ne znači da ijedna podjela netočna štoviše objašnjava funkcije sustava iz dvije perspektive.

Usluge koje pruža ovaj sustav su podijeljene na 4 dijela:

- Nadzorna usluga
- Usluge za pomoć u sigurnosti aerodroma
- Usluga rutiranja
- Usluga navođenja.

Nadzorna usluga pruža bolju situacijsku svjesnost kod aerodromskog kontrolora leta. Identifikacija, lociranje te kontinuirano praćenje zrakoplova i vozila na aerodromu se prikazuje putem HMI¹⁸ kako bi povećali situacijsku svjesnost kod kontrolora. Usluga navođenja uz kontrolorove naredbe sa uslugom nadzora i rutiranja omogućuje: automatizirano paljenje ili gašenje središnjih svjetala za taksi stazu, automatizirano paljenje ili gašenje stop svjetala na ulasku u pistu i automatizirana aktivizacija A-VDGS¹⁹-a [14].

Usluge za pomoć u sigurnosti aerodroma poboljšavaju sigurnost zbog prevencije nesreća ili nezgoda. Ove greške dolaze od djelatnika zračne luka koje variraju od pogrešne naredbe kontrolora leta do netočnosti koje uzrokuju vozači pomoćnih vozila na aerodromu. Ova usluga ima 3 funkcije. Prva funkcija je nadzor piste i upozoravanje na konflikt. Ova funkcija koristi podatke nadzora uz definiranim pravilima za razdvajanje vozila kako bi prilikom nadziranja blizu ili na pisti uočila konflikt. Druga funkcija ima ulogu uočavanja greški kod naredbi kontrolora leta. Kada kontrolor ukucaj neku naredbu na HMI, ukoliko se ne poklapaju sa logičnim pravilima ili prijašnjim naredbama, uključuje se upozorenje kako bi kontrolor uočio svoju pogrešku. Zadnja funkcija je nadziranje usklađenosti kontrolorovih naredbi sa procedurama i pravilima. A-SMGCS daje znak upozorenja kontroloru ako neka njegova naredba nije u skladu s pravilima ili procedurama [14].

¹⁸ Human Machine Interface- hardver ili softver u kojem korisnik može pratiti stanje nekog procesa te utjecati na postavke tog procesa

¹⁹ Advanced-Visual Docking Guidance Systems

Usluga rutiranja pravi rutu za sva vozila na aerodromu pomoću poznatih parametara i namjera kontrolora. Ova usluga pruža točno vrijeme taksiranja vozila te s tim podatkom omogućava kontroloru da poboljša rutu. Pomoću alternativno paralelnog taksi rutiranja, mogu se stvoriti nove rute na manevarskim površinama. Sustav na osnovi mogućnosti vozila daje određen broj optimalnih putanja koje su na raspolaganju kontroloru leta. Najveći utjecaj ove usluge je na uslugu navođenja te u određenim elementima utječe na uslugu za pomoć u sigurnosti aerodroma [14].

4.2 A-SMGCS na zračnoj luci „Franjo Tuđman“ Zagreb

HKZP²⁰ je 12. prosinca 2018. pustila u operativni rad A-SMGCS na Zračnoj luci „Franjo Tuđman“ Zagreb. Investicija sustava je bila oko 4,4 milijuna eura koje je CEF²¹ pokrio 85% troškova. Trajanje projekta je bio oko tri godine koje osim tehničke implementacije sustava ubraja školovanje osoblja, pravne aktivnosti te izgradnju infrastrukture. Proizvođač sustava je tvrtka Saab [15].

Zračna luka u Zagrebu je poznata po učestaloj magli. Budući da je prije aerodrom bio vojni, napravljena je na tom području zbog strateške pozicije koje daje magla. Međutim, danas aerodrom služi i za civilne zrakoplove pa magla smanjuje vidljivost što otežava rad aerodromskim kontrolorima. Kontrolori su prisiljeni prometne situacije promatrati samo putem ekrana što opravdava implementacija A-SMGCS-a na zračnoj luci. Osim magle, Zračna luka „Franjo Tuđman“ je implementirala ovaj sustav zbog dodatnih faktora koji utječu na kompleksnost rada aerodromskog kontrolora. Jedan od tih faktora je novi prometni tok uzrokovano proširenjem aerodroma. Proširenje zračne luke je bilo potrebno zbog konstantnog porasta prometa. Drugi faktor je zbog istovremenog odvijanja civilnog i vojnog prometa koje povećavaju složenost operacija na zračnoj luci [15].

²⁰ Hrvatska kontrola zračne plovidbe

²¹ Connecting Europe Facility



Slika 9. Prikaz A-SMGCS sustava na zračnoj luci „Franjo Tuđman“ Zagreb [15]

4.2 ARIWS

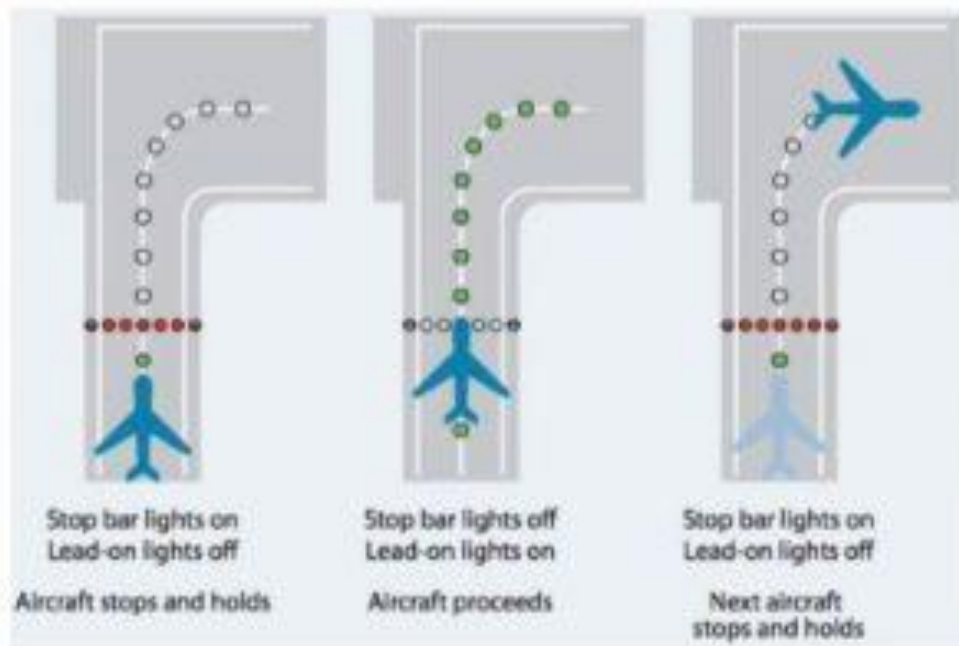
Autonomous Runway Incursion Warning System (ARIWS) je sistem koji pruža autonomnu detekciju opasnosti zbog mogućeg nedozvoljenog ulaska jednog zrakoplova ili vozila na uzletno-sletnu stazu kad je korištena od strane drugog zrakoplova. Temelji se na multilateraciji između neovisnih sustava za nadzor na aerodromu, specifičnim kamerama, radarima za detekciju opasnosti, svjetlima na stazi za vožnju te alarmima povezanim s posadom zrakoplova. Sustavi za nadzor nadgledaju stanje na uzletno-sletnoj stazi i ovisno o tome upravljaju svjetlima na ulazu piste. Ako je uzletno-sletna staza zauzeta, zrakoplov je pri polijetanju ili zrakoplov se spušta na pistu, svjetla na ulazu u uzletno-sletnu stazu postaju crvena. Na taj način daju do znanje pilotu zrakoplova koji se sprema ući na uzletno-sletnu stazu da je zauzeta. Također, ako se zrakoplov sprema poletjeti, na pragu uzletno-sletne staze postaju crvena. Time se signalizira pilotu koji se bio spreman poletjeti da staza više nije sigurna zbog nekog nedozvoljenog ulaska [16].

Primjer rada ovog sustav može se objasniti na sljedeći način. Pilot dobije dozvolu od kontrolora da može ući na uzletno-sletnu stazu, a USS-a²² je zauzeta. ARIWS uvidi ovu grešku i vrlo brzo se pale crvena svjetla na ulasku u USS-u čije je značenje zabrana ulaska. Pilot se zaustavlja i daje do znanja kontrolu leta da je stao zbog crvenih svjetala na USS-i. Nakon zaustavljanja, čeka sljedeću naredbu kontrolora leta. Važno je naglasiti da nakon ovih radnji, crvena se svjetla gase. To ne znači da pilot ima dozvolu ući na USS-u već jedino može nakon što dobije odobrenje kontrolora leta. Ovo je glavni razlog zašto je ovaj sustav neovisan. Služi kao dodatni sloj sigurnosti ako kontrolor nešto pogriješi pri davanju uputa i naredbi zrakoplovima.

Sustav nije potreban na svim zračnim lukama jer zračna luka sa malim brojem operacija neće imati ovakve greške, osobito kada je samo jedna vozna staza na jednu jedinu USS-u. Međutim,

²² Uzletno-sletna staza

ako neki aerodrom ima potrebu da instalira ovaj sustav, mora ispuniti osnovne uvjete za rad ovog sustava. Glavni uvjet je da sustav ima vlastiti kontrolni dio sa samostalnim izvorom energije kako bi bio autonoman. Tako osigurava da sustav bude samostalan od utjecaja kontrole leta. Signale koje pruža moraju biti prihvaćeni od cijelog svijeta odnosno na naredbe koje daje sustava sa njihovom signalizacijom je svugdje na svijetu ista. Zadnji uvjet je da u slučaju kvara sustava postoje procedure koji je sljedeći postupak.



Slika 10. Prikaz ARIWS intervencije [17]

5. IZRADA PROGRAMSKOG RJEŠENJA SUSTAVA SA IZRAČUNOM POZICIJE TEMELJENOG NA PRINCIPU TDOA

Nakon teorijskog objašnjavanja principa određivanja pozicije pomoću razlike u vremenu dolaska signala, u radu je napravljena izrada programskog rješenja za ovaj princip. Matlab je programski jezik u kojem je najbolje opisati TDOA jer pruža uslugu kvalitetnog projektiranja napisanog koda. Preko četiri milijuna ljudi koristi ovaj programa među kojima su najčešće inženjeri i znanstvenici.

5.1 Postupak izrade programskog rješenja

Prvi postupak koji se radio u ovom izračunu je definiranje osnovnih podataka. U izračunu prvo je definirano da će se koristiti 8 senzora za izračun TDOA. Ovi senzori predstavljaju zemaljske stanice. Definirana je brzina svjetlosti za lakše snalaženje u kodu. Čitav izračun će biti u trodimenzionalnom Kartezijevom sustavu koji je ograničen do 300m u svim dimenzijama. U tom rasponu se definiraju koordinate senzora, koji mogu biti proizvoljno određeni. Nakon senzora, određuju se koordinate za zrakoplov. Opisane radnje su prikazane sljedećim kodovima:

```
%% Izrada programskog rješenja sustava za izračun pozicije temeljenog  
%% na principu TDOA
```

```
%parametri
```

```
range_s = 30; % faktor za stanice
```

```
range_z = 300; % raspon dimenzija
```

```
c = 3e8; % brzina svjetlosti
```

```
N = 8; % broj stanica
```

```
P = zeros(3,N); % određivanje pozicije stanica
```

```
P(:,1) = range_s*2*[1; 1.442; 0.2];
```

```
P(:,2) = range_s*2*[2; 2.76; 0.3];
```

```
P(:,3) = range_s*2*[1.7; 3.432; 0.4];
```

```
P(:,4) = range_s*2*[1.2; 2.16; 0.5];
```

```
P(:,5) = range_s*2*[1.3; 1.23; 0.6];
```

```
P(:,6) = range_s*2*[1.52; 3.2; 0.7];
```

```
P(:,7) = range_s*2*[1.8; 2.3; 0.8];
```

```
P(:,8) = range_s*2*[3; 3; 0.9];
```

```
p_T = range_z*2*([0.4; 0.3; 0.4]); % pozicija zrakoplova
```

Nakon definiranje osnovnih podataka, može se napraviti kod za izračun pomoću TDOA principa. U izračun za TDOA će se ubaciti i greška u sekundama. Ta greška će biti generirana nasumično, no limitirana je na male brojke koji neće značajno utjecati na procjenu pozicije (pomak od 0.3 m). Ovu grešku se može proizvoljno odrediti. Pomoću toga se u analizi može pokazati utjecaj greške vremena na točnosti izračuna. Kada program izračuna sve TDOA-ove,

napraviti će estimaciju gdje se zrakoplov nalazi u koordinatnom sustavu. Ove radnje su prikazane sljedećim kodom:

```
E = linspace(30,0.1,20);
for m=1:length(E)
    err_std = E(m)*1e-10; % greške tdoa u sekundama

    %traženje TOAs
    dummy = repmat(p_T,1,N)-P;
    errors = 5;

    toa = zeros(N,1); % sve informacije vezane za tdoa

    for ii = 1:N
        toa(ii) = norm(dummy(:,ii))/c;
    end

    tdoa = toa-toa(1); tdoa(1)=[];
    tdoa = tdoa + err_std*randn(N-1,1);

    p_1 = P(:,1);
    dummy = P(:,2:N)';
    A = 2*[(p_1(1)-dummy(:,1)), (p_1(2)-dummy(:,2)), (p_1(3)-dummy(:,3)), -
c*tdoa];
    b = (c*tdoa).^2 + norm(p_1)^2 - sum((dummy.^2),2);

    x_lin = pinv(A)*b;

end
```

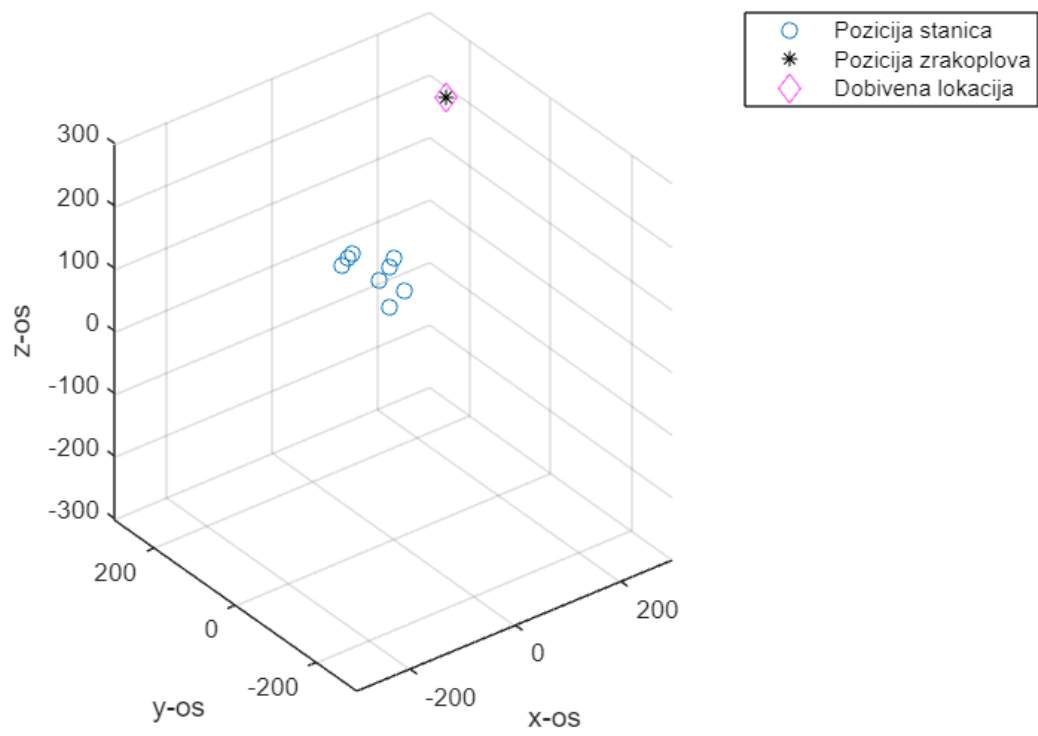
5.2 Postupak izrade grafičkog prikaza programskog rješenja

Rezultati ovog koda biti će grafički ispisani u Matlab-ovom grafikonu. Tražit će se ispis svih točki različitih stanica, poziciju zrakoplova te dobivena pozicija uz aproksimaciju. Uz to, ispisuju se oznake za sve tri osi uz njihova ograničenja. Postavljena je legenda koja označava zrakoplove i stanice. Ove radnje su ispisane sljedećim kodovima:

```
% prikaz pozicije stanica, zrakoplova i dobivene pozicije
figure
plot3(P(1,:), P(2,:),P(3,:), 'o'); hold on;
plot3(p_T(1), p_T(2),p_T(3), 'k*');
xlim([-range_z range_z]);ylim([-range_z range_z]);zlim([-range_z range_z]);
xlabel('x-os'); ylabel('y-os'); zlabel('z-os');

plot3(x_lin(1), x_lin(2),x_lin(3), 'md', 'MarkerSize',7.75);
% estimacija zrakoplova sa linearnim rješenjem

legend('Pozicija stanica', 'Pozicija zrakoplova', 'Dobivena pozicija')
grid on;
hold off;
Pokretanjem navedenog koda se dobije sljedeći prikaz u Matlab-u :
```



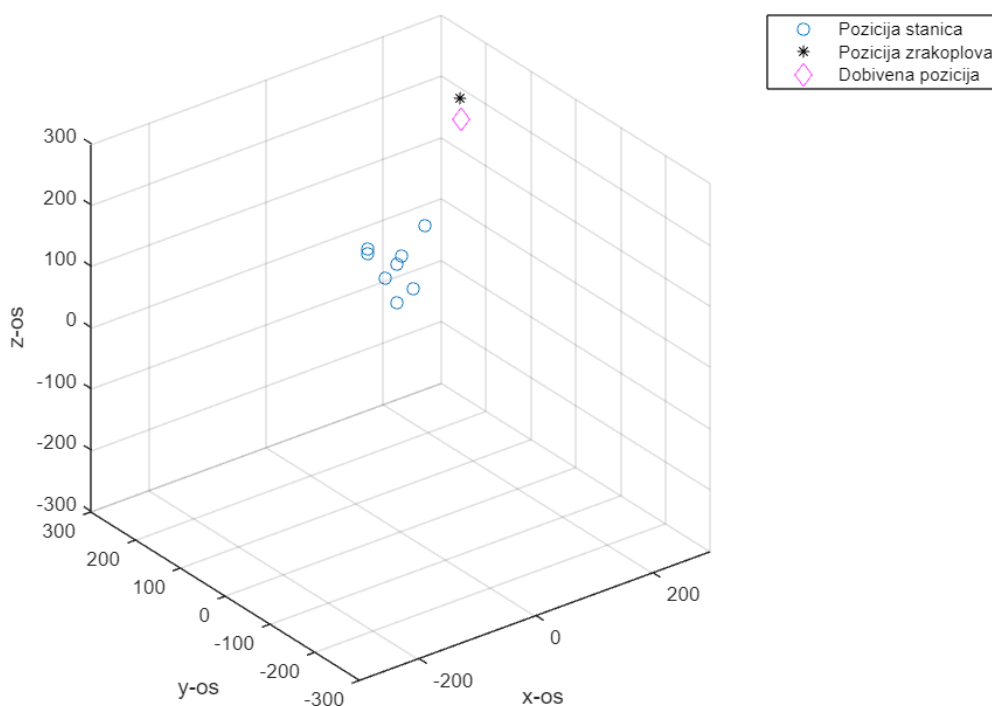
Slika 11. Grafički prikaz programskog rješenja

6. ANALIZA REZULTATA

U prethodnom poglavlju prikazano da je određivanje pozicije zrakoplova TDOA principom. U ovom primjeru nije dodan DOP, koji utječe na točnost određivanja pozicije zrakoplova. Također, u napisanom kodu je postavljena greška točnosti određivanja vremena na način da svi senzori imaju jednaku pogrešku određivanja vremena, što ne mora biti slučaj u praksi. Usprkos navedenim uvjetima, pomoću ovog programskog rješenja, može se prikazati utjecaj pogrešnog mjerenja TOA na poziciju zrakoplova.

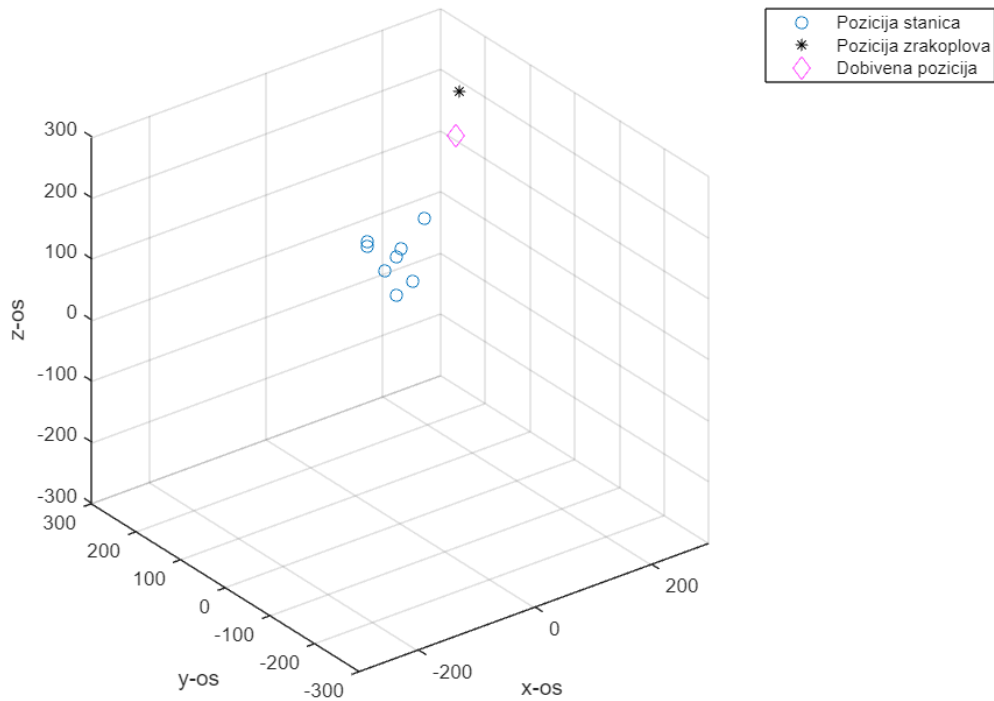
6.1 Netočnosti vremena

U radu je navedeno da 10 ns razlike, kod određivanja udaljenosti pomoću brzine svjetlosti, povećava ili smanjuje udaljenost za 3 m. Kod TDOA principa greška vremena će drugačije utjecati za određivanje pozicije. U uvjetima s minimalnom greškom vremena, dobivena pozicija i vektor zrakoplova će imati skoro identične koordinate. U programskom rješenju su koordinate zrakoplova određene kao (240, 180, 220). Navedene koordinate će se koristiti prilikom usporedbe s pozicijama izračuna uz unesenu grešku vremena. Izračun prikazuje novu poziciju u koordinatama (236, 173, 210) kada bi greška vremena bila 10 ns.



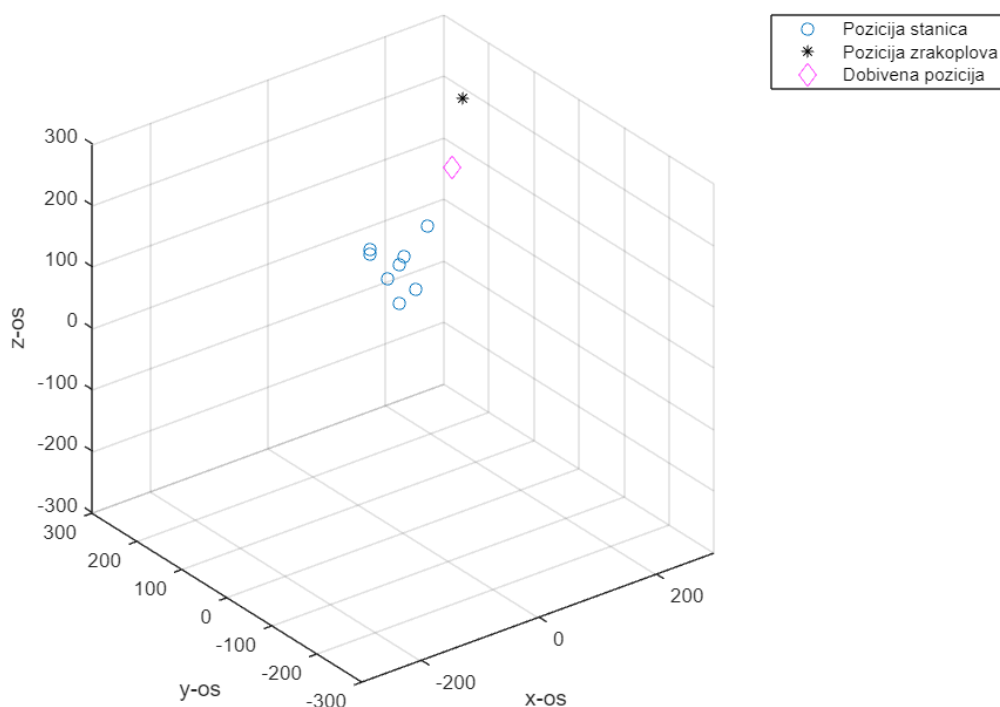
Slika 12. Prikaz greške za 10 ns

Kada bi greška vremena bila 15 ns, koordinate dobivene pozicije su 223 m na x-osi, 167 m po y-osi te 180 m po z-osi. Pomoću ovih koordinate, može se zaključiti da greška u poziciji se ne povećava linearno.



Slika 13. Prikaz greške od 15 ns

U zadnjem primjeru je greška 20 ns. U tom slučaju su dobivene drugačije koordinate pozicije (207, 160, 147). Ove koordinate potvrđuju zaključak da utjecaj pogreške vremena nije linearan odnosno pogreška sustava se neće linearno povećavati sa povećanjem pogreške vremena.



Slika 14. Prikaz greške od 20 ns

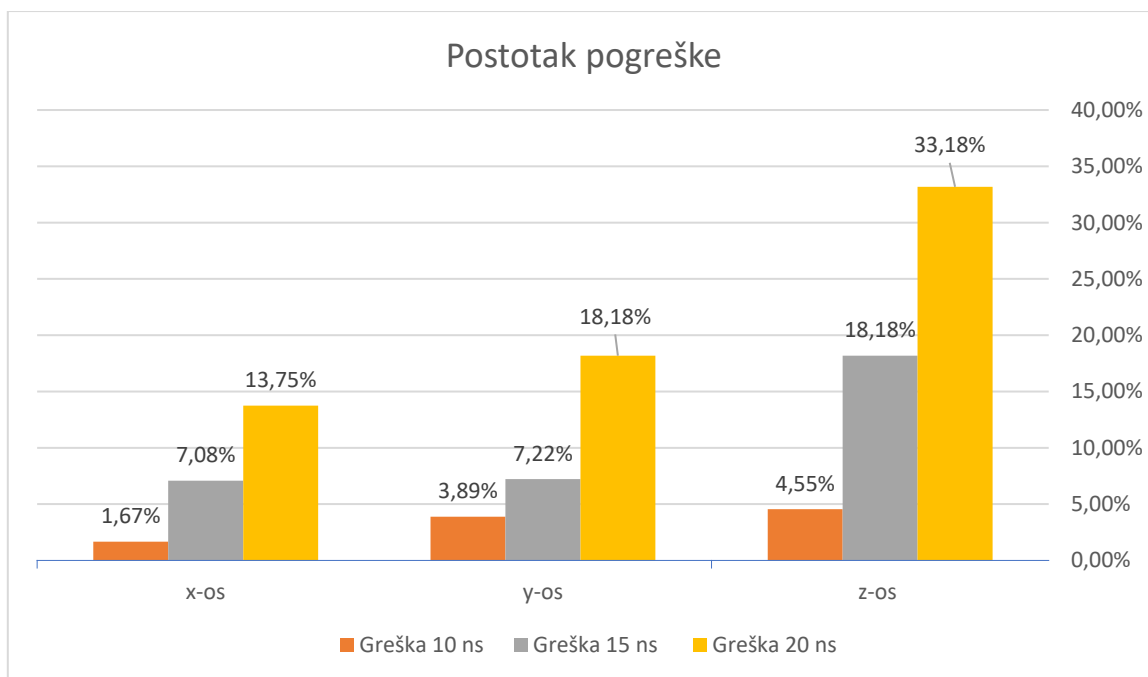
6.2 Usporedba rezultata

Kako bi se lakše usporedili podatci dobiveni unosom pogreške vremena, napravljena je tablica sa svim dobivenim koordinatama.

	Pozicija zrakoplova	Greška 10 ns	Greška 15 ns	Greška 20 ns
x-os	240	236	223	207
y-os	180	173	167	160
z-os	220	210	180	147

Tablica 1. Prikaz svih koordinata

U tablici se može uočiti da su najmanje oscilacije bile na y—osi gdje je razlika pozicije zrakoplova i najveće pogreške vremena samo 20 m. Najveća razlika je na z—osi. Pogreška od 20 ns daje 73m manju udaljenost od točne pozicije zrakoplova odnosno 33% manju vrijednost. Najveća pogreška izračuna na x—osi će biti za 14% ili 37 m. Dobivenim rezultatima, može se uočiti da greška vremena neće jednako djelovati na sve osi. Grafički prikaz postotka pogreške je prikazana sa grafikonom.



Grafikon 1. Postotak pogreške sa različitim greškama vremena

Pomoću ovih podataka, uočava se važnost vrlo točnog određivanja vremena. Razlika od 20 ns djeluje kao zanemarujuće mala, no ona može imati velik utjecaj na sigurnost, budući da se radi o veličini koja iznosi 73 m. Stoga je iznimno bitno da sustavi mogu precizno sinkronizirati vrijeme.

7. ZAKLJUČAK

Kako zračni promet kroz godine postaje pristupačniji, povećava se i njegova potražnja. Rezultat toga je zagušenja zračnog prostora, što zahtjeva povećanje sigurnosti protoka zračnog prometa. Povećanje sigurnosti omogućavaju razni sustavi za nadzor, među kojima je multilateracija. On se pokazala veoma ekonomski isplativom u odnosu na druge sustave jer se lako implementira, a pritom pruža visoku razinu sigurnosti leta u veoma lošim vremenskim uvjetima.

Multilateracijski sustavi koriste TDOA princip za izračun pozicije zrakoplova. Nakon razumijevanja na koji način princip određivanja pozicije pomoću razlike u vremenu dolaska signala funkcionira, zaključuje se sljedeće. Sustavi koji koriste princip TDOA moraju imati barem tri zemaljske stanice kako bi točno bila određena pozicija zrakoplova. Točno određivanje vremena je najvažniji zahtjev multilateracijskih sustava zbog utjecaja na točnost. Iako oscilacije od 20 ns djeluju zanemarive, njihov utjecaj može imati ogromne posljedice. Stoga je izuzetno bitna provjera ispravnosti mjerenja, kako ne bi došlo do pojavljivanja ovakvih grešaka. GPS sustav se najčešće koristi za sinkronizaciju vremena zemaljskih stanica da bi se reducirala greška određivanja vremena. Osim točnog određivanja vremena, bitan je raspored zemaljskih stanica. Zbog geometrijske dilatacije preciznosti, mora se paziti kako se rasporede zemaljske stanice multilateracijskih sustava. Cilj je rasporediti stanice na način da geometrijska dilatacija preciznosti ima minimalan utjecaj.

U radu su opisani razni multilateracijski sustavi koji daju velike doprinose sigurnosti u zrakoplovstvu. WAM povećava sigurnosti, kapacitet i učinkovitost za en-route letove zbog brzine ažuriranja podataka aktivnog sustava WAM-a i postavljanja zemaljskih stanica na mjestima gdje nije moguće postaviti radare. LAM povećava sigurnosti u užim područjima zračnog prostora u odnosu na WAM. Iako je područje malo, ono je izrazito kompleksno budući da se tu nalazi veliki broj zrakoplova u malom prostoru. Zbog toga je potrebna visoka razina točnosti koju osigurava korištenjem LAM sustava.

Multilateracijski sustavi se osim za nadzor zračnog prostora koriste i za nadzor na manevarskim površinama. A-SMGCS sustav povećava situacijsku svijenost aerodromskih kontrolora u lošim meteorološkim uvjetima. Implementacija ovog sustava na zračnoj luci „Franjo Tuđman“ u Zagrebu pokazala se izuzetno korisnom. Istovremeno odvijanje civilnog i vojnog prometa uz loše meteorološke uvjete su samo dio problema koje rješava A-SMGCS na zračnoj luci. Osim A-SMGCS, za nadzor manevarskih površina se koristi ARIWS. On pruža autonomnu detekciju opasnosti zbog mogućeg nedozvoljenog ulaska zrakoplova ili vozila na uzletno-sletnu stazu.

S tim se može zaključiti da multilateracijski sustavi uz GNSS, predstavljaju budućnost nadzora zračnog prostora.

LITERATURA

- [1] SkyBrary. *SkyBrary*. Preuzeto s: <https://skybrary.aero/articles/primary-surveillance-radar-psr>. [Pristupljeno: 13. lipnja 2022].
- [2] Aeroexpo. *Aeroexpo*. Preuzeto s: [2] <https://www.aeroexpo.online/prod/rametas/product-171121-6873.html>. [Pristupljeno: 12. lipnja 2022.].
- [3] M. L. *Nacionalni repozitorij završnih i diplomskih radova*. Preuzeto s: <https://zir.nsk.hr/islandora/object/fpz:2013>. [Pristupljeno: 22. lipnja 2022.].
- [4] Ivošević J. *Merlin*. Preuzeto s: <https://moodle.srce.hr/2019-2020/course/view.php?id=47643>. [Pristupljeno: 15. srpnja 2022.].
- [5] Kosor D. *Merlin*. Preuzeto s: <https://moodle.srce.hr/2019-2020/course/view.php?id=47643>. [Pristupljeno: 11. srpnja 2022.].
- [6] Muštra M. *Merlin*. Preuzeto s: <https://moodle.srce.hr/2019-2020/course/view.php?id=47643>. [Pristupljeno: 12. srpnja 2022.].
- [7] Goward D. *Linkedin*. Preuzeto s: <https://www.linkedin.com/pulse/signals-opportunity-holy-grail-waste-time-gps-world-dana-a-goward>. [Pristupljeno: 20. srpnja 2022.].
- [8] Q. T. W., H. R. Neven., W.H.L., *Wide Area Multilateration*. EUROCONTROL, Bruxelles, 2005.
- [9] Frolic K. *Pagerpower* Preuzeto s: <https://www.pagerpower.com/news/wide-area-multilateration-wam/>. [Pristupljeno: 29. srpnja 2022.].
- [10] EUROCONTROL. *EUROCONTROL*, Bruxelles: EUROCONTROL, 2018.
- [11] C. O. A. Academy. *ATPL Book 11 Radio Navigation*. Oxford: Oxford Aviation Academy, 2014.
- [12] ICAO. *Advanced Surface Movement Guidance and Control Systems (A-SMGCS) Manual*. ICAO. Montreal, 2004.
- [13] Roessingh J. *Researchgate*. Preuzeto s: https://www.researchgate.net/figure/Visual-Display-of-the-A-SMGCS-system-at-Paris-CdG-airport_fig1_225019613. [Pristupljeno: 25. kolovoza 2022.].
- [14] EUROCONTROL. *Specification for Advanced-Surface Movement Guidance and Control Systems*. Eurocontrol, Bruxelles, 2020.
- [15] Hrvatska kontrola zračne plovidbe. *Crocontrol*. Preuzeto s: <https://www.crocontrol.hr>. [Pristupljeno: 1. rujna 2022].

[16] ICAO. *Aerodrome, Aerodrome Design and Operations*. ICAO, Montreal, 2018.

[17] IFATCA. *IFATCA Wiki*. Preuzeto s: <https://ifatca.wiki/kb/wp-2018-88/>. [Pristupljeno: 3. rujna 2022.]

POPIS ILUSTRACIJA

Slika 1. Prikaz antene koju koristi PSR.....	3
Slika 2. Sekundarni nadzorni radar	4
Slika 3. Prikaz radijusa u kojem se može nalaziti zrakoplov	8
Slika 4. Prikaz hiperbole na kojoj se može nalaziti zrakoplov.....	9
Slika 5. Prikaz sjecišta u 3D sustavu	10
Slika 6. Prikaz načina rada WAM	13
Slika 7. Zahtjev točnosti na površinama zračne luke.....	14
Slika 8. A-SMGCS sustav na monitorima kontrolora	18
Slika 9. Prikaz A-SMGCS sustava na zračnoj luci „Franjo Tuđman“ Zagreb	21
Slika 10. Prikaz ARIWS intervencije.....	22
Slika 11. Grafički prikaz programskog rješenja.....	25
Slika 12. Prikaz greške za 10 ns	26
Slika 13. Prikaz greške od 15 ns	27
Slika 14. Prikaz greške od 20 ns	28

POPIS TABLICA

Tablica 1. Prikaz svih koordinata.....	28
---	----

POPIS GRAFIKONA

Grafikon 1. Postotak pogreške sa različitim greškom vremena	29
--	----

Sveučilište u Zagrebu
Fakultet prometnih znanosti
Vukelićeva 4, 10000 Zagreb

IZJAVA O AKADEMSKOJ ČESTITOSTI I SUGLASNOSTI

Izjavljujem i svojim potpisom potvrđujem da je _____ završni rad _____
(vrsta rada)

isključivo rezultat mogega vlastitog rada koji se temelji na mojim istraživanjima i oslanja se na objavljenu literaturu, a što pokazuju upotrijebljene bilješke i bibliografija. Izjavljujem da nijedan dio rada nije napisan na nedopušten 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 završnog/diplomskog rada pod naslovom Izračun pozicije upotrebom principa TDOA u sustavima multilateracije, u Nacionalni repozitorij završnih i diplomskih radova ZIR.

U Zagrebu, 6.9.2022.

Student/ica:

Anteljolić

(ime i prezime, potpis)