

# Određivanje utjecaja visine leta i konfiguracije terena na mogućnost detekcije primarnim radarom

---

Vrhovec, Ivor

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:119:967463>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2025-03-20**



*Repository / Repozitorij:*

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



**SVEUČILIŠTE U ZAGREBU**  
**FAKULTET PROMETNIH ZNANOSTI**

**Ivor Vrhovec**

**ODREĐIVANJE UTJECAJA VISINE LETA I KONFIGURACIJE  
TERENA NA MOGUĆNOST DETEKCIJE PRIMARNIM  
NADZORNIM RADAROM**

**ZAVRŠNI RAD**

**Zagreb, 2023.**

Sveučilište u Zagrebu  
Fakultet prometnih znanosti

## **ZAVRŠNI RAD**

**ODREĐIVANJE UTJECAJA VISINE LETA I KONFIGURACIJE TERENA NA  
MOGUĆNOST DETEKCIJE PRIMARNIM NADZORNIM RADAROM**

**DETERMINING THE INFLUENCE OF FLIGHT ALTITUDE AND TERRAIN  
CONFIGURATION ON THE POSSIBILITY OF DETECTION USING  
PRIMARY SURVEILLANCE RADAR**

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

Student: Ivor Vrhovec  
JMBAG: 0135261932

Zagreb, rujan 2023.

Zagreb, 22. svibnja 2023.

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

## ZAVRŠNI ZADATAK br. 7134

Pristupnik: **Ivor Vrhovec (0135261932)**  
Studij: **Aeronautika**  
Smjer: **Kontrola leta**

Zadatak: **Određivanje utjecaja visine leta i konfiguracije terena na mogućnost detekcije primarnim radarom**

### Opis zadatka:

Definirati parametre koji utječu na propagaciju elektromagnestkog vala u slobodnom prostoru te utjecaje okoline na propagaciju. Opisati princip rada primarnog nadzornog radara s naglaskom na monostatičkom impulsnom radaru. Povezati mogućnost detekcije letjelice primarnim nadzornim radarom s obzirom na snagu reflektiranog signala te odrediti koji čimbenici utječu na snagu reflektiranog signala. Navesti moguće utjecaje terena na propagaciju radarskog signala. Proračunati mogućnost detekcije letjelice s obzirom na karakteristike antenskog sustava primarnog nadzornog radara, uzimajući u obzir utjecaj okoline na propagaciju signala te visinu leta na mogućnost detekcije s obzirom na prepreke između letjelice i radara.

Mentor:

Predsjednik povjerenstva za  
završni ispit:

---

izv. prof. dr. sc. Mario Muštra

## ODREĐIVANJE UTJECAJA VISINE LETA I KONFIGURACIJE TERENA NA MOGUĆNOST DETEKCIJE PRIMARNIM NADZORNIM RADAROM

### SAŽETAK

Primarni nadzorni radar funkcionira na principu refleksije odaslanog signala. Ovisno o radarskim parametrima i parametrima elektromagnetskog vala vjerojatnost za detekcijom varira. Mogućnost detekcije radara ovisna je o nizu uvjeta poput operativne snage radara, duljine impulsa, veličine refleksijske površine i mnogih drugih utjecaja. Utjecaji poput prostora kroz koji se signal propagira (utjecaja padalina i terena) i objekta koji se detektira (visina i veličina) su obrađeni kroz rad. Proračunom karakterističnih slučajeva prikazani su primjeri različitih utjecaja na konačnu vjerojatnost detekcije i drugih parametara. Proračun i grafički prikaz izrađeni su pomoću programa Matlab.

Ključne riječi: Primarni nadzorni radar, refleksija, elektromagnetski val, vjerojatnost detekcije, parametri

## DETERMINING THE INFLUENCE OF FLIGHT ALTITUDE AND TERRAIN CONFIGURATION ON THE POSSIBILITY OF DETECTION USING PRIMARY SURVEILLANCE RADAR

### SUMMARY

The primary surveillance radar operates based on the reflection of the transmitted signal. Depending on parameters of a radar and electromagnetic wave, the probability of detection varies. The possibility of radar detection depends on a number of conditions, such as the operating power of the radar, the length of the pulse, the size of the reflection surface and many other influences. Influences such as the space through which the signal is propagated (influence of rainfall and terrain) and the object being detected (height and size) are addressed throughout the work. By calculating characteristics with various impacts examples of the probability of detection and other parameters are shown. The calculation and graphical presentation were made using Matlab.

Keywords: primary surveillance radar, reflection, electromagnetic wave, probability of detection, parameters

## Sadržaj

1 UVOD .....	1
2 Propagacija elektromagnetskog vala i utjecaji okoline na propagaciju .....	2
3 Primarni radar .....	5
3.1 Propagacija signala kod primarnog radara .....	6
3.2 Podjela primarnog radara i njegove karakteristike .....	7
3.3 Dijelovi primarnog radara .....	8
3.4 Jednadžbe za izračun snage i dometa .....	10
4 Određivanje mogućnosti detekcije letjelice s obzirom na snagu reflektiranog signala .....	12
5 Određivanje utjecaja terena na refleksiju radarskog signala .....	16
6 Proračun mogućnosti detekcije letjelice s obzirom na karakteristike antenskog sustava i utjecaja okoline na propagaciju signala .....	21
6.1 Izgled i prikaz rada primarnog rada u osnovnim uvjetima .....	23
6.2 Utjecaj okoline na propagaciju signala te prikaz radarskih izračuna u zadanim uvjetima .....	27
6.2.1 Utjecaj padalina na detekciju .....	27
6.2.2 Utjecaj visine i veličine zrakoplova na detekciju primarnim radarom .....	30
7 ZAKLJUČAK .....	34
LITERATURA .....	35
POPIS SLIKA .....	36
POPIS TABLICA .....	36

## 1 UVOD

Nadzor zračnog prometa razvio se sa ciljem osiguravanja sigurnog i efikasnog protoka zračnog prometa. Danas kontrolu nad zračnim prostorom vrše dva ključna radara; primarni nadzorni radar i sekundarni nadzorni radar. Njihov princip rada je baziran na odašiljanju elektromagnetskih valova pomoću kojih dobivaju informacije o objektima. Elektromagnetski val se prilikom prostiranja ne širi isključivo direktno jer nailazi na razne smetnje i utjecaje okoline za koje se treba uračunati. Primarni radar je elektromagnetski sustav koji detekcijom letećih objekta na principu refleksije određuje udaljenost i poziciju objekta, čineći ga važnim izumom za kontrolu zračnog prostora. Ovisno o vrsti primarnog radara, detekcija se kreće od padalina do praćenja objekata. Njegova prednost u usporedbi sa sekundarnim nadzornim radarom je ta što nije potrebna kooperacija transpondera da bi se saznalo prisustvo objekta. Kroz formule i parametre dobivaju se važne informacije od udaljenosti do brzine objekta. Cilj ovog završnog rada je istražiti i analizirati princip rada primarnog nadzornog radara, predstaviti način detekcije letjelice širenjem elektromagnetskog vala i različite faktore koji utječu na principe rada radara. Svrha rada je prikaz mogućnosti i limita primarnog nadzornog radara u određenim uvjetima. Rad je podijeljen na sedam cjelina:

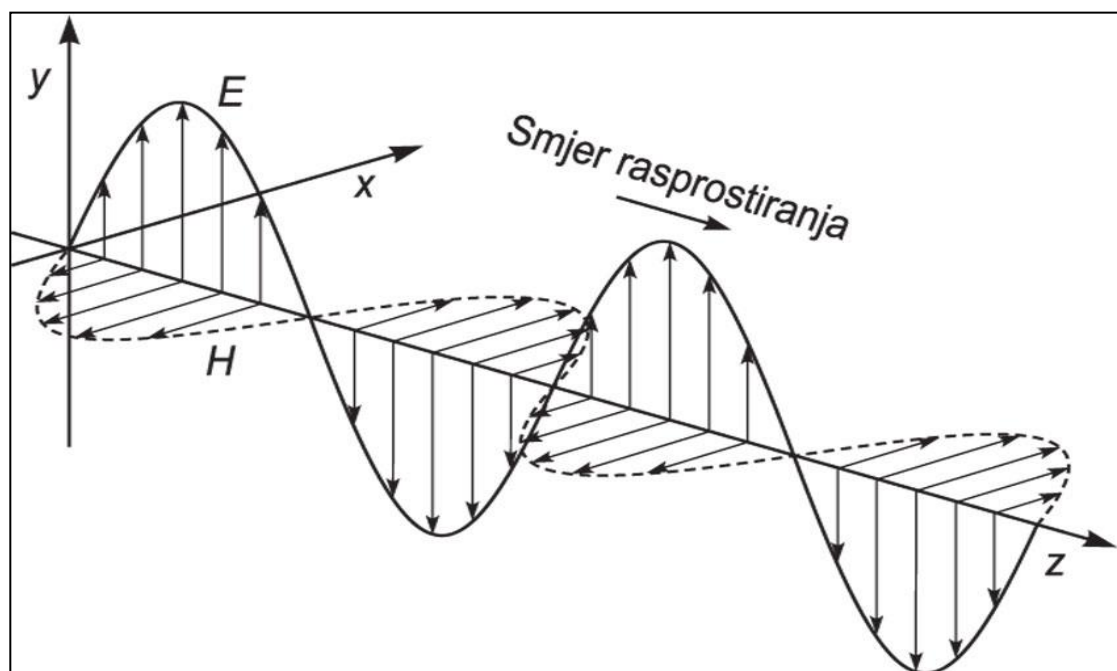
1. Uvod
2. Propagacija elektromagnetskog vala i utjecaji okoline na propagaciju
3. Primarni radar
4. Određivanje mogućnosti detekcije letjelice s obzirom na snagu reflektiranog signala
5. Određivanje utjecaja terena na refleksiju radarskog signala
6. Proračun mogućnosti detekcije letjelice s obzirom na karakteristike antenskog sustava i utjecaja okoline na propagaciju signala
7. Zaključak.

Završni rad sastoji se od sedam poglavlja, od kojih je prvo uvod. U uvodu je opisan i utvrđen cilj te predočena struktura rada. Utjecaj i princip širenja elektromagnetskog vala te vrste efekta i smetnji širenja EM vala su opisani u drugom poglavlju. U trećem poglavlju je opisan princip rada radara, podjela radara na vrste i dijelove, te primjena radarskih jednadžbi. Početak analize rada detekcije letjelice ovisne o snazi refleksije i položaju letjelice obrađen je u četvrtom poglavlju. Petim poglavljem prikazan je i analiziran utjecaj vegetacije, vrste tla i refleksije radarskog signala na propagaciju EM vala. U šestom poglavlju je, kroz proračun mogućnosti detekcije letjelice i utjecaja padaline, prikazan utjecaj mogućnosti detekcije uz parametre antenskog sustava. U posljednjem poglavlju donesen je zaključak iz svega analiziranog u radu.

## 2 Propagacija elektromagnetskog vala i utjecaji okoline na propagaciju

Širenje ili drugim riječima propagacija elektromagnetskog vala odnosi se na pojavu širenja elektromagnetske energije konačnom brzinom u nekom prostoru ili sredstvu. Kako bi nastao elektromagnetski val potreban je izvor koji može biti i vodič smješten u dielektriku, kroz koji teče izmjenična struja. Zbog promjene smjera struje dolazi do pojave vremenski promjenjivog magnetskog polja. Slika 1 prikazuje rasprostiranje elektromagnetskog vala gdje slovo E predstavlja vektor električnog polja dok slovo H označava vektor magnetskog polja. Takav elektromagnetski val je transverzalni i u njemu vektori polja u prostoru titraju u smjeru okomitom na smjer rasprostiranja vala. Takvim rasprostiranjem generirana VF (*visokofrekvencijska*) energija se pretvara u energiju elektromagnetskog polja kroz pobuđivanje okolnog prostora. Svaki EM val se sastoji od osnovnih parametara [1]:

- Brzina rasprostiranja – gotovo ista kao brzina svjetlosti ( $3 \times 10^8$  m/s)
- Titranje – periodičko mijenjanje neke fizikalne veličine, ponavljanje niza stanja u određenim vremenskim razmacima
- Period – vrijeme potrebno za jedan titraj; [s]
- Frekvencija – broj valova u sekundi; [Hz]
- Valna duljina – najmanja udaljenost između dvije čestice u fazi; udaljenost koju napravi val tijekom jednog titraja
- Amplituda – maksimalan otklon vala od ravnotežne vrijednosti; [V]
- Fazni kut – „faza“; stanje procesa titranja u određenom trenutku i mjestu
- Fazna razlika – kutna razlika dviju točaka ili više valova istih valnih duljina; [°]
- Polarizacija – orijentacija električnog vektora EM vala u odnosu na ravninu širenja.



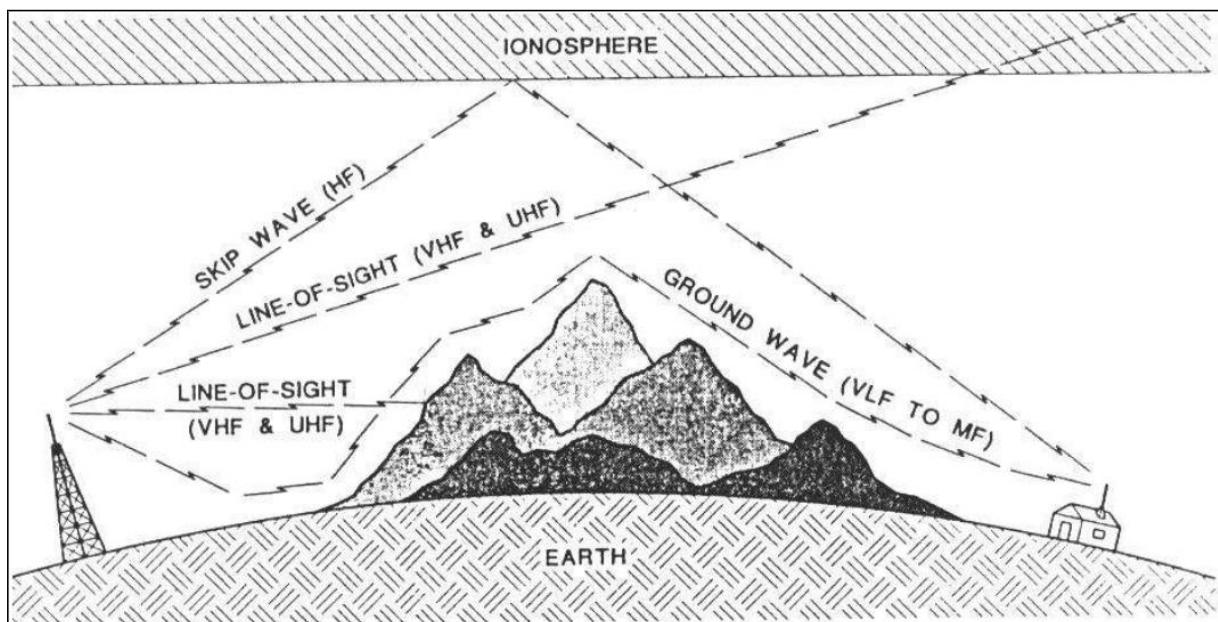
Slika 1 Širenje elektromagnetskog vala

Izvor: [2]



Elektromagnetski val se može dodatno podijeliti prema načinu propagacije, ovisno o položaju antene i smjera zračenja [1]:

- Izravni val – širi se pravocrtno, poput zrake svjetlosti. Na svojstva vala ne utječe Sunčevo djelovanje, pa je uspostavljena veza postojana. Potrebne visoke frekvencije, iznad 30 MHz
- Površinski val – nastaje pri vertikalnoj polarizaciji; energija zračenja brzo otpada jer je antena blizu tla; frekvencije oko 100 kHz uz mogući domet do 1000 km
- Ionosferski val – nastaje kad se energija tj. val, zbog efekta širenja EM vala, odbije od viših slojeva Zemljine atmosfere i vraća natrag na površinu i time ostvaruje domet veći nego kod površinskog vala; važan za kratkovalne zrakoplovne komunikacije
- Prostorni val – rasprostire se od izvora zračenja podjednako na sve strane; važan za komunikacije iznad 30 MHz; domet unutar zone vidljivosti.



Slika 2 Širenje EM valova u prostoru

Izvor: [3]

Slika 2 prikazuje širenje navedenih EM valova te utjecaj terena i atmosfere na njihovu propagaciju. Prikazana su sva četiri načina širenja EM vala.

Utjecaji okoline na širenje EM vala se može podijeliti na efekte širenja EM valova i smetnje koje nastaju pri širenju EM valova. Pod efekte širenja EM vala odnosi se na utjecaj okoline (terena, mora, prepreke,...) i na prostorno širenje EM vala. Efekti širenja EM se mogu podijeliti na [3]:

- Apsorpciju (prigušenje) – ireverzibilna pretvorba energije EM vala u neki drugi oblik energije, npr. val se toplinski načinom prenese u objekt
- Refleksiju (odraz) – promjena smjera rasprostiranja EM val pri nailasku na medij različite gustoće ili vodljivosti

- Refrakciju (lom) – promjena smjera rasprostiranja EM vala prolaskom kroz slojeve različitih indeksa loma
- Difrakciju (ogib) – ogib EM vala pri nailasku na prepreku ili nehomogeni medij
- Interferenciju – pojava uzrokovana dolaskom EM valova istih ili bliskih frekvencija iz više različitih smjerova radi kojih dolazi do faznih pomaka.

Smetnje pri širenje EM valova nastaju zbog niže navedenih utjecaja [3]:

- Fading – pojava varijacije jačine EM vala uzrokovani interferencijom
- Atmosferski utjecaji – od elektrostatickog pražnjenja u atmosferi, smetnji sličnog efekta uzrokovane promjenama magnetskog polja Zemlje do smetnji induciranog pražnjenja naboja na zrakoplova u letu
- Industrijski utjecaji – visokonaponski krugovi paljenja zrakoplovnih motora, smetnje uslijed rada DC/AC pretvarača, utjecaji Zemaljskih visokonaponskih objekata
- Dopplerov efekt – promjena frekvencije EM vala ako postoji relativno gibanje između odašiljača i prijarnika.

### 3 Primarni radar

Radijska detekcija i mjerenje udaljenosti (*Radio Detection And Ranging*), je akronim koji je stvorila američka mornarica te se danas odnosi na sustav detekcije koji koristi princip refleksije za pronalaženje položaja objekata koji se ne mogu vidjeti golim okom. Radar je elektronički uređaj pomoću kojeg se određuje udaljenost, azimut, elevacija i brzina nekog objekta. Osnovna podjela radara je na primarni nadzorni radar i sekundarni nadzorni radar. [4]

Primarni (nadzorni) radar je elektromagnetski sustav koji pomoću elektromagnetskih valova detektira i locira objekte u prostoru. Temelji se na izračunu između udaljenosti objekta do mjesta radara mjereći vrijeme potrebno impulsu do objekta i natrag. Formula 1 prikazuje da se za izračun udaljenosti  $R$  uzima brzina svjetlosti  $c$  fiksne vrijednosti  $3 \times 10^8$  m/s i vrijeme  $t$  potrebno signalu do objekta i natrag. Vrijeme potrebno signalu da prevali put dijeli se sa dva kako bi se odredila udaljenost objekta od radara [5]:

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

Uz određivanja udaljenosti, potrebno je poznavati i smjer iz kojeg reflektirani signal dolazi kako bi znali točnu lokaciju objekta. Zbog toga se antena koja se nalazi na radaru okreće određenom brzinom i odašilje signale 360 stupnjeva oko sebe. Odazivom reflektiranog signala, radar određuje smjer iz kojeg signal dolazi. Na taj način radar detektira i mjeri udaljenost objekta koji se nalaze u njegovom dometu. Mogući domet ovisi o vrsti radara; kratkog ili dalekog dometa. Da bi se postigao što veći domet detekcije potrebna je veća snaga, a s obzirom da postoji određeni gubitak energije u procesu, domet radara je proporcionalan četvrtoj potenciji dometa:

$$P_R = R^4 \quad (2)$$

Da bi se domet povećao potrebno je značajno povećati snagu signala što nam govori formula 2. Međutim, domet je limitiran sa zakrivljenošću Zemlje pa tako u kontroli zračnoga prometa iznosi oko 400 km. Iako postoje refleksije od predmeta i ionosfere koji povećavaju maksimalan domet, on nije beskonačan. [5] Osim navedenog primarni radar može saznati informaciju veličine i oblika reflektiranog objekta. O tome ovisi oblik objekta i njegov utjecaj na refleksiju pulsa te jačina odaslane snage.

Kada je objekt u pokretu primarni radar pomoću Dopplerovog pomaka izračunava putanju kretanja objekta. Dopplerov pomak računa putanju objekta kroz povećanje i smanjenje frekvencije u odnosu na onu generiranu odašiljačem, iz čega je vidljivo da postoji relativna brzina detektiranog objekta u odnosu na radar [6]. Efekt omogućuje radaru odvajanje željenih pokretnih ciljeva od neželjenih stacionarnih ciljeva poput kopna i mora. Prikupljeni podatci se digitaliziraju, obrađuju u računalu i prikazuju na zaslonu. Brzina i smjer kretanja objekata mogu se prikazati dodatnim vektorom brzine pridruženim svakom objektu na zaslonu. Takvu se prikazu mogu dodati i zemljopisna karta promatranoga područja, opis pojedinog objekta

(udaljenost, brzina) i drugi podatci značajni za specifičnu primjenu pojedinoga radarskog sustava.

Neki primarni radari mogu mjeriti i vertikalnu visinu objekta. Visinu mjere na način da u vertikalnoj ravnini lociraju leteći objekt na četvrtini kruga, ali ne poznaju točno njegovu visinu ako koristi antenu s ventilatorskom zrakom. Ta se informacija mora dobiti triangulacijom nekoliko radara. Međutim, s 3D radarom ti se podaci dobivaju ili pomoću kvadratnog uzorka kosekante ili skeniranjem na više kutova pomoću snopa. [7]

Na navedene načine primarni radar može detektirati vertikalnu visinu objekta, kut tj. azimut prilaza, udaljenost i brzinu pružajući važne informacije u zračnom prometu. Za razliku od sekundarnog nadzornog radara koji komunicira dvosmjernom komunikacijom preko transpondera, primarni radar pruža detekciju neovisno o odgovoru letećeg objekta čineći ga nezamjenjivim sustavom u zračnom prometu.

### 3.1 Propagacija signala kod primarnog radara

Primarni radar odašilje EM valove, tzv. impulse, tj. radiovalove u kratkim intervalima, koji su definiranog trajanja. Trajanje svakog impulsa definirano je sa širinom/duljinom impulsa. Zbog toga važan utjecaj koji definira područje detekcije radara su interval ponavljanja pulsa *PRI* i broj impulsa emitiranih u jednoj sekundi *PRF*. Sam odnos između *PRI* i *PRF* je obrnuto proporcionalan. Kod malih dometa povoljan je veći broj odaslanih impulsa, čime je duljina impulsa limitirana. Stoga je potrebno da širina impulsa bude što kraća kako bi signal imao vremena za povratak te na taj način izbjegao mogućnost preklapanja impulsa. Kod većih udaljenosti širina impulsa je veća kako bi se povećala vjerojatnost detekcije. [8]

Također, frekvencijski spektar na kojem radar radi je širok i ima različita svojstva u svakom frekvencijskom pojasu. Tako radarski sustavi pronalazi svoj raspon rada na i iznad raspona L-pojasa, tj. iznad 1000 MHz [10]. Općenito postoje različiti frekvencijski spektri koji su vidljivi na tablici 1.

Tablica 1 Prikaz frekvencijskih pojaseva

<b>L</b>	<b>1 – 2 GHz</b>
<b>S</b>	2 – 4 GHz
<b>C</b>	4 – 8 GHz
<b>X</b>	8 – 12 GHz
<b>Ku</b>	12 – 18 GHz
<b>K</b>	18 – 27 GHz
<b>Ka</b>	27 – 40 GHz

Izvor: [1]

Radari poput meteorološkog i doppler radara rade na frekvencijskom pojasu X, tj. na većim frekvencijama nego ostali. Razlog zbog kojeg funkcioniraju u tom pojasu je mogućnost detekcija pomaka ili padalina.

### 3.2 Podjela primarnog radara i njegove karakteristike

Postoje različite primjene radara pa tako se i primarni radari mogu podijeliti u više skupina ovisno o namjeni kojoj služe [11]:

- Zračni radar, koristi se za detekciju oborina u zraku ili u slučaju vojne uporabe za detekciju zrakoplova, projektila ili slično
- Radar na zračnoj luci, najčešći oblik primarnog radara koji uz sekundarni radar služi za informiranje ljudi o prisustvu zrakoplova u zraku
- Radar za praćenje, koristi se za praćenje meta u zraku i na Zemlji
- Meteorološki radar, koristi se u meteorologiji za praćenje vremenskih uvjeta i oborina, kao što su kiša, snijeg i tuča. Meteorološki radari mogu otkriti veličinu, intenzitet i kretanje čestica padalina, pomažući meteorolozima da predvide vremenske nepogode poput oluja, tornada i uragana
- Vojni radar, koristi se u sustavima vojne obrane za nadzor, otkrivanje prijetnji i praćenje zrakoplova, brodova, raketa i drugih potencijalnih prijetnji. Pomažu u identifikaciji i praćenju neovlaštenih ili sumnjivih aktivnosti u zračnom prostoru i na tlu
- Rutni radar, primarni radari imaju ključnu ulogu u sustavima kontrole zračnog prometa. Koriste se za otkrivanje i praćenje zrakoplova u stvarnom vremenu, pružajući informacije o njihovom položaju, nadmorskoj visini i brzini
- Doppler navigacijski radar, specijalizirani je radar koji koristi Dopplerov učinak za dobivanje podataka o brzini objekata na udaljenosti. To čini odbijanjem mikrovalnog signala od željene mete i analizom kako je kretanje objekta promijenilo frekvenciju vraćenog signala.

Osim navedenog primarni radar se koristi i za druge svrhe, no u puno manjem obujmu. Svaki primarni radar ima predviđen domet detekcije objekta, pa tako postoje radari namijenjeni za različite udaljenosti:

- Nadzorni radar za rutnu kontrolu (domet od 150 NM prema više)
- ASR – Nadzorni radar na zračnoj luci (oko 60 NM ili nešto više)
- Radar za kretanje po zračnoj luci (domet veći od 4 km).

Budući da se primarni radar isključivo zasniva na odsjaju radijskih valova, pomoću njega se može otkriti širok raspon predmeta, uključujući metalne i nemetalne mete. Međutim, primarni radar ima ograničenja. Pruža osnovne informacije o otkrivenim objektima, kao što su položaj i brzina, ali možda ne daje detaljne informacije o identitetu objekta ili drugim specifičnim značajkama poput sekundarnog radara. Karakteristike koje se koriste kod primarnih radara nisu fiksne, ali neke karakteristike radara (S band) su definirane vrijednostima koje su prikazane na Tablici 2. Tablica prikazuje mogući raspon parametara radara u S bandu.

Tablica 2 Prikaz karakteristika primarnog radara (S band)

<b>Karakteristike radara</b>	
<b>Frekvencija</b>	2,7 do 2,9 GHz
<b>Maksimalna snaga</b>	19,2 kW (moguće i 28 kW)
<b>Frekvencijska raznolikost i agilnost</b>	2 frekvencije (dugi/kratki puls) 75 MHz frekvencijska raznolikost
<b>RF TX i brisanje (blanking)</b>	Područje (1,4°) Sinkronizirana mapa zagušenja
<b>Širina pulsa</b>	Kratki puls: 1,2 μs Dugi puls: od 60 do 90 μs
<b>PRF</b>	735 do 1300 Hz
<b>Stabilnost</b>	62 dB
<b>Instrumentni raspon</b>	60 NM ili 80 NM (kraći domet) 100 NM ili 120 NM (veći domet)
<b>Detekcijski raspon</b>	>60 NM ili >80 NM >100 NM ili >120 NM
<b>Dostupnost</b>	99,999%
<b>Rezolucija (raspon i azimut)</b>	Raspon: 230 m, rms (kraći puls) 170 m, rms (dulji puls) Azimut: 2,8° rms
<b>Preciznost</b>	Raspon: 50 m, rms Azimut: 0,15°, rms
<b>Prijamnik</b>	Detekcija buke: 2,35 dB Osjetljivost: -108 dBm (kraći puls) -126 dBm (dulji puls) STC: 3 stupnja (2 RF i digitalni) ADC: 14 bitni, 93,2144 MHz
<b>Antena</b>	Dobitak: 34,5 dB ili 32,5 dB Širina snopa azimuta: 1,35° Elevacija snopa: 4,5° Brzina rotacije: 5 do 7.5 rpm ili 10 do 15 rpm Polarizacija: linearna (vertikalna)
<b>Procesiranje</b>	Vrsta: doppler filtracija Filtri: 6/8 za 80 NM, 8/10 za 60 NM Kapacitet: 1000 plotova/600 odaziva po okretu

Izvor: [12]

### 3.3 Dijelovi primarnog radara

Ovisno o vrsti i namjeni primarni nadzorni radarski sustav sastoji se od određenog broja dijelova. Svaki dio ima svoju funkciju te zajedno rade kao složeni sustav. Osnovni dijelovi svakog radara su [11]:

- Odašiljač – stvara radijski val koji se šalje i modulira ga kako bi formirao elektromagnetske valove
- Antena – uzima radarski impuls od odašiljača i stavlja ga u zrak

- Prijamnik – pojačava i demodulira primljene RF signale. Prijamnik pruža video signale na izlazu
- Duplekser – prekidač koji naizmjenično povezuje odašiljač ili prijamnik s antenom. Svrha mu je zaštititi prijamnika od visoke izlazne snage odašiljača
- Napajanje – osigurava električnu energiju za sve komponente
- Pokazatelj – osnovna funkcija pokazatelja je osigurati lako razumljiv vizualni prikaz raspona i ležajeva radarskih meta od kojih se dobivaju odjeci.

Kao što mu ime govori, *odašiljač* je poput pojačala snage tj. cijev s putujućim valom. Proizvodi potrebne frekvencije i snage pomoću kojih se antena napaja. Frekvencija se potom pretvara u EM valove (u anteni) i prostire kroz prostor. Odašiljači ne samo da moraju moći generirati veliku snagu sa stabilnim valnim oblicima, već često moraju raditi preko širokog pojasa, uz visoku učinkovitost i s dugim vremenom bez problema u radu. Njihova generirana snaga je prilagođena vrsti radara za koji su namijenjeni. [9]

Snaga odašiljača šalje se u prostor pomoću usmjerene *antene* koja koncentrira energiju u uski snop. Uzak, usmjereni snop koji je karakterističan za većinu radarskih antena, ne samo da koncentrira energiju na cilj, već također omogućuje mjerenje smjera do cilja. Tipična širina snopa antene za detekciju ili praćenje objekta može biti oko 1° ili 2°. Generalno širina snopa ovisi o vrsti radara. Antena se okreće u krug, 360°, preko mehanizma za pokretanje koje može biti mehaničko ili elektroničko. Kako bi se omogućilo pretraživanje cijeloga prostora u okolini radara, antena se najčešće zakreće po azimutu i/ili elevaciji. Uz primarni snop nastaju i bočni snopovi tzv. bočne latice koje tipično nastaju pored i iza primarnog snopa. [9] [5]

Kada se EM val reflektira i vrati do antene šalje se do *prijamnika koji prima*, pojačava i izolira dolazeće valove. Prijamnik je gotovo uvijek superheterodinskog tipa s mješačem i oscilatorom. Svrha prijamnika je da odvoji željeni signal od stalno prisutnog šuma i drugih signala. [9]

*Duplekser* djeluje kao brzi prekidač za zaštitu prijemnika od oštećenja kada je uključen odašiljač velike snage. Prilikom prijema signala s isključenim odašiljačem, duplekser usmjerava primljeni signal na prijamnik umjesto na odašiljač. [5]

*Pokazivač*, kao što mu ime govori, služi da prikaže dolazne podatke na ekranu ili da ih pretvori u čujni oblik. Nakon što je vidljivo da je objekt prisutan i da je utvrđena njegova lokacija (u rasponu i kutu), trag cilja može se dobiti mjerenjem ciljane lokacije u različito vrijeme i prikazati na pokazivaču.

Slika 3 prikazuje klasičan izgled primarnog nadzornog radara koji se sastoji od svih navedenih dijelova osim pokazivača.



Slika 3 Standardni izgled primarnog radara

Izvor: [12]

U analizi i radu je korišten konvencionalni radar. To je radar pod koji se podrazumijeva monostatički impulsni radar koji koristi princip eko signala za lociranje cilja. Kod takvog radara odašiljač i prijamnik su na istom mjestu, što znači da postoji jedna primopredajna antena.

### 3.4 Jednadžbe za izračun snage i dometa

Jedan od najkorisnijih opisa svojstva radara pruža radarska jednadžba koja daje raspon rada radara. Pod raspon rada se smatra dobivanje radarskih karakteristika koje karakteriziraju radar. Jedan oblik ove jednadžbe daje primljeni signal snage  $P_R$  kao:

$$P_R = \frac{P_t G_t}{4\pi R^2} \cdot \frac{\sigma}{4\pi R^2} \cdot A_e \quad (3)$$

Desna strana jednadžbe je napisana kao umnožak triju faktora koje treba zastupati fizičke procese koji se događaju. Prvi faktor je gustoća snage na udaljenosti  $R$  metara od radara koji zrači snagu  $P_t$  iz antene s dobicom  $G_t$  (gain). Brojnik drugog faktora je ciljni presjek  $\sigma$  u metru kvadratnom. To je karakteristika određene mete i predstavlja mjeru njegove veličine koju vidi radar. Oba nazivnika  $4\pi R^2$  jednaka su imaginarnoj sferi polumjera  $R$  pomnožena sa  $4\pi$ . Rezultat od prva dva člana predstavlja snagu po kvadratnom metru vraćenu radaru. Antena efektivnog otvora  $A_e$  presreće dio snage iznosa dobivenog od produkta triju faktora. Kada je maksimalan radarski domet  $R_{max}$  definiran kao iznos dobivene snage  $P_r$ , jednak primljenoj minimalnom detektabilnom signalu  $S_{min}$ , radarska jednadžba poprima sljedeći oblik:

$$R_{max}^4 = \frac{P_t G_t A_e \sigma}{(4\pi)^2 \cdot S_{min}} \quad (4)$$



Jednadžba radara pokazuje da je raspon radara proporcionalan četvrtom korijenu snage odašiljača. Stoga, da bi udvostručili raspon potrebno je povećanje snage za 16. To znači da često postoji praktično, ekonomsko ograničenje količine snage koje se treba koristiti za povećanje raspona radara. Kada se ista antena koristi za odašiljanje i za prijam istovremeno, dobitak odašiljanja  $G_t$  i efektivni prijamni otvor  $A_e$  povezani su s  $G_t = 4\pi A_e / \lambda^2$ , gdje  $\lambda$  predstavlja valnu duljinu. Primjenom navedenog proizlazi sljedeći oblik jednadžbe:

$$R_{max}^4 = \frac{P_t G_t^2 \lambda^2 \sigma}{(4\pi)^3 S_{min}} \quad (5)$$

Navedeni primjer radarske jednadžbe koristan je za grube izračune performansi dometa, ali su previše pojednostavljeni i ne daju stvarne rezultate. Postoje dva glavna razloga zašto jednostavan oblik radarske jednadžbe ne predviđa domet stvarnih radara. Prvo, ne uključuje razne gubitke koji se mogu pojaviti zbog radara. Drugo, ciljni presjek i minimalni detektabilni signal su statističke prirode.

Osim što se koristi za predviđanje dometa, radarska jednadžba čini dobru osnovu za preliminarni dizajn sustava pružajući opciju za moguće kompromise među različitim parametrima koji ulaze u performanse radara. [9]

## 4 Određivanje mogućnosti detekcije letjelice s obzirom na snagu reflektiranog signala

Od četvrtog do šestog poglavlja usporediti će se i analizirati razni utjecaji na vjerojatnost detekcije primarnim nadzornim radarom. Kako bi se bolje razumjela vjerojatnost za detekcijom zrakoplova, u ovom djelu bit će prikazan utjecaj razine snage na refleksiju signala od zrakoplova i konačni rezultat vjerojatnosti detekcije. Ujedno će biti prikazan utjecaj veličine zrakoplova na refleksiju signala.

Kako bi prikazali i izračunali mogući domet detekcije letjelice potrebno je postaviti nekoliko parametra uzetih iz simulacije:

- Frekvencija 2,9 GHz
- Prosječna snaga 3 kW (maksimalna 0,11 MW)
- Širina pulsa 20  $\mu$ s
- PRF<sup>1</sup> (*pulse repetition frequency*) 1,3 kHz (PRI<sup>2</sup> (*pulse recurrence interval*) 0,7692 kHz)
- Dobitak 36,35 dBi
- Minimalan detektabilan signal -90,93 dBm
- Ae (efektivna reflektivna površina) iznosi 20 m<sup>2</sup>
- $\sigma$  (RCS) iznosi 12 m<sup>2</sup>
- Valna duljina iznosi 0,1034 m
- $S_{min}$  (minimalna reflektirana snaga) iznosi 0,000348 W.

Koristeći formulu (4) i zadane parametre, dobiven je maksimalan domet od 363,52 km.

$$R_{max}^4 = \frac{P_t G_t A_e \sigma}{(4\pi)^2 \cdot S_{min}} \quad (4)$$

U izračunu se pretpostavlja da je elektromagnetski val direktno reflektiran od letjelice prema radaru te da nije bilo nikakvih atmosferskih utjecaja na signal. Prema formuli za veći domet potrebno je imati mogućnost primanja što niže reflektirane snage, što je kod radara fiksni parametar. Kako bi najbolje bila prikazana mogućnost detekcije letjelice koristi će se formula (3):

$$P_R = \frac{P_t G_t}{4\pi R^2} \cdot \frac{\sigma}{4\pi R^2} \cdot A_e \quad (3)$$

Formula za izračun primljene snage za detekciju je određena sa pet čimbenika; snaga radara  $P_t$ , dobitak radara  $G$ , udaljenost zrakoplova  $R$ , RCS  $\sigma$  i efektivna refleksijska površina  $A_e$ . Jedini parametar koji nije fiksni je udaljenost zrakoplova.

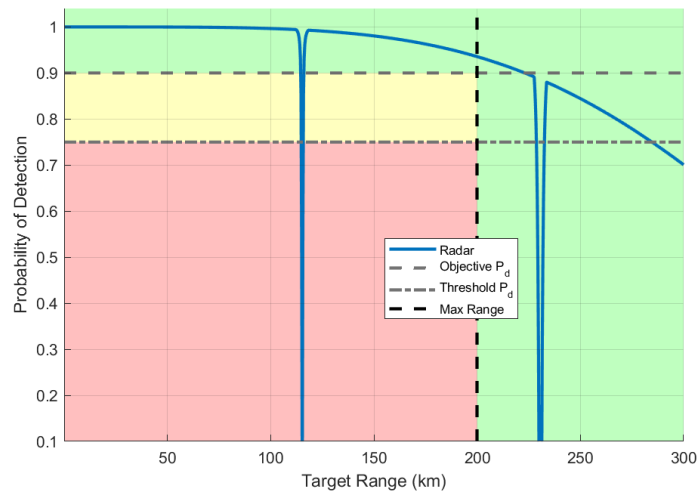
Za svrhu prikaza utjecaja snage reflektiranog signala na mogućnost detekcije bit će prikazani slučajevi gdje se zrakoplov nalazi na dvije različite udaljenosti, RCS u slučaju kad je manjeg iznosa i kad je većeg iznosa te što se događa s primljenom snagom ako se snaga radara poveća. U

---

<sup>1</sup> PRF – broj pulseva odaslanih u jednoj sekundi

<sup>2</sup> PRI – vremenski interval između dva pulsa (PRF i PRI su obrnuto proporcionalni)

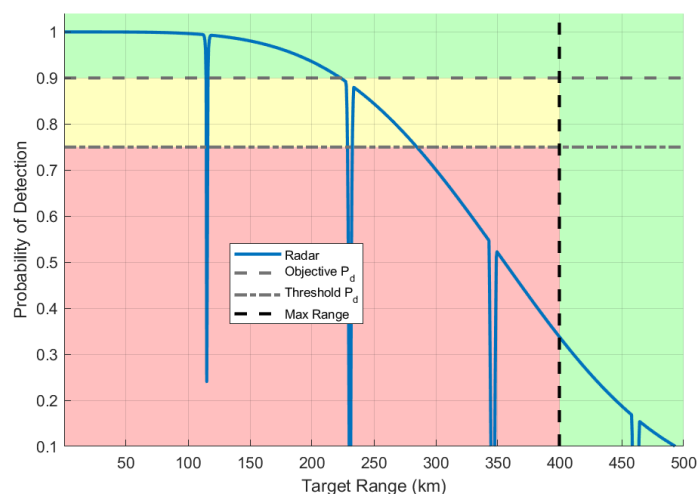
svim primjerima bit će prikazano kako navedena promjena utječe na mogućnost detekcije letjelice.



Slika 4 Prikaz omjera vjerojatnosti detekcije i ciljanog dometa na udaljenosti 200 km

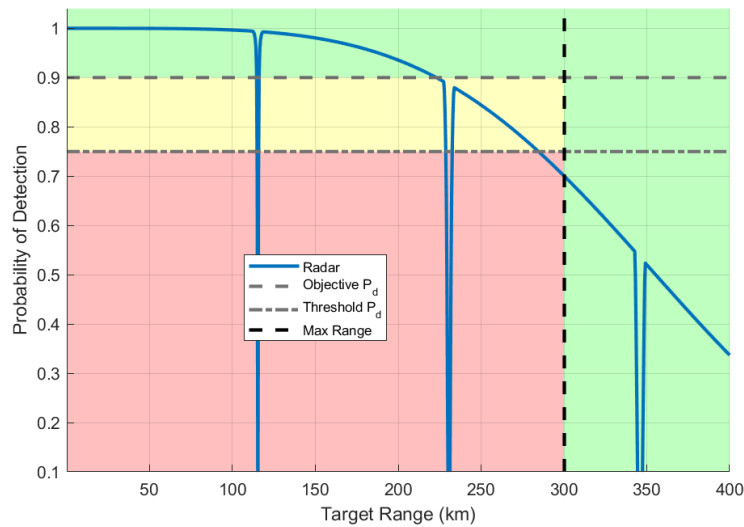
Slika 4 prikazuje vjerojatnost detekcije letjelice na ciljanim udaljenostima s postavljenim maksimalnim dometom od 200 km. Prema formuli snaga primljenog signala iznosi 0,003834 W, što u usporedbi sa postavljenim parametrima zadovoljava uvjete detekcije. Vjerojatnost detekcije na udaljenosti od 200 km iznosi 93,55%.

Kada povećamo domet na 400 km vjerojatnost za detekciju značajno pada. Teoretski prema formuli za maksimalan domet i prema zadanim parametrima, radar bi trebao detektirati do vrijednosti 363,52 km. U izračunu zbog zakrivljenosti Zemlje i utjecaja atmosfere postoje devijacije u formuli te vjerojatnost detekcije bi trebala iznositi 33,7%, no zbog toga što je radaru potreba određena minimalna reflektirana snaga  $S_{min}$ , realna vjerojatnost za detekciju opada na 0%. Izračunom preko formule na udaljenosti od 400 km  $S_{min}$  iznosi 0,0002395 W što je manje nego potrebna reflektirana snaga za detekciju te samim time se potvrđuje pad vjerojatnosti detekcije na 0%. Kada bi objekt prišao na udaljenost od 363,52 km uvjet  $S_{min}$  bi bio zadovoljen te samim time bi detekcija bila moguća.



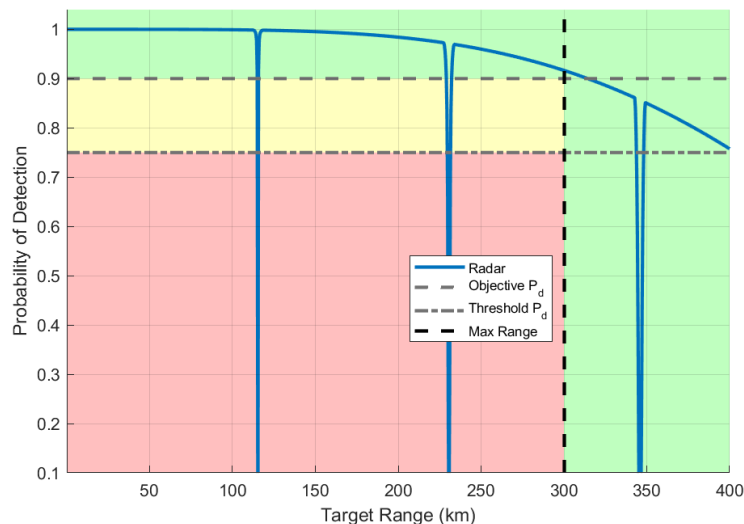
Slika 5 Prikaz omjera vjerojatnosti detekcije i ciljanog dometa na udaljenosti 400 km

U sljedećem primjeru objašnjen je utjecaj RCS (*Radar cross section*) na detekciju letjelice. Prema Zadanim parametrima RCS iznosi  $12 \text{ m}^2$  i na udaljenosti 300 km vjerojatnost detekcije iznosi 70,08% te nakon 300 km postepeno opada što je moguće vidjeti na slici 6.



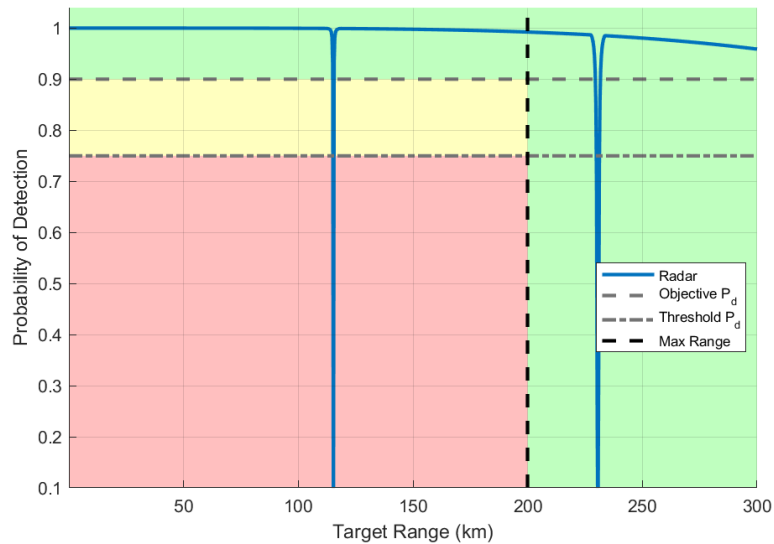
Slika 6 Prikaz omjera vjerojatnosti detekcije i ciljanog dometa kod RCS  $12 \text{ m}^2$

Na slici 7 prikazan je uvećani RCS od  $50 \text{ m}^2$  koji prikazuje vjerojatnost detekcije od 91,66%, što je značajan porast u usporedbi sa prijašnjim RCS-om. Takva promjena ovisna je o veličini površine letjelice, materijalu (metal u ovom slučaju) i obliku. Zaključno tome, vidljivo je da povećanje RCS-a značajno utječe i povećava vjerojatnost za detekcijom.



Slika 7 Prikaz omjera vjerojatnosti detekcije i ciljanog dometa kod RCS  $50 \text{ m}^2$

Kada bi se maksimalna snaga radara mogla povećati za vrijeme rada, zaprimljena snaga bi se značajno povećala. Slika 8 prikazuje slučaj gdje je maksimalna snaga povećana sa prosječne snage na 1 MW. Zaprimljena snaga bi prema formuli iznosila 0,0345 W, što u usporedbi sa minimalnom snagom je značajno veći iznos. Vjerojatnost za detekciju tada iznosi 99,23% umjesto početnih 93,55%.



Slika 8 Prikaz omjera vjerojatnosti detekcije i ciljanog dometa kod povećane snage

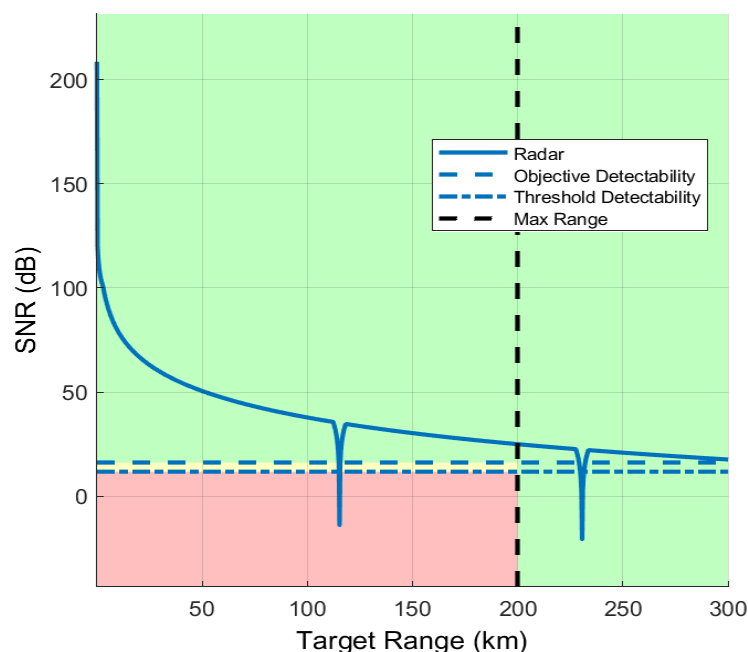
Izračun i primjena formule dokazuju da teoretska vjerojatnost za detekciju postoji na određenim udaljenostima, no radarski limiti ne mogu ostvariti teoretsku detekciju na većim udaljenostima nego što im parametri omogućuju te zbog toga vjerojatnost za detekciju može iznositi 0. Karakteristike letjelice poput veličine i vrste imaju značajan utjecaj na količinu reflektiranog signala te povećavanjem RCS se povećava vjerojatnost za detekciju. Uz to snaga radara, iako fiksna, definira vjerojatnost detekcije letjelice. Kod većih izvora snaga, vjerojatnost za detekciju je veća na istim područjima kao kod slabijeg radara. Također, veća snaga uvjetuje veću mogućnost dometa. U stvarnim izvedbama radara značajan porast snage nije lako moguće zbog potrebe za generiranjem velike snage.

## 5 Određivanje utjecaja terena na refleksiju radarskog signala

Svaka površina iznad koje putuje elektromagnetski val ili od koje se reflektira val, drugačije utječe na vertikalni prikaz i vjerojatnost detekcije. U nastavku bit će prikazana detekcija radara na različitim površinama (more, pustinja, planine i urbano područje), izgled vertikalne pokrivenosti i njezinih vertikalnih latica koje nastaju od ravnog prostiranja EM vala i odbijanja od tla. Vertikalne latice se odnose na vertikalni prikaz pokrivenosti radara na kojem je detekcija moguća. Kada se objekt nalazi izvan latica radar ga ne može detektirati jer se nalazi izvan njegovog područja detekcije.

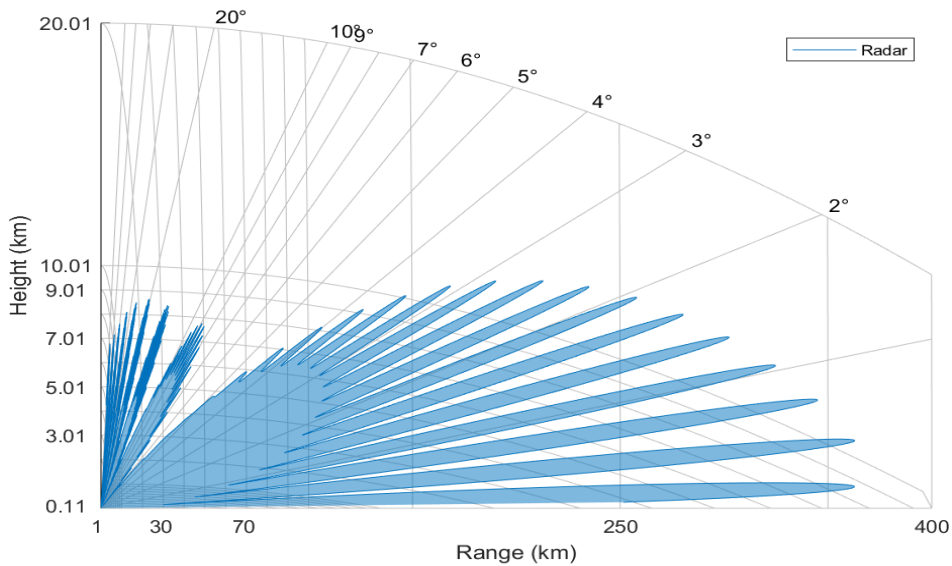
Izračuni i prikazi u ovom poglavlju bit će uspoređeni s osnovnim parametrima, tj. sa izračunima i prikazima koji se nalaze pod poglavljem 6.

Za pojednostavljeni utjecaj uzima se u obzir mirno more bez dodatnih utjecaja padalina. Na slici 9 vidljiv je značajno povećan domet (300 km) u usporedbi sa dometom na slici 18 gdje iznosi 225 km. Razlog tome je ravna površina koja omogućuje jednostavniju propagaciju elektromagnetskog vala.



Slika 9 Prikaz omjera SNR-a i dometa iznad mora

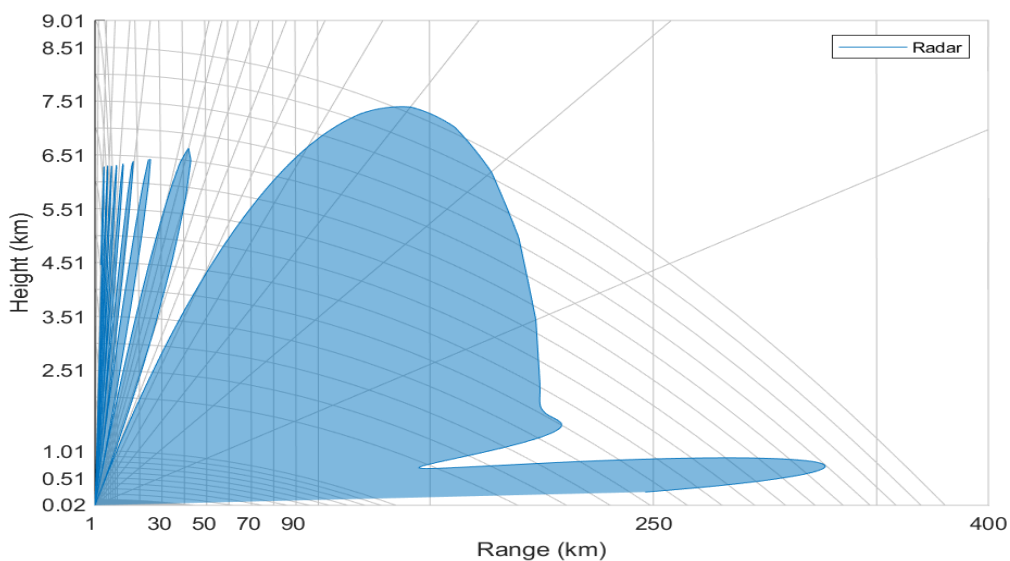
Slika 10 u usporedbi sa slikom 17 prikazuje pokrivenost radara vertikalno iznad mora koja postaje značajno veća do 9 km, dok horizontalno zadržava gotovo identičan domet no nešto drugačiji izgled. Izgled prostora iznad ravnih površina je sličan kosekant krivulji gustoće snage.



Slika 10 Vertikalna pokrivenost radara iznad mora

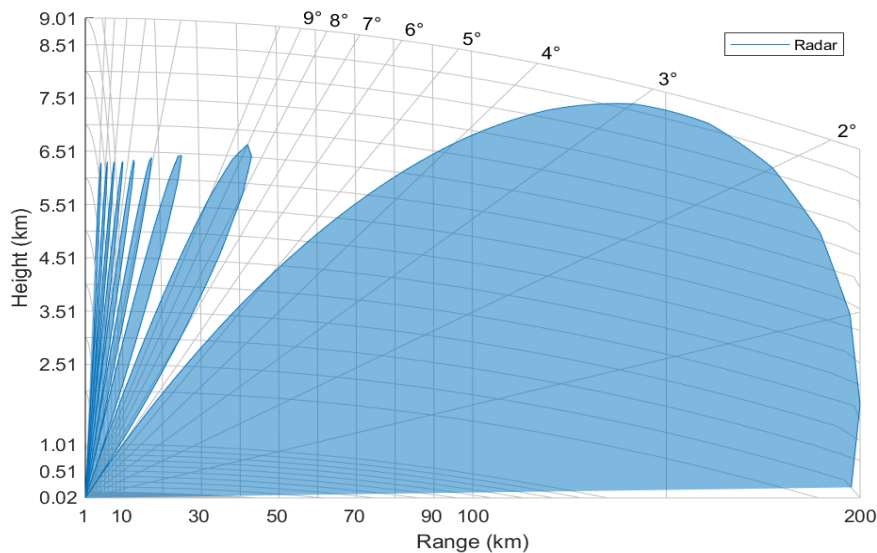
Vjerojatnost za detekciju iznad površine mora na udaljenosti 200 km poraste na 0,9861, tj. 98,61% u usporedbi sa osnovnim primjerom koji je prikazan na slici 17. Vertikalne latice iznad površine mora poprimaju karakterističan oblik u usporedbi sa drugim terenom. Područje pokrivenosti na većim udaljenostima je dosta rascjepkano zbog načina refleksije od ravne površine i utjecaja micanja morske površine. Svaki teren koji je fiksiran poput kopna stvara veće latice te kada bi se radar podigao sa 10 m nadmorske visine na veću visinu latice bi se više preklapale na većim udaljenostima.

Kod pustinja omjer SNR-a i dometa je gotovo identičan onome iznad kopna (Slika 17) uz vjerojatnost za detekciju od 93,53%. Razliku od kopna i mora moguće je primijetiti na vertikalnoj pokrivenosti radara gdje je najveća latica između 1° i 4° stupnja spojena u jednu radi refleksije od dina i sličnih prirodnih predmeta.



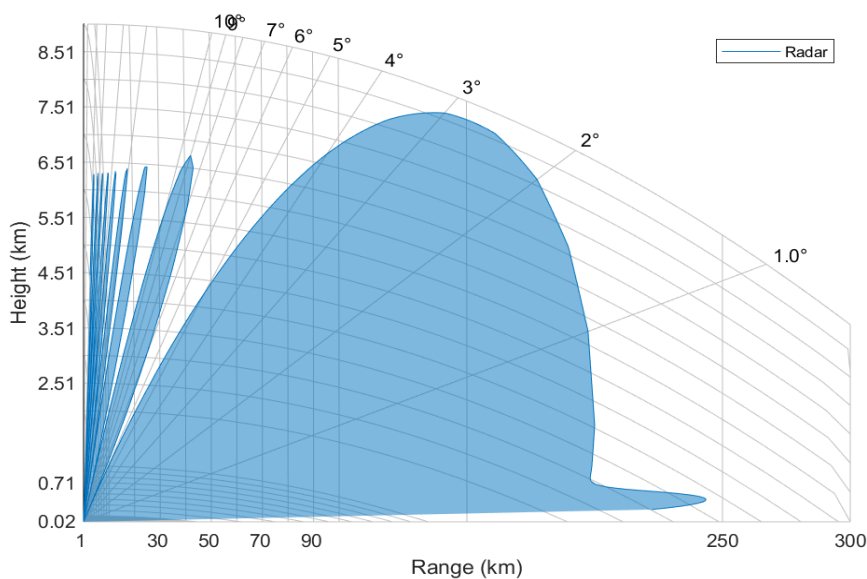
Slika 11 Vertikalna pokrivenost radara iznad pustinje

Kod planinskog područja s drvećem i travom nema velike razlike u utjecaju na domet u usporedbi sa početnim radarskim izračunom do 200 km (Slika 17). Zbog neravnog područja postoji puno refleksija (horizontalnih, ali i vertikalnih) te zbog toga vertikalna pokrivenost radara na planinskom području postaje limitirana na 200 km s velikom laticom što je vidljivo na slici 12. Vjerojatnost detekcije zrakoplova u ovom slučaju iznosi 93,67%.



Slika 12 vertikalna pokrivenost radara na planinskom području

Pod urbanim područjem smatra se gradsko područje s neboderima i zgradama. Slika 13 nalikuje slici 12 jer, kao i u planinskom području, u urbanim sredinama dolazi do puno refleksije. Glavna razlika od planinskog područja je što postoji mali dio latice pri tlu koji pokriva veći domet do 240 km, jer su refleksije pravilnije ili postoji prostor gdje val putuje bez prepreke. Vjerojatnost detekcije iznosi 93,54% te prikaz SNR-a i dometa je gotovo identičan prvom izračunu.

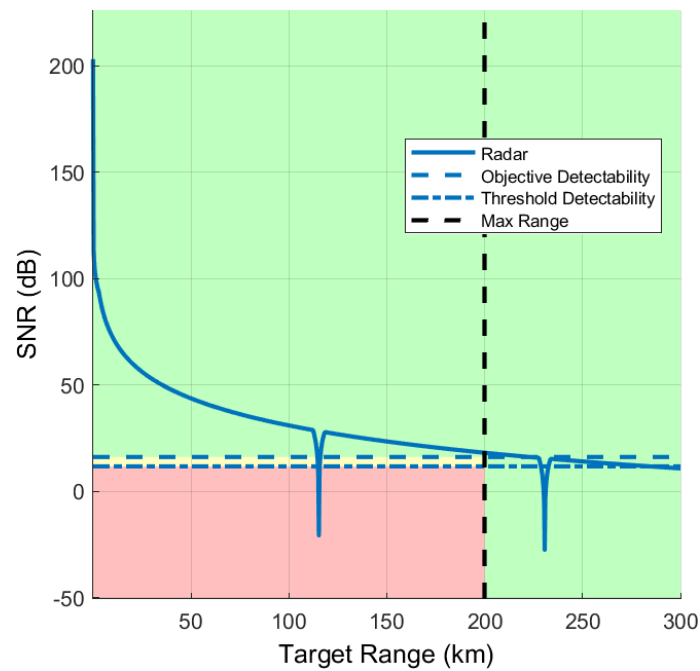


Slika 13 Vertikalna pokrivenost radara u urbanom području

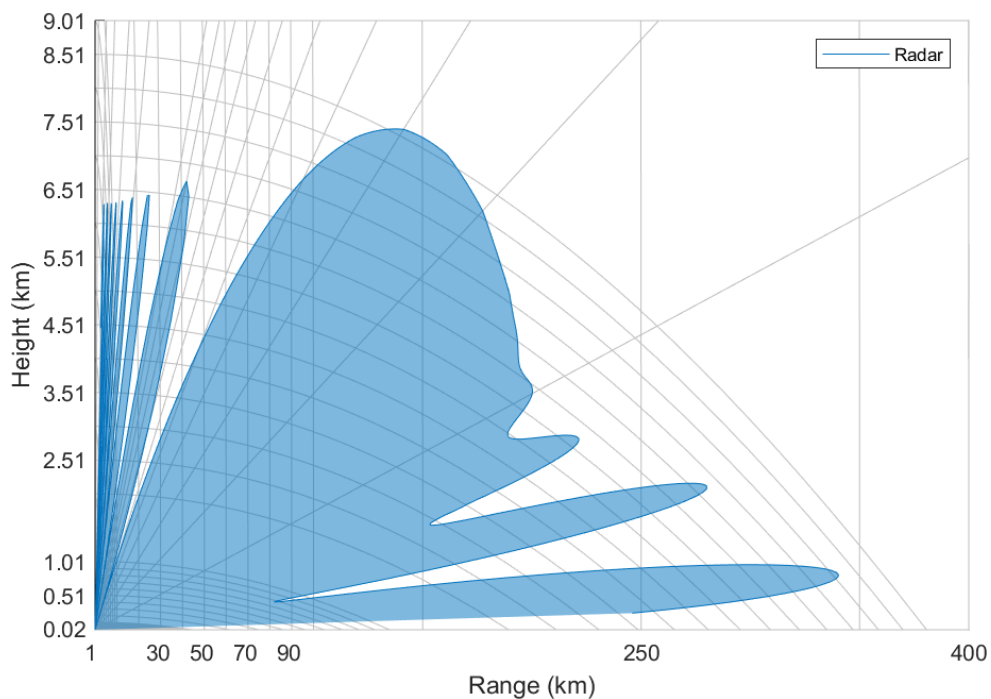


S druge strane, utjecaj drugačije vegetacije na ravnom području ima puno manji utjecaj na domet i vertikalnu pokrivenost radara (tj. propagaciju elektromagnetskog vala) od vrste tla.

Kad se usporedi slika 14 i 15 sa slikama 17 i 18 vidi se da gusto drveće ima minimalan utjecaj na promjenu dometa i vertikalne pokrivenost radara. Glavna razlika postoji kod vertikalne pokrivenosti gdje su latice do 4° kraće zbog refleksije od drveća. Gusti korov u usporedbi sa gustim drvećem ima nešto blaži utjecaj koji se ne može lagano primijetiti kada usporedimo sa grafovima sa slika 17 i 18.



Slika 14 Omjer SNR-a i dometa kod gustog drveća



Slika 15 Vertikalna pokrivenost radara kod gustog drveća

Izračuni u različitim vrstama površina prikazuju da svaka vrsta tla i vegetacije drugačije djeluje na vjerojatnost detekcije i vertikalne pokrivenosti. Kod ravnih površina dolazi do povećanja vjerojatnosti detekcije na većim udaljenostima zbog ravnijih površina koje reflektiraju signal od tla bolje nego kod neravnih površina. To se također može primijetiti na vertikalnom prikazu latica i njihovom izgledu. Kod područja vertikalnih prepreka, poput planina i nebodera, dolazi do većih refleksija i vidljivo je oblikovanje latice u jednu veću laticu koja pokriva područje do 200 km udaljenosti. Kod različitih vegetacija dolazi do veće refleksije sa porastom visine vegetacije i njezine gustoće. Promjene u vjerojatnosti detekcije kod različitih vegetacija su manje nego kod promjene različitih vrsti površina.

## 6 Proračun mogućnosti detekcije letjelice s obzirom na karakteristike antenskog sustava i utjecaja okoline na propagaciju signala

Primarni nadzorni radari imaju različite svrhe ovisno o udaljenosti za koju su namijenjeni. Za proračune mogućnosti detekcije letjelice i utjecaja okoline na propagaciju signala koriste se sljedeći parametri:

- Frekvencija rada iznosi 2,9 GHz
- Širina pojasa iznosi 1,5 MHz
- Prosječna snaga iznosi 3 kW (maksimalna 115 kW)
- Širina impulsa iznosi 20  $\mu$ s
- PRF iznosi 1,3 kHz (PRI iznosi 0,0007692 s).

Osim parametara EM vala uračunati su i sljedeći parametri:

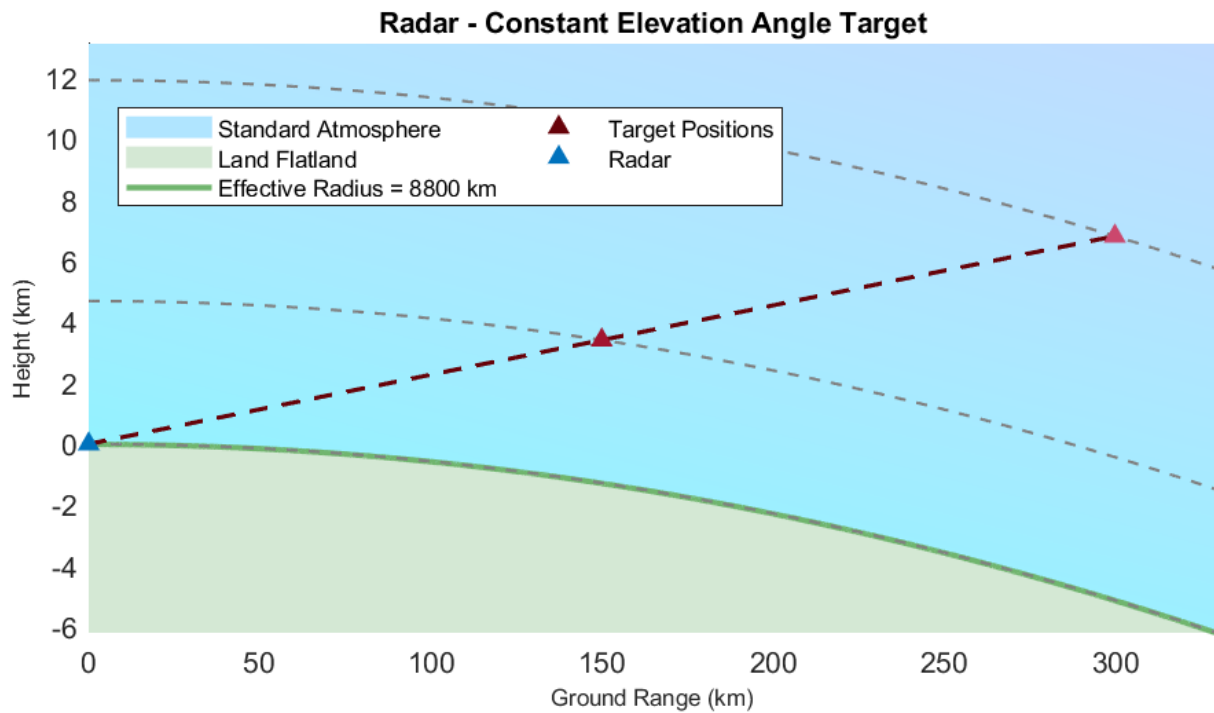
- Visina antene je 10 m
- Kut nagiba antene iznosi 0,5°
- Polarizacija antene je vertikalna
- Širina azimuta iznosi 1,5°, a širina elevacije 5°
- Antenski dobitak (Gain) iznosi 36,35 dBi
- Vjerojatnost za greškom iznosi 0,000001
- Broj odaslanih impulsa je 20
- Integracija pulsa je koherentna
- Uračunat je faktor gubitka koji ovisi o udaljenosti i iznosi 8 dB.

Uz sve navedeno temperatura šuma (noise temperature) iznosi 950 K dok referenta temperatura šuma iznosi 290 K. Temperatura šuma ima izravan utjecaj na omjer signala i buke; *SNR* (signal to noise ratio) te je uračunata istog iznosa za svaki dio prostora.

Za maksimalno ograničenje raspona uračunato je 200 km i uzeto u obzir prosječna brzina kretanja zrakoplova. Osnovni proračun uz navedene parametre i uključene sljedeće parametre:

- Zakrivljena Zemlja
- Standardna atmosfera (cijela atmosfera)
- Automatsko isparivanje vode (7,5 g/m<sup>3</sup>; površinsko isparavanje vode)
- Uračunati su gubici atmosferskih gubitaka radi plinova u atmosferi
- Uračunat je gubitak leće radara
- Uzet je u obzir efektivni radijus 8800 km
- Vrsta tla je kopno
- Vrsta kopna je ravno područje
- Uračunat je faktor radarske propagacije
- Vrsta vegetacije je rijetka trava
- Temperatura iznosi 15 °C

- Sadržaj vode je 0,5 (50%)
- Nema nikakvih padalina.

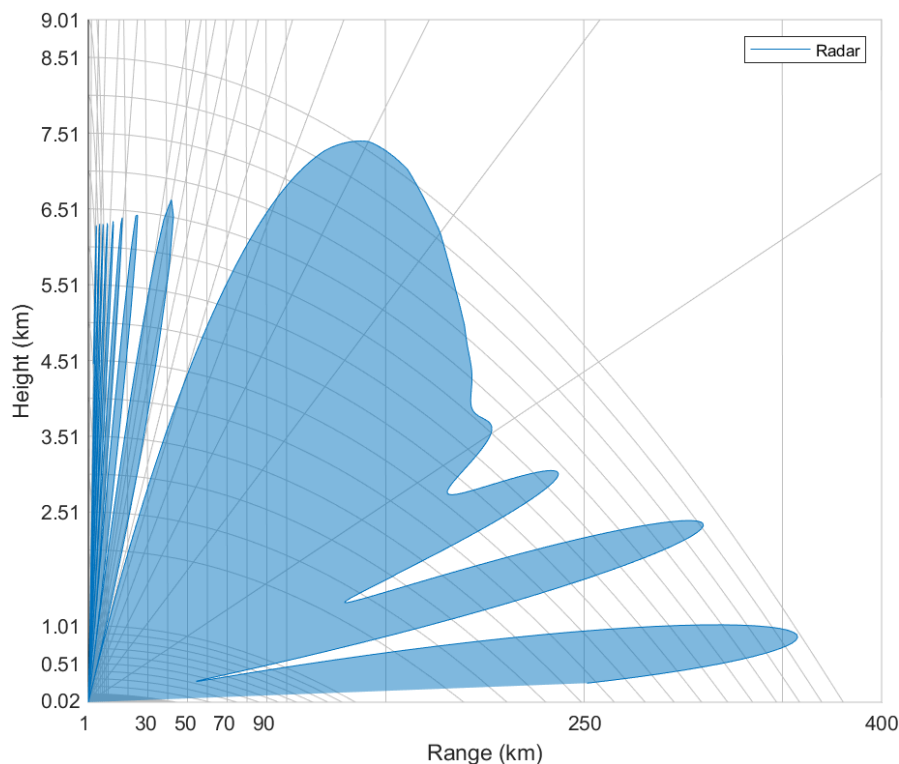


Slika 16 Prikaz detekcije zrakoplova pomoću radara

Na slici 16 prikazan je položaj radara i zrakoplova na udaljenosti 300 km te putanju elektromagnetskog vala od radara do zrakoplova. Uračunati su utjecaju standardne atmosfere i uvjet Zemlje i njezin efektivni radijus od 8800 km zbog ogiba vala.

## 6.1 Izgled i prikaz rada primarnog rada u osnovnim uvjetima

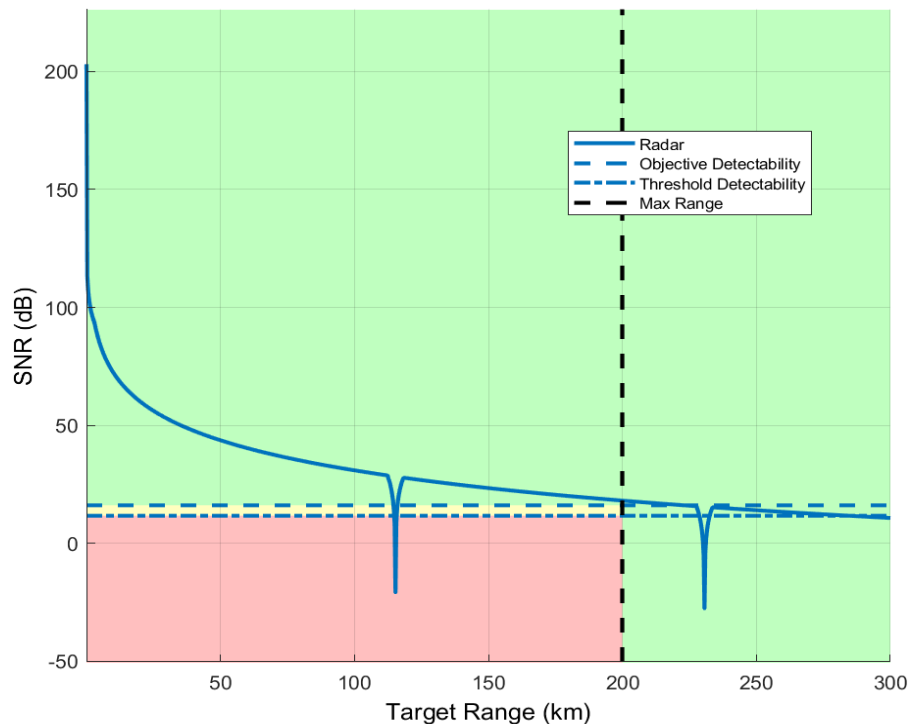
Uz navedene parametre na slici 17 vidljiva je vertikalna pokrivenost koja prikazuje područje detekcije zrakoplova. S lijeve strane na y-osi vidljiva je oznaka za visinu koja prikazuje da pri navedenim parametrima radar visinski detektira zrakoplov od 6,5 km do 8,5 km ovisno o udaljenosti zrakoplova od radara. Primarni radari namijenjeni su za detekciju objekta na udaljenostima pod malim kutovima te zbog toga postoji konus tišine, područje iznad radara, gdje radar nije pouzdan za detekciju. X-os prikazuje domet u kilometrima te se za navedene parametre domet kreće od otprilike 150 km do 350 km, ovisno o visini na kojoj se radi. Razlog gubitka dometa je od više čimbenika. Za elektromagnetske valove koji su emitirani pod većim kutovima u odnosu na površinu Zemlje, domet i pokrivenost su veći (tj. dopijevaju na veće vertikalne udaljenosti, ali prevale manji horizontalni put). Elektromagnetski valovi koji se kreću pod manjim kutom od tla, pokrivaju manje područje, ali njihov horizontalni domet je veći. Neki od drugih faktora su blizina EM vala Zemlji, utjecaj atmosfere, isparavanje vode, zakrivljenost Zemlje, ionosfera,...



Slika 17 Vertikalna pokrivenost radara, osnovni parametri

Slika 18 prikazuje odnos omjera zvuka i buke (SNR) te ciljanog raspona. Pozadina slike prikazana je trima bojama; zelenom, žutom i crvenom. Boje se odnose na dodatne parametre koje se unosi radi zahtjeva zadovoljavanja uvjeta radara. Crvena boja prikazuje područje gdje uvjeti nisu zadovoljni, žuta područje koje je prihvatljivo jer zadovoljava uvjet praga (*Threshold*), ali ne i ciljane uvjete (*Objective*). Tablica 3 prikazuje postavljene uvjete praga i ciljni uvjet uz uračunate parametre koji se koriste za ovaj radar. Tablica 4 prikazuje dobivene parametre vezane za radara, koji su prikazani s rezultatima i napomenom da li je uvjet zadovoljen ili nije.

Crvena boja inducira da uvjet nije zadovoljen, žuta da je djelomično zadovoljen, a zelena da je zadovoljen u potpunosti. Područja su vidljiva na slici 18.



Slika 18 Odnos SNR-a i ciljanog dometa, osnovni parametri

Na slici 18 vidljivo je da omjer zvuka i buke opada sa sve većom udaljenosti. Također je vidljivo da se plava linija koja označava radarski signal nalazi u zelenom području što potvrđuje Tablica 3 sa šansom detekcije zrakoplova od 93,55% na udaljenosti 200 km. Može se napomenuti da desno područje iza 200 km i ispod praga mogućnosti otkrivanja je zelene boje jer je ograničen raspon na 200 km. U slučaju kada bi domet bio veći, ciljani uvjet bi bio ispunjen do 225 km a uvjet praga do 275 km pri zadanim parametrima. Područja naglog pada i rasta SNR nastaju zbog utjecaja faktora pomračenja ovisnog o rasponu. U radarskom smislu, izraz pomračenje opisuje djelomični gubitak podataka na prijamoj strani. To znači da zbog povećanja bočnih snopova koji dovode do kompresije impulsa glavnog snopa, na određenim udaljenostima dolazi do degradacije vjerojatnosti detekcije.

Važno je napomenuti da veliki utjecaj na detekciju zrakoplova ima širina impulsa. Kod većih širina može doći do greške u detekciji te je potrebno prilagoditi broj impulsa koji se odašilju po minuti sa kraćom duljinom impulsa.

Radarski na slici 18 ima određen radarski poprečni presjek (RCS). Što je veći radarski poprečni presjek, zrakoplov je lakše detektirati te za ovaj izračun iznosi  $12 \text{ m}^2$ . Na poprečni presjek ne utječe samo dimenzija zrakoplova već njegova boja, refleksija i vrsta materijala.

Tablica 3 Prikaz parametara i praga vrijednosti postavljenih za test radara

Parametri	Mjerna Jedinica	Minimalna prihvatljiva vrijednost	Ciljana vrijednost
Vjerojatnost detekcije	%	0,75	0,90
Minimalni detektabilni signal	dB	-70	-85
Zahtjev za minimalni domet	m	6000	4000
Nedvosmislen domet	km	140	150
Rezolucija dometa	m	150	100
First blind speed	m/s	40	50
Razlučivost brzine raspona	m/s	10	3
Točnost dometa	stupanj	12	7
Točnost azimuta	stupanj	3	1
Točnost elevacije	stupanj	5	3
Točnost brzine raspona	m/s	3	1
Vjerojatnost točnog zapisa	%	0,95	0,99
Vjerojatnost lažnog zapisa	%	$1 \times 10^8$	$1 \times 10^{12}$
Efektivna izotopična izračena snaga	W	1000	2500
Produkt srednje snage i efektivne površine antene	W m <sup>2</sup>	3500	4200

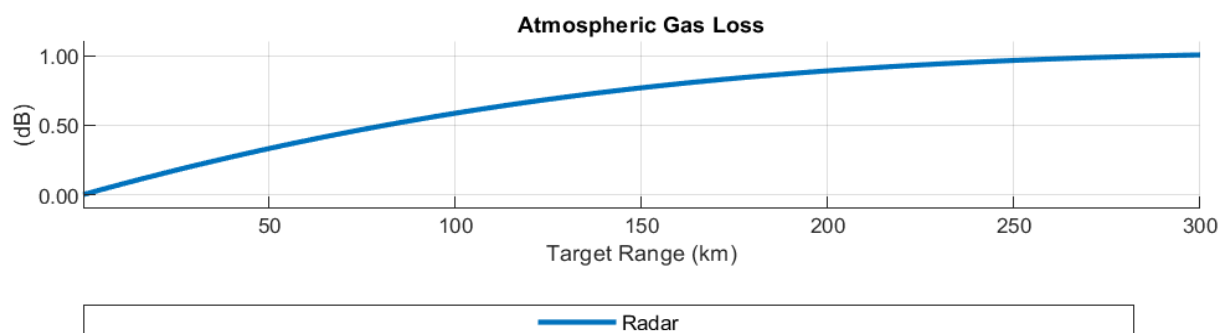
Na Tablici 3 prikazani su parametri vjerojatnosti za detekcijom, minimalnoj detekcijskoj razini signala, minimalnim dometom u smislu dometa ispred radara nakon kojeg se ne detektira zrakoplov te drugi parametri. Svi parametri su zadani tako da je moguće postaviti granice prihvatljivosti radara i prikazati boju u pozadinama slika ovisno zadovoljavaju li uvjete potpuno, djelomično ili ne zadovoljavaju.

Parametri se osobno postavljaju ovisno o vrsti radaru koji korisnik želi postići. Za vjerojatnost detekcije su zadani uvjeti od 0,75 (djelomično prihvatljivo) te 0,90 za ciljanu vrijednost, što je na zadanim parametrima od radara ispunjeno.

Tablica 4 Prikaz rezultata za radar iz programa Matlab

Parametri	Radar	Rezultati
Vjerojatnost detekcije	0,9355 %	Zadovoljava uvjet
Minimalni detektabilni signal	0 dB	Zadovoljava uvjet
Zahtjev za minimalni domet	2998 m	Zadovoljava uvjet
Nedvosmislen domet	115,3 km	Djelomično zadovoljava uvjet
Rezolucija dometa	99,93 m	Zadovoljava uvjet
Maksimalna nedvosmislena brzina	67,19 m/s	Zadovoljava uvjet
Razlučivost brzine raspona	3,36 m/s	
Točnost dometa	5,002 stupnja	Zadovoljava uvjet
Točnost azimuta	0,07513 stupnja	Zadovoljava uvjet
Točnost elevacije	0,2504 stupnja	Zadovoljava uvjet
Točnost brzine raspona	0,1682 m/s	Zadovoljava uvjet
Vjerojatnost točnog zapisa	0,9958 %	Zadovoljava uvjet
Vjerojatnost lažnog zapisa	$8,885 \times 10^{-15} \%$	Ne zadovoljava uvjet
Efektivna izotropno izračena snaga	498,5 W	Ne zadovoljava uvjet
Produkt srednje snage i efektivne površine antene	$423,9 \text{ W m}^2$	Ne zadovoljava uvjet

Tablica 4 prikazuje konačne rezultate parametara sa rezultatima: zadovoljava uvjet, djelomično zadovoljava uvjet i ne zadovoljava uvjet; ovisno o zahtjevima, uvjetima praga i ciljanim uvjetima. Vidljivo je da su gotovo svi uvjeti zadovoljeni uz zadane parametre radara. Uvijete koji nisu zadovoljeni ne utječu na izračun i prikazane grafove i slike već govore da ciljani uvjet nije ispunjen za postavljene parametre zahtjeva koji su vidljivi u Tablici 3.



Slika 19 Utjecaj atmosferskog plina

Slika iznad, slika 19, prikazuje da atmosferski gubitak iznosi 1 dB nakon 300 km zbog utjecaja atmosferskih plinova.



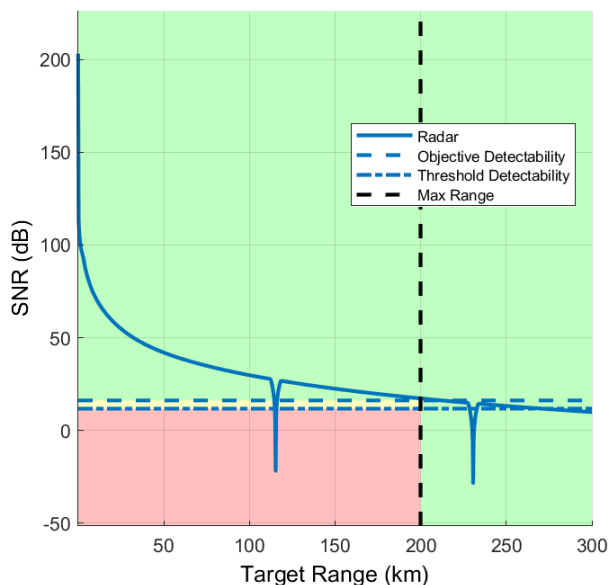
## **6.2 Utjecaj okoline na propagaciju signala te prikaz radarskih izračuna u zadanim uvjetima**

Do sada je prikazano kako izgleda kada primarni radar pri zadanim parametrima detektira zrakoplov na kopnu bez padalina i utjecaja padalina. U ovom djelu bit će prikazan utjecaj okoline na širenje signala i usporedba sa početnim izračunima. Pod okolinu uračunati će se utjecaj padalina te uz to biti će prikazan utjecaj visine i veličine zrakoplova na utjecaj vjerojatnosti detekcije primarnim radarom.

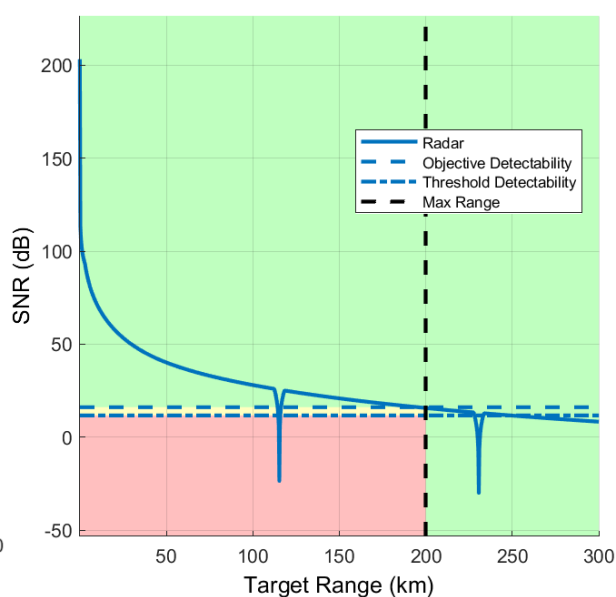
### **6.2.1 Utjecaj padalina na detekciju**

Prigušenje odjeka može ozbiljno ograničiti sposobnost radarskog sustava; stoga je značajan dio radarskog dizajna posvećen minimiziranju učinaka prigušenja do određenih razina. Prilikom minimiziranja treba pripaziti da se ne reducira na razinu nižu od potrebne za detekciju odjeka od željenih objekta (zrakoplova). Slabljenje, tj. postepeni gubitak snage se javlja dok val putuje kroz kišu i ostale padaline. To uzrokuje pogreške prilikom pretvorbe količine primljene energije u količinu padalina ili detekciju objekta. Dopplerova promjena frekvencije uobičajena je metoda kojom se pomični ciljevi razlikuju od nagomilanih nepokretnih objekata. Detekcija ciljeva po kiši predstavlja manji problem na nižim operativnim frekvencijama, budući da radarska jeka od kiše brzo raste proporcionalno porastu frekvencije, dok je refleksijska površina zrakoplova relativno neovisna o frekvenciji u mikrovalnom dijelu spektra. Razlog tome je to što su dimenzije zrakoplova na operativnim frekvencijama značajno veće od valne duljine signala. Budući da su kapljice kiše gotovo sferične (simetrične) i da su zrakoplovi asimetrični, uporabom kružne polarizacije (vertikalna polarizacija) može se poboljšati otkrivanje zrakoplova na kiši. Kružnom polarizacijom električno polje rotira na radarskoj frekvenciji. Zbog toga će elektromagnetska energija koju reflektiraju kiša i zrakoplov biti različitog iznosa, što će olakšati razlikovanje zrakoplova od kiše. U čistim vremenskim uvjetima većina radara koristi linearnu polarizaciju, tj. položaj električnog polja je fiksiran. [13]

Kod utjecaja kiše u proračun se uzima ITU model. U primjerima kiša kreće od mjesta lokacije radara i prostire se do 200 km uz jačinu padanja od 50 mm/h. Količina padaline se računa pomoću postotka tako da se učestalost u kategoriji podijeli s ukupnim brojem padaline i pomnoži sa 100%. U ovom slučaju ona iznosi 0,001%.

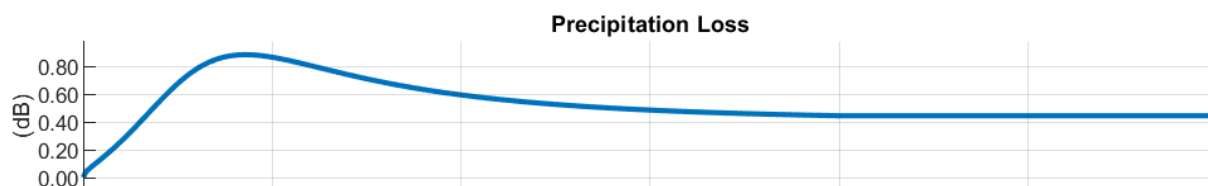


Slika 20 Omjer SNR-a i dometa kod kiše 50 mm/h



Slika 21 Omjer SNR-a i dometa kod kiše 150 mm/h

Kada usporedimo sliku 20 sa slikama osnovnih parametara (slika 14 i 18) vidljivo je da kiša od 50 mm/h ima minimalan utjecaj na detekciju u usporedbi sa utjecajem gustog drveća, čineći domet par kilometara duljim. Ako usporedimo sa osnovnim primjerom dometa, domet je par kilometara kraći kod kiše od 50 mm/h. Uz to postoji maksimalni gubitak od 0,80 dB na udaljenosti 40 km od radara koja se kasnije stabilizira na prosječni gubitak od 0,45 dB. Primarni radar ostvaruje vjerojatnost detekcije od 92,15% pri radu kroz kišu od 50 mm/h.

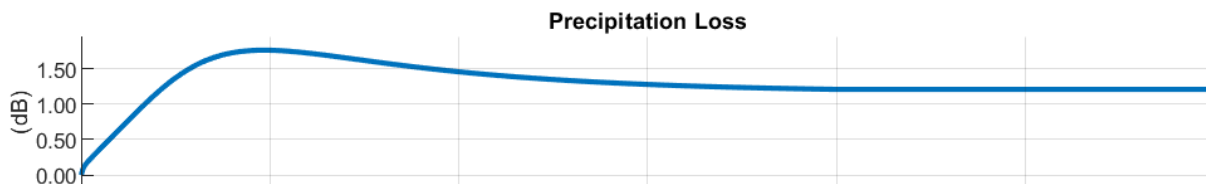


Slika 22 Utjecaj kiše na gubitak dB

*Na x-osi je prikazana udaljenost, svaka crta označava 50 km*

U slučaju tropske kiše od 150 mm/h dolazi do značajnijeg utjecaja na domet. Slika 21 pokazuje da pri dometu od 200 km dolazi do vjerojatnosti detekcije manje od 0,90, točnije iznosi 89,05%. Također je vidljivo da dolazi do vidljivo kraćeg dometa od 25 km u usporedbi sa prvim proračunom bez padalina.

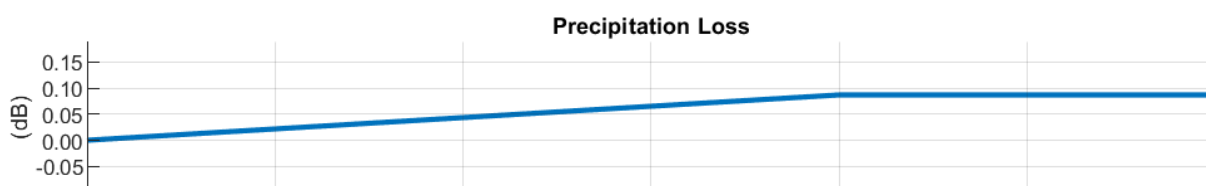
Prikaz pada prijamne snage (Slika 23) zbog utjecaja kiše od 150 mm/h ima maksimalan gubitak na 40 km koji iznosi 1,75 dB a kasnije prosječni gubitak od 1,20 dB što u usporedbi kod kiše od 50 mm/h stvara duplo veći pad prijamne snage uslijed utjecaja kiše.



Slika 23 Prikaz gubitka dB zbog utjecaja kiše

Na x- osi je prikazana udaljenost, svaka crta označava 50 km

Kod snijega utjecaj na domet je blaži nego kod bilo kakvog oblika kiše. Razlika između umjerene količine i jake količine padanja snijega gotovo je zanemariva. U oba slučaja gubitak se kreće oko 0,10 dB što je u usporedbi sa kišom značajno manji gubitak. Kod umjerene količine padanja snijega vjerojatnost za detekcijom iznosi 93,3% dok kod jake količine padanja iznosi 93,17% čineći ne zamjetnu razliku.



Slika 24 Prikaz gubitka dB zbog utjecaja snijeg

Na x- osi je prikazana udaljenost, svaka crta označava 50 km

Kod gubitka dometa neprimjetna je razlika u usporedbi sa prvim proračunom na slici 18.

Iz navedenog može se zaključiti da sve vrste padalina utječu na vjerojatnost detekcije zrakoplova. Gustoća i količina padalina utječu na smanjenje vjerojatnosti detekcije na način da povećanjem gustoće i količine detekcija opada. Taj zaključak također je bio prikazan kroz slike koje prikazuju dijagrame gubitka dB zbog utjecaja padalina. Gubitak radarske energije zbog atmosfenske apsorpcije se javlja prilikom pojave veće koncentracije kiše, što je moguće vidjeti na slikama gubitka dB. Također, kiša i drugi oblici oborina mogu uzrokovati signale odjeka koji prikrivaju željene odjeke mete i time otežavaju detekciju zrakoplova.

## 6.2.2 Utjecaj visine i veličine zrakoplova na detekciju primarnim radarom

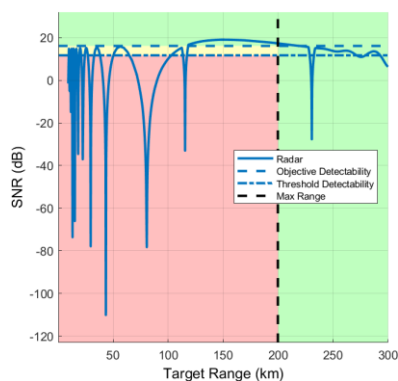
Do sada su parametri primarnog radara, vrsta terena i padaline prikazali utjecaj na detekciju zrakoplova. U ovom djelu bit će prikazan utjecaj visine na kojoj zrakoplov leti i utjecaj veličine zrakoplova na refleksiju elektromagnetskog vala, tj. detekciju zrakoplova ovisno o njegovim karakteristikama. U prvom slučaju parametri radara ostaju isti kao kod osnovnih parametara;

- Prosječna snaga 3 kW
- Širina impulsa 20  $\mu$ s
- PRF 1,3 kHz
- Frekvencija 2,9 GHz
- RCS iznosi 12 m<sup>2</sup> (uz pretpostavku da je zrakoplov barem 12 m<sup>2</sup>)
- Kut antenske usmjerenosti iznosi 0,5 stupnja.

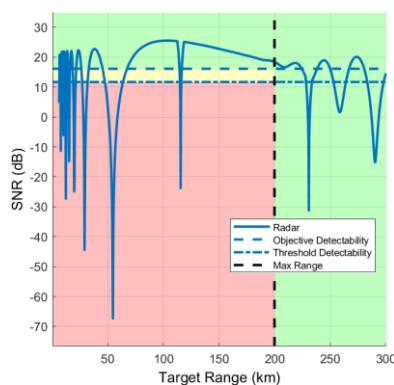
Uz nove parametre zrakoplova;

- Visina leta 9000 m (otprilike FL 290)
- Maksimalna akceleracija zrakoplova 10 m/s<sup>2</sup>
- Pretpostavka da se zrakoplov kreće normalnom brzinom bez neočekivanih skretanja.

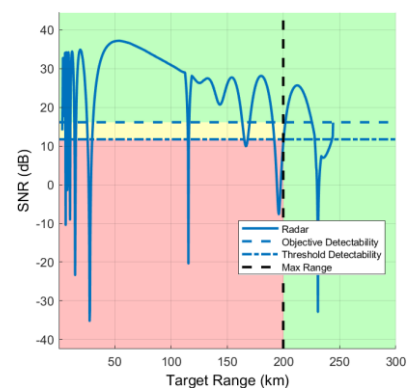
Uz zadane parametre dobije se prikaz SNR-a i ciljanog dometa koji je prikazan slikama 25, 26 i 27. Kod slike 25 vjerojatnost detekcije zrakoplova na udaljenosti 200 km iznosi 92,27% ali na području između 5 km i 130 km vidljiv je pad detekcije zrakoplova koji varira iz područja detekcije u područje gdje zrakoplov nije detektabilan.



Slika 27 Omjer SNR-a i ciljanog dometa za zrakoplov na visini 9000 m (FL 290)



Slika 26 Omjer SNR-a i ciljanog dometa za zrakoplov na 6000 m

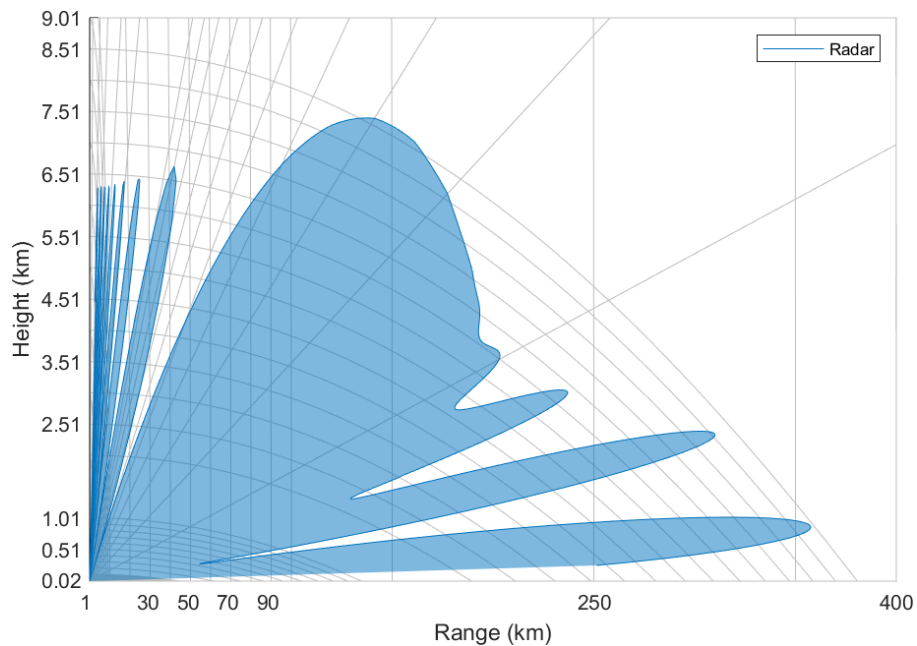


Slika 25 Omjer SNR-a i ciljanog dometa za zrakoplov na 3000 m

Razlog pojave pada detekcije nije samo jedan. Karakteristike primjera radara su prilagođene detekciji zrakoplova na srednjim i većim udaljenostima uz prosječnu snagu od 3 kW i širine impulsa od 20  $\mu$ s. Zbog takvih karakteristika radaru je potrebno više vremena da odašilje i primi signal što utječe na bliže udaljenosti na način da otežava vjerojatnost detekcije. Uz to radarska antena se nalazi pod kutom od 0,5 stupnja čineći ju prilagođenom zrakoplovima na

većoj udaljenosti umjesto na višoj visini. Treći razlog je utjecaj faktora pomračenja ovisnog o rasponu koji je naveden i opisan uz sliku 18.

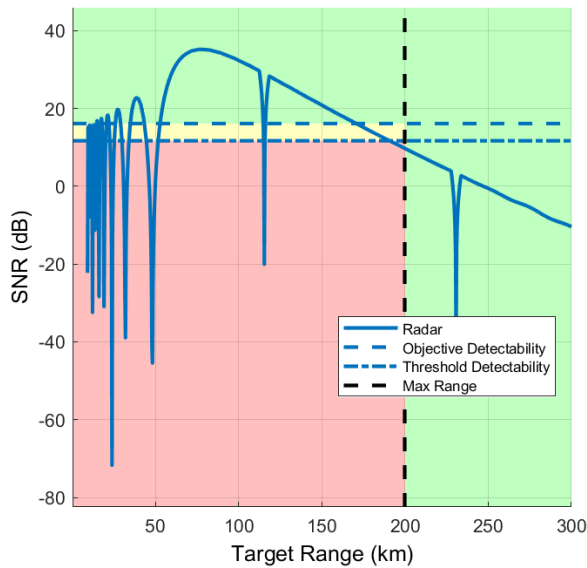
Gubitak detekcije je moguće prikazati na vertikalnom prikazu radarske slike koje je moguće vidjeti na slici 28. Kada se uspoređi gubitak detekcije između udaljenosti od 5 km do 130 km udaljenosti od radara sa vertikalnim prikazom radarske slike, vidljivo je da ne postoje latice iza 130 km udaljenosti. Jedino postoje male latice koje jedva detektiraju zrakoplov na udaljenosti do 40 km od radara te se iz može zaključiti razlog pada detekcije.



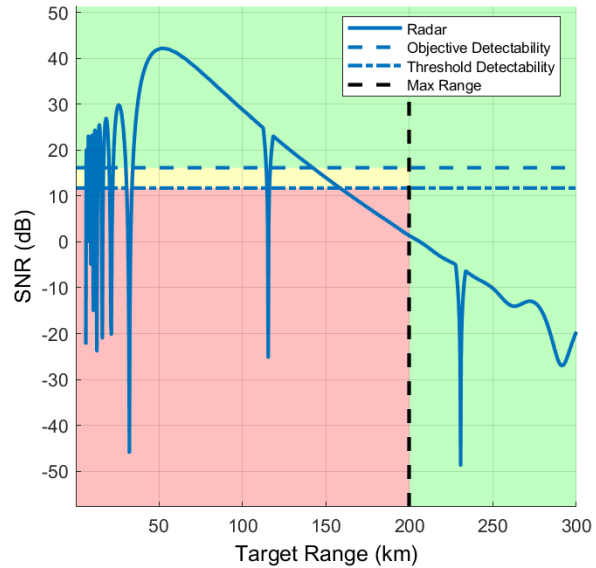
Slika 28 Vertikalni prikaz radarske slike

Povećavanjem RCS sa  $12 \text{ m}^2$  na  $40 \text{ m}^2$ , uz iste parametre, dolazi do povećanja vjerojatnosti za detekcijom na 97,61% što dokazuje da veličina zrakoplova, tj. refleksijsko područje ima značajan utjecaj u području slabe pokrivenosti radarskom propagacijom signala.

Uz iste parametre ali povećanim kutom nagiba antene radara sa 0,5 stupnjeva na 5 stupnjeva vidljivo je na slici 29 da dolazi do promjene u izgledu omjera SNR-a i ciljanog dometa pri detekciji zrakoplova na visini od 9000 m. Dolazi do značajne promjene u povećanju detekcije na udaljenosti između 60 i 130 km od radara. S druge strane zbog nagiba antene vjerojatnost detekcije zrakoplova na udaljenosti od 200 km opada na 63,63%.



Slika 29 Omjer SNR-a i ciljanog dometa pri nagibu antene 5 stupnjeva; visina 9000 m



Slika 30 Omjer SNR-a i ciljanog dometa pri nagibu od 5 stupnjeva; visina 6000 m

Slika 26 prikazuje drugi slučaj zrakoplova koji leti na visini od 6000 m (FL 200) uz iste radarske parametre. Pozitivan utjecaj na detekciju između 60 km i 130 km od radara moguće je vidjeti na slici 28 gdje postoji velika pokrivenost radarskim signalom, čineći vjerojatnost za detekcijom velikom. Vjerojatnost detekcije za zrakoplov na udaljenosti od 200 km iznosi 94,14%.

Isto kao i kod visine od 9000 m tako i kod 6000 m, vjerojatnost za detekcijom na manjim udaljenostima možemo povećati s nagibom antene. Radarska antena pri nagibu od 5 stupnjeva za detekciju zrakoplova na visini od 6000 m, prikazuje veću pokrivenost od 40 km do 140 km udaljenosti od radara u usporedbi kada je zrakoplov na visini 9000 m. Vjerojatnost detekcije zrakoplova na udaljenosti od 200 km je približno 0% za zrakoplove koji lete na 6000 m. Kada se usporede zrakoplovi na 6000 m i 9000 m sa slikom 28 vidljivo je da je vjerojatnost za detekciju veća pri nižim visinama bliže radaru nego u usporedbi kada leti na većim visinama. U oba slučaja nagiba antene dolazi do značajnog povećanja vjerojatnosti detekcije prilikom povećanja RCS sa 12 m<sup>2</sup> na 40 m<sup>2</sup>.

Treći primjer prikazuje zrakoplov koji leti na visini od 3000 m (FL 100) pri istim parametrima radara. Na slici 27 vidljivo je da vjerojatnost detekcije zrakoplova od 35 km do 170 km relativno stabilna i stopostotna. Pad detekcije zrakoplova, tj. vjerojatnosti za detekcijom može se prikazati preko slike 28 gdje na području od 170 km nadalje ne postoji latica koja pokriva područje. Ponovni rast detekcije nakon 200 km omogućuje latica koja ulazi u visinski prostor ali zbog svojih dimenzija, visina i širina, ubrzo prestaje pokrivenost te time detekcija ponovno opada.

Kroz primjere prikazano je da visina na kojoj zrakoplov leti utječe na mogućnost detekcije primarnim radarom. Ako zrakoplov leti na području pokrivenosti radarskim laticama, pogotovo guste pokrivenosti, postajat će velika vjerojatnost za detekciju. U slučaju kada zrakoplov leti izvan područja pokrivenosti latica ili između njih, vjerojatnost za detekciju je manja ili ne postoji. Moguće je prilagoditi kut antene i tako pokriti područja bliže radaru, ali uz cijenu da vjerojatnost za detekciju opada ranije sa udaljenošću, u usporedbi kad je antena namještena na manji kut. Veliki utjecaj na detekciju ima i veličina reflektiranog signala koja djeluje proporcionalno s veličinom zrakoplova. Međutim, pravilo ne vrijedi za sve vrste zrakoplova, pošto postoje zrakoplovi koji su većih dimenzija, ali dizajnirani za nepravilnu refleksiju signala te za njih zaključak ne vrijedi već se uzimaju u obzir klasični zrakoplovi. Važno je spomenuti da postoje atmosferski fenomeni koji mogu utjecati i na radarske performanse. Smanjenje gustoće Zemljine atmosfere s povećanom nadmorskom visinom uzrokuje savijanje radarskih valova dok se šire kroz atmosferu. To obično blago povećava raspon detekcije pod malim kutovima.

## 7 ZAKLJUČAK

Važnost primarnog nadzornog radara prikazana je kroz sposobnost detekcije objekta bez potrebe za dvosmjernom komunikacijom. S obzirom na daljnju uporabu primarnog radara radi sigurnosti i praktičnosti, može se zaključiti kako uporaba primarnog nadzornog radara i dalje predstavlja neizostavan dio nadzora zračnog prometa i kao takav ne može biti uklonjen.

Spoznaja rada i propagacije elektromagnetskog vala pokazuje moguće utjecaje na širenje vala kroz prostor. Radi zakrivljenosti Zemlje domet radara je limitiran na oko 400 km, no zbog utjecaja efekta EM vala taj domet postaje veći. Uz to postoje smetnje pri širenju EM vala za koje je potrebno uračunati određene gubite snage.

Kretanjem vala kroz prostor snaga otpada, a uz različite atmosferske utjecaje gubitak snage je veći. S obzirom na radarsku jednadžbu, može se zaključiti da na snagu utječu radarski presjek, udaljenost i dobitak. Povećavanjem radarskog presjeka i snage, vjerojatnost za detekciju i dobitak na anteni rastu pa time se može zaključiti da se povećanjem radarskog presjeka paralelno povećava maksimalni domet.

Analizom utjecaja terena na refleksiju radarskog signala vidljiva je veza utjecaja vrste tla i vegetacije na vjerojatnost detekcije i dometa. Ravne površine jače reflektiraju signal od tla i time dolazi do stvaranja područja veće horizontalne pokrivenosti u usporedbi sa slučajevima gdje ima više vertikalnih refleksija. Domet značajno raste uslijed refleksija od ravnih horizontalnih površina dok ga vertikalne prepreke limitiraju (planine, građevine). S druge strane vegetacija je pokazala manji utjecaj na vjerojatnost detekcije radi slabog utjecaja na propagaciju signala te vertikalni prikaz poprma minimalne promjene u usporedbi sa idealnim uvjetima terena.

Proračunom i analizom mogućnosti detekcije letjelice s obzirom na karakteristike antenskog sustava i utjecaja okoline na propagaciju signala pokazan je utjecaj padalina i visine letjelica na gotovo idealan primjer rada primarnog rada. Jačina i gustoća kiše porastom smanjuju vjerojatnost detekcije za primjetljiv postotak dok snijeg jedva utječe na vjerojatnost detekcije. Pomoću izračuna za let zrakoplova na tri različite visine, može se zaključiti da nagib antene i pokrivenost utječu na vjerojatnost detekcije s obzirom na karakteristike antenskog sustava. Radarska pokrivenost je limitirana te u svakom trenutku postoji pozicija gdje se zrakoplov može nalaziti previsoko ili na području loše pokrivenosti te samim time biti neprimjetan. Radar se može postaviti pod drugačiji kut za bolju pokrivenost, ali snaga i trajanje impulsa, repeticijska frekvencija impulsa uvijek limitiraju mogući horizontalni domet.



## LITERATURA

- [1] T. Bucak, Elektromagnetski valovi, u *Radio i radarski sustavi*, Zagreb, 2022, pp. 5 - 10.
- [2] Tehnički leksikon, [Mrežno]. Available: <https://tl.lzmk.hr/Clanak/7559>. [Pokušaj pristupa 21 Srpnja 2023].
- [3] T. Bucak, Podjela radiofrenkvencijskog spektra, Zagreb, 2021, pp. 4 - 8.
- [4] Future Learn, [Mrežno]. Available: <https://www.futurelearn.com/info/courses/efqm-foundation-online-certificate/0/steps/232690>. [Pokušaj pristupa 21 Srpnja 2023].
- [5] Enciklopedija, [Mrežno]. Available: <https://www.enciklopedija.hr/natuknica.aspx?ID=51409>. [Pokušaj pristupa 21 Lipnja 2023].
- [6] Wikipedia, [Mrežno]. Available: [https://en.wikipedia.org/wiki/Doppler\\_radar](https://en.wikipedia.org/wiki/Doppler_radar). [Pokušaj pristupa 21 Srpnja 2023].
- [7] Radar tutorial, [Mrežno]. Available: <https://www.radartutorial.eu/06.antennas/Cosecant%20Squared%20Pattern.en.html>. [Pokušaj pristupa 21 Srpnja 2023].
- [8] Simple flying, [Mrežno]. Available: <https://simpleflying.com/airport-radar-guide/>. [Pokušaj pristupa 5 Kolovoza 2023].
- [9] M. I. Skolnik, u *Uvod u radarske sisteme*, Izdano u Singapuru, McGraw-Hill, Inc., 1981, pp. 10 - 34.
- [10] Aviation Hunt, [Mrežno]. Available: <https://www.aviationhunt.com/aviation-radar-system/>. [Pokušaj pristupa 21 Srpnja 2023].
- [11] Aviation Hunt, [Mrežno]. Available: <https://www.aviationhunt.com/aviation-radar-system/>. [Pokušaj pristupa 21 Srpnja 2023].
- [12] Primary surveillance radar, [Mrežno]. Available: [https://www.indracompany.com/sites/default/files/12\\_psr\\_brochure\\_v1\\_02-2009\\_eng.pdf](https://www.indracompany.com/sites/default/files/12_psr_brochure_v1_02-2009_eng.pdf). [Pokušaj pristupa 21 Srpanj 2023].
- [13] Hindawi, [Mrežno]. Available: <https://www.hindawi.com/journals/amete/2017/6124149/>. [Pokušaj pristupa 5 kolovoz 2023].
- [14] Britannica, [Mrežno]. Available: <https://www.britannica.com/technology/radar/Radar-imaging>. [Pokušaj pristupa 21 Srpnja 2023].

## POPIS SLIKA

Slika 1 Širenje elektromagnetskog vala .....	2
Slika 2 Širenje EM valova u prostoru .....	3
Slika 3 Standardni izgled primarnog radara .....	10
Slika 4 Prikaz omjera vjerojatnosti detekcije i ciljanog dometa na udaljenosti 200 km .....	13
Slika 5 Prikaz omjera vjerojatnosti detekcije i ciljanog dometa na udaljenosti 400 km .....	13
Slika 6 Prikaz omjera vjerojatnosti detekcije i ciljanog dometa kod RCS 12m <sup>2</sup> .....	14
Slika 7 Prikaz omjera vjerojatnosti detekcije i ciljanog dometa kod RCS 50m <sup>2</sup> .....	14
Slika 8 Prikaz omjera vjerojatnosti detekcije i ciljanog dometa kod povećane snage .....	15
Slika 9 Prikaz omjera SNR-a i dometa iznad mora.....	16
Slika 10 Vertikalna pokrivenost radara iznad mora.....	17
Slika 11 Vertikalna pokrivenost radara iznad pustinje .....	17
Slika 12 vertikalna pokrivenost radara na planinskom području .....	18
Slika 13 Vertikalna pokrivenost radara u urbanom području .....	18
Slika 14 Omjer SNR-a i dometa kod gustog drveća .....	19
Slika 15 Vertikalna pokrivenost radara kod gustog drveća .....	19
Slika 16 Prikaz detekcije zrakoplova pomoću radara .....	22
Slika 17 Vertikalna pokrivenost radara, osnovni parametri .....	23
Slika 18 Odnos SNR-a i ciljanog dometa, osnovni parametri .....	24
Slika 19 Utjecaj atmosferskog plina .....	26
Slika 20 Omjer SNR-a i dometa kod kiše 50 mm/h.....	28
Slika 21 Omjer SNR-a i dometa kod kiše 150 mm/h.....	28
Slika 22 Utjecaj kiše na gubitak dB .....	28
Slika 23 Prikaz gubitka dB zbog utjecaja kiše .....	29
Slika 24 Prikaz gubitka dB zbog utjecaja snijeg .....	29
Slika 27 Omjer SNR-a i ciljanog dometa za zrakoplov na 3000 m .....	30
Slika 26 Omjer SNR-a i ciljanog dometa za zrakoplov na 6000 m .....	30
Slika 25 Omjer SNR-a i ciljanog dometa za zrakoplov na visini 9000 m (FL 290).....	30
Slika 28 Vertikalni prikaz radarske slike .....	31
Slika 29 Omjer SNR-a i ciljanog dometa pri nagibu antene 5 stupnjeva; visina 9000 m .....	32
Slika 30 Omjer SNR-a i ciljanog dometa pri nagibu od 5 stupnjeva; visina 6000 m .....	32

## POPIS TABLICA

Tablica 1 Prikaz frekvencijskih pojaseva.....	6
Tablica 2 Prikaz karakteristika primarnog radara (S band).....	8
Tablica 3 Prikaz parametara i praga vrijednosti postavljenih za test radara.....	25
Tablica 4 Prikaz rezultata za radar iz programa Matlab .....	26

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 Određivanje utjecaja visine leta i konfiguracije terena na mogućnost detekcije primarnim nadzornim radarom , u Nacionalni repozitorij završnih i diplomskih radova ZIR.

Student/ica:

U Zagrebu, 24.8.2023.

Ivor Vrhovec   
(ime i prezime, potpis)