

# Maketa automatskog sustava za blisku obranu štićene platforme

---

**Hodak, Filip**

**Undergraduate thesis / Završni rad**

**2024**

*Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:* **University of Zagreb, Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture / Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje**

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:235:585023>

*Rights / Prava:* [Attribution 3.0 Unported/Imenovanje 3.0](#)

*Download date / Datum preuzimanja:* **2025-02-07**

*Repository / Repozitorij:*

[Repository of Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture University of Zagreb](#)



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# ZAVRŠNI RAD

**Filip Hodak**

Zagreb, 2024 godina.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# ZAVRŠNI RAD

Mentori:

Prof. dr. sc. Danijel Pavković, dipl. ing.

Student:

Filip Hodak

Zagreb, 2024 godina.

Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno koristeći znanja stečena tijekom studija i navedenu literaturu.

Zahvaljujem se profesoru i mentoru Danijelu Pavkoviću koji mi je proširio znanje o mikroupravljačima i senzoricima koje me je potaklo da izradim maketu autonomnog obrambenog sustava i istražim njihovu primjenu u vojnoj industriji.

Filip Hodak



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite  
Povjerenstvo za završne i diplomske ispite studija strojarstva za smjerove:  
proizvodno inženjerstvo, računalno inženjerstvo, industrijsko inženjerstvo i menadžment, inženjerstvo  
materijala i mehatronika i robotika

Sveučilište u Zagrebu	
Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa: 602 – 04 / 24 – 06 / 1	
Ur.broj: 15 – 24 –	

## ZAVRŠNI ZADATAK

Student: **Filip Hodak** JMBAG: **0035232644**

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Maketa automatskog sustava za blisku obranu štice platforme**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Model of an automated system for close-in defense of a protected platform**

Opis zadatka:

U proteklih nekoliko desetljeća naglo je ubrzan razvoj potpuno automatiziranih sustava za blisku obranu (engl. Point Defense System ili Close-in Weapon System, CIWS) namijenjenih za automatsku detekciju i praćenje pokretnih meta i njihovu neutralizaciju prije nego se uspiju približiti štice platformi. Automatski sustavi za blisku obranu temelje se na sinergiji više područja tehnike, kao što su servosustavi visoke preciznosti, napredni senzorski sustavi te napredni sustavi upravljanja i praćenja mete. U ovom radu potrebno je:

1. Napraviti pregled postojećih automatiziranih sustava za blisku obranu kao što su na primjer Phalanx, Goalkeeper, DARDO, Kashtan, Millenium i slični drugi sustavi.
2. Za navedene sustave odrediti vrste senzorskih sustava koji se koriste za praćenje pokretne mete, kao i performanse samih sustava (vrsta naoružanja i brzina paljbe, brzina praćenja, vjerojatnost pogotka).
3. Osmisliti vlastiti sustav za detekciju bliskih meta primjenom odgovarajućih senzora (na primjer kamere, LIDAR i sl.) i koncipirati umanjenu maketu sustava za automatsko praćenje i eliminaciju mete.
4. Izraditi umanjenu maketu automatskog sustava za blisku obranu integracijom sustava za praćenje mete i sustava za izbacivanje kuglice pomoću stlačenog zraka, primjenom upravljačke platforme zasnovane na mikrokontroleru odgovarajuće procesorske snage.
5. Razviti odgovarajuću programsku podršku za odabrani mikrokontrolerski sustav i ispitati rad makete u laboratorijskim uvjetima.
6. Dati zaključke rada i predložiti pravce za buduće istraživanje i razvoj.

U radu je također potrebno navesti korištenu literaturu i eventualno dobivenu pomoć.

Zadatak zadan:

30. 11. 2023.

Zadatak zadao:

Prof. dr. sc. Danijel Pavković

*Danijel Pavković*

Datum predaje rada:

1. rok: 22. i 23. 2. 2024.  
2. rok (izvanredni): 11. 7. 2024.  
3. rok: 19. i 20. 9. 2024.

Predviđeni datumi obrane:

1. rok: 26. 2. – 1. 3. 2024.  
2. rok (izvanredni): 15. 7. 2024.  
3. rok: 23. 9. – 27. 9. 2024.

Predsjednik Povjerenstva:

*Damir Godec*  
Prof. dr. sc. Damir Godec

## SADRŽAJ

SADRŽAJ .....	I
POPIS SLIKA .....	III
POPIS TABLICA .....	V
POPIS OZNAKA .....	VI
SAŽETAK .....	VII
SUMMARY .....	VIII
1. Uvod: automatski sustavi za blisku obranu .....	1
1.1. Primjer rada sustava Goalkeeper [2][3] .....	2
1.1.1. Radarski sustav za pronalaženje prijatelja .....	2
1.1.1.1. Prepoznavanje neprijatelja .....	2
1.1.2. Radarski sustav za praćenje prijatelja .....	3
1.2. Razlike između obrambenih sustava .....	4
2. Radarski sustavi .....	5
2.1. Povijest .....	5
2.2. Građa radara .....	5
2.3. Načelo rada .....	6
2.3.1. Mjerenje udaljenosti .....	7
2.3.2. Mjerenje brzine .....	8
2.3.3. Mjerenje ubrzanja .....	9
2.3.4. Mjerenje veličine .....	10
2.4. Frekvencije radarskih sustava .....	11
2.5. Vrste i oblici antena .....	12
2.6. Šum i smetnje .....	13
2.6.1. Šum .....	14
2.6.2. Smetnje uzrokovane terenom, tlom i objektima na tlu .....	17
2.6.3. Smetnje uzrokovane morskom površinom .....	19
2.6.4. Smetnje uzrokovane pticama .....	19
2.7. Umjetni načini ometanja radarskih očitavanja .....	20
2.7.1. Dipolni reflektori .....	20
2.7.2. Aktivni ometači radara .....	21
2.8. Pravac razvoja radarskih sustava .....	22
3. Izrada makete .....	23
3.1. Koncept „Stražarnice“ .....	23
3.2. Lociranje objekata pomoću 2D LIDAR-a .....	24
3.2.1. Komunikacija sa senzorom .....	25
3.2.2. Način pohranjivanja podataka i rezolucija mjerenja .....	28
3.2.3. Definicija početnog stanja prostorije .....	29
3.2.4. „Test stabilnosti“ .....	30
3.2.5. Detekcija „stranih“ objekata .....	32
3.2.6. Filtriranje smetnji .....	33
3.2.7. Pronalazak težišta predmeta .....	34

---

3.3. Ciljanje predmeta pomoću koračnog motora .....	36
3.3.1. Pozicioniranje i upravljanje brzinom koračnog motora .....	37
3.3.2. Postavljanje koordinatnog sustava koračnog motora .....	39
3.4. Bežično upravljanje pomoću bluetooth-a.....	41
3.5. Upravljački uređaj “Stražarnice” .....	41
3.6. Performansa „Stražarnice“ .....	43
4. Zaključak .....	46

**POPIS SLIKA**

Slika 1	Kupola obrambenog sustava Phalanx (lijevo) i Goalkeeper (desno) .....	1
Slika 2	Radarski sustav za pronalaženje prijetnji .....	2
Slika 3	Prepoznavanje neprijatelja (IFF) .....	2
Slika 4	Radarski sustav za praćenje prijetnji .....	3
Slika 5	Ilustracija stanice „Chain Home“ sustava i njegovo pokriće obale.....	5
Slika 6	Pojednostavljeni blok dijagram građe radara .....	6
Slika 7	(a) Monostatički radar i (b) Bistatički radar .....	6
Slika 8	Dijagram operacije monostatičkog radara .....	7
Slika 9	Mjerenje udaljenosti radarom .....	7
Slika 10	Utjecaj relativne brzine objekta na frekvenciju signala (Dopplerov pomak).....	8
Slika 11	Reflektirani signal pri tangencionalnom gibanju .....	9
Slika 12	Utjecaj relativnog ubrzanja objekta na frekvenciju signala.....	9
Slika 13	Energija povratnog signala veća kod većeg objekta.....	10
Slika 14	Energija povratnog signala veća kod manjeg objekta zbog orijentacije .....	10
Slika 15	Raspon frekvencija rezerviranih za radarske sustave .....	11
Slika 16	Izotropna i usmjerena antena .....	13
Slika 17	Dometi i oblici snopa radara različitih oblika „tanjura“ .....	13
Slika 18	Oblik signala na prijamniku (gore) i signal razdvojen na komponente (dolje).....	14
Slika 19	Filtracija šuma pomoću praga energije signala .....	15
Slika 20	Slučaj gdje je filtracija šuma pomoću praga energije signala loša .....	15
Slika 21	Koherentna integracija signala .....	16
Slika 22	Smetnje uzrokovane terenom, tlo i objektima na tlu .....	17
Slika 23	Filtracija smetnji terena prigušenjem energije signala .....	18
Slika 24	Smetnje uzrokovane valovima na morskoj površini .....	19
Slika 25	Britanski zrakoplov Lancaster raspršuje dipolne reflektore .....	20
Slika 26	Osljepljenje radara i izgled dipolnih reflektora .....	20
Slika 27	Očitanje radara na koji djeluje ometač .....	21
Slika 28	AESA radar na F/A-18E/F zrakoplovu .....	22
Slika 29	Ilustracija stacionarnog sustava kupole s topom („turret“) .....	23
Slika 30	YDLIDAR X4 .....	24
Slika 31	Brzina prijenosa podataka senzora YDLIDAR X4 .....	25
Slika 32	Ilustracija načina komunikacije YDLIDAR X4 senzora i upravljačkog uređaja ..	25
Slika 33	Lista osnovnih naredbi senzora YDLIDAR X4 .....	25
Slika 34	Veličina paketa YDLIDAR X4 senzora .....	26
Slika 35	Struktura jednog paketa Scan naredbe YDLIDAR X4 senzora .....	26
Slika 36	Dijagram toka raspakiravanja Scan paketa.....	27
Slika 37	Način pohranjivanja podataka i njihovo geometrijsko značenje.....	28
Slika 38	Polje točaka početnog stanja prostorijske .....	29
Slika 39	Polje točaka početnog stanja prostorijske i test stabilnosti .....	30
Slika 40	Dijagram toka definiranja početnog stanja prostorijske .....	31
Slika 41	Usporedba početnog i trenutnog stanja prostorijske .....	32
Slika 42	Točke (kutovi) na kojima je detektirana promjena izmjerene udaljenosti .....	33
Slika 43	Težište detektiranog stranog objekta .....	34
Slika 44	Dijagram toka detekcije stranog objekta .....	35
Slika 45	Izometrijski presjek koračnog motora i NEMA 17 koračni motor.....	36
Slika 46	EasyDriver A3967 driver za koračne motore .....	37
Slika 47	Vizualizacija dva PWM signala .....	38
Slika 48	Stanje Hall efekt senzora s obzirom na kut zakreta koračnog motora.....	39



---

Slika 49	Usklađivanje pozitivnog smjera vrtnje koračnog motora i senzora .....	40
Slika 50	HC 05 bluetooth modul .....	41
Slika 51	MEGA 2560 mikroupravljač .....	42
Slika 52	Prototip „Stožarnice“ .....	43
Slika 53	Ispis kutova na kojima je detektiran strani objekt .....	44
Slika 54	Usporedba promjene kuta zakreta pri praćenju objekta sa različitim udaljenostima .....	44
Slika 55	3D polje točaka sa algoritmom prepoznavanja objekata .....	46

---

**POPIS TABLICA**

Tablica 1	Primjeri automatskih sustava za obranu .....	1
Tablica 2	Usporedba automatskih obrambenih sustava .....	4
Tablica 3	Oznaka frekvencijskih pojaseva i njihova tipična primjena [15] .....	12
Tablica 4	Kut zakreta ovisno o broju koraka i režimu rada .....	38
Tablica 5	Usporedba odziva koračnog motora na PWM signale .....	38

---

**POPIS OZNAKA**

<b>Oznaka</b>	<b>Jedinica</b>	<b>Opis</b>
$R$	Hz	frekvencija odbijenog radiovala
$c$	m/s	brzina valova u mediju
$T$	s	vrijeme potrebno da se signal vrati do prijamnika
$f$	Hz	frekvencija izvora
$f_0$	Hz	frekvencija odbijenog radiovala
$v_r$	m/s	relativna brzina promatrača
$v_s$	m/s	relativna brzina izvora

---

**SAŽETAK**

U radu je razvijena i implementirana umanjena maketa potpuno automatiziranog sustava za blisku obranu (engl. Point Defense System) namijenjenog za automatsku detekciju i praćenje pokretnih meta i njihovu „neutralizaciju“. U radu je najprije napravljen pregled postojećih automatiziranih sustava za blisku obranu te je dan primjer sustava Goalkeeper. Nakon toga je definiran sustav za praćenje pokretne mete temeljen na LIDAR senzoru, kao i sustav za detekciju i praćenje bliskih meta. Na temelju navedenih specifikacija izrađena je umanjena maketu sustava za automatsko praćenje i razvijena je odgovarajuća programska podršku za odabrani mikrokontrolerski sustav te je rad makete ispitan u laboratorijskim uvjetima.

Ključne riječi: Maketa sustava, praćenje pokretne mete, LIDAR senzor, mikrokontroler

---

**SUMMARY**

In this bachelor's thesis a scaled-down model of a fully automated point defense system intended for automatic detection and tracking of moving targets and their "neutralization" has been developed and implemented. The thesis first reviews the existing automated systems for close defense and gives an example of the Goalkeeper system. After that, a system for tracking a moving target based on a LIDAR sensor was defined, as well as a system for detecting and tracking close targets. Based on the above specifications, a scaled-down model of the automatic monitoring system was created, and appropriate software support was developed for the selected microcontroller system, and the model's operation was tested in laboratory conditions.

Keywords: System model, moving target tracking, LIDAR sensor, microcontroller

## 1. Uvod: automatski sustavi za blisku obranu

Obrana od prijetnji u vojnom smislu može se klasificirati kao mekana i tvrda [1]. Mekana obrana uključuje sve ne destruktivne načine obrane od prijetnji. Npr. elektronička djelovanja kojima se pokušava onemogućiti daljinsko upravljanje besposadnih (bespilotnih) letjelica ometajući radio komunikaciju između letjelice i posade koja njome upravlja. U slučajevima kada meka obrana nije moguća kao jedina efektivna alternativa preostaje tvrda obrana koja podrazumijeva uništenje prijetnji kao što su letjelice ili ispaljeni projektili. Zadatak tvrde obrane vrše automatski sustavi za blisku obranu (engl. close-in weapon systems) [Slika 1]. Njihov zadatak je obrana ključne infrastrukture, gusto naseljenih područja i skupih objekata kao što su vojni brodovi i nosači zrakoplova.



Slika 1 Kupola obrambenog sustava Phalanx (lijevo) i Goalkeeper (desno)

Sustav automatske obrane čini kombinacija radara, računala, algoritama i topova smještenih na rotirajućoj kupoli. Većina sustava su topnički ali postoje i raketni sustavi. Postoji puno varijanti sustava koje su razvijene od strane najvećih vojnih industrija [Tablica 1].

Tablica 1 Primjeri automatskih sustava za obranu

Vojna industrija	Naziv sustava
Američka	Phalanx
Kineska	Type 730
Ruska	Kashtan
Nizozemska	Goalkeeper
Talijanska	DARDO

## 1.1. Primjer rada sustava Goalkeeper

### 1.1.1. Radarski sustav za pronalaženje prijetnji

Prvi radarski sustav služi za pronalaženje prijetnji (engl. search radar) [Slika 2] [2] [3]. Njegov je domet 13 km i radi na I pojasu frekvencija (8-10 GHz).



Slika 2 Radarski sustav za pronalaženje prijetnji

#### 1.1.1.1. Prepoznavanje neprijatelja

Sustav ima funkcionalnost prepoznavanja neprijatelja (engl. identify friend or foe - IFF) [4]. Kada radarski sustav za pronalaženje prijetnji detektira objekt on pošalje ispitivački signal. „Prijateljski“ objekti opremljeni sa „transponderom“ koji čeka ispitivački signal te šalje signal odgovora koji potvrđuje njegov status „prijatelja“ [Slika 3].



Slika 3 Prepoznavanje neprijatelja (IFF)

U slučaju ako detektirani objekt ne odgovori ili odgovori krivo na ispitivački signal on se smatra kao prijetnja. Ako se detektira više prijetnji sustav je opremljen sa algoritmom koji prioritizira najveću prijetnju.

### 1.1.2. Radarski sustav za praćenje prijetnji

Nakon što su detektirani objekti označeni kao prijetnja, drugi radarski sustav, sustav za praćenje prijetnji (engl. tracking radar) [Slika 4] kreće pratiti prijetnju koja ima najviši prioritet. Njegov domet je manji od radara za pronalaženje prijetnji te iznosi 6.5 km.

Radarski sustav za praćenje prijetnji radi na I i K pojasu frekvencija (8-10 GHz i 20-40 GHz) radi bolje otpornosti na ometanja.



**Slika 4 Radarski sustav za praćenje prijetnji**

Radarski sustav za praćenje mjeri udaljenost, brzinu i akceleraciju projektila te predviđa putanju kojom će se on kretati.

Kupola se brzo okreće prema prijetnji najvišeg prioriteta pomoću servomotora snage 58kW te topovi pucaju na predviđeno mjesto dolaska projektila koje se nalazi u dometu od 3500 m . Topovi ispaljuju 4200 metaka/minuti koji se prilikom pogotka rasprskavaju čime stvaraju polje krhotina kako bi se maksimizirala šteta prijetnji.



## 1.2. Razlike između obrambenih sustava

Princip rada svih automatskih sustava za blisku obranu je sličan. Rad tih sustava sastoji se od detekcije, praćenja i neutraliziranja prijetnje. Razlike u tim sustavima ne javljaju se u generalnom principu rada nego u učinkovitosti cijelog sustava, gdje i najmanji detalji igraju ulogu. Metrike po kojima se ti sustavi razlikuju su sljedeće: domet prepoznavanja prijetnje, kvaliteta senzorskih očitavanja, točnost prikupljenih podataka o prijetnji, točnost algoritama koji donose zaključak o kakvoj vrsti prijetnje se radi, brzina djelovanja obrambenih topova, preciznost pozicioniranja topova, učinkovitost municije itd.

**Tablica 2 Usporedba automatskih obrambenih sustava**

Naziv sustava	Phalanx [5]	Type 730 [7]	Kashtan [6]	Goalkeeper	DARDO [8]
<b>Masa [kg]</b>	6 200	9 800	15 500	9 902	5 500
<b>Senzorski sustav</b>	Radarski	Radarski, optički	Radarski	Radarski	Radarski
<b>Vrsta naoružanja</b>	Gatlingov mitraljez	Gatlingov mitraljez	Gatlingov mitraljez	Gatlingov mitraljez	Automatski protuzračni top
<b>Domet [m]</b>	2 000	3 000	5 000	3 500	4 000
<b>Kalibar [mm]</b>	20	30	30	30	40
<b>Brzina paljbe [metaka/min]</b>	4 500	5 800	5 000	4 200	900
<b>Raspon kutova djelovanja po elevaciji</b>	-25° - +85°	-25° -85°	-	-25° - +85°	-13° - +85°
<b>Brzina rotacije topa po elevaciji [°/s]</b>	115	100	50	100	60
<b>Brzina rotacije topa po azimutu [°/s]</b>	115	100	70	100	90

Senzori su postali neizbježni dio suvremenog ratovanja. Oni pružaju vojsci kritične informacije o okruženju, omogućujući joj da donosi brze i precizne odluke. Uloga senzora u automatskim sustavima za blisku obranu je primarno detekcija i praćenje mete. Kod pokretne mete koja se kreće brzinom više stotina kilometara na sat važan je domet i brzina mjerenja. Budući da se upravlja sa oružjem koje ima potencijala nanijeti veliku štetu važna je otpornost na smetnje i ispravan rad u svim vremenskim uvjetima kako bi se izbjegla lažna okidanja. Radarska tehnologija razvija se još od početka 2. svjetskog rata, od kada je radarska tehnologija imala vremena „sazrijeti“. Iz tog razloga najkorišteniji senzori za detekciju i praćenje su radari.

## 2. Radarski sustavi

### 2.1. Povijest

Ratne situacije su neizvjesne, obilježene su nedostatkom potpunih, točnih informacija i zbrkom koja je uobičajena u svakom sukobu. Radar je jedan od uređaja koji može pružiti ključne informacije kako bi se smanjila neizvjesnost rata i omogućilo donošenje boljih strateških odluka. Originalna primjena radara bila je u sprječavanju sudara brodova, no široka upotreba radarske tehnologije započela je tijekom Drugog svjetskog rata. Mnogi povjesničari tvrde da je „Bitka za Britaniju“ dobivena zbog tehnologije radara [9]. Radarske stanice bile su raspršene po cijeloj obali Velike Britanije kako bi detektirali Njemačke zrakoplove stotine kilometara prije nego što su došli do obale [Slika 5] [10].

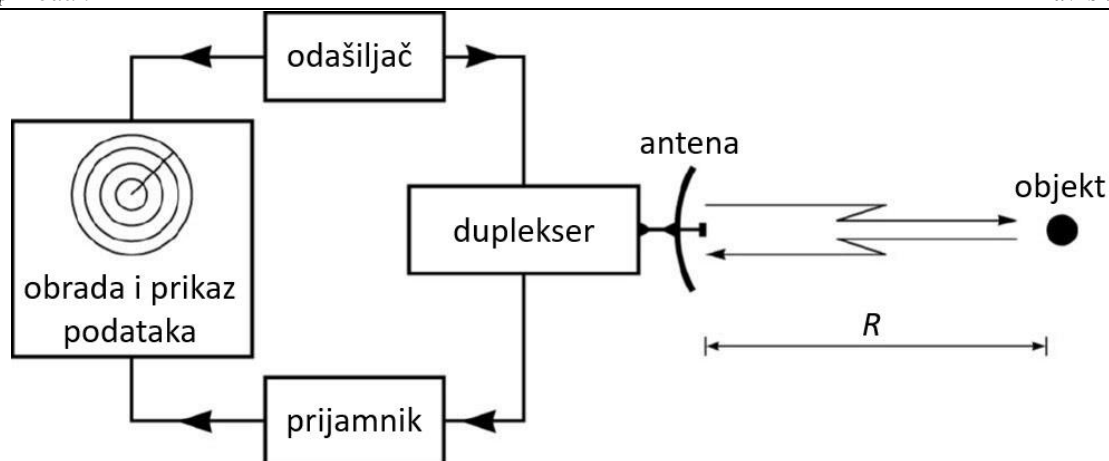


**Slika 5** Ilustracija stanice „Chain Home“ sustava i njegovo pokriće obale

Informacije kao što su udaljenost, smjer i veličina flote Njemačkih zrakoplova pomogle su Britanskim zračnim snagama koje su bile drastično nadjačane pobijediti sukob.

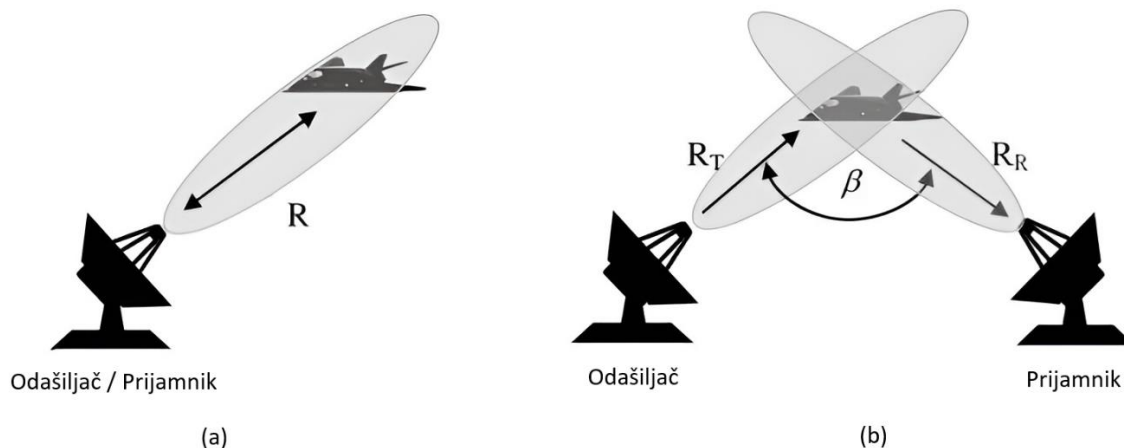
### 2.2. Građa radara

Radar se sastoji od antene, radioodašiljača, radioprijamnika i računala za obradu i prikaz podataka [Slika 6] [11]. Odašiljač i prijamnik mogu se nalaziti na istome mjestu, odvojeni tzv. duplexerom, koji im omogućuje da se ista antena rabi za odašiljanje i prijam elektromagnetskih valova; takav se radar naziva monostatičkim [Slika 7 (a)].



Slika 6 Pojednostavljeni blok dijagram građe radara

Ako su odašiljač i prijamnik postavljeni na različitim mjestima i imaju zasebne antene, radar je bistatički [Slika 7 (b)], odn. multistatički ako ima više odašiljača i prijarnika. Danas su radari većinom monostatički, ali se specifično u vojnoj industriji i dalje često koriste bistatički i multistatički radari.

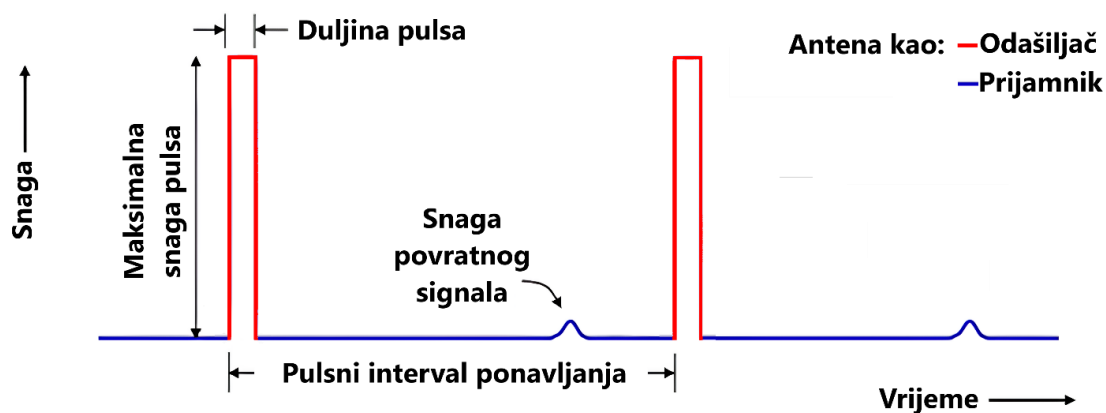


Slika 7 (a) Monostatički radar i (b) Bistatički radar

### 2.3. Načelo rada

RADAR je kratica koja dolazi od engleskog izraza Radio Detection And Ranging. U prijevodu, to znači radio detekcija i određivanje daljine. Radar radi tako da odašilje radiovalove (impulsno ili kontinuirano) i zatim „osluškuje“ povratne valove (odjek) [Slika 8]. Kada radio val udari u objekt, dio se reflektira natrag prema izvoru (odnosno radarskom prijarniku). Poznavanjem brzine radio valova i mjerenjem koliko je vremena potrebno da se radio val vrati, može se izračunati udaljenost, azimut, elevacija, brzina, ubrzanje i veličina objekta.

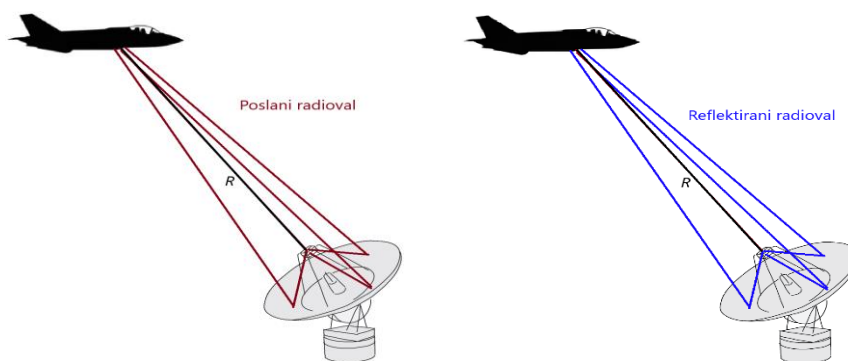
Pulsni interval ponavljanja (engl. pulse repetition interval) je vremenski razmak između dva uzastopna radarska pulsa [12]. Njegovo vremensko trajanje namješta se ovisno o željenom dometu i brzini skeniranja.



Slika 8 Dijagram operacije monostatičkog radara

### 2.3.1. Mjerenje udaljenosti

Udaljenost objekta proporcionalna je vremenu koje je potrebno da se val vrati [Slika 9]. Azimut i elevacija objekta određuje se i ovisi o smjeru u kojem je radio val poslan zajedno sa izmjerenom udaljenosti.



Slika 9 Mjerenje udaljenosti radarom

$$R = \frac{c * T}{2}$$

gdje je:

$R$  – udaljenost između odašiljača i objekta

$c$  – brzina valova u mediju (npr. zraku)

$T$  – vrijeme potrebno da se signal vrati do prijavnika

### 2.3.2. Mjerenje brzine

Promjena opažene frekvencije valova pri relativnom gibanju izvora ili promatrača zove se Dopplerov pomak (engl. Doppler shift). Zamjećuje se kod svakoga valnoga gibanja kao povećanje, odnosno smanjenje frekvencije kada se izvor valova i promatrač međusobno približavaju, odnosno udaljavaju [Slika 10]. Umjesto frekvencije izvora  $f_0$ , opaža se frekvencija  $f$  koja je viša ili niža ovisno relativnom gibanju radara i objekta.

$$f = \left( \frac{c + v_r}{c - v_s} \right) f_0$$

gdje je:

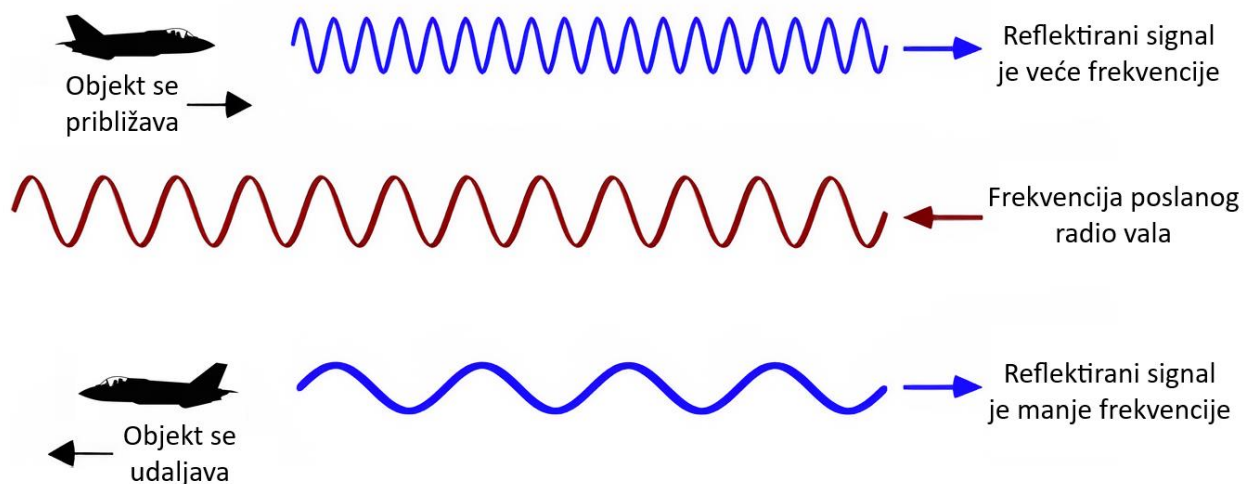
$f$  – frekvencija odbijenog radiovala

$f_0$  – frekvencija izvora

$c$  – brzina valova u mediju (npr. zraku)

$v_r$  – relativna brzina promatrača; pozitivna ako se promatrač približava prema izvoru (negativna za udaljavanje);

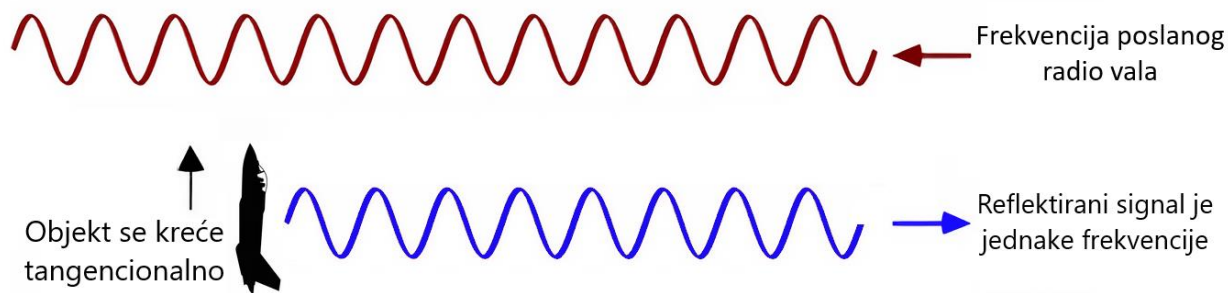
$v_s$  – relativna brzina izvora; pozitivna ako se izvor približava prema promatraču (negativna za udaljavanje).



Slika 10 Utjecaj relativne brzine objekta na frekvenciju signala (Dopplerov pomak)

Brzina objekta može se odrediti pomoću razlike između frekvencije poslanog radiovala i frekvencije reflektiranog radiovala. Promjena frekvencije signala ovisi o relativnoj brzini radara i objekta te se oba gibanja moraju uzeti u obzir kao i smjer njihovog gibanja.

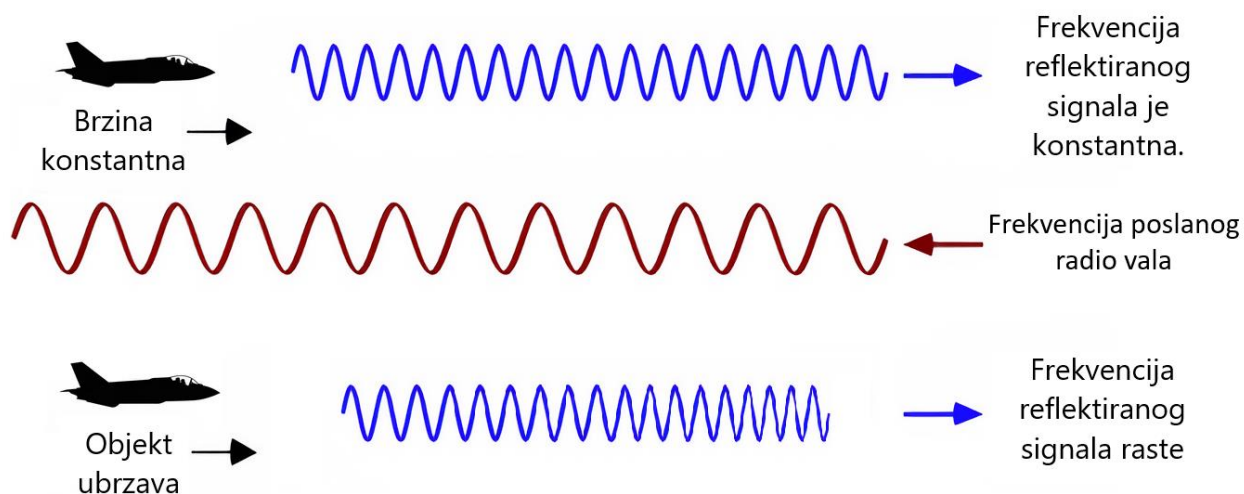
Ako je radar stacionaran, a objekt se giba tangencionalno s obzirom na radar, neće bit Dopplerovog pomaka odnosno objekt će se činiti kao da je stacionaran [Slika 11].



Slika 11 Reflektirani signal pri tangencionalnom gibanju

### 2.3.3. Mjerenje ubrzanja

Ubrzanje objekta općenito je definirano kao druga derivacija pomaka odnosno prva derivacija brzine. Pošto je brzina objekta definirana sa frekvencijom odbijenog signala, ubrzanje se može definirati kao brzina promjene frekvencije reflektiranog radio vala [Slika 12].

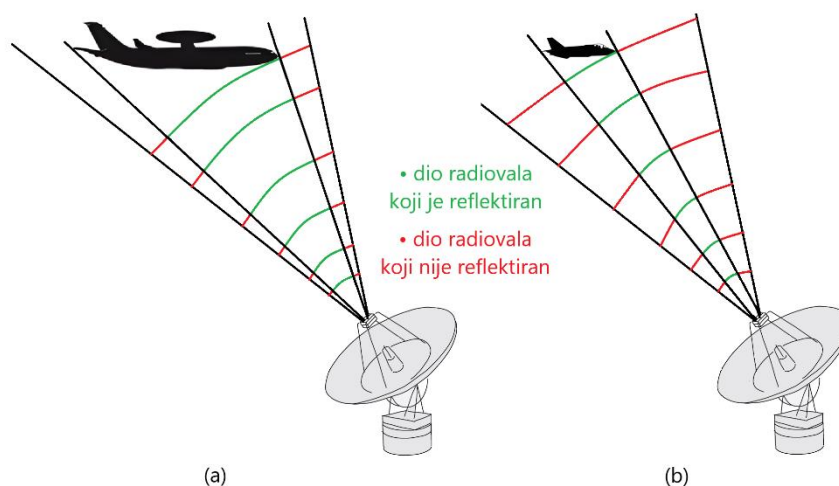


Slika 12 Utjecaj relativnog ubrzanja objekta na frekvenciju signala

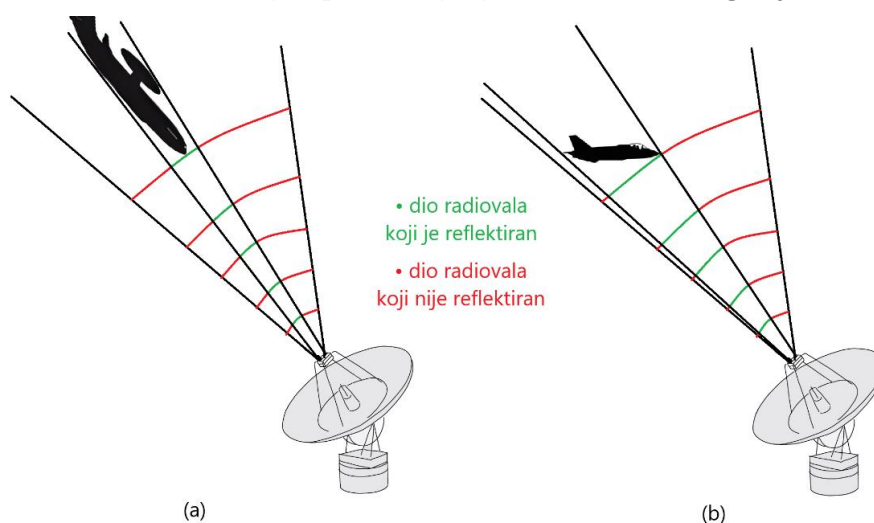
### 2.3.4. Mjerenje veličine

Kod radara povratna energija/snaga ovisi o nizu faktora kao što su frekvencija signala, geometrija objekta, materijal objekta, kut upada radiovala odnosno orijentacija objekta s obzirom na radar, površinskoj obradi objekta [13]... Kako bi se svi ti faktori uzeli u obzir i pojednostavio proračun, objektima se pridodaje svojstvo njihove „vidljivosti“ radaru te se to svojstvo zove Efektivna površina raspršenja mete (engl. Target radar cross section). Važno je naglasiti da je efektivna površina raspršenja mete inherentna karakteristika objekta te ona ne ovisi o udaljenosti.

Dakle, veličina detektiranog objekta može se procijeniti pomoću povratne energije/snage signala i širine snopa signala [Slika 13] ali ta informacija nije jednoznačna jer postoje situacije gdje to nije slučaj [Slika 14].



**Slika 13 Energija povratnog signala veća kod većeg objekta**

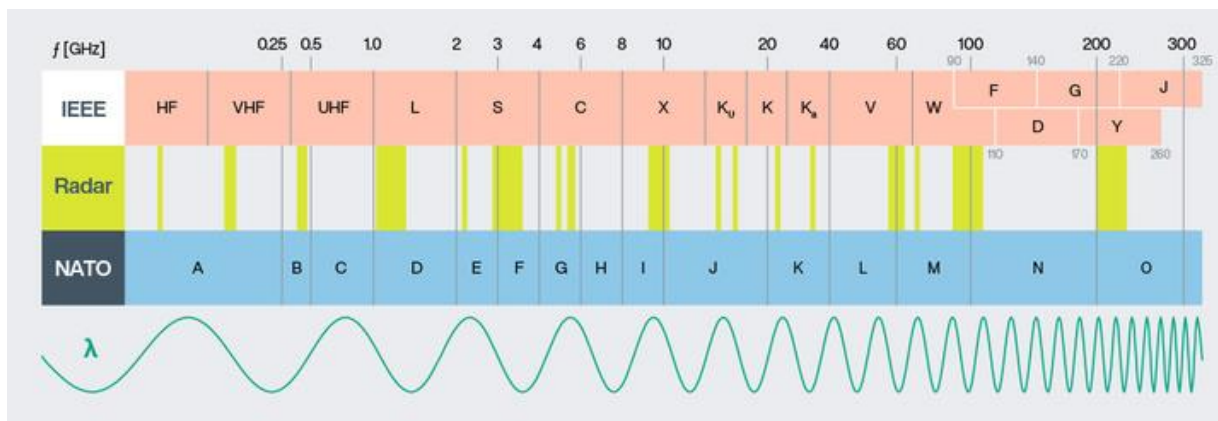


**Slika 14 Energija povratnog signala veća kod manjeg objekta zbog orijentacije**



## 2.4. Frekvencije radarskih sustava

Radari su u početku radili na spektru frekvencija radiovalova po čemu su i nazvani, ali moderniji radari većinom rade na mikrovalnom spektru frekvencija. Unatoč tome u daljnjem tekstu, radi konzistentnosti, koristiti će se izraz radioval iako se zapravo misli na mikroval. Radarski uređaji rade u različitim frekvencijskim i valnim pojasima [Slika 15] [13], koji imaju različita fizikalna svojstva i svaki pokriva određena područja primjene [Tablica 3]. U frekvencijskom rasponu od nekoliko stotina megaherca (MHz), radarski sustavi postižu velike domete detekcije. Radari za zračni nadzor i protuzračnu obranu, primjerice, rade u VHF pojasu (30 do 300 MHz). Moderni radari za nadzor zraka s velikim dometom detekcije rade čak i u frekvencijskom rasponu do dva gigaherca (GHz). C-pojas (4 do 8 GHz) koristi se za meteorološke radare i nadzor morske površine. Radio valovi u X-pojasu (8 do 12 GHz) nude visoku rezoluciju.



Slika 15 Raspon frekvencija rezerviranih za radarske sustave

Kako se frekvencija povećava, domet detekcije se smanjuje zbog prigušenja radiovalova u atmosferi. Iako se domet detekcije smanjuje moguća je veća razlučivost gdje je moguće odrediti i konturu objekta.

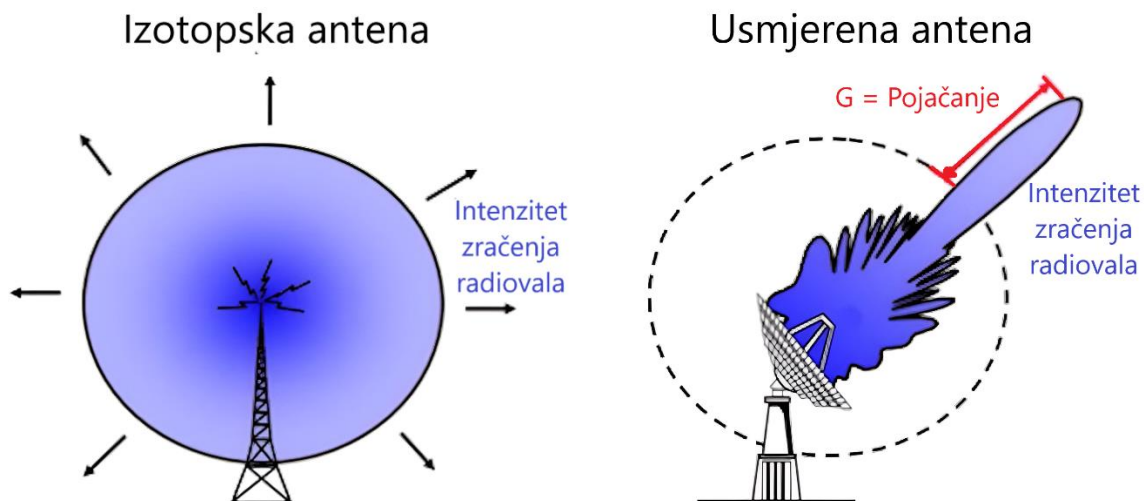


**Tablica 3 Oznaka frekvencijskih pojaseva i njihova tipična primjena [15]**

Oznaka pojasa	Spektar frekvencija	Tipična primjena
VHF	50-330 MHz	Nadzor na vrlo velikim udaljenostima
UHF	300-1,000 MHz	Nadzor na vrlo velikim udaljenostima
L	1-2 GHz	Nadzor na velikim udaljenostima, kontrola prometa na ruti
S	2-4 GHz	Nadzor na srednjim udaljenostima, aerodromska kontrola leta
C	4-8 GHz	Praćenje na velikim udaljenostima
X	8-12 GHz	Praćenje na malim udaljenostima, navođenje projektila, mapiranje, pomorski radar, presretanje zračnih meta
K <sub>u</sub>	12-18 GHz	Mapiranje viske rezolucije
K	18-27 GHz	Rijetko korišten (voda prigušuje signal)
K <sub>a</sub>	27-40 GHz	Mapiranje vrlo visoke rezolucije, nadzor zračne luke
>K <sub>a</sub>	40-100+ GHz	Rijetko korišten

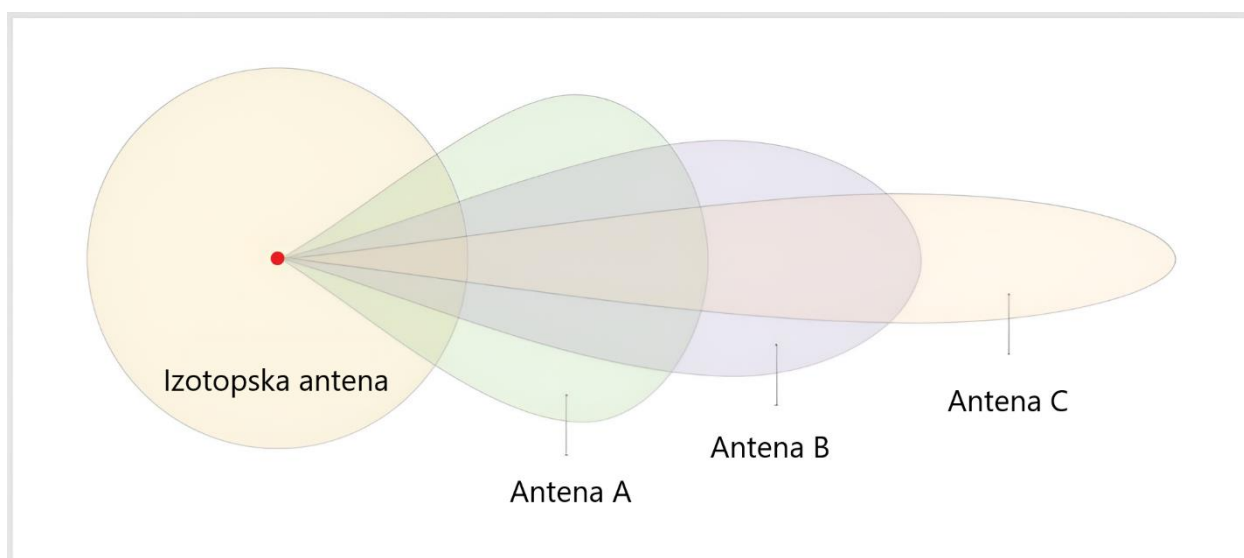
## 2.5. Vrste i oblici antena

Izotopska (omni-direkcijska) antena je najosnovniji oblik antene [Slika 16] [19]. Snaga poslanih radiovalova jednaka je u svakom smjeru oko odašiljača po čemu je ta antena dobila ime. Pošto su radiovalovi poslani u svim smjerovima njezin domet je kratak jer je poslana energija raspršena na jako velikom volumenu. Iako joj je domet kratak njeno je područje veliko. U praksi su puno češće korištene usmjerene antene koje imaju tzv. „tanjur“ koji svojom geometrijom usmjerava radiovalove u željenom smjeru. Time se u jednom smjeru dobije veća koncentracija energije radiovalova čime se poveća domet ali smanji područje [Slika 16].



Slika 16 Izotropska i usmjerena antena

Ovisno o geometriji „tanjura“ mogu se dobiti različiti dometi i oblici snopa [Slika 17] [17].



Slika 17 Dometi i oblici snopa radara različitih oblika „tanjura“

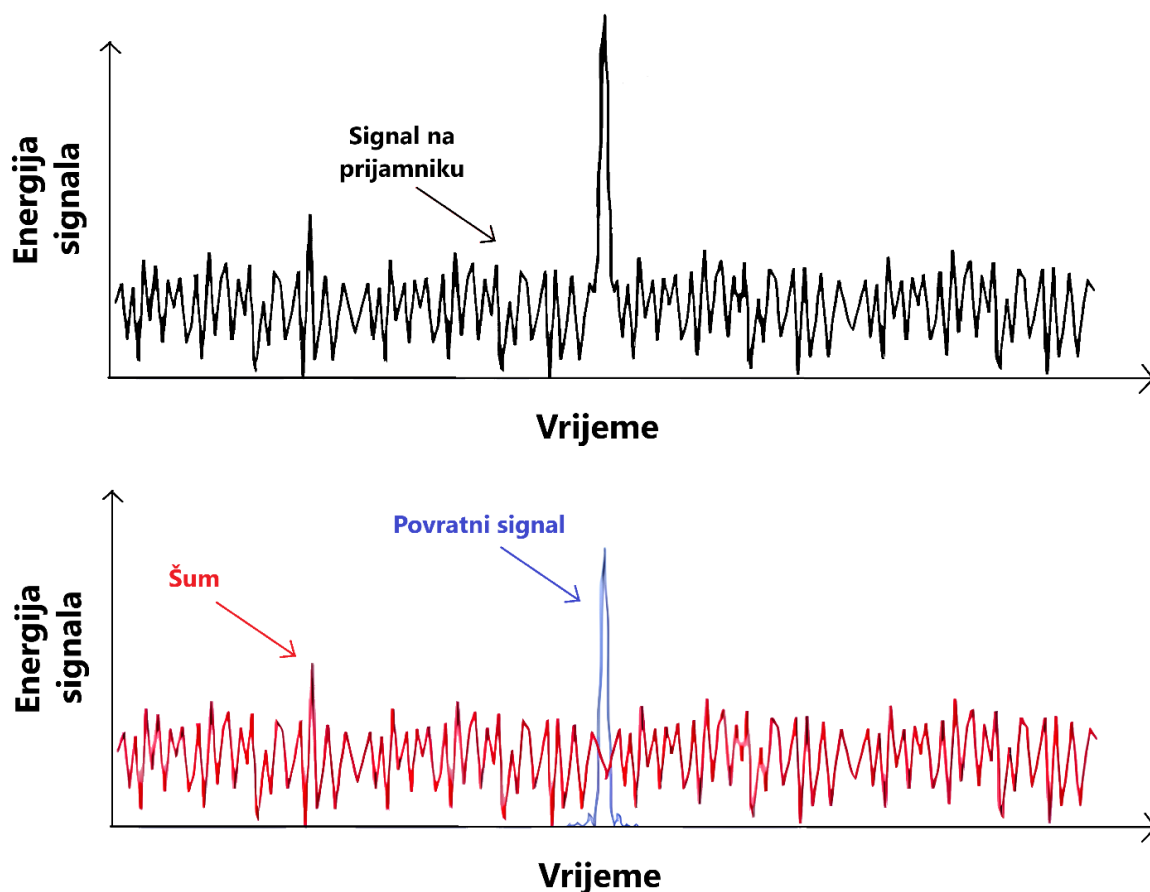
## 2.6. Šum i smetnje

Neželjeni signali u radarima općenito se opisuju kao šum i smetnja. Povratni signal sastoji se od: reflektiranog radiovala, šuma prijamnika, atmosferskog šuma, smetnji koje mogu biti uzrokovane drugim radarima ili ometačima radara te smetnji okoline. Postoji više izvora smetnji okoline: smetnje uzrokovane terenom i objektima na tlu, morskome površinom, prometom, kišom, pticama, insektima...

### 2.6.1. Šum

Šum je neželjeni električni signali koji se miješa s korisnim signalom koji antena prima [19]. Signal šuma je kaotičan po prirodi. Njegova energija se kreće oko neke srednje vrijednosti ali je njezin iznos nepredvidiv i sadrži širok raspon frekvencija [Slika 18]. Izvori šuma mogu biti:

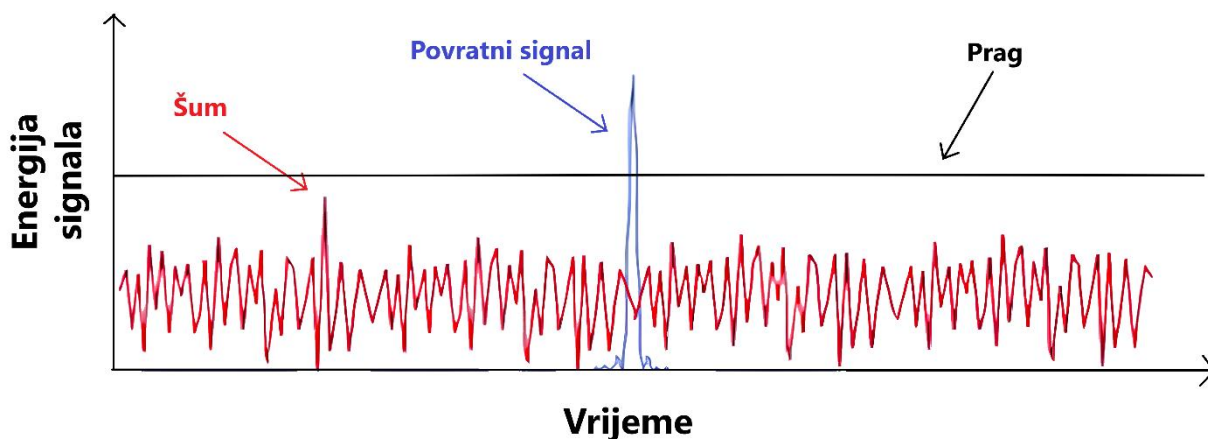
- Prirodni izvori
  - kozmičko zračenje – mikrovalni valovi koji dolaze iz svemira
  - toplinsko zračenje prijamnika – svako tijelo koje ima temperaturu iznad apsolutne nule emitira elektromagnetsko zračenje što doprinosi šumu
- Umjetni izvori
  - električni uređaji – radijski i televizijski uređaji, elektromotori, dalekovodi i drugi električni uređaji mogu stvarati elektromagnetsko zračenje
  - komunikacijski signali – signali drugih radio stanica, mobilnih telefona i drugih komunikacijskih uređaja mogu se miješati s željenim signalom.



Slika 18 Oblik signala na prijamniku (gore) i signal razdvojen na komponente (dolje)

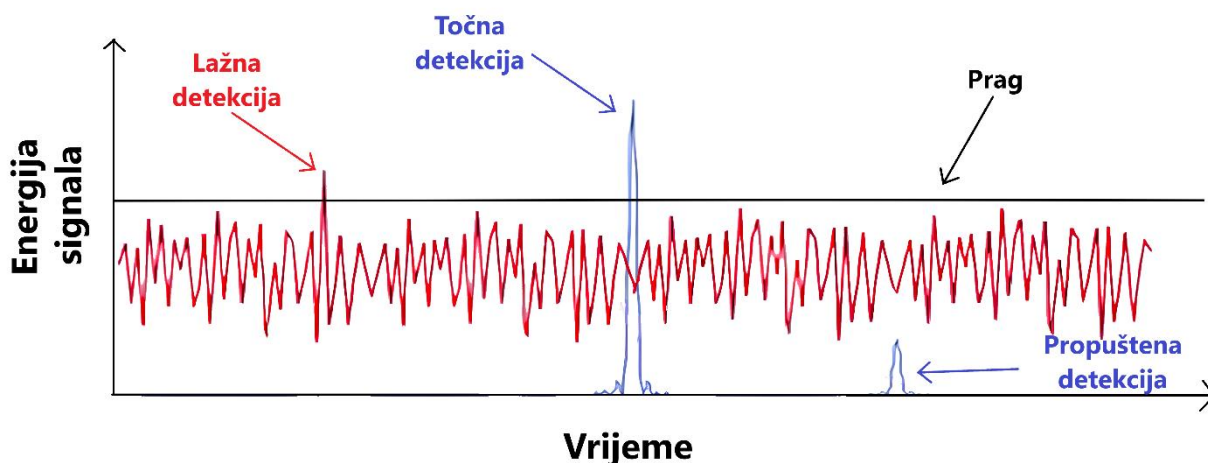
Omjer signala i šuma (engl. signal to noise ratio) važan je podatak koji daje generalnu informaciju o kvaliteti očitavanja i pojednostavljuje filtriranje šuma. Kako bi se šumovi mogli filtrirati poželjno je da omjer energije povratnog signala i energije šuma bude što veći; na taj način može se postaviti prag energije signala koji će filtrirati šumove [Slika 19]. Tipična vrijednost poželjnog omjera signala i šuma je 20 ili više.

$$SNR = \frac{\text{Energija povratnog signala}}{\text{Energija šuma}}$$



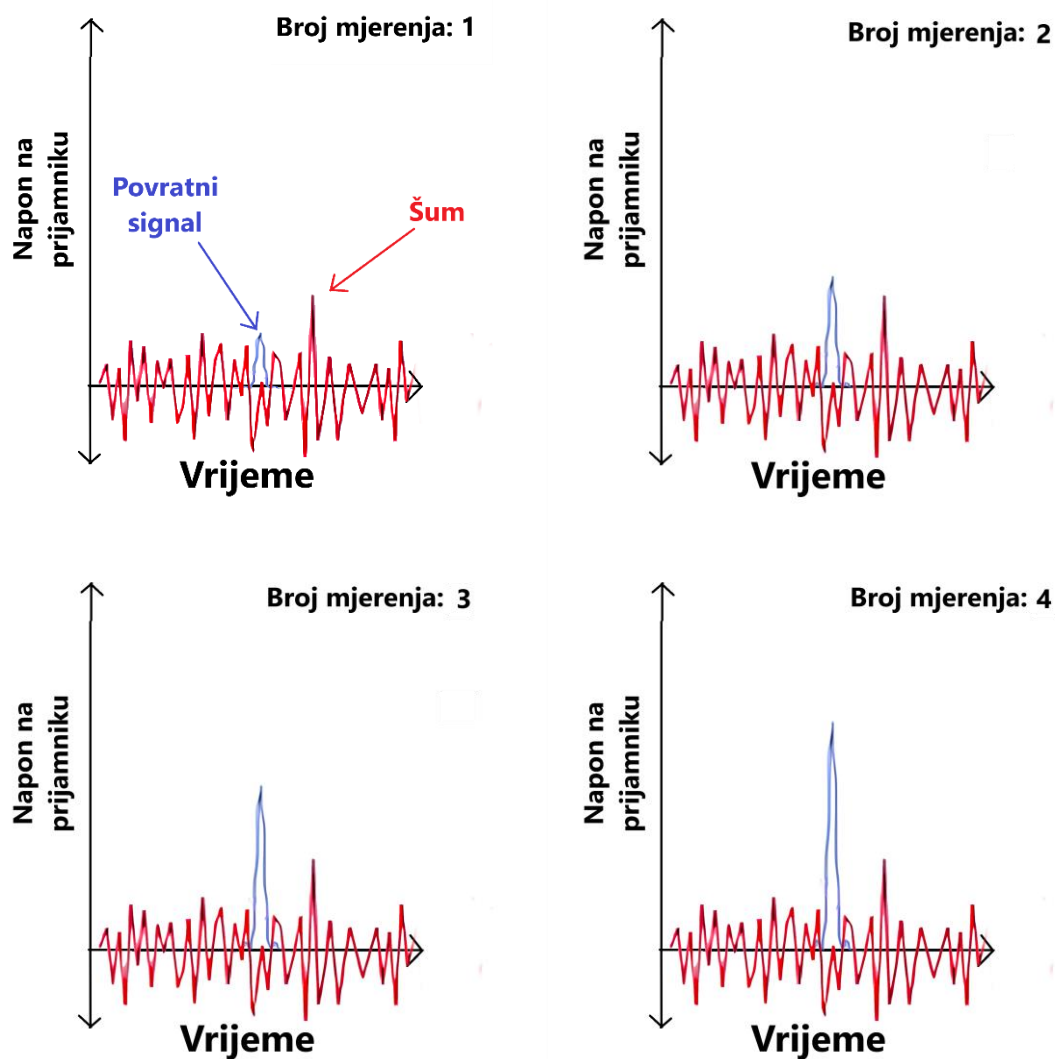
Slika 19 Filtracija šuma pomoću praga energije signala

Problem kod filtriranja šuma pomoću praga energije javlja se u slučajevima gdje je omjer signala i šuma malen. To su slučajevi gdje je energija povratnog signala slabija od energije šuma ili slučajevi gdje je energija šuma slična energiji povratnog signala [Slika 20].



Slika 20 Slučaj gdje je filtracija šuma pomoću praga energije signala loša

Kako bi se izbjegli slučajevi propuštenih signala i krive detekcije šuma, koristi se tehnika koherentne integracije [19]. Ideja je da se zbrajanjem više mjerenja može pojačati signal koji nije šum. To je zato što je signal detektiranog predmeta uvijek jednak tako da će jačina signala rasti linearno sa zbrajanjem njegovih vrijednosti dok će se šum, zbog njegove prirode promjenjive vrijednosti, poništiti svoje varijacije. Posljedično se događa pojačanje povratnog signala gdje je detektiran predmet [Slika 21].

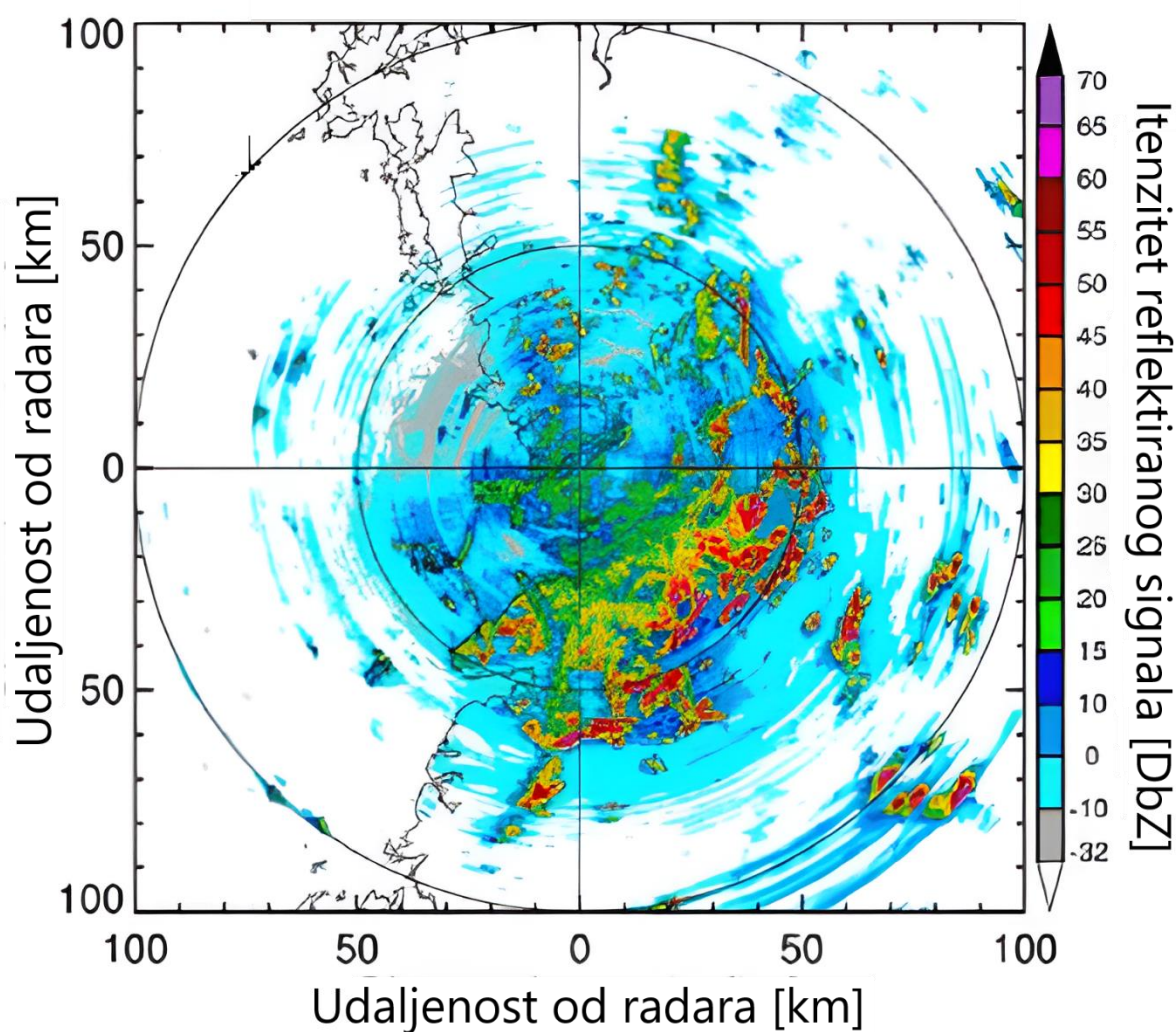


Slika 21 Koherentna integracija signala

### 2.6.2. Smetnje uzrokovane terenom, tlom i objektima na tlu

Očitavanje radara ovisi o nizu faktora te je jedan od njih područje u kojem on djeluje [20] [21]. Radar koji djeluje u planinskim i brežuljastim područjima imat će drugačija očitavanja od radara koji radi na ravnici.

Očitavanja kopnenih masa kao što su planine ili brežuljci, objekata na kopnu kao što su drveća ili zgrade te tla većinom su stacionarna. Veličina odbijenog signala također puno je veća od objekata kao što su avioni ili projektili. Iako su takvi signali veliki (pokrivaju širok snop kutova), njihova povratna energija je manja nego kod objekata interesa npr. aviona [Slika 22].



Slika 22 Smetnje uzrokovane terenom, , tlom i objektima na tlu

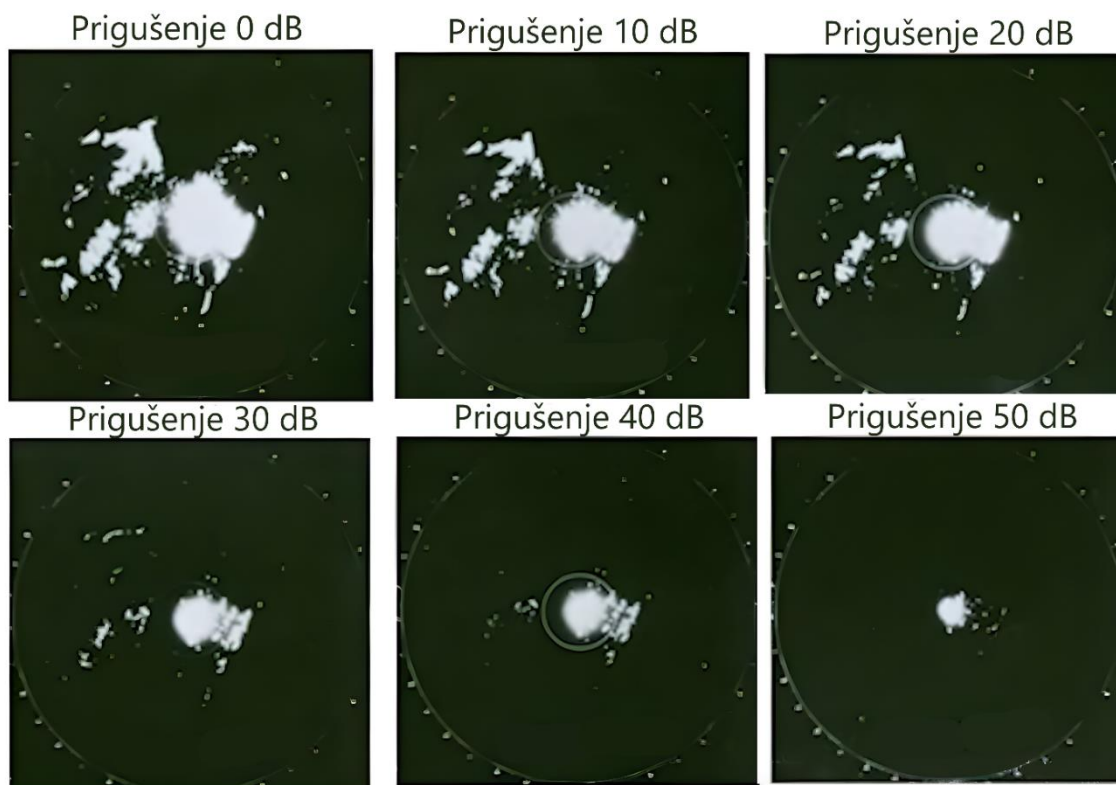


Uz navedene karakteristike smetnji uzrokovanih terenom, tlom i objektima na tlu može se osmisliti način kako ih filtrirati.

Jedna od tehnika filtriranja takvih smetnji je ignoriranje mjerenja koja nemaju brzinu odnosno nemaju Dopplerov pomak (frekvencija povratnog signala jednaka je emitiranoj). Problem se javlja u slučajevima vjetrovitog vremena gdje se drveće i lišće njiše. U tom bi se slučaju javio Dopplerov pomak i došlo bi do puno lažnih detekcija. Kako bi se to izbjeglo koristi se statistička analiza mjerenja gdje se donose zaključci koji su bazirani na više mjerenja.

Tehnika filtriranja smetnji koristeći se informacijom o njihovoj brzini ne mora se bazirati na Dopplerovom efektu nego se može bazirati i na izmjerenim udaljenostima. U slučajevima kada bi se na nekom kutu izmjerila ista udaljenost kao u prethodnima, element se ne bi uzeo u obzir. To je još jedan od načina statističke analize.

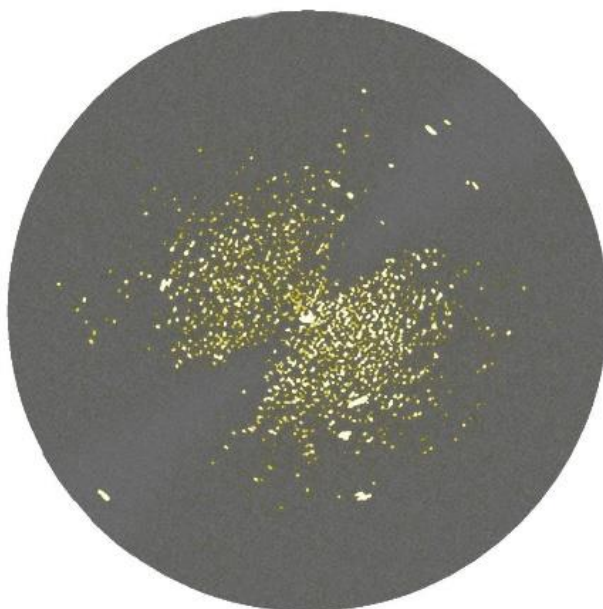
Filtracija se može vršiti i po jačini signala. Kako je navedeno reflektirani signali terena i tla manje su energije te se mogu filtrirati po energiji/snazi povratnog signala. To se vrši prigušenjem signala (engl. signal attenuation). Prigušenjem se smanjuje jačina signala te smetnje padaju ispod praga jačine signala koja će biti prikazana [Slika 23].



Slika 23 Filtracija smetnji terena prigušenjem energije signala

### 2.6.3. Smetnje uzrokovane morskom površinom

Morska površina, za razliku od tla, nije statična [20] [20]. Ovisno o vremenu, veličina i brzina valova je promjenjiva što će se u mjerenjima manifestirati kao Dopplerov pomak (engl. doppler shift) [Slika 24]. Voda i vodena para imaju karakteristiku velike apsorpcije radiovalova odnosno mikrovalova; na tom principu radi mikrovalna pećnica. Rezonantna frekvencija vodene molekule je oko 2.5 GHz te na tim frekvencijama velika većina energije/snage radiovala pretvara se u kinetičku energiju vodene molekule. Iz tog razloga energija/snaga reflektiranog radiovala je oko 100 puta (20 dB) manja nego energija reflektirana sa tla. Kod smetnji uzrokovanih morskom površinom najbolja opcija filtracije signala je filtracija po povratnoj energiji/snazi.



**Slika 24** Smetnje uzrokovane valovima na morskoj površini

### 2.6.4. Smetnje uzrokovane pticama

Ptice su također jedan od izvora smetnji, pogotovo u doba njihove migracije [22]. Jedna ptica relativno je mala tako da povratna energija signala koji se odbije od jednu pticu je relativno mala, ali problem se javlja u slučaju kada ptice lete u jatu. Ptice su također pokretne mete što znači da će se javiti Dopplerov pomak. Pošto je brzina ptica relativno mala u usporedbi sa zrakoplovima i projektilima, filtracija smetnji uzrokovana pticama vrši se pomoću postavljanja praga brzine koji je veći od brzine ptica, a manji od brzine zrakoplova.



## 2.7. Umjetni načini ometanja radarskih očitavanja

### 2.7.1. Dipolni reflektori

Ometanje radara također je u interesu neprijatelja. Jedan od načina ometanja radara je pomoću raspršivanja staklenih vlakana obloženih aluminijem (engl. military chaff) koji služe kao dipolni reflektori [Slika 25] [22] [23] [24]. Zbog materijala, dimenzija i oblika imaju veliku efektivnu površinu raspršenja (engl. radar cross section) koja zavara radar reflektirajući relativno veliku energiju signala nazad u prijemnik. Posljedica toga je privremeno osljepljenje radara na mjestu gdje je materijal raspršen zbog lažnih detekcija [Slika 26]. Raspršena vlakna mogu lebdjeti u zraku od 10 minuta do čak par sati zbog jako male mase, za to vrijeme stignu se raspršiti na puno veće područje od početnog.



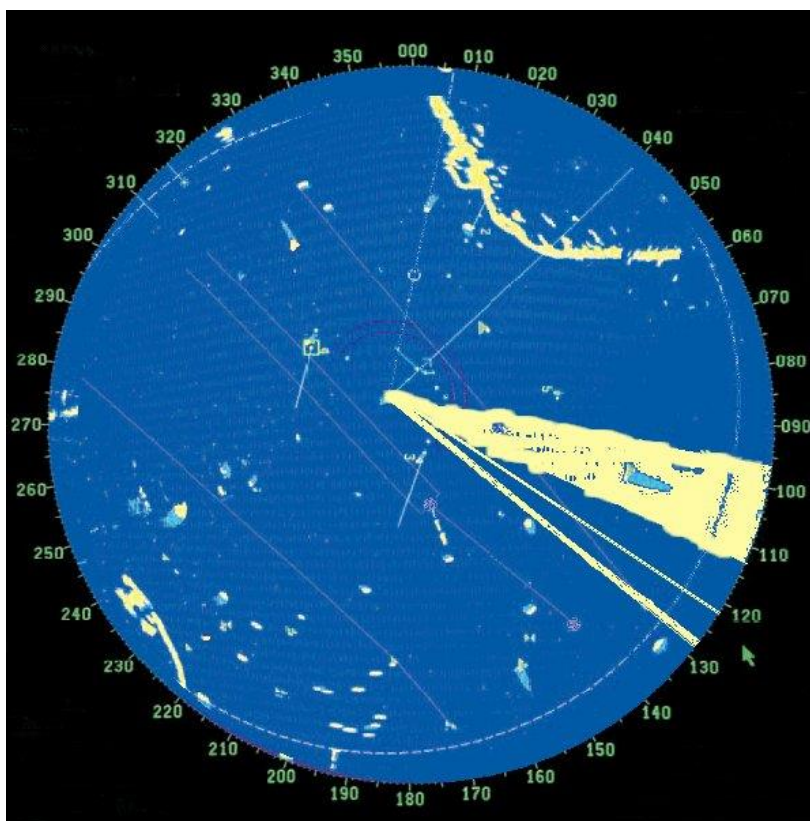
Slika 25 Britanski zrakoplov Lancaster raspršuje dipolne reflektore



Slika 26 Osljepljenje radara i izgled dipolnih reflektora

### 2.7.2. Aktivni ometači radara

Aktivni ometači radara (engl. radar jammers) su elektronički uređaji koji emitiraju signale na frekvenciji radara koji stvaraju šum dovoljno velike energije da prevlada sama očitavanja radara [25]. Ometači radara neće prikriti informaciju njihove pozicije ali će prikriti informaciju njihove udaljenosti zbog kontinuiranog emitiranja signala [Slika 27]. Postoje varijante koje imaju kašnjenja u emitiranju signala kako bi zavarali radar da se predmet nalazi na određenoj udaljenosti. Kako bi ometači radara bili efektivni oni moraju raditi na istoj frekvenciji kao radar čija očitavanja žele omesti. Iz tog razloga počeli su se koristiti radari koji funkcioniraju na više frekvencijskih pojaseva kako bi bili otporniji na ometače. U slučaju da ometač ometa jednu frekvenciju, uzela bi se u obzir očitavanja samo sa druge frekvencije. Iako je to efektivan način negiranja djelovanja ometača radara brzo su se pojavili i ometači koji rade na više frekvencijskih pojaseva.



Slika 27 Očitavanje radara na koji djeluje ometač

## 2.8. Pravac razvoja radarskih sustava

Razvoj vojne tehnologije uvijek je bila igra mačke i miša. Naime, razvoj samih radara utjecao je na razvoj proturadarske tehnologije i vojnih taktika.

Jedan od pravaca razvoja radarske tehnologije danas je u obradi podataka. U 21. stoljeću poboljšanje sve tehnologije pokušava se pomoću neke vrste strojnog učenja i radari nisu iznimka. Na osnovi ogromne baze podataka radarskih mjerenja istrenirani su modeli algoritama za identifikaciju objekata koji su brži i točniji čak i u kompleksnim okruženjima. Također, moderni radari opremljeni su sa sposobnošću prilagođavanja svojih parametara (npr. praga) tijekom operacije u promjenjivim uvjetima. To ih čini otpornijima na promjenu vremenskih uvjeta, jačine šuma, vrste i intenziteta smetnji itd. što smanjuje vjerojatnost lažnih očitavanja.

Objekti koje radar mora detektirati također su se promijenili. Mali dronovi su u početku predstavljali veliku prijetnju radarskim sustavima jer im je efektivna površina raspršenja jako mala zbog koje bi ostali neprimijećeni od strane radara. Integracija radarskih sustava sa drugim tehnologijama kao što su infracrveni senzori upotpunjuje nedostatke samih radarskih sustava.

Jedan od velikih nedostataka radarskih sustava je taj što se moraju mehanički okretati kako bi se usmjerila zraka od odašiljača što ograničava njihovu dinamiku. AESA (engl. Active electronically scanned array) radari su među najmodernijima te nemaju pokretnih dijelova već elektronički mogu usmjeriti zrake odašiljača [Slika 28]. Sustav se sastoji od stotine malih modula odašiljača i prijamnika koji rade simultano pokrivajući puno veće područje od konvencionalnih radara. Slanjem svakog impulsa moduli nasumično mijenjaju emitiranu frekvenciju zbog čega ih je teže detektirati i ometati njihov signal.



**Slika 28** AESA radar na F/A-18E/F zrakoplovu

### 3. Izrada makete

#### 3.1. Koncept „Stražarnice“

„Stražarnica“ je inspirirana konceptom stacionarnog sustava kupole s topom (engl. „turret“) iz tzv. tower defense igrice [Slika 29]. Njegova svrha je obrana nekog teritorija od invazije neprijatelja.



Slika 29 Ilustracija stacionarnog sustava kupole s topom („turret“)

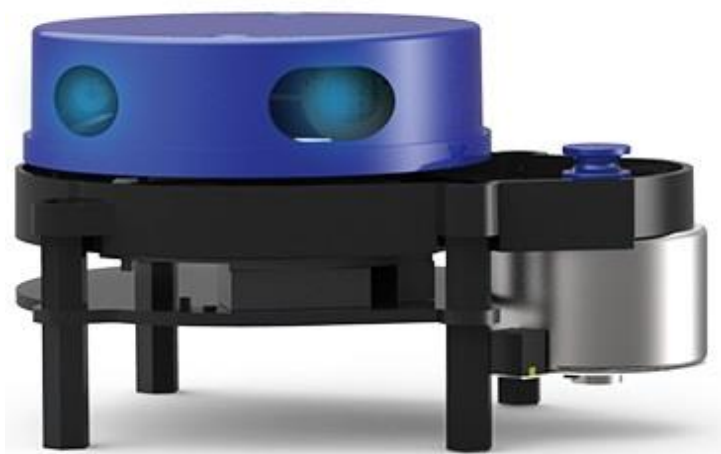
Kada neprijatelj uđe u domet stražarnica ga naciija i napada. Sve dok je neprijatelj unutar dometa „turret“ će se pratiti njegove pokrete kako bi on kontinuirano bio naciijan. „Turret“ prestaje napadati i pratiti neprijatelja kada on izađe iz dometa ili je neutraliziran.

Ideja ja da „Stražarnica“ funkcionira kao autonomni „turret“ koji detektira i prati neprijatelja bez destruktivnog dijela napadanja. Potrebno je savladati izazove detekcije i lokacije neprijatelja zajedno sa izazovom praćenja neprijateljeve kretnje. Kako bi se to izvelo potrebna je kombinacija senzora, aktuatora i algoritama.

Zadatak „Stražarnice“ je obrana prostorije u koju je postavljena. Radi bolje definicije termin „neprijatelj“ u daljnjem tekstu biti će definiran kao „strani objekt“. Kako bi se detektirao i locirao strani objekt trebaju se raspoznati strani/neželjeni objekti od poznatih objekata. Prije detekcije stranih objekata potrebno je definirati objekte koji su poznati kako bi se znalo na koje se objekte ne smije reagirati. U slučaju Stražarnice poznati objekt je prazna prostorija u kojoj se stražari dok je detekcija stranog objekta bilo kakva promjena od početno definiranog stanja prostorije.

### 3.2. Lociranje objekata pomoću 2D LIDAR-a

Kako bi se objekt locirao potrebna je informacija o njegovom položaju u prostoru. Ta informacija može se dobiti na razne načine. Od kamera koje zahtijevaju obradu slike kako bi se odredila lokacija objekta, SONAR-a koji se koriste za lociranje morskog dna u podmornicama sve do GPS-a koji objekt locira pomoću satelita. Detekcija objekata i mapiranje okoline vrlo je aktualna tema u samovozećim automobilima. Kako bi samovozeći automobil izbjegao koliziju sa okolinom konstantno treba imati informaciju što se nalazi u njegovom okruženju. Brzina prikupljanja informacija pogotovo je važna zato što kasna informacija o prisutnosti nekog objekta može značiti sudar i gore. Iz tog razloga koriste se kamere i LIDAR-i. To su senzori koji za svoja mjerenja koriste svjetlo – najbrži medij prijenosa informacije. U ovom radu koristiti će se 2D LIDAR YDLIDAR X4 [Slika 30]. Taj senzor često se koristi u hobističkim mobilnim robotima zbog odličnih performansa i pristupačnosti.



Slika 30 YDLIDAR X4

YDLIDAR X4 koristi ToF (engl. time of flight) metodu kako bi izmjerio udaljenost (mjeri se vrijeme potrebno da se reflektirana laserska zraka vrati do detektora). Sastoji se od Laserskog odašiljača i prijemnika te elektromotora koji ih rotira. Princip rada je sljedeći: odašiljač emitira lasersku zraku, zraka se odbije od objekta i vrati na mjesto prijemnika. Iz poznate brzine svjetlosti i vremena potrebnog da se signal vrati može se izračunati izmjerena udaljenost. Nakon toga elektromotor rotira odašiljač i prijemnik kako bi se izmjerila udaljenost na drugom kutu. Nakon dovoljno mjerenja može se rekonstruirati izgled okoline. Skup točaka dobiven mjerenjem 2D LIDAR-a zove se 2D oblak točaka (2D point cloud).



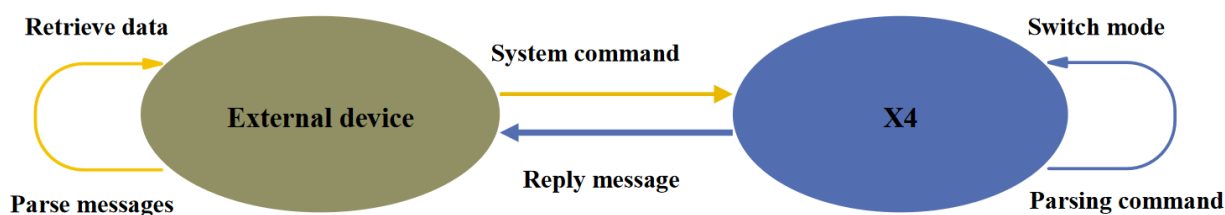
### 3.2.1. Komunikacija sa senzorom

Komunikacija sa senzorom vrši se UART protokolom (engl. Universal asynchronous receiver-transmitter) čija brzina prijenosa podataka je definirana od strane proizvođača [Slika 31].

Item	Min	Typical	Max	Unit	Remarks
Baud rate	/	128000	/	bps	8-bit data bit, 1 stop bit, no parity

Slika 31 Brzina prijenosa podataka senzora YDLIDAR X4

Nakon što je brzina prijenosa podataka usklađena između senzora i upravljačkog uređaja moguće je uspostaviti komunikaciju sa senzorom [Slika 32].



Slika 32 Ilustracija načina komunikacije YDLIDAR X4 senzora i upravljačkog uređaja

Postoji 5 osnovnih naredbi koje senzor raspoznaje : Scan, Stop, Device information, Health status i Restart. Senzoru se naredbe zadaju slanjem kombinacije heksadecimalnih znakova koje on interpretira na način prikazan u tablici.

System command	Description	Mode switching	Answer mode
0xA5 (Start)	0x60	Start scanning and export point cloud data	Scan mode Sustained response
	0x65	Stop and stop scanning	Stop mode No answer
	0x90	Get device information (model, firmware, hardware version)	No Single response
	0x91	Get device health status	No Single response
	0x80	Soft restart	/ No response

Slika 33 Lista osnovnih naredbi senzora YDLIDAR X4

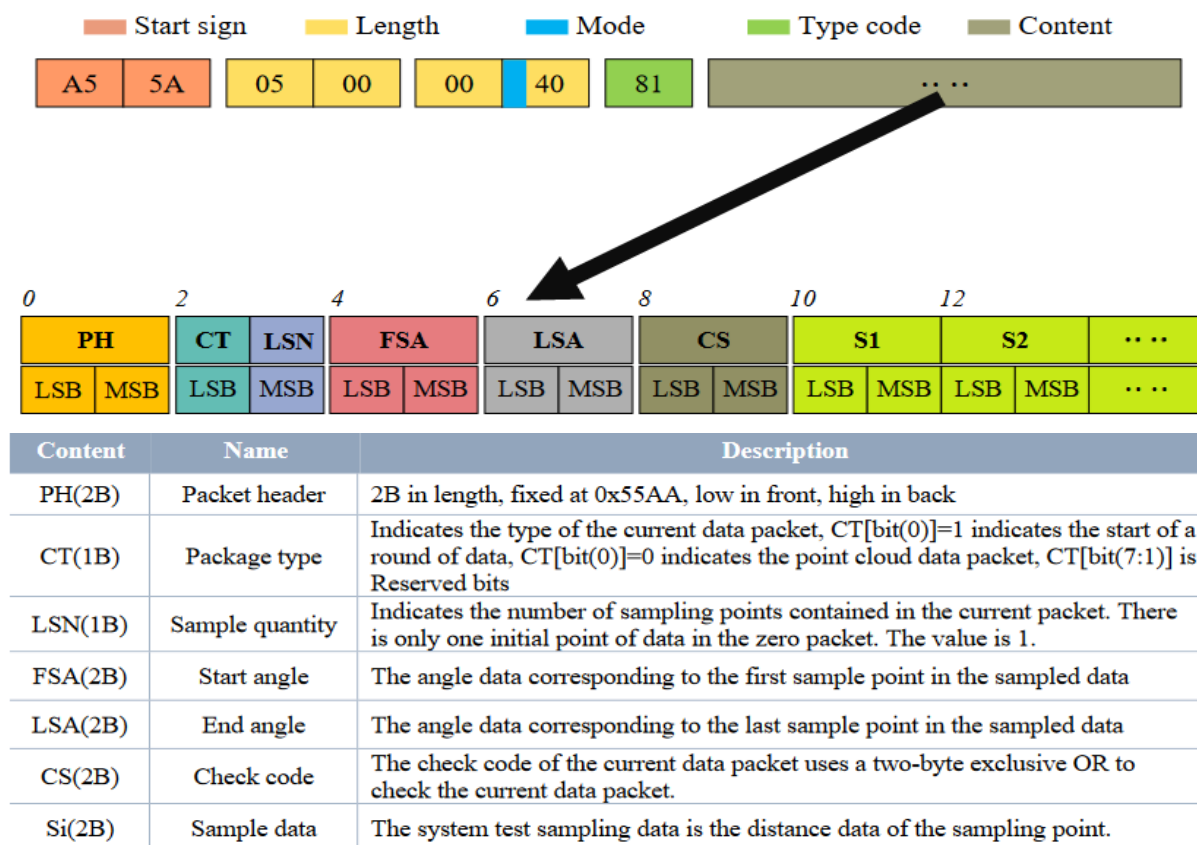
Prema tablici, ovisno o poslanoj naredbi može se očekivati jedan ili kontinuirani odgovor. Naredbe Device information i Health status daju samo jedan odgovor te je duljina njihovog odgovora predefiniрана dok je odgovor Scan naredbe kontinuiran. Senzor odgovor šalje u „paketima“ koje je potrebno „raspakirati“ kako bi se došlo do željenih informacija. „Raspakiranje“ odgovora koji imaju pred-definiranu duljinu je jednostavno; potrebno je učitati pred-definiranu količinu bajtova poslanih sa strane senzora te ih „raspakirati“ na način koji je zadao proizvođač.

Glavna naredba senzora je Scan naredba te je nju nešto kompliciranije raspakirati pošto je duljina odgovora nepoznata [Slika 34]. Ako se pročita kriva količina bajtova podaci će biti nepotpuni i netočni.



Slika 34 Veličina paketa YDLIDAR X4 senzora

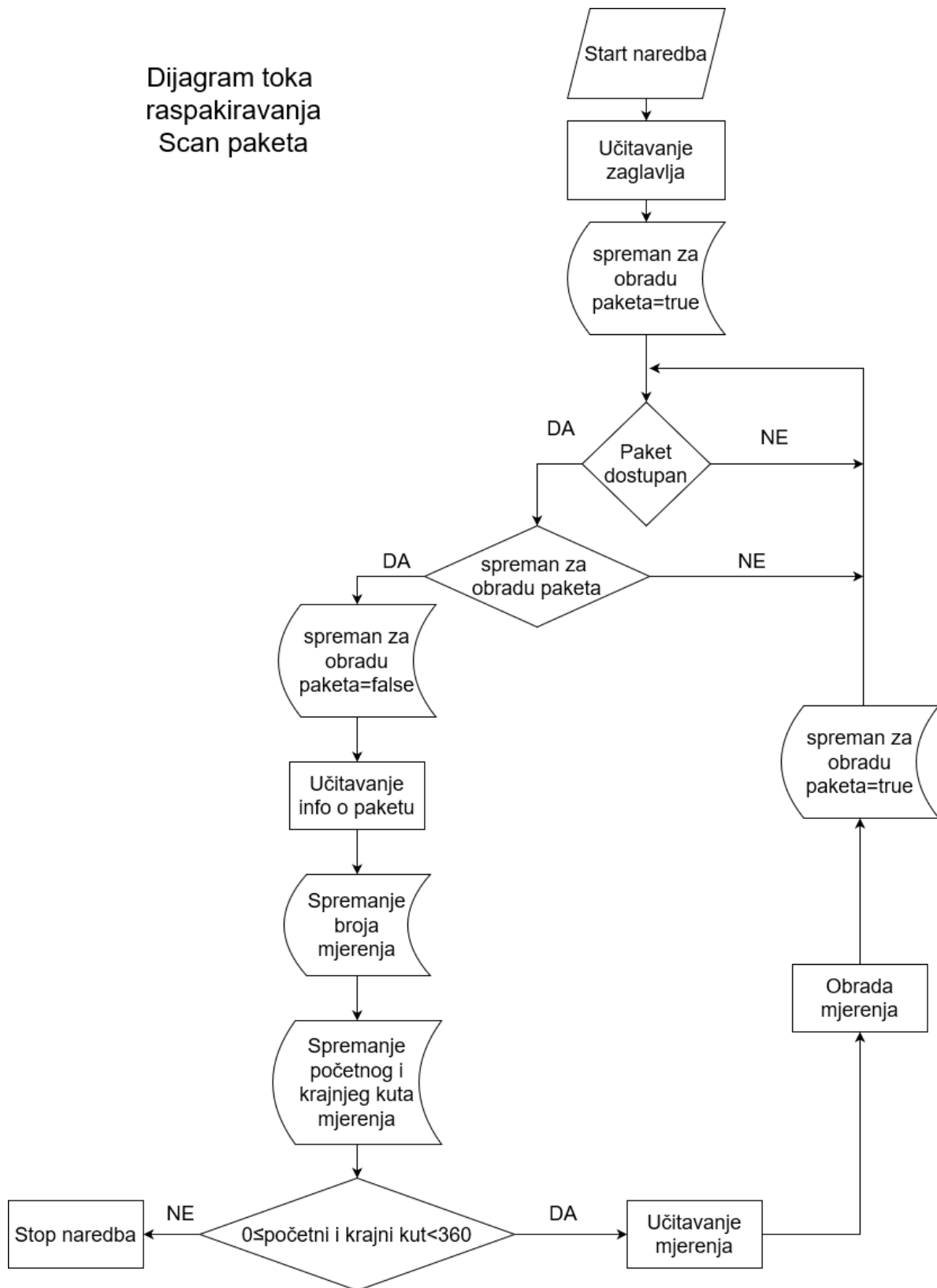
Kako bi raspakiravanje paketa bilo moguće, informacija o duljini svakog paketa sadržana je u samom tom paketu. Paketi koji su poslani kao odgovor na Scan naredbu sastoje se od 3 dijela: dio koji je uvijek isti – zaglavlje, dio koji sadrži informacije o paketu, te dio koji sadrži izmjerene udaljenosti [Slika 35]. Zaglavlje se šalje samo u prvom paketu dok ostali paketi sadrže samo dijelove sa informacijama o paketu i izmjerenim udaljenostima.



Slika 35 Struktura jednog paketa Scan naredbe YDLIDAR X4 senzora

Kako bi se saznala duljina paketa potrebno je učitati LSN bajt. To se vrši tako da se učita prvih 7 bajtova (dio zaglavlja) zatim sljedećih 10 (dio koji sadrži informacije o paketu) te se za kraj učita broj bitova koji je definiran LSN bajtom. Nakon toga podaci se spremaju u memoriju upravljačkog uređaja te se čeka dolazak sljedećeg paketa.

Dijagram toka raspakiravanja Scan paketa

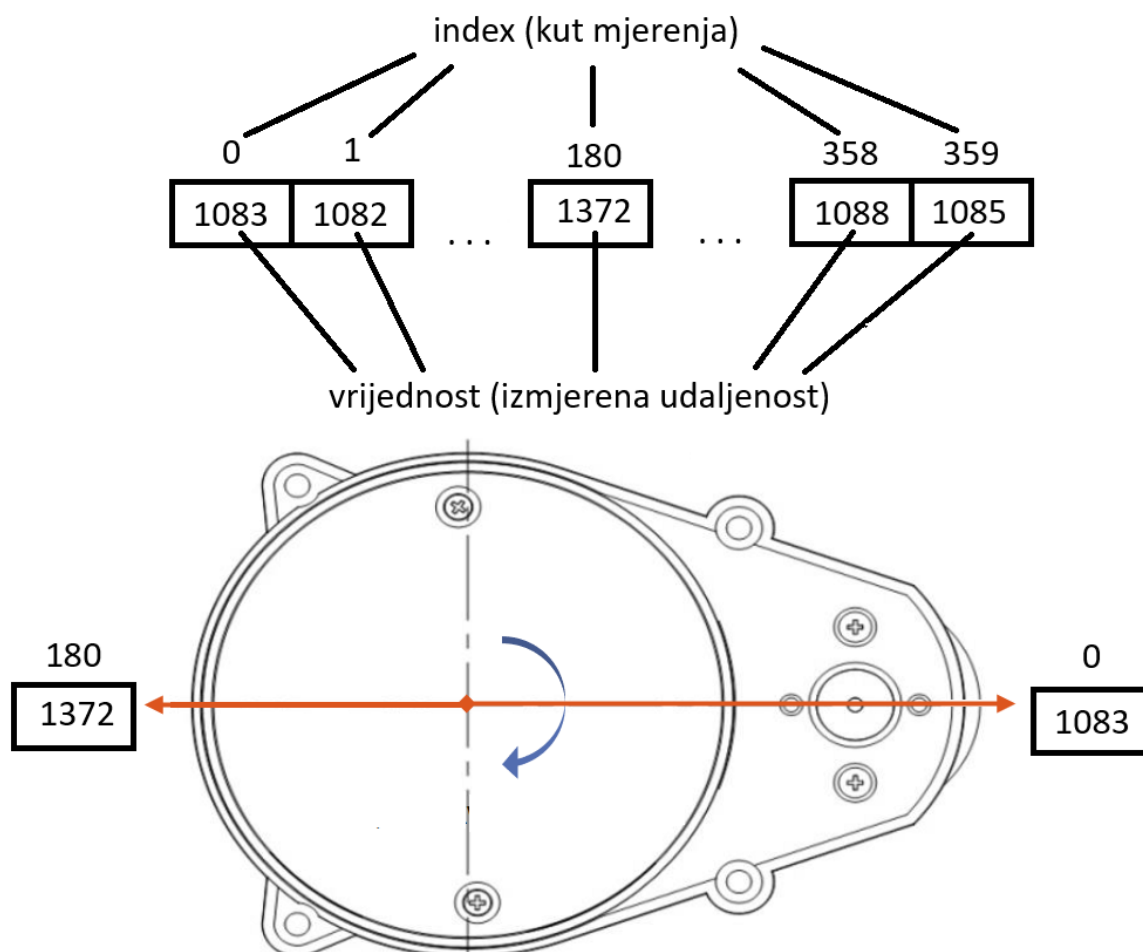


Slika 36 Dijagram toka raspakiravanja Scan paketa



### 3.2.2. Način pohranjivanja podataka i rezolucija mjerenja

Podaci koje senzor prikuplja su kut i udaljenost na tom kutu. Pomoću tih podataka moguća je rekonstrukcija oblika okolnog prostora u polarnim koordinatama. Način spremanja podataka je u polje čija je veličina 360. Veličina polja je 360 jer jedan puni krug sadrži  $360^\circ$  tako da je rezervirana jedna varijabla za svaki kut. U te varijable biti će memorirane udaljenosti dobivene senzorom na odgovarajuće indekse [Slika 37].

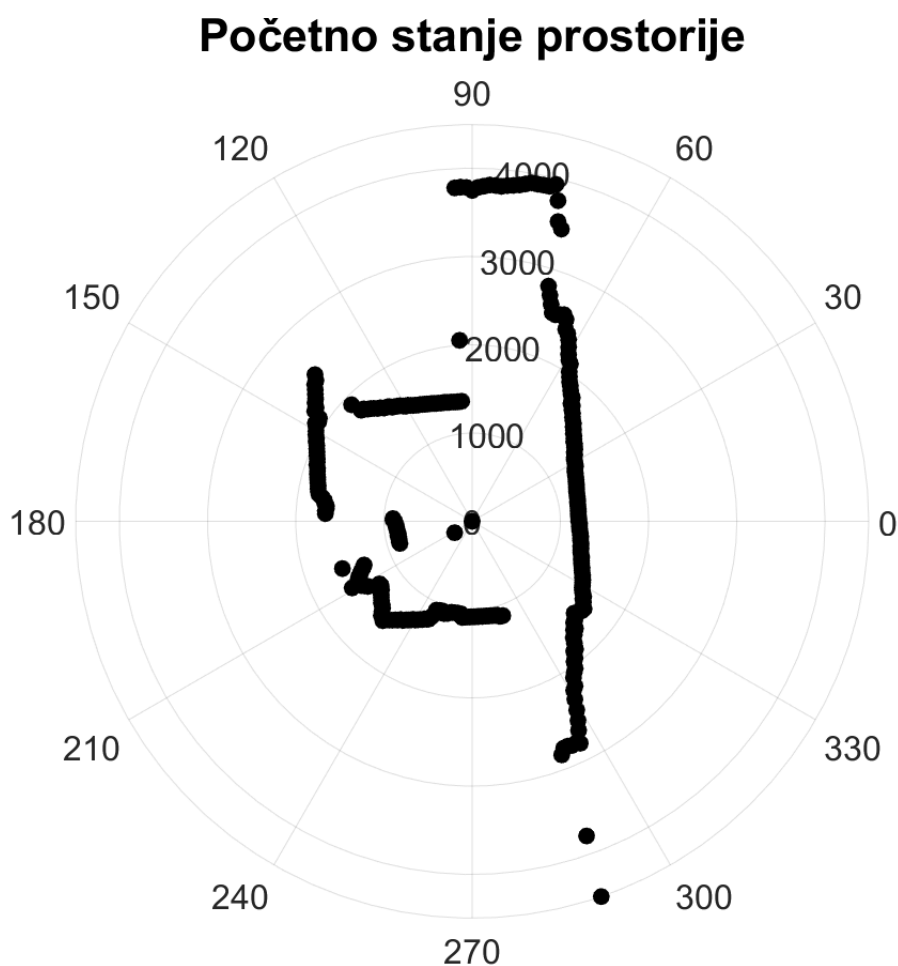


**Slika 37** Način pohranjivanja podataka i njihovo geometrijsko značenje

Važno je naglasiti da senzor šalje vrijednosti koje nisu nužno cjelobrojne npr. na  $71.32^\circ$  izmjerena je vrijednost od 1504.6 mm. U tom slučaju vrijednosti će biti zaokruživane na njihove cjelobrojne vrijednosti. Dakle ti podaci biti će interpretirani kao da je na  $71^\circ$  izmjerena udaljenost od 1505 mm. To zaokruživanje unosi grešku u interpretaciju mjerenja ali je potrebno radi alociranja memorije na upravljačku jedinicu. Zbog cjelobrojnog zaokruživanja rezolucija mjerenja je  $1^\circ$  za kutove i 1mm za udaljenosti.

### 3.2.3. Definicija početnog stanja prostorije

Pošto je dobivena informacija o okolini dobivena senzorom 2D polje točaka, informacija o prostoriji koja se može pohraniti je horizontalna projekcija prostorije na senzor na visini (z-koordinati) na koju je postavljen [Slika 38]. Zbog toga, definicija početnog stanja prostorije je 2D polje točaka u nekom odabranom trenutku koji je proglašen početnim. U slučaju kada bi strani objekt bio prisutan tijekom definicije početnog stanja prostorije on bio bi proglašen poznatim te „Stražarnica“ ne bi reagirala na njegovu prisutnost sve dok se on ne počne kretati. Iz tog razloga tijekom definiranja početnog stanja prostorije, u prostoriji moraju biti prisutni samo poznati objekti na koje se neće reagirati. Na taj način osiguran je pravilan rad „Stražarnice“.



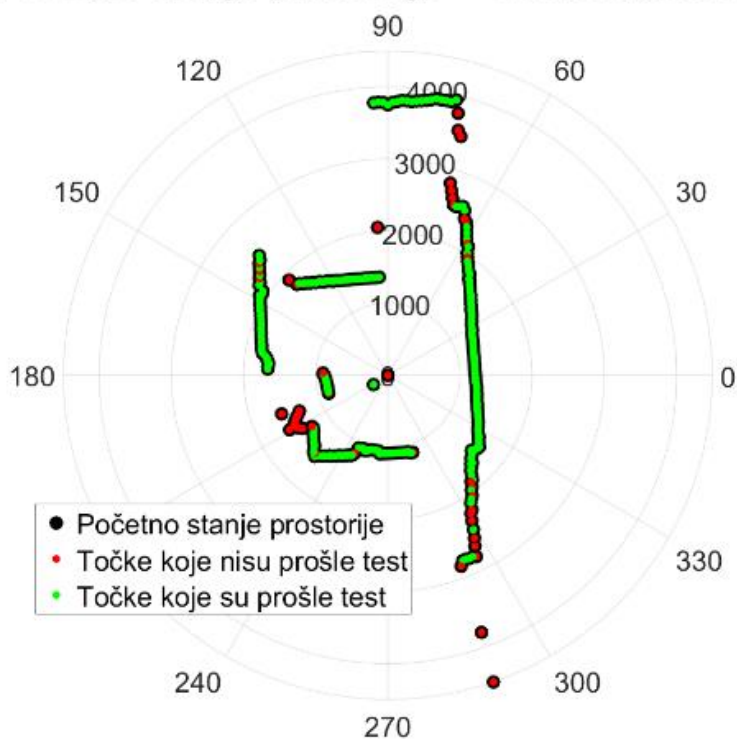
Slika 38 Polje točaka početnog stanja prostorije

### 3.2.4. „Test stabilnosti“

Početno stanje prostorije mora biti dobro definirano jer će se kasnije s njim konstantno uspoređivati daljnja stanja. Postoje mjesta u prostoriji koja su iz nekih razloga teška/nemoguća za izmjeriti; na primjer površine koje apsorbiraju svjetlinu, površine na koje laserska zraka ima veliki kut upada itd. Kako bi se početno stanje smatralo definiranim, testiranjem se pokazalo da je dovoljno „točno“ izmjeriti 80-90% prostorije da bi se postigle zadovoljavajuće performanse kao što su brzina učenja i pokrivenost prostorije. Izmjerena udaljenost smatra se definiranom tek kada se na nekom kutu 5 puta za redom izmjeri udaljenost u toleranciji koju je zadao proizvođač (25mm). Neka se taj proces određivanja točno izmjerenih dijelova prostorije zove „test stabilnosti“ (test konzistentnosti točaka) [Slika 39].

Točke koje ne prođu „test stabilnosti“ u većini su slučajeva dobro izmjerene ali neće biti uzimane u obzir kada se budu uspoređivale sa daljnjim stanjima. Nestabilnosti mjerenja na tim točkama mogu okinuti lažnu/krivu detekciju „stranog“ objekta.

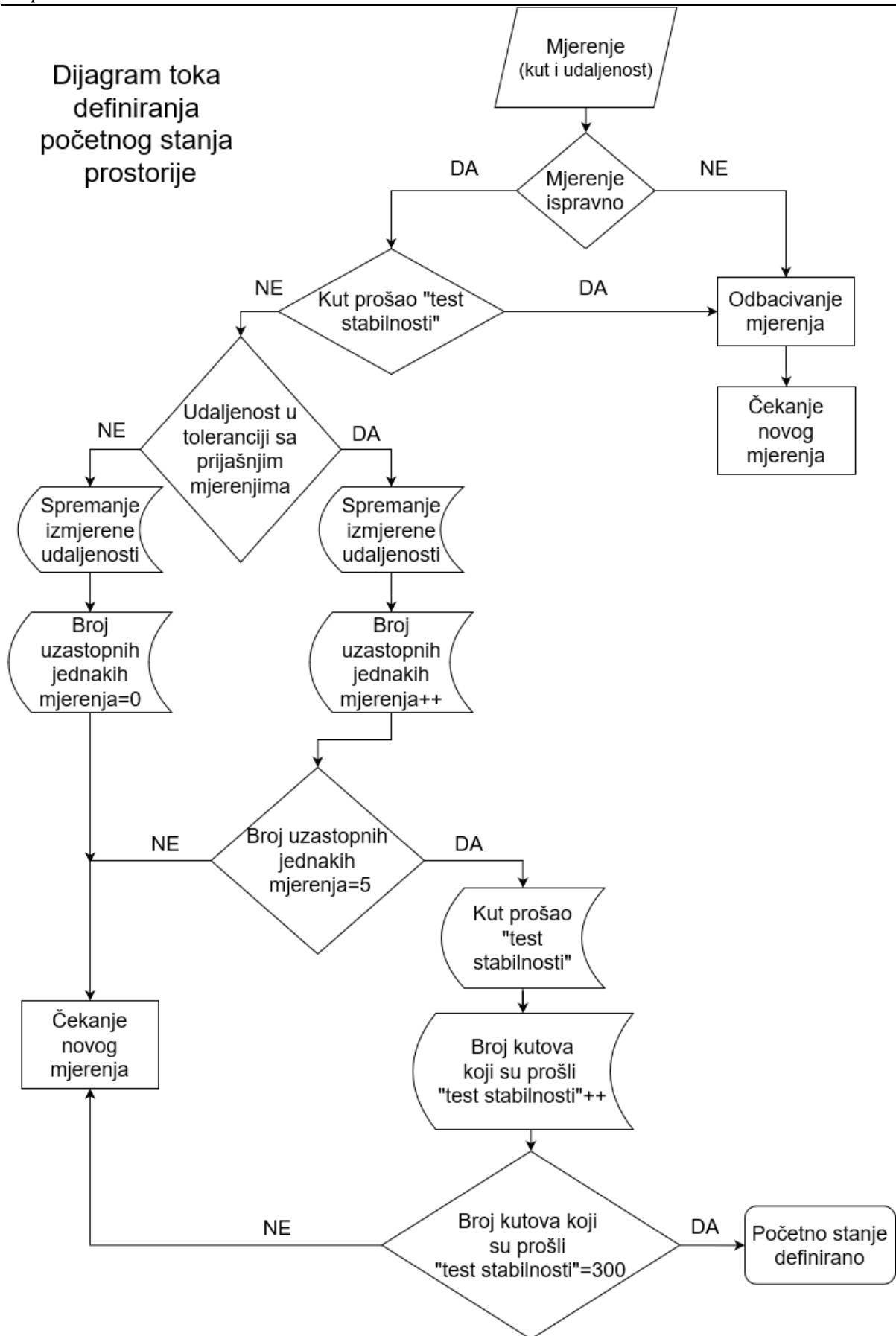
#### Početno stanje prostorije + "test stabilnosti"



**Slika 39** Polje točaka početnog stanja prostorije i test stabilnosti

Važno je napomenuti da je u nekim slučajevima moguće „točno“ izmjeriti i preko 90% prostorije ali za to je potrebno dulje vremena. Samo u idealnim slučajevima mogu se postići vrijednosti iznad 95%. U oba slučaja poboljšanje performanse detekcije „stranog“ objekta pokazalo se zanemarivim.

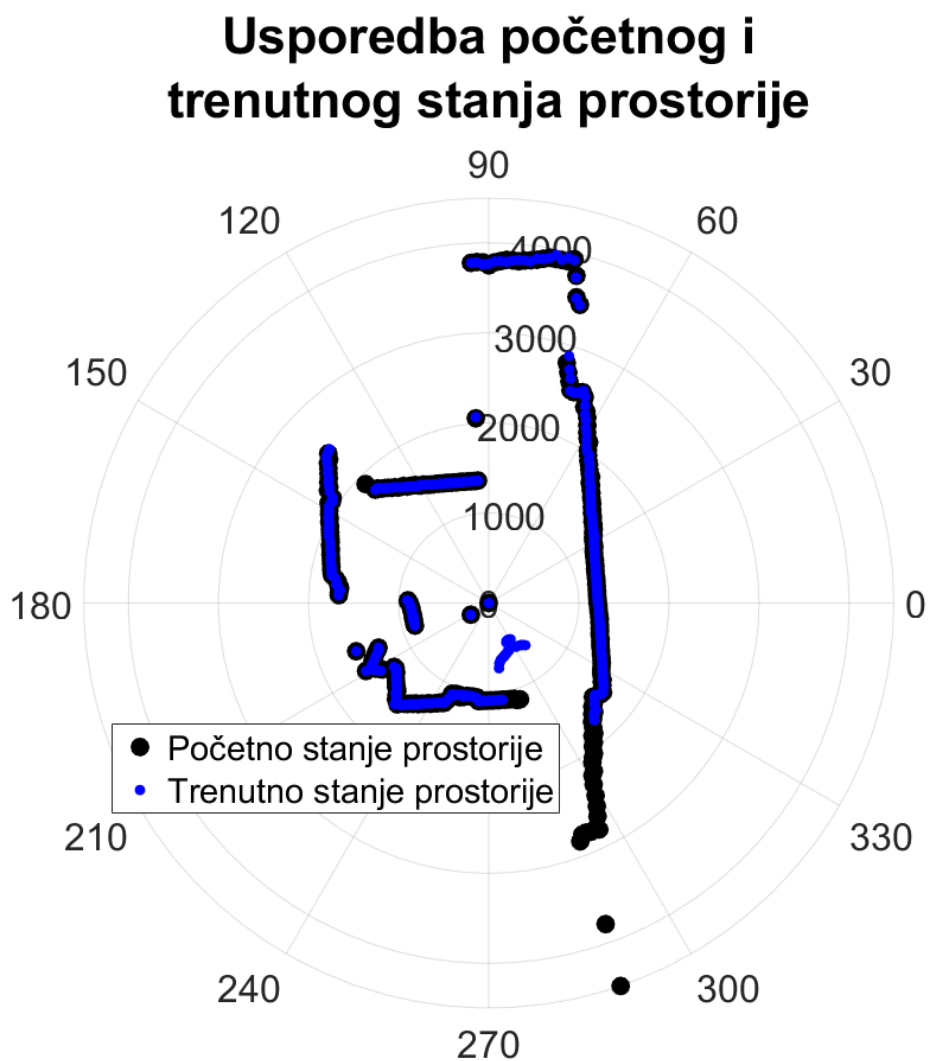
Dijagram toka definiranja početnog stanja prostorije



Slika 40 Dijagram toka definiranja početnog stanja prostorije

### 3.2.5. Detekcija „stranih“ objekata

Nakon što se definiralo početno stanje moguća je detekcija „stranog“ objekta. Detekcija stranog objekta vršit će se konstantnim uspoređivanjem trenutnog i početnog stanja prostorije [Slika 41]. Na kutovima gdje je udaljenost trenutnog stanja prostorije manja od udaljenosti početnog stanja približio se „strani“ objekt, a na kutovima gdje je izmjerena veća udaljenost „strani“ objekt se udaljio. Ako strani objekt nije bio prisutan za vrijeme učenja početnog stanja njegova pojava javit će se samo u obliku smanjenja izmjerene udaljenosti.

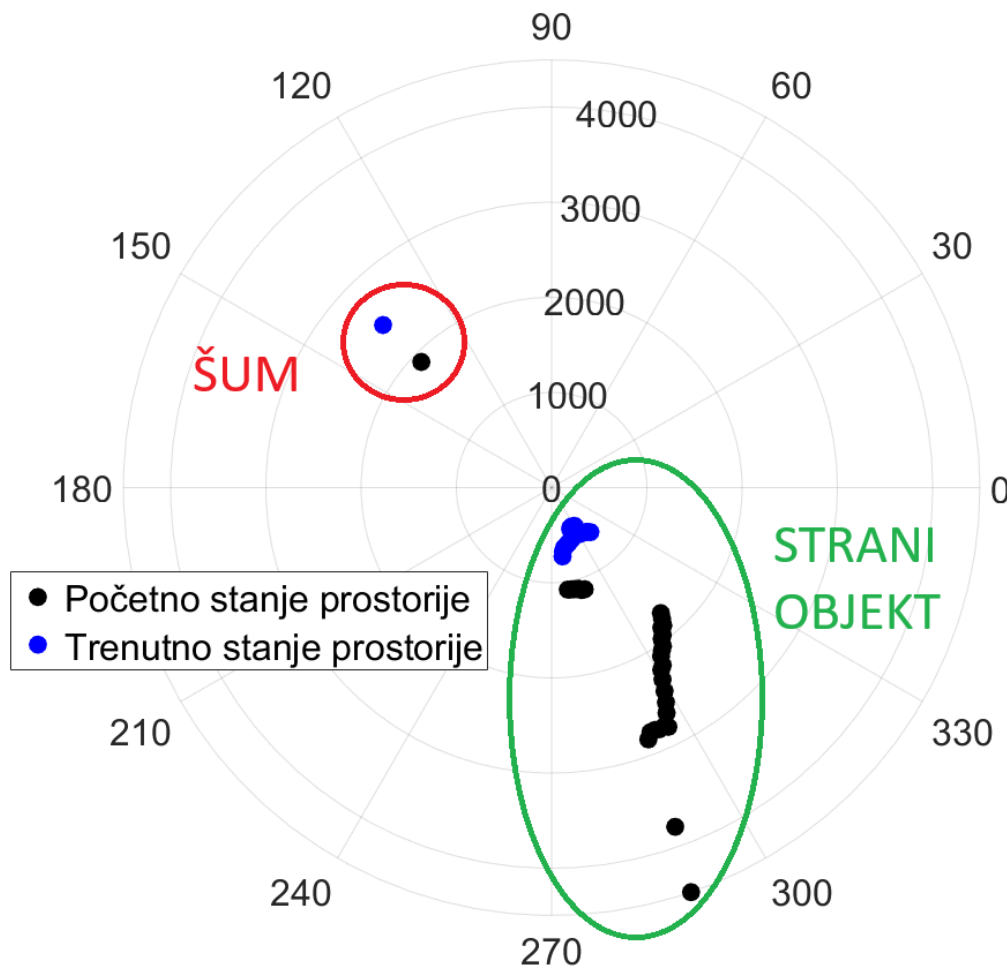


Slika 41 Usporedba početnog i trenutnog stanja prostorije

### 3.2.6. Filtriranje smetnji

Nakon što se trenutno stanje prostorije preklopi sa početnim stanjem te se oduzmu točke koje se preklapaju ostaju točke gdje se dogodila promjena [Slika 42].

## Točke na kojima je detektirana promjena

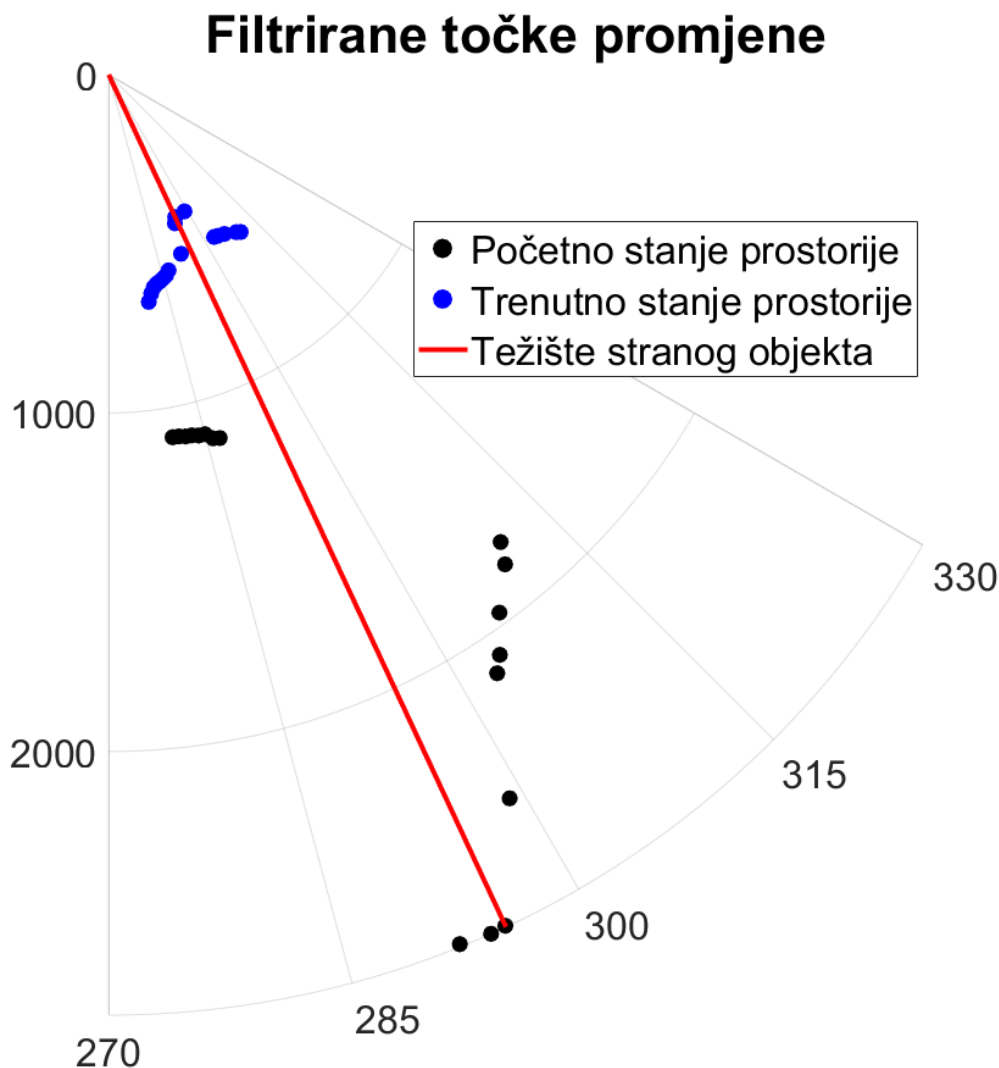


**Slika 42 Točke (kutovi) na kojima je detektirana promjena izmjerene udaljenosti**

Na slici se vidi da postoje 2 područja promjene; jedno je pojava stranog objekta, drugo je mjerni šum (smetnja). Pojava smetnji je neizbježna te ih je potrebno filtrirati. Pojava smetnje je karakterizirana sa tankim snopom točaka. Konkretno na slici, smetnja (šum mjerenja) je detektirana samo na kutu od 136° dok je strani objekt detektiran na kutovima 279°-311°. Širina snopa na kojem je detektiran šum je 1 dok je širina snopa na kojem je detektiran strani objekt 33. Jednostavan način filtriranja šumova je taj da se promjene ne uzmu u obzir ako je njihova širina snopa jako mala.

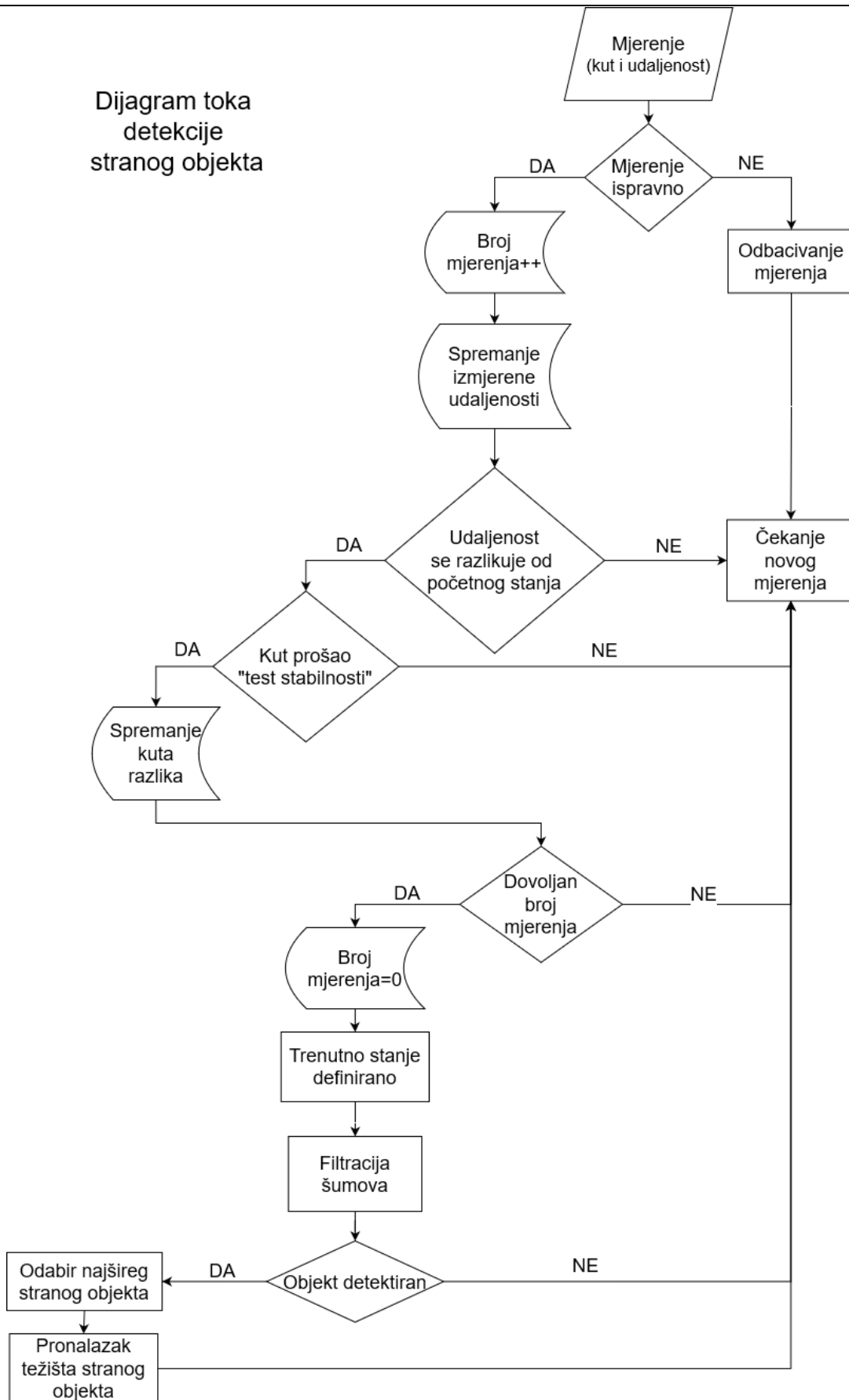
### 3.2.7. Pronalazak težišta predmeta

Nakon što se filtriraju šumovi ostaju točke promjene koje su uzrokovane samo stranim objektom. Kako bi strani objekt bio naciľjan potrebno je pronaći njegovo težište. Ono se nalazi na srednjoj točki u snopu na kojem je detektiran strani objekt. Ako se zna kut početne i krajnje točke, aritmetičkom sredinom dobije se kut na kojem se nalazi težište [Slika 43].



Slika 43 Težište detektiranog stranog objekta

Dijagram toka detekcije stranog objekta

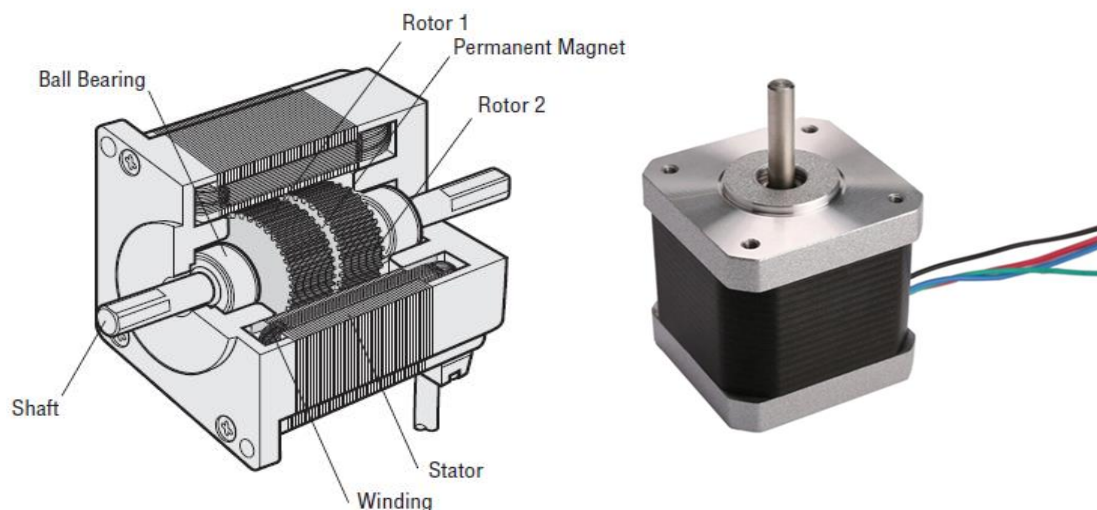


Slika 44 Dijagram toka detekcije stranog objekta



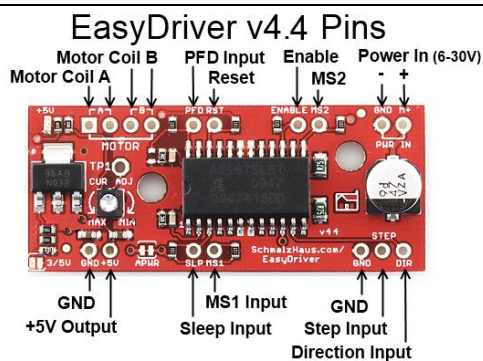
### 3.3. Ciljanje predmeta pomoću koračnog motora

Nakon što je lokacija težišta stranog objekta određena Stražarnica ga treba naciljati i to će izvršiti pomoću koračnog motora na koji je montiran laser. Za razliku od većine elektromotora (istosmjernih i izmjeničnih) koji proizvode kontinuiranu rotaciju, kod koračnih elektromotora rotacija (kutni pomak) vratila odvija se u diskretnim “koracima”. Dok postoji više izvedbi koračnog motora, u ovom radu biti će korišten NEMA 17 koračni motor kojemu je rotor permanentni magnet [Slika 45]. Pozicioniranje, a i rotiranje motora ostvaruje se odgovarajućim (pravovremenim, po polaritetu i iznosu točnim) magnetiziranjem statorskih zavojnica. Velika prednost koračnih motora je ta što nema potrebe za enkoderom; kut zakreta, kutna brzina i kutno ubrzanje mogu se upravljati bez povratne veze.



**Slika 45** Izometrijski presjek koračnog motora i NEMA 17 koračni motor

Kako bi koračni motor bio upravljan ispravno potrebno je pravovremeno nartinuti struju na pojedine zavojnice. Pojednostavljenje upravljanja koračnog motora može se ostvariti primjenom drivera za koračne motore. Driveri za koračne motore sadrže čip koji je dizajniran za upravljanje koračnih motora, elektroniku za napajanje motora i upravljačke signale. Odabrani driver za ovaj rad je EasyDriver A3967 [Slika 46].



Slika 46 EasyDriver A3967 driver za koračne motore

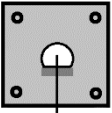
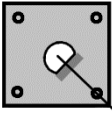
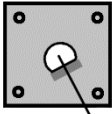
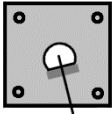
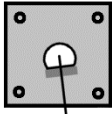
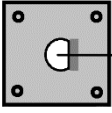
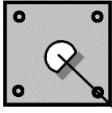
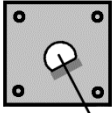
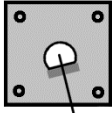
EasyDriver A3967 sadrži potencijometar kojim se može upravljati narinuta struja na zavojnice. Jačina struje kod koračnih motora ne utječe na brzinu nego na moment zakreta i moment držanja vratila. Pošto će na koračni motor biti montiran samo laserski pokazivač nema potrebe za velikim strujama.

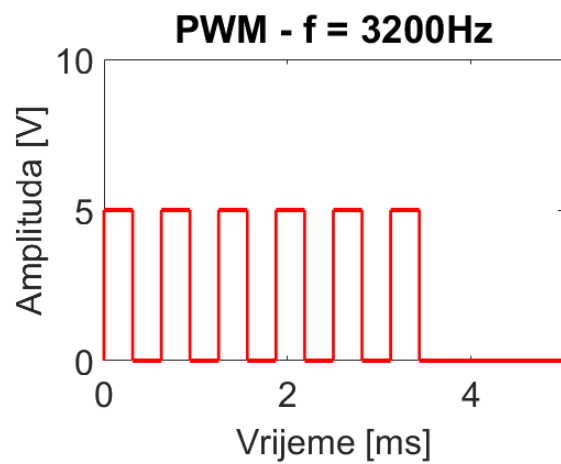
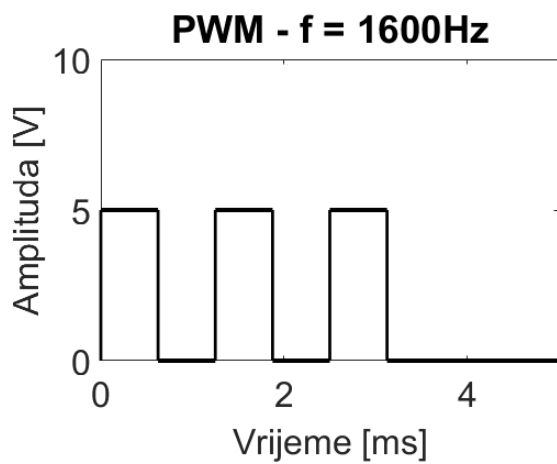
### 3.3.1. Pozicioniranje i upravljanje brzinom koračnog motora

Pomoću driver-a za koračni motor njegovo upravljanje moguće je sa jednim PWM signalom koji određuje kut zakreta, kutnu brzinu i kutno ubrzanje. Konkretno broj pozitivnih bridova PWM signala određuje broj koraka, frekvencija PWM signala određuje kutnu brzinu te promjena frekvencije PWM signala određuje ubrzanje. Kod stražarnice, radi jednostavnosti, brzina vrtnje biti će konstantna.

Preciznost pozicioniranja motora može se povećati pomoću reduktora ili pomoću tzv. microstepping-a. Microstepping je način upravljanja motora kojim se jedan okretaj vratila teoretski može podijeliti na puno više koraka upravljanjem odnosa narinute struje na odgovarajućim zavojnicama. EasyDriver A3967 sadrži opcije povećanja broja koraka u jednoj rotaciji koračnog motora dva (HALF), četiri (QUARTER) do čak osam (EIGHT) puta [Tablica 4]. Konkretno kod NEMA 17 motora pokretanog u režimu rada sa osam puta manjim koracima jedan okretaj vratila podijeljen je na 1600 koraka odnosno svaki korak napravi kut od  $0.225^\circ$  što je više nego dovoljno kada se uzme u obzir rezolucija detekcije promjene od  $1^\circ$ .

**Tablica 4 Kut zakreta ovisno o broju koraka i režimu rada**

		Režim			
		FULL	HALF	QUARTER	EIGHT
Broj koraka	0	 0°			
	50	 45°	 22.5°	 11.25°	 5.625°
	100	 90°	 45°	 22.5°	 11.25°



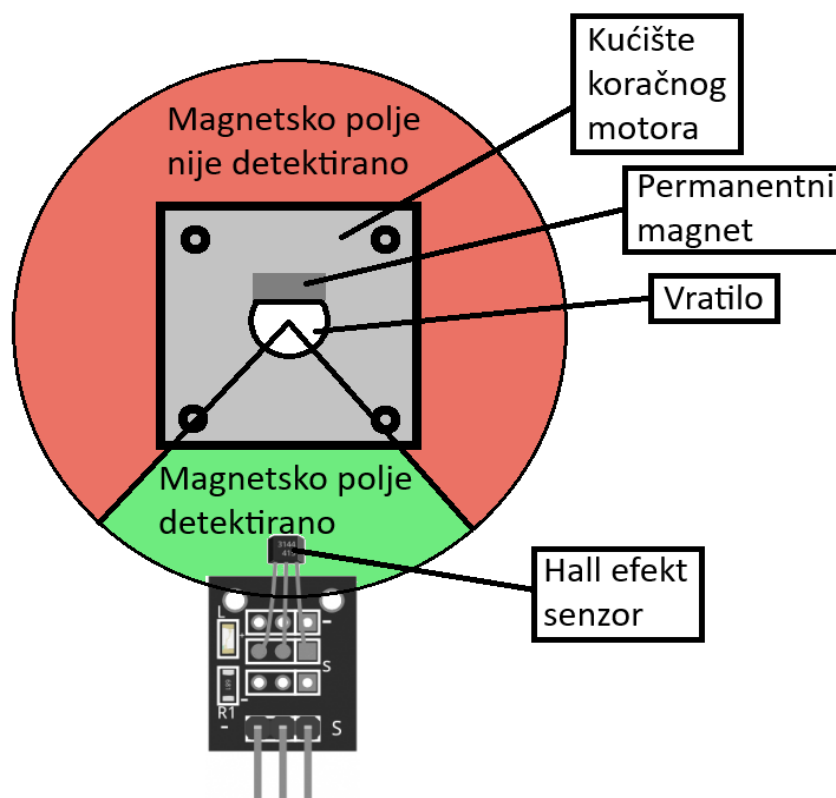
**Slika 47 Vizualizacija dva PWM signala**

**Tablica 5 Usporedba odziva koračnog motora na PWM signale**

Režim rada	EIGHT	
Frekvencija [Hz]	1600	3200
Broj koraka	3	6
Kut zakreta [°]	0.675°	1.35°
Brzina vrtnje [okr./s]	1	2

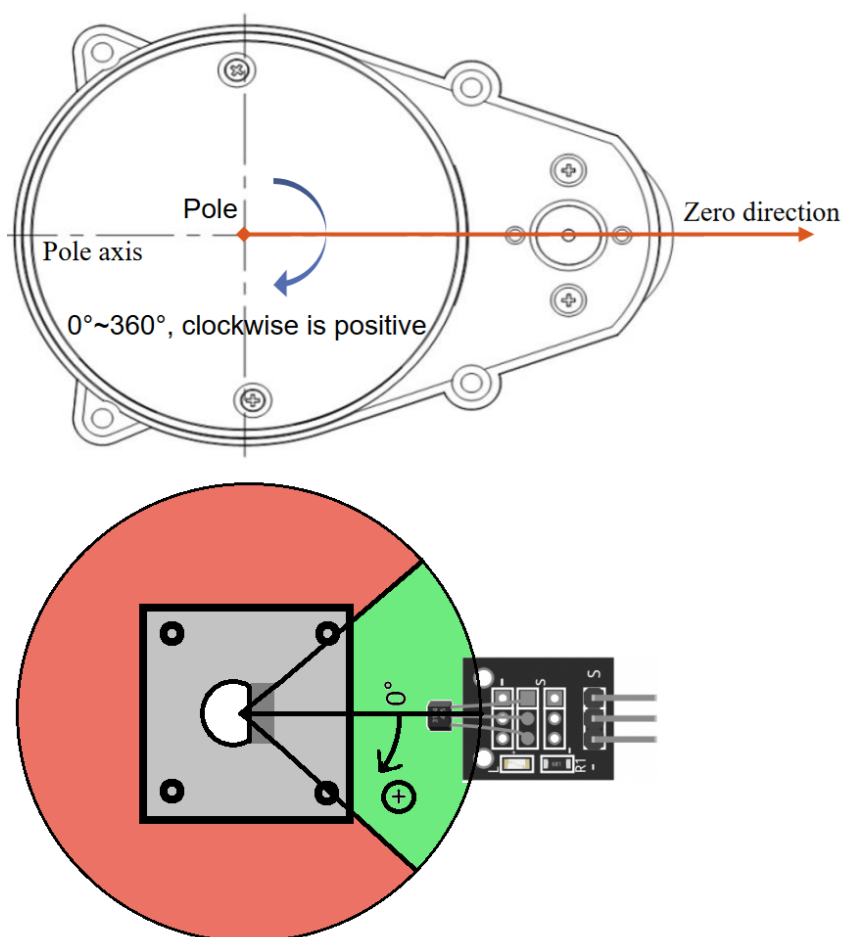
### 3.3.2. Postavljanje koordinatnog sustava koračnog motora

Ovisno o poslanom broju impulsa motor će se zakrenuti za neki kut koji je definiran kutom zakreta jednog koraka. Iako je moguće upravljati kutom za koji će se koračni motor zarotirati, bez poznavanja kuta početne pozicije ne može se definirati apsolutni kut zakreta vratila motora. Kako bi se apsolutna pozicija vratila saznala, potrebno je definirati neku poziciju kao početnu. To je izvedivo pomoću senzora čija je pozicija poznata koji će se aktivirati kada je vratilo na određenom kutu zakreta. Najjednostavnija izvedba postavljanja početne pozicije je pomoću graničnika. Koračni se motor rotira sve dok ne aktivira graničnik, kada je graničnik aktiviran poznata je apsolutna pozicija vratila. Nedostatak korištenja graničnika je taj što je potreban fizički kontakt. Umjesto graničnika koristiti će se KY-003 Hall efekt senzor modul. Hall efekt senzor detektira prisutnost magnetskog polja. Postavi li se permanentni magnet na vratilo elektromotora dobiti će se informacija o apsolutnom kutu rotacije vratila. Nedostatak kod korištenja hall efekt senzora je taj što senzor detektira vratilo elektromotora na cijelom snopu kuta zakreta [Slika 48].



Slika 48 Stanje Hall efekt senzora s obzirom na kut zakreta koračnog motora

Iako je magnetsko polje detektirano na širokom snopu, precizno pozicioniranje i dalje je moguće. Ako se prilikom slobodne rotacije prebroji broj koraka na kojima je senzor aktivan može se dobiti širina snopa u koracima. Nulta pozicija postavi se tako da se koračni motor vrti slobodno sve dok se ne detektira magnetsko polje. Nakon njegove detekcije nastavi se vrtjeti, ali bilježi se broj koraka na kojima je magnetsko polje detektirano. Na koraku gdje magnetsko polje više nije detektirano koračni motor staje i rotira se u suprotnom smjeru za polovicu broja koraka koji su prebrojani. Na taj način vratilo se pozicionira na sredinu snopa i to mjesto proglašava se nultim kutom i apsolutni koordinatni sustav je definiran. Preklope li se koordinatni sustavi LIDAR senzora i koračnog motora može se definirati pozitivan smjer rotacije [Slika 49].

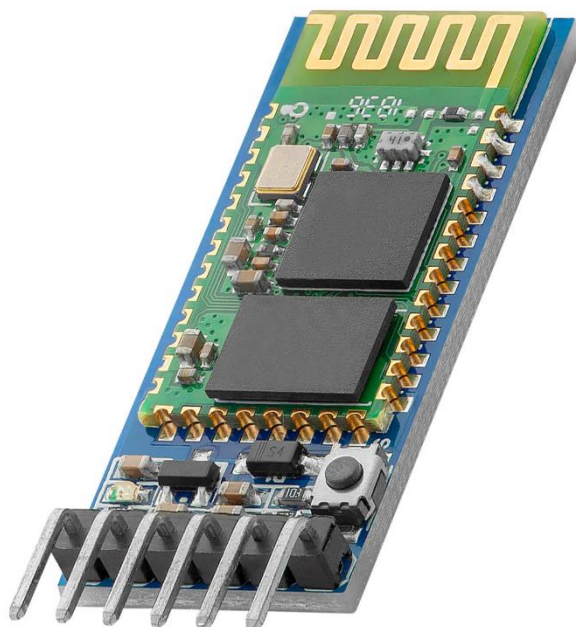


**Slika 49** Usklađivanje pozitivnog smjera vrtnje koračnog motora i senzora

Nakon što se uskladio koordinatni sustav koračnog motora i koordinatni sustav LIDAR senzora moguće je pratiti detektirani strani objekt u prostoriji. Kada LIDAR senzor detektira strani objekt i odredi se kut njegovog težišta, koračni motor rotira se na kut težišta detektiranog stranog objekta.

### 3.4. Bežično upravljanje pomoću bluetooth-a

Za slanje ključnih komandi kao što su Scan komanda potreban je način slanja komandi. Slanje komandi preko žice nije poželjno jer je ideja da je početno stanje prostorije ono kad je ona prazna odnosno kada se u njoj ne nalaze strani objekti. Iz tog razloga odabran je bežičan način upravljanja “Stražarnice” i slanja komandi. HC 05 [Slika 50] je bluetooth modul koji za razliku od HC 06 modula ima opciju komunikacije između 2 uređaja u oba smjera. To omogućuje slanje komandi te primanje informacija o trenutnom statusu.



Slika 50 HC 05 bluetooth modul

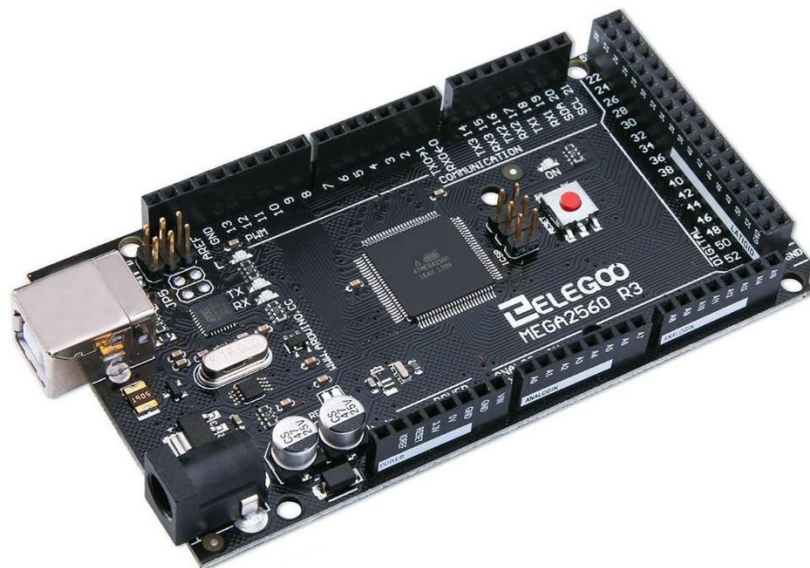
### 3.5. Upravljački uređaj “Stražarnice”

Sada kada su definirani svi uređaji koji su nužni za funkciju stražarnice moguć je educirani odabir upravljačkog uređaja.

Upravljački uređaj treba imati:

- mogućnost UART komunikacije sa senzorom
- mogućnost spremanja mjerenja dobivenih senzorom
- dovoljnu računalnu snagu kako bi odradio obradu mjerenja prije stizanja novog
- mjerenja
- mogućnost generiranja PWM signala za upravljanje brzine motora LIDAR senzora
- mogućnost generiranja PWM signala za upravljanje koračnim motorom
- mogućnost očitavanja stanja Hall efekt senzora
- mogućnost UART komunikacije sa bluetooth modulom

MEGA 2560 [Slika 51] je mikroupravljač koji je opremljen sa svim gore navedenim funkcijama te je cjenovno pristupačan. Važno je naglasiti da postoji cijeli niz upravljačkih uređaja koji zadovoljavaju gore navedene kriterije kao što su Raspberry PI I ESP-32. U slučaju “Stražarnice” koja ne zahtjeva preveliku računalnu snagu ti uređaji bili bi preskupo i presloženo rješenje za dani zadatak.



Slika 51 MEGA 2560 mikroupravljač



### 3.6. Performansa „Stražarnice“

Nakon što su odabrane sve potrebne komponente za izradu makete, potrebno je izraditi kućište. Budući da je fokus ovoga rada na samoj detekciji i praćenju predmeta, radi jednostavnosti je kućište izrađeno od drvene ploče. Geometrija kućišta je jednostavna, nalik na pravokutnu kutiju na koju je montiran senzor [Slika 52]. Kućište ima rupu kroz koju će prolaziti laserska zraka kako bi se demonstrirala funkcionalnost praćenja mete. Pošto je rad konstrukcijski ograničen njegova operacija je smanjena na 180°. Kod izrade kućišta važno je da je senzor u vagi odnosno da je postavljen unutar 2° od horizontalne ravnine. Također je važno fiksirati kućište koračnog motora da prilikom rada ne promjeni poziciju.



Slika 52 Prototip „Stožarnice“



Performansa stražarnice u ovoj konfiguraciji ovisi o:

1. Broju paketa koji određuju „trenutno stanje prostorije“
2. Brzini rotacije koračnog motora

Prilikom eksperimentiranja sa tim vrijednostima pokazalo se da je optimalna vrijednost potrebnog broja paketa 25, a brzina vrtnje koračnog motora 2 okretaja/min. Kao što se može vidjeti na slici, kut zakreta motora zadaje mu se svakih 200 ms, a zvjezdica na kraju ispisa znači da je koračni motor stigao na prijašnju poziciju na vrijeme [Slika 53].

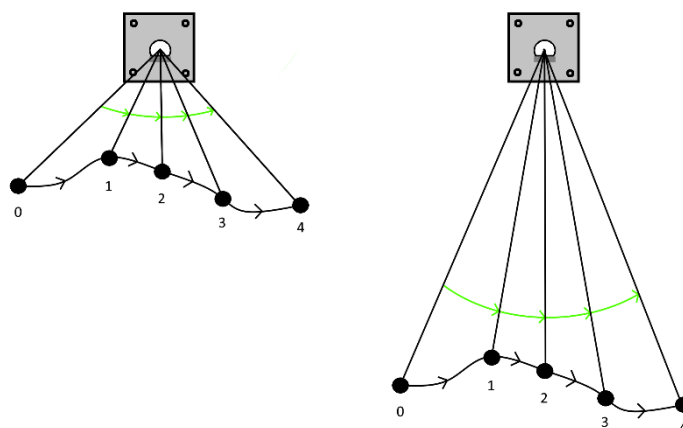
```

20:45:48.085 64*
20:45:48.202 70*
20:45:48.408 81*
20:45:48.603 86*
20:45:48.822 91*
20:45:49.000 95*
20:45:49.146 99*
20:45:49.322 100*
20:45:49.526 101*
20:45:49.651 0*
20:45:49.860 100*
20:45:50.070 100*
20:45:50.309 96*
20:45:50.408 91*
20:45:50.619 83*
20:45:50.770 76*
20:45:50.964 73*
20:45:51.176 69*
20:45:51.328 64*

```

**Slika 53 Ispis kutova na kojima je detektiran strani objekt**

Postavljanje broja potrebnih paketa ovisi o brzini kretanja objekta koji se treba detektirati. Brzina kretanja objekta iz perspektive „Stražarnice“ koja ga prati je brzina promjene kuta zakreta koračnog motora. Ona ovisi o samoj brzini predmeta, udaljenosti i pravcu kretanja [Slika 54]. Najveća brzina vrtnje motora potrebna je kada se predmet kreće pravocрно, tangencijalno, blizu središta vratila.



**Slika 54 Usporedba promjene kuta zakreta pri praćenju objekta sa različitim udaljenostima**

Vrijednosti potrebnog broja paketa manje od 25 bolje prate objekte koje se kreću brzo ali ponekad ne skeniraju cijelu prostoriju i javlja se mogućnost propusta objekta. Kod većeg broja paketa, npr. 50, povećana je pouzdanost mjerenja, no zato praćenje mete postaje tromo odnosno laser često kasni za metom.

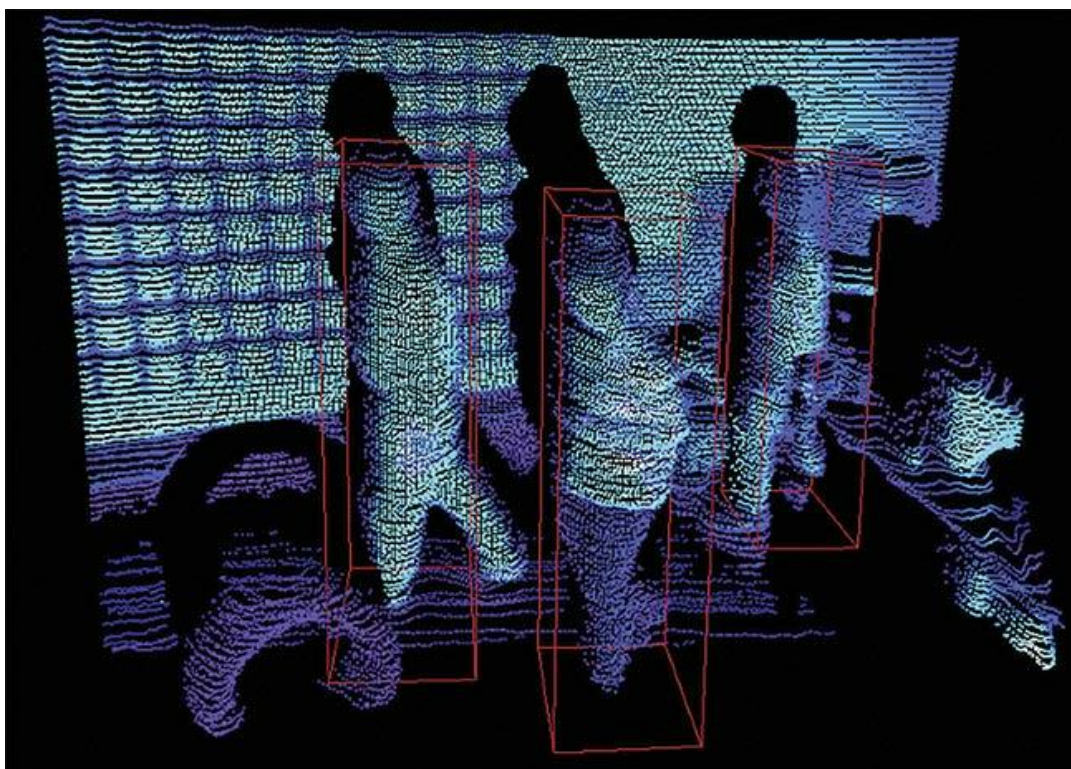
Postavljanje brzine vrtnje koračnog motora ovisi o učestalosti postavljanja kuta zakreta odnosno o broju potrebnih paketa (također indirektno ovisi o brzini kretanja objekta). Najvažnije je to da se koračni motor stigne pozicionirati na zadani kut zakreta prije no što mu se novi kut zakreta postavi. Kada bi se brzina rotacije koračnog motora postavila na preveliku vrijednost može doći do preskakanja koraka uslijed prevelikih kutnih ubrzanja.

Budući da je potrebno neko vrijeme da se trenutno stanje prostorije definira, te da se pronađu promjene od početnog stanja, filtriraju smetnje i pronađe težište objekta, referenca koja se zadaje koračnom motoru uvijek kasni za realnim stanjem. Uz to, potrebno je vrijeme da se koračni motor pozicionira na referentni kut zakreta. Ova kašnjenja prisutna su i u radarskim sustavima bliske obrane. Sustavi bliske obrane to rješavaju praćenjem brzine i smjera kretanja težišta objekta, te se sa tim informacijama može pokušati predvidjeti njegova pozicija poništavajući kašnjenje sustava. To je jedan od načina poboljšanja rada „Stražarnice“. Poboljšanje se također može ostvariti pomoću promjenjivog broja paketa koji određuju stanje prostorije. U tom slučaju odluka o kutu zakreta donosila bi se tek tada kada je cijela prostorija skenirana. Ponekad bi za to bilo potrebno 10 paketa, a ponekad više od 25. Nadalje, implementacijom ubrzanja koračnog motora, rotacija vratila bila bi manje isprekidana i mogle bi se ostvariti veće maksimalne brzine jer bi se izbjegao slučaj preskakanja koraka.

## 4. Zaključak

Sustavi za blisku obranu su kompleksni na razini njihove mehaničke izvedbe i na razini obrade podataka i algoritama. Kako bi sustav bio efektivan u obrani protiv brzih meta kao što su npr. projektili ili zrakoplovi kriteriji su puno strožiji nego kod slučaja obrane protiv ljudskih meta koje se kreću relativno sporo. Zbog same kompleksnosti tih sustava poboljšanje nije ograničeno samo na par aspekata sustava nego postoji cijeli niz dijelova sustava gdje je ono moguće. Pramac razvoja automatskih sustava bliske obrane je obrađen u poglavlju 2.8.

Glavno ograničenje „Stražarnice“ je dostupna vrsta podataka; 2D polje točaka daje malo informacija o njenom okruženju. Glavni prijedlog kod daljnjeg poboljšanja „Stražarnice“ je uporaba senzora koji prikuplja 3D informaciju o njezinom okruženju kao npr. 3D LIDAR. Sa 3D poljem točaka okruženja otvara se puno mogućnosti poboljšanja rada. Izgled prostorije bi generalno bio bolje definiran i u tom slučaju nije se moguće sakriti od senzora krećući se ispod ili iznad horizontalne ravnine na kojoj senzor mjeri udaljenost. Sa više informacija o geometriji okoline moguća je kategorizacija okoline po objektima. Objekti karakteristične geometrije kao što su stolovi, ormarići, stolice, zidovi, ljudi itd. mogu se raspoznati pomoću algoritama za prepoznavanje objekata čime se može poboljšati pouzdanost sustava [Slika 55].



Slika 55 3D polje točaka sa algoritmom prepoznavanja objekata

Slično kao kod automatskih sustava za blisku obranu gdje se uvažavaju samo mjerenja sa Dopplerovim pomakom (mjerenja objekata koja imaju neku relativnu brzinu), implementacijom sličnog algoritma gdje se detektiraju samo pokretne mete, u kombinaciji sa algoritmom prepoznavanja objekata, također se može poboljšati rad. Nakon što je prostorija definirana 3D poljem točaka i objekti su raspoznati, dodavanjem 2. stupnja slobode - rotacije laserske zrake po visini, moguće je ciljanje mete izvan horizontalne ravnine (npr. ciljanje trupa, glave, noge itd.).

Za kraj, postavljanjem stražarnice na pokretnu platformu njeno djelovanje se može proširiti na više prostorija kojima ona može stražariti. Postavljanjem sustava „Stražarnice“ na leteću platformu kao npr. dron može se proširiti njeno djelovanje i na otvorena područja.

## IZVORI

- [1] <https://hrvatski-vojniki.hr/sustavi-za-obranu-od-dronova/>
- [2] <https://www.thalesgroup.com/en/goalkeeper-close-weapon-system>
- [3] <https://www.gd-ots.com/armaments/naval-platforms-system/goalkeeper/>
- [4] <https://web.archive.org/web/20210822212256/https://www.sbir.gov/node/1531759>
- [5] [https://web.archive.org/web/20141104081016/http://www.navy.mil/navydata/fact\\_display.asp?cid=2100&tid=800&ct=2](https://web.archive.org/web/20141104081016/http://www.navy.mil/navydata/fact_display.asp?cid=2100&tid=800&ct=2)
- [6] <https://web.archive.org/web/20111011192439/http://www.navyrecognition.com/index.php/east-european-navies-vessels-ships-equipment/russian-navy-vessels-ships-equipment/weapons-a-systems/123-kashtan-kashtan-m-kashtan-lr-cads-n-1-close-in-weapon-system-ciws-.html>
- [7] <https://web.archive.org/web/20131112012413/http://www.fyjs.cn/viewarticle.php?id=335595>
- [8] [http://www.navweaps.com/Weapons/WNIT\\_4cm-70\\_Breda.php](http://www.navweaps.com/Weapons/WNIT_4cm-70_Breda.php)
- [9] <https://www.youtube.com/watch?v=Hw5IaS6-Fzw>
- [10] <https://www.johnhearfield.com/Radar/Magnetron.htm>
- [11] <https://www.enciklopedija.hr/clanak/radar>
- [12] <https://youtu.be/R70ysC8nWoI?si=xhIMBMzuTrO8DGe8>
- [13] <https://youtu.be/a53Cg3KUTt4?si=4pkw9OJMKiajG6i>
- [14] <https://www.pepperl-fuchs.com/global/en/51480.htm>
- [15] [https://www.aewa.org/Library/rf\\_bands.html](https://www.aewa.org/Library/rf_bands.html)
- [16] <https://youtu.be/p2ify-2DQdE?si=dSuyk8YWxPbGINhf>
- [17] <https://www.techtarget.com/whatis/definition/decibels-relative-to-isotropic-radiator-dBi>
- [18] <https://youtu.be/R70ysC8nWoI?si=8sWKt2VhYgatEJPN>
- [19] <https://youtu.be/EKIzwmjT8SQ?si=Xd79yR6SiohAFzDw>
- [20] [https://youtu.be/XFapyIIzX\\_8?si=BslMnBlS YipcXcmu](https://youtu.be/XFapyIIzX_8?si=BslMnBlS YipcXcmu)
- [21] <https://www.radartutorial.eu/11.coherent/co04.en.html>
- [22] <https://youtu.be/J8W1wkRr1cw?si=ZWSdsOQ5eq5pHbw5>
- [23] <https://cswab.org/does-u-s-military-chaff-contain-pfas/>
- [24] <https://medium.com/@AirPra/discover-the-best-of-chaff-and-flare-in-aerial-defence-3991e1f03ced>
- [25] <https://www.skyradar.com/blog/an-overview-to-electronic-attack-and-the-jamming-classifications#>