

Proračun i usporedba preciznosti lociranja primarnim radarom i multilateracijom

Dujmović, Pavle

Undergraduate thesis / Završni rad

2023

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:119:807561>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-01-16**



Repository / Repozitorij:

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET PROMETNIH ZNANOSTI

Pavle Dujmović

**PRORAČUN I USPOREDBA PRECIZNOSTI LOCIRANJA PRIMARNIM
RADAROM I MULTILATERACIJOM**

ZAVRŠNI RAD

Zagreb, 2023.

Sveučilište u Zagrebu
Fakultet prometnih znanosti

ZAVRŠNI RAD

**PRORAČUN I USPOREDBA PRECIZNOSTI PRIMARNOG RADARA I
MULTILATERACIJE**

**CALCULATION AND COMPARISON OF PRECISION OF PRIMARY
SURVEILLANCE RADAR AND MULTILATERATION**

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

Student: Pavle Dujmović

JMBAG: 0135253580

Zagreb, travanj 2023.

Zagreb, 4. svibnja 2022.

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

ZAVRŠNI ZADATAK br. 6740

Pristupnik: **Pavle Dujmović (0135253580)**
Studij: **Aeronautika**
Smjer: **Kontrola leta**

Zadatak: **Proračun i usporedba preciznosti lociranja primarnim radarom i multilateracijom**

Opis zadatka:

Opisati princip rada primarnog radara te detaljno analizirati dijelove od kojih je radar sačinjen. Povezati razlučivost po azimutu i udaljenosti s karakteristikama antenskog sustava radara i repeticijskom frekvencijom kod impulsnih radara. Navesti dijelove i objasniti funkcioniranje sustava multilateracije. Matematički definirati postupak određivanja pozicije u sustavima multilateracije te navesti parametre koji utječu na točnost određivanja pozicije mete. Izraditi proračun usporedbe preciznosti lociranja primarnim radarom i multilateracijom s različitim ulaznim parametrima kojima je definirana tehnička izvedba sustava.

Mentor:

Predsjednik povjerenstva za
završni ispit:

izv. prof. dr. sc. Mario Muštra

PRORAČUN I USPOREDBA PRECIZNOSTI LOCIRANJA PRIMARNIM RADAROM I MULTILATERACIJOM

SAŽETAK

U završnom radu napravljena je usporedba primarnog radara i multilateracije. Opisan je objašnjen primarni radar te način njegovog funkcioniranja, objašnjeni su elektromagnetski valovi i njihova svojstva. Izvedena je formula radarske jednadžbe kojom se iskazuju parametri koji utječu na preciznost radara. Napravljen je izračun preciznosti korištenjem formule za preciznost te je prikazano kako rezolucija radara utječe na preciznost. Opisan je multilateracijski sustav te način na koji funkcionira. Prikazane su prednosti multilateracije i nedostatci. Prikazana je izvedba programa u Matlabu kojim se računa preciznost multilateracije i njena ovisnost o vremenu, te je nakon toga napravljena usporedba preciznosti radara i multilateracije.

Ključne riječi: primarni radar, multilateracija, frekvencija, jednadžba udaljenosti, elektromagnetski signal, odnos signala i šuma, *Dilution of precision*

CALCULATION AND COMPARISON OF PRECISION OF PRIMARY SURVEILLANCE RADAR AND MULTILATERATION

ABSTRACT

In this work a comparison of precision of primary radar and multilateration is given. Radar and its principles are described, electromagnetic waves are explained along with their main properties. Radar equation that helps us better understand variables that affect radar precision is derived. Precision calculations are made, and it is shown how radar resolution affects the precision. Multilateration and its principles are shown so we can better understand the system and then a list of pros and cons of the system are presented. A program is made in Matlab that calculates precision of multilateration and shows how time error affects it. At the end we compare the two systems and give a summary.

Key words: Primary radar, Multilateration, Frequency, Range equation, Electromagnetic signal, Dilution of precision

Sadržaj

1	Uvod.....	1
2	Primarni nadzorni radar.....	3
2.1	Elektromagnetski valovi	3
2.1.1	Period	5
2.1.2	Frekvencija.....	5
2.1.3	Valna duljina	6
2.2	Osnovna mjerenja radara.....	7
2.2.1	Azimutni kut i kut elevacije	7
2.2.2	Udaljenost	8
2.2.3	Stopa raspona (<i>eng. Range rate</i>).....	8
2.2.4	Polarizacija.....	8
2.3	Jednadžba udaljenosti radara.....	8
2.3.1	Dobitak antene($g_t g_r$)	9
2.3.2	Otvor-antena	9
2.3.3	Presjek radarskog signala(<i>eng. Radar cross section - RCS</i>)	9
2.3.4	Maksimalni domet radara	10
2.3.5	Omjer signala i šuma.....	11
2.4	Gubitci	11
3	Impulsni radar	12
3.1	Razlučivost po udaljenosti	13
3.2	Kutna razlučivost (razlučivost po azimutu)	15
4	Preciznost radara.....	17
4.1	Preciznost u određivanju pozicije	17
5	SSR Sekundarni nadzorni radar	19
6	Multilateracija	20
6.1	Određivanje pozicije multilateracijom	20
6.2	Prednosti multilateracije	21
6.3	Nedostatci multilateracije	22
7	Preciznost multilateracije	23
7.1	Faktori koji utječu na preciznost TDOA.....	23
7.2	<i>Dilution of precision</i>	23
7.3	Prikaz pogreške vremena i greške određivanja pozicije	24
8	Usporedba preciznosti.....	27
9	ZAKLJUČAK	28
	Literatura	29
	Popis slika	30
	Popis grafova	30

1 Uvod

Riječ RADAR je akronim od engleskog naziva *Radio Detection And Ranging*, što predstavlja određivanje pozicije i mjerenja udaljenosti zrakoplova radiovalovima. Primjenom radara uvelike se poboljšava mogućnost nadzora. Prvi radari se pojavljuju prije početka Drugog svjetskog rata. Prvu uspješnu detekciju zrakoplova u letu napravili su Albert Hoyt Taylor, Leo Crawford i Robert Morris Page kada su na rijeci Potomac uspješno detektirali zrakoplov. Prvi radari su radili na jako niskim frekvencijama. Multilateracija je princip ili tehnika za određivanje položaja na temelju mjerenja vremena dolaska elektromagnetskih valova koji imaju poznatu brzinu širenja iz ili do više navigacijskih stanica. Te stanice se nalaze na poznatim mjestima te imaju sinkronizirane satove. Multilateracija je primjer hiperbolne zračne navigacije. Multilateracije sa počinje koristiti početkom Drugog Svjetskog rata, prvi je koristio Britanci. Koristili su sustav koji se zvao Boze sustav ili nekad napisano GEE. Najpopularniji hiperbolični navigacijski sustav koji je bio u široj uporabi je Loran-C, koji se koristio širom svijeta dok se nije ugasio. Završni rad je podijeljen u 8 dijelova:

1. Primarni radar
2. Impulsni radar
3. Preciznost radara
4. Sekundarni nadzorni radar
5. Multilateracija
6. Preciznost multilateracije
7. Usporedba
8. Zaključak.

U prvom dijelu je opisan primarni radar, opisani su elektromagnetski valovi, te njihove karakteristike. Opisan je način rada primarnog rada, radne frekvencije, objašnjena su osnovna mjerenja radara te što se sve može odrediti korištenjem radarskog sustava. Opisana je i izvedena jednadžba radara te njene modificirane verzije za određivanje maksimalnog mogućeg dometa, opisana je rezolucija radara.

U drugom dijelu je opisan impulsni radar te što su impulsi. Prikazani su parametri koji utječu na preciznost. Izračunate su vrijednosti rezolucije udaljenosti i prikazana je azimutalna rezolucija, te su povezane sa preciznošću radara.

U dijelu preciznost primarnog radara su prikazani parametri koje utječu na preciznost radara, te formule koje koristimo za izračun preciznosti. Prikazano je grafom kako širina impulsa i SNR utječu na preciznost radara. Izračunate su vrijednosti za maksimalni domet radara te je prikazano kako dobiti utječe na domet.

Opisan je sekundarni radar (SSR) te način na koji radi, koje probleme predstavlja u navigaciji, te svi modovi SSRa. SSR je važno objasniti jer se multilateracijski sustav na njemu bazira.

U šestom dijelu je opisana multilateracija. Opisan je način kojim se utvrđuje lokacija multilateracijom, navedene su prednosti multilateracije u usporedbi sa tradicionalnim radarskim sustavima te nedostaci multilateracije.

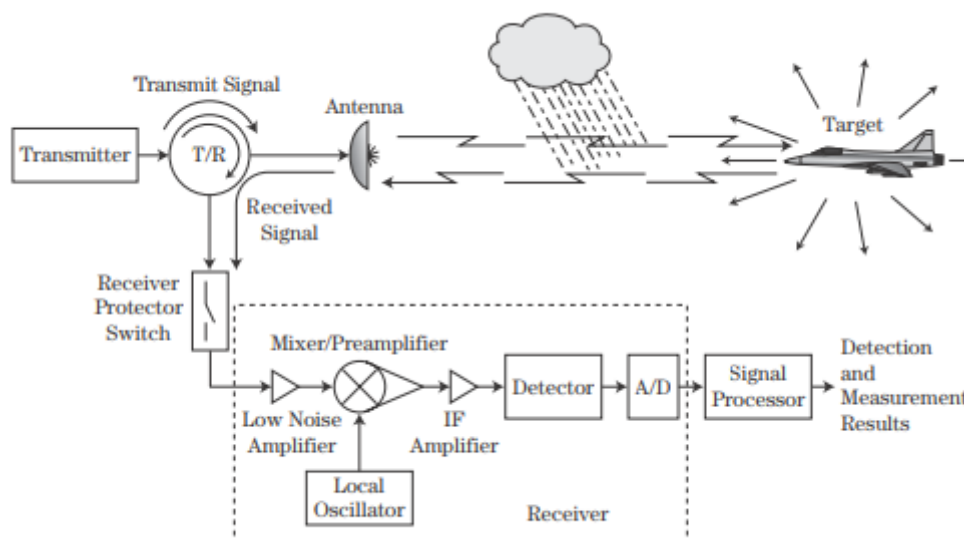
U sedmom dijelu je opisan način kojim se utvrđuje preciznost multilateracijom, opisani su faktori koji utječu na preciznost multilateracije, opisan je DOP. Prikazani su grafovi ovisnosti preciznosti i zadanih varijabli. Napravljen je Matlab program koji prikazuje grešku lokacije sa povećanjem greške mjerenja vremena.

Napravljena je usporedba faktora koji utječu na preciznost kod radara i prikazan je graf koji prikazuje kako greška vremena utječe na pogrešku lokacije kod multilateracije.

Na kraju je napravljen zaključak u kojem su predstavljene sve pozitivne i negativne strane radara i multilateracije. Uspoređeni su sustavi te su izneseni zaključci obrađeni u radu.

2 Primarni nadzorni radar

Radarski sustav šalje elektromagnetske valove prema nekom području ili objektu, te ih detektira kada se od tog objekta odbiju i vrate nazad to radara. Radarski sustav pretražuje prostor i utvrđuje je li se u njemu nalazi meta. Radar u prostor odašilje impuls. Kada taj impuls dođe do objekta dio njega se reflektira nazad u prijamnik radara. Slika 1 pokazuje važne elemente koji sudjeluju u procesu prenošenja radarskog impulsa, rasipanje kroz atmosferu, refleksiju od mete, te odbijanje i primanje nazad na radaru. Radari moraju sadržavati odašiljač, antenu, prijamnik, te procesor. Odašiljač generira elektromagnetske valove, antena odašilje i prima elektromagnetske valove te ih prijenosi kroz atmosferu. Uz metu, sve ostale reflektivne površine, također odbijaju impulse, ta neželjena odbijanja nazivamo *clutter*. Antena prijarnika prima elektromagnetske valove koji su se odbili od mete. Efekti prijenosna u atmosferi mogu promijeniti snagu elektromagnetskih valova kod mete i na prijarniku. [1]



Slika 1 Shema važnih dijelova radara [1]

2.1 Elektromagnetski valovi

Elektromagnetski val je pojava širenja električnog i magnetskog polja konačnom brzinom u nekom prostoru ili sredstvu kao posljedica međusobno naizmjenično induciranih promjenjivih električnih i magnetnih polja. Izvor elektromagnetskog vala može biti vodič smješten u dielektriku kroz koji teče izmjenična struja, vremenske promjene električnog polja izazivaju pojavu vremenski promjenjivog magnetskog polja koji su međusobno u fazi, a u prostorno vremenskom dijagramu međusobno okomiti, na taj način generirana visokofrekvencijska energija pobuđivanjem okolnoga prostora pretvara se u energiju

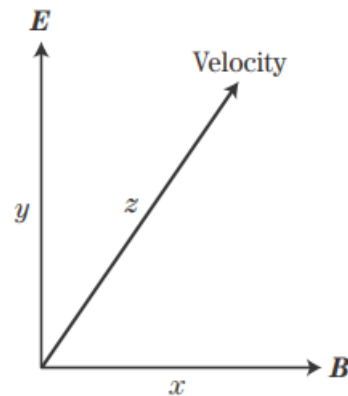
elektromagnetskog polja. Prema vrsti širenja razlikujemo tri vrste elektromagnetskih valova [2]:

1. površinski val- nastaje pri vertikalnoj polarizaciji kada je odašiljačka antena u blizini Zemljine površine, energija zračenja brzo opada zbog apsorpcije tla, značajna za frekvencije do oko 100 kHz a dometi su do 1000 km
2. ionosferski val- nastaje od dijela energije izračene pod nekim kutom u donosu na Zemljinu površinu, zbog efekta širenja elektromagnetskog vala dio energije se odbija od viših slojeva Zemljine atmosfere na udaljenosti između 50 i 300 km i vraća natrag na površinu pa su dometi veći nego kod površinskog vala
3. prostorni val- širi se od izvora zračenja u slobodnome prostoru jednoliko na sve strane, važan za komunikacije iznad 30 MHz, teorijski dometi su unutar zone vidljivosti.
4. Izravni ili direktni val (eng. *Direct* ili *LOS- Line of sight*)- širi se od izvora zračenja u slobodnome prostoru jednoliko na sve strane (dijagrami zračenja su koncentrične kugle), važan je za komunikacije iznad 30 MHz, teorijski dometi su unutar zone vidljivosti [3].

Signal je podložan interferenciji- pojava uzrokovana prijemom elektromagnetskih valova jednakih ili bliskih frekvencija iz više različitih smjerova, zbog različitih vremena dolaska, na prijarniku dolazi do faznih razlika, ako je fazni pomak višekratnik valne duljine, amplitude signala se zbrajaju, krajnji slučaj je fazni pomak od 180 stupnjeva kada se signali teorijski poništavaju. Interferencija dolazi u četiri oblika: unutarnja i vanjska buka elektronike, reflektirani elektromagnetski valovi od objekta koji nam nisu u interesu koji nazivamo *clutter*, nenamjerni vanjski elektromagnetski valovi emitirani iz ostalih ljudski napravljenih izvora elektromagnetska interferencija (EMI), namjerno ometanje korištenjem elektromagnetskih odašiljača u obliku šuma ili krivih meta. Glavna zadaća procesora radara je odrediti poziciju mete u prisustvu šuma, *cluttera* i ometanja. EMI je nenamjerman kao što je šum iz zvuka motora. [1]

Elektromagnetski valovi su električni i magnetski prostorni valovi koji osciliraju određenom frekvencijom. Slika 2 pokazuje električno i magnetsko polje razapeto u

pravokutnom koordinatnom sustavu, električno polje je označeno sa \mathbf{E} , a magnetska indukcija \mathbf{B} te je ona okomita na električno polje. [1]



Slika 2 Orijentacija elektromagnetski polja i vektor brzine [1]

Amplituda elektromagnetskog vala x ili y komponente električnog polja koja se prostire po z osi može se matematički prikazati izrazom. [1]

$$\mathbf{E} = E_0 \cos(kz - \omega t + \varphi) [\text{V/m}], \quad (1)$$

$$\mathbf{B} = \mu^* H \quad (2)$$

H - jakost magnetskog polja

μ - magnetska permabilnost sredstva

E_0 je najveća amplituda, a φ početna faza.

Broj valova i kutni pomak su povezani sa : $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ rad/m i $\omega = 2\pi f$ rad/s.

λ je valna duljina u metrima, a f frekvencija u hertzima.

2.1.1 Period

Period T je vrijeme koje je potrebno elektromagnetskom valu da napravi jedan titraj. Period se izražava u sekundama [s]. [3]

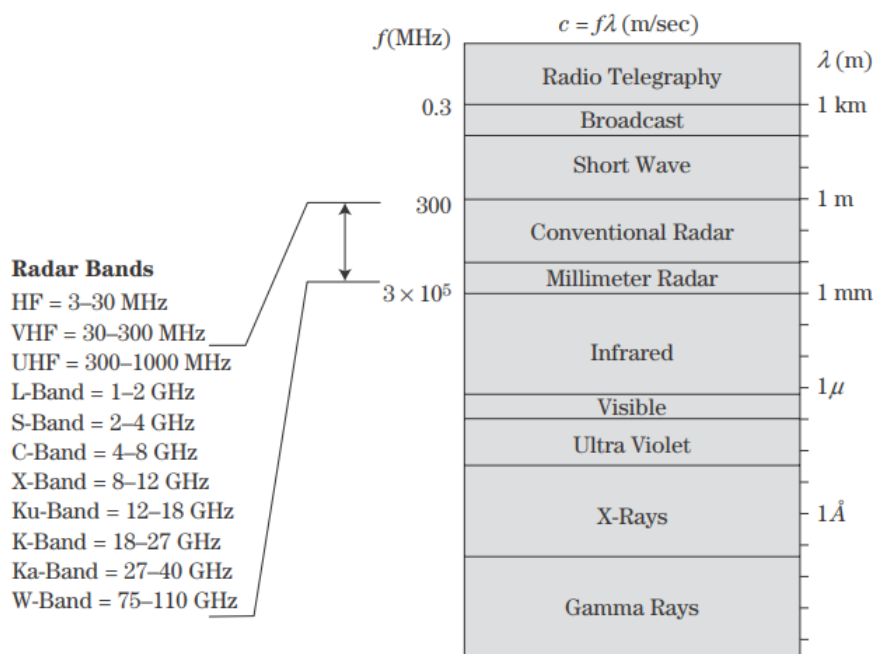
2.1.2 Frekvencija

Frekvencija je broj valova koji u sekundi prođu nekim mjestom ili broj titraja u jedinici vremena. Frekvencija je izražena u hertzima jedan hertz označava jedan krug u sekundi. Frekvenciju možemo izraziti formulom (1) a odnos brzine rasprostiranja c , frekvencije f i valne duljine λ formulom (2). [1]

$$f = \frac{1}{T_0} \quad (3)$$

$$\lambda f = c \quad (4)$$

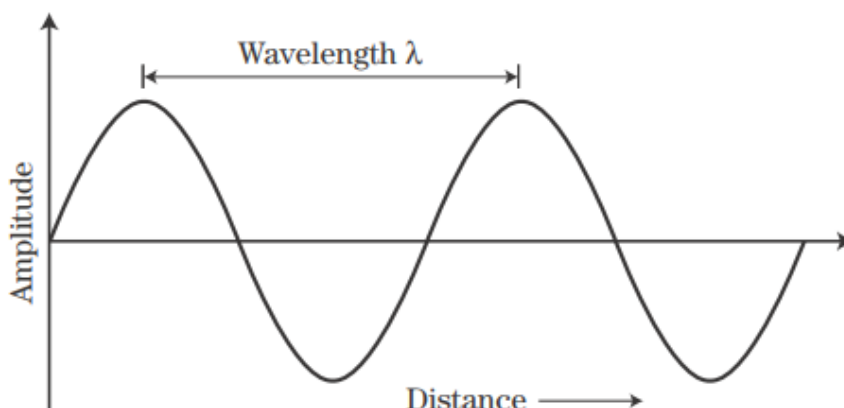
Primarni nadzorni radari rade na frekvencijama od 3 MHz do 300 GHz ali najviše ih radi na pojasu između 300 MHz i 35 GHz. Taj pojas je podijeljen u više slojeva koji su prikazani na slici 3.



Slika 3 Pojasevi frekvencija i označen pojas u kojem radi PSR [4]

2.1.3 Valna duljina

Valna duljina λ je najmanja udaljenost između dvije čestice koje titraju u fazi ili fizička udaljenost koju prijeđe radio val tijekom odašiljanja jednog titraja, izražava se u metrima [m] [3]



Slika 4 Širenje elektromagnetskih valova u prostoru [1]

Valna duljina je udaljenost od neke točke na sinusoidi do sljedećeg područja iste faze, npr. od maksimuma amplitude do sljedećeg maksimuma amplitude. [1]

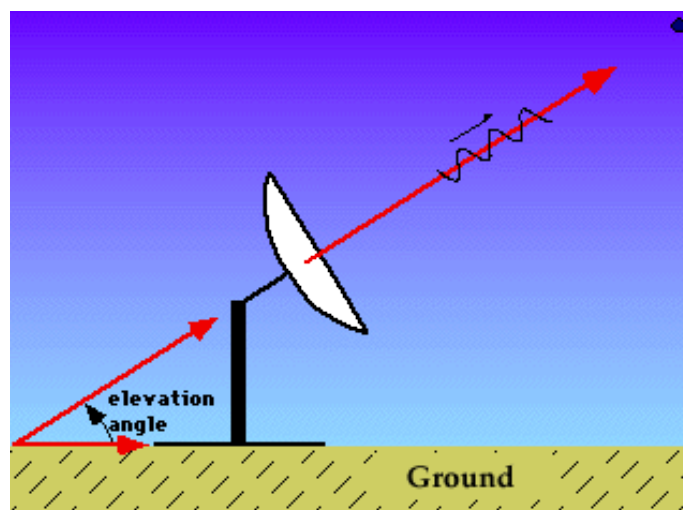
2.2 Osnovna mjerenja radara

Radar određuje poziciju mete u trodimenzionalnom prostoru. Radar mjeri poziciju mete u sferičnom koordinatnom sustavu. Moderni radari mogu odrediti sljedeće parametre [1]:

1. Azimutni kut ϑ
2. Kut elevacije φ
3. Udaljenost
4. Stopa raspona (*eng. Range Rate*)
5. Polarizaciju.

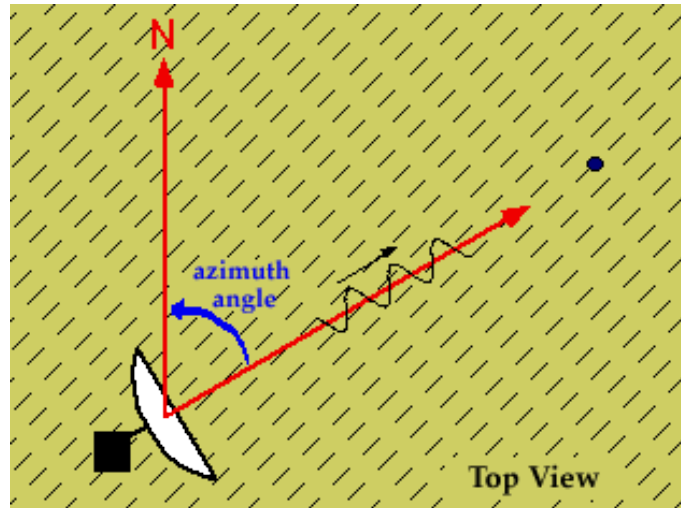
2.2.1 Azimutni kut i kut elevacije

Kutna pozicija mete, ovdje određena sa azimutnim kutom¹ i elevacijskim kutom je određena sa kutom usmjeravanja glavnog snopa antene u trenutku kada je detektirana meta. Na slici 5 i 6 možemo vidjeti koji su to kutovi. [1]



Slika 5 Elevacijski kut [5]

¹ kut koji u prostornome polarnom koordinatnom sustavu projekcija vektora na x, y ravninu zatvara s osi x



Slika 6 Azimutni kut [5]

2.2.2 Udaljenost

Udaljenost do mete se može odrediti uz pomoć vremena koje je potrebno elektromagnetskom valu da dođe do mete brzinom svjetlosti i da se vrati nazad. Pošto je udaljenost brzina pomnožena sa vremenom ukupnu udaljenost koju dobijemo je potrebno podijeliti sa dva. [1]

$$R = \frac{c\Delta T}{2} \quad (5)$$

2.2.3 Stopa raspona (*eng. Range rate*)

Radijalna brzina ili brzina u vidnom polju se naziva stopa raspona ili *Range rate*, to je brzina koja ovisi o relativnoj poziciji promatrača. [1]

2.2.4 Polarizacija

Polarizacija označava smjer električnog polja. Polarizacija se odnosi na vektorsku prirodu odaslanog i primljenog elektromagnetskog vala. Polarizacija ovisi o geometriji objekta od koje se val odbija, različiti objekti će promijeniti polarizaciju elektromagnetskog vala, zbog toga kada se val odbije od nekog objekta on nosi informaciju o obliku tog objekta. Ta informacija se može koristiti da bi razlikovali mete od *cluttera* i da bi olakšali traženje meta interesa. [1]

2.3 Jednadžba udaljenosti radara

Radarska jednadžba pokazuje o kojim parametrima ovisi signal koji smo poslali prema meti, te signal koji se odbio od mete i njegove snage koja je znatno manja. Radarska jednadžba sadrži sve varijable koje definiraju radar te nam ona najbolje može pokazati informacije o performansama radara.

Za dobivanje jednadžbe važna je snaga koju dobivamo na ulazu u prijamnik od signala koji se odbio od cilja. Jednadžba je [6]:

$$P_r = \frac{P_t g_0}{4\pi R^2} * \sigma \frac{1}{4\pi R^2} = \frac{P_0 g_t g_r \lambda \sigma}{(4\pi)^3 R^4} \text{ [W]} \quad (6)$$

P_t -snaga signala koji je poslan

P_r -snaga signala koji je odbijen od cilja, ovo je nepoznata vrijednost i treba je izračunati preko ostalih parametara

2.3.1 Dobitak antene(g_t, g_r)

Dobitak antene prikazuje kolika je stvarna korist neke antene, tj. koliko neka antena zapravo zrači. Dobitak prikazuje omjer kojom antena fokusira signal u usmjereni snop. Sa snopom koji antena odašilje su povezani parametri o usmjerenosti i dobitku. Usmjerenost antene pokazuje koliku količinu elektromagnetskog zračenja antena proizvodi u nekom smjeru u odnosu na izotropni radijator. [6]

Za većinu monostatičkih radarskih sustava, posebno onih koji koriste mehaničke antene, prijamnička i odašiljačka antena imaju isti dobitak, pa je u tim slučajevima G_t i G_r zamijenjeno sa G^2 [1]

2.3.2 Otvor-antena

$$A_e = \frac{G * \lambda^2}{4\pi} \quad (7)$$

A_e - efektivno područje antene

Antena koja šalje signal je u većini slučajeva ista ona koja će i primiti signal. Kada antena šalje signal tada je on velike snage, kada dobiva odbijeni signal nazad on je puno manje snage. Valna duljina nam govori o sposobnosti antene da prihvati odbijeni signal. Fizičke dimenzije antene ovise o dobitku antene i o valnoj duljini. Valna duljina je recipročna frekvenciji. Što je veća frekvencija antene to je veći i dobitak. [6]

2.3.3 Presjek radarskog signala(*eng. Radar cross section - RCS*)

Mogućnost signala da se odbije od cilja koji pogađa nazivamo refleksijska površina radara σ . Ako su svi odbijeni signali raspoređeni jednako oko zrakoplova tada je refleksijska površina radara jednaka refleksijskoj površini zrakoplova kako ga vidi odašiljač. U praksi jedan dio signala se apsorbira od samog zrakoplova a odbijeni signal nije jednak sa svih strana. [6]

2.3.4 Maksimalni domet radara

Ako odbijeni signal ima manju snagu od najmanjeg potrebnog detektiranog signala, radar ne može detektirati metu zato jer je izvan maksimalnog praga radarskog dometa. Zbog toga možemo reći da radar ima najveći mogući domet kada odbijeni signal ima snagu jednaku najmanjoj potrebnoj snazi za detekciju $R=R_{max}$ pri $P_r=S_{min}$. [1]

Iz ove formule možemo zatim izraziti R_{max} kako bi mogli prikazati koji parametri utječu na domet radara.

$$R_{max} = \sqrt[4]{\frac{P_t G^2 \lambda^2 \sigma}{(4\pi)^3 S_{min}}} \quad (8)$$

Korištenjem jednadžbe radara će se prikazati kako pojedini parametri utječu na moguću maksimalnu udaljenost radara. Dobitak antene iznosi [1]:

$$G = \frac{4\pi A_e}{\lambda^2} \quad (9)$$

Kada ubacimo jednadžbu 10 u jednadžbu 9 i sredimo, dobivamo izraz:

$$R_{max} = \left[\frac{P_t G \sigma A_e^2}{(4\pi)^2 \lambda^2 S_{min}} \right] \quad (10)$$

Jednadžba 11 predstavlja modificirani oblik jednadžbe udaljenosti radara, ako iz jednadžbe 10 izlučimo parametar A_e dobivamo [1] :

$$R_{max} = \left[\frac{P_t G^2 \lambda^2 \sigma}{(4\pi)^2 S_{min}} \right]^{1/4} \quad (11)$$

Korištenjem jednadžbe 12 ćemo prikazati kako dobitak antene i frekvencija utječu na maksimalni mogući domet radara. Iz te jednadžbe dobivamo izraz za SNR koji nam je jedan od važnih parametra kod odrađivanja preciznosti radara [1].

P_t označuje najveću snagu u watima

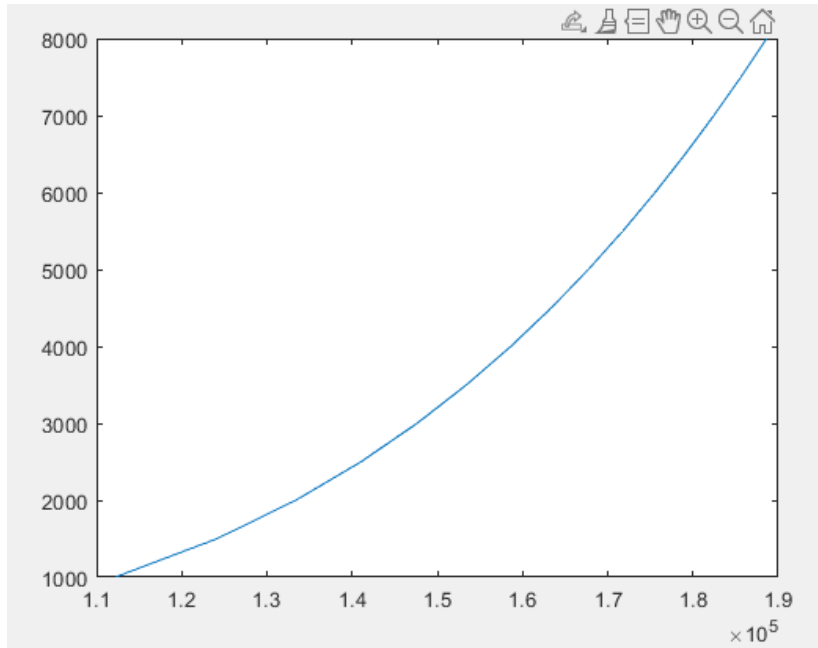
G je dobitak prijenosne antene i dobitak prijамne antene

λ je valna duljina u metrima

σ je presjek radarskog signala mete u kvadratnim metrima

R je domet od radara do mete u metrima.

Korištenjem jednadžbe 12 prikazujemo kako maksimalni domet radara ovisi o raznim parametrima radara. Za primjer ćemo koristiti maksimalnu udaljenost radara sa sljedećim specifikacijama: $P_t=250$ kW, dobitak ćemo mijenjati od 1000 do 8000 sa povećanjima od 500, efektivno područje djelovanja antene $A_e=4$ m², *radar cross range* $\sigma=25$ m², minimalna snaga potrebna $S_{min}=10^{-12}$. Prikazat ćemo kako se sa promjenom dobiti mijenja maksimalna udaljenost radara uvrštavanjem u jednadžbu 11. [7], [8]



Graf 1 ovisnosti dobiti(y- os) i maksimalne udaljenosti (x-os)

2.3.5 Omjer signala i šuma

Omjer signala i šuma je primljena snaga signala podijeljena sa snagom šuma. Omjerom signala i interferencija najbolje možemo iskazati performanse radara. Interferencija može biti od šuma, cluttera ili nekih drugih elektromagnetskih interferencija poput motora, generatora, telekomunikacijskih signala. Ako je SNR manji od nule to znači da je šum jači od signala, ako je SNR 1 ili veći to znači da je signal jači od šuma te će onda radar imati bolje performanse. [1]

$$SNR = \frac{P_t G^2 \lambda^2 \sigma}{(4\pi)^3 R^4 k T O F B} \quad (12)$$

2.4 Gubitci

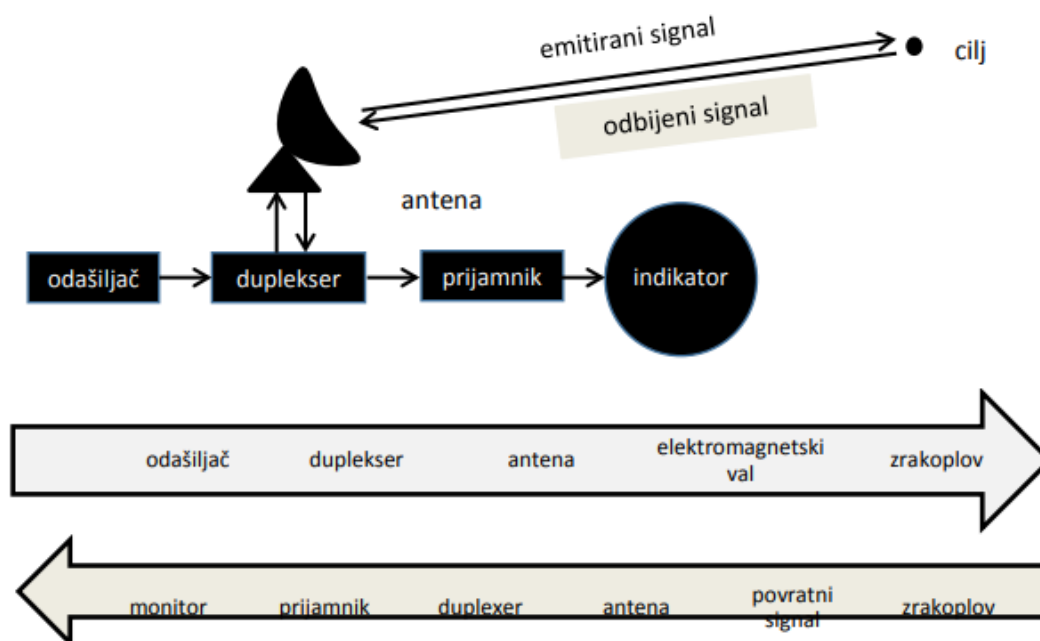
Do ovog dijela radar je prikazan kao savršen sustav bez ikakvih gubitaka, ali u stvarnosti to nije realno te će biti prisutni gubitci. Atmosferska apsorpcija, otpor komponenta, ne idealni uvjeti procesiranja signala vode do lošijih SNR performansi [1].

3 Impulsni radar

Impulsni radar sa pasivnim odjekom radi na principu monostatičkog ²radara. Odašiljač koji je poslao signal radi na velikoj snazi dok je prijamnik koji prihvaća odbijeni signal. Odbijeni signal je puno slabiji zbog gubitaka koji se događaju u procesu detekcije zrakoplova.

Proces detektiranja zrakoplova dobiva se na sljedeći način

- Odašiljač emitira VF signal ili impuls
- Duplexer prebacuje antenu između odašiljača i prijavnika kako bi se samo jedan sklop koristio u trenutku u kojem je to potrebno.
- Antena emitira signal u prostor koji se prenosi u obliku pravca prema cilju
- Nakon što se signal odbije od mete vraća se prema metu u raspršenom obliku
- Kad antena primi odbijeni signal duplexer ga usmjeruje na prijamnik
- Prijamnik demodulira signal te ga pojačava sa pojačalom i šalje ga dalje na zaslou
- Na zaslonu vidimo gdje je promatrani objekt.



Slika 7 Shema dijagrama putanje signala [9]

Udaljenost je do mete je određena mjerenjem intervala između odašiljanja impulsa do njegovog vraćanja u obliku odjeka to nazivamo *Echo* princip. Odašiljač odašilje impulse koji se odbijaju od zrakoplova, taj odjek emitiranog impulsa se javi nakon vremena t_R [6]

$$t_R = \frac{2R}{c}[\text{s}] \quad (13)$$

² Monostatički radar radi na principu slanja elektromagnetskih valova u prostor u obliku uskog snopa, kada se odbije od zrakoplova prihvaća se od strane istog radara koji je poslao taj signal

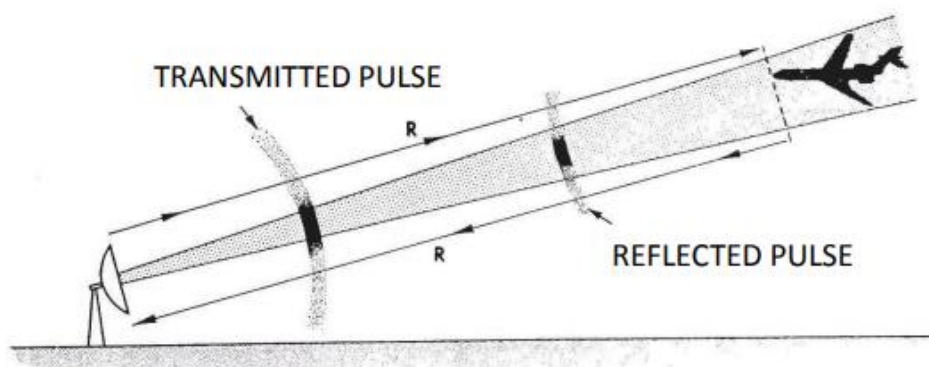
Iz jednadžbe dobivamo udaljenost mete od radara:

$$R = \frac{c \cdot t_R}{2} [\text{m}] \quad (14)$$

Emitirani impulsi se ponavljaju repeticijskom frekvencijom. Sljedeći impuls radar emitira tek nakon primljenog odjeka prethodnog signala. Potrebna je sinkronizacija vremena između odašiljača i prijemnika radara da bi se odredila udaljenost. Radarski sistemi odašilju svaki impuls tijekom vremena prenošenja (ili širine impulsa τ) čekaju povratak impulsa te onda odašilju sljedeći impuls. [10]

$$R_{jedMax} = \frac{c}{2 PRF} \quad (15)$$

PRF - repeticijska frekvencija, ona prikazuje broj impulsa u određenom vremenu, obično sekundi.



Slika 8 Mjerenje udaljenosti mete (zrakoplova) od radara [9]

Uz repeticijsku frekvenciju također imamo i PRI – vrijeme između dva impulsa [7]

$$PRI = \frac{1}{PRF} \quad (16)$$

3.1 Razlučivost po udaljenosti

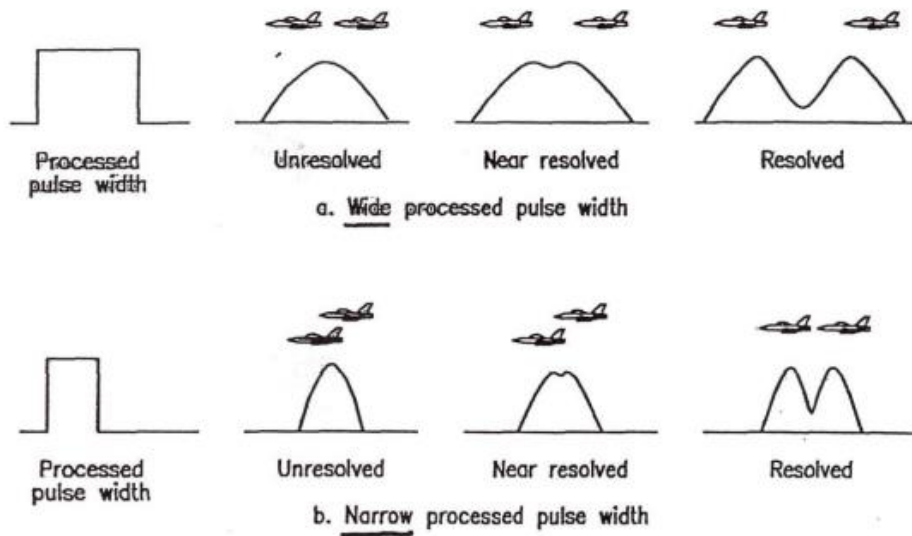
Rezolucija udaljenosti označuje stupanj preciznosti u kojem radarski sustav može odrediti kosu udaljenost (*eng. Slant range*) mete, ovisi o širini impulsa. [1] [7]

$$\Delta R = c * \frac{\tau}{2} \quad (17)$$

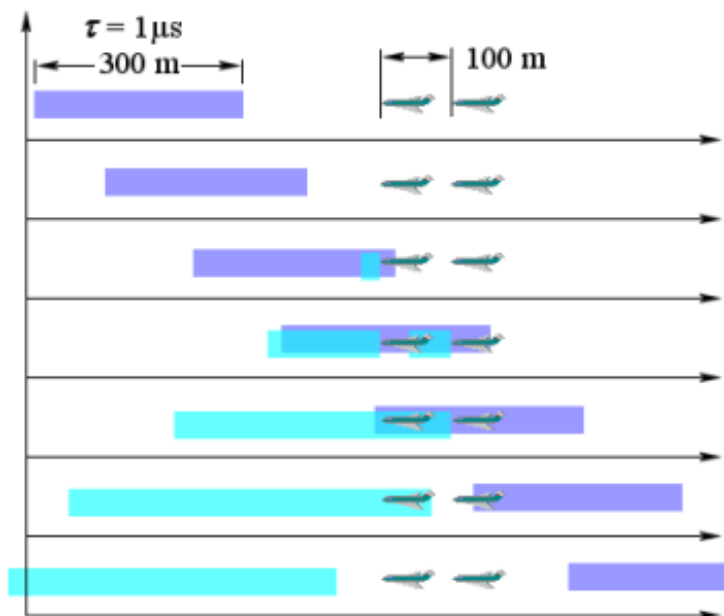
ΔR [m]	75	150	225	300	375	450	525	600	675
τ [μ s]	0.5	1	1.5	2	2.5	3	3.5	4	4.5

Malo slovo c označava brzinu svjetlosti koja će biti $3 \cdot 10^8$, znak τ označava širinu impulsa. U izračunu ćemo prikazati kako se povećavanjem širine signala od 0 do 10 za svakih 0.5 MHz povećava razlučivost po udaljenosti. Iz tablice vidimo da sa signalom širina 0.5 μ s udaljenost između zrakoplova mora biti manja od 75 metara kako bi se zrakoplovi uspješno razdvojili. Tablica je grafički prikazana na grafu 2. Na slici 11 i 12 možemo vidjeti uspješne i

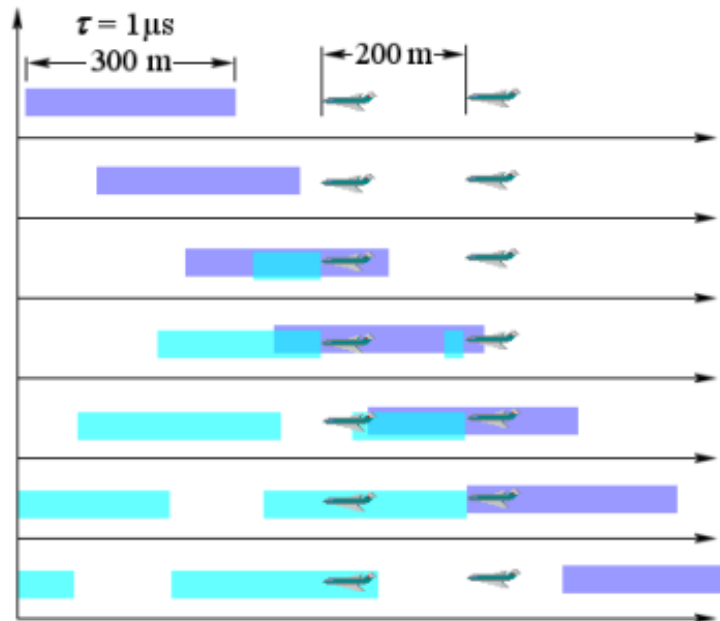
neuspješne primjere detektiranja zrakoplova. Razlučivost je bolja kada je manja vrijednost ΔR .



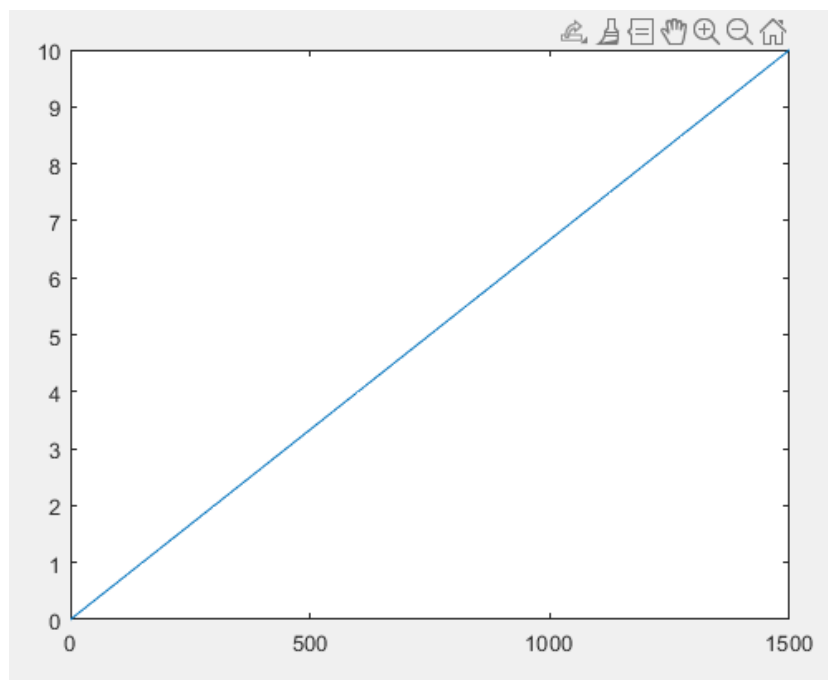
Slika 9 Utjecaj širine impulsa na razlučivost po udaljenosti [7]



Slika 10 Prikaz neuspješnog razdvajanja dvaju zrakoplova [10]



Slika 11 Prikaz uspješnog razdvajanja zrakoplova [10]



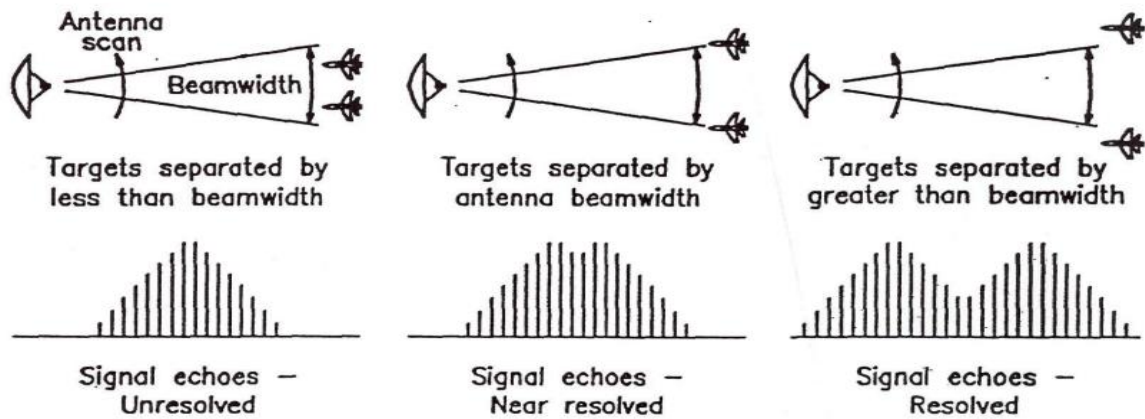
Graf 2 Ovisnost širine impulsa(y-os) i razlučivosti po udaljenosti(x-os)

3.2 Kutna razlučivost (razlučivost po azimutu)

Kutna razlučivost ili razlučivost po azimutu, predstavlja minimalan kut koji je potreban da se dva zrakoplova razdvoje kada se nalaze na istoj udaljenosti od radarske antene. Ovisi o širini pojasa impulsa i udaljenosti.

$$Sa \geq 2R * \sin \frac{\theta}{2} \tag{18}$$

θ označava širinu pojasa impulsa, S_a označava kutnu razlučivost između dvije mete, R označava najkraću udaljenost između mete i antene (*eng. Slant range*). Ako se antena zarotira više od jedne širine pojasa impulsa između dva uzastopna impulsa, postoji šansa da će „preskočiti“ zrakoplov.



Slika 14 Kako širina snopa antene utječe na kutnu rezoluciju [5]

4 Preciznost radara

Preciznost radara je razlika između predviđene pozicije i brzine mete u određenom vremenu i njene stvarne pozicije i brzine, nama za izračun preciznosti brzina nije važna već samo lokacija. Performanse radara su prikazane kao statička mjerenja sistemskih greški koje su specificirane kao [8]:

1. Predvidljive- preciznosti pozicije u odnosu na geografske koordinate zemlje
2. Ponovljive- preciznosti kojima se korisnik može vratiti na poziciju čije koordinate su već prije bile izmjerene od istog navigacijskog sustava
3. Relativne- preciznosti kojima korisnik može odrediti jednu poziciju u odnosu na drugu (ignorira sve moguće pogreške).

Preporučena vrijednost vjerojatnosti između stvarne i predviđene lokacije je 95%, to se podudara sa dvije standardne devijacije srednje vrijednosti za normalnu distribuciju varijable. Sa pretpostavkom da su sve korekcije uzete u obzir govori da će greška u izračunu biti jako blizu nuli. [8]

4.1 Preciznost u određivanju pozicije

Teoretska maksimalna preciznost sa kojom se može mjeriti udaljenost ovisi o preciznosti mjerenja vremena izvođenja. Potrebno je voditi računa o nasumičnoj greški mjerenja (*eng. Random Measurement Error*), SR . Nasumična greška se događa kod puls radara kada uzlazni rub odbijenog signala se izobličiti zbog šuma. [8]

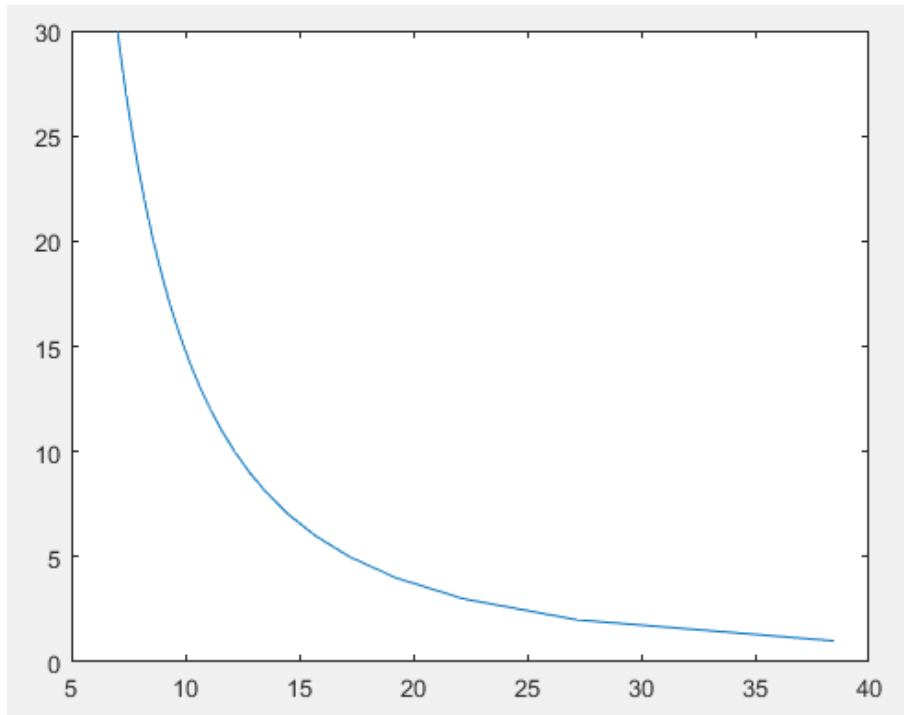
$$SR = \frac{c_0}{2B\sqrt{2SNR}} \quad (19)$$

Pošto je poznato da je rezolucija po udaljenosti $\Delta R = \frac{c_0}{2B}$ preciznost možemo prikazati kao [8]:

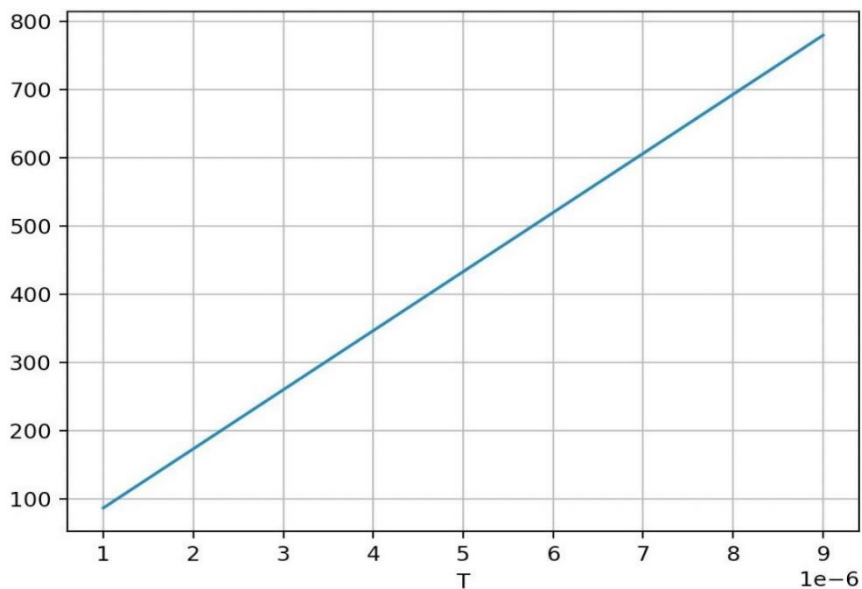
$$SR = \frac{\Delta R}{\sqrt{SNR}} \quad (20)$$

Po ovome možemo reći da preciznost radara ovisi o rezoluciji po udaljenosti i odnosu signala i šuma, preciznost se poboljšava sa većom rezolucijom udaljenosti i sa većim SNR-om, $SNR > 1$ ali često je $SNR \gg 1$ u bilo kakvim realnim uvjetima. Formulu za SNR smo izveli u jednadžbi 14. Iz te formule možemo reći da SNR ovisi o snazi odašiljača, valnoj duljini, dobitku antene i frekvenciji. Povećanjem snage odašiljača, valne duljine, dobitka antene će rasti brojnik te će SNR biti veći te će to uzrokovati bolju preciznost. U nazivniku je domet radara s eksponentom na četvrtu a iz toga možemo zaključiti da je na većim udaljenostima preciznost radara sve manja. Graf 3 prikazuje ovisnost greške pozicioniranja i SNR-a izveden u Matlabu

korištenjem formule 21. U Matlab smo unijeli formulu 21 i povećavali SNR za jedan. Graf 4 prikazuje graf ovisnosti širine impulsa i greške pozicioniranja.



Graf 3 x-os prikazuje SNR a y-os pogrešku određivanja pozicije



Graf 4 x-os prikazuje širinu impulsa, y-os prikazuje pogrešku određivanja pozicije

Povećanjem širine impulsa se smanjuje točnost radara, to smanjenje je prikazano grafom 4. Krivulja ide iz područja malih širina impulsa te je tu greška određivanja pozicija najmanja, a kako rastu širine impulsa raste i greška određivanja pozicije, valne duljine idu iz vrijednosti 0,01 do 0,1 metara.

5 SSR Sekundarni nadzorni radar

Sekundarni radar je radarski sustav koji koristi odašiljače/prijamnike i transponder koji je smješten na zrakoplovu, za razliku od primarnog radara koji radi na principu odbijanja elektromagnetskog vala. Princip SSR-a je sljedeći: sa svojom kontinuirano rotirajućom antenom SSR šalje signal kojim će ispitivati zrakoplove. Kada zraka pogodi zrakoplov, kodirani odgovor bit će poslan natrag prema radaru. Odašiljač šalje upite na frekvenciji 1030 MHz, a transponder odgovara na frekvenciji 1090 MHz. Kada je primljen odgovor određena je pozicija zrakoplova (udaljenost i putanja). Udaljenost je određena poznavanjem vremenske razlike između poslanog upita i dobivenog odgovora. Azimut je dobiven od pozicije antene, antena se rotira brzinom 5-12 rpm. Transponder odgovorom šalje informacije o identifikaciji zrakoplova, visini i ostalim informacijama. Informaciju koju prima ovisi o modu ispitivača (A,C ili S). [5]

Mod A šalje informacije vezane za identifikaciju zrakoplova. Transponder odašilje zemaljskoj stanici četveroznamenasti kod. Imamo 4096 četveroznamenastih kodova koje možemo koristiti. [4]

Mod C se koristi za informacije o visini leta zrakoplova. Instrumentima na zrakoplovu se određuje na kojoj visini lete, a te se informacije zatim šalju putem moda C prema zemaljskoj stanici a kasnije se šalju kontroli leta. [4]

Korištenjem SSR modova dobijemo korisne informacije ali sustav nije savršen i ima dosta nedostataka. Dolazi do interferencije kada dva ili više zrakoplova šalju signal odgovora zemaljskoj stanici koji se međusobno preklapaju, to nazivamo „Garbling“. Drugi nedostatak je „Fruiting“, to je interferencija prouzročena dobivanjem odgovora transpondera ali krivom interogatoru. Kao što je već spomenuto imamo 4096 različitih kodova na raspolaganju, taj broj je premalen zato što ima puno više zrakoplova koji imaju svoju jedinstvenu identifikaciju. Ako zemaljska stanica dobije previše odgovora od transpondera događa se preopterećenje zemaljske stanice. Također zbog planinskog dijela u kojem zrakoplov nekad leti, zbog refleksije se poremećuje signal, to nazivamo „ghost targets“. Zadnji problem se javlja prilikom kretanja zrakoplova. Ako je zrakoplov nagnut može doći do gubljenja signala zato što se antene nalaze na dnu zrakoplova, pomicanjem zrakoplova se sakrije antena te se signal izgubi.

Mod S koristi transpondere na zrakoplovu da bi pružio informacije o visini i identifikaciji uz dodatne globalne navigacijske podatke koji se dobivaju iz GPS sustava. Informacije dobivene sa Mode S prijenosom su dostupne pilotima i kontrolorima zračne plovodbe. Mod S sekundarnog radara rješava gore navedene nedostatke. Koristi selektivno ispitivanje kojim rješava preklapanje signala „garbling“ i „fruiting“.

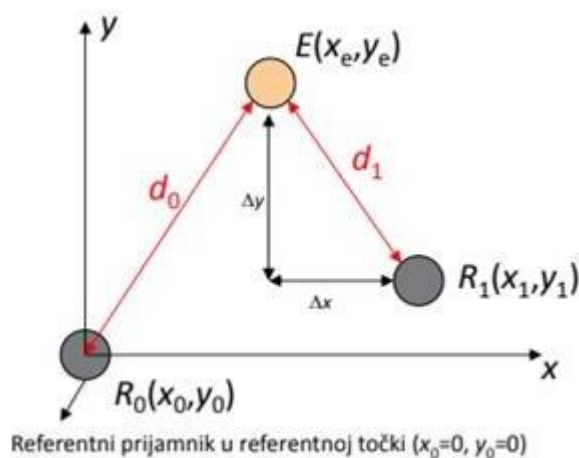
SSR se može koristiti kao interogator u sustavima multilateracije, zato je ukratko opisan u ovom poglavlju. [5]

6 Multilateracija

Multilateraciju u nadzoru zračnog prometa podrazumijeva istovremenu uporabu više zemaljskih stanica koje omogućavaju precizno lociranje zrakoplova, multilateracijski sustavi osnivaju se na kooperativnosti između zrakoplova i zemaljskih stanica. Sustavi za nadzor zračnog prometa su ovisni o zemaljskim stanicama, satelitskim navigacijskim sustavima i ugrađenim mjernim instrumentima. Na zrakoplovu treba biti ugrađen transponder inače sustav ne funkcionira. Multilateracijski sustav se sastoji od sljedećih dijelova: odašiljačkog sustava sastavljenog od odašiljača i prijemnika koji izmjenjuje poruke principom slanja upita i dobivanja odgovora, antenskog niza koji omogućava prijem signala odgovora i preciznog određivanja vremena, te upravljačkog sustava. Napretkom tehnologije, bežični sustavi za određivanje lokacije se sve više i više koriste za civilne i vojne svrhe. TDOA (eng. *Time Difference of Arrival*) tehnologija koristi tri ili više stanice te se izračunava razlika kašnjenja signala te se sa tom informacijom dobiva lokacija. TDOA se koristi za nadziranje radija, mobilne komunikacijske mreže. Koristi se jer se lagano implementira u sustav, ima visoku preciznost, i mogućnosti da se nosi sa širokopojasnim signalima niske spektralne gustoće (eng. *broadband low spectral density signals*) [2] [11]

6.1 Određivanje pozicije multilateracijom

Određivanje lokacije temelji se na razlici između vremena dolazaka signala, TDOA. Objekt se može nalaziti na bilo kojem mjestu na krivulji koja se naziva hiperbola. Za točno određivanje pozicije u dvodimenzionalnom prostoru potrebne su barem 3 stanice, a ako želimo odrediti poziciju u trodimenzionalnom prostoru trebamo najmanje četiri prijavnika. Na slici je prikazana shema načina određivanja lokacija i koordinata stanica i meta u koordinatnom sustavu.



Slika 12 Shema koordinatnog sustava za multilateraciju

$$d_i = |R_i - E| = \sqrt{\Delta x^2 + \Delta y^2} \quad (21)$$

$$d_i = |R_i - E| = \sqrt{(x_i - x_e)^2 + (y_i - y_e)^2} \quad (22)$$

$$d_0 = |R_0 - E| = \sqrt{(x_0 - x_e)^2 + (y_0 - y_e)^2} \quad (23)$$

$$d_1 = |R_1 - E| = \sqrt{(x_1 - x_e)^2 + (y_1 - y_e)^2} \quad (24)$$

$$\Delta d_{10} = |d_0 - d_1| = |\sqrt{(x_0 - x_e)^2 + (y_0 - y_e)^2} - \sqrt{(x_1 - x_e)^2 + (y_1 - y_e)^2}| \quad (25)$$

R_i - referentni prijamnik u referentnoj točki (x_i, y_i)

R_0 - referentni prijamnik u referentnoj točki $(X_0=0, Y_0=0)$

R_1 - referentni prijamnik u referentnoj točki $(X_1=1, Y_1=1)$

D_i - duljina puta

D_0 -duljina puta između prijamnik R_0 i odašiljača

D_1 - duljina puta između prijamnik R_1 i odašiljača

Δx - horizontalna udaljenost od prijamnika

Δy – vertikalna udaljenost od prijamnika

Razliku u vremenima dolaska računamo formulom:

$$\Delta TOA = TDOA = \frac{\Delta d}{v} \quad (26)$$

ΔTOA - Time of arrival

$TDOA$ - time difference of arrival

Δd - ukupna udaljenost

v - brzina signala.

6.2 Prednosti multilateracije

Upotreba multilateracije donosi poboljšanja vezana za operacijska djelovanja koja se odnose na limitirajuća svojstva tradicionalnih radarskih nadzornih sustava, te povećava sigurnost, kapacitet i zaštitu okoliša u skladu sa zahtjevima upravljanja protokom zračnog prometa. MLATna zrakoplovu zahtjeva ugrađen transponder mod A ili C, omogućava brže prepoznavanje zrakoplova zbog bržeg osvježavanja podataka. U zrakoplovu može biti ugrađen i mod S transponder koji će dodatno povećati preciznost. To je razlika u odnosu na radarski sustav gdje je za svaki okret antene potrebno nekoliko sekundi što rezultira povremenim pomicanjem pokazivača na ekranu, takozvanim „skakanjem“. [12]

Poboljšanja se odnose na:

1. Niske financijske troškove implementacije na niskim visinama gdje tradicionalni radari nemaju svrhu ili na mjesta gdje nema radarske pokrivenosti, što vodi boljoj iskoristivosti zračnog prostora.
2. Povećanje sigurnosti i kapaciteta zračne luke u slučajevima loše vidljivosti te zaštita od sudara zrakoplova i vozila na manevarskim površinama.
3. Mogućnosti nadzora i kontrole kretanja na manevarskim površinama uključujući vojne operacije i generalnu avijaciju.
4. Smanjenje infrastrukturnih troškova u slučajevima gdje je prisutno više nadzornih radarskih sustava odabirom kombinacije koja je najisplativija i najbolja.

6.3 Nedostatci multilateracije

Najveći nedostatak multilateracijskog sustava je s financijske strane zbog toga što je njegova implementacije jako skupa, to jest dolazi u upit njena isplativost. Do dodatnih troškova dolazi zato jer je potrebno izgraditi dodatne stanice i uređaje da bi se povećala točnost sustava. Drugi aspekt se odnosi na kontrolu rada i održavanje multilateracijskog sustava i njegove infrastrukture te osiguravanje energije za napajanje. Potreban je i složen sustav za kontrolu rada i komunikaciju sa ostalim sustavima kontrole zračnog prometa, prilagodba sustava na nepredviđene situacije poput vojnih operacija, kontrole granice određenih država te ljudske pogreške do kojih može doći u bilo kojem trenutku. [12]

7 Preciznost multilateracije

Ključni faktori koji utječu na preciznost lokalizacije uporabom TDOA su visina korištenog frekvencijskog područja, ovdje smo fiksirani na 1,090 GHz zbog transpondera koji radi na toj frekvenciji, broj korištenih zemaljskih stanica za izračun, geometrijska konfiguracija mreže, vremenski sinkronicitet i uvjeti propagacije signala. U radu je prikazan izračun pozicije korisnika uporabom metode TDOA unutar programskog alata Matlab. Preciznost je evaluirana prema RMSE (eng. *Root Mean Square Error*) i izražena u metrima. [13] [2]

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{n}} \quad (27)$$

7.1 Faktori koji utječu na preciznost TDOA

1. Širina pojasa – prema Fourierovoj transformaciji, uži propusni pojas frekvencijske domene signala znači širu vremensku domenu, širu korelacijsku funkciju, slabljenje korelacijskog vrhunca i njegovu otežanu detekciju, što utječe na preciznost procjene vremenskog kašnjenja
2. Tip modulacije - različiti modulacijski tipovi podrazumijevaju različite demodulacijske metode. Preciznost demodulatora koji se koriste kod različitih demodulacijskih metoda je također različita, što u konačnici uzrokuje različitu preciznost pri pozicioniranju
3. Frekvencija uzorkovanja - općenito, veća učestalost uzimanja uzoraka znači veću preciznost u pozicioniranju, no previsoka brzina uzorkovanja može uzrokovati poteškoće u obradi na strani prijemnika
4. Omjer signala i šuma (SNR-Signal-to-Noise Ratio) - prekomjerna količina šuma može uzrokovati prekrivanje efektivnog signala i poteškoće u ekstrakciji efektivnog signala
5. Preciznost lociranja uporabom GPS-a - uporaba TDOA tehnologije zahtijeva izrazito precizan mehanizam vremenske sinkronizacije između baznih stanica, a GPS ima značajan utjecaj na sinkronizaciju vremena njime se ne određuje lokacija.
6. Utjecaji višestazne propagacije signala - u realnom okruženju dolazi do reflektiranja radio valova od zgrada i drugih objekata u okolini što stvara interferenciju između vrhunaca korelacijskih funkcija, dovodeći do smanjenja preciznosti. [14]

7.2 *Dilution of precision*

Dilution of precision (DOP) ili *geometric dilution of precision* (GDOP) je pojam koji se koristi u navigaciji kako bi se odredila greška između izmjerene i stvarne pozicije neke mete te kako bi se iskazala preciznost. Ovisi o geometrijskoj poziciji mjernih točaka i utječe na performanse svakog takvog sustava. Ako su DOP vrijednosti niske to znači da je preciznost visoka. Postoje različiti DOP nazivi koji su u primjeni [13]:

GDOP (geometrijski) - opisuje utjecaj geometrije zemaljskog odašiljača na pozicioniranje u 3D prostoru i mjerenje vremena

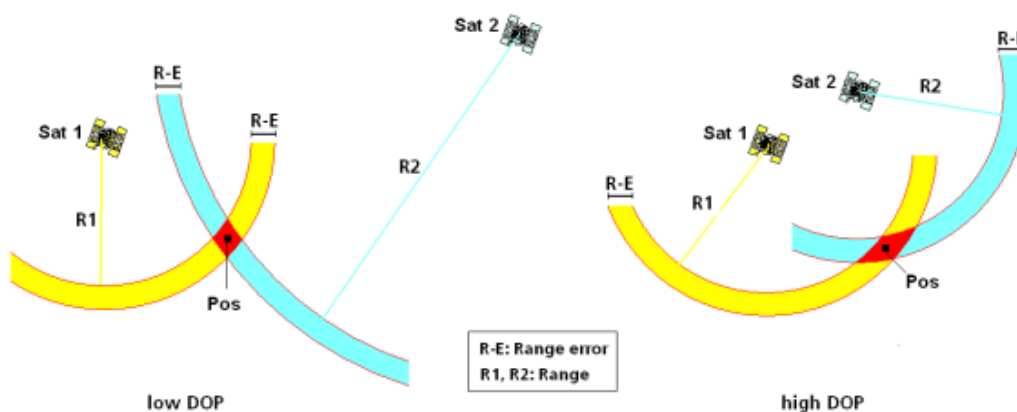
PDOP (pozicijski) - opisuje utjecaj geometrije zemaljskog odašiljača na pozicioniranje u 3D prostoru

HDOP (horizontalni) - opisuje utjecaj geometrije zemaljskog odašiljača na pozicioniranje u ravnini (2D)

VDOP (vertikalni) - opisuje utjecaj geometrije zemaljskog odašiljača na određivanje visine

TDOP (vremenski) - opisuje utjecaj geometrije zemaljskog odašiljača na mjerenje vremena.

Utjecaj geometrije zemaljskih odašiljača na preciznost je prikazana na slici 19. Kada su odašiljači više odvojeni greška određivanja pozicije je manja, kao što je prikazano na lijevom primjeru slike 19. Ako su odašiljači bliže jedan drugom greška određivanja pozicije je veća. [13]



Slika 13 Utjecaj geometrije satelita na preciznost [13]

7.3 Prikaz pogreške vremena i greške određivanja pozicije

U Matlabu je izrađen program koji principom TDOA generira stanice, dolje je prikazan kod:

```
%parameters
range_s = 30; %sensor range for each dimension
range_T = 300; %target range for each dimension
c = 3e8; %the speed of light
M = 8; %number of sensors
E = linspace(30,0.1,20);
method_flag = 0; %TDOA method flag, 0 for linear 1 for Taylor
in_est_error = 20; %initial estimate error std in meter
trials = 1;
```

```

fail_thr = 1e3; % threshold for fail of estimator
RMSE = zeros(length(E),1);
    for m=1:length(E)
        rmse = zeros(trials,1);
        err_std = E(m)*1e-10; %tdoa measurement error std in sec

```

Ovdje su zadani parametri za pokretanje koda. Određen je broj stanica sa M, Definirana je brzina svjetlosti. Program se izvodi u trodimenzionalnom Kartezijevom sustavu koji je ograničen do 300 metara u svim dimenzijama. U varijabli *rmse* će se spremati podatak o pogreški određivanja pozicije.

Ovim linijama su inicijalizirane koordinate stanica koje su fiksirane u poziciji.

```

P = zeros(3,M); %includes all sensor positon vectors

```

```

P(:,1) = range_s*2*[1; 1.38; 0.195];
P(:,2) = range_s*2*[2; 2.7; 0.3];
P(:,3) = range_s*2*[1; 3.44; 0.4];
P(:,4) = range_s*2*[1.2; 2.16; 0.5];
P(:,5) = range_s*2*[1.3; 1.2288; 0.6];
P(:,6) = range_s*2*[1; 3.21; 0.7];
P(:,7) = range_s*2*[1.8; 2.25; 0.8];
P(:,8) = range_s*2*[1; 2.975; 0.9];

```

Ovako su inicijalizirane koordinate pozicije mete.

```

p_T = range_T*2*([0.3; 0.4; 0.3]); %target positon vector

```

Ovaj dio koda određuje poziciju na kojoj će biti meta koju pokušavamo locirati.

```

tdoa = toa-toa(1); tdoa(1)=[];
tdoa = tdoa + 0.5e-9;

```

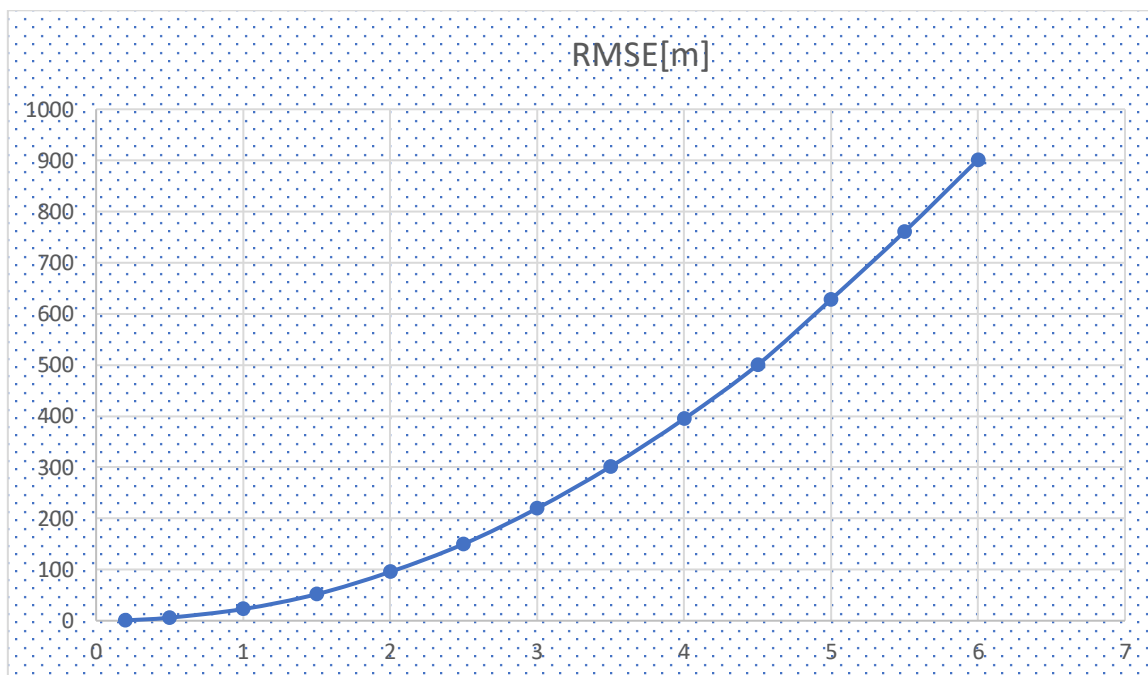
Ovdje ćemo povećavati vremensku grešku. Mijenjat ćemo zadnji dio, 0.5e-9 koji prikazuje 0.5 nano sekundi vremenske greške. Mijenjat ćemo ga od 0.5 nano sekundi i promatrati kako to utječe na grešku pozicije RMSE.

Tablica 1 Greška u određivanju lokacije MLAT

Pogreška [ns]	RMSE [m]
0,2	0,6198
0,5	5,9079
1	22,79
1,5	51,8279
2	95,4299
2,5	149,9229
3	219,5938
3,5	301,2497
4	394,6187
4,5	500,0423
5	628,1284
5,5	760,6014
6	901,3246

8 Usporedba preciznosti

Multilateracija računa razliku vremena u nanosekundama. Rastom greške u vremenu pogreška u određivanju lokacije raste eksponencijalno kao što vidimo na grafu 5. Graf 5 smo dobili iz tablice 1 koja računa RMSE po formuli 30. Već pri malim odstupanjima u vremenu pogreška raste do te mjere da nam sustav nije dovoljno precizan za korištenje u zrakoplovnoj navigaciji. Ovi podaci ukazuju na to da je u multilateraciji jako važno točno određivanje vremena. Što je RMSE veći to znači da je preciznost multilateracije lošija.



Graf 5 x-os povećanje greške vremena, y-os povećanje RMSE

Kod radara na preciznost najviše utječe širina impulsa te također i SNR. Što je veća širina impulsa također raste i pogreška u određivanju pozicije, pogreška raste linearno kao što je prikazano u grafu 4. Preciznost radara se povećava sa što boljom rezolucijom po udaljenosti. U oba sustava vidimo da kada se povećava vremenska pogreška ili što više vremena treba signalu da se vrati nazad u slučaju radara, to je sustav neprecizniji. Na preciznost radara također utječe i brzina rotacije antene. Ako se radar prebrzo okreće postoji mogućnost da „preskoči“ metu. Radar također radi sa puno većom snagom jer se signal treba odbiti od mete nazad do antene.

9 ZAKLJUČAK

Radarski sustav i multilateracija su oboje dovoljno precizni za određivanje lokacije zrakoplova. Radarski sustavi rade na jednostavnijem principu s rotirajućom antenom koja traži zrakoplov samo u području gdje je usmjerena. Zato može doći do toga da metu „preskoči“. Također, ako su dvije mete jedna iza druge, potrebno je poznavati rezoluciju po udaljenosti kako bi radar mogao raspoznati ih kao dvije zasebne mete. Povećavanjem omjera signala i šuma može doći do povećanja pozicijske greške u određivanju pozicije pa je zbog toga bolje imati što veći odnos signala i šuma (SNR), ovisnost SNR-a i greške pozicije je prikazana na grafu 3. Multilateracija je složenija za uvođenje nego primarni radar, za primarni radar nam ne treba na zrakoplovu nikakav dodatni uređaj, dok kod multilateracije na zrakoplovu treba biti ugrađen transponder koji odgovara na upite zemaljskih stanica i radi na istom principu kao za SSR. Za veću preciznost, koja je potrebna u zračnom prometu, treba jako puno stanica, tj. što je više zemaljskih stanica, to će mogućnost lociranja biti veća jer se ostvaruje cjelokupna pokrivenost područja zemaljskim stanicama. Korištenjem multilateracije potrebne su manje snage odašiljača jer signal treba samo doći do zrakoplova, dok u primarnom radaru signal se treba još odbiti od mete i vratiti do prijarnika. U multilateraciji se ne može razmatrati rezolucija po udaljenosti i azimutu jer je princip određivanja pozicije hiperbolni. Potrebno je imati dobru sinkronizaciju satova stanica kako bi greška određivanja pozicije bila što manja. U našem izračunu vidimo da već mala vremenska greška može stvoriti probleme u određivanju lokacije, prikazano na grafu 5. U multilateraciji može doći do problema ako signal slučajno ne pronađe transponder na zrakoplovu, u tom slučaju zrakoplovu neće biti moguće odrediti lokaciju, zbog toga se koristi najčešće zajedno sa primarnim radarom. Multilateracija se uvijek koristi u kooperaciji sa još nekim nadzornim sustavom.

Literatura

- [1] M. A. Richards, *Principles of Modern Radar, Volume 1- Basic Principles*, Scitech, 2010.
- [2] T. Bucak, »USKZP Handout,« Zagreb, 2020.
- [3] p. d. s. T. Bucak, *Radio i radarski sustavi: teme EM valovi, Radijska postaja, Radijske komunikacije u zrakoplovu, autorizirana predavanja, 2022.*
- [4] P. J. Ivošević, *Secondary Surveillance Radar- Autorizirana predavanja Fakulteta prometnih znanosti*, Zagreb, 2020.
- [5] SKYbrary, »SKYbrary SSR,« SKYbrary, [Mrežno]. Dostupno na: <https://skybrary.aero/articles/secondary-surveillance-radar-ssr>. [Pokušaj pristupa 2022].
- [6] B. Dario, *Impulsni radar za kontrolu zračnog prometa - završni rad*, 2017.
- [7] J. Ivošević, »Prezentacija - Primarni nadzorni radar,« Zagreb, 2022.
- [8] »radartutorial,« 2022. [Mrežno]. Dostupno na: <https://www.radartutorial.eu/01.basics/Radars%20Accuracy.en.html>.
- [9] Radartutorial, Radartutorial, Book1 "Radar Basics", 2009.
- [10] C. Wolff, Radar Basics-Book 1 "Radar Basic Principles", 2009.
- [11] p. M. Muštra, *Multilateracijski sustav nadzora zračnog prometa - autorizirana predavanja*, Zagreb: Fakultet prometnih znanosti, Sveučilišta u Zagrebu, 2020.
- [12] V. Kovačević, »Komparativna analiza neovisnih kooperativnih tehnologija nadzora zračnog prometa (Završni rad)«.
- [13] J.-M. Zogg, *GPS Essentials of Satellite Navigation*, 2009.
- [14] C. O. A. Academy, *Radio Navigation ATPL Ground Training Series*, 2014.

Popis slika

Slika 1 Shema važnih dijelova radara [1]	3
Slika 2 Orijentacija elektromagnetski polja i vektor brzine [1].....	5
Slika 3 Pojasevi frekvencija i označen pojas u kojem radi PSR [4]	6
Slika 4 Širenje elektromagnetskih valova u prostoru [1]	6
Slika 5 Elevacijski kut [5]	7
Slika 6 Azimutalni kut [5]	8
Slika 8 Shema dijagrama putanje signala [9]	12
Slika 9 Mjerenje udaljenosti mete(zrakoplova) od radara [9]	13
Slika 10 Utjecaj širine impulsa na razlučivost po udaljenosti [7]	14
Slika 11 Prikaz neuspješnog razdvajanja dvaju zrakoplova [10]	14
Slika 12 Prikaz uspješnog razdvajanja zrakoplova [10]	15
Slika 16 Shema koordinatnog sustava za multilateraciju	20
Slika 17 Utjecaj geometrije satelita na preciznost [13].....	24

Popis grafova

Graf 1 ovisnosti dobiti(y- os) i maksimalne udaljenosti (x-os)	11
Graf 2 Ovisnost širine impulsa(y-os) i razlučivosti po udaljenosti(x-os)	15
Graf 3 x-os prikazuje SNR a y-os pogrešku određivanja pozicije	18
Graf 4 x-os prikazuje širinu impulsa, y-os prikazuje pogrešku određivanja pozicije	18
Graf 5 x-os povećanje greške vremena, y-os povećanje RMSE	27

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 mojega 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 Proračun i usporedba preciznosti lociranja primarnim radarom i

multilateracijom, , u Nacionalni repozitorij završnih i diplomskih radova ZIR.

Student/ica:

U Zagrebu, _18.04.2023_

Pavle Dujmović 
(ime i prezime, potpis)