

UNIVERZITET SINGIDUNUM
BEOGRAD
DEPARTMAN ZA POSLEDIPLOMSKE STUDIJE

DOKTORSKA DISERTACIJA

**Unapređenje performansi izahorizontskih
radara zasnovano na novoj arhitekturi sistema**

MENTOR:

Prof. dr Mladen Veinović

DOKTORAND:

Bojan Džolić

Broj indeksa: 466119/2018

Beograd, 2023. godine

PODACI O MENTORU I ČLANOVIMA KOMISIJE

Mentor:

Prof. dr Mladen Veinović, mentor, redovni profesor
Univerziteta Singidunum

Članovi komisije:

Prof. dr Mladen Veinović, mentor, redovni profesor
Univerziteta Singidunum

Prof. dr Milan Milosavljević, član, redovni profesor
Univerziteta Singidunum

Dr Vladimir Orlić, komentor, viši naučni saradnik
Institut Vlatacom

Datum odbrane disertacije:

ZAHVALNICA

Zahvaljujem se mentoru prof. dr Mladenu Veinoviću kao i komentoru dr Vladimiru Orliću, na kontinuiranoj podršci, dragocenim savetima i učestvovanju tokom izrade ove doktorske disertacije.

Veliku zahvalnost dugujem Institutu Vlatacom, koji mi je pružio priliku i omogućio vreme i resurse za vršenje istraživanja, kao i veliku podršku tokom izrade disertacije. Takođe, zahvaljujem se i svim članovima tima sektora OTHR, čiji sam bio deo, u istraživanju, razvoju i realizaciji projekata širom sveta, a posebno: dr. Nikoli Stojkoviću, prof. dr. Miljku Eriću, prof. dr. Nikoli Lekiću, master inž. elektr. Pavlu Petroviću, master inž. elektr. Nemanji Grbiću i masteru matematike Kristini Matović.

***Posvećeno deci Irini i Andreju,
supruzi Lidiji,
roditeljima Snežani i Ranku***

REZIME

Istraživanje ove doktorske disertacije rezultiralo je u razvoju naprednog rešenja za praktičnu primenu izahorizontnog radarskog sistema (OTHR). Ovaj doprinos obuhvata suštinske izmene u arhitekturi sistema, kao i hardverskom dizajnu i izradi antenskog niza. Paralelno sa tim, prateće korekcije primenjuju se na softverski segment u smislu optimizacije algoritama za obradu signala. Kroz ovu modifikaciju, ostvarena je sposobnost za preciznu detekciju plovila sa smanjenom refleksivnom površinom. Takođe, dobijeno je povećanje pouzdanosti detekcije na velikim udaljenostima od obale, što doprinosi poboljšanim performansama radarskog sistema u uslovima visokog nivoa smetnji i destruktivnih faktora okoline.

Ostvaren je doprinos u dizajnu predajnog antenskog niza OTHR sistema što omogućuje efikasnu instalaciju u izazovnim terenskim uslovima. Dodatno, ovaj dizajn povećava otpornost sistema na eksterne uticaje kao što su poplave i električna pražnjenja.

Uz to, kroz specifičan dizajn prijemnog antenskog niza, dobijena je veća osetljivost sistema. Ova poboljšanja manifestuju se kroz bolju detekciju ciljeva sa određenim karakteristikama, uključujući dimenzije, brzinu, položaj i udaljenost od radara.

Dat je doprinos i izučavanju uticaja morskog klatera na obradu radarskog signala, posebno na pojavu Bragovih linija na određenim Doplerovim frekvencijama, što može zakloniti potencijalne ciljeve. Upotreba simultanih radnih frekvencija prevazilazi ovaj izazov i omogućava otkrivanje brodova maskiranih Bragovim linijama.

Napredak u senzitivnosti u poređenju sa tradicionalnom OTHR arhitekturom ostvaren je dodavanjem većeg broja antenskih elemenata u prijemnom nizu. Ovo otvara mogućnost detekcije ciljeva koji su inače na samoj granici detekcije.

Razvijeni su i implementirani sofisticirani algoritmi za detekciju i praćenje ciljeva, što proširuje mogućnosti detekcije plovila sa malim radarskim površinama.

Sve u svemu, osnovni izazov koji je ovom doktorskom disertacijom rešen dobijen je kroz razvoj novih OTHR arhitektura, kroz unapređenje hardvera i softvera različitih OTHR arhitektura čime su poboljšane performanse uključujući funkcionalnost, robusnost, osetljivost i pouzdanost u detekciji i praćenju ciljeva, koje su omogućile instalaciju ovih sistema širom sveta.

Ključne reči: HF frekvencijski opseg, kontrola morske površine, HF-OTHR, prijemnik, predajnik, antenski sistem, Bragove linije, Doplerova frekvencija, simulacija OTHR, arhitekture OTHR, detekcioni algoritmi, procena i uporedne karakteristike OTHR arhitekture

Naučna oblast: Telekomunikacije, računarstvo i informatika

ABSTRACT:

The research of this doctoral dissertation resulted in the development of an advanced solution for the practical application of an over-the-horizon radar system (OTHR). This contribution includes fundamental changes in system architecture as well as hardware design and antenna array manufacturing. In parallel, accompanying corrections are applied to the software segment in terms of optimization of signal processing algorithms. This modification made it possible to accurately detect vessels with a reduced reflective surface. Also, an increase in the reliability of detection at long distances from the coast was obtained, which contributes to the improvement of the performance of the radar system in conditions of a high level of interference and destructive environmental factors.

A contribution was made to the design of the transmitting antenna array of the OTHR system, which enables efficient installation in challenging field conditions. In addition, this design increases the system's resistance to external influences such as floods and electrical discharges.

In addition, through the specific design of the receiving antenna array, a higher sensitivity of the system was obtained. These improvements are manifested through better detection of targets with certain characteristics, including size, speed, position and distance from the radar.

A contribution was also made to the study of the effect of sea clutter on radar signal processing, in particular the appearance of Bragg lines at certain Doppler frequencies, which can obscure potential targets. The use of simultaneous operating frequencies overcomes this challenge and enables the detection of ships masked by Bragg lines.

The improvement in sensitivity compared to the traditional OTHR architecture was achieved by adding more antenna elements in the receiving array. This opens up the possibility of detecting targets that are otherwise at the very limit of detection.

Sophisticated algorithms for target detection and tracking have been developed and implemented, thus expanding the detection capabilities of vessels with small radar surfaces.

All in all, the main challenge that this doctoral dissertation solved was obtained through the development of new OTHR architectures, through the improvement of hardware and software of different OTHR architectures, which improved performance including functionality, robustness, sensitivity and reliability in target detection. and monitoring, which enabled the installation of these systems worldwide.

Keywords: HF frequency range, sea surface control, HF-OTHR, receiver, transmitter, antenna system, Bragg lines, Doppler frequency, OTHR simulation, OTHR architectures, detection algorithms, evaluation and comparative characteristics of OTHR architectures

SADRŽAJ

SPISAK TABELA.....	9
SPISAK SLIKA	10
LISTA SKRAĆENICA I STRANIH IZRAZA	13
1. UVOD.....	14
2. OTHR - POSTOJEĆE ARHITEKTURE I OBRADA SIGNALA	16
2.1 Specifičnost korišćenja HF opsega u radio lokaciji.....	16
2.2 Obrada OTHR signala	18
2.2.1 Obrada po daljini	20
2.2.2 Obrada po dopleru.....	21
2.2.3 Obrada po azimutu	22
2.2.4 CFAR.....	23
2.3 Dizajn OTHR sistema	23
2.3.1 Optimizacija predajnog antenskog niza.....	25
2.3.2 Simulacije predloženih rešenja koristeći WIPL-D	29
2.3.3 Testiranje niza na terenu i dobijeni rezultati	33
2.4 Mreža OTHR Sistema.....	36
3. OTHR SIMULATOR	38
3.1 Koncept OTHR simulatora:	39
3.2 Primer simulacije	50
4. NOVE ARHITEKTURE OTHR SISTEMA	58
4.1 Monostatičke arhitekture OTHR radara.....	58
4.1.1 Monostatička arhitektura sa jednom radnom frekvencijom.....	59
4.1.2 Monostatička arhitektura sa dve radne frekvencije.....	68
4.2 Bistatička arhitektura OTHR radara	71
4.2.1 Arhitektura bistatičkog radara	71
4.2.2 Formulacija problema procene range-a i doplera kod bistatičkog radara	78
4.2.3 Procena udaljenosti cilja RRx od prijemnog niza bistatičkog radara.....	78
4.2.4 Procena Doplerovog pomaka kod bistatičkog radara	81
4.2.5 Bragove linije kod bistatičkog radara	82
4.2.6 Rezultati provere funkcionalnosti bistatičkog radara	82
5. KVLITATIVNA OCENA PERFORMANSI ARHITEKTURE I DETEKCIONIH ALGORITAMA OTHR.....	83
5.1 Rezultati poređenja.....	87
6. DOPRINOS DISERTACIJE	97

7. ZAKLJUČAK	99
8. LITERATURA.....	100

SPISAK TABELA

Tabela 1 – Ulazni parametri radara.....	51
Tabela 2 – Ulazni parametri za estimaciju okruženja	52
Tabela 3 Ulazni parametri za simulirane brodove	52
Tabela 4 – Procenjeni RCS za 4,6 MHz i 7 MHz i klasifikacija veličine brodova.....	52
Tabela 5 – Postignuti rezultati analize uticaja stanja mora na proces praćenja plovila(sve vrednosti su prikazane u kilometrima)	54
Tabela 6 – Postignuti maksimalni domet detekcije u scenariju sa radijalnim kretanjem plovila za radnu frekvenciju 4,6 MHz (sve vrednosti su prikazane u kilometrima)	56
Tabela 7 – Postignuti maksimalni domet detekcije u scenariju sa radijalnim kretanjem plovila za radnu frekvenciju 7 MHz (sve vrednosti su prikazane u kilometrima)	57

SPISAK SLIKA

Slika 2.1 Gubici u prostiranju iznad morske površine u jednom smeru, program GRWAVE	16
Slika 2.2 Uticaj aspektnog ugla na veličinu radarske površine brodova.....	17
Slika 2.3 Oblik radnog signala.	18
Slika 2.4 Blok dijagram prijemnog kanala OTHR.....	19
Slika 2.5 Obrada signala u okviru OTHR prijemnika.	20
Slika 2.6. Prikaz obrade signala po daljini, u okviru OTHR prijemnika.	21
Slika 2.7. Prikaz obrade signala po Dopleru, u okviru OTHR prijemnika.	22
Slika 2.8. Prikaz obrade signala po azimutu, u okviru OTHR prijemnika.	22
Slika 2.9 Prikaz primene CFAR algoritma, u okviru OTHR prijemnika.....	23
Slika 2.10 Tipična konfiguracija lokacije HFSW radara	24
Slika 2.11 Dimenzije OTHR sajta za frekvenciju od 4.6 MHz.	24
Slika 2.12. Standardni dizajn predajnog antenskog niza OTHR sistema.	25
Slika 2.13 Formirani dijagrami zračenja	27
Slika 2.14 Primer instalacije vertikalnog monopola	28
Slika 2.15 Geometrija Tx niza sa uključenim gromobranskim stubovima	29
Slika 2.16 Model monopol antene sa radijalima instaliranim na zemlji. Parametri dielektrika su $\epsilon_r=10$, $\sigma=0,002$ S/m za pesak u obalnim područjima [24] i $\epsilon_r=70$, $\sigma=5$ S/m [25] za more. Radijacioni oblik - vertikalni presek, $\Theta=[0-90]^\circ$	30
Slika 2.17 Dijagram zračenja – vertikalni presek.....	31
Slika 2.18 3D polarni prikaz predajnog niza [dB].....	32
Slika 2.19 Dijagram zračenja predajnog niza – horizontalni presek, $\Theta=8^\circ$	33
Slika 2.20 Poređenje VSWR rezultata: Levo – antena zajedno sa radijalima insalirana na zemlji; Desno - izdignuta instalacija	34
Slika 2.21 Nivo signala na prijemnoj anteni.....	34
Slika 2.22 OTHR predajni antenski niz.....	35
Slika 2.23 OTHR predajni antenski niz.....	36
Slika 2.24 Ukupna zona pokrivanja formirana zajedničkim radom više OTHR.	37
Slika 3.1 Blok-šema „OTHR” simulatora	40
Slika 3.2 Ulazni scenario za funkciju radarskog modela.....	42
Slika 3.3 – Model gubitaka u prostiranju signala iznad uzburkanog mora	45
Slika 3.4 Model eksternog HF šuma tokom svih godišnjih doba (W_i – zima, S_p – proleće, leto, jesen; 08h, 16 h i 24 h označavaju doba dana; vrednosti na Y osi predstavljaju nivo	

snage šuma iznad praga šuma (-174 dBm/Hz); vrednosti su prikazane za radnu frekvenciju 7 MHz)	46
Slika 3.5 Uticaj incidentnog ugla između radara i plovila	48
Slika 3.6 Model radarske refleksne površine	49
Slika 3.7 – RCS raspodela modela plovila sračunata pomoću OTHR simulatora. a) Model plovila WIPL-D i tabela sa rezultatima RCS vrednosti za simulirani brod, b) RCS izračunat na 4,6 MHz, c) RCS izračunat na 11 MHz i d) RCS izračunat na 6,8 MHz	49
Slika 3.8 Dijagram toka OTHR simulatora.....	51
Slika 3.9 Početno podešavanje scenarija #01, početni položaji posuda za uzorke su označeni strelicama u boji.	53
Slika 3.10 Inicijalna postavka scenarija #02(putanje brodova prikazane su crvenim linijama).....	56
Slika 4.1 Izgled Bragovih lina za frkvencije 8.5 MHz – levo i 15 MHz – desno	59
Slika 4.2 Blok šema monostaticke arhitekture OTHR radara na 9.2 MHz sa 32 Rx antene, instaliranog na poligonu.....	60
Slika 4.3 Višekanalni analogni prijemni sistem	61
Slika 4.4 Blok sema 32-kanalnog 24-bitnog AD modula.....	62
Slika 4.5 Model signala FMCW radara.....	63
Slika 4.6 Monostaticka arhitektura OTHR radara na 9.2 MHz sa 32 Rx antene, instaliranog na poligonu.....	64
Slika 4.7 Realna komponenta signala sa 32 antene na 9.2 MHz nakon miksera.....	65
Slika 4.8 Imaginarna komponenta signala sa 32 antene na 9.2 MHz nakon miksera	65
Slika 4.9 Modul signala sa 32 antene na 9.2 MHz nakon miksera.....	66
Slika 4.10 RD mapa za snimak signala sa 32-kanalnog prijemnog sistema na 9.2 MHz	66
Slika 4.11 Aplikacija za prikaz i praćenje meta kod OTHR sistema sa jednom random fekvencijom i 32 antene.....	67
Slika 4.12 Detaljnija blok šema arhitekture OTHR radara za bi-frekvencijski rad korišćna za ispitivanje detektibilnosti malih čamaca.....	68
Slika 4.13 Modul signala sa 16 antena na 4.6 MHz nakon miksera.....	69
Slika 4.14 Modul signala sa 16 antena na 9.2 MHz nakon miksera.....	69
Slika 4.15 RD mapa za 16 antena na 4.6 MHz (levo) i 16 antena za 9.2 MHz (desno) ...	70
Slika 4.16 Aplikacija za prikaz i praćenje meta kod bi-frekvencijskog OTHR sistema.....	70
Slika 4.17 Razmeštaj Rx i Tx elemenata instalirane bistaticke arhitekture OTHR radara	72
Slika 4.18 Prevoz i instalacija Tx kontejnera bistatičkog radara	73
Slika 4.19 Postavljanje Tx antenskog niza na poligonu.....	73
Slika 4.20 Pozicija Tx kontejnera u odnosu na Tx antenski niz na poligonu	74

Slika 4.21 VSWR Tx aktivnih antenna bistatickog radara na 16.4 MHz pri čemu su odspojeni kratkospojnici na reflektorskim antenama	75
Slika 4.22 Blok šema integracije 24-bitne AD konverzije 16-antenske arhitekture bistatičkog OTHR radara za rad na nominalnoj frekvenciji 16.4 MHz	75
Slika 4.23 Blok šema integracije 24-bitne AD konverzije 32-antenske arhitekture OTHR radara za rad na nominalnoj frekvenciji 9.6 MHz	76
Slika 4.24 Blok šema integracije Tx sajta 16-antenske bistatičke arhitekture OTHR radara na poligonu.....	76
Slika 4.25 Blok šema integracije Rx sajta 16-antenske bistatičke i 32-antenske monostatičke arhitekture OTHR radara na poligonu	77
Slika 4.26 Geometrija bistatičke arhitekture OTHR radara	79
Slika 4.27 Isorange krivulje monostatičkog i bistatičkog radara.....	80
Slika 4.28 Rezolucija po range-u kod bistatičkog radara [58].	81
Slika 4.29 Prikaz akviziranih signala sa 16 antena u trajanju jednog frejma a) realna komponenta, b) imaginarna komponenta c) apsolutna vrednost.....	83
Slika 5.1 Zavisnost ToT parametra od rastojanja	89
Slika 5.2 Vrednosti ToT parametra za različite intervale rastojanja	89
Slika 5.3 Zavisnost ToT parametra od ugla.....	90
Slika 5.4. Zavisnost verovatnoće detektabilnosti od rastojanja.....	91
Slika 5.5 Zavisnost verovatnoće detektabilnosti od ugla	92
Slika 5.6 Zavisnost verovatnoće detektabilnosti od radijalne brzine	93
Slika 5.7 Zavisnost verovatnoće tačnih detekcija od rastojanja	94
Slika 5.8 Zavisnost verovatnoće tačnih detekcija od ugla	95
Slika 5.9 Zavisnost verovatnoće tačnih detekcija od radijalne brzine	96
Slika 6.1 Prostorni razmeštaj linearnog 16-elementnog prijemnog antenskog niza	97
Slika 6.2. Razmeštaj elemenata predajnog niza	98

LISTA SKRAĆENICA I STRANIH IZRAZA

MW – Micro Wave
EM – Electro Magnetic
EO – Electro Optic
NM - Nautical Miles
OTHR – Over The Horizon Radar
FMCW - Frequency Modulated Continuous Wave
HFSW - High Frequency Surface Wave
HF-OTH-B – High Frequency Over The Horizon Backscetter
RCS – Radar Cross Section
EEZ – Exclusive Economic Zone
AD – Analogue to Digital
CFAR - Constant False-Alarm Rate
FFT – Fast Fouirer Transformation
RDA Cube - Range Doppler Azimuth Cube
CIT - Coherent Integration Time
TC - Training Cell
CUT - Cell Under Test
SNR – Signal to Noise Ratio
VSWR - Verifying Standing Wave Ratio
C2 Centre – Command and Control Centre
LAT – Lattitude
LON - Longitude
RFoF - Radio Frequency over fiber
PPS – Pulse Per Second
GPS – Global Positioning System
CPLD - Complex Programmable Logic Device
AIS – Automatic Indentificaton System
COG - Course Over Ground
SOG - Speed Over Ground

1. UVOD

Konvencijom Ujedinjenih Nacija o pravu mora iz 1982. godine uređeni su pravni efekti akta koji definiše to da svaka država koja ima izlaz na more ima pravo proglasiti ekskluzivnu ekonomsku zonu. EEZ je područje koje se nalazi izvan teritorijalnih voda, a u pojasu do 200 NM od kopna u okviru kojeg priobalne države imaju suvereno pravo delovati u skladu sa svojim interesima [1]. Mogućnost nezakonite eksploatacije mineralnih i bioloških resursa, krijumčarenje, ilegalna mitigacija, međunarodni terorizam i kriminalne aktivnosti su neki od razloga za potrebu neprekidnog nadgledanja EEZ. Kontrolisanje ove zone predstavlja tehnološke, finansijske i organizacione izazove.

Kako bi se ostvarilo konstantno pokrivanje tako velike vodene površine mogu se koristiti različiti tipovi senzora kao što su optički i mikrotalasni senzori. Međutim, u zavisnosti od talasnog opsega u kome rade, mikrotalasni i optički senzori imaju fizička ograničenja u vezi svoga dometa – zone pokrivanja. Trenutni sistemi za nadzor mora koji koriste ove tipove senzora mogu detektovati plovila koja se nalaze na maksimalnom rastojanju od 40 km do 60km od obale. Standardni mikrotalasni radari imaju ograničenja u dometu zbog zakrivljenost Zemljine površine i slabljenje usled propagacije signala. Elektro optički (EO) senzori su često ometani slabom vidljivosti obično uslovljeni vremenskim uslovima i dano-noćnim ciklusima. Još jedan problem EO kamera je taj da nisu napravljene za osmatranje velikih površina zbog uskog ugla vidljivosti i prvenstvena namena je vizualizacija već detektovanog objekta putem MW radara.

Da bi se ta zona pokrivanja povećala iza horizonta, neophodno je upravo te senzore postaviti na mobilne platforme - brodove, avione, helikoptere, bespilotne letelice, satelite, itd., koje bi patrolirale morem i slali informacije komandno kontrolnom centru o aktivnostima unutar EEZ. Uprkos činjenici da je ovakav vid nadzora EEZ novčano neisplativ, takođe ima još inherentnih nedostataka. Kao prvo, na ovakav način nije moguće nadgledati kompletnu EEZ i osvežavati celokupnu sliku u realnom vremenu, jer avion ili brod može da nadgleda samo određenu površinu u jednom vremenskom intervalu, tako da bi se osvežavanje novim informacijama sa te površine radilo na nekoliko dana. Drugo, loši vremenski uslovi mogu da otežaju, a nekad i potpuno onemogućavaju upotrebu mobilnih platformi u kontroli iza horizonta.

Rešenje za nadgledanje morske površine iza horizonta upravo leži u korišćenju dobro dizajniranih radara koji rade u HF frekventnom opsegu od 3 do 30 MHz. U ovu kategoriju spadaju dva tipa radara – radari koji koriste osobinu refleksije elektromagnetnih talasa od jonosfere (HF-OTH-B) i radari koji koriste osobinu vertikalno polarizovanih elektromagnetnih talasa koji prate zakrivljenost Zemljine površine (HF-SW-OTHR), [2] – [4]. HF-OTH-B radari mogu ostvariti veoma velike domete koji idu i do par hiljada kilometara. Glavni nedostatak ovih radara je „slepa zona“ što predstavlja oblast koja se prostire od same pozicije radara pa do nekoliko stotina kilometara u pravcu glavnog snopa zračenja, iz koje nije moguće detektovati

bilo kakav objekat. Zbog ovog nedostatka ovaj tip radara nije pogodan za nadgledanje EEZ. HFSW-OTHR radar koristi površinske talase koji se mogu prostirati nekoliko stotina kilometara iznad provodne površine. Prvenstveno su razvijeni za okeanografska istraživanja, HFSW-OTHR radari nalaze sve veću primenu u nadgledanju EEZ. Uvezivanjem više HFSW-OTHR radara realizuju se radarske mreže kojima se obezbeđuje kontrola i nadgledanje veće površine [5]. Troškovi korišćenja ove vrste senzora su manji u odnosu na druge načine kontrole morske površine iza horizonta.

U okviru ovog projekta su razmotrena najvažnija pitanja na koja se nailazi u procesu projektovanja, razvoja, instalacije i eksploatacije HFSW-OTHR radara. Detaljno je prikazan proces formiranja namenskog antenskog niza na predajnom delu HFSW-OTHR radara, namenjenog za rad u praktičnim terenskim uslovima. Posebno projektovanje je neophodno kako ako bi radar ove vrste postigao optimalne performanse u zahtevnom okruženju, poput ekvatorijalnih geografskih oblasti, u kojima je lokacija za instalaciju sistema standardno karakterisana niskom obalom, čestim olujama i jakim padavinama tokom većeg dela godine, koje rezultuju čestim plavljenjem lokacije. Istovremeno, cena kompletnog dizajna predstavlja značajan limitirajući faktor u praktičnoj realizaciji, budući da većina zemalja u ekvatorijalnim oblastima ekonomski spada u kategoriju zemalja u razvoju. Proces formiranja antenskog niza započinje teorijskim razmatranjima – matematičkom formulacijom, zatim se nastavlja kroz analizu u softveru za elektro-magnetnu (EM) simulaciju, da bi potom bio i praktično testiran u terenskim uslovima. Na osnovu rezultata dobijenih u ovakvoj proceduri, antenski nizovi HFSW-OTHR se instaliraju na realnim lokacijama i radari se nalaze u operativnoj upotrebi. Konačna potvrda kvaliteta kreiranih rešenja dobija se kroz svakodnevnu upotrebu instaliranih HFSW-OTHR u periodu od više godina, u zahtevnim radnim uslovima koji karakterišu okruženje ekvatorijalnih geografskih oblasti. Različite strukture / arhitekture radarskog sistema takođe su razmatrane, sa ciljem da se dostignu najbolje performanse u smislu detekcije i praćenja ciljeva u realnim uslovima kontrole pomorskog saobraćaja na velikim rastojanjima od obale.

Disertacija započinje opsežnim pregledom oblasti u poglavlju 2, koje uključuje specifično korišćenje HF opsega za potrebe implementacije radarskih sistema, prikaz načina funkcionisanja HFSW-OTHR i metoda obrade signala specifičnih za ove radarske sisteme, dizajn OTHR sistema u praktičnoj implementaciji sa posebnim naglaskom na realizaciju njegovog antenskog podsistema. U poglavlju 3 opisan je OTHR simulator, koji je razvijen u okviru Instituta Vlatacom i koristi se za analizu pogodnosti terena i radarskog okruženja za potencijalnu instalaciju samog OTHR sistema. U poglavlju 4 opisane su nove arhitekture OTHR sistema i prikazani rezultati testiranja na terenu. U poglavlju 5 opisana je kvalitativna ocena performansi novih algoritama korišćenih u razvoju nove verzije OTHR sistema. U poglavlju 6 je istaknut naučni doprinos, dok su u poglavlju 7 izloženi zaključci disertacije i pravci daljeg istraživanja. U poglavlju 8 su navedeni mogući izvori podataka tokom rada na projektu, relevantna literatura i reference od značaja u samoj oblasti istraživanja.

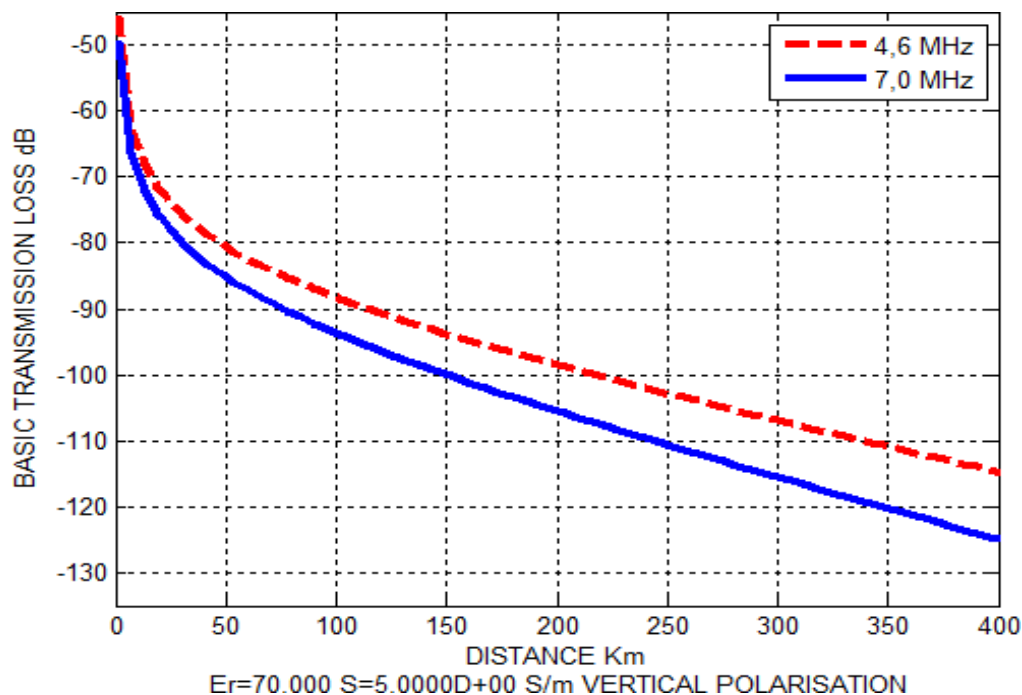
2. OTHR - POSTOJEĆE ARHITEKTURE I OBRADA SIGNALA

2.1 Specifičnost korišćenja HF opsega u radio lokaciji

Domet HFSW radara zavisi od različitih faktora od kojih su najvažniji: radna frekvencija, električne karakteristike površine iznad koje se prostire EM talas, stanja mora, pravac vetra, pravac kretanja talasa, radarska površina cilja, nivo atmosferskog, kosmičkog i industrijskog šuma [6] – [9].

Gubici u prostiranju površinskih talasa zavise od radne frekvencije radara, zakrivljenosti i električnih karakteristika površine. Što je manja provodljivost površine veći su gubici. Slana morska voda u odnosu na suhu zemlju ima bolju provodljivost i gubici su manji. Za vodene površine, nivo saliniteta određuje električne karakteristike, [10]. Sa povećanjem frekvencije gubici u prostiranju površinskog talasa su veći, Slika 2.1.

Na dodatne gubitke u prostiranju HF površinskih talasa utiče talasnost površine. U slučaju morske površine, visina morskih talasa je uzrok dodatnih gubitaka u prostiranju površinskih talasa. Stanje mora zavisi od brzine vetra i trajanju dužine puta na kojem vetar deluje na površinu mora i izražava se skalom od 0 do 9. Veći broj na skali odgovara većoj visini talasa što dovodi do većih gubitaka u prostiranja. Analiza za stanje mora od 0 do 6 pokazuje da povećanje frekvencije radara ima za posledicu povećanje gubitaka u prostiranju. Na gubitke utiče i ugao koji pravac vetra zaklapa sa pravcem prostiranja površinskih talasa [11].



Slika 2.1 Gubici u prostiranju iznad morske površine u jednom smeru, program GRWAVE

U HF opsegu na domet radara prvenstveno utiče nivo eksternog šuma pod kojim podrazumevamo ukupni šum koji je posledica atmosferskih, kosmičkih ili veštačkih izvora.

Atmosferski šum zavisi od geografske lokacije, godišnjeg doba: zima (decembar, januar, februar), proleće (mart, april, maj), leto (jun, jul, avgust), jesen (septembar, oktobar, novembar), vreme dana/noći: (00-04, 04-08, 08-12, 12-16, 16-20, 20-24), [13]. Veštački šum zavisi od regiona (ruralna zona, naseljeno mesto ili industrijska zona). U opštem slučaju nivo šuma je veći za niže frekvencije.

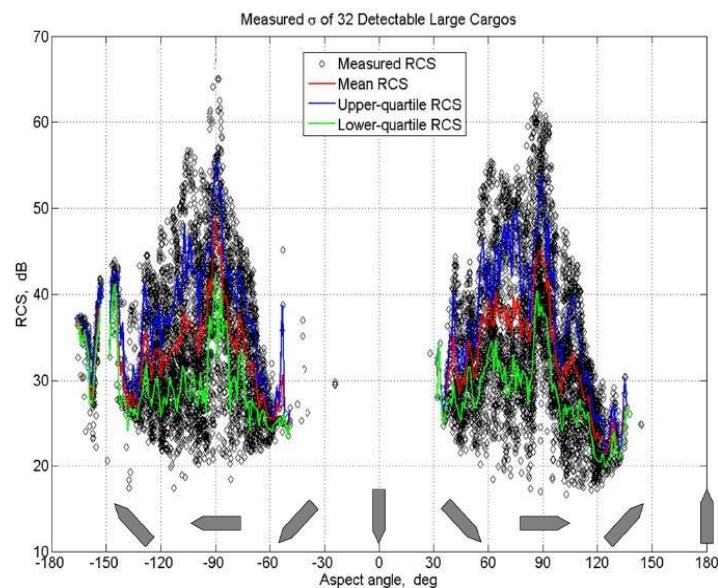
Uticao spoljnog šuma i nivo interferencije dominantno ograničava sposobnost detekcije HFSW radarskog sistema.

Brod kao radarski cilj u HF opsegu ima određene specifičnosti u odnosu na S i X radarski opseg, od kojih je najvažnija dimenzija u odnosu na talasnu dužinu. HF opseg ima talasne dužine od 10 m do 100 m, što u odnosu na fizičke dimenzije broda, ima za posledicu da dužina broda može biti i manja od jedne talasne dužine, pa do par desetina talasnih dužina.

HFSW radari koriste vertikalno polarizovane elektromagnetske talase. Na brodovima su uobičajene vertikalne strukture - nosači, dizalice, koje u značajnoj meri utiču na refleksiju elektromagnetskih talasa, jer se ponašaju kao rezonantne antene [14].

Relativni ugao pod kojim se vidi brod u odnosu na pravac radar brod (aspektni ugao), utiče na nivo reflektovanog signala, Slika 2.2.

Refleksije od morskih talasa predstavljaju klater kod HFSW radara. Glavni mehanizam interakcije između elektro- magnetnih talasa i morskih talasa je Bragovo rasejanje. Ova dominantna pojava je posledica rasejanja koje potiče od morskih talasa čije je međusobno rastojanje polovina talasne dužine radara i kreću se radialno u odnosu na radar.



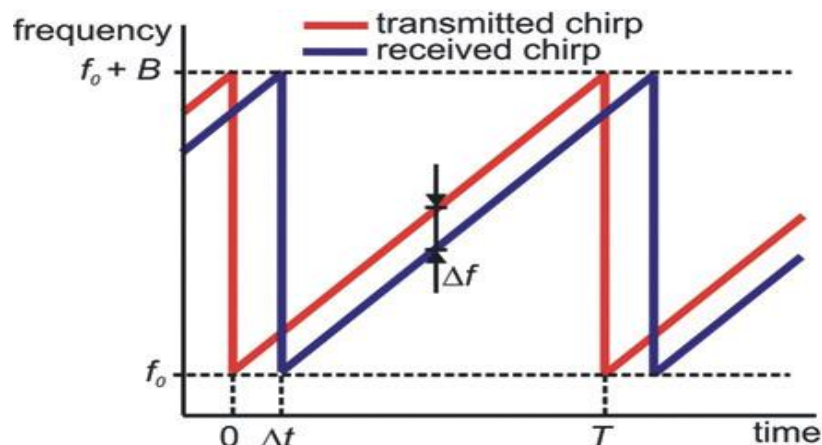
Slika 2.2 Uticaj aspektnog ugla na veličinu radarske površine brodova.

Rezonantno rasejanje prvog reda ima za posledicu dva dominantna vrha u Doplerovom spektru i oni se zovu Bragove linije. Rasejanje drugog reda je uzrokovano interakcijom između površinskog talasa i ostalih morskih talasa, što dovodi do bočnih opsega oko Bragovih linija. Ove Bragove linije mogu negativno uticati na detekciju brodova, jer njihove odraze mogu da maskiraju [16].

Na kraju, HF opseg ima talasne dužine od 10m do 100m što ima za posledicu da antene HFSW radara, realizovane kao žičane strukture, imaju velike dimenzije.

2.2 Obrada OTHR signala

HFSW OTHR predstavlja sistem daljinskog osmatranja koji se instalira direktno na obali i koristi izahorizontsku radarsku tehnologiju za detektovanje i praćenja plovila. S obzirom na to da je cilj ostvariti ekstremno velike domete ovaj sistem za radne frekvencije koristi frekvencije iz opsega od 4 do 20 MHz koje odgovaraju talasnim dužinama od 75 do 15m, respektivno. Kako bi se ostvarili veliki dometi sistem je dizajniran da koristi vertikalno polarizovane elektro-magnetni (EM) talase. Vertikalno polarizovani EM talas se spreže sa provodnom površinom mora prateći zakrivljenost zemljine površine. Na taj način je moguće ostvariti domete iza linije horizonta uspešno pokrivajući kompletnu EEZ.



Slika 2.3 Oblik radnog signala.

S obzirom na to da je spektar u HF opsegu jako „zagađen“ (dosta je izražen morski klater) HFSW OTHR koristi frekvencijski modulirane kontinualne EM talase (Frequency Modulated Continuous Wave - FMCW), kao što je prikazano na Slika 2.3. Za vreme trajanja čirpa τ frekvencija f linearno raste u okviru definisane širine kanala B . Pretpostavka je da se pozicija mete ne menja u okviru trajanja jednog čirpa τ . Primljeni čirp je zakašnjen za Δt , što odgovara rastojanju (R) potencijalne mete:

$$\Delta t = \frac{2R}{c}$$

gde c predstavlja brzinu svetlosti. S obzirom na to da je chirp linearan Δt odgovara razlici frekvencija predajnog i primljenog signala i naziva se bit frekvencija - Δf . Doplerova frekvencija detektovanog signala će izazvati promenu u bit frekvencijama u svakom od primljenih chirpova. Relacija između domera (R) i bit frekvencije (Δf) je data sledećom formulom:

$$R = \frac{c \Delta f}{2 B} \tau$$

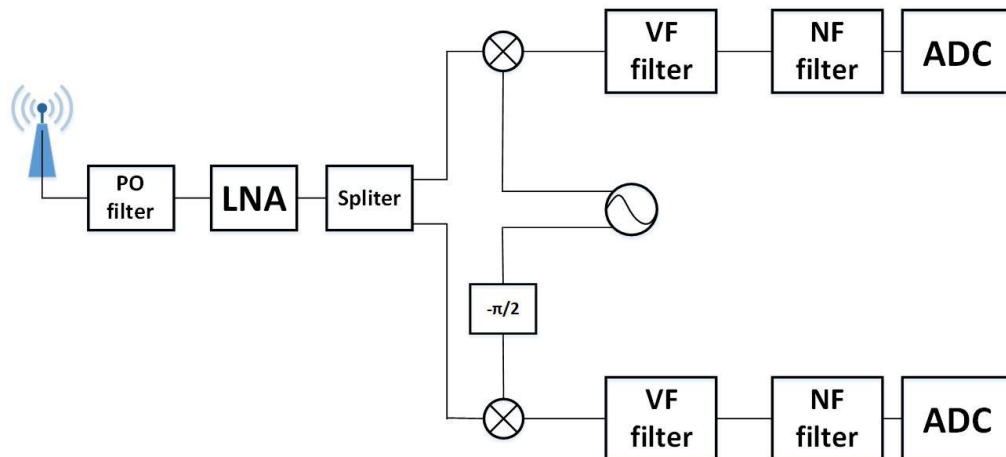
Kako bi se odredili vektori za domet na svaki čirp se primenjuje Brza Furijeva Transformacija (*Fast Fourier Transform - FFT*). Rezoluciona ćelija ΔR je proporcijalna rezoluciji FFT-a koja direktno zavisi od širine kanala B . Na taj način dubina rezolucione ćelije je matematički opisana sledećom formulom:

$$\Delta R = \frac{c}{2B}$$

Što je širina kanala veća – uža je rezoluciona ćelija, a time se povećava rezolucija celog sistema. Većom rezolucijom sistema postiže se mogućnost detekcije više brodova na jako bliskim rastojanjima. Međutim, povećanjem širine kanala zauzima se veći prostor u radio spektru pa je stoga potrebno naći optimalan odnos za aplikaciju od interesa.

Za aplikaciju koja se odnosi na praćenje morskih brodova optimalna vrednost širine radio kanala je $B=100$ KHz, što odgovara širini rezolucione ćelije od $\Delta R=1.5$ km.

Ugao pokrivanja po azimutu iznosi $\pm 60^\circ$ u odnosu na osu prijemnog niza (boresight). Prijemni niz se sastoji od 16 antenskih elemenata koji su raspoređeni duž obale. Blok dijagram prijemnih kanala je prikazan na Slika 2.4.



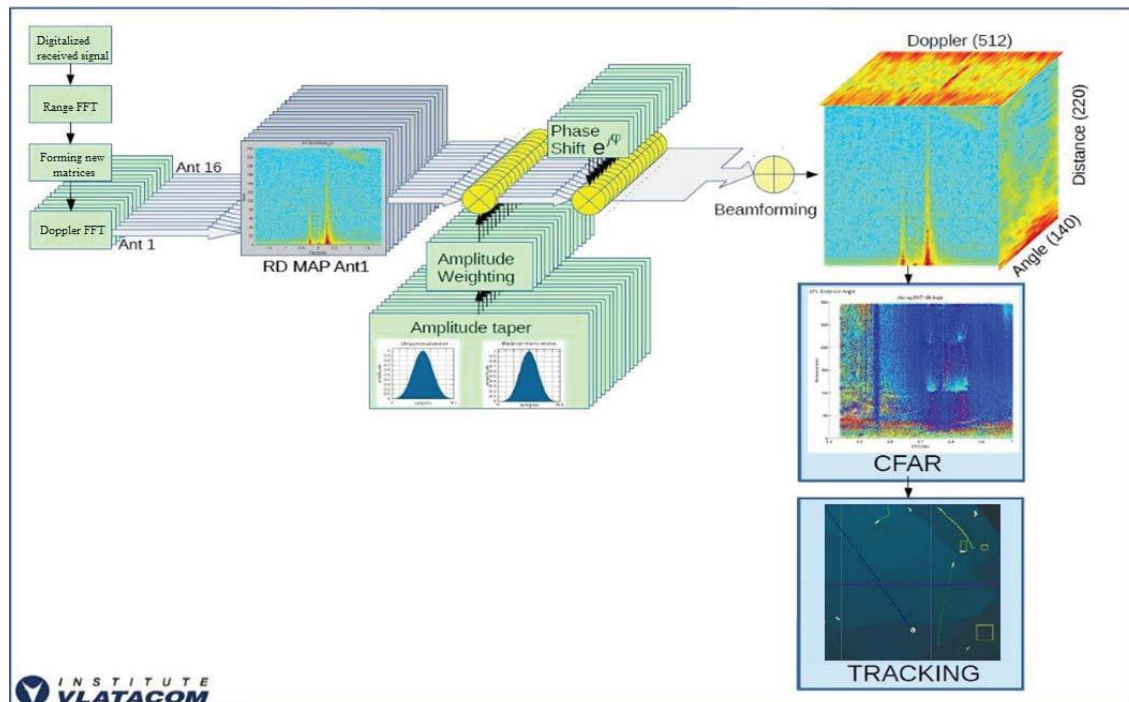
Slika 2.4 Blok dijagram prijemnog kanala OTHR.

Primljeni signal se na svakom kanalu zasebno obrađuje. Prvo se deli na zasebnu I i Q granu. Nakon toga se preko miksera spusta u osnovni opseg tako što se množi sa replikom emitovanog signala. Kako prijemni signal slabi sa četvrtim stepenom rastojanja od mete u slobodnom prostoru [17], a još više u slučaju prostiranja površinskog talasa zbog gubitka energije u medijumu (površina mora) očekuje se da refleksije od objekata koji se nalaze u neposrednoj blizini radara dosta veće po snazi

od refleksija od udaljenih meta. Baš te „jake“ refleksije od bliskih objekata teraju AD konvertor u zasićenje. Kako bi se povećao dinamički opseg AD konvertora neophodno je uvesti filter visokih učestanosti, koji ima zadatak da potisne komponente od 0Hz do 70 Hz. Takođe se uvodi još jedan filter propusnik niskih učestanosti do 1 kHz kako bi se potisnule slike signala koje se prilikom demodulacije javljaju na $2f_{dem.}$. Granična učestanost ovog filtera nije fiksna vrednost i definiše se u zavisnosti od maksimalnog dometa radara.

Signal u osnovnom opsegu se šalje na analogno-digitalni (AD) konvertor. Posle AD konvertora signal se šalje na blok za digitalnu obradu. U ovom bloku signal prolazi kroz sve osnovne faze obrade:

1. Obrada po daljini,
2. Obrada po dopleru,
3. Obrada po azimutu (uglu)
4. CFAR
5. Praćenje meta

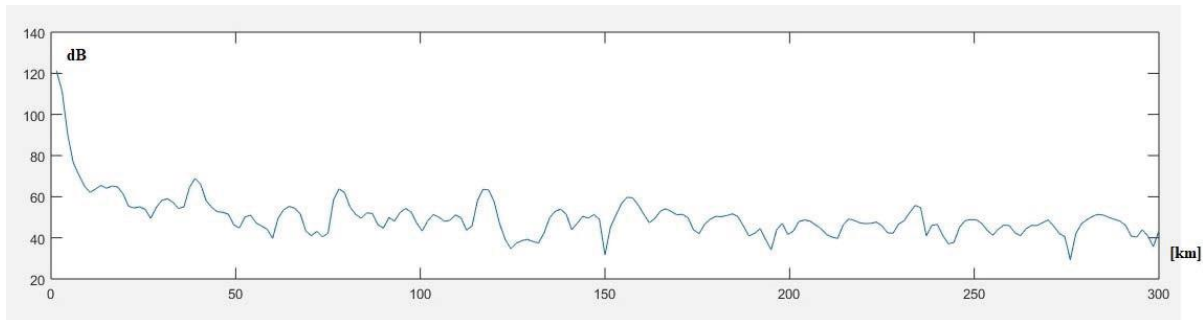


Slika 2.5 Obrada signala u okviru OTHR prijemnika.

2.2.1 Obrada po daljini

Signal na izlazu iz AD konvertora predstavlja digitalizovanu kompleksnu anvelopu prijemnog signala demodulisanog u osnovni opseg. Prijamni signal čija je vrednost kašnjenja $\Delta t=0s$ će se nakon množenja i filtriranja translirati na učestanost od 0 Hz. Što je kašnjenje prijemnog čirpa veće to će komponenta spektra demodulisanog signala koja odgovara toj refleksiji biti udaljenija od 0 Hz. Primenom FFT (Range FFT)

na odbirke demodulisanog signala dobija se spektar koji sadrži informaciju o udaljenosti svih potencijalnih meta od radara, Slika 2.6.



Slika 2.6. Prikaz obrade signala po daljini, u okviru OTHR prijemnika.

2.2.2 Obrada po dopleru

Range FFT se primenjuje za svaki čirp i rezultat se smesta u kolone matrice dimenzije $N_R \times N_D$. N_R predstavlja odbirke po daljini (R) – broj rezolucioni ćelije, dok N_D predstavlja broj čirpova unutar koherentnog integracionog vremenskog intervala (*Coherent Integration Time, CIT*).

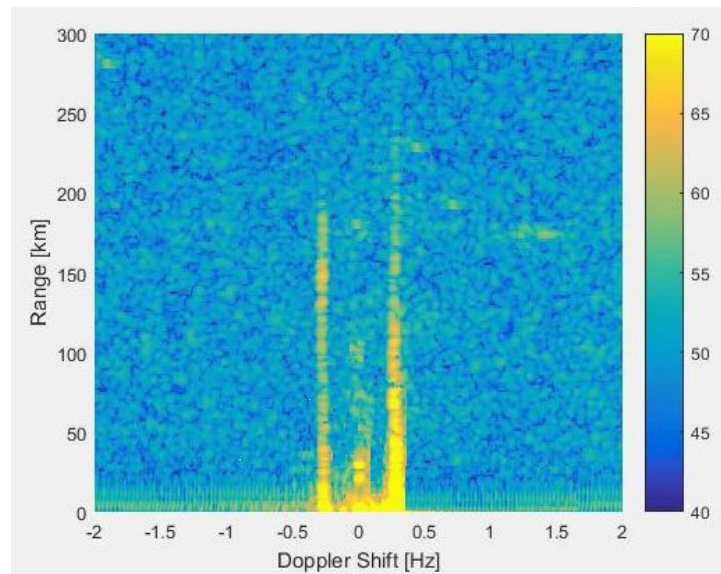
$$CIT = N_D \tau$$

Za aplikaciju praćenja brodova vreme trajanja čirpa iznosi 0.26 s, dok se u toku koherentnog integracionog vremenskog intervala koristi 128 čirpova, pa optimalna vrednost CIT-a iznosi 33 s. Signal reflektovan od mete je koherentan u toku CIT-a, dok signali dobijeni od eksternog suma, morskog klatera nisu koherentni i međusobno se potiskuju. Kako bi se procenila informacija o Doplerovom pomaku primenjuje se još jedan FFT (Doppler FFT) na svaku kolonu matrice $N_R \times N_D$. Varijacija frekvencije Δf je malo pomenjena od čirpa do čirpa zbog promene brzine mete unutar rezolucione ćelije, pa će spektar u frekvencijskom domenu nakon svakog FFT takođe biti promenjen. Upravo ova promena odgovara Doplerovoj frekvenciji f_D u frekvencijskom domenu. Na osnovu informacije o Doplerovoj frekvenciji f_D i početnoj frekvenciji f_0 može se izračunati radijalna brzina (v) potencijalne mete kao

$$v = \frac{c f_D}{2 f_0}$$

Kao rezultat ove operacije dobije se RD mapa (eng. Range-Doppler map). Primer RD mape je prikazan na Slika 2.7. Opseg Doplerovih frekvencija je ± 2 Hz, što za radnu frekvenciju od oko 7 MHz odgovara radijalnim brzinama od oko 85 m/s. Može se primetiti postojanje dve izražene vertikalne linije pozicionirane simetrično oko sredine ose Doplerovog pomaka, Slika 2.7. Ova pojava se naziva Bragove linije i javlja zbog toga što talasne dužine EM talasa su srazmerne talasnim dužinama morskih talasa. Kada se EM talas reflektuje od familije morskih talasa kojima je razmak između vrhova jednak polovini dužine EM talasa dolazi do koherentnog sabiranja. Razmak između Bragovih linija zavisi direktno od radne učestanosti. Postojanje Bragovih linija u RD mapama predstavlja problem prilikom detektovanja radarskih ciljeva. Ako se

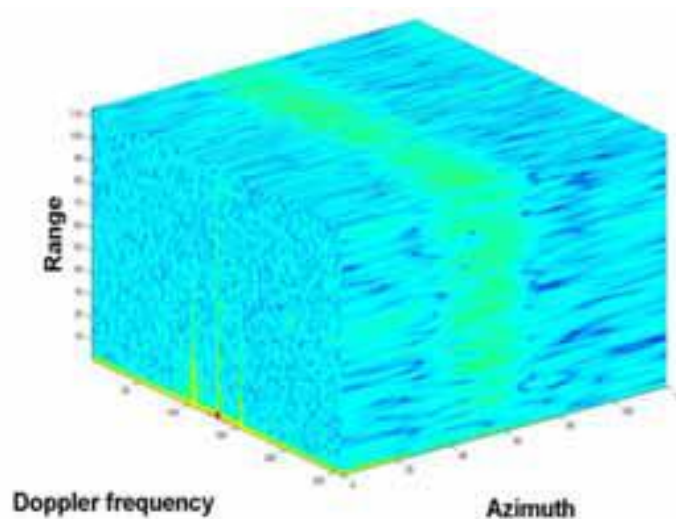
potencijalna meta kreće brzinom koja je dovoljna da njena refleksija po Doplerovom pomaku „padne“ u zonu Bragovih linija biće u potpunosti zaklonjena.



Slika 2.7. Prikaz obrade signala po Dopleru, u okviru OTHR prijemnika.

2.2.3 Obrada po azimutu

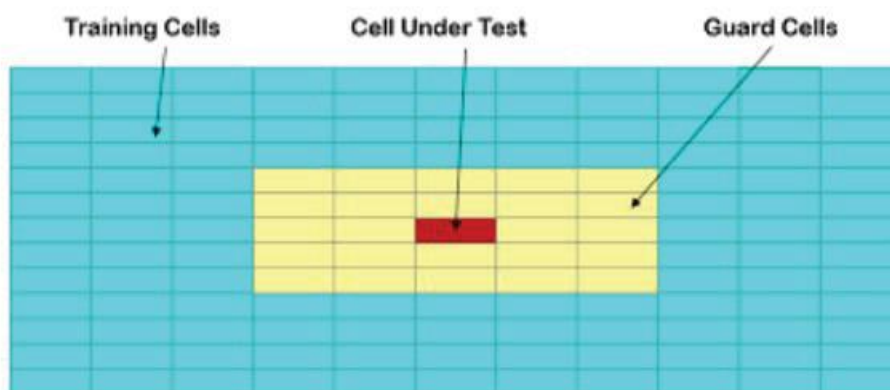
Range FFT i Dopler FFT se primenjuju na svih 16 prijemnih kanala pojedinačno. Na ovaj način dobijamo informaciju o detektovanim metama po dve koordinate - daljini i Dopleru, ali ne i po smeru odakle je došla meta. Prijemni niz OTHR-a je fiksiran, tako da se informacija o uglu dolaska prijemnog signala dobija *Beamforming* algoritmom [19] – [21]. *Beamforming* se izvršava nad RD mapama dobijenih sa svih pojedinačnih kanala. Ponavljanjem ove operacije za svaku tačku u RD ravni i svaki ugao po azimutu dobija se trodimenzionalna struktura kompleksnih brojeva koja se naziva RDA kocka (eng. *RDA Cube, Range Doppler Azimuth Cube*). Na sledećoj slici je prikazan primer jedne RDA kocke (Slika 2.8).



Slika 2.8. Prikaz obrade signala po azimutu, u okviru OTHR prijemnika.

2.2.4 CFAR

CFAR (eng. *Constant False-Alarm Rate*, CFAR) algoritam je blok u nizu procesa obrade koji ima zadatak da izoluje mete is okoline koja sadrži šum, klater i interferenciju. CFAR algoritam analizira sve rezolucione ćelije unutar obzervacione zone. Neke ćelije sadrže odbirke koje potiču od meta, dok neke sadrže samo šum. Pretpostavka CFAR algoritma je da će vrednost ćelija koje sadrže mete biti veće od okolnih ćelija koje sadrže šum [22, 23]. CFAR algoritam koristi prozor koji skenira domen u kojem se traže mete. Prozor u jednom položaju (rezolucionoj ćeliji) donosi odluku na osnovu okoline (susednih ćelija) da li se tu nalazi meta ili ne. Pomeranjem prozora vrši se analiza definisane zone. Struktura prozora je prikazana na Slika 2.9.



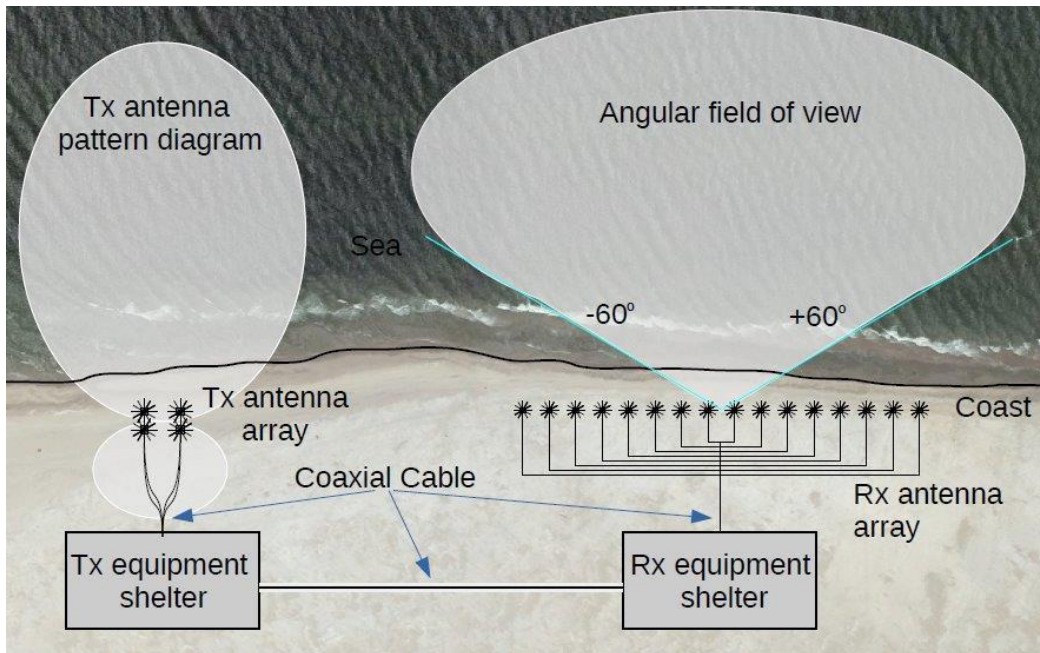
Slika 2.9 Prikaz primene CFAR algoritma, u okviru OTHR prijemnika.

Sa slike se može primetiti da je crvenom bojom definisana ćelija za koju se proverava da li postoji meta (eng. *Cell Under Test*, CUT), plavom bojom zona u kojoj se nalaze ćelije na osnovu kojih se računa kriterijumska funkcija (eng. *Training Cell*, TC), dok je žutom bojom označena zona u kojoj se nalaze ćelije koje imaju zadatak da izoluju CUT od TC, da blago razlivanje meta ne bi uticalo na kompletnu statističku procenu okoline.

OTHR kao domen koristi RDA kocke. Mete se traže u svakoj od kocki. Na osnovu TC-a u prozoru se postavlja kriterijumska funkcija. Ako je vrednost odbiraka u kocki veća od kriterijumske funkcije za tu kocku se proglašava da sadrži metu.

2.3 Dizajn OTHR sistema

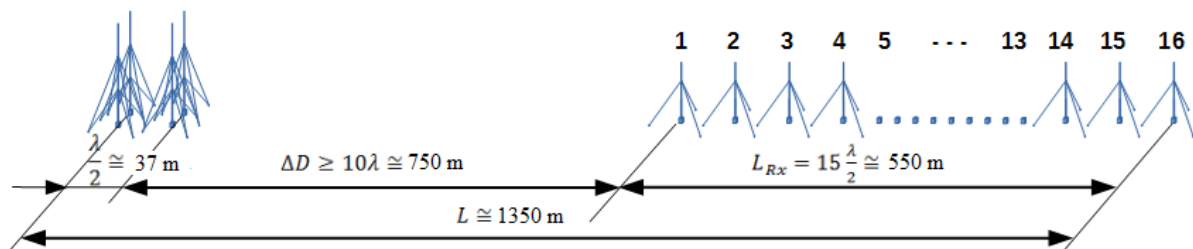
HFSW OTHR čine 3 podsistema: predajni antenski niz, prijemni antenski niz i primopredajnik koji može da bude na jednom mestu ili fizički razdvojen. Geometrija sajta je od krucijalne važnosti, zato što se time definiše zona pokrivanja sistema, kao i robusnost na samo-ometanje u isto vreme.



Slika 2.10 Tipična konfiguracija lokacije HFSW radara

Sve fizičke dimenzije sistema, antene, dužine kablova i organizacija prostora gde je smešten radar, zavise od izabrane radne frekvencije radara. Kao primer u razmatranje će se uzeti radna frekvencija od 4.6 MHz što odgovara maksimalnom dometu od 200NM. Slika 2.10 prikazuje geometriju prijemnog i predajnog antenskog niza. Talasna dužina (λ) koja odgovara ovoj frekvenciji iznosi oko 65m.

Prijemni antenski sistem je linijska grupa i sastoji se od 16 monopol antena visine $1/8$ talasne dužine. Antene se instaliraju paralelno sa obalom mora. Centar predajnog niza treba da se nalazi u liniji sa prijemnim nizom, mada je moguće malo zakriviti prijemni niz. Rastojanje između monopola mora biti 0.5λ , dok odstupanje pozicije monopol antene ne sme biti veće od ± 10 cm. Sa slike se može videti da minimalna dužina niza iznosi 7.5λ , što odgovara dužini od blizu 500m. Visina antena ne mora biti u istom nivou. Moguće je napraviti blago zakrivljenje kako bi se ispratio reljef lokacije, ali nije preporučljivo praviti oštre promene u visini između susednih monopola.

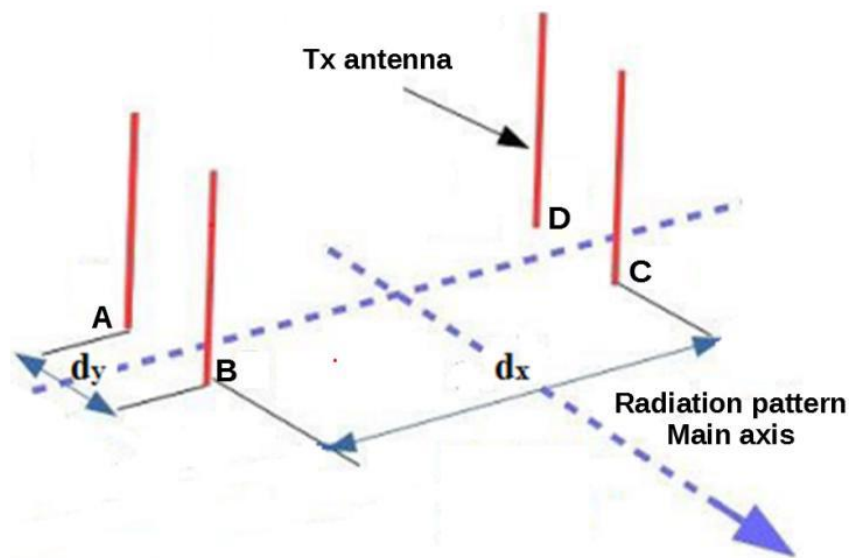


Slika 2.11 Dimenzije OTHR sajta za frekvenciju od 4.6 MHz.

Problem koji je poznat kod FMCW HFSW OTHR sistema je izolacija između predajnog i prijemnog signala. U ovom slučaju, kod FMCW HFSW OTHR imamo zahtev da nivo signala direktnog talasa od predajne antene do prijemnih antena ne sme da dovede u zasićenje prijemnik. Zbog toga se određuje razmak između predajnog i prijemnog antenskog sistema od minimalno 10 talasnih dužina.

2.3.1 Optimizacija predajnog antenskog niza

Kod projektovanja predajnog antenskog sistema postavljaju se sledeći zahtevi: izračena energija treba da bude maksimalno usmerena u pravcu mora i sistem mora da zrači minimum ka prijemnom antenskom sistemu.



Slika 2.12. Standardni dizajn predajnog antenskog niza OTHR sistema.

Predajni antenski sistem se sastoji od grupe 4 monopol antene visine 1/4 talasne dužine, koje su raspoređene u obliku temena pravougaonika, sa širom stranicom okrenutom paralelno obali (Slika 2.12). Faznom razlikom između prednjih i zadnjih antena i fizičkim razmakom između levih i desnih antena (1/2 talasne dužine) omogućava se usmeravanje elektromagnetne energije ka okeanu od 120°, dok je minimum usmeren ka prijemnom antenskom sistemu, Slika 2.13. U praksi, potiskivanje u nuli dijagrama zračenja u pravcu prijemnog antenskog niza je oko 30 dB.

Koordinatni centar se postavlja u centar predajnog niza, a ugao se računa od ose upravne na maksimalno zračenje. Vredi napomenuti da su antenski elementi A i D, kao i B i C u fazi, dok između ove dve grupe postoji fazna razlika. Svi elementi imaju istu amplitudu struje. Imajući sve ovo u vidu diagram zračenja predajnog niza (\vec{F}_r) je izveden iz sledećih jednačina, prema [24]:

$$\vec{F}_r = \sum_{k=1}^n \vec{F}_k$$

$$\vec{F}_k = \vec{F}_m a_k e^{j\beta(\vec{r}_k \cdot \vec{i}_r)}$$

$$a_k = I_1 e^{j\delta_k}$$

\vec{F}_k predstavlja dijagram zračenja k-tog elementa u nizu kada je koordinatni centar postavljen u centru niza. \vec{F}_m predstavlja karakterističnu funkciju zračenja četvrt-talasnog monopola, β predstavlja propagacioni koeficijent, \vec{r}_k je vektor položaja za svaki element, \vec{i}_r je vektor koji predstavlja pravac zračenja, I_1 predstavlja referentnu struju i δ_k predstavlja fazu k-tog elementa.

S obzirom na to da sva 4 antenska elementa imaju istu amplitudu struje, a razlikuju se samo po fazi, dijagram zračenja predajnog niza se može napisati u sledećem obliku:

$$\vec{F}_r = \vec{F}_m * I_1 (e^{j\beta(d_x \cos \varphi + d_y \sin \varphi)} + e^{j\beta(-d_x \cos \varphi + d_y \sin \varphi)} + e^{j(\delta + \beta(-d_x \cos \varphi - d_y \sin \varphi))} + e^{j(\delta + \beta(d_x \cos \varphi - d_y \sin \varphi))})$$

gde d_x predstavlja rastojanje između elemenata koji su u fazi (A i D, B i C), dok d_y predstavlja rastojanje između grupe elemenata koji su u fazi (A-D i B-C), δ predstavlja faznu razliku, dok φ predstavlja aspektni ugao.

Pošto je cilj da se zračenje signala prema prijemnom nizu (0° i 180° , Slika 2.13) maksimalno potisne razmak između elemenata koji su u fazi, d_x , treba da se postavi na $\lambda/2$. Pored ovog parametra koji bi trebalo da je fiksne vrednosti, potrebno je odrediti parametre d_y i δ kako bi glavni lob dijagrama zračenja bio što širi, održavajući što manje izračene energije prema prijemnom nizu. Zavisnost ovih parametara se mogu iskazati sledećom formulom:

$$B * d_y + \delta = \pi$$

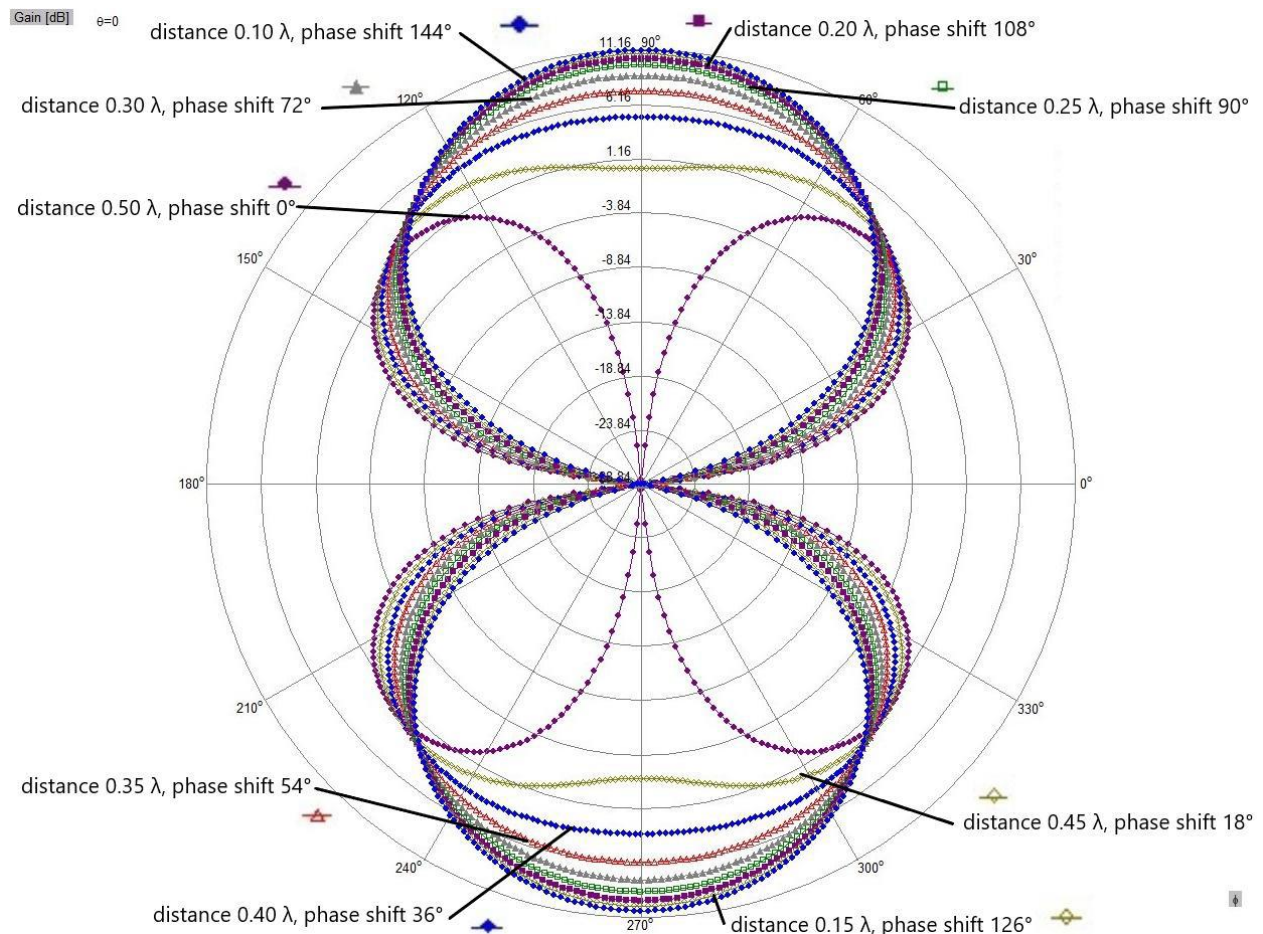
U nastavku će se testirati odgovarajuće vrednosti za δ kada d_y varira od 0.1λ do 0.5λ , sa korakom od 0.05λ . Test je urađen u softverskom paketu WIPL-D [50], uzimajući u obzir da je modelovanje zemlje ispod antena savršeni provodnik.

Iz Slike 2.13 može se videti da vrednosti od $0,5$, $0,45$ i $0,4 \lambda$ za d_y neće pružiti željeni dijagram zračenja i da bilo koja druga prikazana vrednost može obezbediti zadovoljavajuće rezultate. Pošto nema svrhe povećavati prostor na kojem se instalira predajni niz većom nego što je potrebno, jasno je da će optimalne vrednosti biti od $0,1$ do $0,2 \lambda$. Na kraju je izabrano $0,15 \lambda$ kao optimalna vrednost.

2.3.1.1 Izazovi okruženja i predložena rešenja

Prvi izazov koji donosi okolina je vrlo niska obala, jedva iznad nivoa mora. Samo to po sebi ugrožava lokaciju i, prema tome, antenske nizove tokom visokih plima ili olujnog vremena. Osim toga, ekvatorske oblasti imaju najveće stope padavina na svetu [55], što veoma često dovodi do poplava na toj lokaciji. Imajući ovo u vidu, jasno je da antene i propratni radijali ne mogu biti postavljeni na zemlji, kao što se obično radi. S obzirom na to da HFSWR lokacije zauzimaju velike površine [3] prilikom instalacije,

bilo je nepraktično i skupo podizati nivo zemlje oko antenskih nizova i na taj način rešiti problem plavljenja.

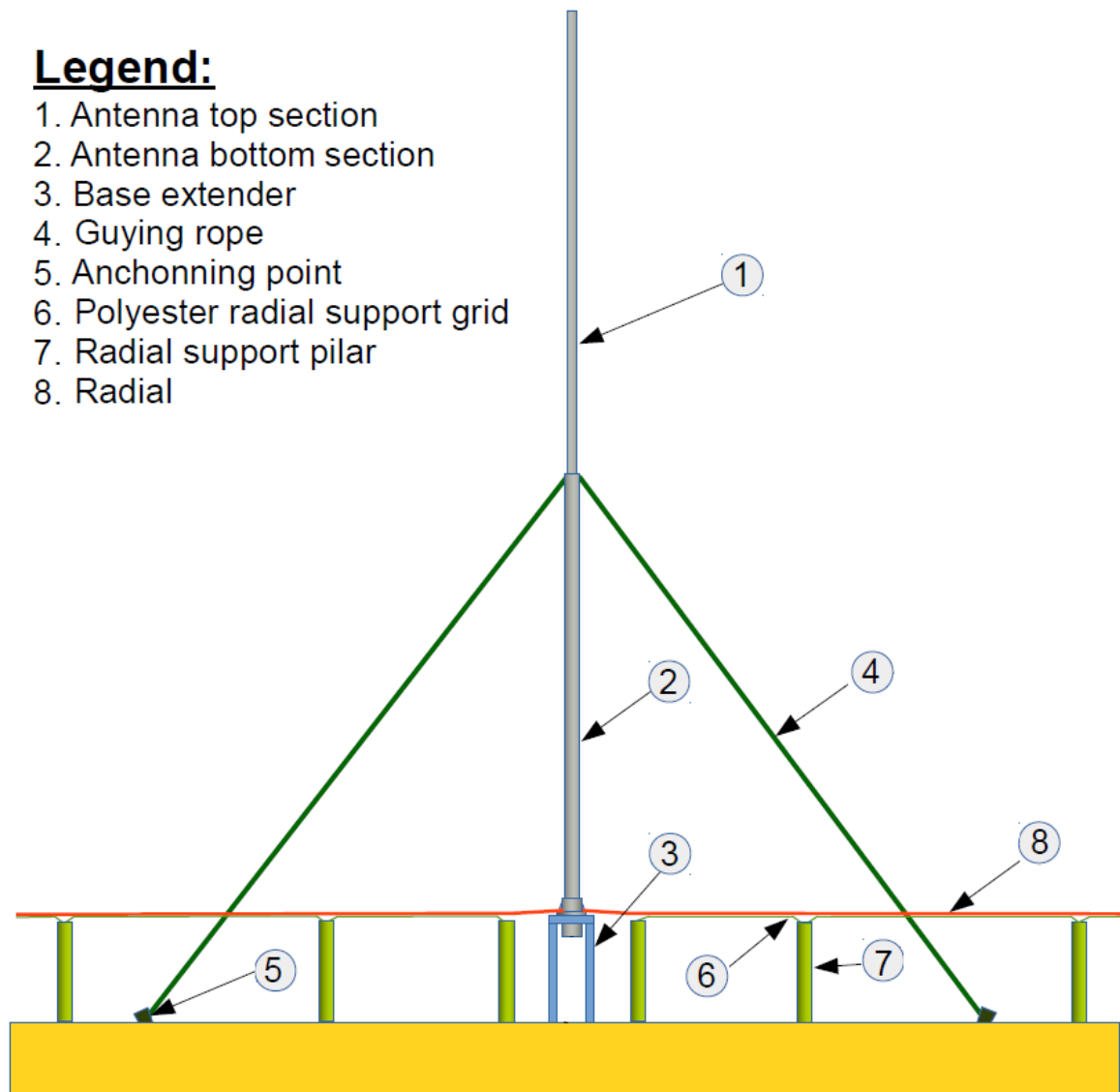


Slika 2.13 Formirani dijagrami zračenja

Dakle, potrebno je pronaći alternativno rešenje. Takođe, neka mesta su suviše uska i nije moguće instalirati radijale u punoj dužini, pa je bilo potrebno pronaći optimalnu dužinu radijala koja može da stane unutar granica lokacije. Na kraju, s obzirom na to da oko 70% udara groma u svetu se dešava u tropskim regionima [54], a četvrt-talasni monopoli se postavljaju direktno na obali, bez odgovarajuće zaštite od groma HFSWR neće dugo preživeti. Takođe, ključno je da zaštita od groma vrlo malo ili uopšte ne utiče na radijacioni uzorak antenskog niza.

Rešenje za "problem poplava", izazvan kako morem tako i padavinama, nalazi se u podizanju antena i radijalnih elemenata 1,5 metara iznad nivoa zemlje, kako je prikazano na slici 2.14. Kako bi se ova konstrukcija što više odupirala vetru, tačke za montažu antena i sidrišta opterećene su betonskim blokovima postavljenim na betonski sloj koji je smešten otprilike 1 metar ispod nivoa zemlje. Pored toga, potporni stubovi radijalnih elemenata zakopani su 4 metra u zemlji, dok su poliesterski žice koje čine potporna mrežu radijalima čvrsto vezane za potporne stubove. Na ovaj način, potporna mreža je i jaka i lagana. Radijali su povezani s potporna mrežom, formirajući provodni sloj podignut 1,5 metara iznad nivoa zemlje, tako da čak i kada je

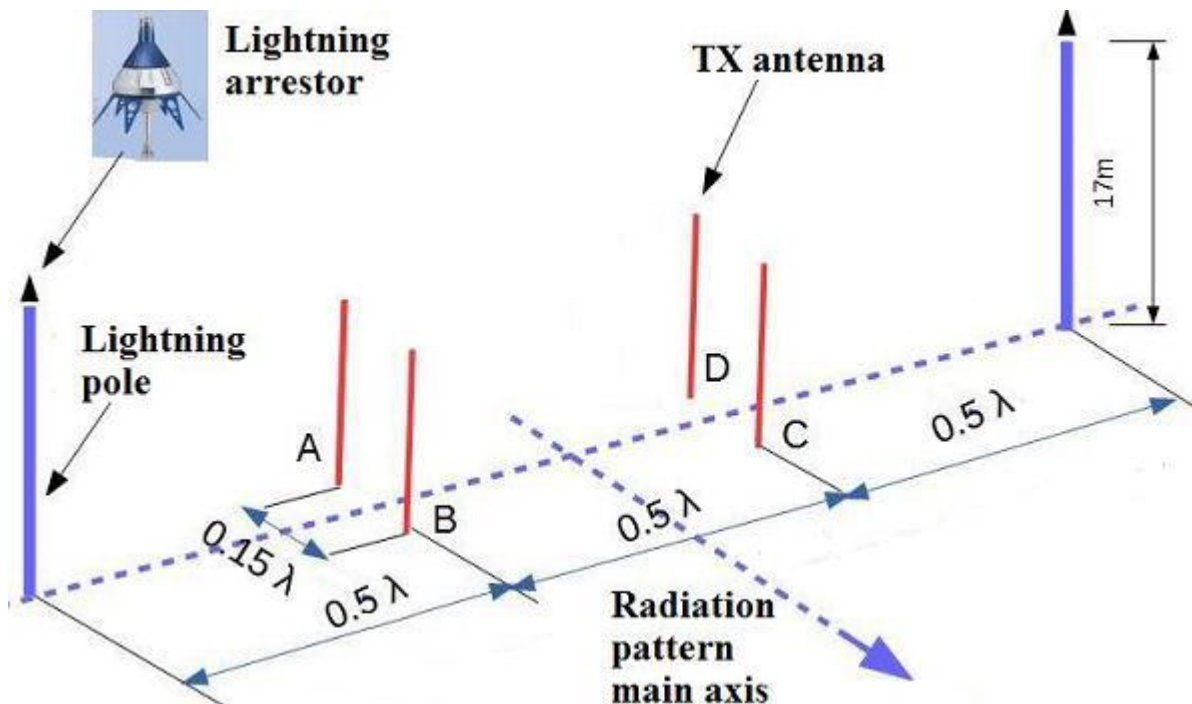
lokacija potpuno poplavljena, njen rad nije ugrožen. Ovaj način instalacije radijala došao je sa malim nedostatkom. S obzirom na to da su svi radijali instalirani iznad zemlje, mreža koju formiraju prilično je gusta u oblasti između antena. Ovo je dovelo do situacije u kojoj je praktično nemoguće kretati se u oblasti između antena (uglavnom prilikom preventivnog i korektivnog održavanja antena), ako je razdaljina između grupa elemenata u fazi (označeno sa "dy" na slici 2.12.) $0,1 \lambda$. Zbog toga je razdaljina od $0,15 \lambda$ odabrana kao razdaljina između grupa elemenata u fazi, budući da omogućava dovoljno kretanja na lokaciji i održava je što je moguće manjom.



Slika 2.14 Primer instalacije vertikalnog monopola

Gromobranski stubovi postavljeni su u minimumima dijagrama zračenja predajnog niza, uzdižući se iznad predajnih antena, istovremeno štiteći antene i minimalno utičući na dijagram zračenja.

Rešenje za zaštitu od groma prikazano je na slici 5.



Slika 2.15 Geometrija Tx niza sa uključenim gromobranskim stubovima

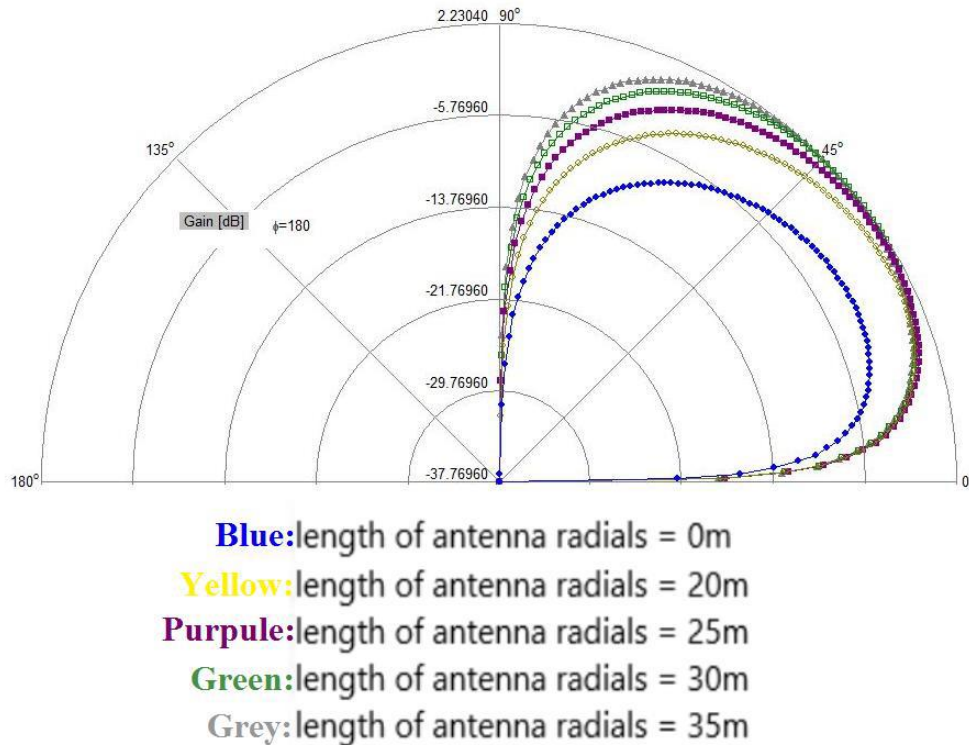
2.3.2 Simulacije predloženih rešenja koristeći WIPL-D

Ravan ispod antenske strukture značajno utiče na raspodelu struje u anteni i takođe uvodi gubitke u propagaciji elektromagnetskih talasa. Kako bismo dobili rezultate koji odgovaraju realnom ponašanju antena u radnom okruženju, niz je modelovan iznad stvarnog zemljišta definisanog dielektričnom konstantom i provodljivošću koja predstavlja pesak. Pošto propagacija površinskih talasa zavisi od sredine kojom prolaze, područje ispred antena je modelirano kao more, sa odgovarajućom dielektričnom konstantom i provodljivošću. Proces simulacije izvodi se u softverskom paketu WIPL-D [50].

2.3.2.1 Instalacija jedne antene na zemlji

Model četvrt-talasne monopol antene postavljen je na tlo koristeći 36 radijala. Struktura je prikazana na slici 2.16. Za ovaj tip monopol antena je preporuka da radijali budu dužine od 35 metara, što zahteva veliku površinu za instalaciju (posebno kada se radi o nizu antena). To je često teško obezbediti zbog veoma uskih obala. Stoga je dužina radijala varirala od 20 do 35 metara kako bi se ispitala mogućnost smanjenja površine zahtevane za instalaciju predajnog niza. Odmah nakon radijala peskovito područje se transformiše u plitke vode, ostavljajući prostor samo za ogradu. Dodatno, kao ekstremni slučaj, ispitan je i antenski sistem bez radijala. Simulacija je izvršena na centralnoj frekvenciji od 6,8 MHz, što je odabrano prema potrebama klijenta. Molimo

vas da imate na umu da je HFSWR prilagodljiv senzorski sistem i da se različiti parametri mogu prilagoditi, uključujući centralnu frekvenciju. Rezultati dobijeni za ovu postavku prikazani su na 2.16. Treba napomenuti da se dijagram zračenja antene računa za uglove elevacije od 0-90°, budući da je dijagram zračenja za uglove elevacije od 90-180° praktično simetričan.



Slika 2.16 Model monopol antene sa radijalima instaliranim na zemlji. Parametri dielektrika su $\epsilon_r=10$, $\sigma=0,002$ S/m za pesak u obalnim područjima [24] i $\epsilon_r=70$, $\sigma=5$ S/m [25] za more. Radijacioni oblik - vertikalni presek, $\Theta=[0-90]^\circ$.

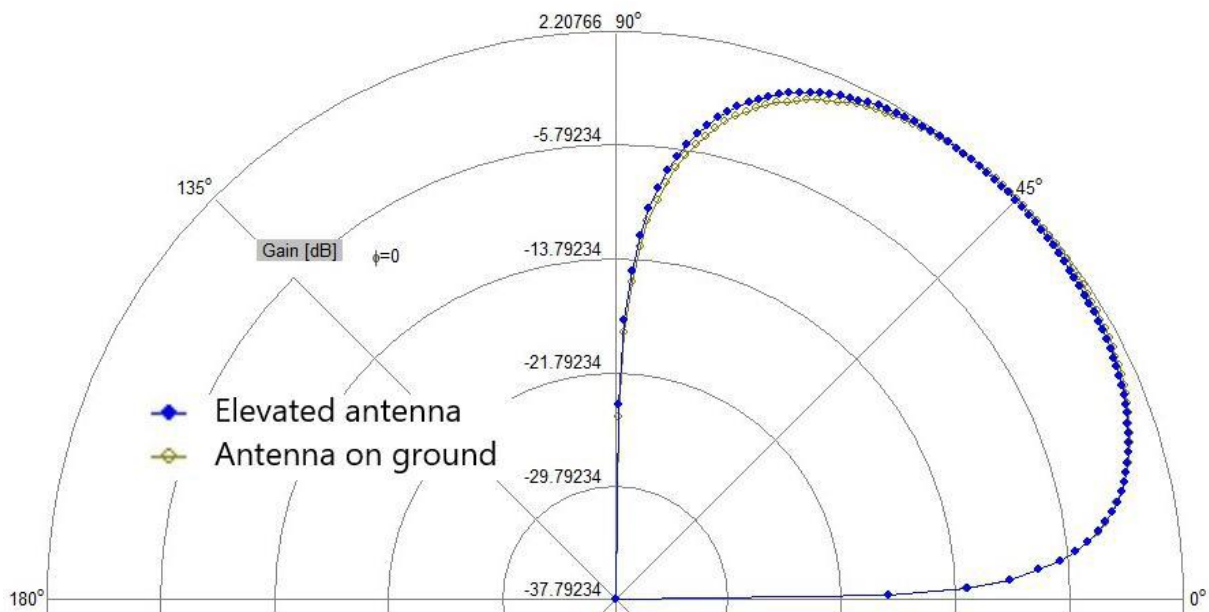
S obzirom na to da HFSWR OTHR koristi propagaciju površinskih talasa, zračenje prema malim uglovima elevacije (θ), najrelevantnije je u analizi dijagrama zračenja. Iz slike 2.16. može se videti da za $\theta=0^\circ$ gotovo uopšte nema zračenja, jer su gubici najveći blizu tla, budući da se elektromagnetsko polje smanjuje prema izrazu $e^{-(\alpha+j\beta)*r}$, gde je α koeficijent atenuacije, β je fazni koeficijent definisan sa $\beta = 2\pi/\lambda$, dok je r udaljenost do tačke posmatranja. Udaljenost između prvog predajnog monopola i obale iznosi λ za navedenu radnu frekvenciju. Iz slike 2.16. može se primetiti da za male uglove θ (posebno do 10°), dobit antene ne zavisi od dužine radijala u definisanom opsegu (od 20 do 35 metara). To implicira da skraćivanje radijala na 20 metara nema značajan uticaj na propagaciju površinskih talasa. Takođe, energija zračena prema jonosferi (uglovi θ iznad 45°) opada kako se skraćuje dužina radijala, što je dodatna vrednost za primenu na koju ciljamo.

Trebalo bi takođe napomenuti da, zbog heterogene strukture vazduha na različitim visinama, elektromagnetni talasi se šire malo različitim brzinama, što uzrokuje da EM talas putuje duž zakrivljene putanje. Blizu tla, ovaj fenomen je izraženiji zbog većeg

diskontinuiteta između tla i vazduha (u poređenju sa razlikama između različitih slojeva vazduha). Ovo dalje znači da je raspodela snage antene u dalekom polju više pogodna za bolje pokrivanje u horizontalnoj ravni. Sa izabranom dužinom radijala, dodatno se smanjuje elevacija glavnog snopa do zadovoljavajućeg nivoa, što je glavni cilj prilagođenja. Ovim pristupom, naše rešenje se odlikuje jakom otpornošću antenskog niza monopola, i kao očigledni benefit ovoga je taj da distribucija zračenja antene je pogodna za aplikaciju za koju se koristi.

2.3.2.2 Izdignuta antena iznad tla

Kako je već navedeno, antene i radijali trebaju biti podignuti kako bi se sprečila moguća oštećenja opreme uzrokovana visokim vodostajem i tako osigurala konstantna funkcionalnost radara. Visina od 1,5 metara dovoljna je da se osigura da voda ne može dospeti u antene u većini vremenskih uslova. Na slici 2.17. prikazan je dijagram zračenja oba tipa antena (zemljane i podignute) u vertikalnom (φ) preseku.



Slika 2.17 Dijagram zračenja – vertikalni presek

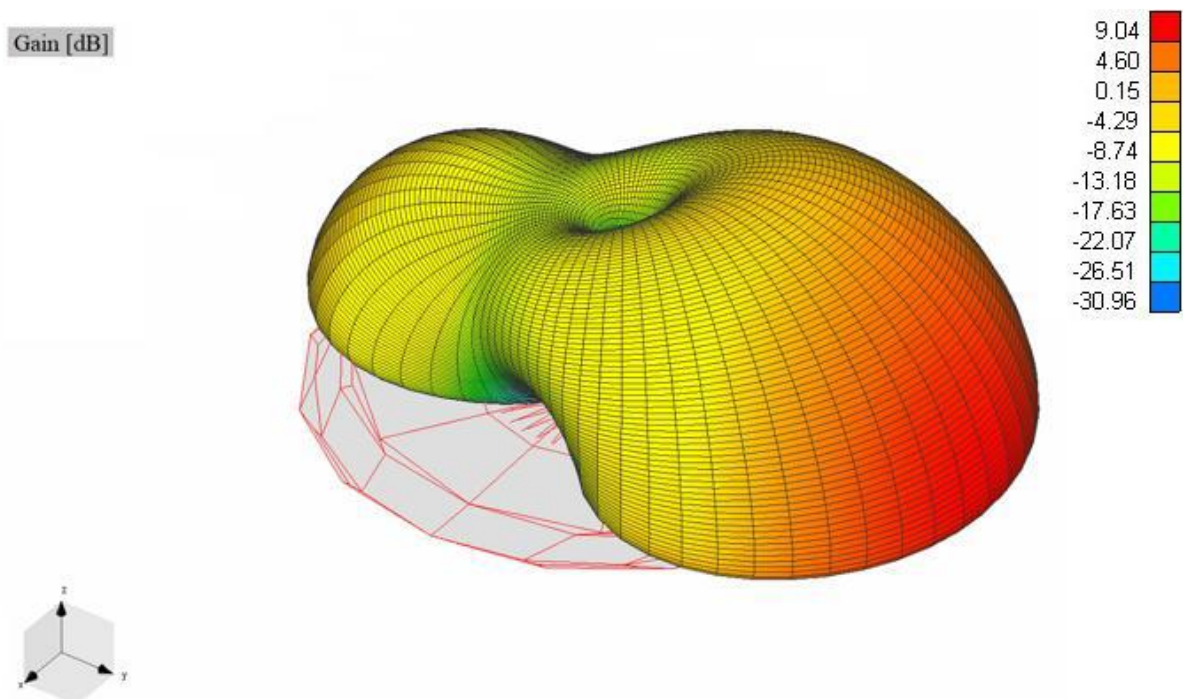
Ovi visoki rezultati podudaranja su posledica činjenice da je dužina od 1,5 m značajno manja od EM talasne dužine, koja je nešto više od 44 m na centralnoj frekvenciji od 6,8 MHz.

2.3.2.3 Antenski niz

Znajući da pojedinačna antena nije dovoljna da obezbedi željeni dobitak, niti nule u pravcu prijemnog niza, planarni predajni niz je dizajniran prema dosadašnjim zaključcima. S namerom da se maksimizuje energija koja se šalje prema moru i stvaraju nule u dijagramu zračenja prema prijemnom nizu, elementi A i D imaju fazni

pomak od 126° u odnosu na elemente B i C sa Slike 2.15. Gromobranski stubovi postavljeni su na $\Theta=0^\circ$ i 180° , na rastojanju od $0,75\lambda$ od centra niza, duž ose na kojoj se očekuju nule. Dijagram zračenja predajnog niza u daljem polju može se videti na Slici 2.18, dok je horizontalni presek na 8° prikazan na Slici 2.19. Postoje dva razloga zašto je odabrano 8° :

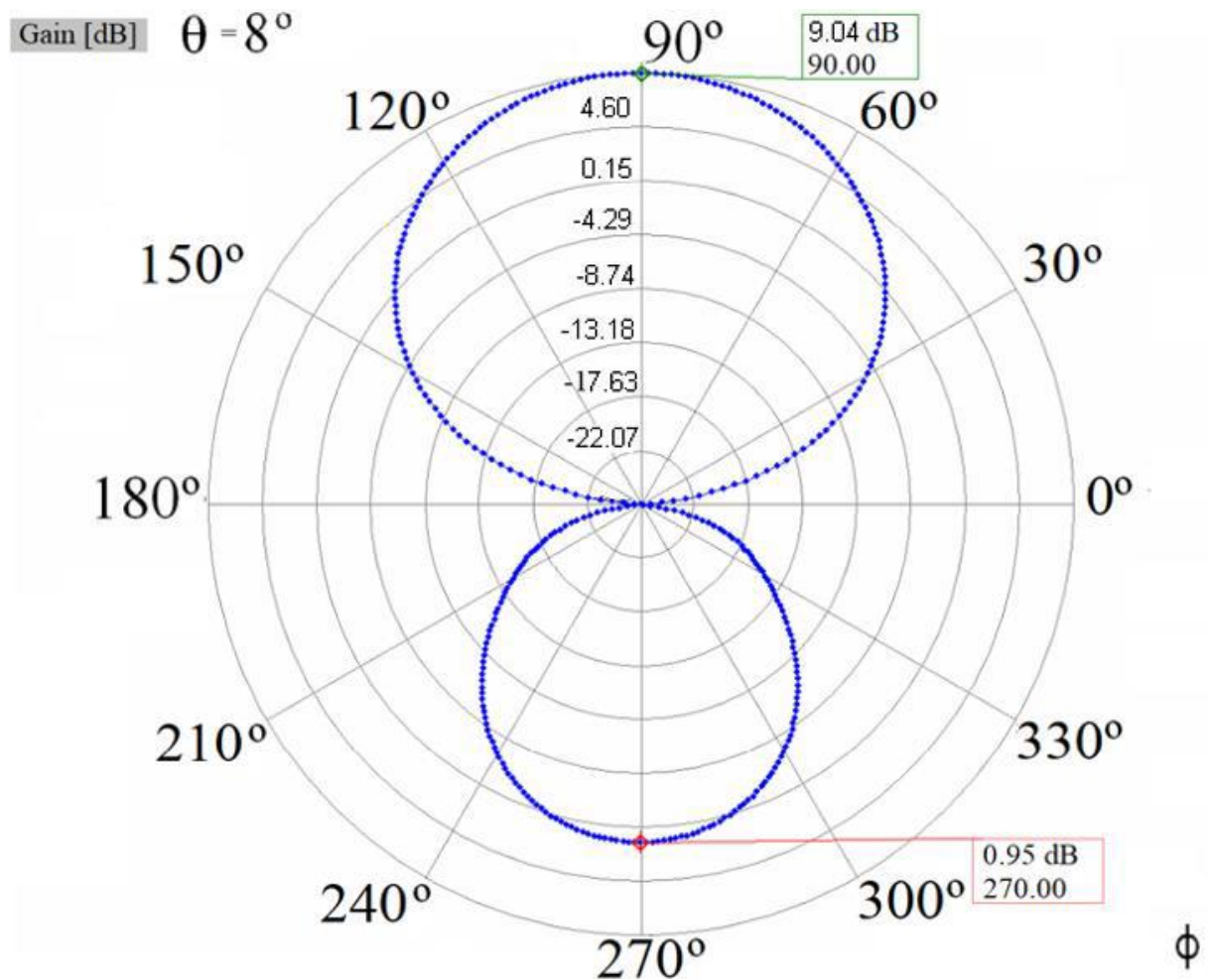
- Zbog širenja površinskih talasa. Talasni front iznad zemlje se nagnje naniže, omogućavajući talasu da prati zakrivljenost zemlje, pa ima smisla razmotriti elevacione uglove nešto iznad nule [14].
- Drugo, iako HFSWR nije primarno dizajniran za detekciju i praćenje letelica, postoji mogućnost za takvu upotrebu, što predstavlja dodatnu vrednost mogućnostima radara. Prema tome, mali elevacioni uglovi su takođe relevantni, jer na većim udaljenostima visina iznad nivoa zemlje (mora) premašuje maksimalnu letnu visinu savremenih aviona. Na primer, na udaljenosti od otprilike 200 km od radara, visina iznad nivoa mora za elevacioni ugao od 8° značajno premašuje 20 km.



Slika 2.18 3D polarni prikaz predajnog niza [dB]

Još jedno ograničenje koje je uticalo na dizajn i simulaciju modela jeste ograničenje koje proizlazi iz situacije na terenu. To ograničenje odnosi se na dostupan prostor za instalaciju antenskog niza. Tačnije, tokom izviđanja terena primećeno je da je dostupna površina za instalaciju niza prilično uska, dozvoljavajući instalaciju neposredno pored mora, praktično bez suvog tla (samo nekoliko metara) između kraja radijala i same morske obale. Ovo je zapravo korisno s gledišta propagacije talasa, jer stvara manji diskontinuitet prema moru u poređenju s diskontinuitetom prema kopnu, usmeravajući tako više energije prema moru nego prema kopnu. S druge strane, ovaj

nedostatak prostora čini TX niz još više izloženim eroziji usled talasa. Kao što je prikazano, zadnji lob prema uglu $\Theta=270^\circ$ ima oko 8 dB niži dobitak od maksimuma glavnog loba za ugao $\Theta=90^\circ$, dok se nule javljaju u pravcima $\Theta=0^\circ$ i $\Theta=180^\circ$. Ovo je prilično zadovoljavajuće (u poređenju s očekivanim, odnosno onim prikazanim na Slici 2.13), pa je ovaj dizajn prihvaćen kao konačan, i testovi na terenu su organizovani u skladu s tim.



Slika 2.19 Dijagram zračenja predajnog niza – horizontalni presek, $\Theta=8^\circ$

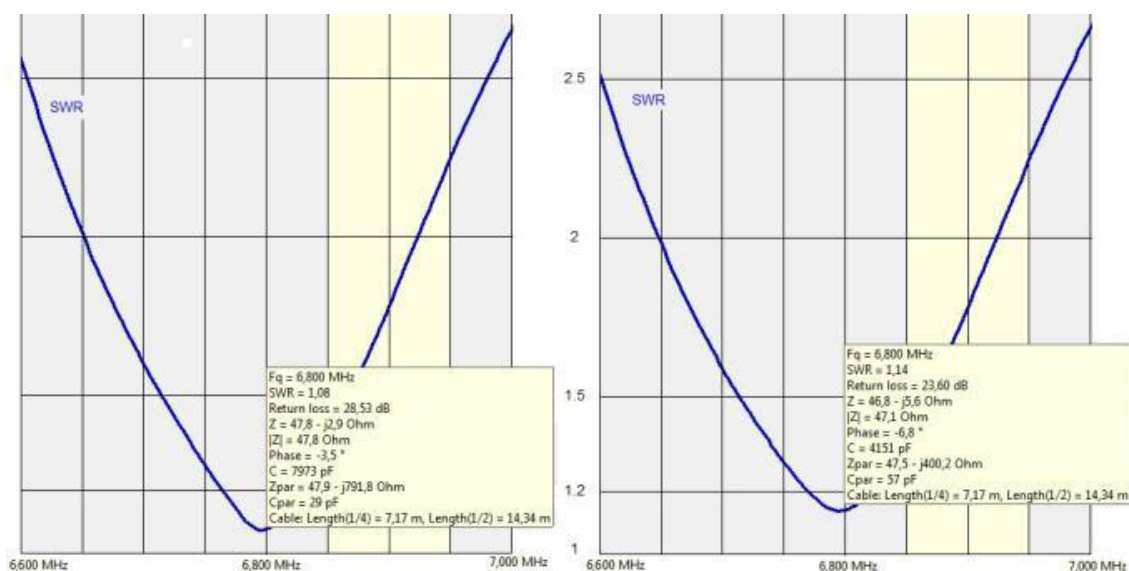
2.3.3 Testiranje niza na terenu i dobijeni rezultati

Testovi na terenu su podeljeni u dve različite grupe:

- Testovi sa jednom antenom - izvršeni kako bi se testirala i potvrdila validnost inicijalnog rešenja (povišena instalacija)
- Operativni testovi OTHR sistema - potvrda validnosti simuliranog dijagrama zračenja koristeći oba rešenja (povišena instalacija i zaštita od groma).

2.3.3.1 Testovi sa jednom antenom

Kako bi se testirala validnost rešenja povišene instalacije, instalirana je jedna TX antena na planiranom mestu za predajni niz, a zatim su izmereni VSWR (*Verifying Standing Wave Ratio*). Nakon toga, urađeni su testovi nivoa snage signala na prijemnoj anteni udaljenom 500 m od predajne. S obzirom na planiranu centralnu frekvenciju od 6,8 MHz i planiranu širinu propusnog opsega od 400 KHz, testovi su sprovedeni u skladu s tim. Važno je napomenuti da HFSWR neće konstantno zauzimati celih 400 KHz opsega, već će raditi unutar tog opsega. Poređenje VSWR vrednosti prikazano je na Slici 2.20.



Slika 2.20 Poređenje VSWR rezultata: Levo – antena zajedno sa radijalima insalirana na zemlji; Desno - izdignuta instalacija

Kako se može videti sa Slike 2.20, nema značajne razlike između slučaja kada su antena i radijali instalirani na nivou zemlje i slučaja kada su povišeni. Zatim, se mere nivoi snage na prijemnoj anteni kako bi se pronašla optimalna dužina radijala i dalje potvrdila validnost u slučaju izdignute instalacije. Na slici 2.21. se mogu pronaći rezultati pri predajnoj snazi od 1 kW.

RECEIVED SIGNAL POWER LEVELS			
Radial length	Frequency	Receive signal level	
		Ground installation	Elevated installation
35 m	6.7 MHz	3.05 dBm	3.06 dBm
30 m	6.7 MHz	3.00 dBm	2.97 dBm
25 m	6.7 MHz	2.95 dBm	2.96 dBm
20 m	6.7 MHz	2.45 dBm	2.43 dBm
35 m	6.8 MHz	3.30 dBm	3.28 dBm
30 m	6.8 MHz	3.28 dBm	3.28 dBm
25 m	6.8 MHz	3.25 dBm	3.23 dBm
20 m	6.8 MHz	2.70 dBm	2.71 dBm
35 m	6.9 MHz	3.10 dBm	3.10 dBm
30 m	6.9 MHz	3.06 dBm	3.05 dBm
25 m	6.9 MHz	3.01 dBm	2.99 dBm
20 m	6.9 MHz	2.57 dBm	2.55 dBm

Slika 2.21 Nivo signala na prijemnoj anteni

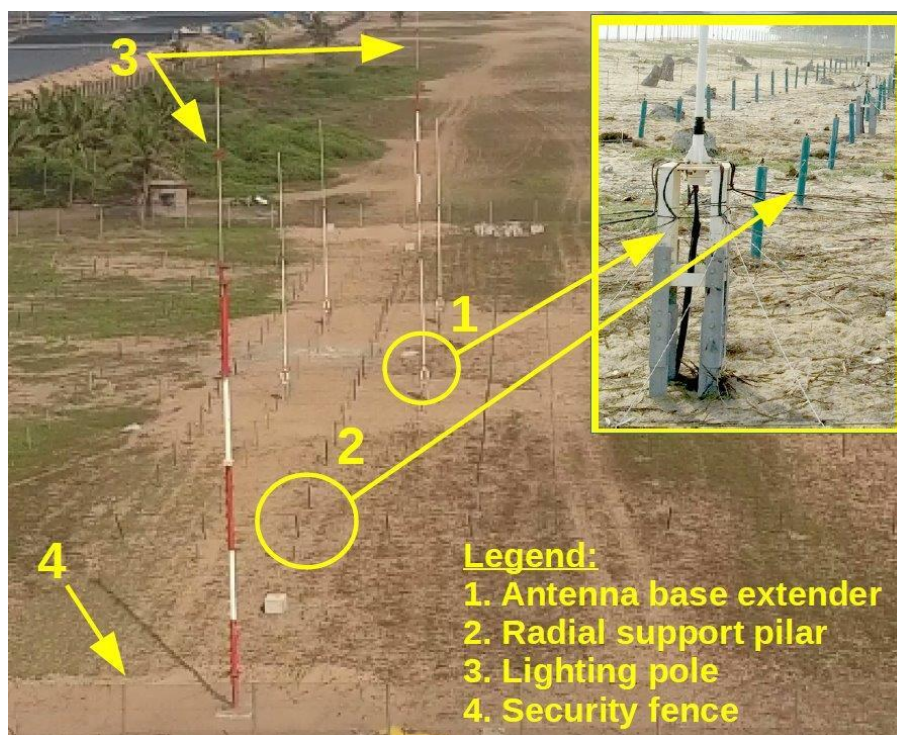
Kako se može videti sa slike 2.21, nivoi prijemnog signala za instalaciju antena na zemlji i iznad zemlje su praktično isti, s obzirom da se razlika samo u drugoj decimali. Ovo čvrsto legitimizuje pristup izdignute instalacije i potvrđuje rezultate simulacije. Međutim, neke razlike u odnosu na simulirane rezultate mogu se primetiti pri dužini radijala od 20 metara. Iako nisu značajne (tek oko 0,5 dB), to je uticalo na odluku da se dužina radijala postavi na 25 metara kao konačna odluka.

2.3.3.2 Operativni testovi OTHR sistema

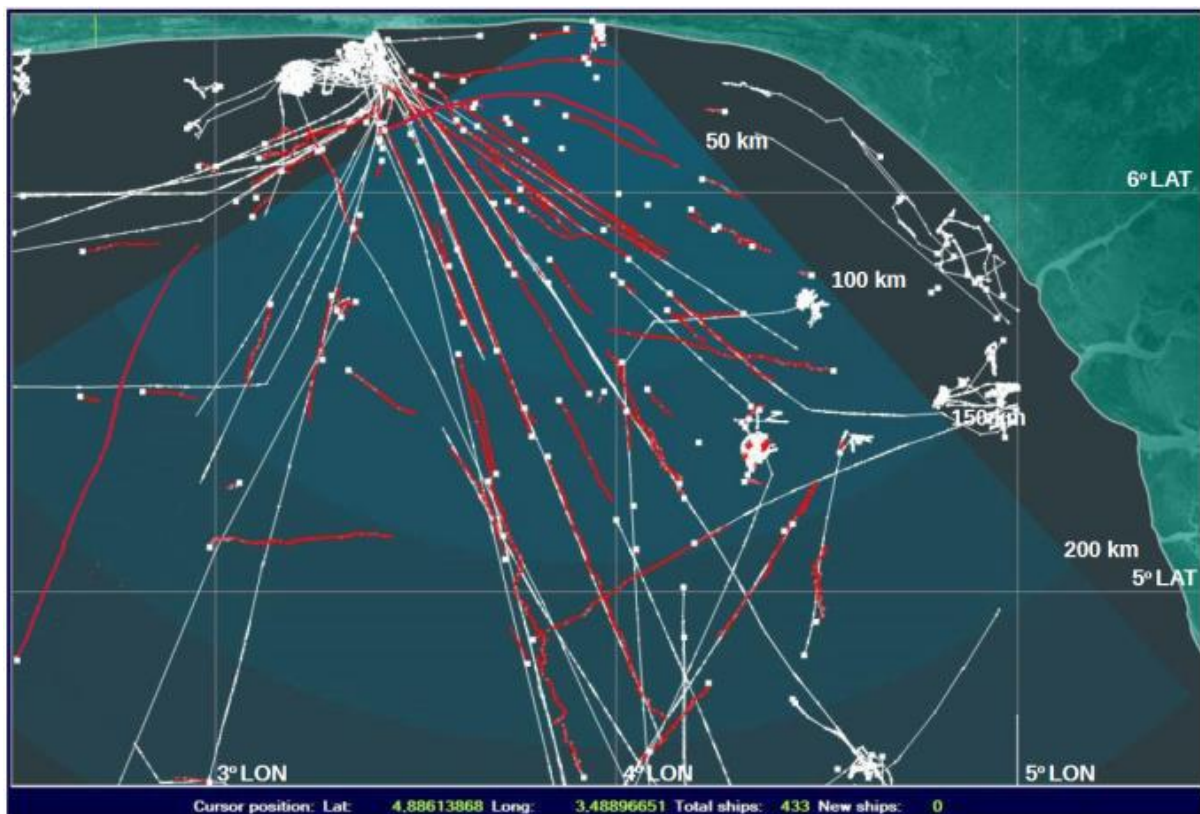
Na osnovu zaključaka koji su prikazani u prethodnim odeljcima instaliran je prvi OTHR sistem, slika 2.22. koji je predstavljao poligon za operativne testove. Budući da je HFSWR postao operativan pre nekoliko godina, bilo je dovoljno vremena da se prikažu sve prednosti i nedostaci predloženih rešenja.

Prvo, validnost simuliranog dijagrama zračenja morala je biti potvrđena u praksi. Tokom perioda od godinu dana različite brodove su detektovali HFSWR-om, i na osnovu praćenja brodova, izvučeni su zaključci o dijagramu zračenja. Na Slici 2.24 prikazan je jedan primer, dok se mnogi drugi primeri, kao i statistički podaci, mogu pronaći u [55], [11].

Na Slici 2.23 prikazani su brodovi koji su prešli područje pokriveno OTHR sistemom tokom jednog dana (24 sata). Crvene trake predstavljaju tragove brodova detektovanih OTHR sistemom, dok bele trake predstavljaju AIS podatke [55]. Pozicije većine detektovanih brodova takođe su potvrđene AIS uređajima kako bi se potvrdila pokrivenost OTHR-a i time njegov dijagram zračenja predajnog niza. Kao što se vidi, OTHR sistem je sposoban da detektuje brodove u zoni od 120° ispred radara.



Slika 2.22 OTHR predajni antenski niz



Slika 2.23 OTHR predajni antenski niz

2.4 Mreža OTHR Sistema

Jedan radar često nije dovoljan da bi se odredila precizna pozicija mete unutar velikih zona pokrivanja, kao što je EEZ. Zbog toga se projektuju radarske mreže koje su sastavljen od više HFSW radara čije se zone osmatranja delimično poklapaju [56].

Pored toga što omogućava pokrivanje većih površina, radarska mreža može poboljšati preciznost određivanja koordinata cilja, ali i dovesti do podizanja nivoa lažnog alarma.

Postoje dva principa pomoću kojih se može umanjiti nivo lažnih alarma, sektorska organizacija radarske mreže i upotreba algoritama za fuziju podataka. Prvi pristup praktično isključuje pojavu lažnih alarma jer se kompletna radarska mreža deli na sektore u kojima se podaci o cilju prihvataju samo sa radara kome je taj sektor dodeljen. Loša strana ovog pristupa je nekonzistentnost praćenja cilja, jer dolazi do male zadržke u praćenju kada cilj prelazi iz sektora u sektor. Primenom algoritama za fuziju podataka, pojava lažnih ciljeva se ne može u potpunosti isključiti, ali se može svesti na praktično zanemarljivu veličinu. Sa druge strane, primenom algoritama za fuziju podataka može se unaprediti određivanje parametara cilja, jer se u obzir uzimaju podaci dobijeni sa svih radara koji su detektovali cilj. Na kraju, ma koji princip da se primeni, krajnji cilj je uvek isti – formiranje jedinstvene slike sa svih radara u celoj

radarskoj mreži uz što manji nivo lažnih alarma i što preciznije određivanje parametra cilja.



Slika 2.24 Ukupna zona pokrivanja formirana zajedničkim radom više OTHR.

Pored zahteva o jednoznačnosti dobijenih podataka, radarske mreže moraju zadovoljiti još jedan bitan faktor. Naime, one se moraju projektovati tako da ostave što manje tzv. rupe u zoni osmatranja, tj. pokriju što veći deo zone osmatranja. Primer jedne radarske mreže sastavljene od više VHF-OTHR-a, koja je namenjena za osmatranje EEZ jedne države prikazan je na .

Granica EEZ jedne države je predstavljena crnom linijom, Slika 2.24. Položaji HFSW radara su obeleženi belim tačkama, dok su njihove zone osmatranja obeležene plavim kružnim isečcima. Ukoliko se radarska mreža formira kao na slici, jasno se uočavaju rupe u zoni osmatranja (obeležene su crvenom bojom). Rupe koje se nalaze blizu obale, lako se rešavaju upotrebom radara kratkog dometa. Što se tiče rupe na samom obodu EEZ-a, ona se ne može pokriti, brod koji se nalazi u toj zoni pre ili kasnije mora ući u zonu pokrivanja nekog od susednih OTHR sistema, te će tada biti detektovan.

3. OTHR SIMULATOR

Osnovni cilj simulatora je da proceni relevantne mogućnosti detekcija plovila različitih veličina, što je glavni reper za ovu vrstu radarskih aplikacija. OTHR sistemi koriste površinsku komponentu elektro-magnetnih talasa kako bi ostvarili velike domete po pitanju detekcije i prćenja meta. Ti dometi se protežu i preko 200 NM (*Nautical Miles*) što ga čini jako pogodnim kao dominantni senzor u sistemu nadgledanje kompletne Ekskluzivne Ekonomske Zone.

Opisaćemo novi napredni simulator OTHR sistema, posebno dizajniran za sveobuhvatno predviđanje i analizu različitih spoljnih faktora koji utiču na operativne performanse ovog sistema.

Postoje dva održiva pristupa za postizanje sveobuhvatnog praćenja EEZ. Prvi pristup se oslanja na primenu senzora niskog dometa, kao što su sistemi elektro-optičkih (EO) kamera i mikrotalasni (*MW – microwave*) radari, na mobilnim platformama kao što su plovila i avioni. Ova strategija zaobilazi ograničenja svojstvena pojedinačnim senzorima. Nasuprot tome, drugi pristup koristi mrežu radara OTHR-a kako bi se osigurao kontinuirani nadzor čitave obale, koja se proteže daleko izvan tradicionalne linije horizonta.

Ono što OTHR radare izdvaja kao preferirani izbor za pomorski nadzor je njihova isplativost. U poređenju sa kombinovanim troškovima povezanim sa gore pomenutim senzorima i njihovim odgovarajućim platformama, OTHR radarske mreže pokazuju se znatno ekonomičnijim. Ovaj isplativi atribut je učvrstio OTHR radare kao senzor izbora za efikasan pomorski nadzor, kao što su naglasile studije [3], [35] i [44].

OTHR radar radi u frekventnom opsegu od 3 do 30 MHz, kategorisan kao visokofrekventni (*HF – high frequency*). Koristi vertikalno polarizovane površinske elektromagnetne talase, koji se prostiru iznad morske površine ili površine okeana. Korišćenje OTHR površinskih talasa sadrži brojne izazove, čije rešavanje je i predmet ove disertacije.

Ovi izazovi obuhvataju:

Uticao mora: Na prostiranje elektromagnetnog talasa iznad površine mora preovlađujuće utiče stanje mora. Varijacije u uslovima mora mogu značajno uticati na prostiranje signala i performanse radara.

Zakrivljenost Zemljine površine: Zakrivljenost Zemljine površine nameće specifične karakteristike predajnih i prijemnih antenskih sistema, utičući na prostiranje elektromagnetnih talasa.

Faktori smetnji: OTHR sistemi su suočeni sa potencijalnim smetnjama nastalih od: drugih radio uređaja, atmosferskog šumom, kosmičkog i industrijskog šuma. Ovi faktori mogu smanjiti performanse radara i njima se mora efikasno upravljati.

Radarska refleksna površina (RCS- Radar Cross Section): Otkrivanje i praćenje ciljeva, što je ključno u OTHR aplikacijama, zavisi od tačne procene RCS ciljeva. RCS je kritičan parametar za uspješan rad [6], [2], [46].

S obzirom na višestruke izazove povezane sa sistemima OTHR-a, imperativ je da se svi faktori sveobuhvatno razmatraju tokom faza planiranja i implementacije. Primene od suštinskog značaja su analiza u ranoj fazi detekcije i proračuni performansi prilagođeni određenim lokacijama. Da bi se ovi inženjerski zadaci efikasno obavili, razvoj kompjuterskog OTHR simulatora se pokazao neprocenjivim.

U ovom kontekstu rešenje je OTHR simulator, koje je razvijen i koristi se u globalnim projektima. Ovaj simulator služi kao moćan alat za inženjerske svrhe, omogućavajući temeljnu analizu i procenu performansi OTHR sistema u različitim uslovima i scenarijima. Njegova primena je ključna u obezbeđivanju uspeha i pouzdanosti primene OTHR-a širom sveta. Simulator olakšava sveobuhvatnu analizu uticaja okoline na rad OTHR-a, omogućavajući korisnicima da prilagode svoje procene prema potrebi. Njegova funkcionalnost obuhvata praćenje svih mogućih promena u radarskim uslovima unutar HF frekvencijskog opsega, istovremeno pružajući fleksibilnost za konfigurisanje različitih scenarija. Ova prilagodljivost obezbeđuje preciznu kontrolu nad parametrima simulacije i specifičnim scenarijima, povećavajući njegovu korisnost.

Integralni deo mogućnosti simulatora je inkorporacija varijacija RCS, koje igraju ključnu ulogu u određivanju odnosa signal-šum (SNR – *Signal to Noise Ratio*) za svako plovilo. Ova karakteristika rezultira podacima koji blisko imitiraju uslove u stvarnom svetu, srodni onima koji se sreću tokom praktičnih radarskih operacija.

Ono što je najvažnije, simulator daje podatke u formatu identičnom formatu stvarnih OTHR radarskih senzora. Ova kompatibilnost omogućava validaciju upoređivanjem simuliranih podataka sa stvarnim OTHR sistemima nakon instalacije. Primetno je da je OTHR simulator često i supervizor OTHR radarima, sa potpunom kompatibilnošću u pogledu modela i formata podataka [3], [18].

3.1 Koncept OTHR simulatora:

Primarna namena simulatora je usredsređena na procenu kapaciteta radara OTHR-a da detektuje plovila različitih veličina, što je ključno merilo u radarskim primenama [3]. Ove procene pažljivo razmatraju karakteristike okoline specifične za potencijalne lokacije, s obzirom da su mnogi parametri simulacije veoma zavisni od geografskih nijansi i okruženja.

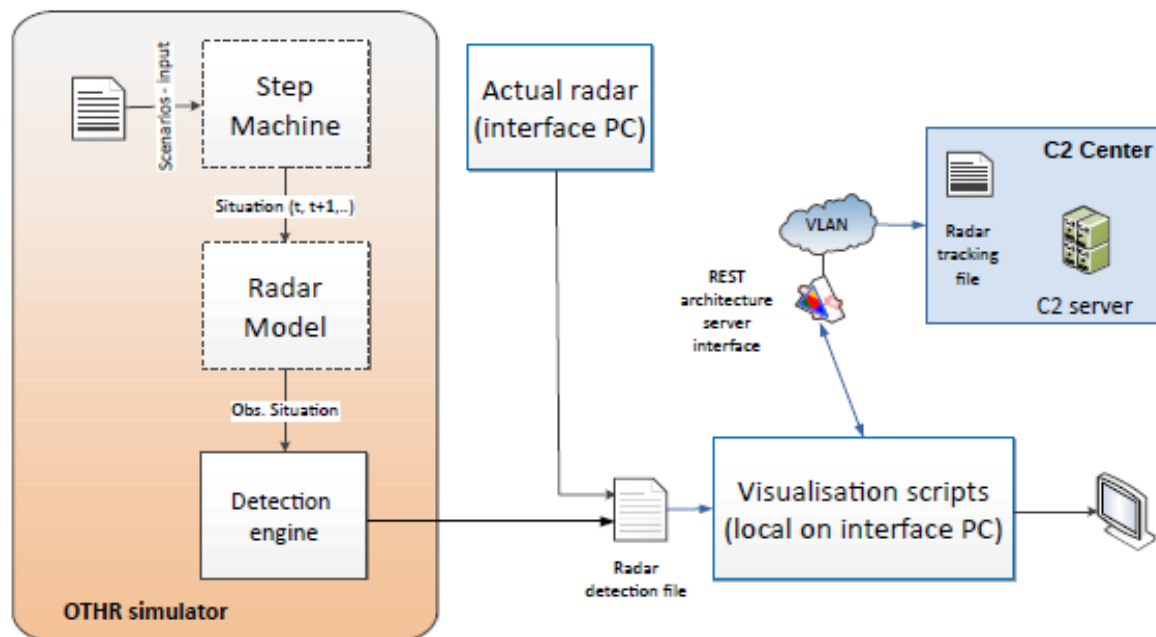
Softver simulatora je konstruisan korišćenjem Matlab-a i kompatibilan je sa operativnim sistemom Windows [45]. Ulazni parametri su obezbeđeni putem scenarija simulacije, koji obuhvata predviđene putanje plovila, brzinu i dimenzije plovila, sezonske faktore, doba dana ili noći, uslove na moru, usmerenost vetra i geografske koordinate potencijalnih lokacija. Ovaj scenario je prikladno formatiran kao XML datoteka. Izlaz simulatora predstavlja otkrivene mete u tabelarnom formatu, odražavajući specifikacije vHF-OTHR interfejsa.

Simulator služi kao svestran alat koji obuhvata:

- Testiranje funkcionalnosti softvera za otkrivanje i praćenje plovila.
- Analizu i procenu parametara relevantnih za performanse radara OTHR-a.
- Procenu uslova jedinstvenih za određene geografske lokacije za raspoređivanje OTHR-a.

Osnovni elementi simulatora, Slika 3.1, obuhvataju:

- **Step Machine:** Ova komponenta služi kao raznovrsna biblioteka odgovorna za kreiranje, čitanje i organizaciju ulaznih XML datoteka prilagođenih za simulacije. Služi korisniku za dizajniranje specifičnih scenarija simulacije.
- **Radarski model:** Osnovna biblioteka posvećena izračunavanju SNR za svaki simulirani cilj. Ovaj modul igra ključnu ulogu u preciznom repliciranju radarskih performansi.
- **Detection Engine:** Ova integralna biblioteka specijalizovana je za otkrivanje i praćenje simuliranih ciljeva, obezbeđujući da simulirani scenariji verno odražavaju mogućnosti radara u stvarnom svetu.



Slika 3.1 Blok-šema „OTHR” simulatora

Modul "Step Machine" posebno je koristan u konstruisanju preciznih scenarija simulacije. Olakšava definisanje različitih parametara, uključujući:

Početne parametre plovila: Ovo pokriva ključne aspekte kao što su početne koordinate plovila, njihov predviđeni kurs i brzine. Korisnici mogu odrediti putanje plovila kao pravolinijske putanje, krivolinijske rute ili u skladu sa unapred definisanim scenarijima. Ovi parametri su definisani u XML format.

Osnovni parametri radara: Korisnici imaju fleksibilnost da podese bitne parametre radara, kao što su geografska širina i dužina lokacije radara i izlazna snaga. Ovi faktori duboko utiču na performanse radara i kritični su za precizne simulacije.

Parametri okoline: Modul uzima u obzir varijable okoline, uključujući doba godine (mesec), doba dana, uslove mora i smer vetra. Ove varijable su ključne u oponašanju stvarnih uslova i njihovog uticaja na radarske operacije.

Svi ovi parametri su pogodno uneti i organizovani u XML formatu, omogućavajući pojednostavljenu konfiguraciju scenarija i podešavanje simulacije. Ovaj sveobuhvatni pristup osigurava da simulator može verno da replicira uslove u stvarnom svetu i pruži vredan uvid u performanse radara.

Blok „Radarski model“ funkcioniše kao modul zasnovan na Matlab-u dizajniran za izračunavanje vitalnih parametara za potencijalne mete, uključujući maksimalni domet, ugaonu poziciju u odnosu na pravi sever i odnos signal-šum (SNR). Za svaki skup ulaznih podataka koje generiše „Step Machine“, „Radarski model“ generiše odgovarajuću XML datoteku koja sadrži sveobuhvatne informacije o svim radarskim ciljevima. Ove informacije kasnije služe kao ulaz za završni blok, „Mašina za otkrivanje i praćenje“.

Blok "Detection Engine" preuzima prethodno pomenute podatke i sastavlja tabelu potencijalnih detekcija. Ovaj korak uspostavlja osnovu skupova podataka neophodnih za testiranje procesa radarskog praćenja. Tipično, nakon praktične instalacije radara (kao što je prikazano u bloku „Aktualni radar“, Slika 3.1), podaci prikupljeni sa simulatora podvrgavaju se rigoroznom poređenju sa podacima dobijenim od operativnog OTHR radara.

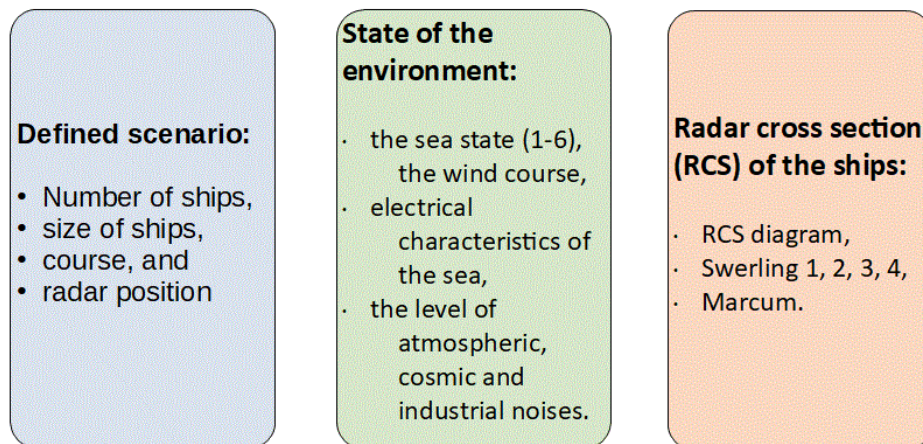
Operativni OTHR radari prenose svoje podatke o detekciji na komandne i kontrolne (C2) servere preko komunikacione mreže, Slika 3.1. Ovi prikupljeni podaci o detekciji zatim se vode u najviši sloj u hijerarhiji obrade signala, a to je aplikacija za praćenje [34]. Proces uključuje pažljivo poređenje između simuliranih i podataka iz stvarnog sveta, zadatak koji olakšavaju skripte za vizuelizaciju [44]. Ova komparativna analiza omogućava fino podešavanje parametara stvarnog radarskog sistema OTHR-a ako se pojave dispariteti između rezultata na terenu i očekivanih ishoda.

Naše istraživanje temeljno je usmereno na otkrivanja i praćenja ciljeva, kao i komunikaciju i upravljanje podacima za OTHR sisteme, primarni fokus simulatora je na razjašnjavanju samog procesa modeliranja. Ovaj proces modeliranja služi kao osnova simulatora i podupire sve druge funkcionalnosti koje iz njega proističu. Važno je napomenuti da rešenja ugrađena u naš radarski model imaju široku važnost. Oni nisu vezani za određeni sistem, što ih čini prilagodljivim za primenu u analizi performansi ili simulaciji bilo kog OTHR, bez obzira na prodavca. Ova svestranost naglašava širu primenljivost koncepata, Slika 3.1.

Ključni „Radarski model“ stoji kao kamen temeljac simulatora, obavljajući suštinski zadatak izračunavanja odnosa signal/šum (SNR) za svaku metu koja je ocrtana u okviru simuliranog scenarija.

U okviru simulatora, radarski model je ukorenjen u poznatoj radarskoj jednačini, kao što je izraženo jednačinom (1). Ova formula, za razliku od konvencionalne radarske jednačine, obuhvata sveobuhvatan niz faktora. On uzima u obzir uslove okoline,

razmatranja frekvencije i talasnog oblika, RCS, spoljne izvore šuma, smetnje, pojačanje antene, prostornu rezoluciju i smetnje [6].



Slika 3.2 Ulazni scenario za funkciju radarskog modela

$$S/N = \frac{P_{av} G_t G_r T \lambda^2 \sigma_{RCS} F_p}{N_0 L (4\pi)^3 R^4} \quad (1)$$

gde su:

- S/N označava odnos signal/šum,
- P_{av} označava prosečnu snagu prenosa (V),
- G_t označava pojačanje emitovane antene,
- G_r označava primljeno pojačanje antene,
- T označava efektivno vreme obrade (s),
- λ označava talasnu dužinu (m),
- σ_{RCS} označava radarski presek cilja (m²),
- F_p predstavlja faktor putanje propagacije,
- N_0 označava ukupnu snagu šuma (V),
- L označava gubitke na putu prenosa i sistema, i
- R označava rastojanje između radara i cilja (m).

Jednačina (1) služi kao robustan okvir za radarski model, omogućavajući mu da emulira radarske performanse u stvarnom svetu sa visokim stepenom vernosti. Inkorporacija ovih višestrukih varijabli osigurava da izlaz simulatora tačno odražava složenost rada radara u različitim scenarijima i okruženjima.

U praksi, odnos S/N se obično označava u dB. Parametri iz jednačine (1): σ_{RCS} , L , F_p i N_0 dobijaju se iz samog radarskog modela, kao što će biti opisano kasnije u tekstu. Sve ostale parametre unosi korisnik.

U razmatranom radarskom modelu uticaj spoljašnjih faktora se izračunava na osnovu sledećih podmodela:

- Podmodel 1: Gubici na površini ravnog mora,

- Podmodel 2: Uticaj hrapavosti površine mora,
- Podmodel 3: Spoljna šum, i
- Podmodel 4: RCS plovila.

Navedeni podmodeli služe kao osnovni elementi u simulaciji performansi OTHR-a. Dok određeni sistemski specifični parametri, kao što su snaga zračenja i karakteristike antene, mogu da variraju među pojedinačnim radarskim jedinicama, svi parametri generisani kroz ove podmodele ostaju specifični za lokaciju i unapred su definisani za specifične uslove okoline.

Podmodel 1: Gubici na površini ravnog mora

OTHR radar radi u HF opsegu, sa frekvencijama koje obično padaju između 4,6 i 7 MHz, nudeći optimalnu ravnotežu između dometa i performansi. Međutim, kako se radna frekvencija povećava, gubici prostiranja signala postaju značajan faktor. Na električna svojstva površine propagacije pretežno utiče nivo saliniteta medijuma [10]. Slana voda, u poređenju sa suvom, pokazuje superiorne karakteristike provodljivosti, što rezultira smanjenim gubicima pri prostiranju. Shodno tome, OTHR radari su prvenstveno pogodni za postavljanje u priobalnim područjima, gde su instalacije u neposrednoj blizini ivice vode, što omogućava praćenje velikih vodnih plovila.

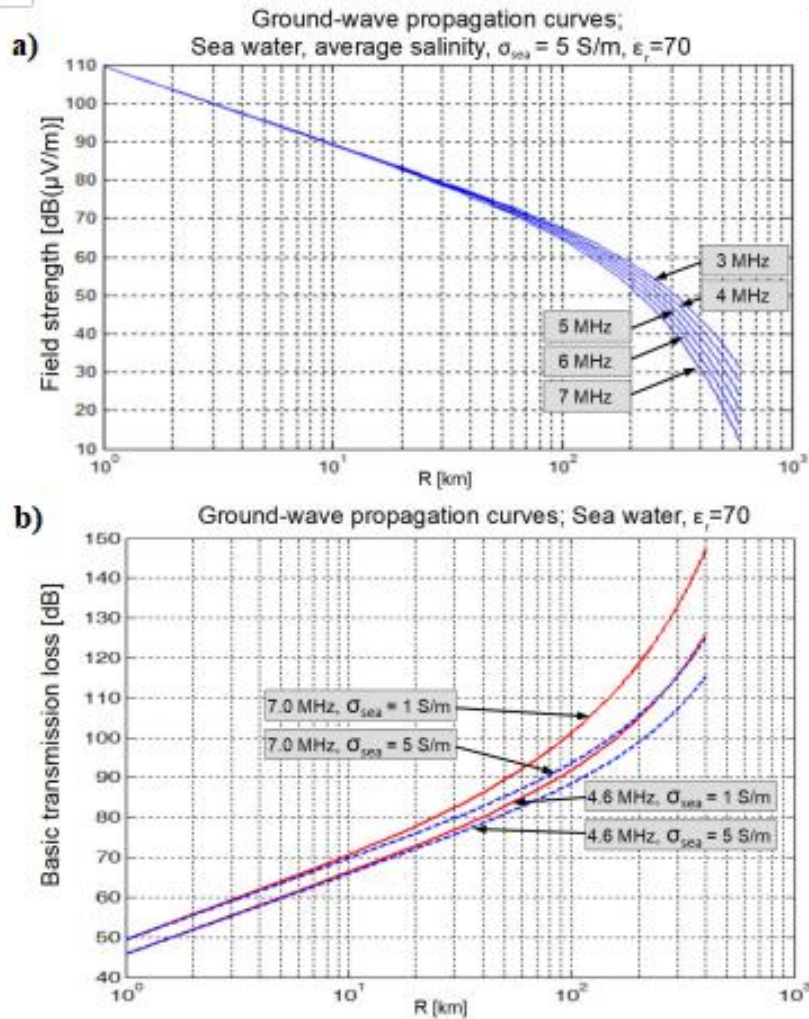
Za morsku vodu sa salinitetom od 5 S/m na 20°C, obično se koristi globalna prosečna vrednost. Značajno je da određeni regioni, kao što je Baltičko more, mogu imati niže vrednosti, oko 1 S/m, dok Crveno more može da pokaže provodljivost veću od 6 S/m [10]. Važno je napomenuti da provodljivost varira sa salinitetom i temperaturom morske vode i određena je sledećim odnosom:

$$\sigma_{SEA} = 0,18C^{0,93} [1 + 0,02(T - 20)] \frac{S}{m}$$

gde:

- C označava salinitet (grami soli po litru),
- T označava temperaturu (°C).

Proračun gubitaka pri prostiranju iznad površine mora olakšava program GRVAVE [12], koji koristi linearnu interpolaciju između tačaka udaljenosti. Ovaj program uključuje model koji uzima u obzir zakrivljenost Zemljine površine, električna svojstva površine mora i nehomogen vazduh, uzimajući u obzir prelamanja. Izvršen u DOS okruženju, GRVAVE generiše rezultate u obliku TKST datoteke. Slika 3.2 prikazuje krive propagacije koje obuhvataju frekvencije od 3MHz do 8MHz, izvedene iz TKST datoteke koju proizvodi program GRVAVE. Ove krive se odnose na širenje morske vode u uslovima prosečnog saliniteta (5 S/m) i relativnoj permeabilnosti (ϵ_r) od 70.



Slika 3.2 Model propagacije signala iznad morske površine zasnovan na softveru „GRWAVE”, a) nivo polja, b) gubici u propagaciji signala

Slika 3.2, podslika a), ilustruje jačinu polja elektromagnetnog (EM) talasa na određenim rastojanjima, što je ključni faktor koji se koristi za izračunavanje osnovnog prenosa (L) prema jednačini (1) [48]. Podslika b) razjašnjava varijacije u L u pogledu radne frekvencije i provodljivosti mora. Jedini ulazni parametar za ovu funkciju je opseg (tj. rastojanje) od interesa za izračunavanje gubitaka.

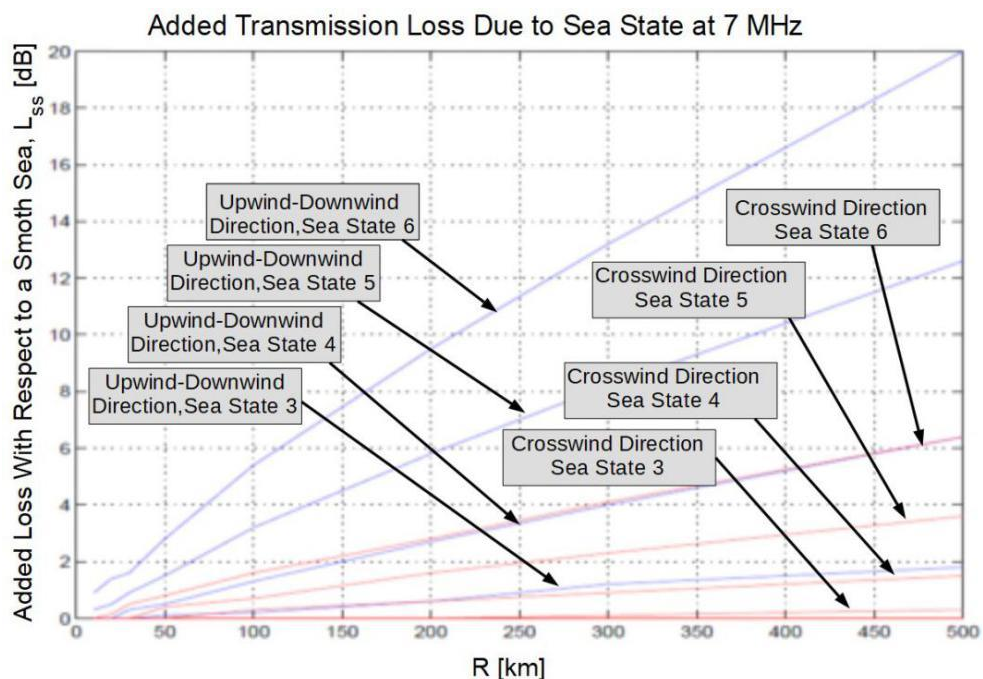
Podaci dobijeni iz GRWAVE-a se naknadno integrišu u Matlab kod OTHR simulatora, igrajući ključnu ulogu u modeliranju gubitaka propagacije specifičnih za ovaj podmodel.

Podmodel 2: Uticaj hrapavosti površine mora

Osim gubitaka opisanih u okviru podmodela 1, dodatni gubici u prostiranju VF površinskih talasa su uzrokovani talasima na površini prostiranja. Drugim rečima, gubici pri prostiranju takođe zavise od hrapavosti površine mora. Hrapavost površine mora, poznata i kao stanje mora, najčešće se opisuje Daglasovom skalom. Ovom skalom stanje mora se izražava ciframa od 0 do 9. Veći broj na skali odgovara većoj

visini talasa, što dovodi do većih gubitaka u prostiranju. Analiza stanja mora od 0 do 6 pokazuje da je povećanje visine talasa proporcionalno povećanju gubitka pri prostiranju. Detaljna analiza ovog fenomena može se naći u [11].

Druga Matlab funkcija se koristi za opisivanje modela propagacije koji se bavi uticajem hrapavosti površine mora. Maksimalni radarski domet, uslovi mora i pravci vetra su definisani kao ulazni parametri za ovu Matlab funkciju, koja generiše TKST datoteku na izlazu. Vrednosti iz TKST datoteke se koriste za izračunavanje parametra "L" iz jednačine radara (1). Slika 3.3 prikazuje gubitke prostiranja signala za stanja mora 3, 4, 5 i 6 kada je smer vetra u pravcu broda (crvene linije), kao i kada je smer vetra normalan na tok broda. (plave linije). Proračuni su napravljeni na osnovu vrednosti uzetih iz empirijskih krivih [11] za radnu frekvenciju od 7 MHz.



Slika 3.3 – Model gubitaka u prostiranju signala iznad uzburkanog mora

Podmodel 3: Spoljni šum

Glavna razlika za proračun S/N između MV radara i HF-OTHR radara je uticaj spoljašnjih šuma. Za MV radar, S/N je definisan termičkim šumom, dok za OTHR na S/N značajno utiče nivo spoljne šuma u HF opsegu. Spoljašnja šum se sastoji od različitih vrsta šuma, kao što su atmosferska, kosmička i šum koju stvara čovek [49].

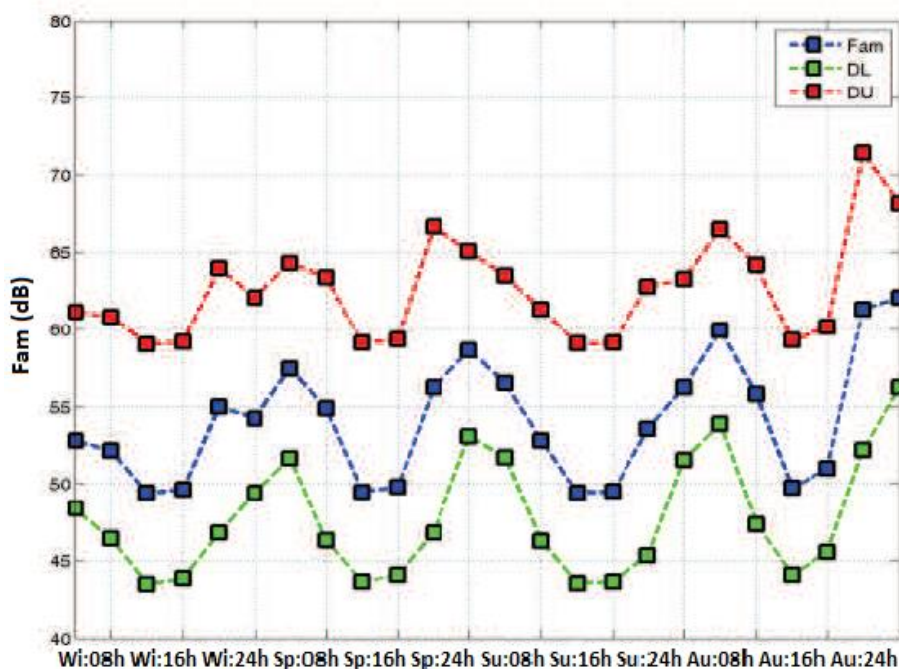
Atmosferska šum pretežno zavisi od geografskog položaja i godišnjeg doba: zima, proleće, leto ili jesen, dok kosmička šum zavisi samo od doba dana/noći. Sa HF tačke gledišta, postoji 6 perioda tokom 24 časa: 00h-04h, 04h-08h, 08h-12h, 12h-16h, 16h-20h i 20h-24h [13].

Karakteristike kosmičkog radio šuma su slične onima toplotnog šuma. Kao fenomen globalne prirode, kosmička šum ne zavisi od geografske lokacije ili godišnjeg doba. Zavisi samo od radne frekvencije radara [6].

Veštačka (proizvedena) šum varira u zavisnosti od regiona (ruralne zone, podgradske ili urbane zone). Detaljan opis atmosferske i kosmičke šuma može se naći u [13], dok šum koju stvara čovek najviše zavisi od ekonomskog razvoja područja oko radarskog mesta, pa se stoga uvek analizira na veoma lokalni način, bez mogućnosti da se obuhvati globalnom studijom. Generalno, nivo spoljne šuma je veći za niže radne frekvencije. Kao što je pokazano u [53], u nekim oblastima šum koju je napravio čovek je apsolutno dominantna u poređenju sa drugim izvorima šuma.

Uticao spoljašnje šuma značajno ograničava sposobnost detekcije OTHR radara. Program GH-NOISE [47] koristi se za izračunavanje nivoa šuma za različita godišnja doba i doba dana. Ulaz za ovaj softver je dat u geografskim koordinatama potencijalne radarske lokacije, godišnjem dobu, vremenskom intervalu (tj. vremenskom intervalu, gde je trajanje slota 4 sata) tokom dana i radnoj frekvenciji za proračune.

Izlaz GH-NOISE-a se čuva u obliku TXT datoteke, koju Matlab funkcija dalje koristi kako bi povezala sve vrste šuma koje utiču na maksimalni domet radara. Ova funkcija izračunava najviši nivo svih šuma (nivo dominantne šuma za određeno područje), tokom svih godišnjih doba i unapred definisanih vremenskih intervala, i predstavlja njegovu varijaciju, Slika 3.4.



Slika 3.4 Model eksternog HF šuma tokom svih godišnjih doba (Wi – zima, Sp – proleće, leto, jesen; 08h, 16 h u 24 h označavaju doba dana; vrednosti na Y osi predstavljaju nivo snage šuma iznad praga šuma (-174 dBm/Hz); vrednosti su prikazane za radnu frekvenciju 7 MHz)

Vrednosti na Y osi predstavljaju snagu šuma iznad nivoa šuma (-174 dBm/Hz). Prosečni nivo šuma varira između -125 i -112 dBm/Hz, Slika 3.4. Fam predstavlja srednju snagu atmosferske šuma u dB iznad kTB, DL označava koliko je dB ispod srednje snage šuma premašilo 90% dana u mesecu, a DU označava koliko je dB iznad srednje snage šuma premašilo 10% dana u mesecu za određenu tačku simulacije (izbor parametara).

Vrednost Fam se koristi za N_0 u jednačini (1). Sve vrednosti su izračunate za lokaciju koja se nalazi u Gvinejskom zalivu.

Podmodel 4: RCS plovila

Među najvažnijim parametrima koji utiču na performanse radara je RCS. RCS igra ključnu ulogu u upravljanju nivoom reflektovanih signala i posle toga određuje odnos signal-šum (SNR). Tokom faze projektovanja OTHR-a, razumevanje RCS-a za različite klase plovila postaje imperativ za procenu mogućnosti otkrivanja i praćenja sa najvišim stepenom objektivnosti.

RCS, konceptualno, označava projektovanu površinu metalne sfere koja bi proizvela isti eho signal kao i sama meta, pod uslovom da je meta zamenjena ovom sferom [15]. Odziv eha iz provodne sfere ostaje nezavisan od ugla gledanja. Međutim, stvarni ciljevi pokazuju značajne varijacije u eho odgovoru na osnovu njihove prostorne orijentacije u odnosu na radar (tj. ugao između radara i posmatranog cilja).

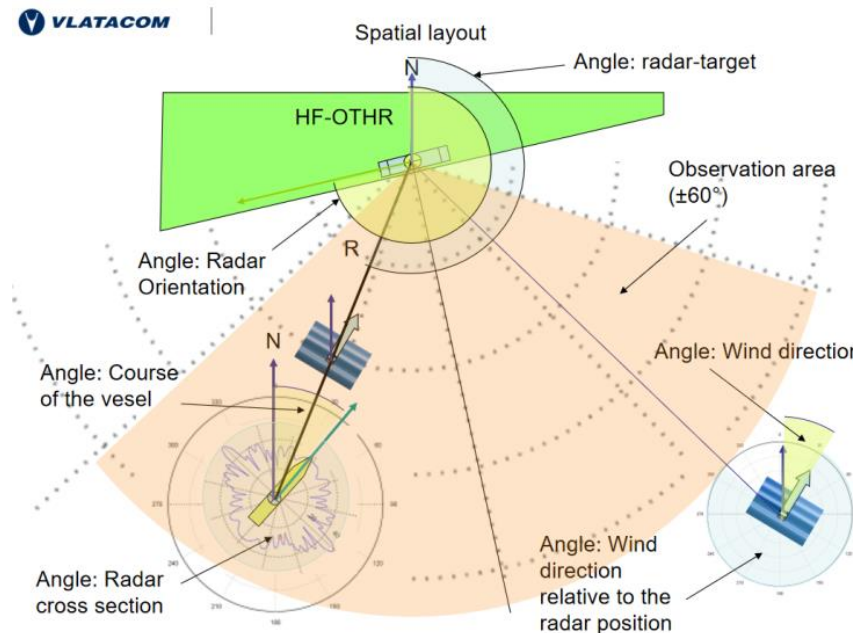
RCS mete zavisi od nekoliko ključnih parametara:

- Geometrijski oblik i veličina: Izloženi oblik i veličina plovila unutar radarskog snopa.
- Električna svojstva: elektromagnetne karakteristike materijala plovila.
- Pozicija mete: Relativna pozicija mete u odnosu na upadni elektromagnetni talas.
- Veličina u odnosu na talasnu dužinu: Veličina plovila u odnosu na talasnu dužinu radara.
- Polarizacija antene: Polarizacija radarske antene u vezi sa orijentacijom plovila.

OTHR simulator poseduje mogućnost skeniranja ugao širine od $\pm 60^\circ$ oko unapred definisane radarske lokacije. Da bi se otkrio cilj, potreban je odnos signal-šum (SNR) prijema od najmanje 10 dB. Osim parametara OTHR sistema, faktori okoline koji utiču na detekciju, kao što su mesec, lokalno vreme, stanje mora i šum koju je napravio čovek, se računavaju u proračun. Putanja cilja je određena koordinatama cilja (širina i dužina), koje variraju u zavisnosti od brzine i kursa plovila. Za svaku tačku na putanji izračunava se ugao upada radara i plovila, ocrtavajući RCS efekat, Slika 3.5.

Dok analitičke metode mogu efikasno izračunati RCS za elementarne oblike radarskih ciljeva kao što su ploče, diskovi, cilindri ili tanke žičane strukture. Složene geometrijske forme poput posuda predstavljaju nepremostive izazove za takve analitičke pristupe. Shodno tome, profesionalni softver za elektromagnetno modeliranje, kao što je VIPL-D [50], koristi se za predviđanje RCS plovila. VIPL-D olakšava elektromagnetno

modeliranje antena i skatera, predstavljajući kombinacije žičanih i pločastih struktura. Koristeći pristup metode momenta (MoM), softver se bavi integralnim jednačinama za procenu nepoznate distribucije struje, što ga čini pogodnim alatom za analizu monostatičkih i bistatičkih RCS scenarija.



Slika 3.5 Uticaj incidentnog ugla između radara i plovila

OTHR simulator uključuje RCS model, Slika 3.6, sastavljen od četiri ključne komponente. Za početak, procena RCS-a plovila počinje primenom empirijske formule koja nudi osnovnu procenu [54]:

$$\sigma_{RCS} = 52 * f^{\left(\frac{1}{2}\right)} * D^{\left(\frac{3}{2}\right)}$$

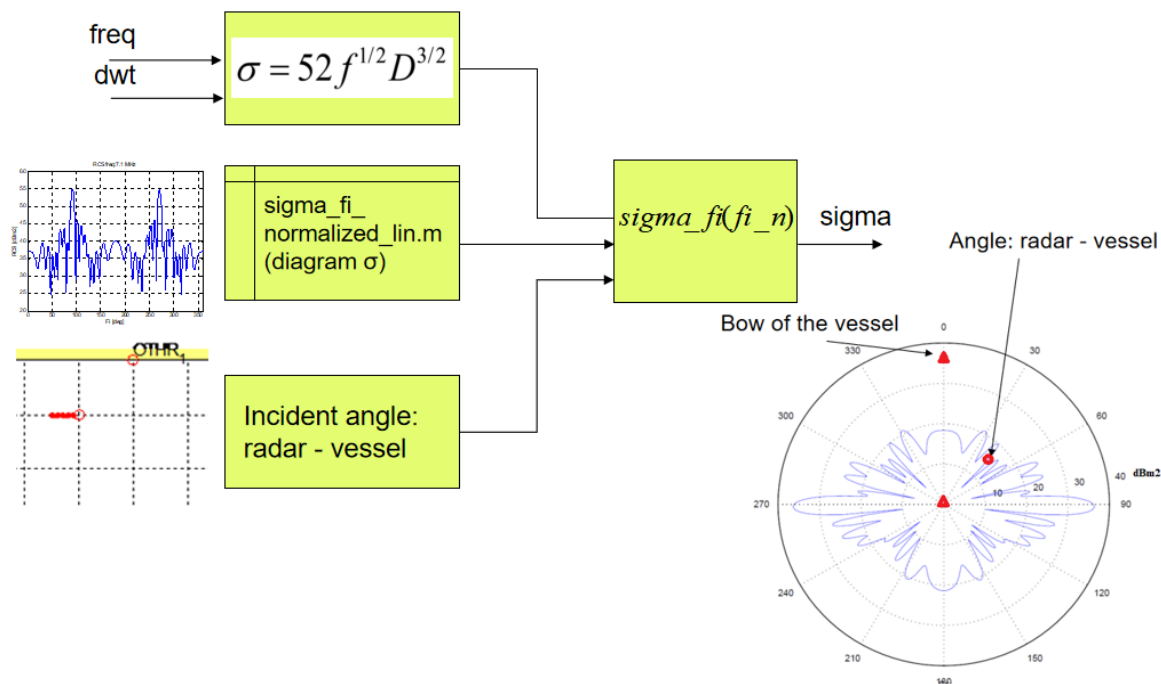
gde:

- sRCS označava RCS vrednost, merenu u kvadratnim metrima (m²).
- f označava frekvenciju, merenu u megahercima (MHz).
- D predstavlja pomeraj plovila pri punom opterećenju, mereno u kilotonima.

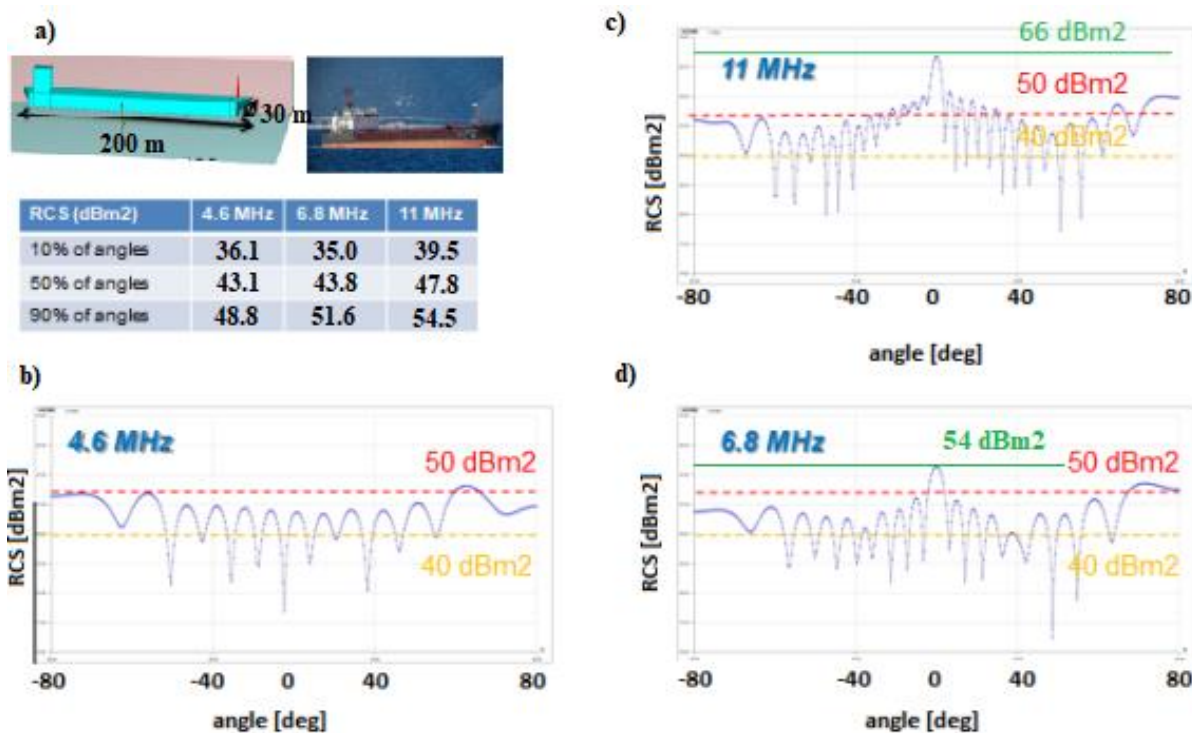
Vrednost sRCS izračunata preko ove formule služi kao maksimalna procena RCS-a, uzimajući u obzir isključivo veličinu plovila i radnu frekvenciju.

Bitno je napomenuti da vrednost sRCS izračunata preko ove formule služi kao maksimalna procena RCS-a, uzimajući u obzir isključivo veličinu plovila i radnu frekvenciju.

Drugi blok u okviru RCS modela je namenjen za obradu izlaza generisanog od strane VIPL-D softvera. U ovom procesu, maksimalna vrednost signala se normalizuje korišćenjem prethodno izračunatih vrednosti.



Slika 3.6 Model radarske refleksne površine



Slika 3.7 – RCS raspodela modela plovila sračunata pomoću OTHR simulatora.
 a) Model plovila WIPL-D i tabela sa rezultatima RCS vrednosti za simulirani brod, b) RCS izračunat na 4,6 MHz, c) RCS izračunat na 11 MHz i d) RCS izračunat na 6,8 MHz

Proračuni su izvršeni za tri različite radne frekvencije: 4,6 MHz, 6,8 MHz i 11 MHz, Slika 3.7. Podsluka a) predstavlja model plovila napravljen u okviru VIPL-D, praćen tabelom sa detaljima varijacija koje su rezultat promena u incidentu ugao za pomenute radne frekvencije. Podfigure b), c) i d) prikazuju RCS vrednosti koje je VIPL-D izračunao za odgovarajuće radne frekvencije od 4,6 MHz, 11 MHz i 6 MHz.

Podsluka c) naglašava da se, za radnu frekvenciju od 11 MHz, minimalna vrednost RCS postiže kada upadni talas udari u pramac plovila, registrujući odstupanje od 26 dB od maksimalne vrednosti RCS. Na ovoj radnoj frekvenciji, najveći bočni režnjevi pokazuju smanjenje od otprilike 10 dB u poređenju sa maksimalnom RCS vrednošću. Nasuprot tome, za niže frekvencije, disparitet u vrednostima RCS-a teži da bude manji.

U trećem bloku (Slika 3.6) korisnik definiše upadni ugao između radara i plovila [16]. U zavisnosti od vrednosti upadnog ugla, RCS može značajno da varira, (Slika 3.7). Na ovoj slici, crveni trougao simbolizuje kurs plovila, dok crveni krug predstavlja vrednost RCS koja odgovara upadnom uglu talasa koji se prenosi radarom. Slika 3.7 ilustruje da RCS doživljava slabljenje od više od 20 dB u odnosu na maksimalnu vrednost RCS za uglove upada od 90/270°.

Poslednji blok u ovoj fazi spaja vrednosti sa izlaza prethodna tri bloka i generiše krajnju vrednost sRCS na osnovu svih prethodno ocrtanih parametara. Podaci dobijeni tokom ove simulacije mogu se bez napora izvesti u različite formate datoteka, omogućavajući uvoz u druge softverske alate za dalju analizu. Generisana vrednost RCS-a, zajedno sa drugim fundamentalnim parametrima proizvedenim od strane specifičnih blokova simulatora, daje sveobuhvatan skup podataka neophodan za računarsku OTHR simulaciju.

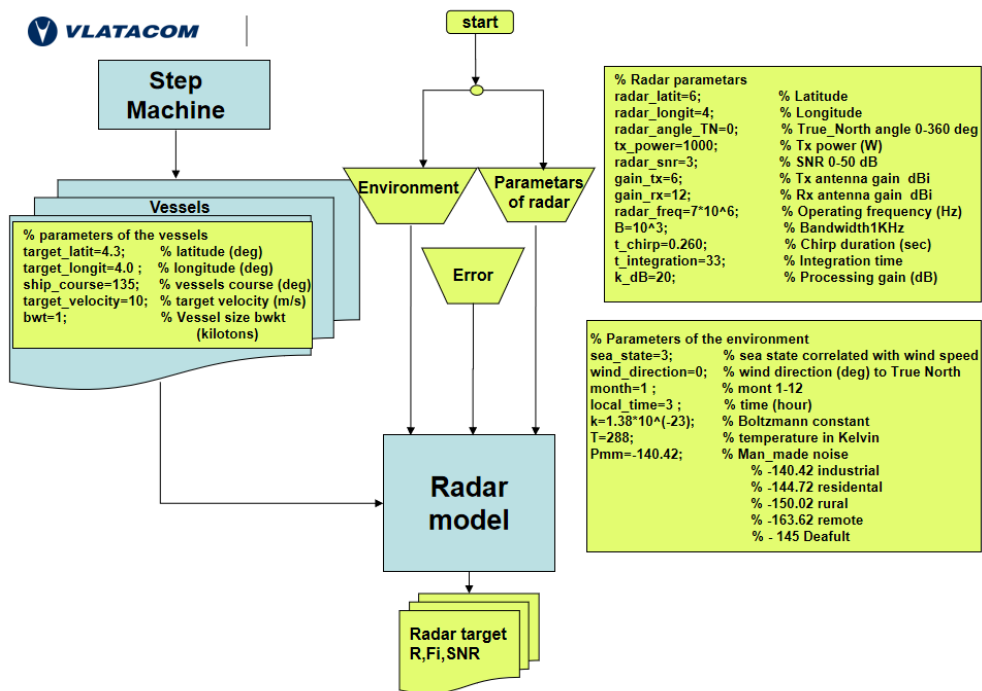
3.2 Primer simulacije

U radu je prikazana emulacija performansi uzorka sistema u realnom okruženju. Ova emulacija se sprovodi korišćenjem simulatora, koji se sastoji od opisanih softverskih komponenti, sa ciljem procene pokrivenosti i testiranja mogućnosti praćenja plovila u okviru sistema uzorka. Sistem je snabdeven pažljivo pripremljenim setovima ulaza za efikasno ilustraciju karakteristika radara u različitim uslovima, uključujući podešavanje radara, ciljeve, faktore okoline i još mnogo toga. Slika 3.8 prikazuje dijagram toka ovog uzorka simulacije.

Ulazi za simulaciju

Ulazi za simulaciju su organizovani u tri kritična skupa parametara: parametri radara, parametri okoline i posude za uzorke. Pored toga, blok „Greška“ uvodi opcionu funkciju za ispitivanje uticaja potencijalnih odstupanja u parametrima radara, uslovima okoline ili pozicijama ciljeva. LAT i LON podaci iz mašine za korake se transformišu u radarski koordinatni sistem u odnosu na LAT i LON pozicije radara, izražene kao rastojanje (R), ugao (F_i) i odnos signal-šum (S/N) koji odgovaraju specifičnim ciljevima.

Udaljenost (R) igra ključnu ulogu u modulima 1 i 2, doprinoseći proračunu gubitaka pri prostiranju elektromagnetnih talasa iznad površine mora.



Slika 3.8 Dijagram toka OTHR simulatora

Parametri radara

Koordinate radarske lokacije su pažljivo odabrane tako da liče na realne lokacije lokacije, pogodne za analizu u kontekstu potencijalnog postavljanja. U Tabela 1 su navedeni ključni parametri radara.

Tabela 1 – Ulazni parametri radara

NO	PARAMETER	UNIT	DEFAULT VALUE	VARIABLE
1	Radar latitude position	°	6.3	radar_latit
2	Radar longitude position	°	3.3	radar_longit
3	true_north-radar-antenna angle (main beam direction)	°	180	radar_angle_TN
4	Transmitted power	W	1000	Tx_power
5	SNR	dB	10	Radar_snr
6	Tx antenna gain	dBi	6	gain_tx
7	Rx antenna gain	dBi	12	gain_rx
8	Radar frequency	MHz	4.6	radar_freq
9	Bandwidth	kHz	1	B
10	Chirp duration	Sec	0.26	t_chirp
11	Integration time	Sec	33	t_integration

Parametri okoline

Tabela 2 daje parametare okoline obuhvaćenih simulacijom uzorka.

Tabela 2 – Ulazni parametri za estimaciju okruženja

NO	PARAMETER	UNIT	DEFAULT VALUE	VARIABLE
1	Sea state 1-6		1	<i>sea_state</i>
2	Wind direction (°) to True North	°	0	<i>wind_direction</i>
3	Month 1-12		1	<i>month</i>
4	Time (Hour) 0-24		9	<i>local_time</i>

Primer plovila

Tabela 3 daje niz parametara koji se odnose na plovila, a koji su od direktnog značaja za simulaciju uzorka. Ovi parametri ocrtavaju karakteristike ciljeva u okviru specifičnog scenarija simulacije.

Tabela 3 Ulazni parametri za simulirane brodove

NO	PARAMETER	UNIT	DEFAULT VALUE	VARIABLE
1	latitude (°)	°	5	<i>target_latit</i>
2	longitude (°)	°	5	<i>target_longit</i>
3	Vessel's course (°) TrueNorth	°	270	<i>ship_course</i>
4	Target velocity (m/s)	m/s	10	<i>target_velocity</i>
5	Ship size	kT	100	<i>bwt</i>

Procene RCS

Tabela 4 prikazuje procene površine RCS korišćene u ovoj simulaciji za dve radne frekvencije sistema. Ove vrednosti su kategorisane u tri grupe plovila: veoma velika (VL), srednja (M) i vrlo mala (VS), pri čemu je svaka kategorija definisana bruto tonažom i fizičkim dimenzijama plovila [46], kako je navedeno u tabeli.

Tabela 4 – Procenjeni RCS za 4,6 MHz i 7 MHz i klasifikacija veličine brodova

	Very large – VL	Medium – M	Very small – VS
DWT(1000T)	300	50	5
Length (m)	400	200	50
Width (m)	60	30	10
RCS- 4,6 MHz (m2)	579514.28	39430.95	1246.92
RCS- 4,6 MHz (dBm2)	57.63	45.96	30.96
RCS- 7 MHz (m2)	714881.81	48641.55	1538.18
RCS- 7 MHz (dBm2)	58.54	46.87	31.87

Rezultati simulacije

Funkcionalnost namenskog OTHR simulatora je demonstrirana kroz korišćenje dva različita scenarija. Rezultati svake simulacije se porede sa realnim vrednostima dobijenim iz implementiranog OTHR sistema, a numerički rezultati se dalje analiziraju korišćenjem softvera za prezentaciju.

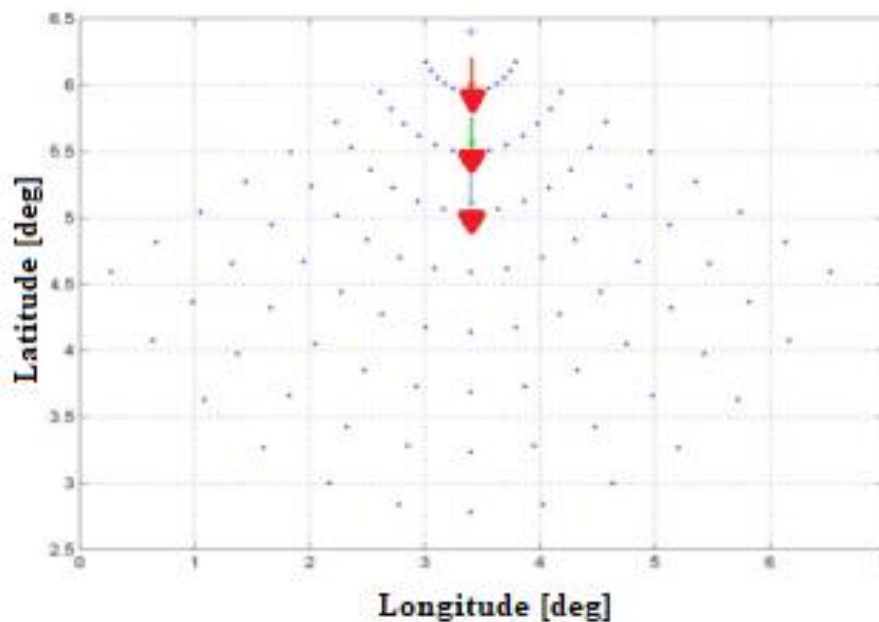
Scenario #1: Uticaj stanja mora na praćenje plovila

U ovom scenariju se ispituje uticaj stanja mora i pravca vetra na područje pokrivenosti sistema, posebno u odnosu na definisana plovila. Simulacija nastoji da potvrdi hipotezu da veće vrednosti stanja mora smanjuju pokrivenost sistema.

Radarski ciljevi u ovom scenariju se sastoje od grupe od tri plovila, od kojih svako pripada drugoj klasi. Plovilo koje je najbliže radaru je najmanje klase, dok je najveće plovilo pozicionirano najudaljenije od radara. Grupa plovila se kreće linearno, održavajući konstantnu brzinu sa kursom okomitim na prijemni niz radara. Fiksno rastojanje između uzastopnih plovila je 45 km. Zona posmatranja za simulaciju se kreće od 5 km do 400 km prema otvorenom moru, u okviru ugla pokrivanja od 120° ($\pm 60^\circ$ od centralne ose radarskog niza).

Slika 3.9 ilustruje podešavanje scenarija, uključujući početne pozicije plovila i njihove kurseve, pri čemu X-osa predstavlja relativnu širinu, a Y-osa predstavlja relativnu geografsku dužinu oblasti posmatranja.

Vreme integracije, Tabela 1, označava vreme potrebno da radarski simulator završi prikupljanje podataka. S obzirom da je pravom radaru potrebno 33 sekunde za integraciju, vreme integracije za ovaj scenario je precizno podešeno na 33 sekunde. Trajanje čirpa, takođe Tabela 1, iznosi 0,26 sekundi. Za ovaj scenario se koristi 256 čirpova, što rezultira ukupnim trajanjem simulacije od približno 66 sekundi ($0,26 \text{ sekundi} * 256 \text{ zvukova}$). Ukupno je sprovedeno osam serija podataka: dva za svaku radnu frekvenciju (4,6 MHz i 7 MHz) i četiri za svako stanje mora (vrednosti 1, 3, 5 i 6), sa posmatranim plovilima veličina VS, M i VL u svakom pokretanju simulacije. Parametar „smer vetra“ ostaje fiksna u svim simulacijama.



Slika 3.9 Početno podešavanje scenarija #01, početni položaji posuda za uzorke su označeni strelicama u boji.

Rezultati radarskog simulatora za scenario br. 1 su sažeti u

Tabela 5. Kolona „Očekivani domet“ predstavlja vrednosti dobijene od prethodno instaliranih operativnih radara na terenu, dok kolona „Stvarni domet“ predstavlja vrednosti izvedene iz izlaza OTHR simulatora za određenoj lokaciji. Rezultati potvrđuju da veće stanje mora zaista smanjuje pokrivenost OTHR sistemom, u skladu sa početnim očekivanjima.

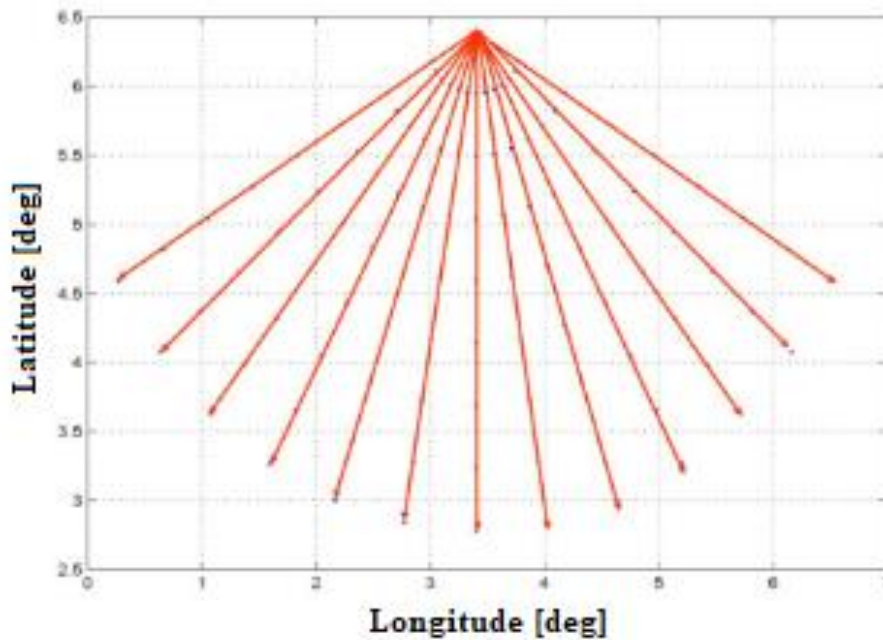
Tabela 5 – Postignuti rezultati analize uticaja stanja mora na proces praćenja plovila (sve vrednosti su prikazane u kilometrima)

Case	Radar freq. MHz	Sea State	Expected Range for VS vessel	Actual Range for VS vessel	Expected Range for M vessel	Actual Range for M vessel	Expected Range for VL vessel	Actual Range for VL vessel
1	4.6	1	215	222.75	300	313.25	370	387.75
2	4.6	3	215	225.75	300	317.25	370	392.75
3	4.6	5	190	197.25	260	275.75	320	340.25
4	4.6	6	170	176.25	220	245.75	280	302.75
5	7	1	120	129.75	180	196.25	240	253.25
6	7	3	115	127.75	160	191.25	230	245.25
7	7	5	100	103.75	140	154.75	180	197.75
8	7	6	90	92.25	120	135.25	160	172.75

Scenario #2: Uticaj radijalnog kretanja plovila na performanse detekcije

U ovom scenariju, fokus je na posmatranju područja pokrivanja plovila koja se radijalno udaljavaju od radara. Njihovo kretanje prati zračenje radarskog niza, sa razlikom od 10° između njihovih kurseva. Simulacija ima za cilj da testira hipotezu da je domet radarske detekcije veći u centralnom režnju antenskog niza u poređenju sa njegovim granicama. Štaviše, ispituje se kako opseg detekcije varira u zavisnosti od njihove

veliĉine i radne frekvencije (veći sudovi i niže frekvencije dovode do većeg opsega

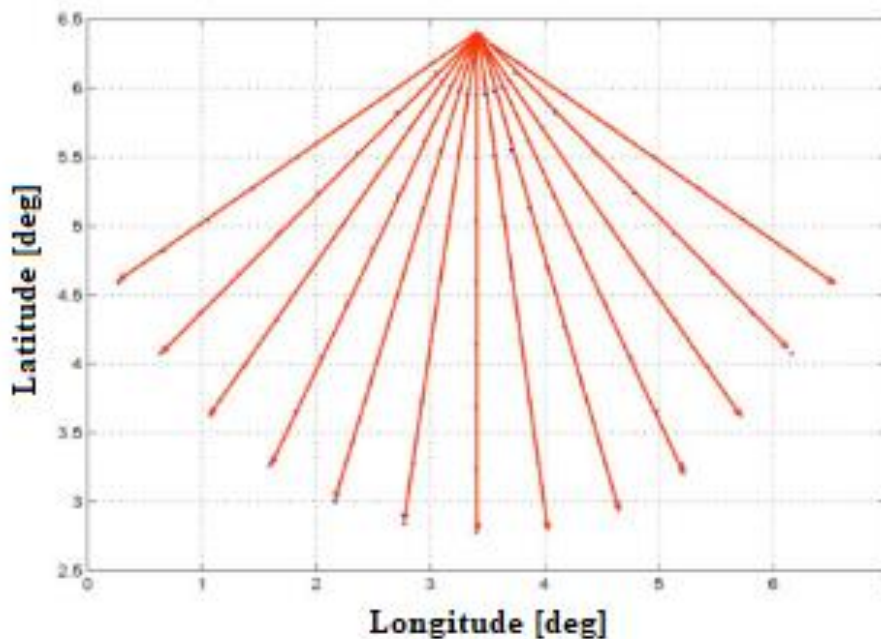


detekcije).

Slika 3.10 ilustruje početne položaje plovila i njihove *bearing* za scenario #2.

U ovom scenariju, radarski ciljevi se sastoje od grupe od 13 plovila koja pripadaju istim klasama za svaku simulaciju. Plovila se kreću linearno sa konstantnom brzinom i kursom, zračeći dalje od radarskog prijemnog niza (prateći patern zračenja). Zona posmatranja za simulaciju se proteže od 5 km od radara do 400 km u otvoreno more, sa uglom pokrivanja od 120° ($\pm 60^\circ$ od središnje ose radarskog niza).

Vreme integracije je podešeno na 33 sekunde, što rezultira ukupnim trajanjem simulacije od oko 66 sekundi. Izvršeno je ukupno šest serija podataka: dva za svaku radnu frekvenciju (4,6 MHz i 7 MHz) i tri za svaku posmatranu klasu plovila (VS, M, VL). Razmatrana vrednost stanja mora je 3.



Slika 3.10 Inicijalna postavka scenarija #02(putanje brodova prikazane su crvenim linijama)

Tabela 6 i Tabela 7 predstavljaju rezultate simulacije za sektore 1-7, koji odgovaraju uglovima od 60° naniže do 0°, sa dekrementom od 10°. Opsezi su dati u kilometrima, pri čemu "E" označava očekivane vrednosti zasnovane na operativnim radarima, a "A" predstavlja vrednosti iz OTHR simulatora za konkretnu lokaciju koja se razmatra. Imajte na umu da su vrednosti za sektore 8-13 simetrične onima koje su prikazane.

Tabela 6 – Postignuti maksimalni domet detekcije u scenariju sa radijalnim kretanjem plovila za radnu frekvenciju 4,6 MHz (sve vrednosti su prikazane u kilometrima)

Vessel size \ Sector	1E	1A	2E	2A	3E	3A	4E	4A	5E	5A	6E	6A	7E	7A
VS	180	188.2	185	189.2	195	202.2	200	209.7	205	218.7	215	221.7	220	222.7
M	275	276.2	280	289.2	290	299.2	295	304.7	300	309.7	305	311.7	310	312.7
VL	330	343.7	350	363.2	360	368.2	370	374.2	380	380.2	385	387.2	385	388.2

Kao što je vidljivo iz Tabela 6 i Tabela 7, veća plovila se mogu detektovati na većim udaljenostima od radara u poređenju sa manjim klasama plovila, što je u skladu sa očekivanjima. Štaviše, plovila iste veličine su vidljiva na većim udaljenostima kada se detektuju korišćenjem niže radne frekvencije (4,6 MHz) radarskog sistema. Maksimalni domet se postiže upravo u pravcu centralne ose radarskog niza. Kako se neko udaljava od centralnog ugla, vrednost maksimalnog dometa progresivno se smanjuje.

Tabela 7 – Postignuti maksimalni domet detekcije u scenariju sa radijalnim kretanjem plovila za radnu frekvenciju 7 MHz (sve vrednosti su prikazane u kilometrima)

Vessel size \ Sector	1E	1A	2E	2A	3E	3A	4E	4A	5E	5A	6E	6A	7E	7A
VS	90	106.7	95	114.7	110	124.7	115	127.7	120	128.7	125	129.7	125	129.7
M	160	168.7	170	177.7	180	187.2	185	191.2	190	192.2	195	195.2	195	195.2
VL	215	223.7	225	234.7	230	241.7	235	247.7	240	250.7	250	252.2	250	253.2

U zaključku OTHR simulator, softverski alat, je detaljno opisan i testiran u različitim scenarijima kako bi se proverila njegova funkcionalnost i tačnost podataka koje proizvodi. Ključni nalazi i doprinosi mogu se sažeti na sledeći način:

1. Funkcionalnost: OTHR Simulator omogućava analizu faktora okoline i parametara specifičnih za sistem koji utiču na rad radarskih sistema iznad horizonta. Pruža fleksibilnost za povezivanje sa drugim kompjuterskim alatima i stvarnom radarskom opremom, što ga čini raznovrsnim alatom za radarsku analizu.

2. Validacija: Simulator je testiran pod različitim scenarijima, a njegovi rezultati su upoređeni sa stvarnim merenjima dobijenim od operativnih OTHR radara. Rezultati su pokazali da su performanse simulatora dobro usklađene sa podacima iz stvarnog sveta, demonstrirajući njegovu pouzdanost za praktične primene.

3. Primene: Simulator se može koristiti za planiranje radarskog sistema, istraživanje i razvoj, komercijalne primene i obrazovne svrhe. Inženjeri su ga koristili za instalacije VHF-OTHR sistema širom sveta, doprinoseći proceni mogućnosti OTHR radarskog sistema u stvarnoj primeni.

4. Nastavno sredstvo: Simulator može poslužiti i kao obrazovno sredstvo na visokoškolskim ustanovama, posebno u oblastima vezanim za radarske sisteme, omogućavajući studentima da steknu praktično iskustvo u radarskoj tehnologiji.

Ukratko, OTHR Simulator nudi vredan alat za analizu, planiranje i razvoj radarskih sistema iznad horizonta, sa dokazanom pouzdanošću i praktičnom korisnošću u aplikacijama u

4. NOVE ARHITEKTURE OTHR SISTEMA

HFSW OTHR sistemi su jako kompleksni, pa samim tim na praktičnu implementaciju utiču razni faktori kao što su: konfiguracija radara, odabir lokacije gde se sistem instalira, broj antenskih elemenata, arhitektura prijemnih i predajnih nizova, zatim talasni oblik OTHR signala i odabir algoritama za detekciju [44].

Arhitektura OTHR sistema se odnosi na relativni položaj predajnika i prijemnika. U zavisnosti od toga koliko su prijemnik i predajnik međusobno udaljeni razlikujemo tri glavne arhitekture:

1. Monostatički radar
2. Bistatički radar
3. Multistatički radar

Kod monostatičkog radara predajnik i prijemnik su locirani na istoj lokaciji, dok su kod bistatičkog radara [58] predajnik i prijemnik prostorno odvojeni i nalaze se na različitim lokacijama. Kod multistatičkog radar postoji jedan predajnik i više prijemnika koji su prostorno odvojeni [74-76], ali se ova konfiguracija neće razmatrati u ovom radu.

4.1 Monostatičke arhitekture OTHR radara

Ukoliko se predajni i prijemni deo OTHR sistema nalaze na istoj lokaciji onda se ta geometrija naziva monostatička. S obzirom na to da se kod ovog radara koristi frekvencijski modulisan kontinualan signal (*FMCW*) jako je bitno izolovati direktnu komponentu koja dolazi sa predajnog niza na prijemni niz. Ovo se postiže prostornom separacijom predajnika i prijemnika sa međusobnim razmakom između 10 i 20 talasnih dužina. Na ovan način se sprečava potencijalno zasićenje prijemnika i samim tim sistem ostaje u operativnom režimu.

Odabir radne frekvencije je veoma bitan to pitanju performansi OTHR sistema. Jako je važno da prilikom odličivanja koje će se frekvencije koristiti uzme u obzir „čistoća“ spektra. Pored ovoga glavni faktori koji utiču na odabir frekvencije su: (1) propagaciono slabljenje površinskog talasa, (2) spektralna gustina ambijentalnog šuma, (3) varijacije RCS-a, (4) Doplerova frekvencija meta, (5) rezolucija po azimutu, (6) uticaj jonosverske interferencije [2]. Svi ovi faktori jako variraju sa promenom frekvencije.

Za brodove koji se nalaze iza linije horizonta propagaciono slabljenje iznad slanog mora se dramatično menja u slučaju promene radne frekvencije. Gustina snage signala reflektovanog od brod u zoni difrakcije je dosta veća za niže frekvencije. Iz tog razloga je bitno da se radi na nižim frekvencijama kako bi se ostvarili veći domeri radara.

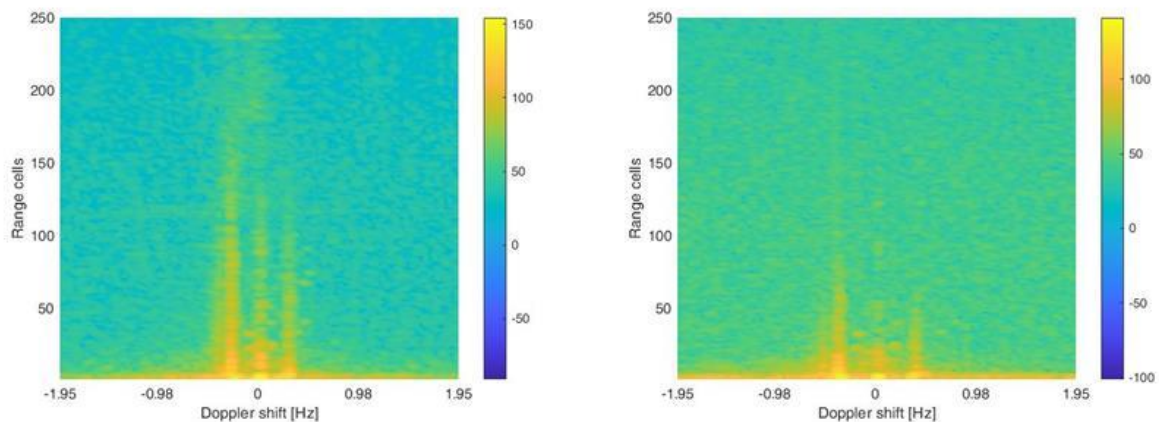
Uticaj jonosfere se znatno menja sa porastom frekvencije, tako da za radne frekvencije više od 8 MHz uticaj je jako mali, takođe kod viših frekvencija širina glavnog loba u dijagramu zračenja prijemnog niza je uža i samim tim se ostvaruje bolja rezolucija po azimutu. RCS ima tendenciju porasta sa porastom radne frekvencije.

Zbog izraženog uticaja Bragovig linija koje je javljaju u RD mapi kao posledica refleksije signala od morske talase dolazi do maskiranja potencijalni brodova koji se nalaze baš u toj zoni doplerovih frekvencija [2]. Promenom radne frekvencije menja se i položaj Bragovih linija u RD mapi, što je prikazano na slici 4.1.

Iz svega nevedenog prilikom odabira frekvencije jako je bitno da se pronade dobar balans. Npr. povećavanjem radne frekvencije dobija se boljitak u RCS-u, kao i smanjuje uticaj jonosfere, dok se sa druge strane znatno povećavaju propagacioni gubici, pa se tim smanjuje domet radara. Ukoliko je akcenat na malim brodovima, a ne na velikom dometu koristi se radna frekvencija u vecem delu HF spektra (9-16 MHz), ali ako se trazi sto veci domet radara, a fokus je na većim brodovima koristi se radna frekvencija u nižem delu HF spektra (4-9 MHz).

Kao rešenje ovih ograničenja u korišćenju pojedinačnih frekvencija došlo se do ideje da se koristi dvo-frekvensijski mod. Na ovaj način otvara se mogućnost praćenja većih brodova na jako velikim udaljenostima, do 400 km, a isto tako omogućena detekcija i praćenje veoma malih brodova (15m u dužini).

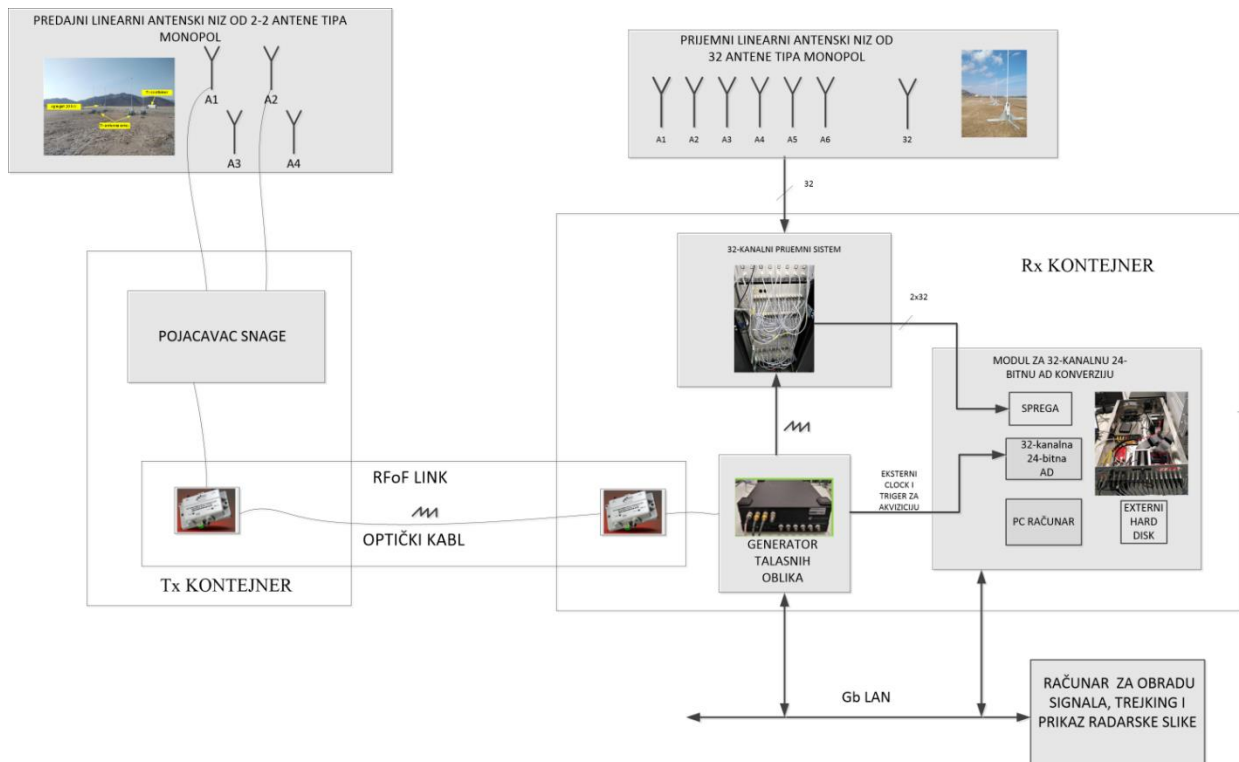
Takodje, simultanim korišćenjem dve različite radne frekvencije otvara se mogućnost detekovanja brodova na pozicijama Bragovih linija. Slika 4.1 ilustruje primer gde za dve različite radne frekvencije radar pozicionira drugačije bragove linije u RD mapi i na taj način simultanim radom se primecuju detekcije koje bi bile prekrivene ukoliko bi se koristila samo jedna frekvencija.



Slika 4.1 Izgled Bragovih lina za frkvencije 8.5 MHz – levo i 15 MHz – desno

4.1.1 Monostatička arhitektura sa jednom radnom frekvencijom

U ovoj arhitekturi su korišćene 32 antene u prijemnom nizu, dok su u predajnom nizu korišćene 4 antene, slika 4.2.



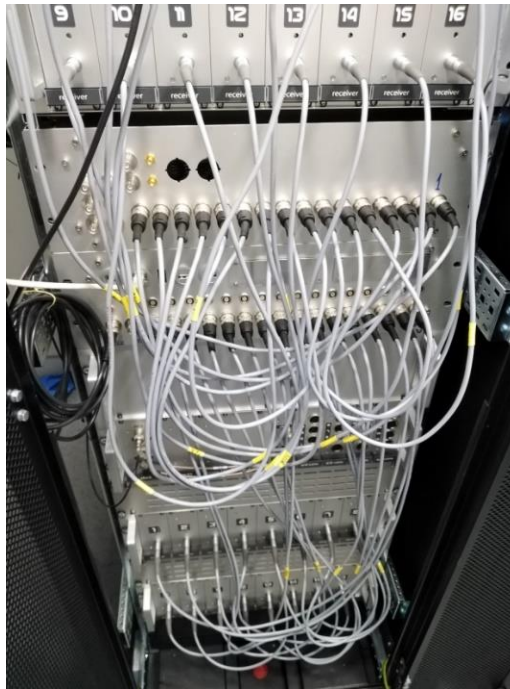
Slika 4.2 Blok šema monostaticke arhitekture OTHR radara na 9.2 MHz sa 32 Rx antene, instaliranog na poligonu

Uredjaji OTHR radara su integrisani u funkcionalne celine i to:

- Prijemni (Rx) deo smešten u kontejner sa pripadajućim antenskim nizom
- Predajni (Tx) deo smešten u kontejner sa pripadajućim predajnim antenskim nizom

Predajni i prijemni deo radara se razmeštaju na lokacijama pogodnim za funkcionisanje prijemnih i predajnih antenskih nizova na medjusobnom rastojanju reda 1.2-1.5 km. Povezuju se RFOF (Radio Frequency over fiber) linkom, što predstavlja unapredjenje u pogledu arhitekture OTHR radara u odnosu na postojeća rešenja (U većini poznatih rešenja OTHR radara prijemni i predajni deo se povezuju koaksijalnim kablovima, što je skopčano sa postavljanjem tih kablova u kanalima. Poseban problem predstavlja uzemljenje tih kablova zbog rizika vezanih za atmosferska pražnjenja pri kojima se u slučaju lošeg uzemljenja koaksijalnih kablova indukuje visok napon koji može da ošteti uređjaje na prijemnoj odnosno predajnoj strani radara.

U prijemnom kontejneru smešteni su višekanalni prijemni sistem, generator talasnih oblika i modul za 32 kanalnu 24-bitnu AD konverziju izlaznih signala sa prijemnih kanala. Svi prijemni kanali su analogni i u suštini predstavljaju homodinsku varijantu prijemnika.



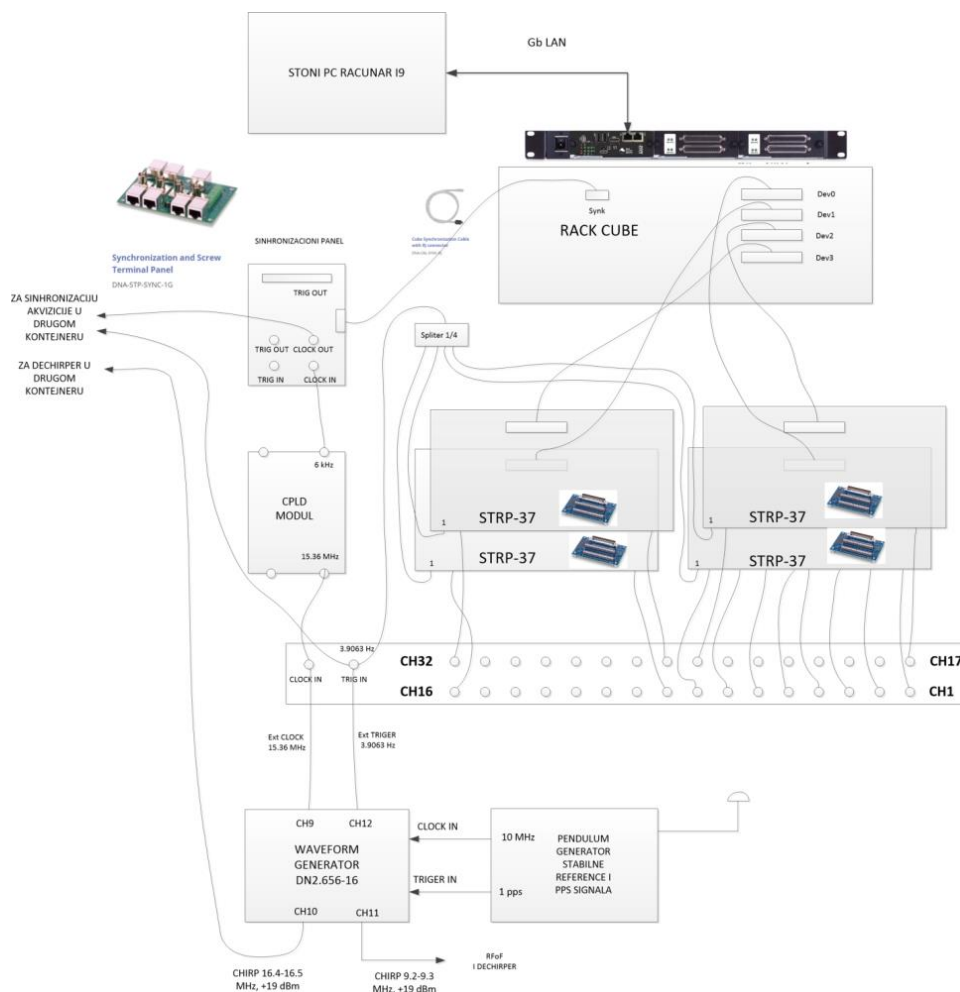
Slika 4.3 Višekanalni analogni prijemni sistem

Modul za 24-bitnu 32-kanalnu AD konverziju omogućava prihvatanje analognih IQ signala sa izlaza analognih prijemnih kanala sa integrisanim modulom za spregu "single-ended" izlaza prijemnika na diferencijalni ulaz modula za AD konverziju. Eksterni triger i takt za AD konverziju se generišu u generatoru talasnih oblika. Upravljanje radom modula za akviziciju se vrši pod nadzorom internog PC računara. Ovaj računar upravlja startovanjem procesa akvizicije i procesima transfera i memorisanja RAW fajlova sa akviziranim signalima. RAW fajlovi se opciono šalju na drugi računar u ili van kontejnera gde se obrađuju ili interno memorišu na hard disku a u cilju naknadne "off-line" analize.

Generator talasnih oblika generise simultano dva vremeski sinhronizovana chirp signala. Jedan se posredstvom splitera vodi na mikser prijemnih kanala, a drugi posredstvom RFoF linka na predajni deo radara. Pored toga generator talasnih oblika generise signal eksternog trigera i eksternog takta koji se koriste za upravljanje akvizicijom modula za 32-kanalnu akviziciju.

Sastavni deo prijemnog dela OTHR radara je računar za obradu signala, praćenje meta i prikaz radarske slike. Ovaj računar je integrisan u konkretnoj instalaciji u prijemni kontejner, ali se prema potrebi može izmestiti van kontejnera i povezati putem LAN mreže sa prijemnim kontejnerom. Na ovom računaru su implementirani algoritmi za primarnu obradu signala (formiranje detekcija), praćenje ciljeva i vizuelizaciju radarske slike. Posredstvom ovog računara se mogu setovati svi sistemski parametri radara od interesa za njegovu funkcionalnost.

U predmetnoj instalaciji prijemni antenski niz je linearan sa ekvidistantnim razmakom između antena 0.45 talasne dužine nosioca. Antene su osmo-talasni monopoli sa radijalima žičnog tipa koji se postavljaju radijalno u odnosu na poziciju antena.



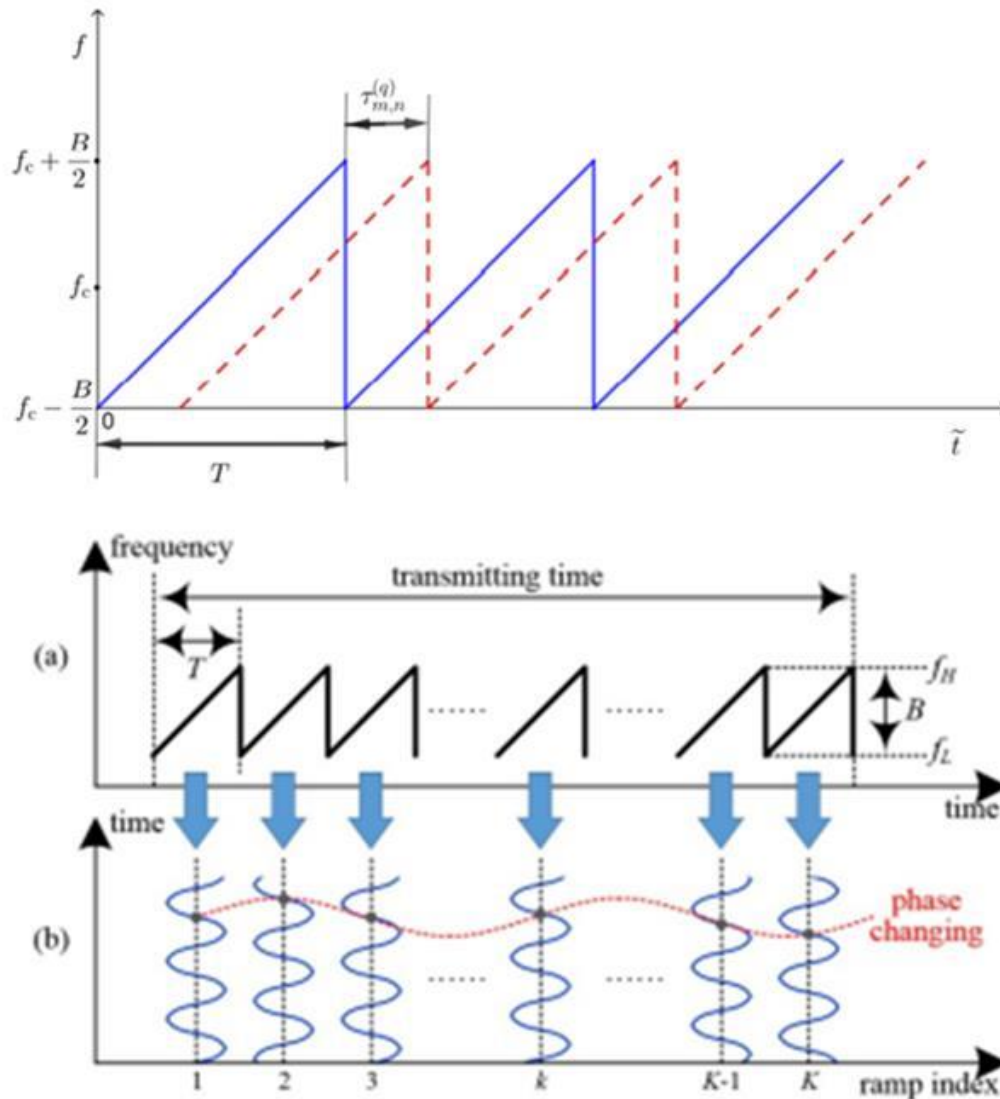
Slika 4.4 Blok sema 32-kanalnog 24-bitnog AD modula

Antene u antenskom nizu se povezuju sa kvalitetnim koaksijalnim kablovima 50 Ohm. Pre montaže vrši se kalibracija antenskih kablova i prijemnih kanala kojom se mere razlike u električnim dužinama kablova u odnosu na referentni kabl (obično kabl prve antene, ali to može da bude kabl bilo koje antene). Jako je bitno da fazno odstupanje na kanalima i odgovarajućim kablovima bude sto niže, tj. da ne prelazi 180 stepeni. Kalibracionim postupkom se formiraju kalibracioni koeficijenti koji imaju ulogu da nadomeste fazna odstupanja po kanalima tokom obrade signala.

Osnovni element predajnog dela OTHR radara je pojačavač snage. U konkretnoj instalaciji je korišćen pojačavač nominalne snage 1kW, ali je u praksi korišćena predajna snaga reda 500W. Pojačavač dobija predajni čirp signal posredstvom RF linka, isti pojačava, pa preko razdelnika deli na dva izlaza i te izlaze korišćenjem koaksijalnih kablova iste dužine vodi na predajne antene 1 i 2 sa slike 4.6. Antene 3 i 4 su pasivne, opterećenje sa impedansom od 50 Oma i njihova uloga je da na principu pasivnog couplinga poboljša odnos napred-nazad predajnog niza.

Osa prve i druge antene se postavlja tako da bude u pravcu ose prijemnog antenskog niza. Time se formira nula u dijagramu predajnog antenskog niza koja je u smeru prijemnog antenskog niza čime se potiskuje direktni talas za oko 20 dB. Da bi se dodatno smanjio uticaj direktnog talasa, a u cilju optimizacije ulaznog signala u AD konvertor, na iza miksera analognih prijemnika ugradjeni su visokopropusni filtri (kolokvijalno poznati kao notch filtri) kojima se dodatno filtriraju komponente bliske DC, a koje su posledica direktnog talasa.

Po principu sada OTHR radar sa sl. 4.5 spada u kategoriju kontinualnih FMCW radara.



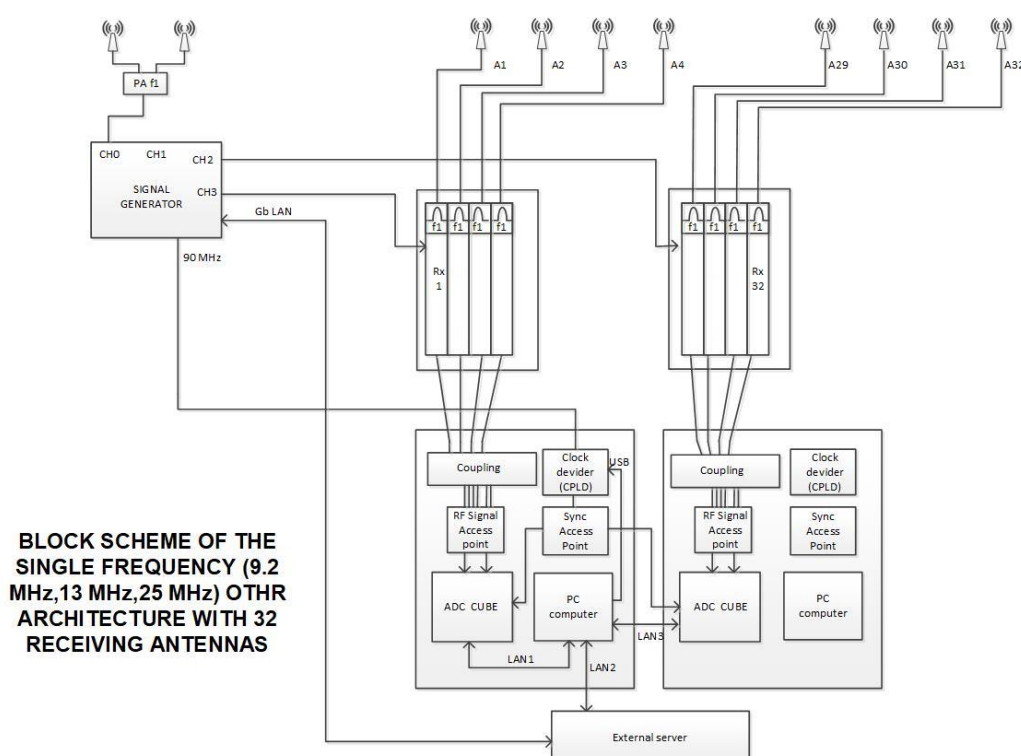
Slika 4.5 Model signala FMCW radara

Kao što je prethodno rečeno, generator talasnih oblika generise simultano dva vremeski sinhronizovana čirp (*chirp*) signala. Jedan se posredstvom delitelja vodi na mikseru prijemnih kanala, a drugi posredstvom RFoF linka na predajni deo radara. Predajni čirp signal se reflektuje od ciljeva i dolazi na prijemni antenski niz sa kasnjenjem koje je srazmerno daljini cilja.

Signal sa antena sa ulaza prijemnika se nakon filtriranja i pojačanja množi sa čirp signalom koji se generise u generatoru talsanih oblika (dečirpovanje ulaznih signala). Na sl. 4.5 prikazan je model signala ciljnog FMCW radara, []. Na sl. 4.5 "T" označava trajanje čirp signala (u konkretnom radaru $T=0.256$ s), " f_c " frekvenciju nosioca (u konkretnom radaru $f_c=9.2$ MHz), a "B" predstavlja širinu spektra FMCW signala. Signal reflektovan sa cilja dolazi na mikser sa vremenskim kašnjenjem koje je srazmerno udaljenosti cilja od radara. Množenjem reflektovanih signala od ciljeva dobija se skup kompleksnih sinusoida na izlazu miksera čije frekvencije su srazmerne daljini ciljeva (mikser preslikava vremenska kašnjenja u frekvenciju). Ukoliko je cilj pokretan, tada postoji doplerov pomak u prijemnom signalu koji je srazmeran radijalnoj brzini cilja.

Od uzoraka signala koji se dobijaju simultanom akvizicijom signala sa izlaza multikanalnog prijemnog sistema formira se 3D kocka dimenzija (M,N,P) gde M predstavlja broj frejmova u periodu integracije (*slow domain*), N predstavlja broj antena u antenskom nizu, a P broj vremenskih uzoraka u svakom od frejmova (*fast domain*). U konkretnoj instalaciji $M=768$, $N=32$, $P=1536$. Za navedene parametre obezbedjuje se rezolucija po daljini od 1.5 km i rezolucija po Dopleru 0.0025 Hz.

Primenom 3D fourijeove analize na 3D kocku (cube) sa vremenskim uzorcima signala sa svih antena dobija se 3D kocka u spektralnom domenu. Pozicije pikova u toj 3D kocki odgovaraju daljini, doplerovom pomaku (radijalnoj brzini) i smeru cilja u odnosu na lokaciju radara. Detekcija ciljeva u predmetnoj instalaciji se vrši korišćenjem CFAR detektora primenjenog na 3D kocku u spektralnom domenu.

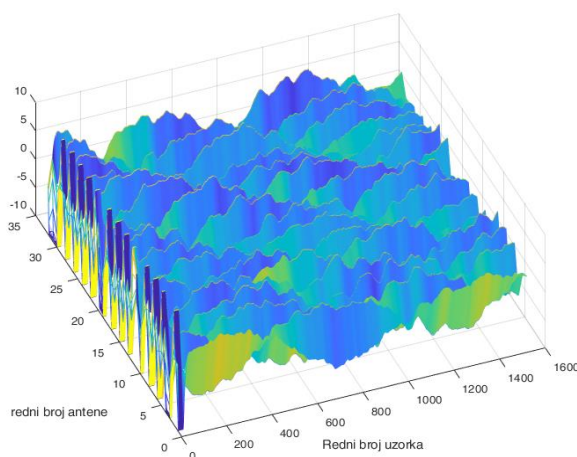


Slika 4.6 Monostatička arhitektura OTHR radara na 9.2 MHz sa 32 Rx antene, instaliranog na poligonu

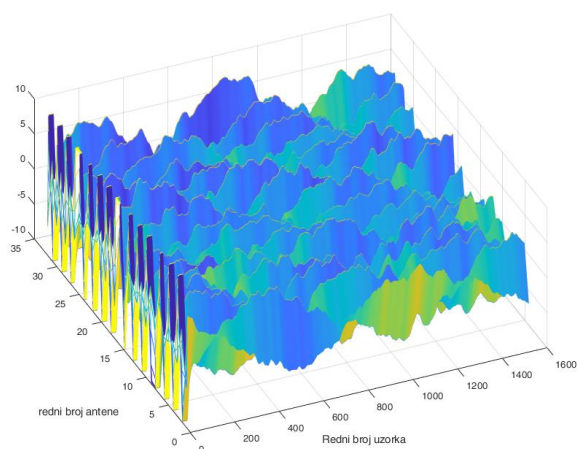
4.1.1.1. Rezultati funkcionalnog testa

Testiranje 32-antenskog niza

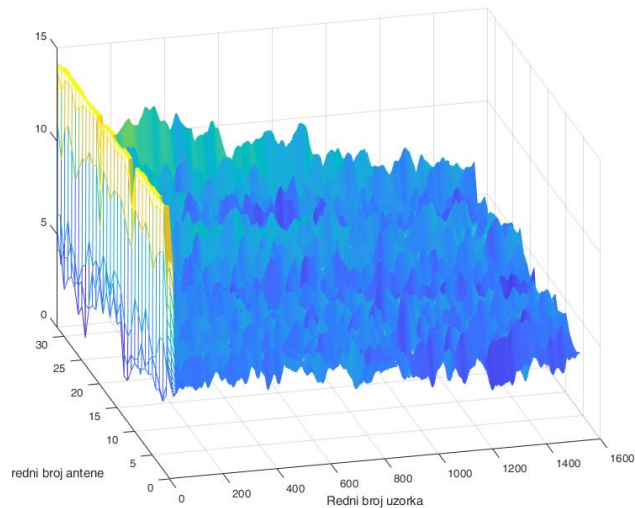
Prvi korak u proveri funkcionalnosti 32-kanalne arhitekture OTHR radara je provera da li višekanalna akvizicija radi korektno. Na slikama 4.7, 4.8 i 4.9 prikazane su realna komponenta, imaginarna komponenta i modul akviziranih signala na izlazu miksera u prijemnim kanalima. Sa slika se uočava da u svakom frejmu ima tačno 1536 samplova (nema 'klizanja' samplova), te da su tranzicije signala na svakoj anteni koje su posledica preklapanja referentnog čirp signala i zakasnenih replika čirp signala poravnate što znači da je eksterno trigerovanje akvizicionih kartica funkcioniše dobro. Takodje na slici 4.9 se može uociti da su nivoi signala na 31 i 32 anteni nesto viši nego na ostalim antenama što je i očekivano jer su ove antene najbliže predajnim antenama na 9.2 MHz. Takodje se uočava da u signalima nema klipovanja što znači da su atenuacije podešene kako treba.



Slika 4.7 Realna komponenta signala sa 32 antene na 9.2 MHz nakon miksera



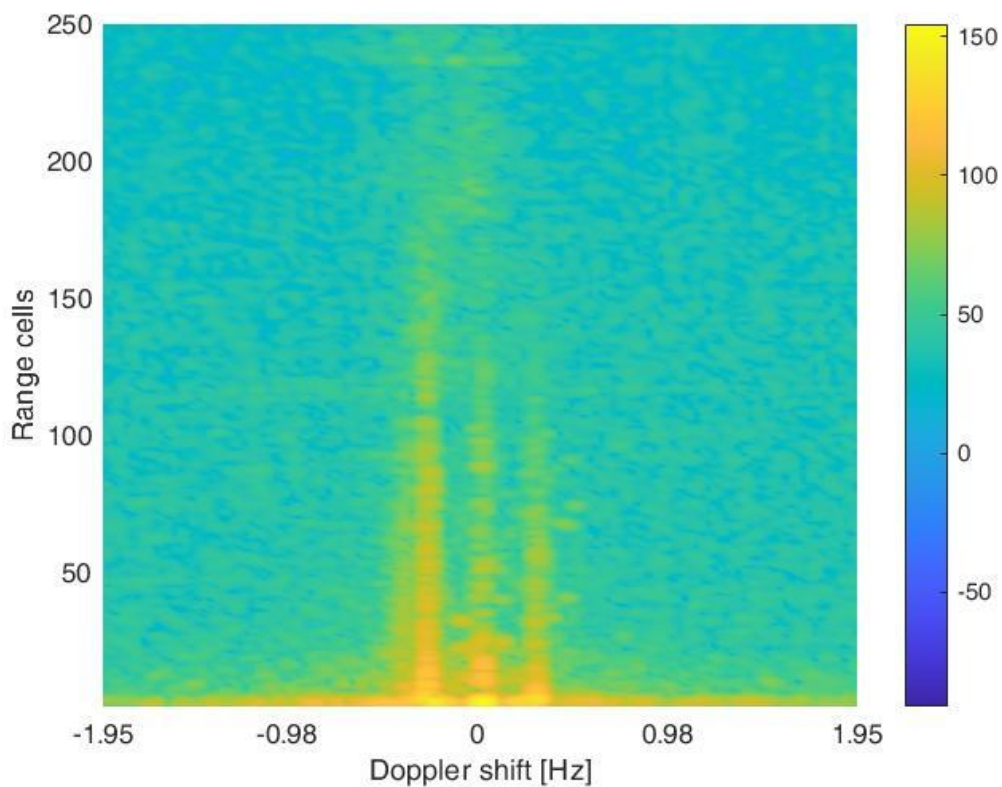
Slika 4.8 Imaginarna komponenta signala sa 32 antene na 9.2 MHz nakon miksera



Slika 4.9 Modul signala sa 32 antene na 9.2 MHz nakon miksera

RD mape

Drugi korak u proveru funkcionalnosti vezan je za generisanje Range-Dopler (RD) mapa. Na slici 4.10 prikazan je primer RD mape dobijen na osnovu signala prikazanih na slikama 4.7, 4.8 i 4.9.



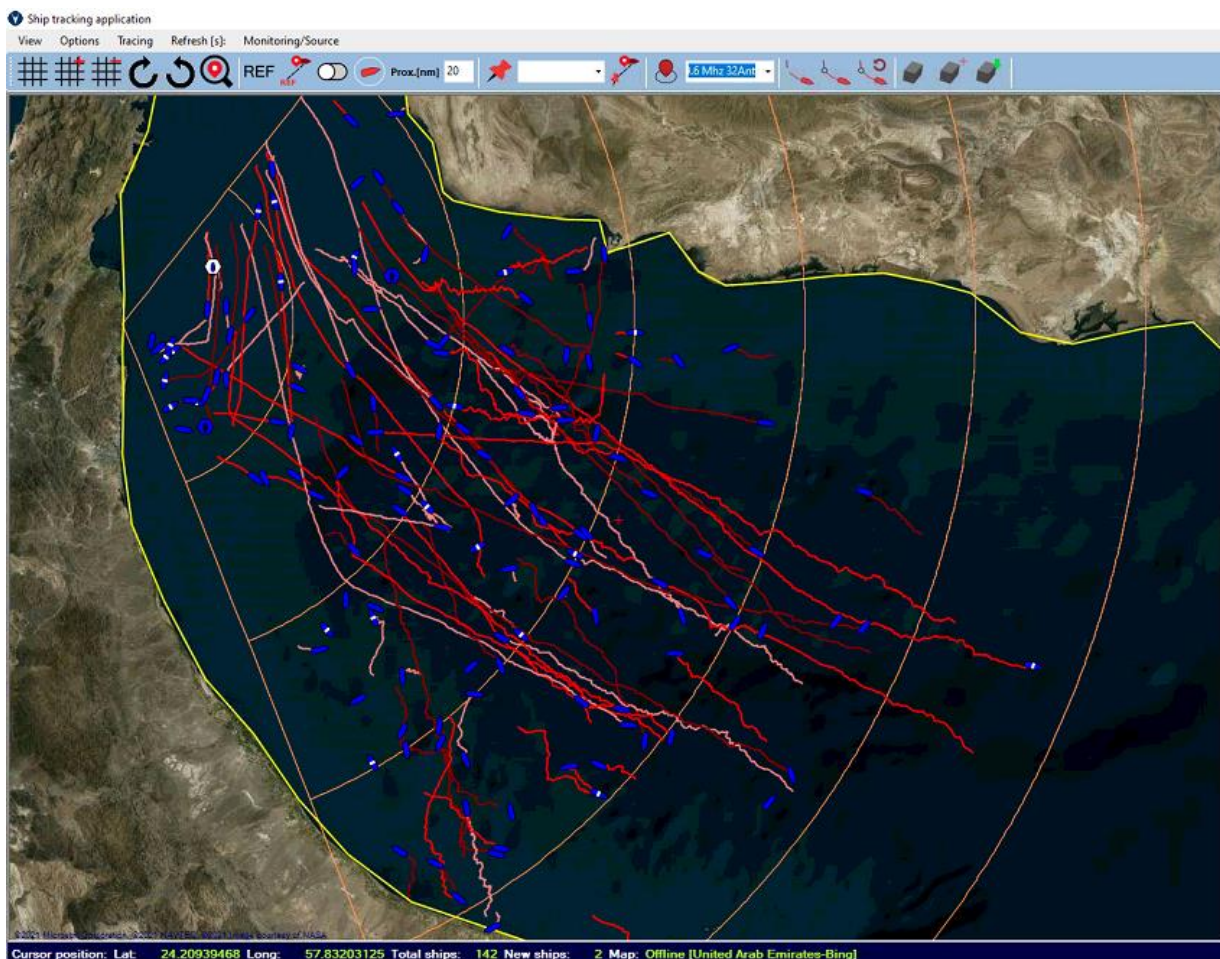
Slika 4.10 RD mapa za snimak signala sa 32-kanalnog prijemnog sistema na 9.2 MHz

Na slici 4.10 se uočava postojanje Bragovih linija na Doplerovim frekvencijama oko +/- 0.3 Hz što se slaže sa Doplerovim pomacima Bragovih linija na frekvenciji 9.2 MHz dobijenih primenom formula (9).

Takodje na RD mapi se uočava da postoji veliki broj nerazdvojivih pikova na nultoj Doplerovoj frekvenciji koji odgovaraju stacionarnim ciljevima. Do sada su postupkom detekcije detektovani samo razdvojivi pikovi u RD mapi. Iz navedenih razloga, a polazeći od prikazane RD mape, intenzivno se radi na nadogradnji postojeće aplikacije za detekcije tako da ista detektuje ciljeve sa nultim Doplerovim pomakom, a čiji su pikovi u RD mapi nerazdvojivi po range-u.

Prikaz detekcija I tragova

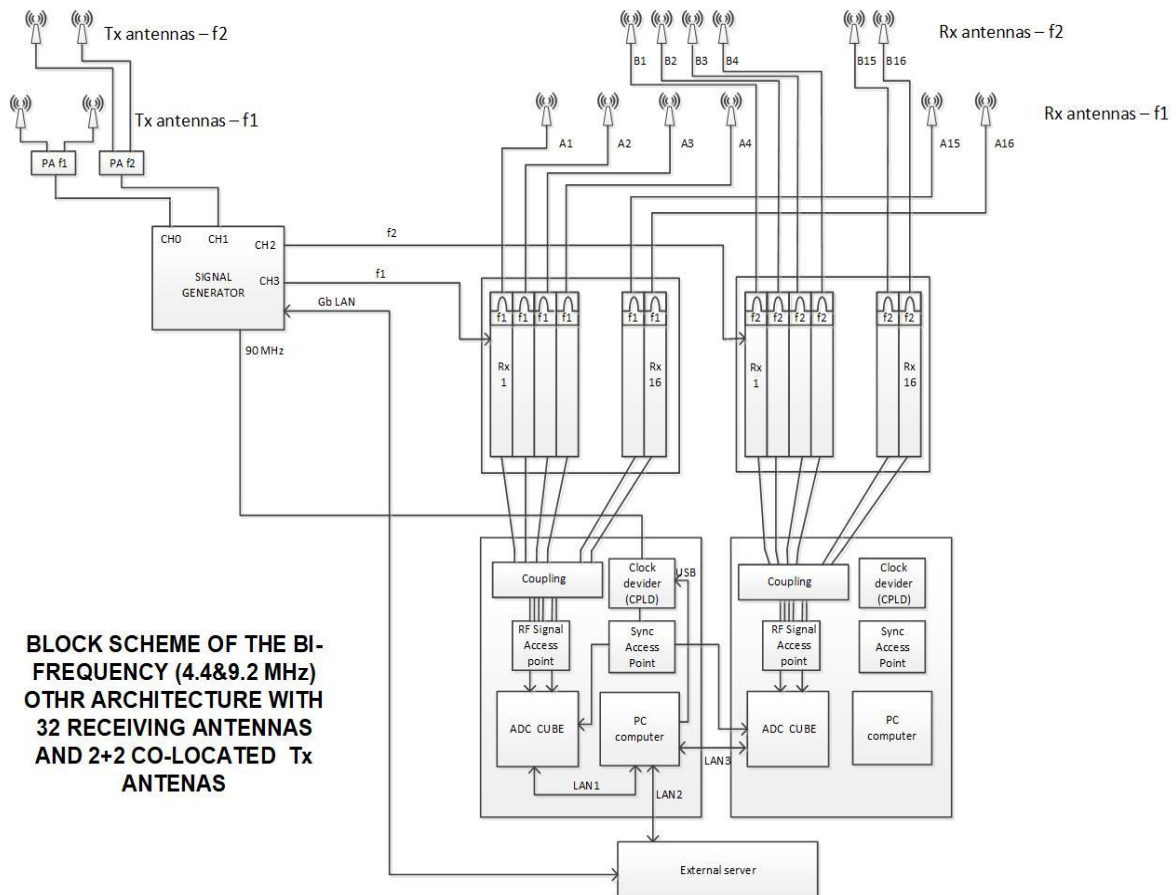
U okviru Instituta Vlatacom je razvijena aplikacija za praćenje detekcija, slika 4.11. Korišćenjem ove aplikacije se vizualizuju detekcije i njihovi tragovi na mapi. Slika 4.11 pokazuje mapu sa detekcijama I njihovim tragovima nakon 12 sati uzastopnog snimanja. Sa slike se može jasno uočiti ulančavanje detekcija i konzistentnost formiranih tragova.



Slika 4.11 Aplikacija za prikaz i praćenje meta kod OTHR sistema sa jednom random fekvencijom i 32 antene

4.1.2 Monostatička arhitektura sa dve radne frekvencije

Za predmetna testiranja korišćena je bi-frekvencijska 32-kanalna (16 kanala za 4.6 MHz+16 kanala za 9.2 MHz) arhitektura OTHR radara iz razvoja koja je instalirana na lokaciji AI Bidya. Na slici 4.12 prikazana je blok šema arhitekture OTHR sistema.



BLOCK SCHEME OF THE BI-FREQUENCY (4.4&9.2 MHz) OTHR ARCHITECTURE WITH 32 RECEIVING ANTENNAS AND 2+2 CO-LOCATED Tx ANTENNAS

Slika 4.12 Detaljnija blok šema arhitekture OTHR radara za bi-frekvencijski rad korišćna za ispitivanje detektibilnosti malih čamaca

Arhitektura OTHR radara za bi-frekvencijski rad je formirana integracijom prijemnih modula dva radara za opseg 4.6 i 9.2 MHz u jedan rek, slika 4.12, korišćenjem već postavljenih linearnih antenskih nizova od po 16 antena za ta dva opsega. Da bi se to omogućilo izradjena su i kalibrisana dva nova seta prijemnih antenskih kablova nominalne dužine od 275 metara sa kojima su povezane antene za opseg 9.2 MHz i izvedeno je uvođenje tih kablova u isti kontejner zajedno sa kablovima iste dužine antenskog niza od 4.6 MHz.

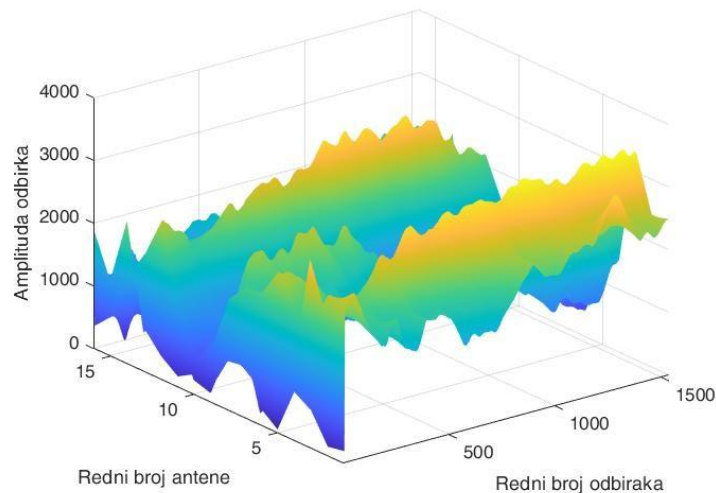
Za potrebe formiranja nove arhitekture OTHR radara za bi-frekvencijski rad izvršena je integracija dva modula za 24-bitnu AD konverziju u jedinstven modul za sinhronizovanu 32-kanalnu akviziciju sa externim taktom i trigerom generisanim pomoću waveform generatora (slika 4.12).

Izvršeno je testiranje ispravnosti povezivanja prijemnih kanala na modul za 32-kanalnu akviziciju, podešavanje atenuacija na prijemnim kanalima kao i podešavanje nivoa signala na izlazu waveform generatora.

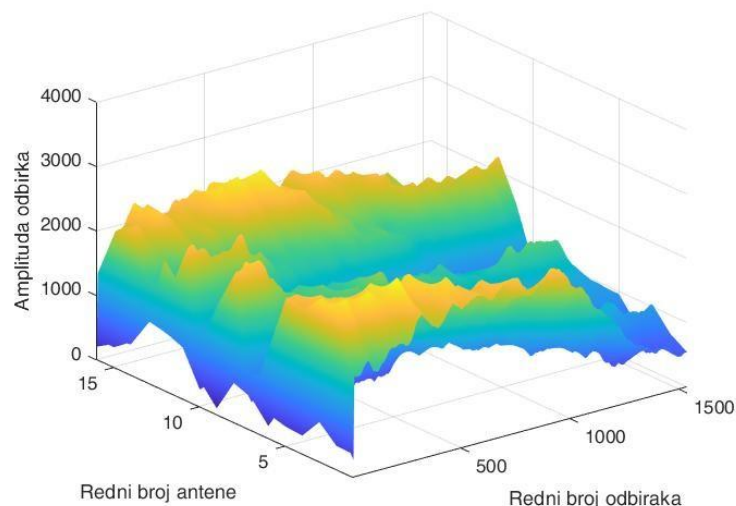
4.1.2.1. Rezultati funkcionalnog testa

Testiranje 32-antenskog niza

Kao i kod OTHR sistema sa jednom random frekvencijom za bi-frekvencijski OTHR sistem potrebno je uraditi proceduru kalibracije i testiranja prijemnih kanala i antenskih kablova. Slike xx, xx I xx pokazuju rezultate nivoa signala po prijemnim kanalima.

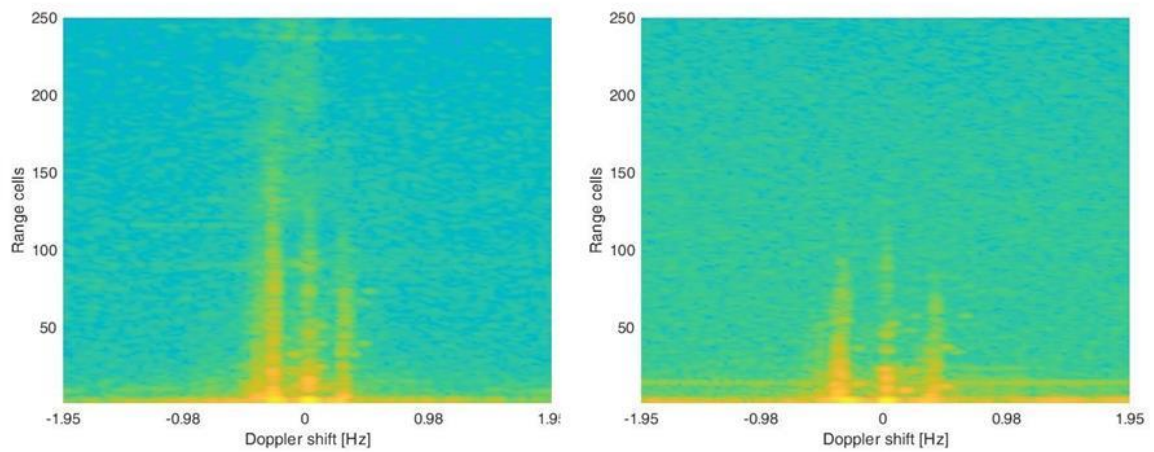


Slika 4.13 Modul signala sa 16 antena na 4.6 MHz nakon miksera



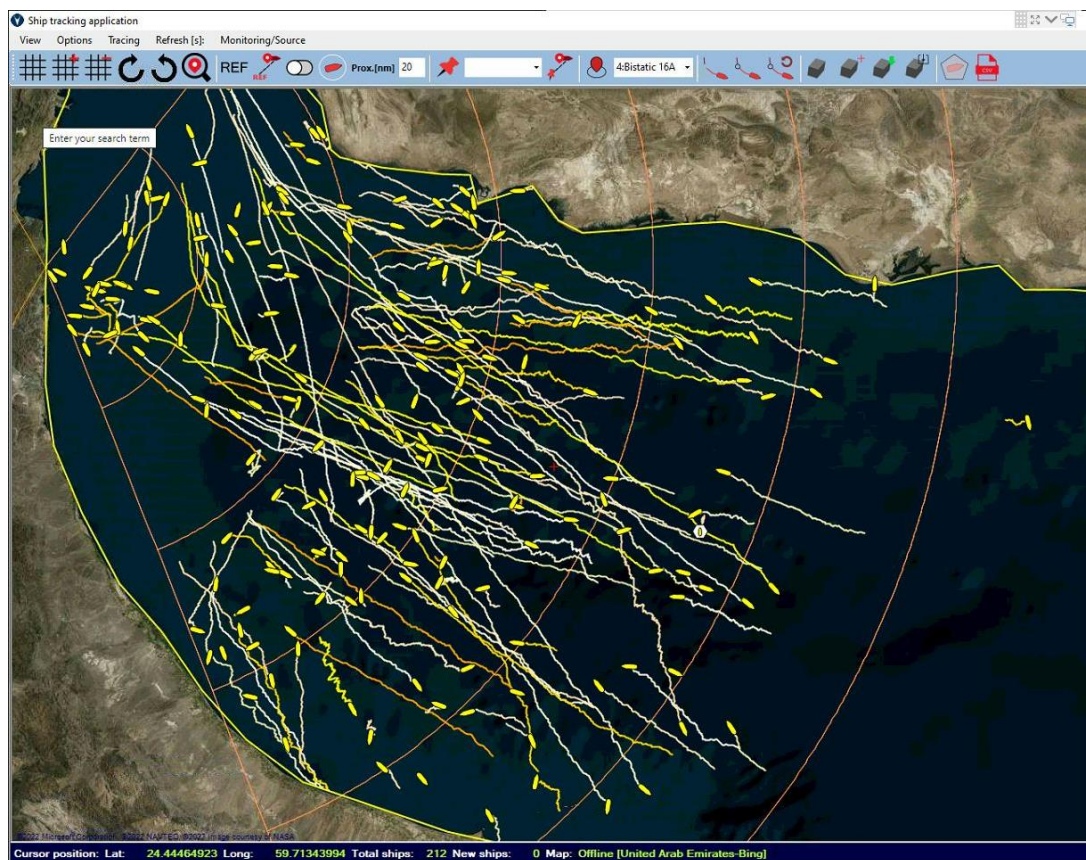
Slika 4.14 Modul signala sa 16 antena na 9.2 MHz nakon miksera

RD mape



Slika 4.15 RD mapa za 16 antena na 4.6 MHz (levo) i 16 antena za 9.2 MHz (desno)

Prikaz detekcija i tragova



Slika 4.16 Aplikacija za prikaz i praćenje meta kod bi-frekvencijskog OTHR sistema

4.2 Bistatička arhitektura OTHR radara

U ovoj glavi teze dat je prikaz rezultata hardverske, softverske i funkcionalne integracije 16-antenske bistatičke arhitekture OTHR radara na 16.4 MHz.

4.2.1 Arhitektura bistatičkog radara

Opšti cilj i motivacija za formiranje bistatičke arhitekture OTHR radara da se dodje do odgovora na pitanje da li se i pod kojim uslovima primenom bistatičke arhitekture može poboljšati detektibilnost ciljeva sa malom radarskom refleksnom površinom u odnosu primenu monostatičke arhitekture OTHR radara. Iz navedenih naloga instalacija bistatičke arhitekture predstavlja teorijski i praktičan izazov koji je u funkciji traženja odgovora na postavljeni problem od interesa.

Bistatički radari imaju dugu istoriju razvoja (kao i monostatički) što znači da su principi rada bistatičkih radara opštepoznati [57] [71]. Jedan od prvih radara koji je razvijen i operativno korišćen za vreme drugog svetskog rata za ranu detekciju aviona (Chain Home) bio je impulsni bistatički. Radio je u frekventijskom opsegu 20-55 MHz, sa predajnom snagom zavisno od verzije u opsegu od 100 kW do 1 MW i dometom do 160 km. Bistatičke arhitekture FMCW OTHR radara su novijeg datuma [79].

Ključne činjenice koje idu u prilog tvrdnji da bistatičke arhitekture radara uopšte a posebno bistatičke arhitekture FMCW OTHR radara imaju bolje performanse u pogledu detektibilnosti ciljeva sa malom/smanjenom radarskom refleksnom površinom su sledeće:

- Pošto su kod bistatičkog radara Tx i Rx sajt prostorno razdvojeni, nivo signala direktne komponente talasa kod bistatičkog FMCW OTHR radara na mestu prijema (Rx sajt) je za faktor $\frac{R_{mTx}^2}{R_{bTx}^2}$ manji od nivoa signala direktnog talasa bistatičkog radara pri (R_{mTx} označava Tx - Rx rastojanje kod monostatičkog a R_{bTx} Tx - Rx rastojanje kod bistatičkog radara). Kod monostatičkog FMCW OTHR radara Tx sajt je praktično kolociran sa Rx sajtom (u konkretnoj instalaciji monostatičkog radara na poligonu rastojanje između Tx i Rx sajta je oko 1 km) tako da se na izlazu dečirpera direktni talas pojavljuje kao sinusni signal blizak DC komponenti (rastojanje od 1 km je unutar rezolucione ćelije radara od 1.5 km). Direktna komponenta na izlazu dečirpera povećava dinamički opseg ulaznog signala na AD konvertor. Zbog toga se na izlazu dečirpera koristi *notch* filter koji atenuira direktni talas i reflektovane komponente od ciljeva koji su blizu radara (na udaljenostima do oko 20 km) i time smanjuje dinamički opseg signala na ulazu u AD konvertor. Iz navedenih razloga *notch* filter na izlazu dečirpera degradira detektibilnost bliskih ciljeva na udaljenostima do 20-tak km od radara. Kod instalacije bistatičkog radara Tx-Rx rastojanje kod je oko 52 km što znači da se direktna komponenta pojavljuje na 17-toj rezolucionalnoj ćeliji bistatičkog radara odnosno na frekvenciji $17 \cdot 100000 / 1536 = 1.041$ kHz što je van opsega *notch* filtra tako da notch filter kod bistatičkog radara ne degradira detektibilnost

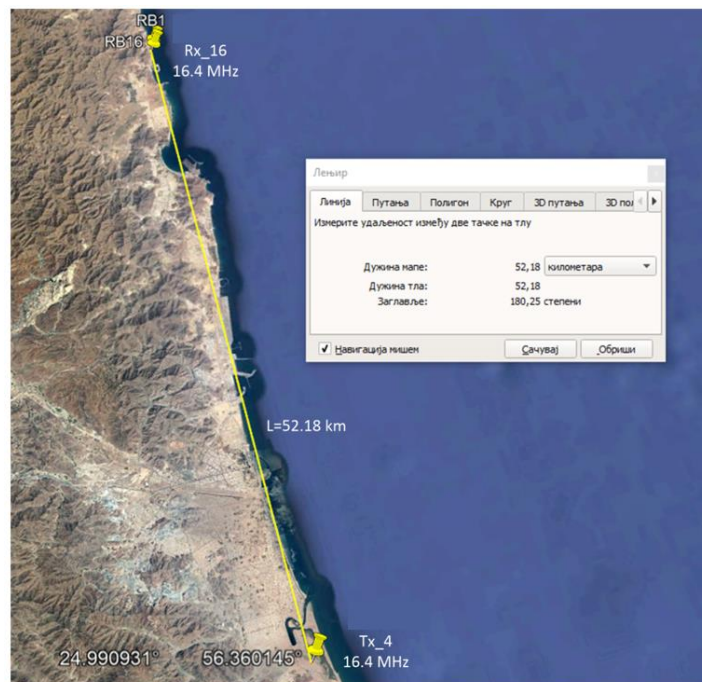
ciljeva na bliskim rastojanjima od radara do 20-tak km. Iz navedenih razloga očekuje se da će bistatička arhitektura imati bolje karakteristike detektibilnosti bliskih ciljeva sa malom radarskom refleksnom površinom poput čamaca od interesa.

- Pošto je kod bistatičke arhitekture FMCW OTHR radara nivo direktnog talasa na mestu prijema za faktor $\frac{R_{mTx}^2}{R_{bTx}^2}$ niži od nivoa direktnog talasa kod monostatičkog FMCW OTHR radara, u cilju povećanja detektibilnosti ciljeva moguće je povećati predajnu snagu bistatičkog radara. U literature se navodi podatak da su kod bistatičkog FMCW OTHR radara predajne snage reda nekoliko kW [79].

Integracijom bistatičke arhitekture OTHR radara se stvaraju pretpostavke za analizu performansi bistatičke arhitekture sa aspekta detektibilnosti ciljeva sa malom radarskom refleksnom površinom kao i optimizaciju algoritmike za primarnu obradu signala i trejking koja se primenjuje u bistatičkoj arhitekturi OTHR radara.

Za razliku od monostatičkog radara kod koga su prijemni (Rx sajt) i predajni deo (Tx sajt) kolocirani, kod bistatičkog radara Rx i Tx sajt su dislocirani. Rastojanje izmedju Rx i Tx sajta oko 52 km. Instalacija bistatičkog radara je konfigurisana za rad na nominalnoj frekvenciji 16.4 MHz. Na prijemnoj strani koristi se linearni antenski niz od 16 antena. U konkretnoj instalaciji bistatičkog FMCW OTHR radara za rad na 16.4 MHz maksimalni nivo predajne snage korišćenjem raspoloživih pojačavača je oko +56 dBm (oko 400 W).

Na slici 4.17 prikazan je prostorni razmeštaj linearnog 16-elementnog prijemnog antenskog niza i 4-elemntnog predajnog antenskog niza bistatičkog radara.



Slika 4.17 Razmeštaj Rx i Tx elemenata instalirane bistatičke arhitekture OTHR radara



Slika 4.18 Prevoz i instalacija Tx kontejnera bistatičkog radara

Na svih 16 antena Rx antenskog niza izvršen je upgrade mreže za antensko prilagodjenje kako bi iste mogle da se koriste za frekvencijski opseg 16.4 MHz. Za potrebe kalibracije su demontirani i ponovo montirani antenski kablovi. Takođe su radijali pričvršćeni na antenska postolja.

Takođe izvršena je kalibracija prijemnih kanala (antenskih kablova). Ustanovljeno je da je na frekvenciji 16.4 MHz nivo signala na izlazu FCR-a koji se koristi za dečirpovanje oko +6 dBm (treba da bude oko +17 dBm). Iz navedenih razloga nije mogla da se primeni kalibraciona procedura koja je ugrašnja u radar WERA već je primenjeno vlastito rešenje za kalibraciju.

Postavljen je Tx antenski niz bistatičkog radara na poligonu je podrazumevalo izbor i pripremu mikrolokacije za postavljanje antenskog niza, postavljanje geometrije antenskog niza i nivelaciju antenskih postolja, montiranje samih antenna, postavljanje radijala, razvlačenje, postavljanje i provera antenskih kablova što je prikazano na slici 4.19.



Slika 4.19 Postavljanje Tx antenskog niza na poligonu

Medjusobna udaljenost Tx kontejnera i Tx antenskog niza je oko 80 metara (ograničena je raspoloživom dužinom kablova). Zbog vlažnog peskovitog natopljenog terena nisu postojali uslovi da se antenski niz i kontejner postave bliže moru.

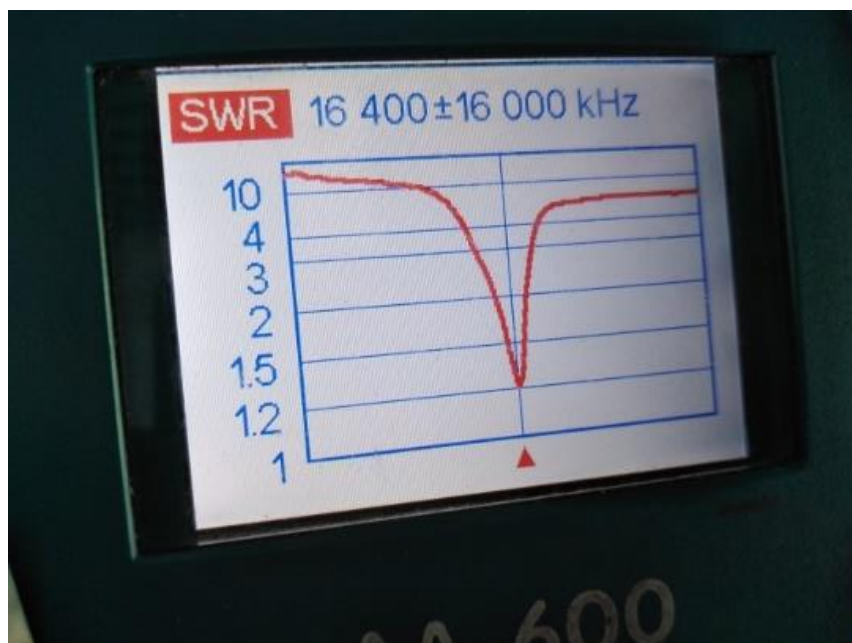


Slika 4.20 Pozicija Tx kontejnera u odnosu na Tx antenski niz na poligonu

Predajni kontejner, prikazan na slici 4.20, je povezan na trofazno napajanje iz agregata 20 kW koji je postavljen neposredno na ulazu u poligon na udaljenosti od kontejnera oko 200 metara.

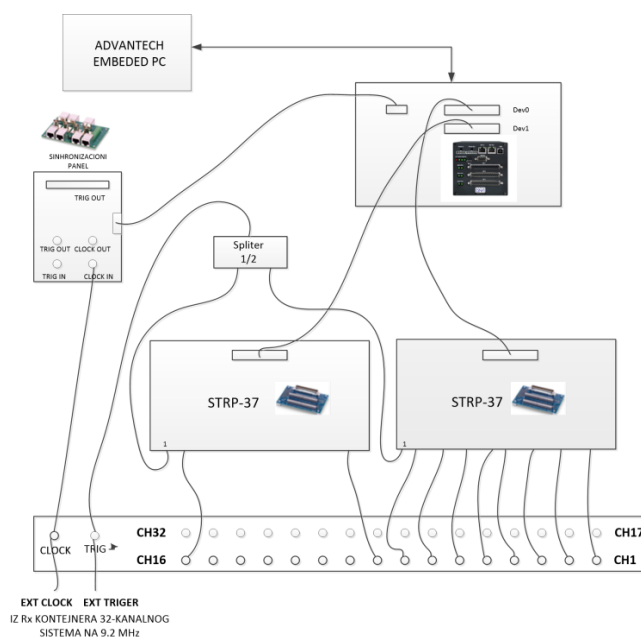
Kontejner je bio nepropisno uzemljen pa je naknadno angažovana lokalna firma koja je uradila ponovo uzemljenje po uzoru na uzemljenje kontejnera koje je ranije izvedeno na poligonu.

Što se tiče radne frekvencije, planiran je da bistatički radar radi na frekvenciji 15.2 MHz. U Vlatacom Institutu je merenjem VSWR-a ustanovljeno da je rezonantna frekvencija antenna koje se koriste za bistatički radar upravo 15.2 MHz. Ustanovljeno je da je kanal na frekvenciji zauzet (postoji permanentan signal) i zbog toga je tražen kanal koji je slobodan. Merenjem VSWR-a Tx antenna je ustanovljeno je da kada se na pasivnom reflektorskom paru antenna skine kratkospojnik sa antenskog priključka, tada je rezonantna frekvencija aktivnih antenna 16.4 MHz, slike 4.21. Zbog toga je kao radna frekvencija bistatičkog radara izabrana frekvencija od 16.4 MHz uz napomenu da u tom slučaju reflektorske antene nemaju ulogu poboljšanja odnosa napred/nazad u dijagramu predajnog antenskog niza ali da to sa aspekta izračene snage nije kritično.

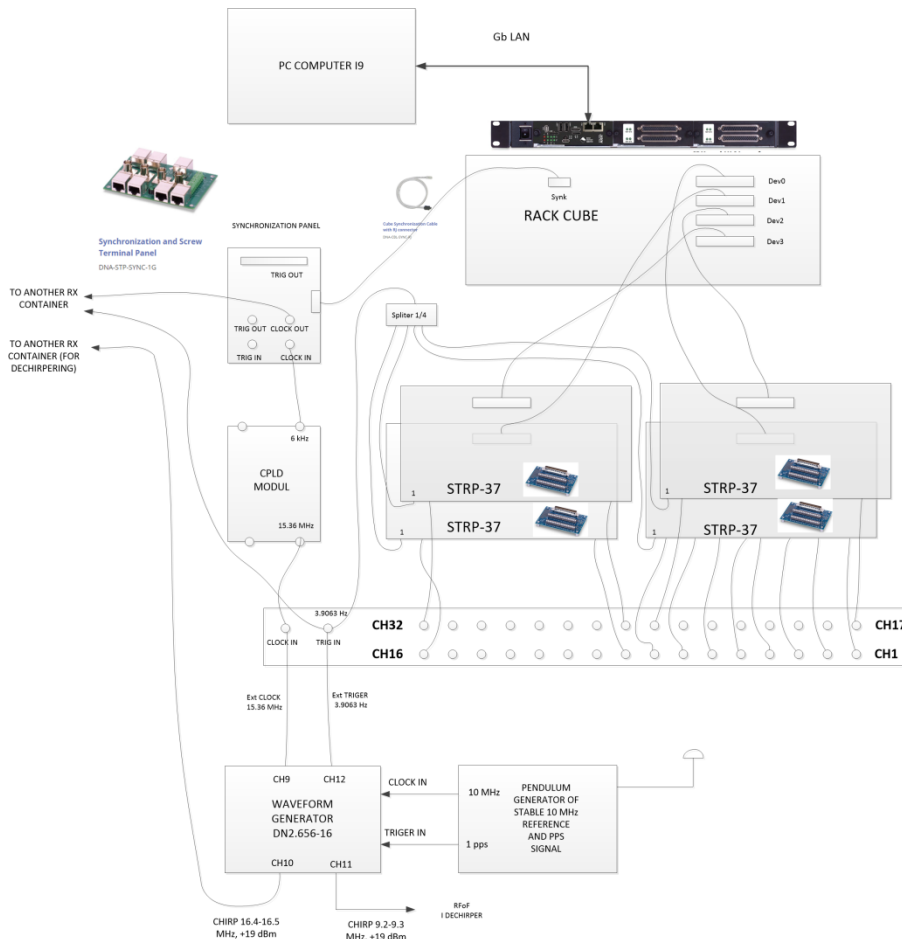


Slika 4.21 VSWR Tx aktivnih antenna bistatičkog radara na 16.4 MHz pri čemu su odspojeni kratkospojnici na reflektorskim antenama

Modul za 16-kanalnu akviziciju u prijemnom sistemu na 16.4 MHz bistatičkog radara je formiran od modula za paralelnu akviziciju koji je bio prvobitno razvijen za potrebe paralelne akvizicije sa radara WERA, slika 4.22. Ovaj modul prima eksterni triger 3.9063 Hz i eksterni takt za AD konvertor od 6 kHz iz Rx kontejnera 32-kanalnog sistema za rad na 9.2 MHz. Radi razumevanja detalja kompletnog tehničkog rešenja na slike 4.23 je prikazana i šema tehničkog rešenja za 32-kanalnu akviziciju na 9.2 MHz. Kao što se može videti akvizicije signala na oba radara (monostatičkom i bistatičkom) koriste isti takt za akviziciju i isti triger za trigerovanje akvizicije što je neophodan ali ne dovoljan uslov za potpunu vremensku i frekvencijsku sinhronizaciju oba radara.

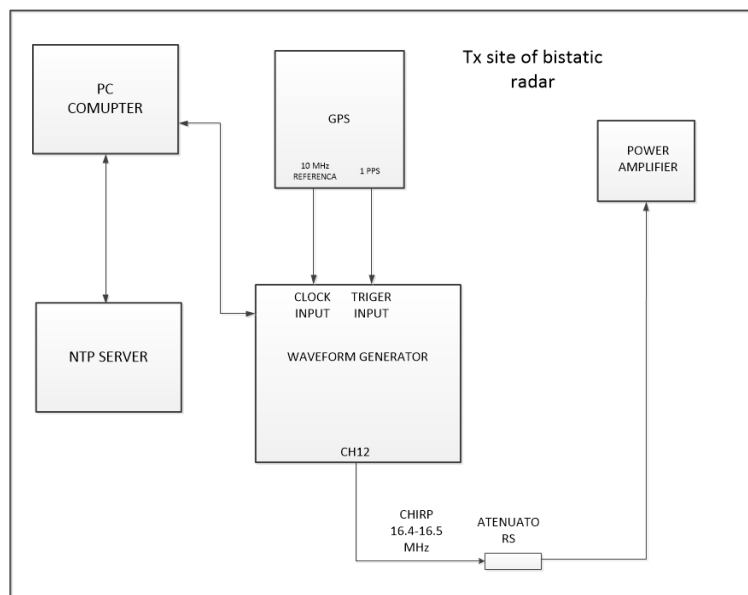


Slika 4.22 Blok šema integracije 24-bitne AD konverzije 16-antenske arhitekture bistatičkog OTHR radara za rad na nominalnoj frekvenciji 16.4 MHz



Slika 4.23 Blok šema integracije 24-bitne AD konverzije 32-antenske arhitekture OTHR radara za rad na nominalnoj frekvenciji 9.6 MHz

Slika 4.24 prikazuje blok šemu integracije Tx sajta bistatičke arhitekture OTHR radara na poligonu.



Slika 4.24 Blok šema integracije Tx sajta 16-antenske bistatičke arhitekture OTHR radara na poligonu

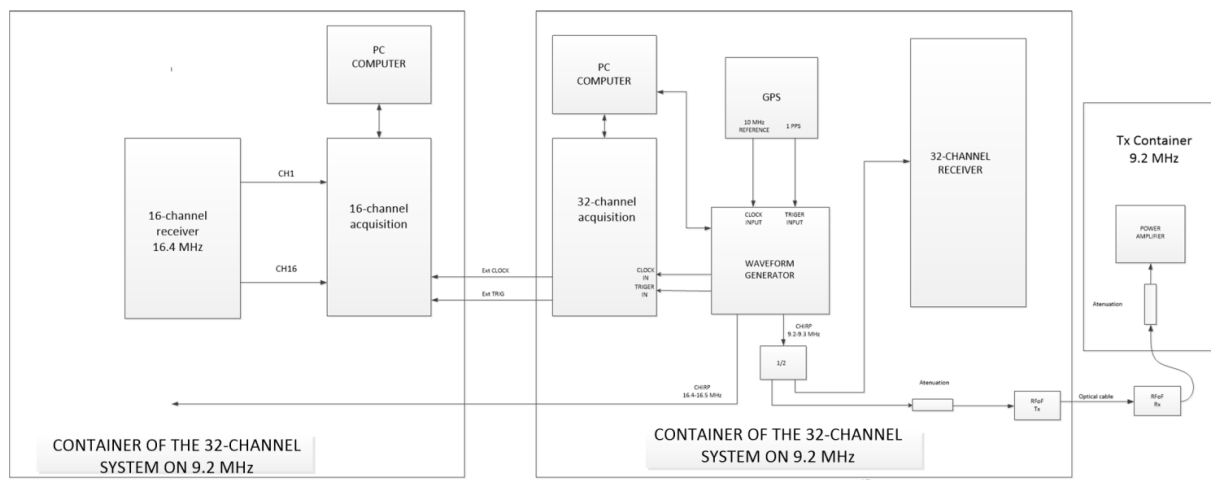
U Tx sajt bistatičkog radara integrisan je 4-kanalni waveform generator koji generiše predajni čirp signal 16.4-16.5 MHz. Waferom generator dobija externi triger (pps signal) i externu referencu 10 MHz iz GPS stabilisanog generitora Pendulum. Na računaru koji upravlja waveform generatorom se postavlja sistemsko vreme korišćenjem NTP servera po identičnoj proceduri kao u Rx sajtu bistatičkog radara.

Ključni zahtev pri instalaciji bistatičke arhitekture OTHR radara je bio da se time ne naruši funkcionalnost 32-antenske arhitekture OTHR radara instaliranog na poligonu.

Vremenska i frekvencijska sinhronizacija bistatičkog radara je implementirana korišćenjem waveform generator a (model: *Spectrum instrumentation*) i GPS stabilisanih generatora frekvencijske reference 10 MHz i PPS signala (Pendulum). S obzirom da su Rx i Tx sajtovi bistatičkog radara prostorno dislocirani na dva poligona ne medjusobnoj udaljenosti od oko 52 km, za implementaciju vremenske i frekvencijske sinhronizacije bistatičkog radara bilo je neophodno da se u Rx i Tx sajtove bistatičkog radara integrišu po jedan waveform generator i po jedan GPS stabilisani generator frekvencijske reference 10 MHz i PPS signala.

Nesmetana funkcionalnost bistatičkog i monostatičkog radara je obezbedjena na taj način što kod Rx monostatičkog i Rx bistatičkog radara, čiji su kontejneri kolocirani prema slici 4.25, dele isti waveform generator i GPS stabilisani generator frekvencijske reference 10 MHz i PPS signala, koji su ugradjeni u kontejner 32-kanalnog monostatičkog radara.

Na sl.12. prikazana je blok šema integracije Rx sajta 16-antenske bistatičke i 32-antenske monostatičke arhitekture OTHR radara na poligonu.



Slika 4.25 Blok šema integracije Rx sajta 16-antenske bistatičke i 32-antenske monostatičke arhitekture OTHR radara na poligonu

U Rx kontejneru 32-antenskog sistema na 9.2 MHz integrisani su 16-kanalni waveform generator Spectrum instrumentation koji generiše četiri izlazna signala i to:

- Sinusni signal frekvencije 15.6 MHz iz koga se deljenjem u CPLD moduli generise takt za AD konverziju od 6 kHz. Ovaj signal se koristi kao eksterni

takt za 32-kanalnu akviziciju u RX kontejneru za 9.2 MHz. Isti signal od 6 kHz se koaksijalnim kablom uvodi u Rx kontejner za 16.4 MHz gde se koristi kao externi triger ya 16-kanalnu akviziciju prijemnih kanala na 16.4 MHz.

- Chirp signal 9.2-9.3 MHz. Ovaj signal se splituje na dva kraka. Jedan se vodi na pojačavač snage Tx predajnika na 9.2 MHz posredstvom RFoF linka, a drugi se vodi na dečirpere prijemnih kanala.
- Triger signal frekvencije 3.9063 Hz koji se koristi kao eksterni triger za 32 kanalnu akviziciju u Rx kontejneru za 9.2 MHz. Isti signal se koaksijalnim kablom uvodi u Rx kontejner na 16.4 MHz gde se koristi kao externi triger za 16-kanalnu akviziciju.
- Chirp signal 16.4-16.5 MHz Ovaj signal se koaksijalnim kablom uvodi u Rx kontejner bistatičkog radara gde se koristi za dečirpovanje u prijemnim kanalima na 16.4 MHz.

4.2.2 Formulacija problema procene range-a i doplera kod bistatičkog radara

Slika 4.26 prikazuje uopštenu geometriju bistatičke arhitekture OTHR radara [58][61][83]. Na slici θ_R označava azimuth cilja u odnosu na sever u smeru kazaljke na satu, R označava ukupan propagacioni put signala od predajnika do prijemnog antenskog niza bistatičkog radara, a koji predstavlja sumu propagacionog puta od predajnika do cilja R_{Tx} i propagacionog puta od cilja do prijemnika R_{Rx} .

$$R = R_{Rx} + R_{Tx} \quad (1)$$

Rastojanje izmedju predajnika i prijemnika L je poznato i ono se naziva bistatička osnovica. Takodje je poznat ugao φ koji predstavlja ugao izmedju ose bistatičke osnovice i ose jug-sever, definisan na način prikazan na slici 4.26. Ugao β se **naziva bistatički ugao**. Ovaj ugao se menja sa promenom lokacije cilja i od fundamentalnog je značaja sa aspekta performansi bistatičkog radara.

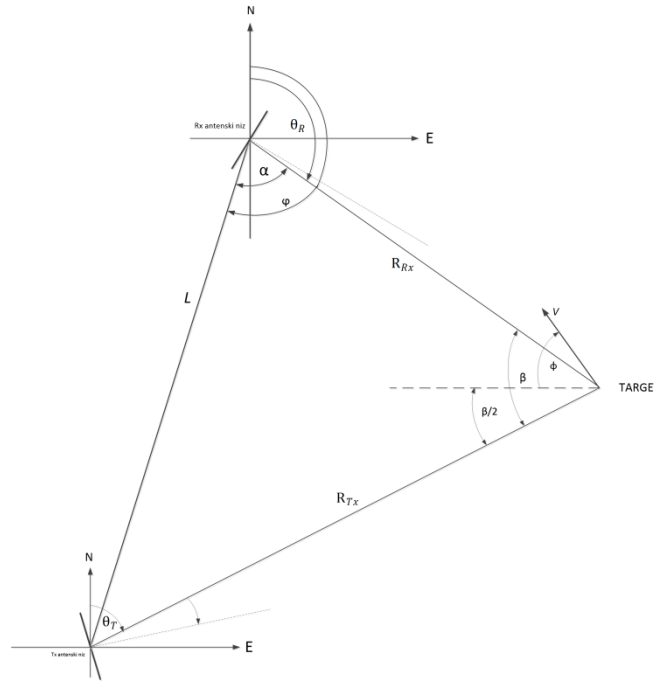
Potrebno je da se odredi lokacija i Doplerov pomak cilja na osnovu poznatog bistatičkog rastojanja L , procenjenog azimuta θ_R i procenjenog ukupnog propagacionog puta R . Problem se svodi na procenu *range*-a cilja R_{Tx} na osnovu napred navedenih parametara.

4.2.3 Procena udaljenosti cilja R_{Rx} od prijemnog niza bistatičkog radara

Na osnovu podataka datih na Slika 4.26 vrede sledeće relacije:

$$R_{Tx}^2 = (R - R_{Rx})^2 = R^2 + R_{Rx}^2 - 2RR_{Rx} \quad (2)$$

$$R_{Tx}^2 = R_{Rx}^2 + L^2 - 2R_{Rx}L \cos \alpha \quad (3)$$



Slika 4.26 Geometrija bistatičke arhitekture OTHR radara

Iz jednačina (2) i (3) dalje sledi da se iz poznatog L , procenjenih R i θ_R range cilja R_{Rx} po se dobija po sledećoj formuli:

$$R_{Rx} = \frac{R^2 - L^2}{2(R - L \cos \alpha)} \quad (4)$$

Ugao α se procenjuje iz procenjenog smera dolaska signala na antenski niz θ_R i ugla φ definisanog po formuli:

$$\alpha = \varphi - \theta_R \quad (5)$$

Formula (4) za range R_{Rx} kod bistatičkog radara praktično implicira da je već razvijeni program za detekciju u monostatičkom radaru može primeniti za detekciju u bistatičkom radaru koji kao rezultat daje procenu parametra R na osnovu koga se primenom formule (4) dobija R_{Rx} .

Geometrija bistatičkog radara je komplikovanija od geometrije monostatičkog i ona ima implikacije po procenu range-a i Doplera [78-79].

Kod monostatičkog radara procenjuje se range R_{Rx} . Moguće pozicije cilja se u slučaju monostatičkog radara nalaze na kružnici poluprečnika R_{Rx} (*isorange* krivulje). Kod bistatičkog radara se procenjuje ukupni predjeni put signala $= R_{Rx} + R_{Tx}$. Procena rastojanja od R_{Rx} od Rx do cilja se po formuli (4) dalje dobija iz izmerenog R i ugla α . Kod bistatičkog radara *isorange* krivulje se nalaze na elipsi u čijem fokusima se nalaze Rx i Tx bistatičkog radara, slika 4.27.

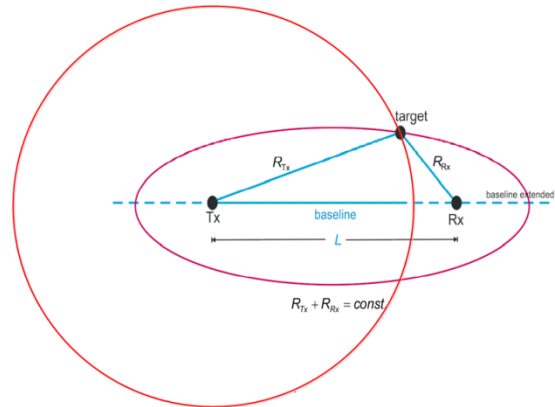
Može se zaključiti da u slučaju monostatičkog i bistatičkog radara sa istom snagom predajnika, monostatički radar ima veći maksimalni domet u odnosu na bistatički, ali da bistatički radar ima tu prednost što zbog manjeg uticaja direktne komponente talasa može da radi sa većom predajnom snagom.

Drugi važan segment bistatičkog radara vezan je za rezoluciju po daljini. Kod monostatičkog radara rezolucija po daljini ΔR_m se određuje po formuli:

$$\Delta R_m = \frac{c}{2\Delta f_{BW}} \quad (6)$$

Rezolucija po daljini bistatičkog radara ΔR_b zavisi od bistatičkog ugla β i računa se aproksimativno po formuli [10]:

$$\Delta R_b = \frac{\Delta R_m}{\cos(\beta/2)} \quad (7)$$



Slika 4.27 Isorange krivulje monostatičkog i bistatičkog radara

$\cos(\frac{\beta}{2})$ se računa prema formuli:

$$\cos(\frac{\beta}{2}) = \sqrt{\frac{1}{2} + \frac{R_{Rx} - L \cos(\varphi - \theta_R)}{2\sqrt{L^2 + R_{Rx}^2 - 2LR_{Rx} \cos(\varphi - \theta_R)}}} \quad (8)$$

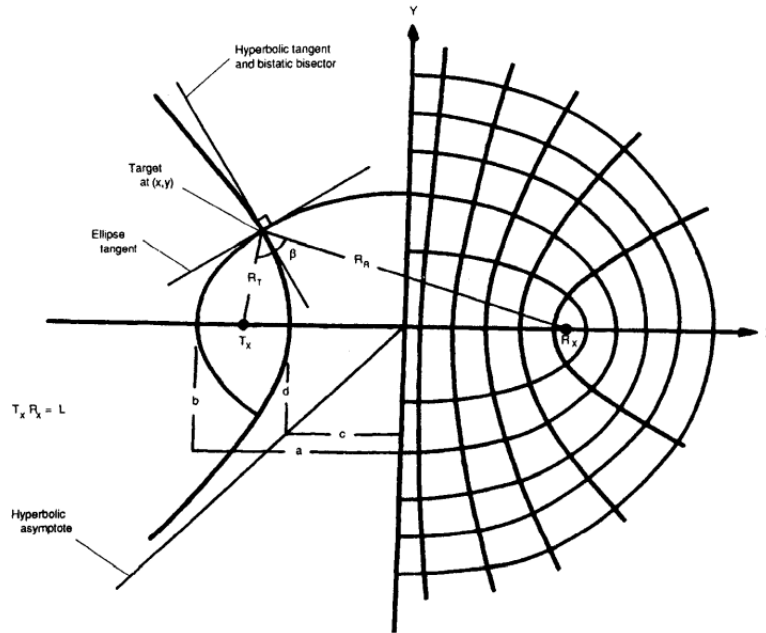
Iz formula 7 i 8 dalje sledi:

$$\Delta R_b = \frac{\Delta R_m}{\cos(\beta/2)} = \frac{\Delta R_m}{\sqrt{\frac{1}{2} + \frac{R_{Rx} - L \cos(\varphi - \theta_R)}{2\sqrt{L^2 + R_{Rx}^2 - 2LR_{Rx} \cos(\varphi - \theta_R)}}}} \quad (9)$$

Iz formule (9) se može uočiti da kod bistatičkog radara postoji nelinearna zavisnost rezolucije po *range*-u od *range*-a cilja ΔR_m i azimuta cilja θ_R .

Rezolucija po daljini predstavlja mera razdvojenosti ciljeva na susednim *isorange* krivuljama. Kod monostatičkog radara *isorange* krivulje su kružnice, Rezolucija po *range*-u je ista i unofornna po *range*-u. Kod bistatičkog radara *isorange* krivulje su elipse, rezolucija po *range*-u nije ista niti unofornna po *range*-u.

Slika 4.28 ilustruje zavisnost rezolucije po *range*-u kod bistatičkog radara [58].



Slika 4.28 Rezolucija po range-u kod bistatičkog radara [58].

Ciljevi koje detektuje bistatički radar se nalaze u presečištu *isorange* krivulja i hiperbola sa istim količnikom $\frac{R_{Rx}}{R_{Tx}}$, Slika 4.28. Sa slike se može zaključiti da je kod bistatičkog radara najlošija rezolucija po daljini za ciljeve koji su na osi koja je ortogonalna na osu osnovice (baze) bistatičkog radara i koji su na bliskoj udaljenosti od te osnovice.

4.2.4 Procena Doplerovog pomaka kod bistatičkog radara

Doplerov pomak kod bistatičkog radara je rezultat promene ukupnog predjenog puta talasa od predajnika do cilja i od cilja do prijemnika bistatičkog radara i računa se po formuli:

$$f_D = \frac{1}{\lambda} \frac{dR}{dt} = \frac{1}{\lambda} V_{dR} \quad (8)$$

Pri čemu V_{dR} predstavlja ukupna promenu brzine kretanja na putanji kretanja cilja:

$$V_{dR} = \frac{dR_{Rx}}{dt} + \frac{dR_{Tx}}{dt} = V \cos\left(\Phi - \frac{\beta}{2}\right) + V \cos\left(\Phi + \frac{\beta}{2}\right) = 2V \cos \Phi \cos \frac{\beta}{2} \quad (9)$$

Dalje sledi:

$$f_D = \frac{1}{\lambda} 2V \cos(\Phi) \cos\left(\frac{\beta}{2}\right) \quad (10)$$

Kada je ugao $\beta = 0$, geometrija bistatičkog radara se svodi na monostatički radar i u tom slučaju se dobija formula za Doplerov pomak monostatičkog radara:

$$f_D = \frac{1}{\lambda} 2V \cos(\Phi) \quad (11)$$

gde $V \cos(\Phi)$ predstavlja radijalnu brzinu monostatičkog radara za $\beta = 0$.

Kada se izraz iz formule (7) sa $\cos \frac{\beta}{2}$ uvrsti u formulu 10 dolazi se do sledećeg izraza

za Doplerov pomak:

$$f_D = \frac{1}{\lambda} 2V \cos(\Phi) \cos\left(\frac{\beta}{2}\right) = \frac{1}{\lambda} 2V \cos(\Phi) \sqrt{\frac{1}{2} + \frac{R_{Rx} - L \cos(\varphi - \theta_R)}{2\sqrt{L^2 + R_{Rx}^2 - 2LR_{Rx} \cos(\varphi - \theta_R)}}} = \quad (12)$$

U jednačini (12) veličina

$$V_E = V \cos(\Phi) \quad (13)$$

predstavlja intezitet projekcije vektora brzine cilja na simetralu bistatičkog ugla β i u literaturi se ona naziva **eliptička** brzina. Intezitet vektora eliptičke brzine se menja sa promenom lokacije cilja (azimuta dolaska cilja θ_R i *range*-a cilja R_{Rx}) prema formuli 12. U graničnom slučaju kada je $L = 0$ (bistatički radar postaje monostatički) sledi da je $V_E = V_R$ gde je V_R označava radialnu brzinu cilja kod monostatičkog radara.

Iz formule (12) se vidi da postoji nelinearna zavisnost doplerovog pomaka a time i eliptičke brzine od parametara $R_{Rx}, L, \varphi, \theta_R$ i ugla Φ pri čemu se ugao Φ dodatno menja sa promenom lokacije cilja (promenom parametara R_{Rx}, θ_R). Iz navedene analize proističe zaključak da je geometrija bistatičkog radara komplikovanija od geometrije monostatičkog u kontekstu rezolucije po daljini i dopleru te da to implira zaključak da rešenje trejkinga optimizirano za monostatički radar nije optimalno za primenu u bistatičkom radaru.

4.2.5 Bragove linije kod bistatičkog radara

Kod monostatičkog radara frekvencije Bragovih linija f_{MB} u RD mapi se aproksimativno mogu izračunati po formuli:

$$f_{MB} = \pm \sqrt{\frac{g}{\pi\lambda}} \quad (14)$$

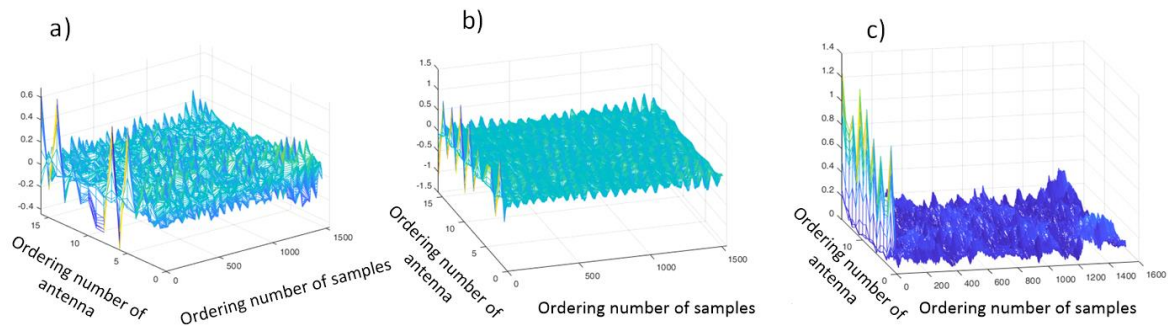
Kod bistatičkog radara frekvencije Bragovih linija f_{BB} u bistatičkoj RD mapi se aproksimativno mogu izračunati po sledećoj formuli:

$$f_{BB} = f_{MB} \sqrt{\cos\left(\frac{\varphi}{2}\right)} \quad (15)$$

Iz formule (15) se vidi da frekvencije Bragovih linija kod bistatičkog radara zavise od bistatičkog ugla φ što ima za posledicu širenje (sprading) Bragovih linija.

4.2.6 Rezultati provere funkcionalnosti bistatičkog radara

Slika 4.29 a), b) i c) prikazuje akvizirane signale sa 16 antena u trajanju jednog frejma.



Slika 4.29 Prikaz akviziranih signala sa 16 antena u trajanju jednog frejma a) realna komponenta, b) imaginarna komponenta c) apsolutna vrednost

Sa slike 4.29 se uočava da je pozicija tranzijentnih impulsa uvek na početku frejmova na svima antenama, da nema klizanja samplova na različitim antenama, što implicira zaključak da je korektno rešen problem vremenske sinhronizacije u bistatičkom radaru.

5. KVLITATIVNA OCENA PERFORMANSI ARHITEKTURE I DETEKCIONIH ALGORITAMA OTHR

Kao što je rečeno pomorski nadzor igra ključnu ulogu za brojne nacionalne i međunarodne organizacije i subjekte. Njegovi primarni ciljevi uključuju jačanje potrage i spasavanja, omogućavanje brzog reagovanja na nesreće i vanredne situacije, nadgledanje aktivnosti u ribarstvu, sprečavanje zagađenja životne sredine i pomaganje sprovođenju zakona, posebno nacionalnoj odbrani.

Rešavanje otkrivanja navigacionog rizika radi podrške operaterima i optimizacija alokacije resursa za efikasnost i uštedu su dodatne oblasti koje izazivaju pažnju. Štaviše, uspostavljanje pouzdanih metoda za razmjenu podataka i informacija među relevantnim organima je ključno. Ove mere imaju za cilj maksimiziranje održivog korišćenja okeana i mora uz podsticanje inovacija i znanja u pomorstvu. Podrška okviru pomorskog nadzora je brz napredak informacione i komunikacione tehnologije, koju karakteriše rastuća dostupnost senzora za nadzor, obimnih baza podataka, mrežnih sistemskih rešenja i robusnih tehnika detekcije i obrade radarskog signala. Zbog toga je od velikog značaja i kvalitativna ocena performansi detekcionih algoritama OTHR.

Ova glava je posvećena oceni performansi detekcionih algoritama koristeći AIS podatke kao glavni izvor informacija. Ključni parametri AIS informacija uključuju

- MMSI/IMO broj,
- Geografske koordinate plovila,
- Kurs na površini (COG) i
- Brzinu na površini (SOG).

Detekcioni algoritam generiše periodične setove merenja ili detekcija u skladu sa

definisanim vremenom koherentne integracije (CIT). Ovi setovi sadrže podatke kao što su

- Rastojanje potencijalne mete od radara,
- Azimut u odnosu na pravac geografskog severa i
- Radijalna brzina potencijalne mete.

U radu [84], za svaki od N različitih MMSI brojeva u odabranoj grupi, definišu se skupovi stanja u obliku vektora. N_mmsi predstavlja broj zabeleženih podataka za određeni MMSI broj. U ovom slučaju, AIS podaci za metu sa određenim identifikacionim brojem se reprezentuju sledećim skupom vektora:

$$\begin{aligned}\varphi_k &= \{\rho_k, \theta_k, v_{\rho,k}\} \\ \pi_k &= \{x_{LAT,k}, x_{LON,k}\} \\ \vartheta_{AIS,k}^{MMSI_n} &= \{\pi_k; \varphi_k\}, k = 1..N_{MMSI}(n) \\ X^{AIS} &\triangleq \{\vartheta_{AIS,k}^{MMSI_n}\}_{k=1, N_{MMSI}(n), n=1, N}\end{aligned}$$

U tekstu se koriste sledeći parametri:

- $x_{LAT,k}, x_{LON,k}$: Geografsku širinu i dužinu AIS mete za k-ti element podataka.
- ρ_k : Rastojanje od radara do AIS mete.
- θ_k : Azimut AIS mete u odnosu na usvojen koordinatni sistem radar.
- $v_{\rho,k}$: Radijalna brzina AIS mete u usvojenom koordinatnom sistemu, za k-ti element podataka sa datom identifikacijom.

Parametri ρ_k, θ_k i $v_{\rho,k}$ se izračunavaju koristeći informacije o poziciji $x_{LAT,k}, x_{LON,k}$, COG i SOG informacije AIS mete, kao i poziciju radara. Ovi podaci se interpoliraju kako bi se usklađivali sa vremenskim trenucima kada su dostupni radarski podaci.

Međutim, može se desiti da informacije AIS mete nisu dostupne tokom dužeg vremenskog perioda. Da bi se takvi slučajevi eliminisali, u radu [84] se definiše određeni parametar (koji se verovatno dalje objašnjava u tekstu) kako bi se obradile i tretirale situacije u kojima nema dostupnih AIS informacija o određenom plovilu.

$$I_m^n = \begin{cases} 1, & \Delta T_m^n \leq \Delta T_{max} \\ 0, & \Delta T_m^n > \Delta T_{max} \end{cases}$$

U tekstu se koriste sledeći pojmovi:

Parametar ΔT_m^n predstavlja vremenski interval između m-tog i (m-1)-og ažuriranja pozicije n-tog plovila. ΔT_{max} predstavlja maksimalno dopuštenu razliku između dva ažuriranja AIS pozicije. S obzirom na tipične brzine brodova koji se prate putem OTH radara, koje obično ne prelaze 20 m/s, smisleno je postaviti kritično vreme za validnost interpolacije na 1 sat, što je takođe navedeno u [84].

U slučajevima kada je vrednost parametra $I_m^n = 0$, podaci AIS-a za n-ti brod se ne koriste prilikom procene performansi. Takođe, s obzirom na veličinu brodova i njihovu relativno malu brzinu, možemo pretpostaviti da su svi dostupni podaci za vreme t_AIS validni za određeno vreme radara t_r , ako je ispunjen uslov $|t_r - t_{AIS}| \leq \Delta L_{max}$. Ovde,

ΔL_{max} predstavlja maksimalnu prihvatljivu razliku između vremena radara i vremena ažuriranja AIS pozicije.

Za svaki određeni trenutak radara t_r definiše se skup detekcija X_r^{OTHR} :

$$\vartheta_{OTHR,r,k} = \{\rho_{r,k}, \theta_{r,k}, v_{\rho,r,k}\},$$

$$X_r^{OTHR} \triangleq \{\vartheta_{OTHR,k}\}_{k=1, \overline{N_r^{OTHR}}}$$

- N_r^{OTHR} : Predstavlja broj zabeleženih detekcija (ili detekcija drugih objekata) za zadato vreme rada radara t_r .
- $\vartheta_{OTHR,r,k}$: Oznaka za k-tu detekciju (ili drugi objekat) za zadato vreme rada radara t_r .
- X_r^{AIS} : Skup AIS meta koje su se pojavile za zadato vreme t_r .
- $x_{r,n}^{AIS}$ ($n = \overline{1, N_r}$): Oznaka za n-ti AIS trag koji pripada skupu X_r^{AIS}

Da bi se ocenile performanse detekcionih algoritama, potrebno je uspostaviti odgovarajuće asocijacije između skupa radarskih detekcija X_r^{OTHR} i AIS meta. Svaki AIS trag $x_{r,n}^{AIS}$ može biti povezan samo sa jednom detekcijom $\vartheta_{OTHR,r,k}$: iz skupa X_r^{OTHR} .

Asocijacije se uspostavljaju tako što se pretražuju i upoređuju sve radarske detekcije iz skupa X_r^{OTHR} sa pozicijom dane AIS mete. Ovo se radi u 3-D (rastojanje, azimut, brzina promene rastojanja) regionu koji se koristi za validaciju performansi. Na osnovu [84], ovakva asocijacija se postiže na sledeći način:

Za svaku AIS metu $x_{r,n}^{AIS}$, pretražuju se sve detekcije $\vartheta_{OTHR,r,k}$ iz skupa X_r^{OTHR} koje padaju unutar 3-D regiona validacije centriranog oko pozicije te AIS mete.

Ovim postupkom se povezuju odgovarajuće AIS mete sa odgovarajućim radarskim detekcijama, omogućavajući ocenu performansi detekcionih algoritama na osnovu te asocijacije. Detalji o tome kako se ova asocijacija tačno izvodi mogu se pronaći u radu [84] ili drugim relevantnim izvorima.

$$(N_r^{OTHR} \ni k \rightarrow n \in N_r) : d(x_{r,n}^{AIS}, \vartheta_{OTHR,r,k}) = \min_{i \in N_r^{OTHR}} d(x_{r,n}^{AIS}, \vartheta_{OTHR,r,i}) .$$

Ako za n-ti AIS cilj iz skupa $x_{r,n}^{AIS}$ postoji pridružena detekcija, što znači da je minimalna udaljenost između pozicije n-tog AIS cilja $x_{r,n}^{AIS}$ i bilo koje detekcije $\vartheta_{OTHR,r,k}$ iz skupa X_r^{OTHR} manja od unapred definisanog praga, tada možemo zaključiti da je taj cilj praćen tokom zadanog vremena radara t_r . S druge strane, ako nema pridružene detekcije za n-ti AIS cilj, možemo pretpostaviti da taj cilj nije praćen tokom tog vremena radara t_r .

Takođe, ako je k-ta detekcija iz skupa X_r^{OTHR} pridružena nekom AIS cilju, smatra se da je to tačna detekcija ili potvrđena detekcija. Suprotno tome, ako k-ta detekcija nije pridružena nijednom AIS cilju, smatra se da je to lažna detekcija.

Za ocenu praćenja mete koristi se odnos vremena praćenja mete (ToT), koji meri koliko je dugo meta bila praćena u odnosu na ukupno vreme koje je meta provela u zoni pokrivanja radara, uzimajući u obzir potvrđene AIS podatke.

ToT se izražava kao procenat i u idealnom sistemu bi imao vrednost od 100%, što znači da nema lažnih alarma. U ovom slučaju, vreme se meri u broju ciklusa (CIT -

Coherent Integration Time), označenim kao N_{CIT} .

Za određeni uzorak praćenja koji traje određeno vreme, a u kojem je registrovano prisustvo N_{AIS} ciljeva ω_i ($i = \overline{1, N_{AIS}}$), gde i varira od 1 do N_{AIS}), ToT se izračunava na sledeći način, kako je objašnjeno u radu [84]:

$$ToT = \frac{\sum_{i=1}^{N_{AIS}} N_{CIT}^P(\omega_i)}{\sum_{i=1}^{N_{AIS}} N_{CIT}^T(\omega_i)} \cdot 100 \text{ [%]}$$

U ovom delu teksta, objašnjava se kako se računa ToT parametar, koji meri koliko je dugo meta bila praćena u odnosu na ukupno vreme koje je meta provela u zoni pokrivanja radara.

$N_{CIT}^P(\omega_i)$: Ovaj broj predstavlja ukupan broj CIT ciklusa u kojima je praćenje AIS cilja ω_i zabeleženo detekcijom.

$N_{CIT}^T(\omega_i)$: Ovaj broj predstavlja ukupan broj CIT ciklusa u kojima je zabeležena pojava AIS cilja ω_i unutar zone pokrivanja radara, od prvog pojavljivanja do poslednjeg zabeleženog intervala u vremenskim okvirima odabranog uzorka. Ovde se uključuju i CIT ciklusi za koje nije bilo ažuriranja AIS pozicije, ali se može sa sigurnošću tvrditi da se AIS meta kretala unutar zone praćenja, na osnovu interpolacije njenog puta.

Osim ovoga, kako bi se ocenile performanse detekcionih algoritama na uzorcima dužeg trajanja, može se analizirati kako ToT parametar zavisi od rastojanja, ugla ili radijalne brzine. Za to se koristi odabrani korak podele skale za rastojanje (Δr [km]), ugao ($\Delta \alpha$ [stepeni]) ili radijalnu brzinu (Δv [m/s]). Parametar ToT se tada računa za određene intervale rastojanja ($r \in [k\Delta r, (k+1)\Delta r]$), ugla ($\alpha \in [k\Delta \alpha, (k+1)\Delta \alpha]$) ili radijalne brzine sa usvojenim korakom podele Δv . Ova analiza omogućava bolje razumevanje performansi algoritama u zavisnosti od promenljivih kao što su rastojanje, ugao ili brzina.

$$ToT(r) = \frac{\sum_{i=1}^{N_{AIS}} N_{CIT}^P(\omega_i, r)}{\sum_{i=1}^{N_{AIS}} N_{CIT}^T(\omega_i, r)} \cdot 100 \text{ [%]}$$

$$ToT(\alpha) = \frac{\sum_{i=1}^{N_{AIS}} N_{CIT}^P(\omega_i, \alpha)}{\sum_{i=1}^{N_{AIS}} N_{CIT}^T(\omega_i, \alpha)} \cdot 100 \text{ [%]}$$

$$ToT(v) = \frac{\sum_{i=1}^{N_{AIS}} N_{CIT}^P(\omega_i, v)}{\sum_{i=1}^{N_{AIS}} N_{CIT}^T(\omega_i, v)} \cdot 100 \text{ [%]}$$

Za svaki CIT ciklus c_r , verovatnoća detektabilnosti se izračunava na sledeći način:

- Prvo se broji ukupan broj detektovanih AIS ciljeva tokom tog CIT ciklusa c_r .
- Zatim se broji ukupan broj stvarno prisutnih AIS ciljeva tokom istog CIT ciklusa c_r , koristeći dostupne AIS podatke.
- Verovatnoća detektabilnosti $p_{D,r}$ za taj CIT ciklus se izračunava kao odnos broja stvarno detektovanih AIS ciljeva i i ukupnog broja stvarno prisutnih AIS ciljeva.

Ova verovatnoća detektabilnosti meri koliko je uspešno detekovano stvarno prisutnih AIS ciljeva u odnosu na ukupan broj prisutnih ciljeva tokom tog CIT ciklusa. Ovaj parametar se koristi kako bi se ocenila pouzdanost detekcija u odnosu na stvarno prisutne ciljeve tokom određenih vremenskih intervala.

$$p_{D,r} = \frac{N_r^P}{N_r}, r = \overline{1, N_{CIT}}$$

Verovatnoća detektabilnosti p_D za ceo posmatrani uzorak se dobija usrednjavanjem verovatnoća detektabilnosti po svim CIT ciklusima. Za svaki CIT ciklus c_r , verovatnoća detektabilnosti se izračunava kako je prethodno opisano:

$$p_D = \frac{\sum_{r=1}^{N_{CIT}} p_{D,r}}{N_{CIT}}$$

za svaki CIT ciklus c_r verovatnoća tačnih tj. potvrđenih detekcija:

$$p_{TD,r} = \frac{N_r^{OTHR,P}}{N_r^{OTHR}}, r = \overline{1, N_{CIT}}$$

N_r^{OTHR} je broj radarskih detekcija za zadati ciklus c_r , a $N_r^{OTHR,P}$ je broj radarskih detekcija koje su pridružene nekoj AIS meti iz skupa X_r^{AIS} . se, u tom slučaju, Usrednjavanjem verovatnoća tačnih detekcija po svim ciklusima dobija se verovatnoća tačnih detekcija za celokupni posmatrani uzorak.

$$p_{TD} = \frac{\sum_{r=1}^{N_{CIT}} p_{TD,r}}{N_{CIT}}$$

Na osnovu istog principa koji se koristi za definisanje zavisnosti ToT parametra u odnosu na rastojanje, ugao i radijalnu brzinu, moguće je definisati i kako verovatnoća detektabilnosti i verovatnoća tačnih detekcija zavise od rastojanja, ugla i radijalne brzine. Drugim rečima, možemo koristiti usvojeni korak podele po rastojanju (Δr [km]) za računanje verovatnoća detektabilnosti i tačnih detekcija u određenim intervalima rastojanja $r \in [k\Delta r, (k+1)\Delta r]$, u skladu sa prethodnim definicijama:

$$p_D(r) = \frac{\sum_{i=1}^{N_{CIT}} p_{D,i}(r)}{N_{CIT}}$$

$$p_{TD}(r) = \frac{\sum_{i=1}^{N_{CIT}} p_{TD,i}(r)}{N_{CIT}}$$

Na sličan način se može definisati kako verovatnoća detektabilnosti i verovatnoća tačnih detekcija zavise od ugla i radijalne brzine, ili bilo koje druge relevantne veličine, kao što je na primer dužina broda [85].

5.1 Rezultati poređenja

U svrhu uporedbe tri različita detekciona algoritma sa standardnim parametrima, korišćeni su različiti vremenski uzorci trajanja, uključujući 4 sata, 10 sati, 23 sata, 37 sati i 5 dana. Rezultati analize, odnosno grafici koji prikazuju zavisnost ToT parametra, verovatnoću detektabilnosti i verovatnoću tačnih detekcija u odnosu na rastojanje, ugao i radijalnu brzinu, dati su u nastavku.

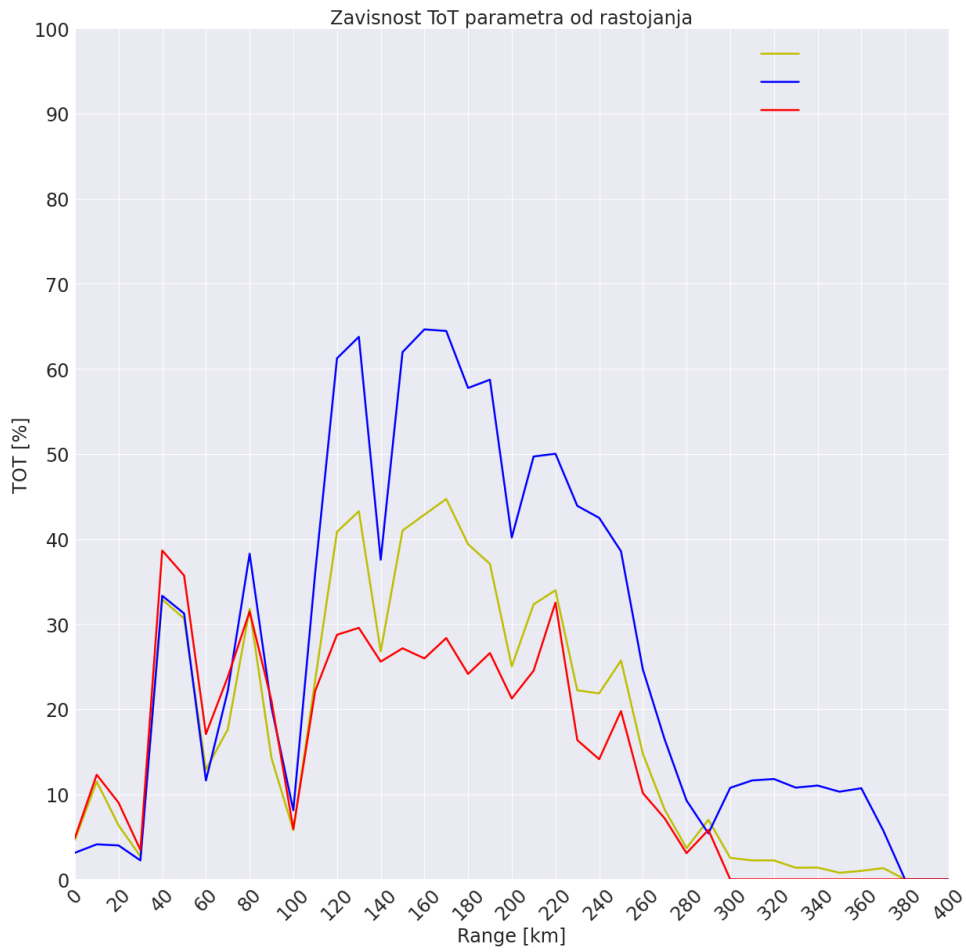
Korišćena su tri različita algoritma: ŽUTI, PLAVI i CRVENI algoritam. ŽUTI je preuzet iz literature, WERA algoritam, PLAVI i CRVENI ALGORITAM su razvijeni u institutu Vlatacom.

Na grafiku br. 1 (Slika 5.1) prikazana je zavisnost ToT parametra u odnosu na rastojanje, dok grafik br. 2 (Slika 5.2) prikazuje usrednjene vrednosti ToT parametra za različite intervale rastojanja. Iznenadujuće, rezultati pokazuju da su sva tri algoritma gotovo podjednako efikasna na rastojanjima do 100 km. Međutim, zabeležena je razlika kod vrednosti ToT parametra na rastojanjima do 70 km, gde detekcioni CRVENI algoritam u proseku ostvaruje viši ToT parametar za oko 3%, u odnosu na ŽUTIdetekcioni algoritam, i za oko 4% u odnosu na detekcioni algoritam PLAVI.

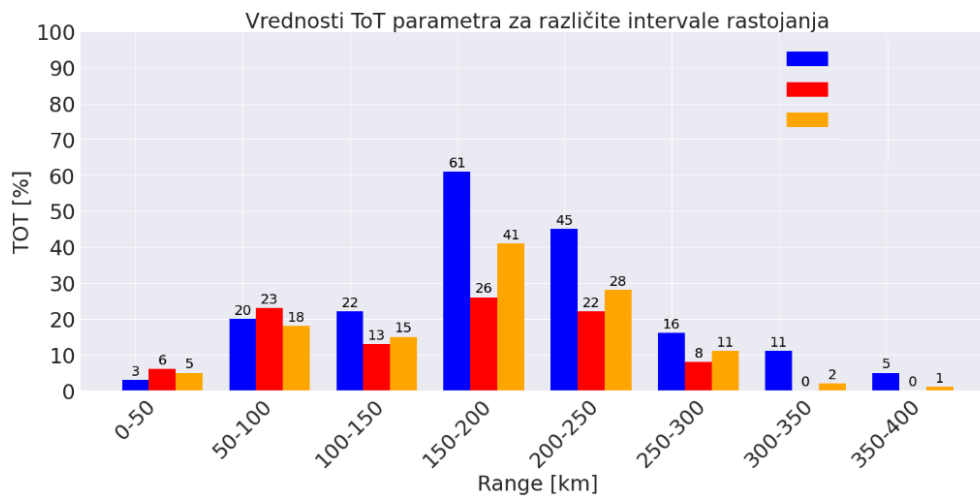
Važno je napomenuti da se na celom preostalom opsegu rastojanja do 300 km, detekcioni algoritam PLAVI pokazuje kao superiorniji u odnosu na druga dva algoritma, sa prosečno 14% boljim ToT parametrom u odnosu na ŽUTIdetekcioni algoritam i 21% boljim ToT parametrom u odnosu na detekcioni CRVENI algoritam. Osim toga, ŽUTI detekcioni algoritam se pokazao boljim od PLAVOG detekcionog algoritma na ovim rastojanjima. S obzirom na ograničen domet CRVENOG do 300 km, razumno je uporediti samo ŽUTI detekcioni algoritam i detekcioni algoritam PLAVI, gde je detekcioni algoritam PLAVI i dalje pokazao bolje rezultate.

Grafik br. 3 (Slika 5.3) prikazuje kako se ToT parametar menja u zavisnosti od ugla. Primetno je da se, kako se udaljavamo od pozicije radara i prelazimo na veća rastojanja, površina kopna koja je obuhvaćena zonom pokrivanja radara povećava. Ovo dovodi do smanjenja opsega vrednosti uglova sa pozitivnim vrednostima ToT parametra na većim rastojanjima.

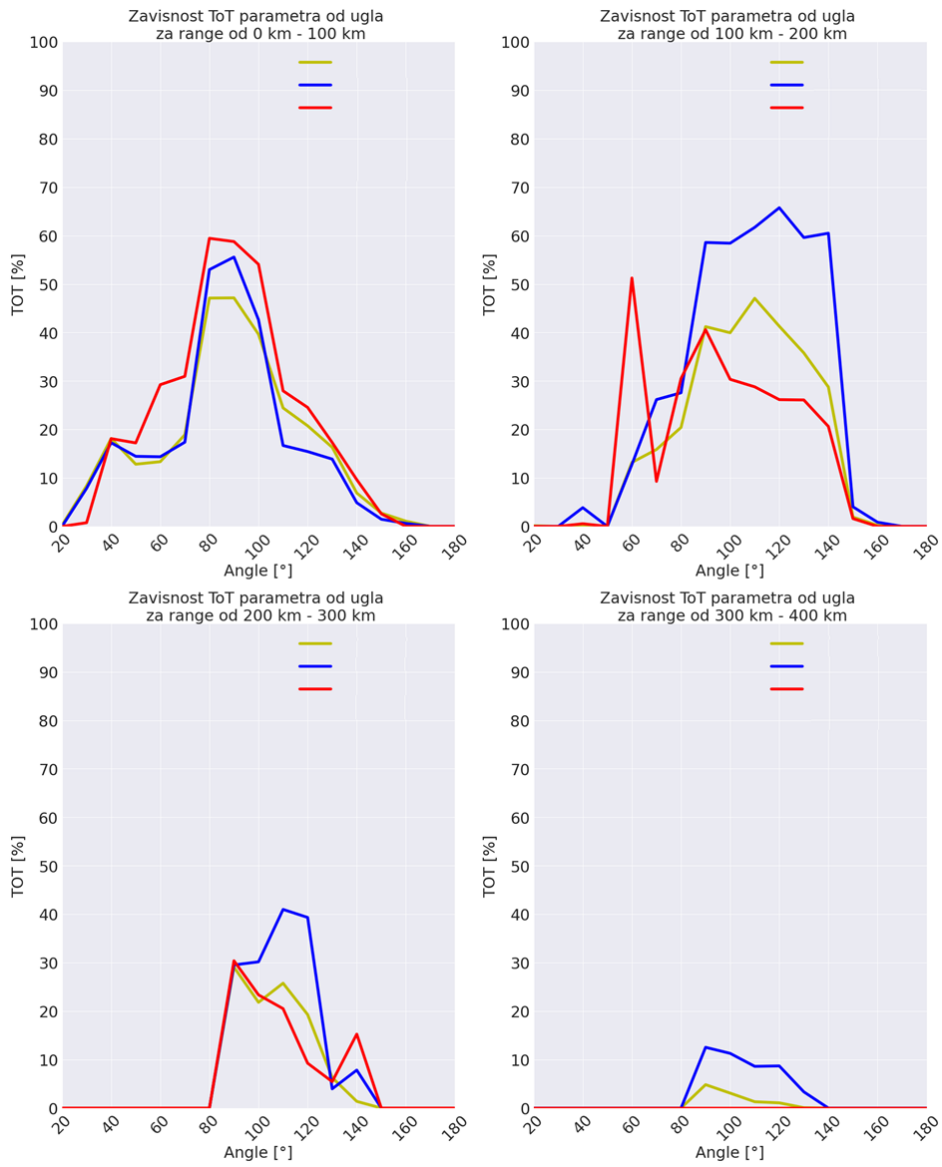
Kada analiziramo vrednosti ToT parametra na rastojanjima do 100 km, primećujemo da detekcioni CRVENI ALGORITAM ostvaruje u proseku više vrednosti ToT parametra za oko 2% u odnosu na ŽUTI detekcioni algoritam i algoritam PLAVI, na svim uglom. Međutim, na rastojanjima većim od 100 km, detekcioni algoritam PLAVI postiže najbolje rezultate u većini slučajeva, osim u opsegu uglova od otprilike 50° do 65° na rastojanjima od 100 do 200 km i uglovima od otprilike 130° do 150° na rastojanjima od 200 do 300 km, gde detekcioni CRVENI ALGORITAM ostvaruje veće vrednosti ToT parametra.



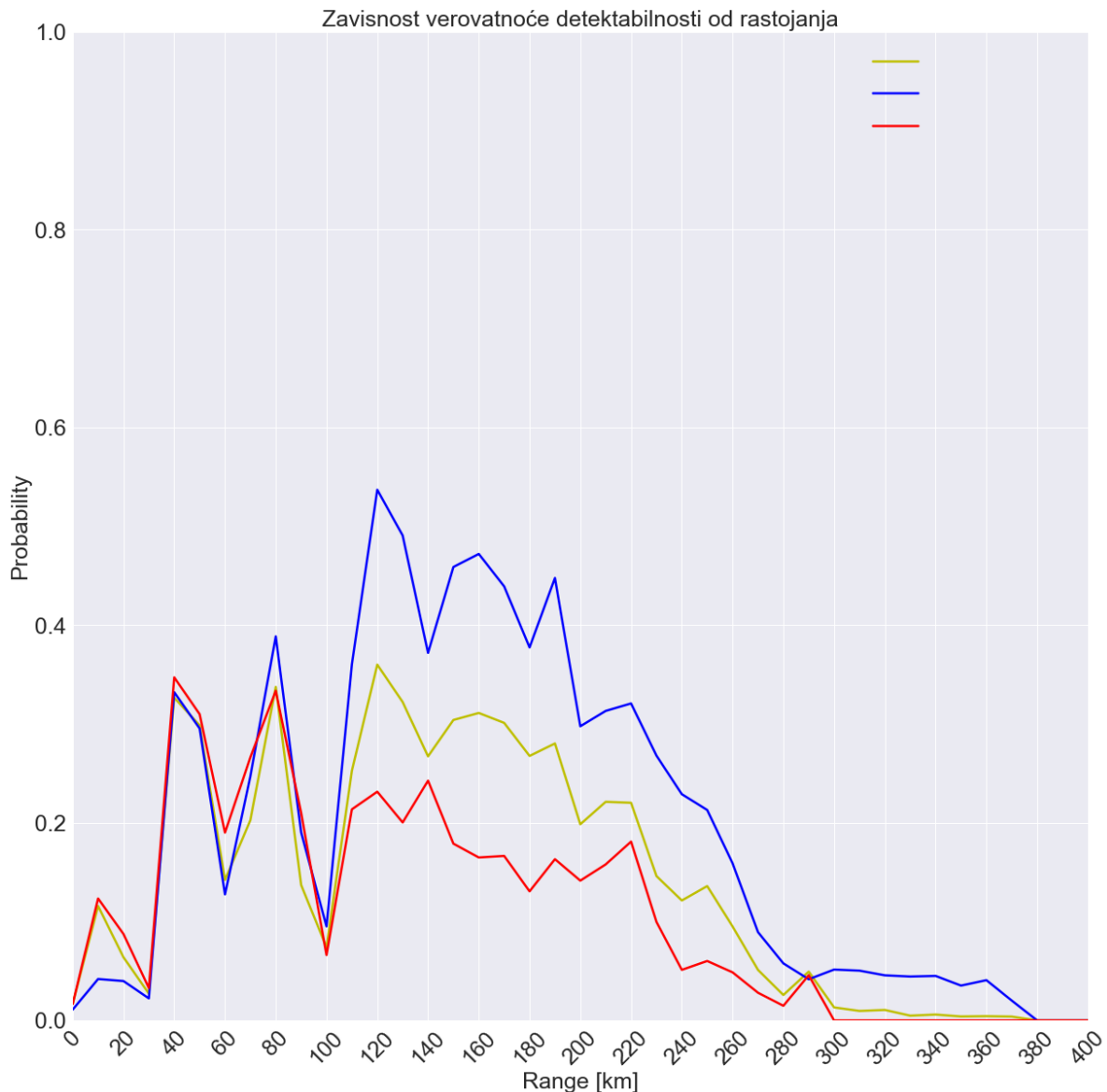
Slika 5.1 Zavisnost ToT parametra od rastojanja



Slika 5.2 Vrednosti ToT parametra za različite intervale rastojanja

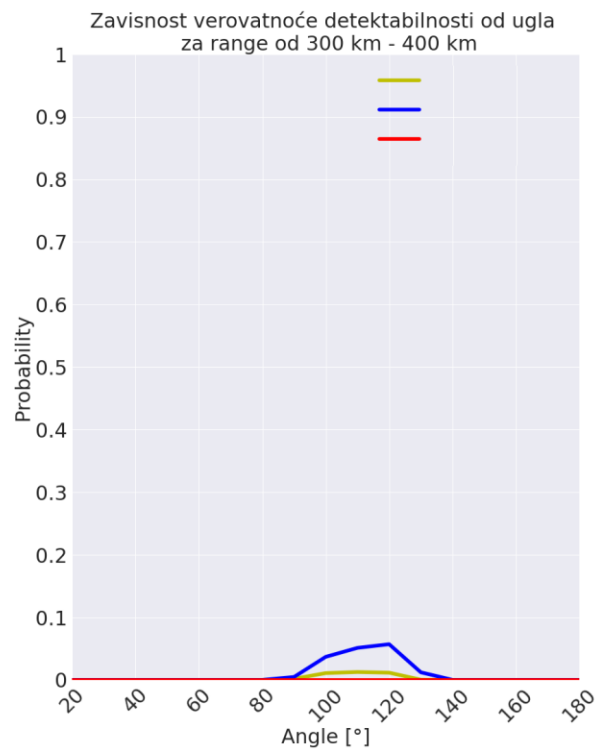
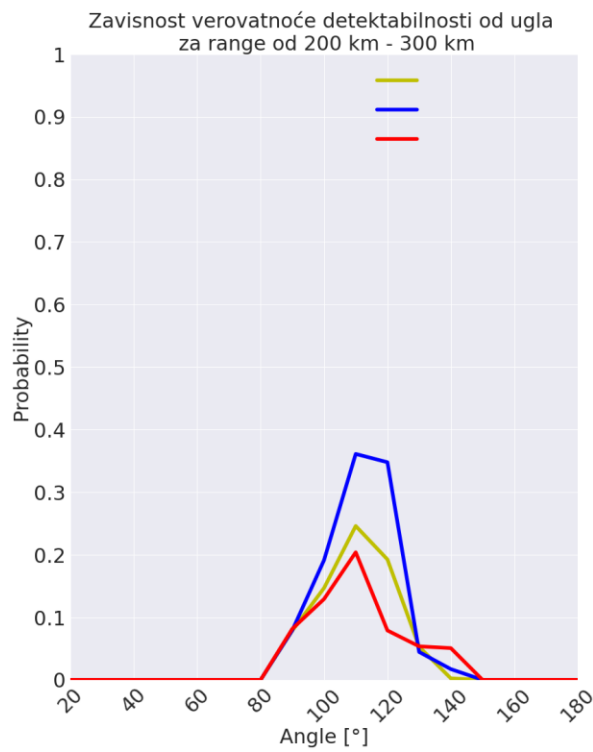
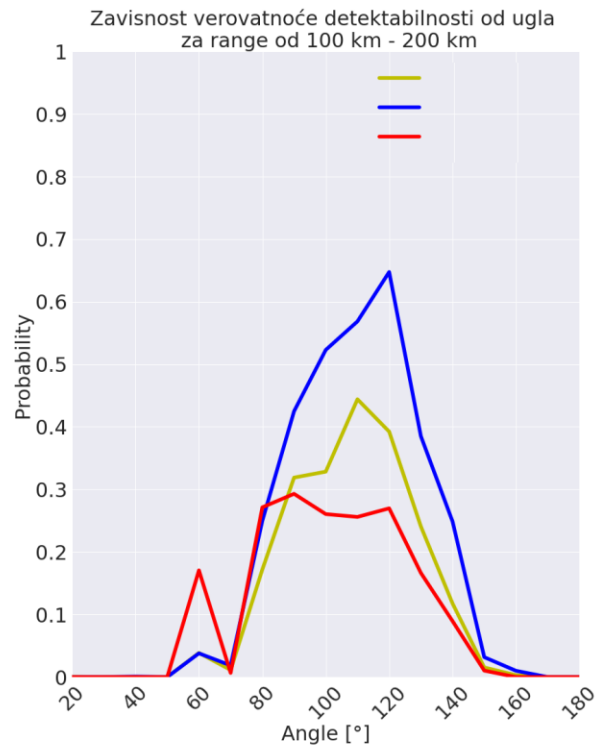
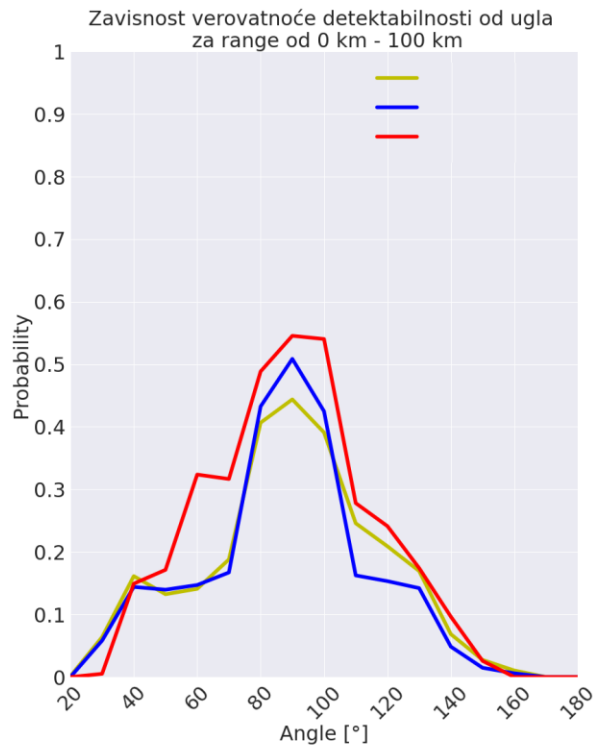


Slika 5.3 Zavisnost ToT parametra od ugla

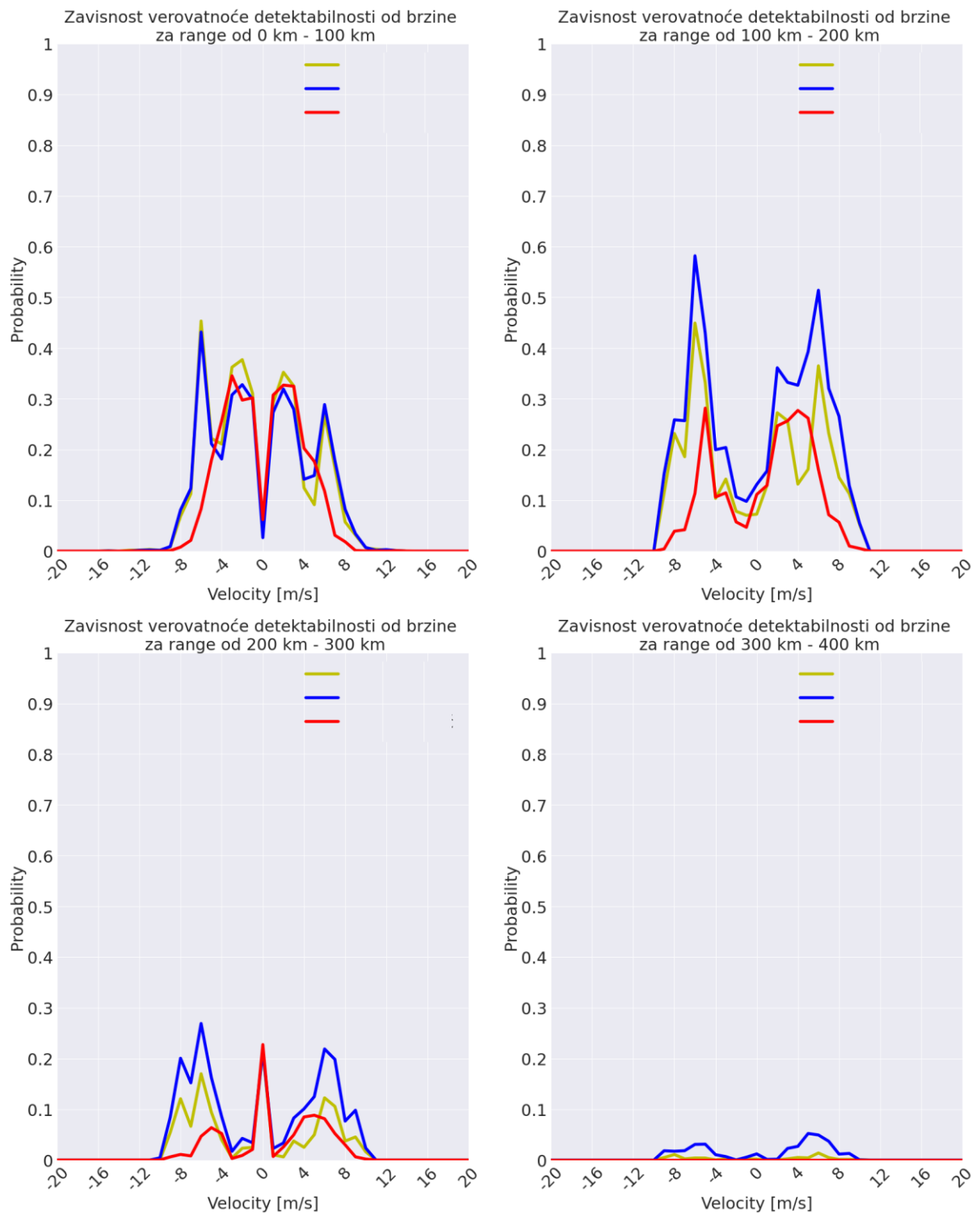


Slika 5.4. Zavisnost verovatnoće detektabilnosti od rastojanja

Grafici broj 5 i broj 6 (Slika 5.5 i Slika 5.6) prikazuju zavisnosti verovatnoće detektabilnosti u odnosu na ugao i radijalnu brzinu na različitim intervalima udaljenosti. Slično kao što je navedeno za grafik broj 2, na udaljenostima do 100 km, CRVENI detekcioni algoritam pokazuje više vrednosti verovatnoće detektabilnosti po svim uglovima, dok na udaljenostima od 100 km PLAVI detekcioni algoritam postiže najviše vrednosti verovatnoće detektabilnosti po skoro svim uglovima. Na svim intervalima udaljenosti prikazanim na grafiku broj 6, kao i na gotovo svakoj vrednosti radijalne brzine, PLAVI detekcioni algoritam ostvaruje najveće vrednosti verovatnoće detektabilnosti.



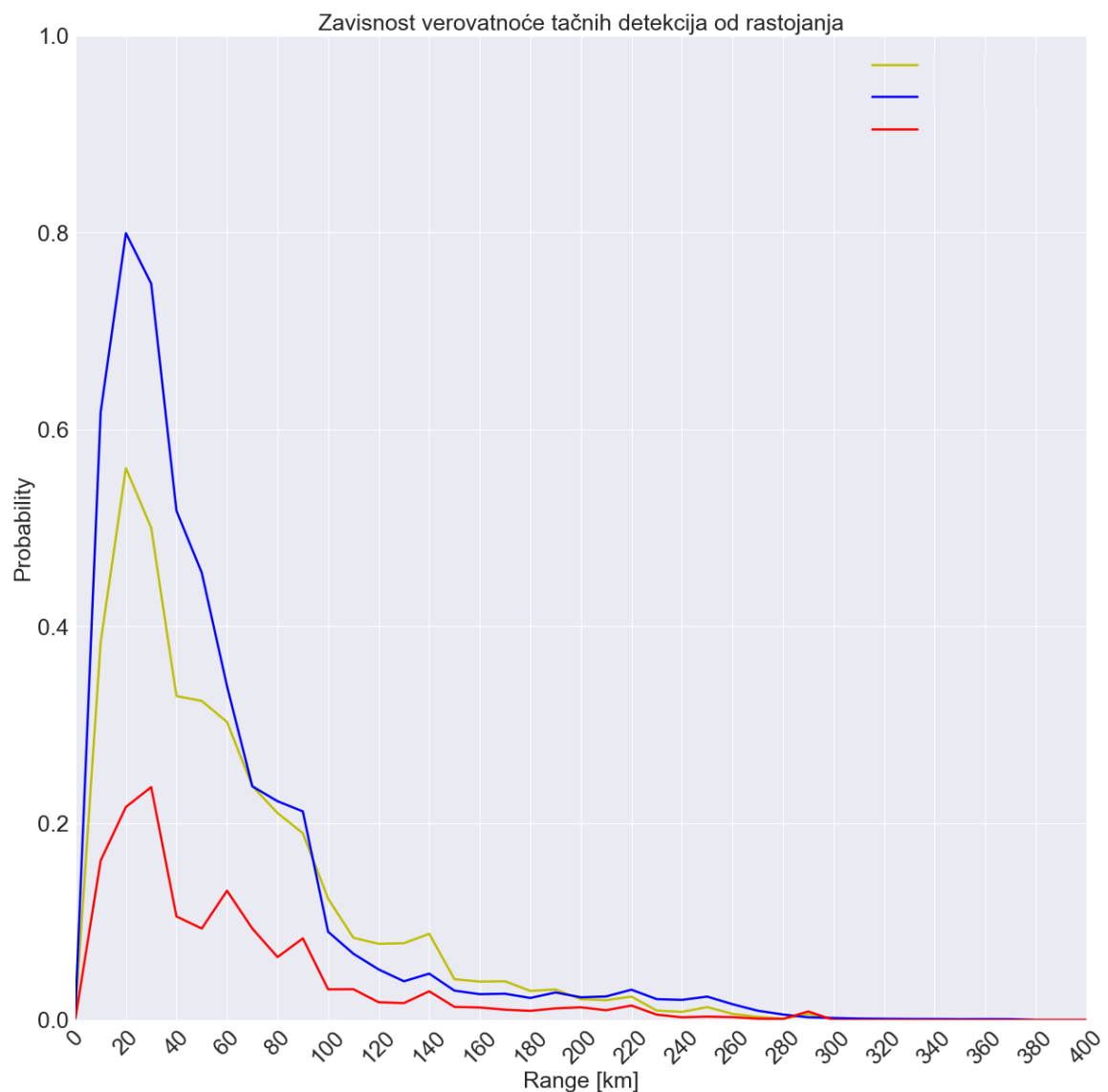
Slika 5.5 Zavisnost verovatnoće detektabilnosti od ugla



Slika 5.6 Zavisnost verovatnoće detektabilnosti od radialne brzine

Na grafiku br. 7 (Slika 5.7) prikazana je veza između verovatnoće tačnih detekcija i rastojanja. Primećujemo da detekcioni algoritam PLAVI ostvaruje najviše vrednosti verovatnoće tačnih detekcija na svim rastojanjima do 70 km, u poređenju sa druga dva detekciona algoritma. Nasuprot tome, vrednosti ToT parametra i verovatnoće detektabilnosti kod detekcionog algoritma PLAVI su skoro uvek niže od vrednosti ToT parametra i verovatnoće detektabilnosti kod druga dva algoritma, što se vidi na graficima br. 1 i br. 4.

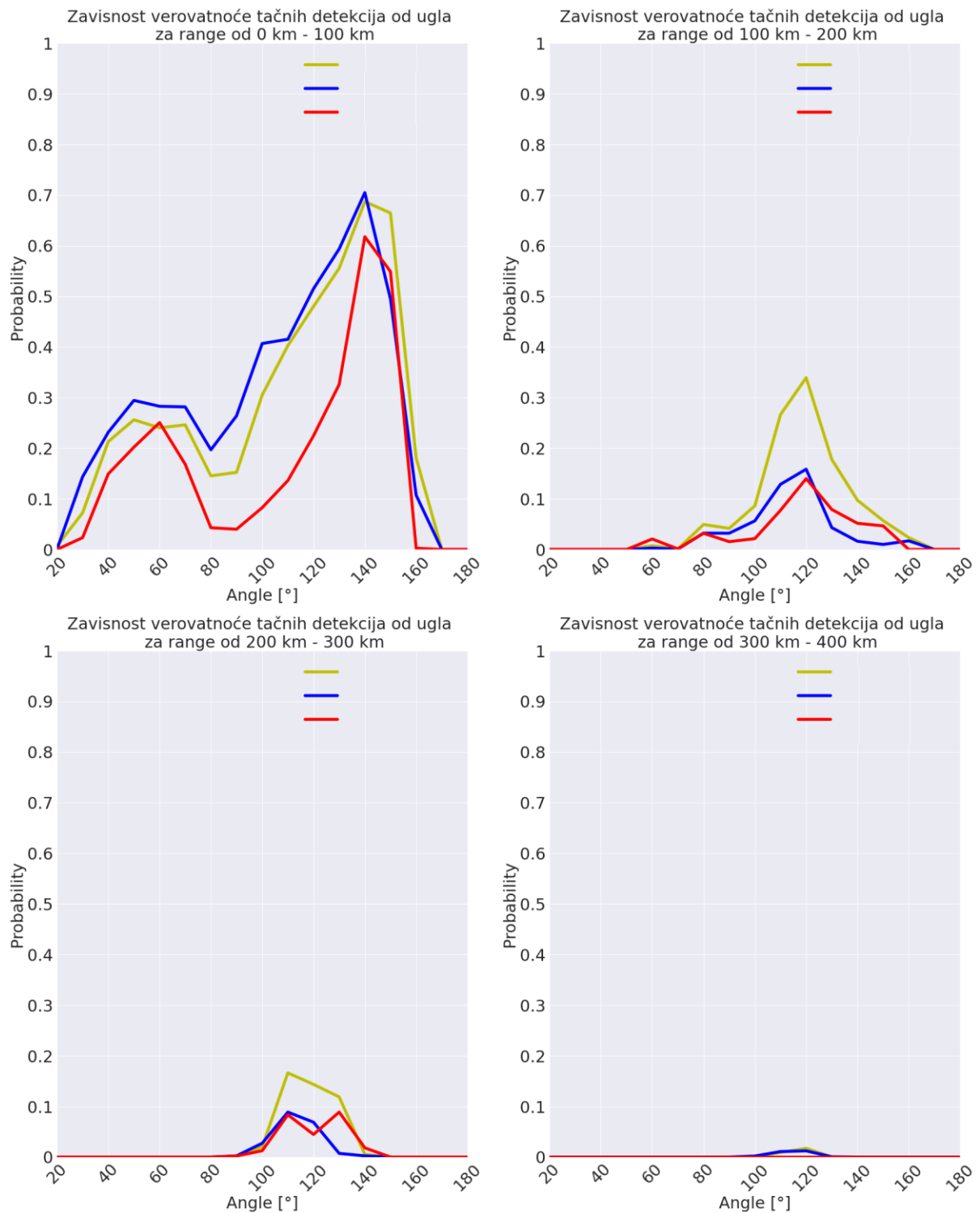
Iz tog razloga, s obzirom na značajno veće vrednosti verovatnoće tačnih detekcija na rastojanjima do 70 km, predlaže se da se kriterijumi za ovaj opseg rastojanja oslabljuju kod detekcionog algoritma PLAVI.



Slika 5.7 Zavisnost verovatnoće tačnih detekcija od rastojanja

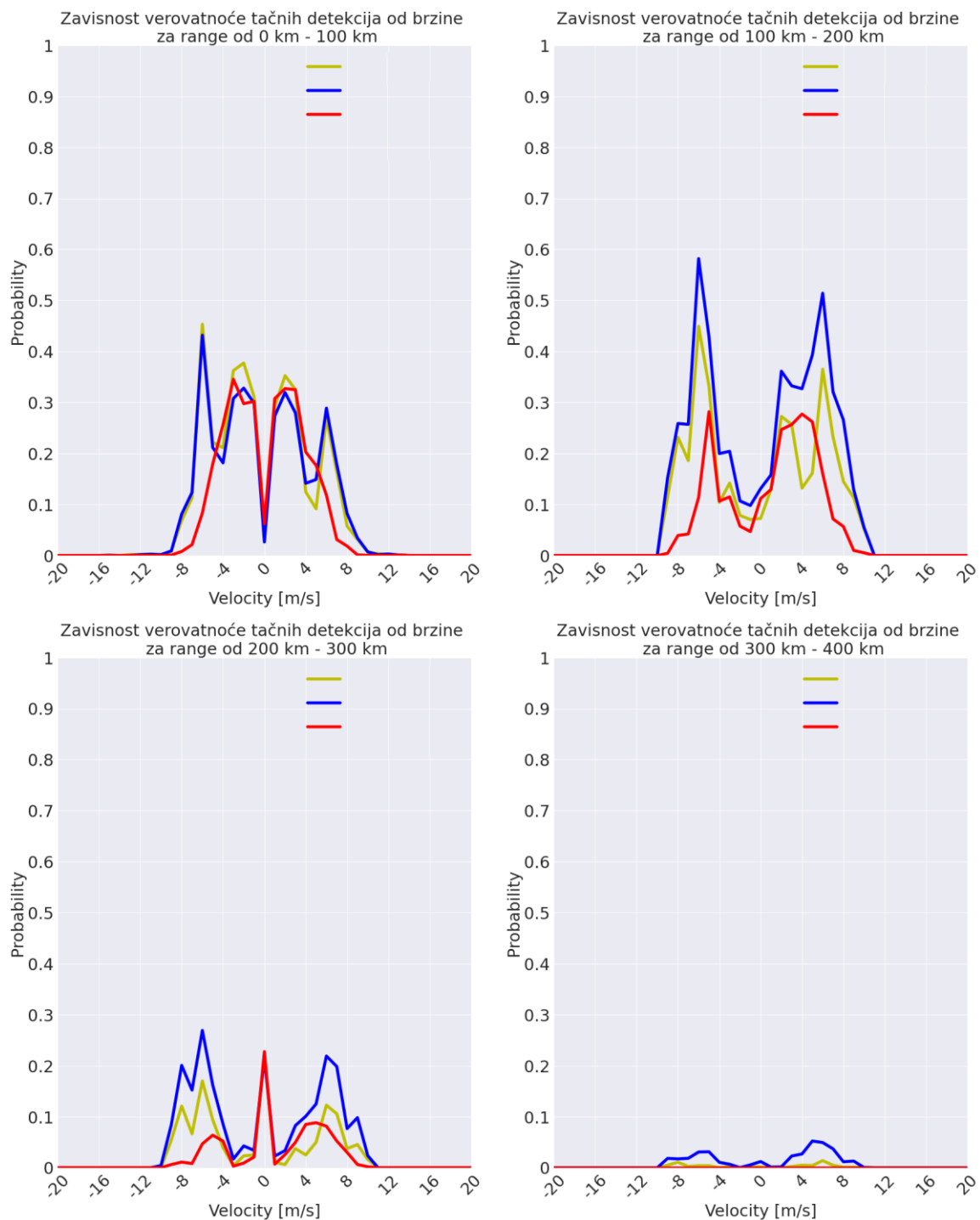
Na rastojanjima od približno 100 km do 180 km, ŽUTI detekcioni algoritam ostvaruje više vrednosti verovatnoće tačnih detekcija u poređenju sa druga dva algoritma. Konkretno, ŽUTI detekcioni algoritam ostvaruje prosečno 0.05 viših vrednosti verovatnoće tačnih detekcija u odnosu na detekcioni CRVENI algoritam i prosečno 0.02 viših vrednosti verovatnoće tačnih detekcija u odnosu na detekcioni algoritam PLAVI.

Slike 5.8 i 5.9 prikazuju zavisnosti verovatnoće tačnih detekcija u odnosu na ugao i radialnu brzinu. Zapaženo je da na rastojanjima većim od 100 km i gotovo svim vrednostima ugla, ŽUTI detekcioni algoritam ostvaruje veće vrednosti verovatnoće tačnih detekcija u odnosu na preostala dva algoritma.



Slika 5.8 Zavisnost verovatnoće tačnih detekcija od ugla

Na preostalom opsegu rastojanja, detekcioni algoritam PLAVI, u većini slučajeva, pokazuje najbolje performanse. Ovaj postupak uporedne analize detekcionih algoritama može se primeniti u budućim istraživanjima na uzorcima znatno većeg obima, omogućavajući detaljniju i precizniju analizu. Takođe, moguće je dodatno filtriranje oblasti oko naftnih platformi i luka gde se često nalazi značajan broj brodova radi dalje optimizacije i unapređenja performansi detekcionih algoritama.



Slika 5.9 Zavisnost verovatnoće tačnih detekcija od radialne brzine

Na osnovu analize iz prethodnih grafikona, zaključeno je da su sva tri detekciona algoritma gotovo jednako efikasna na rastojanjima do 100 km, iako se detekcioni CRVENI algoritam može dati prednost u ovom opsegu. Međutim, zbog visokih vrednosti verovatnoće tačnih detekcija kod detekcionog algoritma PLAVI na rastojanjima do 70 km, predloženo je da se kriterijumi za ovu zonu pokrivanja ublaže. Izložena metodologija se pokazala kao veoma dobar alat ne samo izbora već i unapređenja detekcionih algoritama.

6. DOPRINOS DISERTACIJE

Na osnovu sprovedenih istraživanja, poboljšane su radne performanse OTHR sistema u nekoliko ključnih aspekata. To uključuje veću funkcionalnost, otpornost na spoljne uticaje, povećanu osetljivost, kao i pouzdanost u detekciji i praćenju ciljeva. Kako bismo postigli ove ciljeve, razvijene su potpuno nove arhitekture OTHR sistema, koristeći inovativna konceptualna rešenja, poboljšanu hardversku implementaciju pojedinih podsistema kao i primenom novih algoritme za detekciju i praćenje ciljeva.

Nova arhitektura je posebno prilagođena za komercijalnu proizvodnju stoga odgovara potrebama stvarne implementacije u zahtevnim terenskim uslovima.

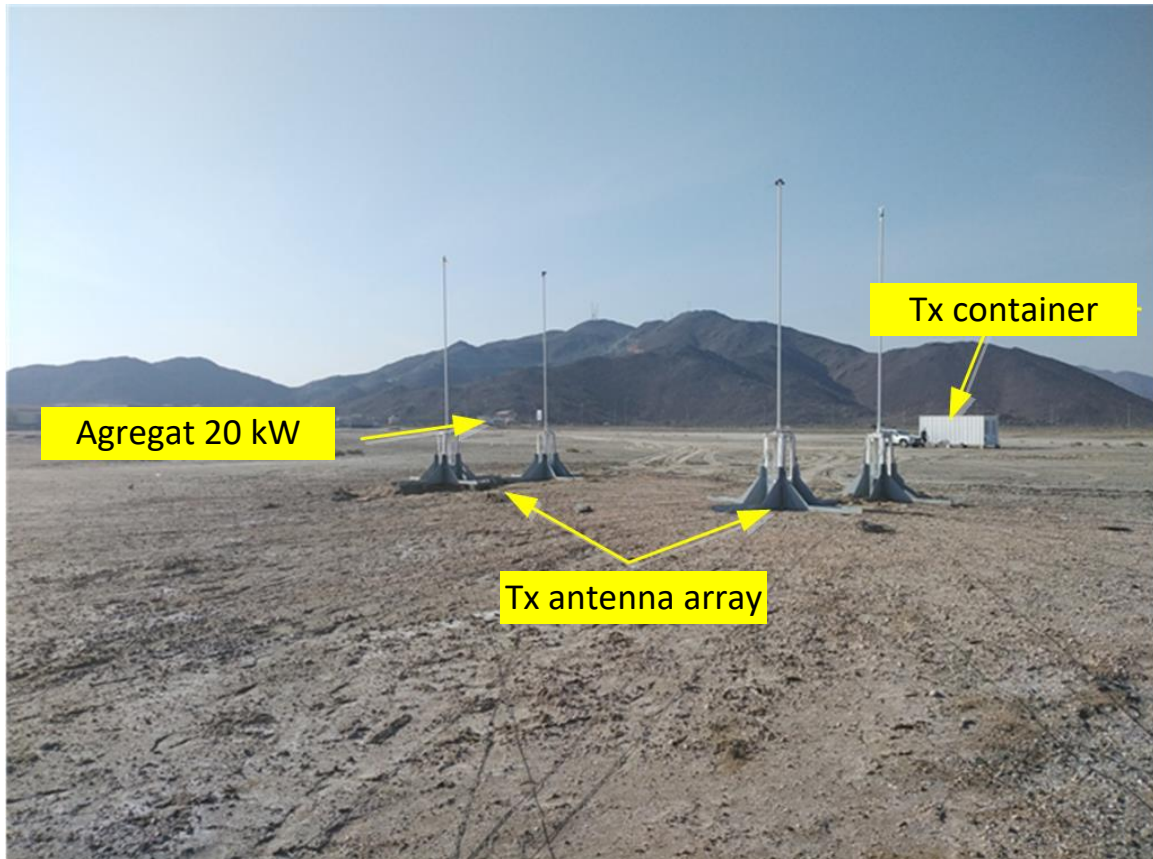
Najveći doprinos ove disertacije je da su dobijeni rezultati istraživanja uspešno primenjeni u OTHR sistemima koji su operativni širom naše planete. Svi hardverski i softverski podsistemi celog OTHR sistema predstavljaju sopstveni razvoj.

Razvoj, instalacija i korišćenje OTHR sistema zahteva rešavanje niza tehničkih i organizacionih izazova. Prvo i osnovno, potrebno je uzeti u obzir specifične uslove prostiranja HF površinskih talasa, kao i nepovoljni uticaj okoline. Ovo uključuje visoki atmosferski šum, galaktički šum i industrijski šum koji mogu značajno uticati na rad radara.

Slike u nastavku ilustruju neke delove instalacije OTHR sistema:



Slika 6.1 Prostorni razmeštaj linearnog 16-elementnog prijemnog antenskog niza



Slika 6.2. Razmeštaj elemenata predajnog niza

Na kraju najvažniji doprinosi disertacije mogu se taksativno navesti:

- Istraživanje i razvoj više novih arhitektura sistema,
- Hardverska i softverska unapređenja podsistema OTHR sistema,
- Potpuno novi razvoj antenskog podsistema,
- Originalni simulacioni model sistema,
- Razvoj metodologije za upoređenje arhitektura sistema i detekcionih algoritama
- Instalacija sistema,
- Kalibracija sistema,
- Eksploatacija sistema.

7. ZAKLJUČAK

Na osnovu decenijskog rada na ovoj disertaciji, projektovanju, instalaciji i eksploataciji OTHR sistema u različitim geografskim i klimatskim uslovima širom sveta, za sve postavljene ciljeve koje je disertacija trebalo da valorizuje, može se konstatovati da su i ostvareni. Na osnovu do sad postignutih rezultata može se reći sledeće:

- Istraživanjem i razvojem adekvatne nove arhitekture OTHR sistema, ostvareno je značajno povećanje robusnosti ovih radara u zahtevnim okruženjima, kao što su npr. ekvatorijalna područja. Nove arhitekture omogućavaju znatno bolje performanse u promenljivim atmosferskim uslovima i interferencijama, povećavajući osetljivost sistema i proširujući granice detekcije. Ovo obezbeđuje otkrivanje ciljeva koji bi inače bili izvan dometa klasičnih OTHR sistema.
- Nova arhitektura OTHR sistema značajno unapređuje pouzdanost i kvalitet praćenja ciljeva koji su prethodno detektovani. Ovo je od suštinskog značaja za situacije gde je praćenje kretanja ciljeva od vitalnog značaja, kao što je u vojnim operacijama ili praćenju vazdušnog i pomorskog saobraćaja.
- Razvoj i primena novih algoritama za detekciju i praćenje ciljeva predstavlja ključnu komponentu unapređenja performansi HFSW OTHR sistema. Ovi algoritmi, zajedno sa novim hardverskim rešenjima i inovativnim konceptima u arhitekturi sistema, znatno doprinose boljoj obradi radarskih signala i povećavaju ukupne performanse sistema. Ovo omogućava preciznije detektovanje i praćenje ciljeva, smanjujući rizik od grešaka u detekcijama.
- Svi navedeni rezultati i rešenja imaju značajnu praktičanu primenu u realnim uslovima i aplikacijama. Poboljšane performanse OTHR sistema čine ih konkurentnim i relevantnim u širokom spektru naučno-istraživačkih i operativnih konteksta. Njihova primena može biti od ključnog značaja u oblastima kao što su nacionalna bezbednost, nadgledanje vazdušnog i pomorskog saobraćaja, kao i u istraživanju i razvoju novih tehnologija u oblasti radara.
- Ova disertacija doprinosi značajnom unapređenju tehnologije i primeni izahorizontskih radara u HF frekvencijskom opsegu i postavlja osnovu za dalje istraživanje i razvoj ovih sistema u budućnosti.

Novi izazovi koji stoje pred OTHR sistemima se mogu definisati u dva pravca:

- Kako na moru detektovati što manja plovila (npr. gumene čamce – jako mali RCS), i
- Kako u vazduhu detektovati letelice na što većim rastojanjima.

8. LITERATURA

[1] *Law of the Sea, Part V—Exclusive Economic Zone*, United Nations, New York, NY, USA, Aug. 2011.

[2] G. Fabrizio, *High Frequency Over-the-Horizon Radar: Fundamental Principles, Signal Processing, and Practical Applications*. New York, NY, USA: McGraw-Hill, 2013.

[3] Dzolic, B., Veinovic, M., Nikolic, D., Grbic, N., Lekic, N., & Orlic, V. (2021). Tailoring HFSWR transmitting antenna array for environment of the equatorial area: Gulf of Guinea experiences. *IEEE Sensors Journal*, 21(5), 6973–6981. <https://doi.org/10.1109/jsen.2020.3039420>

[4] P. Barca, S. Maresca, R. Grasso, K. Bryan, and J. Horstmann, “Maritime surveillance with multiple over-the-horizon HFSW radars: An overview of recent experimentation,” *IEEE Aerosp. Electron. Syst. Mag.*, vol. 30, no. 12, pp. 4–18, Dec. 2015

[5] H. Roarty et al., “The global high frequency radar network,” *Frontiers Mar. Sci.* vol. 6, p. 164, Dec. 2019.

[6] Skolnik, M.I., *Radar Handbook*, Second Edition. New York: McGrawHill, 1990. ISBN: 0-07-057913-X.

[7] Nikolić, D., Džolić, B., Tošić, N., Lekić, N., Orlić, V. & Todorović, B. “HFSW Radar Design: Tactical, Technological and Environmental Challenges”. *Proc. of OTEH 7th International Scientific Conference on Defensive Technologies*, Belgrade, Serbia, October 6-7., 2016.

[8] Nikolic, D., Popovic, Z., Borenovic, M., Stojkovic, N., Orlic, V., Dzvonkovskaya, A. & Todorovic, B. “Multi-Radar Multi-Target Tracking Algorithm for Maritime Surveillance at OTHR Distances”. *Proc. of 17th International Radar Symposium (IRS)*, Krakow, Poland, May 11-15, 2016.

[9] Nikolic, D., Stojkovic, N. & Lekic, N. “Maritime Over the Horizon Sensor Integration: HFSWR and AIS Data Integration Algorithm”. *Sensors*, 18 (4), 1147, 2018. Available at: <https://doi.org/10.3390/s18041147>.

[10] ITU (International Telecommunication Union). *Recommendation ITU-R P.527-3. Electrical characteristic of the surface of the earth* [online], 1992. Available at:

https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/p/R-REC-P.527-3-199203-S!!PDF-E.pdf

[11] Barrick, D.E. *Theory of Ground-Wave Propagation Across A Rough Sea at Decameter Wavelengths*. Columbus, Ohio: Battelle Memorial Institute [online], 1970. Available at: <https://apps.dtic.mil/dtic/tr/fulltext/u2/865840.pdf>

[12] ITU (International Telecommunication Union). *Software, Data and Validation examples for ionospheric and tropospheric radio wave propagation and radio noise, Ground-wave propagation (GRWAVE) ver.9.2, Software* [online], 2020. Available at: <https://www.itu.int/en/ITU-R/study-groups/rsg3/Pages/ionotrospo-spheric.aspx>

[13] Spaulding, A.D. & Washburn, J.S., *Atmospheric Radio Noise: Worldwide Levels and Other Characteristics*. NTIA Report 85-173. U.S. Department of commerce, 1985.

- [14] M. Dragovic, *Antene i Prostiranje Radio Talasa*, 4th edition, Belgrade, Serbia: Akademska Misao, 2008.
- [15] Skolnik, M.I. "An empirical formula for the radar cross section of the ships at grazing incidence". *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, AES-10(2), pp.292-292, 1974. Available at: <https://doi.org/10.1109/TAES.1974.307935>.
- [16] Dzvonkovskaya, A. & Rohling, H. "Cargo ship RCS estimation based on HF radar measurements". *Proc. of 11th International Radar Symposium (IRS)*, Vilnius, Lithuania, June 6-18, 2010. Available at: <https://ieeexplore.ieee.org/document/5547445> [Accessed: 7 June 2020].
- [17] Džolić, Bojan R., Mladen Đ. Veinović, Vladimir D. Orlić, Nikola L. Lekić, and Nemanja R. Grbić. "A SOLUTION FOR THE OVER-THE HORIZON-RADAR SIMULATOR." *Military Technical Courier/Vojnotehnicki Glasnik* 68, no. 4 (2020).
- [18] Vlatacom Institute. Over the horizon radar: vOTHR, Product datasheet, 2018. Available at: <https://www.vlatacominate.com/over-thehorizon-radar>
- [19] H. L. Van Trees, *Optimum Array Processing*, John Wiley & Sons, Inc., 2002.
- [20] H.J. Orchard, R.S. Elliott, G.J. Stern, "Optimizing the synthesis of shaped beam antenna patterns", *In Proceedings of the IEE Microwave, Antennas and Propagation*, H 132, Mar. 1985, vol. 1, pp 63 – 68.
- [21] O. M. Phillips, "Radar returns from the sea surface—Bragg scattering and breaking waves," *J. Phys. Oceanogr.*, vol. 18, pp. 1065-1074, 1988.
- [22] X. Lu, J. Wang, R. Dizaji, Z. Ding, A. M. Ponsford , "A New Constant False Alarm Rate Technique for High Frequency Surface Wave Radar", *IEEE CCECE*, 2004.
- [23] D. Ivković, M. Andrić, B. Zrnić, "Detection of Very Close Targets by Fusion CFAR Detectors", *Scientific Technical Review*, vol. 66, no. 3, pp. 50-57, 2016.
- [24] A. C. Balanis, *Antenna Theory: Analysis and Design*, 3rd ed. Hoboken, NJ, USA: Wiley, 2005.
- [25] K. Wang, P. Zhang, J. Niu, W. Sun, L. Zhao, and Y. Ji, "A performance evaluation scheme for multiple object tracking with HFSWR," *Sensors*, vol. 19, no. 6, p. 1393, Mar. 2019
- [26] *Handbook on Ground Wave Propagation*, ITU, Geneva, Switzerland, Accessed: Apr. 8, 2020. [Online]. Available: <http://handle.itu.int/11.1002/pub/809efe7d-en>
- [27] L. Mattioni and G. Marrocco, "Design of a broadband HF antenna for multimode naval communications," *IEEE Antennas Wireless Propag. Lett.*, vol. 4, pp. 179–182, Feb. 2005, doi: 10.1109/LAWP.2005.850796.
- [28] L. Mattioni and G. Marrocco, "Design of a broadband HF antenna for multimode naval Communications—Part II: Extension to VHF/UHF ranges," *IEEE Antennas Wireless Propag. Lett.*, vol. 6, pp. 83–85, Feb. 2007, doi: 10.1109/LAWP.2007.893094.
- [29] L. F. Sánchez et al., "HF broadband antenna design for shipboard communications: Simulation and measurements," *Measurement*, vol. 89, pp. 13–20, Jul. 2016, doi: 10.1016/j.measurement.2016.03.068.
- [30] M. M. Weiner, *Monopole Antennas*. New York, NY, USA: Marcel Dekker, 2003.

[31] M. Fartookzadeh, S. H. Mohseni Armaki, S. M. J. Razavi, and J. Rashed-Mohassel, "Optimum functions for radial wires of monopole antennas with arbitrary elevation angles," *Radioengineering*, vol. 25, no. 1, pp. 53–60, Apr. 2016, doi: 10.13164/re.2016.0053.

[32] *WERA Guide*. [Online]. Available:

http://wera.cen.uni-hamburg.de/WERA_Guide/WERA_Guide.shtml

[33] *SeaSonde General Specs*. [Online]. Available:

http://www.codar.com/SeaSonde_gen_specs.shtml

[34] N. Stojkovic, D. Nikolic, P. Petrovic, N. Tomic, N. Lekic, "An Implementation of DBF and CFAR models in OTHR signal processing", *In proceedings of the 15th IEEE Colloquium on Signal Processing and its Applications (CSPA 2019)*, Penang, Malesia, 8-9 Mar. 2019.

[35] L. Sevgi, A. Ponsford, H.C. Chan, "An integrated maritime surveillance system based on high-frequency surface-wave radars. Part 1. Theoretical background and numerical simulations", *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, vol. 43, no. 4, pp. 28-43, Aug 2001.

[36] A. Ponsford, A. Ponsford, H.C. Chan, "An integrated maritime surveillance system based on highfrequency surface-wave radars. Part 2. Operational status and system performance", *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, vol. 43, no. 5, pp. 52 -63, Oct 2001.

[37] T. Ponsford and J. Wang, "A Review of High Frequency Surface Wave Radar for Detection and Tracking of Ships", Special Issue on Sky- and Ground-wave High Frequency (HF) Radars: Challenges in Modelling, Simulation and Application, *Turk J Elec Eng & Comp Sci*, vol. 18, no. 3, 2010.

[38] L. Sevgi, "Modeling and simulation strategies in high frequency surface wave radars", *Turk J Elec Eng & Comp Sci*, vol. 18, no. 3, 2010.

[39] A. Ponsford, R. McKerracher, Z. Ding, P. Moo, D. Yee, "Towards a Cognitive Radar: Canada's Third Generation High Frequency Surface Wave Radar (HFSWR) for Surveillance of the 200 Nautical Mile Exclusive Economic Zone", *Sensors*, vol. 17, no. 7, article no. 1588, 2017.

[40] N. Lekic, D. Nikolic, B. Milanovic, D. Vucicevic, A. Valjarevic, B. Todorovic, "Impact of Radar Cross Section on HF Radar Surveillance Area: Simulation approach", *In Proceedings of 2015 IEEE Radar conference*, Johannesburg, RSA, 2015.

[41] Z. Ding, P. Moo, "Design of an IMM-NNJPDA tracker for HFSWR", *In Proceedings of the 17th International Radar Symposium (IRS)*, 2016, pp. 1-5.

[42] N. Stojkovic, D. Nikolic, B. Dzolic, N. Tomic, V. Orlic, N. Lekic, B. Todorovic, "An Implementation of Tracking Algorithm for Over-The-Horizon Surface Wave Radar", *In Proceedings of the 24th Telecommunications Forum (TELFOR)*, Belgrade, Serbia, 22-23 Nov. 2016.

[43] Dzolic, B., Tomic, N., Lekic, N., Orlic, V & Veinovic, M. "Transmitter's internal noise performance as limiting factor in High-Frequency Over-the-Horizon radars". *In proc. of 2019 14th International Conference on Advanced Technologies, Systems and Services in Telecommunications (TELSIKS)*, Niš, Serbia, October 23-25, 2019. Available at: <https://doi.org/10.1109/TELSIKS46999.2019.9002333>.

[44] Džolić, B., Tošić, N., Orlić, V. & Veinović, M. "Visualization tools for design of Maritime Surveillance System". *In proc. of Sinteza 2019 - International Scientific Conference on*

Information Technology and Data Related Research, Belgrade, Serbia, April 20th., 2019. Available at: <https://doi.org/10.15308/Sinteza-2019-546-552>.

[45] Girault, B., Narayanan, S., Ortega, A., Gonçalves, P. & Fleury, E. "Grasp: A Matlab toolbox for graph signal processing." *In proc. of 2017 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP)*, New Orleans, USA, March 5-9., 2017. Available at: <https://doi.org/10.1109/ICASSP.2017.8005300>.

[46] Grbić, N., Petrović, P., Stevanović, N., Džolić, B., Nikolić, D. & Lekić, N. "Simulacija radarske površine brodova u kratkotalasnom frekventnom opsegu." *In proc. of 62nd ETRAN Conference*, Palić, Serbia, pp.126-129, June 11-14, 2018. (In Serbian) [online]. Available at: <https://www.etrans.rs/common/Zbornik%20ETTRAN%20IC%20ETTRAN-18-final>.

[47] Hand, G.R. *Combination of Radio Noise modification* [online]., 2017.. Available at: <http://www.greg-hand.com/noise/>

[48] ITU (*International Telecommunication Union*). *Recommendation P.368-9 (02/07) Ground-wave propagation curves for frequencies between 10 kHz and 30 MHz* [online], 2007. Available at: <https://www.itu.int/rec/R-REC-P.368-9-200702-I/en>

[49] ITU (*International Telecommunication Union*). *Recommendation P.372-11 (09/2013) Radio noise* [online], 2013. Available at: <https://www.itu.int/rec/RREC-P.372-11-201309-S/en>

[50] Kolundzija, B.M., Ognjanovic, J.S. & Sarkar T.K. *WIPL-D Microwave: Software and User's Manual: Circuit and 3D EM Simulation for RF and Microwave Applications*. Norwood, Massachusetts: Artech House, 2005. ISBN: 978- 1580539654.

[51] Petrovic, R., Simic, D., Drajić, D., Cica, Z., Nikolic, D. & Peric, M. 2020. "Designing Laboratory for IoT Communication Infrastructure Environment for Remote Maritime Surveillance in Equatorial Areas Based on the Gulf of Guinea Field Experiences." *Sensors*, 20(5), 1349. Available at: <https://doi.org/10.3390/s20051349>

[52] Sevgi, L. & Ponsford, A.M. "An HF Radar Base Integrated Maritime Surveillance System." *In proc. of 3rd International Multiconference IMACS/IEEE CSCC'99*, Athens (Greece), pp.5801-5806, July 4-8, 1999. [online]. Available at:

<http://www.wseas.us/e-library/conferences/athens1999/Papers/580.pdf>

[53] Tošić, N., Džolić, B., Nikolić, D., Lekić, N. & Todorović, B. "Izazovi pri projektovanju HFSW radara." *In proc. of 60th ETRAN Conference*, Zlatibor, Serbia, June 13-16, 2016. (in Serbian).

[54] Wilson, H. & Leong, H. "An Estimation and Verification of Vessel Radar-Cross-Section for HF Surface Wave Radar." *In 2003 Proceedings of the International Conference on Radar (IEEE Cat. No.03EX695)*, Adelaide, Australia, September 3-5, 2003. Available at:

<https://doi.org/10.1109/RADAR.2003.1278830>.

[55] M.C. Peel, B.L. Finlayson, T.A. McMahon, "Updated world map of the Koppen – Geiger climate classification", *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, vol.

[54] H.J. Christian et al, "Global frequency and distribution of lightning as observed from space by Optical Transient Detector", *Journal of Geophysical Research*, vol. 108, no D1, Jan. 2003

DOI: 10.1029/2002JD002347,

[55] IMO Resolution MSC.74(69): Annex 3, Recommendation on performance standards AIS, adopted on 12th of May 1998.

[56] N. Tošić, A. Samčović, D. Nikolić, D. Drajić, and N. Lekić. "An Algorithm for Detection of Electromagnetic Interference in High Frequency Radar Range-Doppler Images Caused by LEDs." *IEEE Access* 7 (2019): 84413-84419.

[57] Nicholas, J. *Bistatic Radar*, 2nd ed.; SciTech Publishing Inc.: Troy, NY, USA, 2005; pp. 119–123.

[58] M.C. Jackson, "The geometry of bistatic radar systems", *IEE PROCEEDINGS*, Vol. 133, Pt. F, No. 7, DECEMBER 1986.

[59] Yonggang Ji, Yiming Wang, Weifeng Sun, Ruifu Wang, Ming Li, Xiaoyu Cheng, and Xu Liang, "Ship Monitoring With Bistatic Compact HFSWR of Small Aperture", *IEEE JOURNAL OF SELECTED TOPICS IN APPLIED EARTH OBSERVATIONS AND REMOTE SENSING*, VOL. 15, 2022.

[60] Yonggang Ji, Jie Zhang, Yiming Wang, Chao Yue, Weichun Gong, Junwei Liu, Hao Sun, Changjun Yu and Ming Li "Coast–Ship Bistatic HF Surface Wave Radar: Simulation Analysis and Experimental Verification", *Remote Sens.* 2020, 12, 470; doi:10.3390/rs12030470

[61] Skolnik, M.I. *An Analysis of Bistatic Radar*. *Aerosp. Navig. Electron. Ire Trans.* 1961, ANE-8, 19–27.

[62] D. B. Trizna, "A bistatic HF radar for current mapping and robust ship tracking," *Oceans.*, Quebec City, QC, Canada, IEEE, pp. 1-6, 15-18, Sept, 2008.

[63] Yonggang Ji, Jie Zhang, Yiming Wang, Qingdao, China Weifeng Sun, Ming Li, Qingdao, "Target Monitoring Using Small-Aperture Compact High-Frequency Surface Wave Radar", *IEEE A&E SYSTEMS MAGAZINE*, MARCH 2018

[64] Kongrui Zhao, Changjun Yu, Gongjian Zhou, and Taifan Quan, "SIMULTANEOUS TARGET FLYING MODE IDENTIFICATION AND ALTITUDE ESTIMATION IN BISTATIC T/R-R HFSWR", *Asian Journal of Control*, Vol. 18, No. 3, pp. 1062–1074, May 2016

[65] Hank Leong, "The potential of bistatic HF surface wave radar system for the surveillance of water-entry area along coastline", 2006 IEEE Conference on Radar, Verona, NY, USA

[66] M Del Mistro, "A STUDY OF BISTATIC RADAR AND THE DEVELOPMENT OF AN INDEPENDENT BISTATIC RADAR RECEIVER", Master thesys, University of Cape Town, Australia, 1992.

[67] Karl Erik Olsen, "Investigation of Bandwidth Utilisation Methods to Optimise Performance in Passive Bistatic Radar", PhD thesys, University of London, 2011.

[68] Peter Marrone, Peter Edwards, "The Case for Bistatic HF Surface Wave Radar", 2008 International Conference on Radar

[69] T. Tsao, D. Weiner, P. Varshney H. Schwarzlander, M. Slamani, "AMBIGUITY FUNCTION FOR A BISTATIC RADAR", *Proceedings of the IEEE-SP International Symposium on Time-Frequency and Time-Scale Analysis*, 1992,

[70] Jian Wang, Reza Dizaji, A. M. Ponsford," ANALYSIS OF CLUTTER DISTRIBUTION IN BISTATIC HIGH FREQUENCY SURFACE WAVE RADAR", Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering 2004 (IEEE Cat. No.04CH37513)

[71] H. D. Griffiths," From a Different Perspective : Principles, Practice and Potential of Bistatic Radar", 2003 Proceedings of the International Conference on Radar (IEEE Cat. No.03EX695), Adelaide, SA, Australia

[72] Panhe Hu , Qinglong Bao, and Zengping Chen," Weak Target Detection Method of Passive Bistatic Radar Based on Probability Histogram", Hindawi Mathematical Problems in Engineering Volume 2018, Article ID 8243686, 10 pages

[73] H.D. Griffiths," PASSIVE BISTATIC RADAR AND WAVEFORM DIVERSITY", RTO-EN-SET-119(2009)

[74] Pavel BEZOUŠEK , Vladimír SCHEJBAL," Bistatic and Multistatic Radar Systems", RADIOENGINEERING, VOL. 17, NO. 3, SEPTEMBER 2008

[75] Johnsen, T.; Olsen, K.E. (2006) Bi- and Multistatic Radar. In Advanced Radar Signal and Data Processing (pp. 4-1 – 4-34). Educational Notes RTO-EN-SET-086, Paper 4. Neuilly-sur-Seine, France: RTO

[76] Hugh Griffiths," Bistatic and Multistatic Radar", IEEE AESS Distinguished Lecture, ETH Zurich, 7 November 2013.

[77] Belinda Lipa, Chad Whelan, Bill Rector and Bruce Nyden," HF Radar Bistatic Measurement of Surface Current Velocities: Drifter Comparisons and Radar Consistency Checks", Remote Sens. 2009, 1, 1190-1211; doi:10.3390/rs1041190

[78] Matthew. A. Ritchie," Statistical Analysis of Coherent Monostatic and Bistatic Radar Sea Clutter", PhD thesis, University of London, July 2013.

[79] A. Manikas,"Principles of Classical and Modern Radar Bistatic Radar", Department of Electrical & Electronic Engineering Imperial College London February 2020.

[80] Matthias Weiß," Synchronisation of Bistatic Radar Systems", IGARSS 2004. 2004 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium

[81] Mike Cherniakov, Marina Gashinova, Pierfancesco Lombardo, Debora Pastina: Marco Martorella," Bistatic and Multistatic Radar",EuRAD 2013, European Radar conference

[82] "Bistatic HF Radar", Edited by Stuart Anderson, Printed Edition of the Special Issue Published in Remote Sensing

[83] Guangdong Liang, Liqiang Hou, Yongbin Chou, Yanbin Shi, "EFFECT OF BISTATIC ANGLE ON SPREAD OF BISTATIC BRAGG LINES", Conference: International Conference on Automatic Control and Artificial Intelligence (ACAI 2012)

[84] Maresca S, Braca P, Horstmann J, Grasso R. , "Maritime surveillance using multiple high-frequency surface-wave radars," IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, vol. 52, no. 8, pp. 5056-5071, 2013.

[85] Braca, P., Maresca, S., Grasso, R., Bryan, K., Horstmann, J., "Maritime surveillance with multiple over-the-horizon HFSW radars: An overview of recent experimentation," IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine, no. 12, pp. 4-18, 2015.