

# Proračun operativnih parametara sekundarnog nadzornog radara

---

**Samardžić, Kristina**

**Undergraduate thesis / Završni rad**

**2019**

*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:119:890204>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2024-12-26**



*Repository / Repozitorij:*

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET PROMETNIH ZNANOSTI

Kristina Samardžić

PRORAČUN OPERATIVNIH PARAMETARA SEKUNDARNOG  
NADZORNOG RADARA

ZAVRŠNI RAD

Zagreb, 2019.

Zagreb, 1. travnja 2019.

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

## ZAVRŠNI ZADATAK br. 5189

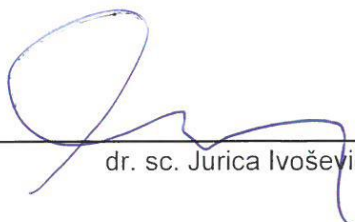
Pristupnik: **Kristina Samardžić (0135240778)**  
Studij: **Aeronautika**  
Smjer: **Kontrola leta**

Zadatak: **Proračun operativnih parametara sekundarnog nadzornog radara**

Opis zadatka:

Protumačiti princip rada te prednosti i nedostatke sekundarnog nadzornog radara. Usporediti modove rada sekundarnog nadzornog radara. Analizirati Friisovu jednadžbu za izračun snage na ulazu u prijamnu antenu. U programskom jeziku napisati algoritam koji prilagođava ulazne veličine (koordinate radara i zrakoplova, frekvencija, dobitci odašiljačke i prijamne antene, snaga na izlazu iz odašiljačke antene radarskog interogatora) i izračunava snagu na ulazu u prijamnu antenu transpondera. Napraviti proračun za 5 karakterističnih slučajeva. Opisati i komentirati rezultate te mogućnosti poboljšanja algoritma.

Mentor:



---

dr. sc. Jurica Ivošević

Predsjednik povjerenstva za  
završni ispit:

---

Sveučilište u Zagrebu  
Fakultet prometnih znanosti

## **ZAVRŠNI RAD**

**PRORAČUN OPERATIVNIH PARAMETARA SEKUNDARNOG  
NADZORNOG RADARA**

**ANALYSIS OF SECONDARY SURVEILLANCE RADAR  
OPERATIONAL PARAMETERS**

Mentor: dr. sc. Jurica Ivošević

Student: Kristina Samardžić  
JMBAG: 0135240778

Zagreb, rujan 2019.

## PRORAČUN OPERATIVNIH PARAMETARA SEKUNDARNOG NADZORNOG RADARA

### SAŽETAK

Sekundarni nadzorni radar obrađuje podatke na temelju odaslanog koda transpondera. Ovisno o radarskom sustavu na zemlji te uvjetima kroz koji se signal propagira, snaga odaslanog signala varira. Kako bi zrakoplov bio detektiran potrebno je da signal na interogatoru ima snagu iznad minimalne detektibilne snage. Proračunom karakterističnih slučajeva prikazani su primjeri propagacije signala u različitim uvjetima atmosfere. Proračun i grafički prikaz izrađeni su u programskom jeziku Matlab.

KLJUČNE RIJEČI: sekundarni nadzorni radar; radarski gubitci; radarski parametri; interogator; kod transpondera; Friisova jednadžba.

### SUMMARY

The Secondary surveillance radar processes the data based on the transmitted transponder code. The power of the transmitted signal varies depending on the radar system on the ground and the conditions through which the signal propagates. It is necessary that the signal on the interrogator has a power above the minimum detectable power in order for the aircraft to be detected. The calculation of the characteristic cases show examples of signal propagation under different atmospheric conditions. The analysis of the problem is made in the programming language Matlab.

KEY WORDS: Secondary Surveillance Radar; Radar losses; Radar parameters; interrogator, transponder code, Friis equation.

# SADRŽAJ

1. UVOD.....	1
2. SIGNAL RADARA I OBRADA PODATAKA.....	2
2.1. KARAKTERISTIKE SIGNALA.....	2
2.2. ANALIZA PARAMETARA RADARA.....	3
2.2.1.ODREĐIVANJE UDALJENOSTI OBJEKTA.....	3
2.2.2.ODREĐIVANJE KUTA ELEVACIJE .....	4
2.2.3.ODREĐIVANJE USMJERENOSTI SIGNALA .....	4
2.2.4.ODREĐIVANJE MAKSIMALNOG DOMETA.....	4
2.2.5.ODREĐIVANJE REZOLUCIJE RADARA .....	5
2.2.6.ODREĐIVANJE VISINE .....	6
2.3.POKRIVENOST RADARA.....	6
3. NAMJENA I PRINCIP RADA SSR .....	8
3.1. PRINCIP RADA SSR-A.....	8
3.2. MODOVI RADA.....	9
4. PREDNOSTI I NEDOSTATCI SSR-a.....	10
4.1 NEDOSTATCI RADARA.....	10
4.1.1 ATMOSFERSKI GUBITCI.....	10
4.1.2.OSTALI GUBITCI .....	11
4.1.3. INTERFERENCIJE SIGNALA .....	11
4.1.4. NEDOSTATCI TRANSPONDERA .....	12
4.2. PREDNOSTI SEKUNDARNOG RADARA .....	12
5. FRIISOVA JEDNADŽBA.....	13
5.1.OSNOVNI OBLIK FORMULE.....	13
5.2.PRIMJENA FORMULE .....	13
6. PROGRAMIRANJE JEDNADŽBE I IZRAČUN KARAKTERISTIČNIH SLUČAJEVA U PROGRAMSKOM JEZIKU MATLAB.....	16
6.1.IZRAČENA SNAGA RADARA .....	16
6.2.IZRAČUN KARAKTERISTIČNIH SLUČAJEVA .....	20
6.2.1ANALIZA OVISNOSTI SNAGE ODAŠILJAČA INTEROGATORA U OVISNOSTI O KIŠI .....	22
6.2.2 ANALIZA OVISNOSTI SNAGE ODAŠILJAČA TRANSPONDERA U OVISNOSTI O KIŠI .....	23
7. ZAKLJUČAK .....	24
LITERATURA .....	25
Popis kratica.....	26
Popis slika.....	27
Popis tablica.....	28

<b>Prilog 1</b> .....	29
<b>Prilog 2</b> .....	30
<b>Prilog 3</b> .....	31
<b>Prilog 4</b> .....	32
<b>Prilog 5</b> .....	33
<b>Prilog 6</b> .....	34
<b>Prilog 7</b> .....	35

## 1. UVOD

Nadzor i kontrola zračnog prostora nezamisliva je bez upotrebe radara. Upotreba radara u vojne svrhe označavala je početak razvoja radarskog sustava. Vremenom su se ukazali problemi i nedostaci primarnog radara te su bile potrebne izmjene.

Sekundarni radar je nadzorni sustav koji aktivnim signalom odjeka određuje poziciju zrakoplova. Upotreba sekundarnog radara može biti za nadzor i kontrolu zračnog prometa ili u vojne svrhe prilikom prepoznavanja prijateljskih točaka. U početku je davao informaciju samo o poziciji i identifikaciji, a kasnije informacije o visini, ruti, brzini i dr. Sustav se sastoji radarskog upitivača na tlu i transpondera na zrakoplovu. Ubrzo su se pojavili nedostaci koji su iziskivali brzo pronalaženje rješenja. Zagušenost kanala, kvar transpondera ili interferencija signala predstavljali su probleme koji su mogli ugroziti sigurnost zrakoplova. Razvili su se sigurnosni sustavi i različiti modovi rada uz čiju su se pomoć greške i kvarovi smanjili. Upotrebom moda S sekundarnog radara poboljšala se točnost i sigurnost informacija te se otvorila prilika za razvitak modernijih sustava za nadzor zračnog prostora.

Prilikom dizajna radara i odabira položaja moraju se napraviti precizni izračuni kako bi u svakom trenutku sustav omogućavao radarsku pokrivenost. Gubitci i prigušenja predstavljaju problem prilikom preciznog izračuna snage. Čimbenici su brojni i promjenjivi. U ovom radu predstavljen je problem detektiranja zrakoplova u uvjetima jakih hidrometeora. U proračunu je prikazano šest karakterističnih slučajeva gdje se na temelju podataka o sekundarnim nadzornim radarima s područja Republike Hrvatske izračunata mogućnost detekcije signala u uvjetima kiše. Pomoću izlaznih podataka može se odrediti koliko je sustav prilagođen i upotrebljiv u navedenim uvjetima.



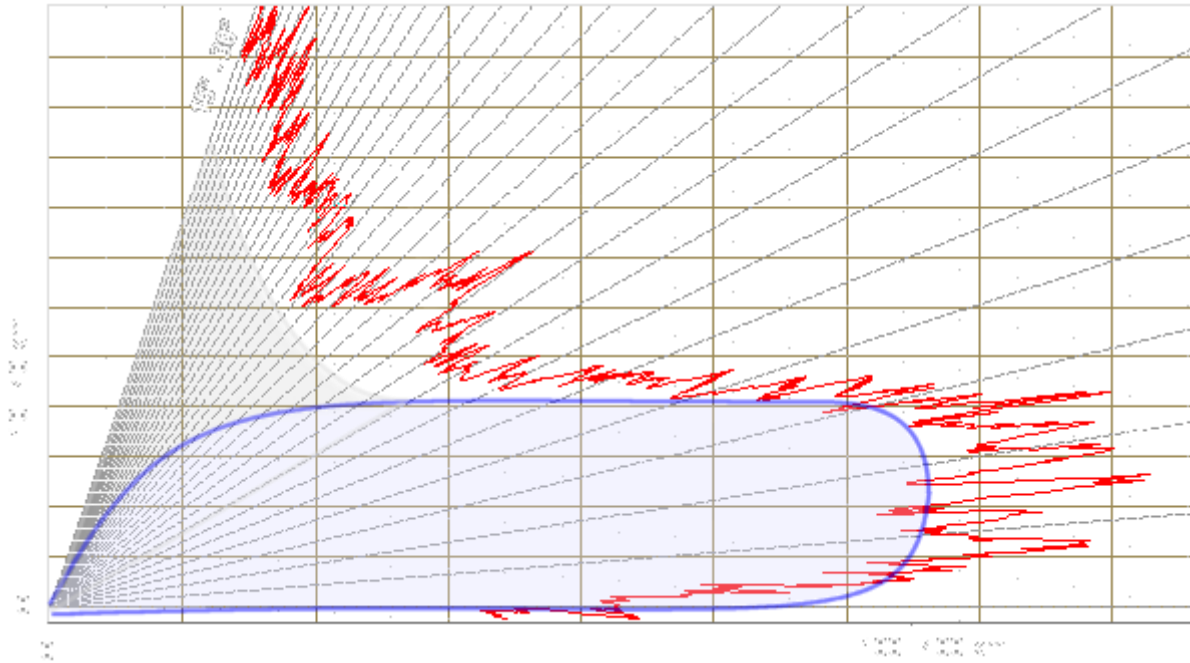
## 2. SIGNAL RADARA I OBRADA PODATAKA

Radar (*Radio Detection And Ranging*) je prvotno zamišljen sustav kojim se uz pomoć elektromagnetskih valova određuje položaj i brzina cilja. [1] Upotreba sekundarnog nadzornog radara namijenjena je zrakoplovima koji mogu aktivno odgovarati na upite interogatora. Interogator odašilje kodirani signal kojeg detektira transponder zrakoplova. Transponder je riječ nastala kombinacijom dviju engleskih riječi: *transmitting responder*. Transponder zatim kodira svoj odgovor i odašilje signal. Zaključuje se kako primarni radar radi na principu odjeka odaslanog signala, a sekundarni radar na principu odgovora kodiranog signala transpondera. Signal kojeg odašilje transponder može sadržavati informacije o visini, identifikacijskom kodu, poruku o problemima i kvaru na ruti. [2]

### 2.1. KARAKTERISTIKE SIGNALA

Signal elektromagnetskog vala kojeg odašilje upitivač ima frekvenciju od 1030 MHz koji pripada u UHF spektar frekvencija. Razlog tomu je višestruk. Veća frekvencija znači i manja valna duljina čime se poboljšava rezolucija antene. Nadalje, veća frekvencija smanjuje veličinu antene za isti dobitak. Negativni utjecaj visokih frekvencija je gubitak snage koji raste povećanjem frekvencije. Spektar frekvencija koje se koriste za komunikaciju može se podijeliti u pojaseve. L pojas frekvencija odgovara frekvencijama radara koji se koriste u kontroli zračnog prometa. Domet je do 250 NM. Ovakvi radari emitiraju modulirane impulse visoke snage i širokog pojasa. Domet radara je određen horizontom te se stoga domet povećava s visinom upitivača i odgovarača.[2]

Na signal najviše utječe odbijanje od tla. Taj utjecaj se smanjuje upotrebom viših frekvencija. Odbijanje signala od tlo može koristiti za komunikaciju sa zrakoplovom koji je na nižim visinama. Problem nastaje povećanjem frekvencije gdje se zbog utjecaja tla stvaraju područja u kojima je signal isprekidan. Na Slici 1.1 prikazano je rasprostiranje signala.[3]



Slika 1.1 Rasprostiranje radarskog signala u prostoru[4]

Plavom bojom prikazan je teoretski izgled rasprostiranja, crvenom bojom prikazan je oblik rasprostiranja u kojem je uračunat utjecaj tla. Prilikom odabira visine i položaja antene mora se dobro razmotriti utjecaj tla. Dopuštena devijacija za mod S rada iznosi 100m i 0,06° te 250 m i 0,15° za ostale modove.[5]

## 2.2. ANALIZA PARAMETARA RADARA

Princip rada je uspoređan s principom rada primarnog radara. Signal elektromagnetskog vala kojeg interogator odašilje na određenoj frekvenciji, putuje brzinom svjetlosti i širi se pravocrtno. U stvarnosti, taj signal nije u potpunosti pravocrtan zbog utjecaja atmosfere i padalina. Upotrebom antena, energija signala može biti usmjerena u željenom smjeru na temelju čega se može izračunati udaljenost, smjer i visina objekta.[2]

### 2.2.1. ODREĐIVANJE UDALJENOSTI OBJEKTA

Signal odaslan interogatorom bilježi vrijeme odašiljanja signala te prati vrijeme koje je potrebno transponderu za odgovor. Vrijeme između odašiljanja signala i primanja ponovnog signala važno je prilikom računanja udaljenosti.

S obzirom da je brzina širenja vala poznata, udaljenost između antene i objekta računa se po formuli :

$$R = \frac{c_0 \cdot t}{2} \quad (2.1)$$

gdje je:  $c_0$ —brzina svjetlosti ( $3 \cdot 10^8$  m/s);

t—vrijeme između odaslanog i primljenog signala.

Treba naglasiti kako udaljenost između antene radara i objekta nije horizontalna udaljenost, nego udaljenost pod određenim kutom te je za određivanje horizontalne udaljenosti potrebno znati visinu objekta.[3]

### 2.2.2. ODREĐIVANJE KUTA ELEVACIJE

Impuls kojeg antena prima dolazi pod određenim kutom. Taj kut naziva se kut elevacije i računa se s obzirom na horizont. Na temelju udaljenosti, prikazanoj u poglavlju 2.2.1 i kutu elevacije moguće je izračunati horizontalnu udaljenost i visinu objekta.[3]

### 2.2.3. ODREĐIVANJE USMJERENOSTI SIGNALA

Za određivanje kuta pod kojim signal iz zrakoplova dolazi do antene, bitno je znati dobitak antene. Dobitak antene je sposobnost antene da koncentrira energiju u određenom smjeru. Određivanjem usmjerenosti antene kada je primljen signal iz zrakoplova moguće je u odrediti azimut i visinu zrakoplova u usporedbi s antenom. Točnost izračuna određena je dobitkom antene koja je funkcija veličine antene. Dijagram zračenja signala koji je odaslan ima oblik latice. Signal koji se zatim vraća prema odašiljačkoj anteni varira snagom ovisno o položaju cilja. Naime, snaga signala koju prima antena bi bila najveća u onom slučaju kada bi ista bila usmjerena direktno na metu. Ovim principom se može izračunati kut pod kojim signal dolazi prema anteni.[3]

### 2.2.4. ODREĐIVANJE MAKSIMALNOG DOMETA

Maksimalni teoretski domet radara je udaljenost do koje odaslani signal doputuje te se vrati do odašiljačke antene prije nego je idući signal odaslan. Na taj način jedino je sigurno da su informacije koje primi antena u dovoljnoj mjeri precizne i točne. Vrijeme putovanja signala mora biti manje od perioda između dva uzastopna signala. U protivnom radar ne može odrediti koji odgovor pripada određenom pulsu. Period između dva uzastopna signala označuje se i kraticom PRT (Pulse Repetitive Time).

Ovisnost maksimalnog dometa, perioda i vremena trajanja signala možemo prikazati formulom:

$$R_{\max} = \frac{c_0 \cdot (T - \tau)}{2} \quad (2.2)$$

gdje je:  $R_{\max}$ - maksimalan domet radara [m];

$c_0$ - brzina širenja signala, tj. brzina širenja elektromagnetskog vala[m/s];

$T$ - period između dva uzastopna signala [s];

$\tau$  –trajanje odaslanog pulsa [s].

Danas se koriste antene koje detektiraju signal neovisno o PRT i dužini trajanja signala. Za uspješno detektiranje signala potrebno je bilo dizajnirati antene koje imaju dovoljno uzak snop zračenja i na taj način su eliminirale odjeke koji nisu točni. Veća antena podrazumijeva mogućnost užeg snopa signala. Problem se javio kada je bilo potrebno rotirati velike i teške antene koje bi pokrile željeni prostor. Rješenje tomu je bio antenski niz.[3]

Antenski niz je red ili mreža antena koje odašilju isti signal na određenoj frekvenciji. Njihovi signali interferiraju i stvaraju signal uskog snopa. Veći broj antena u nizu znači i uža snop signala kojim se točnije može detektirati odgovor odaslanog signala. Za rotiranje takvog signala, bez da se cijeli antenski niz rotira, koristi se razlika u vremenu. Signal sa svake antene odaslan je s vremenskim kašnjenjem kako bi se mijenjao smjer signala antenskog niza. Time se smanjila ovisnost dometa radara o PRT.[4]

Drugi način kojim se domet radara može povećati povezan je s upotrebom modulacije impulsa. Modulacijskim se signalom utječe na amplitudu impulsa, trajanje impulsa i položaj impulsa. Svaki odaslan impuls ima drukčiji oblik i na taj se način odgovor može povezati sa samo jednim odaslanim signalom.[3]

#### 2.2.5. ODREĐIVANJE REZOLUCIJE RADARA

Sposobnost radara da razlikuje objekte koji su na malim udaljenostima, naziva se rezolucija radara. Razlikuju se dva tipa rezolucije, kutna rezolucija i rezolucija po udaljenosti.

Rezolucija po udaljenosti podrazumijeva razlikovanje objekata koji su smješteni na istom pravcu, ali različitoj udaljenosti od antene. Ovaj oblik rezolucije ovisi najviše o širini impulsa. Formula po kojoj se izračunava rezolucija je:

$$S_r = \frac{c_0 \cdot \tau}{2} \quad (2.3)$$

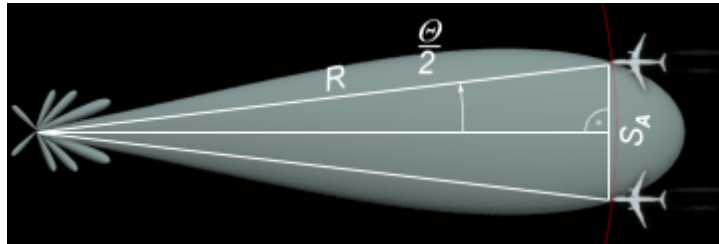
gdje je  $S_r$ -rezolucija radara [m];

$c_0$ -brzina svjetlosti [m/s];

$\tau$ -širina impulsa [s].

Kako bi zrakoplovi bili odvojeni po udaljenosti potrebno je da međusobna udaljenost bude dovoljna da ne dođe do preklapanja dva povratna signala. U protivnom radar će prepoznati samo jedan objekt te će takvu informaciju prenijeti korisniku.[1]

Kutna rezolucija predstavlja mogućnost radara da razlikuje dva zrakoplova jednako udaljena od njega, ali pod drugačijim kutom. Kutna rezolucija određena je širinom pojasa glavne laticice. Širina glavne laticice signala definira granične točke gdje je snaga smanjena za 3 dB u odnosu na maksimalnu snagu. Kut između te dvije točke često ima oznaku  $\Theta$ . Na slici 2.1. prikazana je glavna laticica zajedno za kutom  $\Theta$ . [3]



Slika 2.1. Definiranje kutne rezolucije radara[3]

Granične točke se koriste kako bi se definirala kutna rezolucija antene. Dvije točke moraju biti udaljene najmanje kolika je i udaljenost između graničnih točaka kako bi bile detektirane.

### 2.2.6. ODREĐIVANJE VISINE

Visina na kojoj se zrakoplov nalazi izračunava se iz podataka o udaljenosti i kutu elevacije. Primjenom znanja trigonometrije gdje je sinus kuta odnos nasuprotne stranice kuta i hipotenuze može se odrediti visina zrakoplova. Ovakav izračun bi bio precizan u slučaju da zemlja nije zaobljena te da se elektromagnetski val širi kroz medij jednake gustoće. Stoga je formula za izračun visine zrakoplova kompleksnija:

$$H = R \cdot \sin\theta + \frac{R^2}{2r_e} \quad (2.4)$$

gdje je:  $R$ - udaljenost pod kutom od antene,

$\theta$  kut elevacije zrakoplova,

$r_e$ - radijus Zemlje [km].[3]

Preciznije informacije o visini zrakoplova omogućuje mod C rada. Naknadno će biti objašnjen princip rada moda C.

### 2.3. POKRIVENOST RADARA

Pokrivenost radara se definira kao prostor kontroliran jednim radarom ili radarskom mrežom. Vjerojatnost detekcije zrakoplova unutar radarskog volumena trebala bi biti 95%. Vjerojatnost je najviše ograničena snagom signala. [5]

Radarska antena najčešće ima oblik dijagrama rasprostiranja prema funkciji kosekans kvadrat. Ovakav oblik rasprostiranja omogućava u teoriji jednaku snagu na prijamniku u slučaju kada zrakoplov leti na istoj visini. Oblik odgovara pravokutniku sa zaobljenim bridovima.

Svaki radar ima područje unutar kojega ne može detektirati zrakoplov. Konus tišine nastaje kao posljedica smanjene učinkovitosti antene na području iznad antene te se povećava visinom. Razlog tomu je kut rasprostiranja signala koji je manji od 90 °. Upotrebom više radara lako se eliminiraju područja konusa tišine.

Pokrivenost nižih nadmorskih visine stvara problem zbog zaobljenosti zemlje. Također, nepravilan teren kao što su planine i brda stvaraju područja koja radarski ne mogu biti pokrivena.[4]

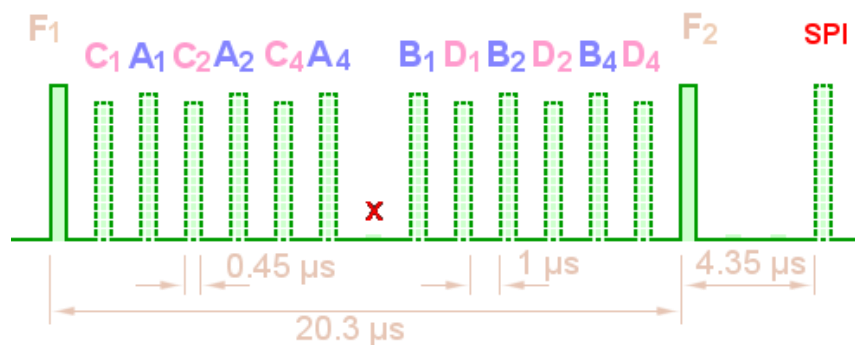
### 3. NAMJENA I PRINCIP RADA SSR

Sekundarni nadzorni radar pripada sustavu kooperativne neovisne detekcije pomoću koje se zrakoplov identificira. Nadzor zrakoplova moguć je jedino ako je zrakoplov opremljen transponderom te ako se nalazi unutar dometa antene upitivača. Ovisno o modelu radara razlikuju se informacije koje sekundarni radar omogućava.[2] Hrvatska kontrola zračne plovidbe koristi tri mod S radarska sustava te tri vojna radara. Smješteni su tako da omogućavaju pokrivenost cijelog *en-route* prostora kao i terminalnog područja Republike Hrvatske.[6]

#### 3.1. PRINCIP RADA SSR-A

Upitivač na tlu kodira upit koristeći koder. Kod se razlikuje ovisno o modu rada. Vremenski razmak impulsa  $P_1$  i  $P_3$  određuju mod rada, a  $P_2$  je kontrolni signal kojim se eliminiraju odgovori na upite bočnih latica. Kodirani signal se modulira te se takav odašilje. Frekvencija signala iznosi 1030 MHz.

Transponder zrakoplova prima signal koji ga na početku pojačava i demodulira. Zatim započinje proces dekodiranja signala te se kodira odgovor na upit upitivača. Izlazni signal se pojačava i modulira. Frekvencija signala je 1090 MHz. Odgovor transpondera sastoji se od niza impulsa, svaki širine  $0,45\mu s$ . Udaljenost između impulsa  $F_1$  i  $F_2$  je  $20,3$ . Odgovor se kodira na taj način da sadrži oktalni kod. Slika 3.1. prikazuje način na koji se impulsi unutar signala kodiraju i dekodiraju.[1]



Slika 3.1. Odgovor transpondera na signal moda A upitivača [7]

SPI (*Special purpose identification*) se koristi u slučaju kada se želi potvrditi identifikacija zrakoplova. Pilot pritiskom na određenu tipku na transponderu odašilje SPI puls kojim se zrakoplov izdvaja od ostalih. Dogovorno su izabrani određeni kodovi kojima se prenose točno definirane informacije. Kod 7500 označava da je zrakoplov otet, kod 7600 predstavlja kvar radio-komunikacijskih uređaja i kod 7700 kojim se označava stanje hitnosti zrakoplova.

Signal koji sadrži odgovor na upit vraća se odašiljačkoj anteni gdje se signal demodulira i pojačava. Moguće su smetnje i interferencije koje se filtriraju. Odgovor se dekodira na upitivaču te se kao takav prikazuje korisniku.

### 3.2. MODOVİ RADA

Signal kojeg odašilje upitivač definira mod rada. Signali  $P_1$  i  $P_3$  širine 0, 8  $\mu\text{s}$  definiraju mod rada vremenskom udaljenošću između njih. Modovi rada koji se koriste u zrakoplovstvu za nadzor su mod A, mod C te mod S. Interogator izmjenjuje modove rada periodično.[1]

Mod A daje informacije o identifikaciji zrakoplova, koristi se u civilne i vojne svrhe. Udaljenost između signala je 8  $\mu\text{s}$  ( $\pm 0,2\mu\text{s}$ ). Omogućuje upotrebu 4096 različitih kodova s obzirom da je poruka 12-bitna. Identifikacija zrakoplova svodi se na 4 znamenke oktalnog sustava poznatog i kao squawk kod transpondera.

Mod C omogućava informacije o visini zrakoplova i također se koristi u civilne i vojne svrhe. Udaljenost između signala iznosi 21  $\mu\text{s}$  ( $\pm 0,2\mu\text{s}$ ). Informacije o visini zrakoplova dobivaju se iz kodirajućeg visinomjera.

Mod S nastao je kao rješenje problema koji se javljao sve većim porastom prometom. Mod A koji omogućava upotrebu 4096 različitih kombinacija kodova, nije više zadovoljavao trenutnu potražnju. Veličina poruke unutar koje se kodira identifikacija povećala se na 24-bita. Kako bi se mod S interogacijska poruka razlikovala od ostalih modova, koristi se vrijeme trajanja impulsa  $P_1$  i  $P_2$ . Kontrolni impuls u ovom slučaju je  $P_5$  nakon kojeg slijedi impuls unutar kojeg se nalazi poruka od 56 do 112 Bita. Odgovor transpondera sastoji se od dva dijela. Preambule i podatkovnog bloka. Preambula ili uvod, je širine 8  $\mu\text{s}$ , a podatkovni blok 56 ili 112  $\mu\text{s}$ . Svaki odgovor na mod S započinje jednako preambulom nakon čega slijedi podatkovni blok. Podatkovni blok podijeljen je u 3 dijela. Prvi 5-bitni dio koji služi za identifikaciju formata. Drugi 27-bitni dio koji je u svrhu nadzora i kontrole. Treći 24-bitni dio unutar kojeg se nalazi identifikacija zrakoplova. Na Slici 3.2 prikazan je primjer kodirane poruke moda S. Duža verzija moda S sadržava dodatna 56 bita unutar kojih je prenesena poruka s dodatnim korisnim informacijama. Današnji suvremeni mod S omogućuje selektivnu komunikaciju sa zrakoplovom. [1]



Slika 3.2. Kodirana poruka moda S

Ostali modova rada su rijetko korišteni ili se uglavnom koriste za identifikaciju vojnih zrakoplova, tip ili misiju zrakoplova.



## 4. PREDNOSTI I NEDOSTATCI SSR-a

Prednost radar je ta što su upotrebljivi neovisno o dobu dana i vremenskim uvjetima, ima veliki domet te objekti koji se detektiraju radarom ne moraju biti stacionarni.

Nedostatci primarnog radara najviše su povezani s prednostima specifičnim za sekundarni radar. Primjer toga je smanjenje osjetljivosti prijarnika s obzirom da je signal na prijarniku jači, čime se direktno utjecalo i na točnost detekcije signala.[2]

### 4.1 NEDOSTATCI RADARA

Svaki radarski sustav ima različite oblike gubitaka. Pojedini se gubitci mogu prevenirati ili smanjiti dobro osmišljenim dizajnom radara dok se na druge može utjecati redovitim održavanjem sustava. Problem kod gubitaka predstavlja to što su neizbježni i što njihov iznos zbrajanjem može iznositi do 20 dB.[3]Unutar gubitaka sustava ne treba ubrajati propagacijske efekte elektromagnetskih valova. Propagacijski efekti mogu smanjiti ili povećati domet radara. [8]

Upotrebom sekundarnog radara, postoji mogućnost da transponder može primiti signal bočnih latica signala i na njih poslati svoj odgovor. Time transponder dobije sliku više zrakoplova na istoj udaljenosti ali različito usmjerenih. Rješenje problema obavlja se potiskivanjem bočnih latica. Svaki sekundarni radar se sastoji od dvije odašiljačke antene. Jedna odašilje usmjereni signal dok druga služi kao kontrolna antena te odašilje jednak signal u svim smjerovima. Prvi signal P1 je odaslan s usmjerene antene, drugi signal P2 je odaslan s antene koja šalje signal u svim smjerovima. Uvjet je taj da snaga P2 mora biti manja 9dB od snage P1 kako bi transponder odgovorio na upit.[1]

S obzirom da je jedna frekvencija u upotrebi, prilikom zagušenja kanala nije moguća nikakva alternativa.

„*Garbling*“ predstavlja interferenciju signala prilikom preklapanja dva ili više odgovora transpondera. Interferencija interogatora uzrokovana odgovorom transpondera koji je primio upit drugog interogatora poznat je i pod nazivom „*Fruiting*“.

#### 4.1.1 ATMOSFERSKI GUBITCI

Gubitci koji nastaju apsorpcijom atmosfere mogu iznositi i više od 1 dB. Utjecaj na ovaj tip gubitka najviše ima radna frekvencija radara, zatim i udaljenost koju signal prijeđe te kut elevacije. [3]

Elektromagnetski val može biti djelomično ili u potpunosti apsorbiran od strane medija. Energija prelazi radijacijom na medij najčešće u obliku topline. Gubitci su neprimjetni za frekvencije ispod 3 GHz u slučaju vedrog neba. Na frekvencijama iznad 3 GHz, frekvencija impulsa odgovara rezonantnim frekvencijama molekula u atmosferi čime širenje impulsa kroz medij postaje otežano. Slabljenje signala postaje jače što je frekvencija veća i put kojim

se širi dalji. Slabljenje se može povećati raznim vremenskim uvjetima. Relativna vlažnost zraka i temperatura također određuju slabljenje.[3]

Prodirući kroz molekule zraka i vodene pare, dio energije prelazi u toplinu dok se drugi dio raspršuje pod utjecajem dipolnih molekula. Time slabljenje postaje jače povećanjem vlažnosti zraka.

Atmosferski gubitci predstavljaju zbroj slabljenja signala određenim sastavom atmosfere te slabljenja određenog vremenskim uvjetima, te ne može biti izbjegnuto.

#### 4.1.2.OSTALI GUBITCI

Samim nastajanjem elektromagnetskog impulsa i njegovom distribucijom do odašiljača nastaje greška. Svaki konstruktivni dio pridonosi manjem gubitku koji na kraju može iznositi i do 3,4 dB.

Dobitak antene koji je uzet u obzir u radarskoj jednadžbi te Friisovoj jednadžbi odgovara vrijednosti koja je maksimalna moguća. U stvarnosti je ta vrijednost promjenjiva ovisno o amplitudi signala i obliku antene. Gubitak koji se generira integriranjem signala može iznositi i do 3dB za antenski niz.

U slučaju kada radar integrira dodatni šum uz signal koji prenosi informaciju nastaje gubitak koji se može izraziti formulom:

$$L_c = \frac{n + m}{n} \quad (4.1)$$

gdje je : n- broj impulsa koji prenose informaciju i šum

m- broj impulsa koji prenose samo šum

Nadalje stvaraju se gubitci obrade signala, gubitci u prijenosu signala između pojačala signala i antene odašiljača kao i gubitci u prijarničkoj anteni. Svaka od ovih grešaka može iznositi do 2 dB.[8]

Navedeni gubitci mogu se izračunati matematički dovoljno precizno te tako umanjiti njihov utjecaj. Gubitci koji se ne mogu lagano prikazati niti izračunati su: nesofisticirana oprema, premor opreme i dr.

#### 4.1.3. INTERFERENCIJE SIGNALA

Korištenje određene frekvencije za rad interogatora i transpondera omogućava olakšanu i globalnu upotrebu sekundarnog radara zbog čega dolazi do interferencije signala.

„*Fruiting*“ nastaje kada zrakoplov prima upite od najmanje dva interogatora. Odgovor koji se kodira je netočan jer se vremenski preklapaju dva odgovora.[1] Interferencija se prepoznaje

po tome što je odgovor poslan jednom ili više korisnika koji taj odgovor nisu očekivali. Povećanjem prometa povećao se i broj odgovora koji su izgubljeni ili odgovora koji daju netočne informacije. Problem se rješava tako što svaka antena sekundarnog radara sadrži uređaj koji pamti odgovore transpondera. Svakom rotacijom antene, uređaj zabilježi dva uzastopna odgovora transpondera te ih uspoređuje sa sljedećim odgovorom.

„*Garbling*“ je produkt preklapanja odgovora dva zrakoplova na maloj udaljenosti čime se otežava mogućnost razdvajanja odgovora jednog od drugog. Dva su tipa ovakve interferencije. Nesinkronizirana interferencija lakša je za otkriti tako što odgovori nisu vremenski ujednačeni. Sinkronizirana interferencija ne može se dekodirati jer se odgovori vremenski preklapaju. [9]

#### 4.1.4. NEDOSTATCI TRANSPONDERA

Poznati su slučajevi kada se odgovori transpondera izgube ili jednostavno nisu prepoznati. Odgovor može izostati u slučaju kada je zrakoplov zauzet odgovaranjem drugom interogatoru ili je u fazi oporavka nakon odgovaranja. Faza oporavka može trajati i do 125  $\mu$ s ali najčešće je 45  $\mu$ s.[5] U područjima gdje se nalazi previše upita interogatora moguće je smanjiti osjetljivost transpondera na upite. Nadalje, odgovor transpondera će izostati u slučaju kada transponder primi upit bočnih latica odašiljačke antene. U slučaju kada je zrakoplov u zaokretu moguće je da signal interogatora ne bude detektiran zbog efekta sjene koji se stvara.

Nepravilan rad transpondera može biti uzrokovan kvarom jedne ili više komponenti sustava. Stoga zrakoplovi često imaju rezervni transponder u slučaju kvara.

#### 4.2. PREDNOSTI SEKUNDARNOG RADARA

Upotrebom sekundarnog radara povećao se broj informacija koje se mogu prenijeti. Osim visine i identifikacijskog koda, moguće je slanje posebnih poruka transpondera npr. kvar radio komunikacijskih uređaja. S obzirom na to da je manji put koji signal mora prelaziti, tj. signal putuje jednosmjerno, signal je jači i sadrži manje šumova. Time se osjetljivost prijamne antene može smanjiti. Upotrebom sekundarnog radara moguće je saznati brzinu, destinaciju te povijest prijeđenog puta ovisno o modu rada.[2] Kapacitet od 400 zrakoplova koju posjeduje zemaljska stanica zadovoljava potražnju i u prometnom najzagušenijim dijelovima zračnog prostora. Upotrebom različitih frekvencija za odašiljanje signala, zagušenje je smanjeno. Razvitkom moda S informacije su točnije i zaštićenije. [5]

## 5. FRIISOVA JEDNADŽBA

Radarska jednadžba ima ulogu određivanja približnog dometa radara kao funkciju njegovih karakteristika, ali koristi se i kao osnova za dizajniranje primarnog radara. Jednadžba je blisko povezana s Friisovom jednadžbom kojom se izračunava snaga prijамne antene sekundarnog radara. Nadalje, jednadžba pokazuje da su gubitci energije manji što je manja frekvencija. Stoga je upotreba visokih frekvencija i dalje ograničena. Najčešće se koriste za komunikacije *point-to-point* gdje su obje antene u istim prostorijama.[3]

### 5.1.OSNOVNI OBLIK FORMULE

Pretpostavke na kojima se zasniva formula su da se elektromagnetski valovi šire u idealnim uvjetima, tj. bez disperzije, obje antene su jednako polarizirane te je udaljenost između antena veća od valne duljine signala. Oblik jednadžbe koji se koristi za izračun ulazne snage signala interogatora i transpondera je :

$$P_R = P_t G_R G_t \left( \frac{\lambda}{4\pi d} \right)^2 \text{ [W]} \quad (5.1)$$

gdje je:  $P_R$ - snaga na prijамniku [W],

$P_t$ - snaga na odašiljaču[W],

$G_R$ -dobitak prijамne antene,

$G_t$ - dobitak odašiljačke antene,

$\lambda$ - valna duljina signala[m],

$d$ - udaljenost koju signal prijeđe [m].

Ako se odaslana snaga redistribuira radi postizanja većeg zračenja povećava se gustoća snage u smjeru zračenja. Ovaj efekt naziva se dobitak antene.[10]

Faktor  $\left( \frac{\lambda}{4\pi d} \right)^{-2}$  predstavlja gubitke slobodnog širenja signala elektromagnetnog vala koji se propagira bez refleksije ili difrakcije.

### 5.2.PRIMJENA FORMULE

Oblik Friisove jednadžbe u kojoj je snaga iskazana u mjernoj jedinici vat [W] nije jedina mogućnost. U tehnici je poznatiji oblik u kojem je dobitak antene iskazan u dBi, a snaga u dBm ili dBW. Na taj se način dobivaju vrijednosti snage koji su u malim rasponima te ih je lakše računati i njima se koristiti.

Oznaka za razinu snage izraženu u decibelima u odnosu na referentnu vrijednost od 1 mW je dBm. Ista je definicija i za dBW, osim što je u ovom slučaju referentna vrijednost 1 W.

Formula kojom se izračunava snaga izražena u dBm je:

$$P_{(\text{dBm})} = 10 \log_{10} \frac{P_{(\text{W})}}{1\text{mW}} \quad (5.2)$$

u ovom slučaju logaritam se množi brojem 10 koji je faktor pojačanja.[10]

Friisova formula u ovom obliku poprima oblik:

$$P_R = P_t + G_R + G_t + 20 \log_{10} \left( \frac{\lambda}{4\pi d} \right) \quad (5.3)$$

gdje je:  $P_R$ - snaga na prijamniku [dBm],

$P_t$ - snaga odašiljačke snage [dBm],

$G_R$ -dobitak prijamne antene [dBi],

$G_t$ - dobitak odašiljačke antene [dBi],

$\lambda$ - valna duljina signala[m],

$d$ - udaljenost koju signal prijeđe [m].

Formula je najtočnija za idealne uvijete u kojima se signal ne odbija od zgrade ili tla te nema nikakvih ostalih smetnji. Pretpostavlja se da su antene jednako polarizirane. U protivnom bi se u formulu morao uračunati PLF (Polarization loss factor). PLF označava gubitke uzrokovane različitim kutom širenja električnog polja dviju antena. U slučaju da je prva antena vertikalno polarizirana, a druga horizontalno polarizirana, odaslana se snaga ne bi mogla uspješno prenijeti.

Oblik formule primjenjiv za izračun primljene snage na prijemniku u Vatim je oblika:

$$P_R = P_t \cdot \frac{G_R G_t}{L_{AT} L_I L_T} \cdot \left( \frac{\lambda}{4\pi d} \right)^2 \quad [\text{W}] \quad (5.4)$$

Gdje je:  $P_R$ - snaga na prijamniku [dBm],

$P_t$ - snaga odašiljačke snage [dBm],

$G_R$ -dobitak prijamne antene [dBi],

$G_t$ - dobitak odašiljačke antene [dBi],

$\lambda$ - valna duljina signala [m].

$d$ - udaljenost koju signal prijeđe,

$L_I$ - suma svih gubitaka između interogatora (transpondera) i antene,

$L_T$ - suma svih gubitaka unutar sustava između antene i transpondera (interogatora),

$L_{AT}$ - suma atmosferskih gubitaka.

## 6. PROGRAMIRANJE JEDNADŽBE I IZRAČUN KARAKTERISTIČNIH SLUČAJEVA U PROGRAMSKOM JEZIKU MATLAB

Pomoću poznatih parametara sekundarnih nadzornih radara korištenih u Republici Hrvatskoj objašnjen je način na koji ulazni podaci formiraju snagu na prijamniku. Prilagodбом friisove jednadžbe i izračunom izračene snage radara prikazano je šest karakterističnih slučajeva. Slučajevi se razlikuju frekvencijom i jačinom kiše.

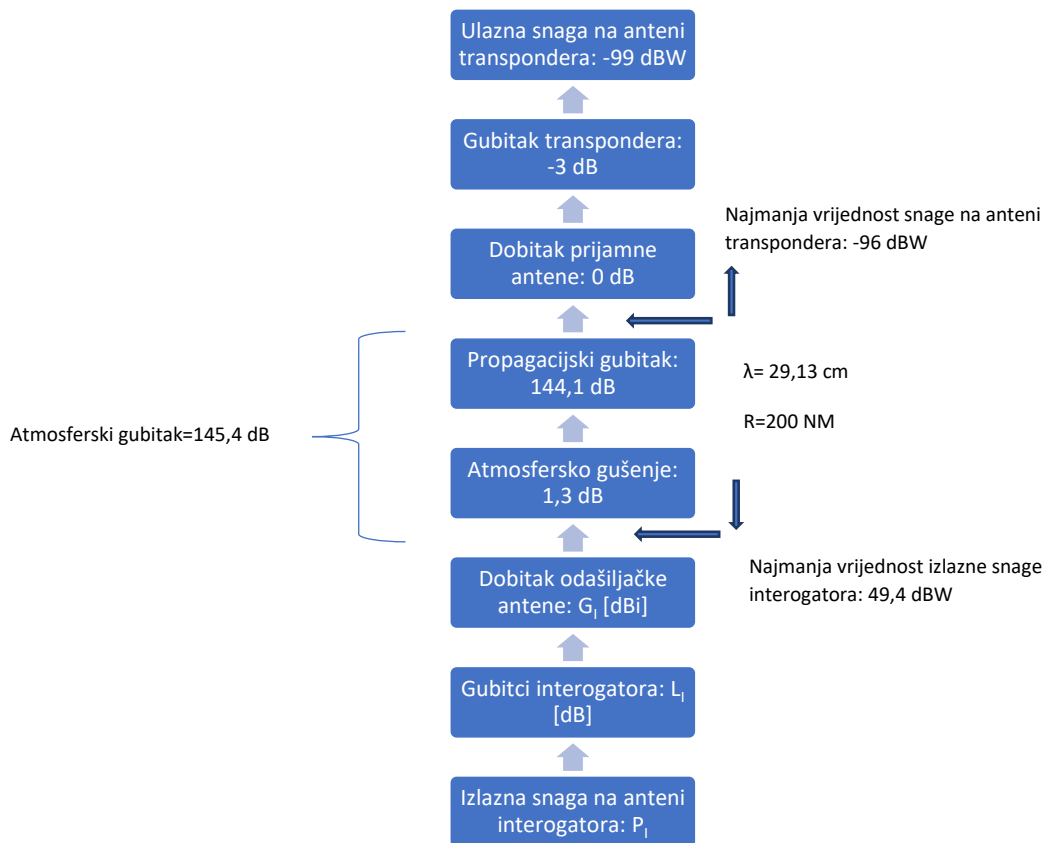
### 6.1. IZRAČENA SNAGA RADARA

Četiri su radara koji se koriste za nadzor zračnog prostora RH. Radar Pleso, radar Kozjak, radar Psunj te radar Monte Kope dijele jednake karakteristike.[9] Karakteristike radara bitne za izračun su prikazane u Tablici.6.1

<b>RADAR</b>	<b>PLESO</b>	<b>KOZJAK</b>	<b>PSUNJ</b>	<b>MONTE KOPE</b>
<b>TRANSMITIRANA IMPULSNA SNAGA(PREDAJNIK ODAŠILJAČ BEZ ANTENE)</b>	64 dBm	64 dBm	64 dBm	64 dBm
<b>DOBITAK PRIJAMNE ANTENE</b>	27,41 dBi	27,41 dBi	27,41 dBi	27,84 dBi
<b>MINIMALNA DETEKTIBILNA SNAGA RADARA</b>	-91 dBm	-90 dBm	-90 dBm	-89 dBm
<b>DOMET</b>	Korišteni operativni 200 NM	Korišteni operativni 200 NM	Korišteni operativni 200 NM	Korišteni operativni 200 NM
<b>RADNA FREKVENCIJA UPITIVAČA</b>	1030 MHz	1030 MHz	1030 MHz	1030 MHz

Tablica 6.1. Karakteristike SSR-a u Republici Hrvatskoj[9]

Elementi izlaznog signala interogatora prikazani su na Slici 6.1. Vrijednost atmosferskih gubitaka na Slici 6.1. odgovara najgorem mogućem slučaju prilikom propagacije signala dok je u stvarnosti ta vrijednost promjenjiva.



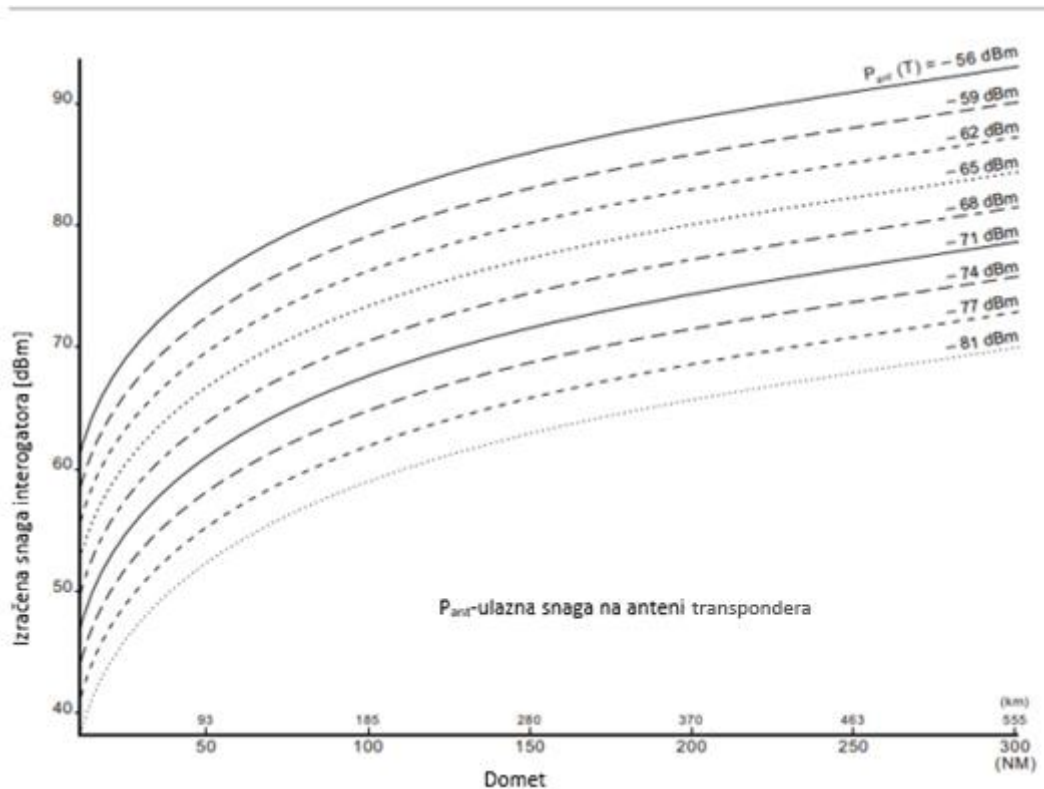
Slika 6.1. Prikaz elemenata izlaznog signala interogatora

Upotrebom izračene snage uzima se u obzir dobitak antene, gubici te izlazna snaga signala.[5] Formula kojom se izračunava je:

$$ERP_1 = P_I \cdot \frac{G_I}{L_I} [W] \quad (6.1)$$

Odnos izračene snage i snage na anteni transpondera prikazan je na Slici 6.2.





Slika 6.2 Prikaz iznosa izračene snage ovisno izlaznoj snazi interogatora[5]

Uvrštavanjem formule 6.1 u osnovni oblik Friisove formule dobije se oblik formule:

$$P_T = ERP_1 \cdot \frac{1}{L_{AT}} \cdot \left( \frac{\lambda}{4\pi d} \right)^2 \text{ [W]} \quad (6.2.)$$

S obzirom da je frekvencija signala interogatora 1030MHz, valna duljina je 29,13 cm, pretvorbom jednadžbe u logaritamski oblik i zapisom dometa u nautičkim miljama dobiva se oblik jednadžbe:

$$P_T = ERP_1 - L_s R - 20 \log(R) - 98.05 \text{ [dBm]} \quad (6.3)$$

gdje je:  $L_s$  gubitak nastao zbog kiše [dB/km]. [5]

Formula za izračunavanje gubitka:

$$L_s = \gamma(R) l_e(R) p(R) \quad (6.4)$$

gdje je:  $\gamma$ - gušenje po jedinici duljine jačine kiše R,

$l_e$ -ekvivalentni put kiše jačine R,

$p$ - vjerojatnost jačine kiše R[%].[10]

Za izračun se pretpostavlja temperatura od 0°C, jednaka jačine kiše cijelim putem te vjerojatnost kiše 100%.

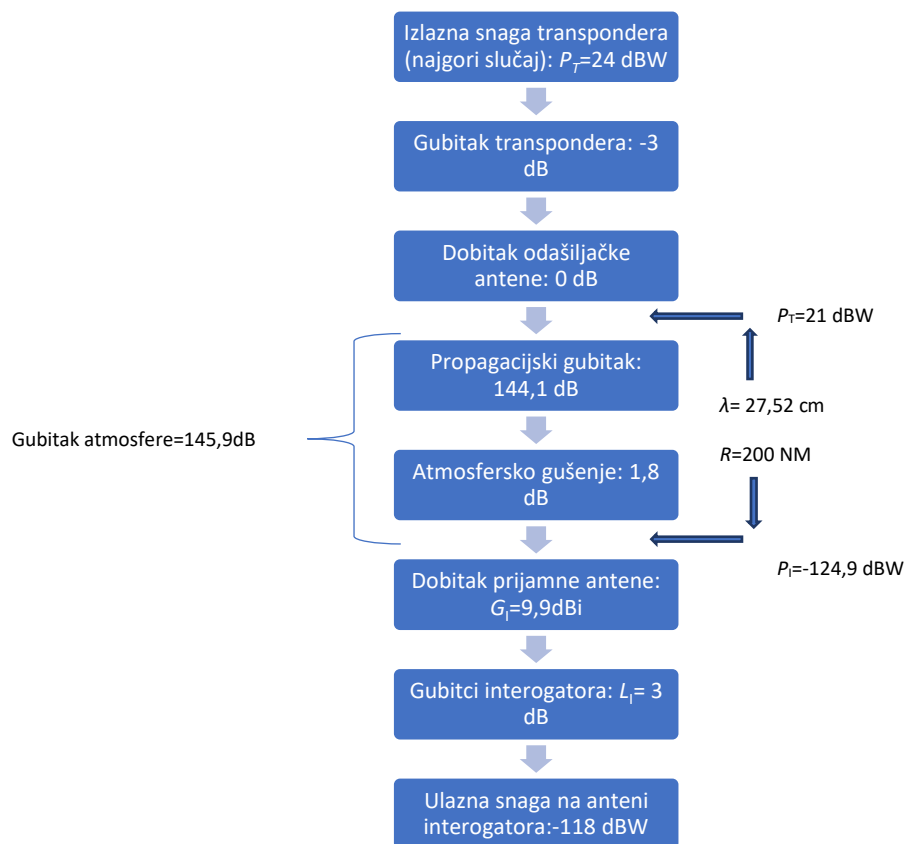
$$\gamma(R) = aR^b \left[ \frac{\text{dB}}{\text{km}} \right] \quad (6.5)$$

gdje su a i b varijable ovisne o jačini kiši, veličini kapljica, indeksu loma i temperature. Računaju se formulama:

$$a = G_a f^{E_a} \quad (6.6)$$

$$b = G_b f^{E_b} \quad (6.7)$$

Elementi izlaznog signala transpondera prikazani su na Slici 6.3.



Slika 6.3. Prikaz elemenata izlaznog signal transpondera

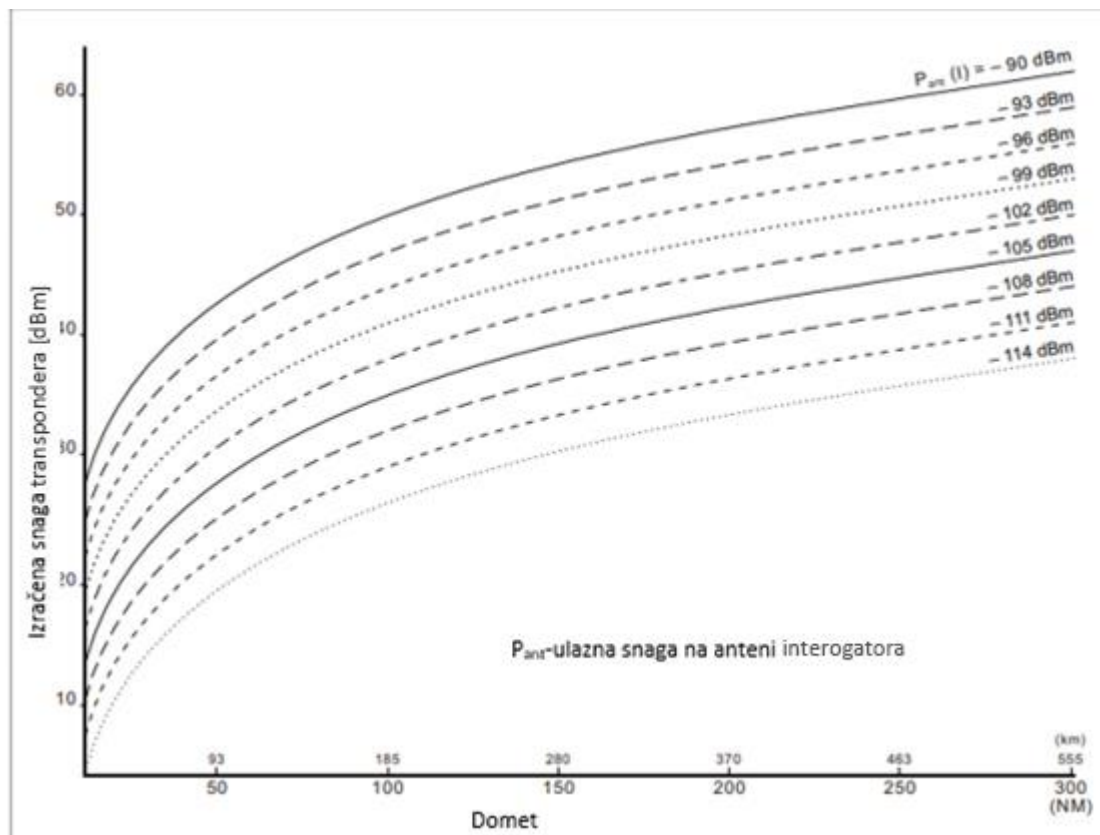
Čimbenici koji djeluju na iznos snage signala interogatora i transpondera su jednaki. Dobivena izračena snaga prikazuje se formulom:

$$ERP_T = P_T \cdot \frac{G_T}{L_T} [\text{W}] \quad (6.8)$$

odnosno u logaritamskom obliku:

$$ERP_T = P_T + G_T - L_T [\text{dBm}] \quad (6.9)$$

Odnos izračene snage transpondera i snage na anteni interogatora prikazan je na Slici 6.4.



Slika 6.4. Prikaz iznosa izračene snage ovisno izlaznoj snazi transpondera[5]

Uvrštavanjem u Friisovu formulu dobiva se oblik jednadžbe:

$$P_I = ERP_T \cdot \frac{1}{L_{AT}} \cdot \left( \frac{\lambda}{4\pi d} \right)^2 \quad [W] \quad (6.10)$$

S obzirom da je frekvencija signala transpondera 1090MHz odnosno valna duljina 29,13cm, pretvorbom jednadžbe u logaritamski oblik te zapisom dometa u nautičke milje dolazimo do izraza:

$$P_I = ERP_T - L_S R - 20 \log(R) - 98,54 \quad [dBm] \quad (6.11)$$

[5]

## 6.2. IZRAČUN KARAKTERISTIČNIH SLUČAJEVA

U programskom jeziku Matlab napravljen je izračun za šest karakterističnih slučajeva. U tri slučaja predajnik je interogator, a prijatelj transponder te u tri slučaja predajnik je transponder a prijatelj interogator. Za svaki od tri slučaja uzete su različite jačine kiše dok

su ostali parametri konstantni. U Tablici 6.2. prikazani su karakteristični parametri za pojedini slučaj.

	SLUČAJ 1	SLUČAJ 2	SLUČAJ 3	SLUČAJ 4	SLUČAJ 5	SLUČAJ 6
<b>FREKVENCIJA</b>	1030 MHz	1030 MHz	1030 MHz	1090 MHz	1090 MHz	1090 MHz
<b>JAČINA KIŠE</b>	0	1,25 mm/h	50 mm/h	0	1,25 mm/h	50 mm/h
<b>DOBITAK IZLAZNE ANTENE</b>	24,41 dBi	27,41 dBi	27,41 dBi	0	0	0
<b>DOMET</b>	200 NM	200 NM	200 NM	200 NM	200 NM	200 NM
<b>GUBITCI UREĐAJA</b>	2 dB	2 dB	2 dB	2 dB	2 dB	2 dB
<b>IZLAZNA SNAGA</b>	64 dBm	64 dBm	64 dBm	54 dBm	54 dBm	54 dBm

Tablica 6.2 Parametri karakterističnih slučajeva

Slučaj 1 i slučaj 4 prikazuju propagaciju signala interogatora i transpondera u uvjetima bez kiše.

Slučaj 2 i slučaj 3 prikazuju gubitke signala interogatora u uvjetima slabe i jake kiše. Informacije o dobitku, izlaznoj snazi i dometu odgovaraju vrijednostima radara korištenih unutar područja RH.

Slučaj 5 i slučaj 6 prikazuju gubitke signala transpondera u uvjetima slabe i jake kiše. Pretpostavljeni su najgori mogući slučajevi. Dobitak antene 0dBi te izlazna snaga 54dBm.[10]

Promjenjiva varijabla je jakost kiše. Gubitci uređaja aproksimirani su na 2 dB [3]. Izračena snaga izračunata je pomoću formule 6.9

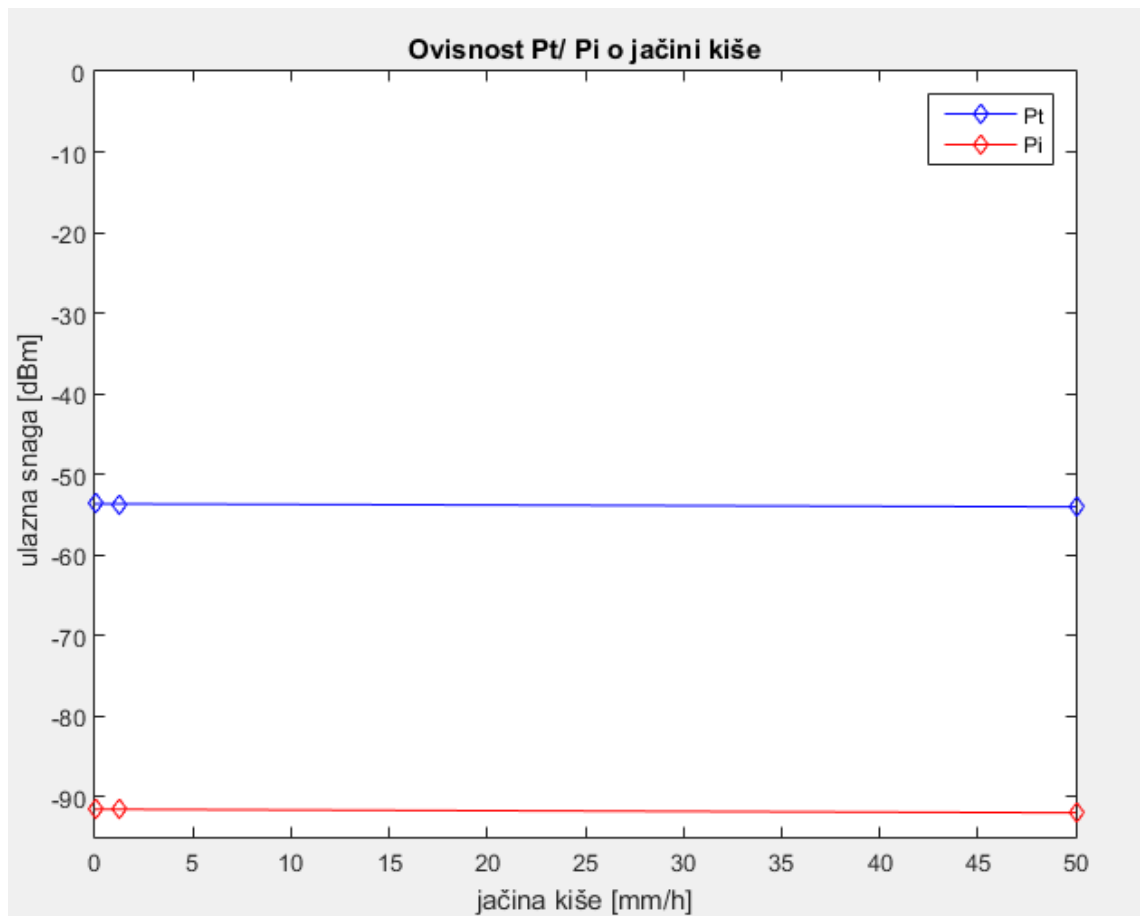
Uvrštavanjem konstantnih vrijednosti u formule 6.6 i 6.7 te njihovim uvrštavanjem u formulu 6.5 dobiva se iznos prigušenja nastalog kišom.

Završni korak je izračunavanje snage uz pomoć formula 6.3 te 6.11 nakon čega se dobiva iznos snage koji treba biti iznad minimalne detektibilne kako bi signal bio uspješno obrađen.

Ovisnost snage ulaznog signala o jačini kiše prikazan je na slici 6.5. Plavom bojom prikazana je ulazna snaga signala na anteni transpondera a crvenom bojom ulazna snaga signala na anteni interogatora. U prilogu 7 prikazan je postupak izrade grafa u programu Matab.

Snaga na prijemu interogatora znatno je manja od snage na prijemu transpondera stoga i uređaj mora biti osjetljiviji kako bi se slabiji signali moglo detektirati. Transponder u svakom trenutku treba odgovarati samo jednoj zemaljskoj stanici. Kada bi osjetljivost antene transpondera bila veća moglo bi doći do zagušenja i interferencije signala. Najveća razlika u snazi na prijemu interogatora i transpondera proizlazi iz dobitka antene Transponder odašilje

signal u svim smjerovima što dovodi i do većih gubitaka dok interogator, s velikim iznosom dobitka antene, odašilje signal uskog snopa velike snage.



Slika 6.5. Ovisnost jačine ulaznog signala o jačini kiše (Matlab)

### 6.2.1 ANALIZA OVISNOSTI SNAGE ODAŠILJAČA INTEROGATORA U OVISNOSTI O KIŠI

U prilogu 1 prikazan je slučaj izračuna snage u uvjetima bez kiše. Vrijednost snage od -53,6619 dBm veća je od slučajeva s kišom. Ovisno o jačini kiše mijenja se ulazna snaga na anteni transpondera.

U prilogu 2 napravljen je izračun slučaja 2 za slabu kišu jačine 1,25 mm/h, čime je snaga na odašiljaču iznosila -53,6770 dBm.

U prilogu 3 obrađen je slučaj 3 u kojem se izrađuje proračun s jakom kišom jačine 50mm/h. Vrijednost koja se dobiva je -54,0454 dBm. što znači da bi minimalna osjetljivost transpondera trebala biti veća od -54 dBm kako bi se sa sigurnošću svi signali mogli detektirati.

## 6.2.2 ANALIZA OVISNOSTI SNAGE ODAŠILJAČA TRANSPONDERA U OVISNOSTI O KIŠI

U prilogu 4. prikazan je izračun snage signala na ulazu u antenu interogatora u uvjetima bez kiše. Vrijednost snage iznosi -91,5637 dBm i takav signal bi bio obrađen. Utjecaj kiše na ulaznu snagu na anteni interogatora prikazan je u prilogu 5 i prilogu 6. U uvjetima jake kiše ulazna snaga signala iznosi -92,0054 dBm što je manje od minimalne detektibilne snage što znači da taj signal ne bi bio prepoznat i obrađen.

U slučaju slabe kiše snaga ulaznog signala na anteni interogatora iznosi -91,5791 dBm što je granična vrijednost minimalne detektibilne snage. Postoji vjerojatnost da ovaj signal također ne bi bio prepoznat i obrađen.

U oba slučaja odašiljačka snaga signala transpondera je minimalna moguća te je dobitak antene 0 dBi.

## 7. ZAKLJUČAK

Upotrebom sekundarnog nadzornog radara omogućila se komunikacija sa zrakoplovom koja nije temeljena samo na odjeku signala. Time se povećao broj informacija i poboljšala se kvaliteta nadzora zrakoplova. Razvojem moda S rada transpondera započeo je razvoj novih tehnologija koje se danas svakodnevno koriste.

Frekvencije rada sekundarnog nadzornog radara omogućuju komunikaciju koja trpi manje utjecaje okoline na jačinu signala. Oblici gubitaka i interferencije su brojni te ih detaljnim izračunima treba detektirati i točno odrediti kako bi se njihov utjecaj mogao što više smanjiti.

U završnom radu prikazani su slučajevi gdje su na jačinu signala izračunati utjecaji kiše različite jakosti. Kako bi signal bio uspješno detektiran potrebno je da bude jači od minimalne detektibilne snage radara. U programu Matlab napravljen je proračun za najgori mogući scenarij u kojem je snaga odaslano signala minimalna dopuštena, a zrakoplov se nalazi na udaljenosti koja odgovara maksimalnom dometu radara. Parametri interogatora jednake su karakteristikama interogatora radara Republike Hrvatske.

Iz rezultata je vidljivo da samo utjecaj kiše ne prouzrokuje velike gubitke snage. Najmanja detektibilna snaga transpondera trebala bi biti -54 dBm da bi svaki odaslani signal zrakoplova mogao biti uspješno obrađen.

Rezultatima je prikazano da će signal zrakoplov biti detektiran u slučaju slabe kiše na udaljenosti od 200 NM no u slučaju jake kiše signal će biti preslab da bi se detektirao. U proračunu je uzeta jakost kiše jednaka po cijelom putu rasprostiranja što je u praksi gotovo nemoguće te je vjerojatnost loše detekcije signala u stvarnosti manja. Položaj radara trebao bi biti takav da se i u uvjetima jake kiše svaki signal uspješno može obraditi.

## LITERATURA

- [1] Edde, B. : Radar principles, technology, applications, PTR Prentice Hal, Engewood Cliffs, New Jearsey, 1993.
- [2] URL:<http://www.radartutorial.eu/druck/Book2.pdf> (pristupljeno kolovoz 2019.)
- [3] URL: <http://www.radartutorial.eu/druck/Book1.pdf> (pristupljeno kolovoz 2019.)
- [4] URL: <http://www.radartutorial.eu/druck/Book3.pdf> (pristupljeno kolovoz 2019.)
- [5] Doc.9684 AN/951, Priručnik za Sekundarni nadzorni radar
- [6] URL:<http://www.crocontrol.hr/default.aspx?id=176> (pristupljeno kolovoz 2019.)
- [7] URL: <http://www.radartutorial.eu/13.ssr/sr07.en.html> (pristupljeno kolovoz 2019.)
- [8] URL:[http://www.ece.uah.edu/courses/material/EE619-2011/RadarLosses\(7\)2011.pdf](http://www.ece.uah.edu/courses/material/EE619-2011/RadarLosses(7)2011.pdf) (pristupljeno kolovoz 2019.)
- [9] Nastavni materijali iz kolegija Radio i radarski sustavi; dr. sc. Jurica Ivošević
- [10] Gold, Frederick L. : Radar for Technicians, Instalation, maintenance and repair, McGraw-Hill/TAB Electronics; 1. izdanje, 1995



Popis kratica

UHF-Ultra High Frequency

PRT- Pulse repetition time

SPI-Special purpose identification

PLF- Polarization Loss Factor

ERP- Effective radiated power

## Popis slika

Slika 1.1 Rasprostiranje radarskog signala u prostoru

Slika 2.1. Definiranje kutne rezolucije radara

Slika 3.1. Odgovor transpondera na signal moda A upitivača

Slika 3.2. Kodirana poruka moda S

Slika 6.1. Prikaz elemenata izlaznog signala interogatora

Slika 6.2 Prikaz iznosa izračene snage ovisno izlaznoj snazi interogatora

Slika 6.3. Prikaz elemenata izlaznog signal transpondera

Slika 6.4. Prikaz iznosa izračene snage ovisno izlaznoj snazi transpondera

Slika 6.5. Ovisnost jačine ulaznog signala o jačini kiše (Matlab)

## Popis tablica

Tablica 6.1. Karakteristike SSR-a u Republici Hrvatskoj

Tablica 6.2. Parametri karakterističnih slučajeva

## Prilog 1

$P_i=64$ ; %snaga odašiljačke antene interogatora u dBm

$G_i=27.41$ ; %dobitak odašiljačke antene interogatora u dBi

$f_i=1.030e9$ ; %radna frekvencija. interogatora u Hz

$d=200*1852$ ; %udaljenost prijarnik-odašiljač u m

$c=3e8$ ;

$\lambda=c/f_i$ ;

$L_i=1$ ; %gubitak prijenosa signala unutar sustava interogatora u dB

$ERP_i=P_i+G_i-L_i$ ; %izračena snaga odašiljačke antene

$P_t=ERP_i+20*\log_{10}(\lambda/(4*\pi*d))$ ; %snaga na prijarničkoj anteni transpondera u dBm

$P_t=-53.6619$

## Prilog 2

```
>>Pi=64.00; %snaga odašiljačke antene interogatora u dBm
Gi=27.41; %Dobitak odašiljačke antene interogatora u dBi
fi=1.030; % radna frekvencija interogatora u GHz
d=200.00; %udaljenost prijamnik-odašiljač u NM
Li=1.00; %gubitak prijenosa signala unutar sustava interogatora u dB
R=1.25; %jačina kiše u mm/h
a=6.39*0.00001.*(fi^(2.03));
a =6.7852e-05
b=0.851*(fi^0.158);
b =0.8550
gama=a*(R^b);% gušenje po jedinici duljine jačine kiše R
gama =8.2114e-05
p=1.00; %vjerojatnost kiše
s=gama*p;
Ls =8.2114e-05
x=log10(d);
ERP_i=Pi+Gi-Li; %izračena snaga odašiljačke antene interogatora
ERP_i =90.4100
Pt=ERP_i-(Ls.*d)-(20*x)-98.05;% snaga na prijamničkoj anteni transpondera u dBm
Pt =-53.6770
```

### Prilog 3

```
>>Pi=64.00; %snaga odašiljačke antene interogatora u dBm
Gi=27.41; %Dobitak odašiljačke antene interogatora u dBi
fi=1.030; % radna frekvencija interogatora u GHz
d=200.00; %udaljenost prijamnik-odašiljač u NM
Li=1.00; %gubitak prijenosa signala unutar sustava interogatora u dB
R=50.00; %jačina kiše u mm/h
a=6.39*0.00001.*(fi^(2.03));
b=0.851*(fi^0.158);
a=6.7852e-05
b=0.8550
gama=a*(R^b);% gušenje po jedinici duljine jačine kiše R
gama =0.0019
p=1.00; %vjerojatnost kiše
Ls=gama*p;
Ls =0.0019
ERPi=Pi+Gi-Li; %izračena snaga odašiljačke antene interogatora
ERPi =90.4100
x=log10(d);
Pt=ERPi-(Ls.*d)-(20*x)-98.05;% snaga na prijamničkoj anteni transpondera u dBm
Pt =-54.0454
```

## Prilog 4

Pt=54; %snaga odašiljačke antene transpondera u dBm

Gt=0; %dobitak odašiljačke antene transpondera

ft=1.090e9; %radna frekvencija. transpondera u Hz

d=200\*1852; %udaljenost prijarnik-odašiljač u m

Lt=1; %gubitak prijenosa signala unutar sustava transpondera u dB

lambda=c/ft;

ERPt=Pt+Gt-Lt; %izračena snaga odašiljačke antene transpondera

Pi=ERPt+20\*log10(lambda/(4\*pi\*d));

Pi=-91.5637

## Prilog 5

```
>>Pt=54.00; %snaga odašiljačke antene transpondera u dBm
Gt=0; %Dobitak odašiljačke transpondera u dBi
ft=1.090; % radna frekvencija transpondera u GHz
d=200.00; %udaljenost prijarnik-odašiljač u NM
Lt=1.00; %gubitak prijenosa signala unutar sustava transpondera u dB
R=1.25; %jačina kiše u mm/h
a=6.39*0.00001.*(ft^(2.03));
a =7.6116e-05
b=0.851*(ft^0.158);
b =0.8627
gama=a*(R^b);% gušenje po jedinici duljine jačine kiše R
gama =9.2274e-05
p=1.00; %vjerojatnost kiše
Ls=gama*p;
>> Ls
Ls =9.2274e-05
x=log10(d);
ERPt=Pt+Gt-Lt; %izračena snaga odašiljačke antene transpondera
ERPt =53
Pi=ERPt-(Ls*d)-(20*x)-98.54;% snaga na prijarničkoj anteni interogatora u dBm
Pi =-91.5791
```



## Prilog 6

```
>> Pt=54.00; %snaga odašiljačke antene transpondera u dBm
Gt=0; %Dobitak odašiljačke transpondera u dBi
ft=1.090; % radna frekvencija transpondera u GHz
d=200.00; %udaljenost prijarnik-odašiljač u NM
Lt=1.00; %gubitak prijenosa signala unutar sustava transpondera u dB
R=50; %jačina kiše u mm/h
a=6.39*0.00001.*(ft^(2.03));
a =7.6116e-05
b=0.851*(ft^0.158);
b =0.8627
gama=a*(R^b);% gušenje po jedinici duljine jačine kiše R
gama =0.0022
p=1.00; %vjerojatnost kiše
Ls=gama*p;
Ls =0.0022
x=log10(d);
ERPt=Pt+Gt-Lt; %izračena snaga odašiljačke antene transpondera
ERPt =53
Pi=ERPt-(Ls*d)-(20*x)-98.54;% snaga na prijarničkoj anteni interogatora u dBm
Pi =-92.0054
```

## Prilog 7

```
Snaga_kise=[0,1.25,50];
Pt=[-53.6619,-53.677,-54.0454];
Pi=[-91.5637,-91.579,-92.0054];
figure
plot(Snaga_kise,Pt,'-bd',Snaga_kise,Pi,'-rd')
axis ([0 50 -95 0])
title('Ovisnost Pt/ Pi o jačini kiše')
xlabel('jačina kiše [mm/h]')
ylabel('ulazna snaga [dBm]')
legend('Pt','Pi')
axis equal
```



Sveučilište u Zagrebu  
Fakultet prometnih znanosti  
10000 Zagreb  
Vukelićeva 4

## IZJAVA O AKADEMSKOJ ČESTITOSTI I SUGLASNOST

Izjavljujem i svojim potpisom potvrđujem kako je ovaj \_\_\_\_\_ završni rad

isključivo rezultat mog vlastitog rada koji se temelji na mojim istraživanjima i oslanja se na objavljenu literaturu što pokazuju korištene bilješke i bibliografija.

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

Izjavljujem također, kako 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 rada  
pod naslovom **Proračun operativnih parametara sekundarnog nadzornog radara**

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

U Zagrebu, \_\_\_\_\_ 5.9.2019. \_\_\_\_\_

Student/ica:

*Kristina Jambrić*  
\_\_\_\_\_  
(potpis)