

UNIVERZITET U BEOGRADU  
ELEKTROTEHNIČKI FAKULTET

Nikola D. Stojković

**Sistem za nadgledanje pomorskog saobraćaja  
primenom mreže izahorizontskih radara**

doktorska disertacija

Beograd, 2021

UNIVERSITY OF BELGRADE  
SCHOOL OF ELECTRICAL ENGINEERING

Nikola D. Stojković

**System for surveillance of maritime traffic using  
the network of over-the-horizon radars**

Doctoral Dissertation

Belgrade, 2021

**Mentor:**

Dr Srđan Stanković, profesor emeritus,  
Univerzitet u Beogradu, Elektrotehnički fakultet

**Članovi komisije:**

1. Dr Željko Đurović, redovni profesor  
Univerzitet u Beogradu, Elektrotehnički fakultet

2. Dr Miljko Erić, vanredni profesor  
Univerzitet u Beogradu, Elektrotehnički fakultet

3. Dr Miroslav Perić, viši naučni saradnik  
Institut Vlatakom

**Datum odbrane disertacije:**

---

# Zahvalnica

Zahvaljujem se mentoru, prof. Dr. Srđanu Stankoviću, na dragocenim savetima, kontinuiranoj podršci i učestvovanju tokom izrade ove doktorske disertacije.

Zahvaljujem Institutu Vlatakom, koji mi je omogućio priliku i vreme za vršenje istraživanja, kao i veliku podršku tokom izrade disertacije. Takođe, zahvaljujem se i članovima tima, čiji sam bio deo u realizaciji projekta razvoja i instalacije mreže izahorizontskih radara i bez čije podrške i učešća, istraživanja ne bi mogla biti izvedena: Dr Nikoli Tošiću, Mast. inž. elektr. Bojanu Džoliću, Dr Dejanu Nikoliću, Dr Vladimiru Orliću i prof. Dr Nikoli Lekiću.

Želeo bih da napomenem da bez neverovatnog strpljenja moje porodice i njene žrtve, ova disertacija ne bi bila napisana.

*Posvećeno ćerkama Ružici i Juliji,  
supruzi Jadranki,  
roditeljima Nadici i Dimitriju*

**Naslov teze:** Sistem za nadgledanje pomorskog saobraćaja primenom mreže izahorizontskih radara

**Rezime** - Ova disertacija se bavi optimizacijom i prilagođenjem algoritama za praćenje ciljeva za potrebe ublažavanja uticaja štetnih refleksija na proces praćenja ciljeva kod izahorizontskih radara sa površinskim talasom (HFSW radari), upotrebljenih za osmatranje pomorskih ciljeva i konceptualizacijom i realizacijom sistema za integrisano pomorsko praćenje ciljeva baziranog na HFSWR mrežama.

Algoritamska optimizacija potiče iz osobina okruženja za praćenje ciljeva, što omogućava klasterizaciju, tj. grupisanje setova detekcija i tragova, uz nizak nivo korelacije između klastera, čime se daje mogućnost razvoju heurističkih metoda koje uprošćavaju primenu združenih asocijacija podataka kao izbora algoritma za praćenje. Drugi važan problem okruženja HFSW radara predstavljaju neželjeni jonosferski i povraćaji od agitovane površine mora, koji izazivaju veliki broj lažnih potvrđenih tragova. Ovi tragovi se ne mogu regulisati jednostavnim pravilima menadžmenta tragova i zahtevaju primenu drugih tehnika za ocenu pouzdanosti traga.

Uspostavljanje koncepta i dizajn mreža za praćenje pomorskih ciljeva omogućava uvid u brojne aspekte sistematskog pomorskog osmatranja. Uloga ovog sistema je, pored praćenja ciljeva, fuzije i integracije sa drugim mornaričkim sensorima, monitoring i kontrola softverskih procesa obrade podataka i sekundarnih senzora u HFSWR mreži.

Metode istraživanja u disertaciji se u teorijskom smislu zasnivaju na novijim rezultatima teorije i prakse praćenja pokretnih ciljeva sa aspekta primene na HFSW radarima. Za potrebe eksperimentalnih istraživanja i provere teorijskih koncepata koriste se podaci sa realnog sistema. Ulazne podatke predstavljaju setovi detekcija CFAR algoritma i AIS podaci sa zemaljskih i satelitskih izvora iz regiona osmatranja, kao jedini stvarni pokazatelj istinitog stanja na terenu.

Pokazano je na reprezentativnom uzorku da tragovi i merenja u okruženju HFSW radara formiraju dobro izolovane klustere, primenom metode grupisanja po gustini, gde je iskorišćeno Mahalanobis rastojanje između predikcije traga i merenja, kao kriterijum grupisanja. Dobro izolovani klasteri rešavaju se združenim metodama, gde je JPDA algoritam izabran kao preferentni metod. Raspodela veličina klastera je takva da postoji vrlo mali broj, do 2 % svih klastera u uzorcima po radaru, koji ne bi zadovoljio kriterijume izvršavanja u realnom vremenu, formirane po broju maksimalno mogućih događaja asocijacija. Za takve slučajeve koristi se izuzetno robustan Roekeroz algoritam. Na taj način, omogućena je približno optimalna dodela asocijacija traga i merenja u preko 95 % slučajeva kod potvrđenih tragova i obezbeđeno je izvršavanje u realnom vremenu na jednostavnom hardveru. Izvršena je analiza koja je potvrdila dobra lokalizaciona svojstva procedure praćenja, uz parametre odstupanja duboko unutar rezolucione ćelije radara.

Na osnovu definisanog parametra kvaliteta traga, pokazano je da potvrđeni tragovi pokriveni AIS podacima uzimaju visoke vrednosti maksimuma ovog parametra, a nešto niže pri većim uglovima i rastojanjima od radara, dok se velika većina lažnih tragova nalazi neposredno ispod njih, sa izrazitim nagomilavanjem oko glavne ose zračenja radara i najvišim vrednostima parametra pouzdanosti traga. Formulisan je kriterijum promocije tragova, a na osnovu tih istraživanja koncipiran je i metod za primenu modifikovanih IPDA algoritama, kao osnova za buduća unapređenja. Analiza performansi praćenja je vršena za uzorke u najgorim vremenskim uslovima, gde su poredjena poboljšanja generalnih i kratkoročnih performansi praćenja. Pokazan je veliki napredak u kratkoročnim performansama radara i veliki pad faktora lažnih alarma radara, od 2 do 8 puta u odnosu na početnu vrednost, na štetu prihvatljivog, malog smanjenja praćenja AIS meta, kao posledica primenjene metode.

U dizajnu HFSWR mreža primenjena je zvezdasta topologija mreže, čime se omogućuje agregacioni monitoring svih procesa iz jednog centralnog čvora, tipično smeštenog u komandnom centru sistema. Ovakva realizacija omogućava jednostavniju kontrolu i dostupnost mernih podataka u uslovima kakvi tipično vladaju na lokacijama instalacija senzora, kao što su loši komunikacioni i infrastrukturni uslovi. Omogućena je realizacija IoT koncepata u arhitekturi mreže i daljinski monitoring svih aspekata HFSWR mreže od strane proizvoljnog broja korisnika u privatnom okruženju. Na kraju disertacije pokazan je test mreže i prikazane su mogućnosti aplikacija iz aplikativnog sloja arhitekture sistema.

**Ključne reči:** izahorizontski radar, HFSWR, praćenje ciljeva izahorizontskim radarima, grupisanje podataka po gustini, eliminacija lažnih ciljeva, HFSWR mreža, jedinstvena operaciona slika

**Naučna oblast:** Elektrotehnika

**Uža naučna oblast:** Upravljanje sistemima i obrada signala

**UDK broj:** 621.3

**Dissertation title:** System for surveillance of maritime traffic using a network of over-the-horizon radars

**Summary** - This dissertation deals with the optimization and adaptation of target tracking algorithms to mitigate the impact of harmful reflections on the target tracking process in over-the-horizon high frequency surface wave radar (HFSW radar), used to observe maritime targets and conceptualize and implement an integrated maritime surveillance system based on HFSWR networks.

Algorithmic optimization comes from the properties of the tracking environment, which allows clustering, i.e. grouping of detection and track sets, with a low level of correlation between clusters, which allows the development of heuristic methods that simplify the application of joint data association as a choice of tracking algorithm. Another important problem of the HFSW radar environment is unwanted ionospheric and agitated sea surface returns (clutter), which causes a large number of false confirmed tracks. These tracks cannot be regulated by simple track management rules and require the application of other techniques for assessment of the reliability of the tracks.

Establishing the concept and design of networks for monitoring maritime targets provides insight into numerous aspects of systematic maritime surveillance. The role of this system is, in addition to monitoring targets, fusion and integration with other naval sensors, monitoring and control of software processes of data processing and secondary sensors in the HFSWR network.

The research methods in the dissertation are theoretically based on the recent results of the theory and practice of target tracking from the aspect of application on HFSW radars. For the needs of experimental research and verification of theoretical concepts, data from a real system are used. The input data are CFAR algorithm detection sets and AIS data from terrestrial and satellite sources from the observation region, as the only real indicator of the true state of the field.

It was shown in a representative sample that tracks and measurements in the HFSW radar environment form well-isolated clusters, using the density-based clustering method, where the Mahalanobis distance between track prediction and measurement was used as a grouping criterion. Well-isolated clusters are solved by joint methods, where the JPDA algorithm is chosen as the preferred method. The distribution of cluster sizes is such that there is a very small number, up to 2% of all clusters in the samples per radar, which would not meet the real-time execution criteria, formed by the number of maximum possible association events. For such cases, an extremely robust Roeker algorithm is used. In this way, approximately optimal assignment of trace and measurement associations is enabled in over 95% of cases with confirmed tracks, and real-time execution on simple hardware is ensured. An analysis was performed that confirmed the good localization



properties of the monitoring procedure, with deviation parameters deep within the radar resolution cell.

Based on the defined track quality parameter, it is shown that confirmed tracks covered by AIS data take high values of the maximum of this parameter, and slightly lower at higher angles and distances from radar, while the vast majority of false tracks are located just below them, with pronounced accumulation around the main radiation axis of the radar and the highest values of the track quality parameter. Track promotion criteria were formulated and, on the basis of these researches, a method for the application of modified IPDA algorithms was conceived, as a basis for future improvements. Analysis of monitoring performance was performed for samples in the worst weather conditions, where improvements in general and short-term monitoring performance were compared. There has been a large improvement in short-term radar performance and a large drop in the false alarm radar factor, from 2 to 8 times the initial value, to the detriment of an acceptable, small reduction in AIS target tracking, as a consequence of the applied method.

In the design of HFSWR networks, a star network topology is applied, which enables aggregation monitoring of all processes from one central node, typically located in the command center of the system. This implementation enables simpler control and availability of measurement data in conditions that typically prevail at sensor installation locations, such as poor communication and infrastructure conditions. The realization of IoT concepts in the network architecture and remote monitoring of all aspects of the HFSWR network by any number of users in a private environment is enabled. At the end of the dissertation, a network test is shown and the possibilities of applications from the application layer of the system architecture are presented.

**Keywords:** Over-the-horizon radar, HFSWR, target tracking with over-the-horizon radars, density based clustering, elimination of false targets, HFSWR network, unique operational picture

**Scientific area:** Electrical Engineering

**Scientific subarea:** System Control and Signal Processing

**UDK code:** 621.3

# Sadržaj

1	Uvod.....	1
1.1	Formulacija problema, motivacija i ciljevi disertacije.....	2
1.2	Organizacija disertacije.....	5
2	HFSW radar kao senzor i specifičnosti praćenja pomorskih ciljeva HFSW radarima.....	7
2.1	HFSW radar kao senzor.....	7
2.1.1	Princip rada HFSWR i obrada radarskih podataka.....	10
2.1.2	Izlaz obrade senzorskih podataka HFSW radara.....	12
2.2	AIS kao senzor.....	13
2.3	Specifičnosti praćenja ciljeva u okruženju HFSW radara.....	15
2.3.1	Morski klater kod HFSW radara.....	15
2.3.2	Radarska krossekcija i njen uticaj na proces praćenja ciljeva.....	26
2.3.3	Jonosferski klater u okruženju HFSW radara.....	28
2.4	Metodologija ocene performansi procedura praćenja ciljeva.....	30
2.5	Integrirano osmatranje mora primenom HFSWR mreža.....	33
3	Heurističke metode za praćenje ciljeva u okruženju izahorizontskih radara.....	49
3.1	O izboru MTT procedure.....	49
3.2	Procedura praćenja ciljeva.....	50
3.2.1	Estimator gustine klatera.....	51
3.2.2	Modelovanje kretanja ciljeva.....	51
3.2.3	Procedura za asocijaciju podataka.....	55
3.2.4	Pravila menadžmenta tragova.....	59
3.3	Eksperimentalni rezultati.....	60
3.3.1	Statistička analiza i analiza performansi.....	61
3.3.2	Ispitivanje rezultata rada heurističke procedure praćenja u terenskim uslovima.....	66
4	Redukcija lažnih tragova u algoritmima praćenja u okruženju izahorizontskih radara.....	70
4.1	Uslovi praćenja ciljeva u slučajevima nepovoljnih vremenskih prilika.....	70
4.2	Dizajn procedure za eliminaciju lažnih tragova uzrokovanih nepovoljnim vremenskim uslovima.....	72
4.2.1	Primena pouzdanosti traga i postojećih sekvencijalnih tehnika promocije traga u praćenju ciljeva.....	73
4.2.2	Dizajn metode za potvrdu i brisanje tragova zasnovane na najjačem susedu.....	74
4.3	Razmatranja primene integrativnog pristupa u praćenju ciljeva u okruženju izahorizontskih radara.....	78
4.3.1	IPDA VMC algoritam.....	79
4.3.2	Razmatranja dizajna koeficijenta modela egzistencije traga i graničnih vrednosti.....	81
4.3.3	MTT pristup sa redukovanom kompleksnošću algoritma.....	82
4.4	Eksperimentalni rezultati.....	83
4.4.1	Merenje poboljšanja trenutnih performansi procedure praćenja.....	84
4.4.2	Merenje poboljšanja generalnih performansi procedure praćenja.....	89
5	Dizajn sistema za praćenje pomorskih ciljeva.....	91
5.1	Koncept sistema za praćenje ciljeva baziranom na HFSWR mrežama.....	91
5.1.1	Topologija HFSWR mreža.....	92
5.1.2	Detalji IoT arhitekture HFSWR mreža.....	94
5.1.3	Distribuirani midlver.....	96
5.2	Implementacija softverske infrastrukture IoT arhitekture sistema.....	98
5.3	Struktura softvera za osmatranje i monitoring stanja mreže.....	101
5.3.1	LDI modul.....	101
5.3.2	Centralni proces.....	102
5.3.3	Pregled mernih i kontrolnih tačaka i izgradnje alarmnog sistema.....	104
5.4	Demonstracija rada sistema za praćenje pomorskih ciljeva.....	106
5.4.1	Demonstracija funkcionalnosti SNMP interfejsa eksternom NMS aplikacijom.....	106
5.4.2	Demonstracija procesa osmatranja i monitoringa stanja sistema.....	107
6	Zaključak.....	112
7	Literatura.....	119

# 1 Uvod

Monitoring pomorskog saobraćaja udaljenih morskih površina, koji predstavlja, može se reći, egzistencijalnu potrebu mnogih pomorskih nacija, efikasno se može vršiti primenom izahorizontskih radara (engl. *Over-The-Horizon Radar* - OTHR) u HF (engl. *High Frequency* - HF) opsegu. U ove svrhe najviše se koriste OTH radari sa propagacijom elektromagnetnih talasa preko jonosferskih slojeva [1], kao i OTH radari bazirani na propagaciji površinskih elektromagnetnih talasa. OTH radari koji koriste jonosfersku refleksiju imaju mogućnost dometa i do nekoliko hiljada kilometara, ali takođe imaju mogućnost pojava slepih zona u svojoj oblasti pokrivanja. Sa druge strane, OTH radari bazirani na propagaciji površinskih talasa praktično nemaju mogućnost pojave slepih zona, a poseduju mogućnost velikog dometa, od nekoliko stotina kilometara, dovoljnim da se njihovom primenom pokriju morske površine od posebnog ekonomskog i odbrambenog interesa. Upravo zbog tih osobina ovi radari danas imaju široku primenu, a predstavljaće i senzore kojima se bavi i ova disertacija. Na dalje, pod pojmom izahorizontskih radara smatraće se kratkotalasni radari u HF opsegu sa površinskim talasom, ili skraćeno, HFSW radari (engl. *High Frequency Surface Wave Radar* - HFSWR).

Produkt primarne obrade podataka HFSW radara predstavljaju detekcije potencijalnih meta, kao izlaz CFAR algoritma (engl. *Constant False Alarm Rate* - CFAR)[2]. Za HFSWR su razvijene posebne verzije ovih algoritama, na primer [3] i [4]. Set detekcija predstavlja ulazni set podataka za proceduru praćenja ciljeva. Ovaj ulazni set poseduje izuzetno visok nivo lažnih alarma, čije je poreklo od štetnih refleksija radarskih emisija od morske površine i jonosferskih slojeva. HFSWR radari se primenjuju u grupama, formirajući mreže, pri čemu se oblasti pokrivanja senzora u određenoj meri poklapaju, pa je potrebno izvršiti fuziju podataka [5][6]. Za potrebe identifikacije plovila, HFSWR podacima se pridružuju AIS (engl. *Automated Identification System* - AIS) [7], koje je potrebno integrirati posebnim algoritmom [8][9].

Primenjeni senzori i pomenuti postupci predstavljaju elemente koncepta integrisanog pomorskog nadgledanja (engl. *Integrated Maritime Surveillance* - IMS) [10], baziranog na HFSW radarima. IMS koncept baziran na HFSWR mrežama predstavljen je prvi put u [11] i [12]. U skladu sa ovim konceptom, postavlja se koncept softverskog okruženja za nadzora rada HFSWR mreže i njegova realizacija, što predstavlja predmet istraživanja disertacije u širem smislu. HFSWR senzor je senzor čije performanse veoma zavise od meteoroloških uslova na terenu. Važnost poznavanja fenomena koji prate radarska merenja direktno će uticati na kvalitet realizacije algoritama za

praćenje ciljeva, a samim tim i na kvalitet celog sistema, pa je potrebno algoritme za praćenje ciljeva prilagoditi realnim uslovima rada. Ti postupci predstavljaju predmet izučavanja ove disertacije u užem smislu.

## 1. 1 Formulacija problema, motivacija i ciljevi disertacije

Prva grupa ciljeva istraživanja odnosi se na optimizaciju i prilagođenje algoritama za praćenje za potrebe eliminacije uticaja štetnih refleksija kod HFSWR. Dosadašnja eminentna istraživanja praćenja ciljeva HFSW radarima data u [13] i [14] ukazuju na upotrebu zastarelih tehnika praćenja, baziranih na estimatorima kao što su  $\alpha - \beta$  filtri [15], koji imaju inferiorne performanse u odnosu na, na primer, UKF (engl. *Unscented Kalman Filter* - UKF)[16] ili čestične filtre (engl. *Particle Filter* - PF)[17]. Sa druge strane, upotrebljena UKF-JPDA [18] šema u [14] i [19] poseduje pre svega, inherentan problem upotrebljivosti u realnom vremenu, kao posledica izuzetne kompleksnosti JPDA algoritma u slučajevima veće gustine potencijalnih meta ili lažnih alarma. Zbog ovih nedostataka, postoji potreba za nalaženjem sveobuhvatnijeg rešenja za praćenje ciljeva kod HFSW radara, koje bi uvažilo i osobenosti okruženja, pored toga što bi imalo i praktičnu dimenziju. Proučavanjem statističkih osobina raspodele detekcija radara u prostoru i poznavanjem osobina praćenja plovila na otvorenom moru, moguće je definisati heurističke metode koje mogu dramatično ubrzati izvršavanje algoritama za praćenje, naročito onih koji se zasnivaju na združenoj asocijaciji podataka, kao što je JPDA. Specifičnosti praćenja ciljeva kod OTHR, kao što su iščezavanje meta (engl. *fading*) i potreba za boljom kontrolom parametra kvaliteta traga [15], nameću i prilagođenje procedura menadžmenta traga, koje nisu rešene na zadovoljavajući način u [19]. Pokušaj pristupa ovom problemu preko IPDA algoritma [20] i modifikovanih skrivenih Markovljevih lanaca [21], učinjen je u [22]. Izvedena poboljšanja procedure praćenja za HFSW radare u disertaciji zasnivaju se na pretpostavkama da postoji realna disperzija meta u pomorskom okruženju usled velike površine pokrivanja radara, taktičkih razloga i karakteristika pomorskog saobraćaja na otvorenom moru. OTHR ima relativno malu prostornu rezoluciju kao ograničavajući faktor i ne koristi se za osmatranje veoma gustog pomorskog saobraćaja, na primer, ispred velikih luka. Iz načina upotrebe senzora moguća je klasterizacija, tj. grupisanje setova detekcija i tragova po određenom kriterijumu, uz nizak nivo korelacije između klastera, čak i u prisustvu velike gustine klatera, tj. lažnih alarma. Uz pretpostavku zanemarivanja ove korelacije, mogu se razviti približno optimalne heurističke metode koje uprošćavaju primenu združenih asocijacija podataka kao izbora algoritma za praćenje i koje lako postižu kriterijume izvršavanja u realnom vremenu.

Drugi važan problem okruženja HFSW radara predstavljaju meteorološki faktori i fizički faktori sredine kroz koju propagiraju emitovani elektromagnetni talasi. Pre svega, pretnju uspešnom

praćenju ciljeva predstavljaju neželjeni jonosferski i povraćaji od agitovane površine mora [23]. Poremećaji nastali usled oluja ili fenomena kao što je meteo-cunami [24] izazivaju veliki broj lažnih potvrđenih tragova, koji ugrožavaju, ako ne i onesposobljavaju, proces praćenja ciljeva u toku svog trajanja. Pod pretpostavkom da ovi lažni tragovi, bez obzira na poreklo, imaju nešto niže pokazatelje kvaliteta traga u odnosu na prave mete, moguće je kreirati proceduru koja bi sprečila konfirmaciju lažnih tragova ili njihovu brzu eliminaciju u slučaju pogrešne odluke o potvrđivanju postojanja mete. Oslanjajući se upravo na ova istraživanja, biće koncipirana i metodologija kojom se, primenom varijanti IPDA algoritma, afirmiše upotreba verovatnoće postojanja cilja, kao kriterijuma za eliminaciju lažnih tragova, izlažu se razmatranja vezana za način izbora parametara algoritama, kao i upotreba algoritama sa linearnom kompleksnošću, baziranih na IPDA, u cilju redukcije računске kompleksnosti procedura praćenja u okruženju izahorizontskih radara.

Primenom procedure za sprečavanje konfirmacije lažnih tragova podižu se generalne performanse praćenja radara, ali i one kratkoročne, čime se postiže sveukupna upotrebna vrednost senzora, koji ima očuvane mogućnosti praćenja ciljeva u svim vremenskim prilikama i pri najvećim jonosferskim povraćajima. U dostupnim naučnim radovima [14], [25] i [26] data su, na primer, merenja generalnih performansi praćenja, na kojima se ne mogu uočiti kratkotrajni poremećaji u ovom procesu, niti su oni razmatrani kao posebna pojava. Cilj ovih istraživanja bio je dokaz upotrebljivosti HFSW radara male snage za praćenje ciljeva. U drugim istraživanjima [27] i [28] proučavan je uticaj loših vremenskih uslova na praćenje meta, ali se nije bavilo količinom i eliminacijom lažnih tragova. Dodatni problem u većini dostupnih istraživanja predstavlja i činjenica da su korišćeni senzori relativno malog dometa, pa se neke pojave, kao što su jonosferski povraćaji i udaljene oluje na pučini, ne mogu ni ispoljiti u vidu lažnih tragova u takvim uslovima. S obzirom na domet korišćenih senzora u praktičnim eksperimentima u ovoj disertaciji, ovi fenomeni postaju dominantna smetnja u svakodnevnom radu. Zbog toga je ublažavanje pojave lažnih tragova i ispitivanje generalnih i trenutnih performansi radara u najgorim mogućim uslovima važan deo prve grupe ciljeva ove disertacije, kojom se pokušava napraviti i dopuna dosadašnjih istraživanja drugih autora.

Druga važna grupa ciljeva disertacije odnosi se na konceptualizaciju i realizaciju sistema za praćenje ciljeva baziranog na HFSWR mrežama. Uspostavljanje koncepta i sistemski dizajn ovakvog sistema omogućava uvid u brojne aspekte sistematskog pomorskog osmatranja primenom HFSWR mreža. Kao što je već napomenuto, uloga ovog sistema je, pored praćenja ciljeva, fuzije i integracije sa drugim mornaričkim sensorima, monitoring i kontrola softverskih procesa obrade podataka i sekundarnih senzora u HFSWR mreži. IMS sistemi koji deluju u uslovima otežanih komunikacionih uslova tipično poseduju zvezdastu topologiju, kao optimalno rešenje u skladu sa

ovim uslovima rada, pri čemu je kontrola i monitoring najvećeg dela ili celog sistema u centralnom čvorištu. Specifičnosti topologije drastično utiču na postavljanje koncepta softverskog sistema za monitoring HFSWR mreže, tako što mogu da pojednostave softverski dizajn i omogućavaju komunikaciju sa malim brojem posrednika, tj. agenata u srednjem softverskom sloju (engl. *middleware*)[29]. Pored toga, monitoring i kontrolu senzora moguće je koncipirati koristeći IoT (engl. *Internet of Things* - IoT) [30] principe dizajna, pogotovo servisno orijentisanu arhitekturu (engl. *Service Oriented Architecture* - SOA)[31], čime se kreira rešenje softverskog sistema instalirano na privatnom klauđu (engl. *private cloud*), dostupno krajnjem korisniku sistema putem interneta, uz odgovarajuće kredencijale. Važno je napomenuti da se pod IoT pristupom dizajnu ovog sistema smatra udaljeni pristup i kontrola svih dostupnih primarnih i sekundarnih senzora mreže, kroz konverziju njihovih interfejsa, omogućavanjem unifikovanog načina pristupa, a zatim i diverzifikacijom načina pristupa, na primer, istovremeno omogućavajući Web-servisni i pristup preko SNMP protokola. Dalje, to podrazumeva i definisanje IoT arhitekture sistema i njene softverske realizacije, kako na serverskoj strani, tako i na klijentskoj strani, kroz softverske alate iz aplikativnog sloja arhitekture sistema. Dostupnih istraživanja u ovoj oblasti je veoma malo jer je i mali broj instaliranih HFSWR mreža u svetu, koje su uglavnom zatvorenog tipa zbog svoje specijalne namene. Pored toga, izloženi koncepti [12],[32] i [33] uglavnom su opšti ili su detalji nedostupni, pa tu leži i motivacija, s obzirom na rastući značaj teme nadgledanja mora, za bavljenjem ovom temom.

Metode istraživanja u disertaciji se u teorijskom smislu zasnivaju na novijim rezultatima teorije i prakse praćenja pokretnih ciljeva sa aspekta primene u okviru OTHR sistema, imajući u vidu da je mali broj naučnih radova posvećen ovoj problematici. Zbog toga je potrebno šire teorijsko sagledavanje ovih metoda, koje uključuje i njihova proveru kroz simulacioni pristup. Rezultati pojedinačnih simulacija nisu uključeni u disertaciju, radi održanja njene kompaktnosti. Naglasak se stavlja, pre svega, na verifikaciju istraživanja u praksi, kroz eksperimentalni rad, s obzirom da je, na zadovoljstvo autora, postojala mogućnost za direktnu i praktičnu proveru svih rezultata. Za potrebe tih eksperimentalnih istraživanja i provere teorijskih koncepata koriste se podaci sa HFSWR mreže, sistema instaliranog u Gvinejskom zalivu u Africi, koji je izveo Institut Vlatkom iz Beograda. Ulazne podatke predstavljaju setovi detekcija CFAR algoritma i AIS podaci sa zemaljskih i satelitskih izvora iz regiona osmatranja. Ovi podaci se koriste za eksperimentalnu, statističku proveru i potvrdu rezultata, gde AIS podaci predstavljaju referencu za poređenje, kao jedini stvarni pokazatelj istinitog stanja na terenu. Podaci se uzimaju u velikim vremenskim intervalima, radi potvrde polaznih hipoteza.

Naučni doprinos ove disertacije će biti ostvaren u vidu opisanih istraživanja, od kojih su neka već objavljena u međunarodnim časopisima i konferencijama [46][75][86][100]. Istraživanja osobina

asocijacija tragova i merenja omogućice konstrukciju metoda za praćenje ciljeva koje će na približno optimalan način rešavati problem praćenja ciljeva, uz očuvanje mogućnosti izvršenja u realnom vremenu. Istraživanje i rešavanje problema lažnih tragova u složenim meteorološkim uslovima predstavljaće originalni naučni doprinos, od koga se očekuje drastično poboljšanje sveukupnih performansi HFSW radara i očuvanu upotrebljivost senzora u svim uslovima rada, a koncipirani metod rešavanja problema praćenja i lažnih tragova preko modifikacija IPDA predstavljaće osnovu za dalja unapređenja procesa praćenja u okruženju HFSW radara. Biće predložen koncept IoT arhitekture HFSWR mreža i detalji realizacije, kao jedan od doprinosa disertacije. Softverska realizacija sistema za osmatranje takođe predstavlja doprinos ove disertacije, bez koga, po mišljenju autora, ostali rezultati ne bi bili potpuni. Na osnovu svega navedenog, očekuje se realan doprinos disertacije sveopštem unapređenju postojećih IMS sistema baziranih na HFSWR mrežama, pogotovo u domenu pouzdanosti praćenja ciljeva, povećanoj upotrebnoj vrednosti i sistemskom dizajnu ovih mreža.

## 1.2 Organizacija disertacije

Disertacija se sastoji od 7 poglavlja, pri čemu uvod predstavlja prvo poglavlje. U drugoj glavi predstavlja se HFSWR mreža koja je instalirana u Africi za osmatranje Gvinejskog zaliva i način upotrebe HFSW radara i AIS, kao senzora u okvirima disertacije. Zatim se opisuju specifičnosti okruženja za praćenje ciljeva, vezanog za primenu ovih senzora, u okviru kojih se govori o tipovima najvećih smetnji algoritmima praćenja ciljeva. Nakon iznošenja tehničkih detalja, uvođenja terminologije i specifikacije senzora, opisuje se metodologija istraživanja u okviru disertacije i definiše metrika pomoću koje će biti vršeno merenje performansi primenjenih rešenja. Na kraju se vrši pregled postojećih sistema za nadgledanje pomorskog saobraćaja i njihovih rezultata. Svrha ove glave je pre svega, pregledna, sa ciljem da se uspostavi okvir koji je potreban za prikaz rezultata u disertaciji, u oblasti koja je izuzetno obimna i složena.

U trećoj glavi se predstavlja algoritam za praćenje ciljeva HFSW radarima, zasnovan na specifičnostima okruženja, na osnovu kojih su kreirane heurističke metode na bazi klasterizacije podataka pomoću kojih je omogućeno optimalno izvršavanje u realnom vremenu, uz očuvanje približno optimalnih vrednosti asocijacija u ogromnoj većini slučajeva.

Tema četvrte glave su metode za ublažavanje pojave lažnih tragova i poboljšanje sveukupnih performansi HFSW radara, kao senzora za praćenje pomorskih ciljeva. Pri tome se posmatraju zabeleženi slučajevi u kojima je praćenje ciljeva izuzetno otežano u pojedinim zonama pokrivanja radara. U okviru ove glave biće koncipirana i metoda za primenu IPDA algoritama, prilagođena okruženju izahorizontskih radara.

Peto poglavlje se bavi sistemskim dizajnom i implementacijom mreža HFSW radara, koje, pored primarnih senzora, obuhvata i sekundarne senzore za kontrolu i monitoring stanja same mreže. Definišu se pojmovi u topologiji HFSWR mreža i osnovni elementi implementirane IoT arhitekture, uz demonstraciju rada softverskih komponenti za monitoring stanja mreže i praćenje ciljeva.

Na kraju, u poglavlju br. 6 izložen je zaključak disertacije, u kome su istaknuti njeni doprinosi i pravci daljeg istraživanja. Poglavlje 7 predstavlja spisak korišćene literature.



## 2 HFSW radar kao senzor i specifičnosti praćenja pomorskih ciljeva HFSW radarima

Ovo poglavlje je, pre svega, preglednog karaktera i svrha mu je da predstavi elementaran okvir u kome se HFSW radari koriste za osmatranje pomorskog saobraćaja, predstavi specifičnosti okruženja koje imaju uticaj na proces praćenja ciljeva upotrebom ovih senzora i specificira metodologija kojom su vršena istraživanja u ovoj disertaciji. Na početku potrebno je napomenuti zašto se HFSW radar uopšte koristi u oblasti regulisanja pomorskog saobraćaja i na koji način se mreže ovih senzora upotrebljavaju. Pri tome, biće predstavljena i već implementirana mreža ovih senzora, pomoću koje je vršeno istraživanje u ovoj disertaciji. Zatim, biće izložen princip rada HFSW radara i osnovi procesiranja radarskih podataka. Daju se, takođe, osnovni podaci o AIS senzorima, koji imaju važnu ulogu u validaciji rezultata, kao jedina istinita referenca na terenu. Nakon toga, predstavljene su specifičnosti okruženja, koje čine praćenje ciljeva HFSW radarima izuzetno kompleksnim zadatkom. HFSWR je pogođen velikim brojem izvora eksternog šuma, ali najveću opasnost po njegove performanse predstavljaju nepoželjni povraćaji signala (klater), koji potiču od jonosferskih slojeva i agitacije morske površine meteorološkim faktorima.

Nakon upoznavanja sa senzorima, osnovnim pojmovima i fenomenima, objašnjena je metodologija kojom su vršena istraživanja. Definisana je metrika koja služi za ocenu performansi algoritama praćenja ciljeva i način prikupljanja podataka.

Sa sistemske tačke gledišta, grupe ovih senzora su obično u sprezi sa senzorima slične namene, ukomponovani u IMS koncept [10]. Mreže HFSW radara kao deo ovog koncepta su još uvek redak slučaj u svetu, pa je izvršen pregled postojećih rešenja i koncepata, pri čemu je akcenat stavljen i na ostvarene rezultate praćenja ciljeva, u kojima se ukazuje na slabosti i ograničenosti postojećih rešenja i realne probleme sa kojima su analize performansi praćenja suočene, kakvi su, na primer, brojni tzv. nekooperativni ciljevi, koji ne poseduju ili ne uključuju AIS transpondere u svom saobraćaju.

### 2.1 HFSW radar kao senzor

HFSWR kao senzor je multinamenski uređaj koji ima primenu u detekciji pomorskih plovila, praćenju morskih struja i okeanografskim istraživanjima i detekciji pojava cunamija. Njegova komercijalna najveća vrednost je upravo u kontroli morskih resursa, kojima raspolazu pomorske nacije, preko dodeljenih morskih zona sa pravom eksploatacije, tzv. ekskluzivnih ekonomskih zona.

Prema konvenciji Ujedinjenih Nacija, ekskluzivna ekonomska zona (EEZ) [34] je zona određene širine koja se proteže od teritorijalnih voda države u pravcu otvorenog mora, sve do 200 nautičkih milja (370 km), u kojima države poseduju ekskluzivna prava eksploatacije bioloških i mineralnih resursa mora. Sa ovim dolazi i velika odgovornost za efikasnu kontrolu ove zone, koja predstavlja veliki tehnološki, finansijski i organizacioni izazov. Jedno od rešenja monitoringa EEZ je mreža HFSW radara [1]. Pogodnosti ovog pristupa opisane su u [11][12], ali postoje brojna otvorena pitanja koja su kritična za uspešnu implementaciju ovih sistema, o kojima će kasnije biti više reči. Jedna HFSWR mreža instalirana je od strane instituta Vlatacom [35] u Gvinejskom zalivu, u Nigeriji, u okviru projekata br. 89.0 i 89.1. Primarna uloga u osmatranju mora pripada HFSW radarima, a trenutno su operativna 2 radara, čije su lokacije i oblast pokrivanja prikazani na slici (2.1). Radari su označeni sa identifikatorima 0 i 1, prema istoj slici i te oznake će se koristiti u disertaciji.

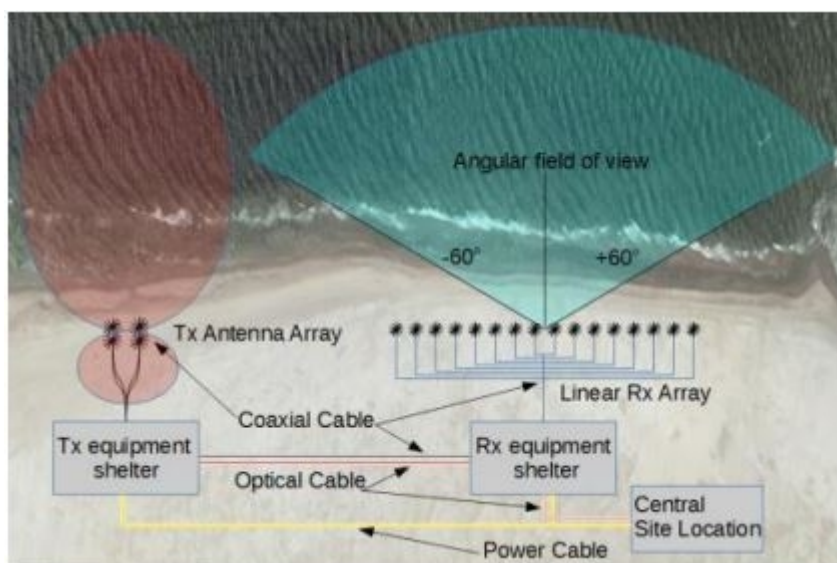


Slika 2.1. Pozicije, označavanje i oblast pokrivanja HFSW radara mreže u Gvinejskom zalivu

Instalirani radari imaju nominalni domet od 80 nm (oko 150 km) tokom noći i pri relativno mirnom moru, za manja plovila. Za veća plovila i tokom dana, domet radara se povećava do 125 nm (približno 230 km). Više detalja o istraživanjima u vezi zavisnosti dometa radara od veličine plovila, doba dana i meteoroloških uslova može se pronaći u [1].

Struktura HFSWR radarskog položaja slična je strukturi drugih tipova radara [36]. Sastoji se od predajnog i prijemnog dela, na kojima su locirani antenski nizovi, prema slici (2.2). Pored ovih najvažnijih elemenata, radarski položaj može imati i centralnu tačku položaja, koja obezbeđuje napajanje i konekciju prema drugim komunikacionim centrima. Izabrana geometrija položaja i radna frekvencija radara  $f_c$  definišu oblast pokrivanja radara i veličinu oblata potrebnu za instalaciju položaja. Oblast pokrivanja radara tipično se određuje u odnosu na centralnu osu zračenja, upravnu na osu prijemnog antenskog niza (*Main Radiation Axis* - MRA), pri čemu se oblast pokrivanja definiše najčešće u rasponu  $\pm 60^\circ$  u odnosu na položaj MRA ose, koji je određen kursom u odnosu na geografski sever  $\theta_{A,MRA}$  i koordinatama prve antene u prijemnom antenskom nizu. Prostor

potreban za zauzeće radarskog položaja biće demonstriran primerom, datim u [36]. Neka je dat sistem sa  $f_c=4.6$  MHz (talasna dužina  $\lambda \approx 65$  m) i linearnim antenskim nizom. On će imati maksimalni domet oko 370 km, ali će zahtevati veliku površinu za instalaciju antenskog niza. Rastojanje ( $d$ ) između antena prijemnog niza bira se tako da bude zadovoljeno  $d < 0.5 \lambda$ , kako bi se sprečila fazna neodređenost u procesu bimforminga [37], a tipično se bira tako da bude zadovoljena relacija  $d = 0.45 \lambda$  (u ovom slučaju,  $d \approx 29.2$  m). Za prijemni linearni antenski niz od 16 antena potrebno je, dakle, oko 450 m zaravljene površine. Zatim, da bi se sprečila međusobna interferencija između prijemnog i predajnog niza potrebno je obezbediti barem  $10\lambda$  razmak između najbližih susednih antena dva položaja. Zajedno sa predajnim nizom, sveukupno, potrebno je skoro 1.5 km dužine i skoro 100 m širine zaravljene površi na obali mora za optimalnu instalaciju jednog HFSWR položaja, što govori o obimnosti projekta instalacije jednog HFSWR senzora. Više detalja o konstrukciji HFSWR položaja i upotrebljenim antenskim elementima i merenjima može se naći u [36] i [38].



Slika 2.2. Tipična struktura položaja HFSW radara [36]

Na slici (2.3) prikazan je izgled instalacije HFSWR položaja. Na levom delu slike je predajni niz, a na desnom prijemni, pri čemu je lokacija predajnog niza dodatno obeležena. Pored osnovnih elemenata radarskog položaja, uočavaju se i instalacije drugih senzora - na slici je prikazan i toranj na kome je instalirana elektro-optička oprema za osmatranje mora i mikrotalasni radar.



Slika 2.3. Rx i Tx antenski niz položaja HFSW radara [36]

### 2. 1. 1 Princip rada HFSWR i obrada radarskih podataka

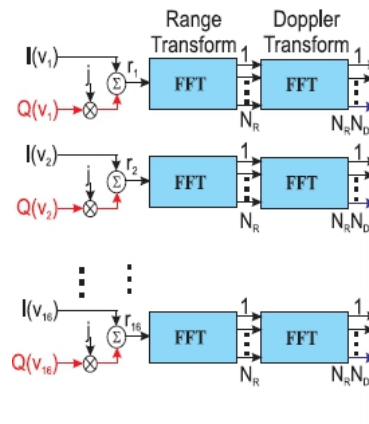
Princip rada HFSWR upotrebljenog u predstavljenom sistemu za osmatranje zasnovan je na površinskoj propagaciji FMCW (engl. *Frequency Modulated Continuous Wave*) signala sa transmisionog položaja i prijemu i obradi povraćaja opisanog u [23]. Osnovi rada HFSWR su generalno isuviše opširna tema za disertaciju i mogu se pronaći u [1]. Detalji o hardveru HFSW radara u predstavljenom sistemu, blok šema i osnove obrade radarskih signala predstavljeni su u [39], a opis obrade radarskih signala u sistemu dat je u [40] i [36], pa će se na ovom mestu izvršiti neophodna rekapitulacija zbog pojmova koji će se koristiti u drugom delu disertacije.

Prvi ciklus obrade primljenog signala zasniva se na kvadraturnoj analognoj demodulaciji tj. dečirpovanju i analogno-digitalnoj konverziji, sa ciljem dobijanja rastojanje-dopler mapa (engl. *Range-Doppler* - RD) za svaki prijemni (Rx) kanal. Proces formiranja RD spektra radarskog eha je dat na slici (2.4) i predstavlja skup FFT operacija i operacija preslaganja rezultatnih spektralnih odbiraka, nad kompleksnim odbircima  $N_A$  demoduliranih antenskih signala  $[IQ(V_i)]$ ,  $i = 1..N_A$ . Nad kompleksnim odborcima u toku trajanja jednog FMCW čirpa, izračunava se spektar u onim tačkama koje predstavljaju ćelije po rastojanju [41]. Ukoliko je predviđeno  $N_R$  ćelija po rastojanju, ukupno se izračunava  $N_R$  spektralnih odbiraka za jedan čirp trajanja  $T_{CH}$ . Ovi spektralni odbirci se sakupljaju u matricu odziva po rastojanju po redovima i kada se sakupi  $N_{CH}$  odziva (za isto toliko emitovanih čirp sekvenci), matrica se izčitava po kolonama, a na takve sekvence se primenjuje nova FFT transformacije u  $N_D$  tačaka. Novodobijena sekvenca predstavlja Doplerov spektar ulaznog demodulisanog antenskog signala za rezolucionu ćeliju  $i$ , tj. za  $i$ -tu kolonu matrice odziva po

rastojanju. Skup svih sekvenci Doplerovog spektra, sortiranog po svim rezolucionim ćelijama predstavlja RD mapu ulaznog demodulisanog signala. Proizvod vremena trajanja FMCW čirpa i broja zahvaćenih čirpova u ovom procesu predstavlja koherentno vreme integracije HFSW radara, tj. vreme skeniranja:

$$T_{CIT} = T_{CH} N_{CH} \quad (2.1)$$

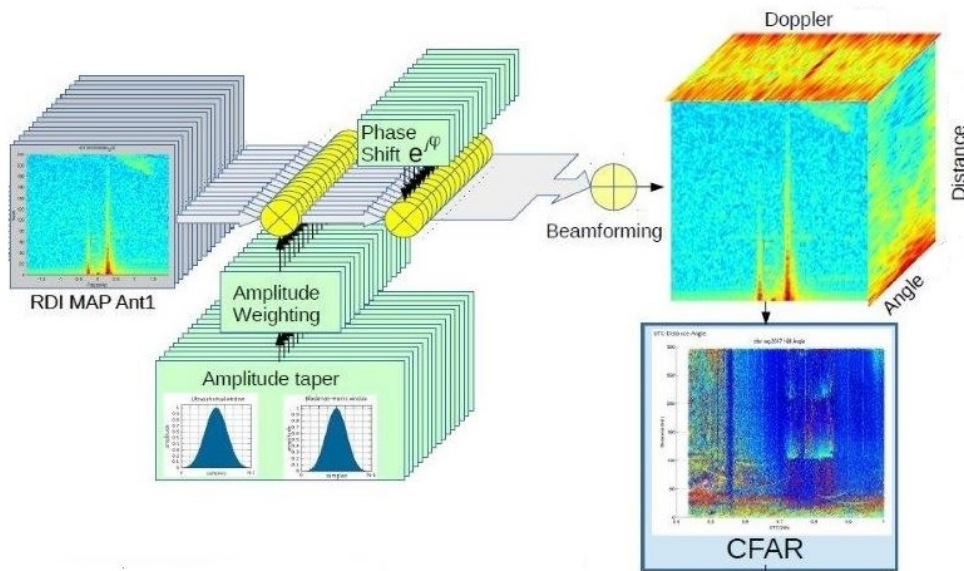
Za upotrebljene radare u Gvinejskom zalivu važe podaci:  $T_{CH} = 0.260028$  s,  $N_{CH} = 128$ , pa je vreme skeniranja radara  $T_{CIT} = 33.28$  s.



Slika 2.4. Operacije formiranja RD spektra demodulisanog antenskog signala

Rezultat prethodnih operacija su RD mape za  $N_A$  antenskih ulaza prijemnika radara, koje predstavljaju ulazni set za proces formiranja snopa sa faznim pomerajem (engl. *phase shifting beamformer*) [42] sa korakom promene po azimutu od  $1^\circ$ , tipično u opsegu  $\pm 60^\circ$  u odnosu na MRA osu antenskog niza. Izlaz procesa formiranja snopa predstavlja za svaku vrednost ugla se smešta u trodimenzionu matricu, tzv. RDA kocku (*Range-Doppler-Azimuth* - RDA). Opisani proces prikazan je na slici (2.5).

RDA kocka predstavlja ulaz CFAR algoritma [2], prilikom čijeg izvršavanja se dobija izlaz obrade radarskih podataka u vidu seta potencijalnih detekcija. Opis korišćenog CFAR algoritma dat je u [40] i [36].



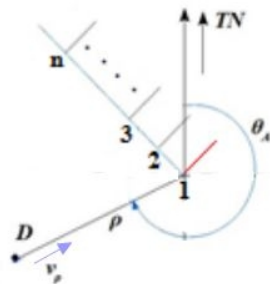
Slika 2.5. Blok šema procesa obrade RD mapa antenskih ulaza HFSW radara

### 2. 1. 2 Izlaz obrade senzorskih podataka HFSW radara

CFAR algoritam obezbeđuje setove merenja tj. detekcija na svakih  $T_{CIT} = 33.28$  s. Svaka detekcija D sadrži sledeće podatke:

$$D = [\rho, \theta_A, \dot{\rho}, \sigma_\rho, \sigma_{\theta_A}, \sigma_{\dot{\rho}}, SNR] \quad (2.2)$$

gde su  $\rho, \theta_A$  i  $\dot{\rho}$  rastojanje od radara, azimut u odnosu na pravac geografskog severa, računat u negativnom pravcu i radijalna brzina potencijalne mete, respektivno. Ove veličine predstavljaju senzorske merne veličine, definisane u polarnom koordinatnom sistemu na slici (2.6). Vektor radijalne brzine usmeren je ka radarskom položaju, jer je pozitivan Doplerov frekvencijski pomak u smeru ka radaru.  $\sigma_\rho, \sigma_{\theta_A}$  i  $\sigma_{\dot{\rho}}$  su standardne devijacije ovih mernih veličina, dok SNR predstavlja odnos signal-šum u ćeliji detekcije.



Slika 2.6. Polarni koordinatni sistem vezan za antenski Rx položaj HFSW radara

Predpostavljeno je da ne postoji statistička korelacija između bilo koje dve merne veličine i da se kovarijansa matrice mernog šuma može predstaviti u obliku:

$$R_D = \text{diag}(\sigma_\rho, \sigma_{\theta_A}, \sigma_{\dot{\rho}}) \quad (2.3)$$

Kovarijansa mernog šuma nije konstantna matrica i parametri greške merenja utvrđuju se pojedinačno za svako merenje, a ekstremne vrednosti  $\sigma$ , normalizovane veličinom rezolucione ćelije, kao i osnovni tehnički podaci radarskih merenja dati su u tabeli (2.1).

Tabela 2.1. Tehnički podaci o mernim veličinama HFSW radara

Veličina	Rezolucija	Ekstremne vrednosti std. devijacije $\sigma$	Broj korišćenih rezolucionih ćelija	Opseg vrednosti merene veličine
Rastojanje	1.5 [km]	0.5-2	200	0 - 300 [km]
Azimet	1 [°]	0.5-1.5	121	$(\theta_{A,MRA}-60^\circ) - (\theta_{A,MRA}+60^\circ)$ [°]
Radijalna brzina	0.32 [m/s]	0.5-2	128	-20.5 - 20.5 [m/s]

## 2. 2 AIS kao senzor

AIS (engl. *Automated Identification System* - AIS) je razvijen kao sistem za razmenu podataka o plovilima između samih plovila i AIS baznih stanica, koristeći VHF (engl. *Very High Frequency*) tehnologiju, sa ciljem poboljšanja bezbednosti na moru. Sistem omogućava transmisiju podataka između AIS primopredajnika, koji mogu biti instalirani na plovilima, baznim stanicama, lukama, objektima na moru (bove) ili na spasilačkim letilicama.

Postoje 3 tipa AIS podataka [7]: statički podaci, u koje spadaju, na primer, ime plovila i dimenzije, zatim, dinamički podaci, u koje spadaju pozicija plovila ili kurs iznad površine, i, podaci vezani za putovanje plovila (opis tovara, krajnja destinacija...). Zbog ovih svojstava, AIS je koristan dodatak radarskim sistemima jer omogućava informacije koje inače ne bi bile dostupne. Statičke informacije se podešavaju jednom i ne mogu biti promenjene od strane posade plovila, dok pozicioni raporti sadrže dinamičke podatke, koji predstavljaju merenja drugih senzora priključenih na AIS trasiver, kao što su GPS senzor (engl. *Global Positioning System* - GPS) ili kompas. I statičke i dinamičke informacije obezbeđuju korisne informacije za korekciju kursa, identifikaciju plovila i izbegavanje kolizije plovila. Dodatno, regulatori pomorskog saobraćaja imaju detaljniji pregled trenutne situacije na moru. Najvažnija funkcija AIS, uparenog sa radarskim podacima,

svakako je identifikacija plovila, putem statičkih podataka, kao što je MMSI broj (engl. *Maritime Mobile Service Identity* - MMSI) ili IMO broj. Danas se smatra da sva veća plovila moraju imati jedinstven MMSI/IMO i uključen AIS transiver pri putovanju, pogotovo u okolini velikih lučkih instalacija, pa se plovila koja ne ispunjavaju ovaj uslov nazivaju nekooperativnim i mogu biti predmet intervencije nadležnih službi. Sledeći način primene AIS podataka je u algoritmima izbegavanja kolizije plovila. Zbog ovih primera je važno obezbediti integritet AIS podataka, što je bio predmet istraživanja, datih u [43]. U tim istraživanjima se došlo do zaključka da je dostupnost statičkih i najvažnijih dinamičkih pozicionih podataka vrlo dobra, ali da je dostupnost pojedinih dinamičkih podataka bitnih za algoritme za izbegavanje kolizije plovila upitna. Međutim, to ne pogađa direktno integracione zadatke AIS i HFSWR podataka, čiji je prevashodni cilj identifikacija plovila, pa se može smatrati da je integritet AIS podataka prihvatljiv za identifikaciju plovila, ali i za eksperimentalne verifikacione zadatke.

Sa stanovišta HFSWR mreže, svi AIS podaci su sistemu dostupni u formi skupa zemaljskih baznih AIS stanica, tj. LAIS veze (engl. *Land AIS*) i satelitske AIS (SAIS) veze, na koje se povezuju klijentske aplikacije za prijem ovih grupa podataka. Poruke sa baznih LAIS stanica se transmituju preko UDP ili TCP/IP protokola do kolekcione završne tačke, u kojoj poseban softver, tzv. AIS konzentator, vrši filtriranje i eliminaciju dupliciranih, zakasnelih i invalidnih poruka. Format LAIS poruka je standardni NMEA AIVDM [44], dok SAIS poruke koriste format koji je proširen početnim zaglavljem, koje zavisi od dobavljača satelitskih usluga, u ovom slučaju OrbCom [45]. Ovo zaglavlje sadrži polja razdvojena separacionim karakterom, u koja se utiskuju podaci o vremenu prijema poruke na servis, identifikacija satelitskog dobavljača i specifičnosti servisa. Posle zaglavlja, ostatak sadržaja poruke je originalna AIVDM poruka [46]. Rezultat AIS koncentracionog procesa je uniformni tok AIS poruka, koji se dostavlja povezanim klijentima preko predefinisanih pristupnih parametara (IP adresa, port), preko IP socket komunikacije. Usklopu filtracije poruka za integracione i identifikacione senzorske aktivnosti, za HFSWR mrežu izdvajaju se samo određeni tipovi poruka sa odgovarajućim statičkim i dinamičkim informacijama:

- 1) MMSI/IMO broj
- 2) geografske koordinate plovila
- 3) Kurs na površini (engl. *Course Over Ground* - COG)
- 4) Brzina na površini (engl. *Speed Over Ground* - SOG)

Poruke koje poseduju ove informacije su, dakle, pozicioni raporti i pre svega, od interesa su poruke tipa 1,2,3, 18,19 i 27 [47], koje sadrže dinamičke informacije.



## 2. 3 Specifičnosti praćenja ciljeva u okruženju HFSW radara

Klater u radnom okruženju HFSW radara predstavlja ozbiljnu pretnju korektnosti procedura praćenja, pošto može dovesti do potvrđenosti nepostojećih tragova. Ponekad, ovi lažni tragovi se mogu pojaviti na korisničkom ekranu operatora nadgledanja pomorskog saobraćaja i mogu, u nekim scenarijima, izazvati nepotreban alarm sa višim stepenom angažovanja. Takvi slučajevi se odnose na monitoring zona od posebnog interesa, kao što su, na primer, naftne platforme ili prilazi mornaričkim instalacijama. Priroda ovih alarma uglavnom leži u nemogućnosti CFAR procesnog bloka i njemu asocirane logike da se izbore sa različitim nivoima klatera. Na primer, velike oblasti RDA kocke, koja predstavlja ulaz u CFAR algoritam, mogu biti pogođeni, za HFSWR, štetnim povraćajima iz E i F jonosferskih slojeva [48]. Ovi povraćaji mogu imati takve ekstremne amplitude da poseduju kapacitet da kreiraju tzv. slepe zone unutar oblasti pokrivanja HFSW radara sa fiksnim radnim frekventnim opsegom, u trajanju od nekoliko časova. Drugi fenomeni koji predstavljaju izvor smetnji su radio-frekventna interferencija (RFI), pojačani morski klater uzrokovan jakim olujama na otvorenom moru, pa čak i meteo-cunamijima [24]. Izvori RFI mogu biti uzrokovani direktnim ili indirektnim dejstvom čoveka ili mašina, u vidu indukovanih električnih smetnji koje se utiskuju u osetljivi elektronski primo-predajnik HFSW radara. Na primer, prekidačka napajanja LED osvetljenja izazivaju smetnje najviše u opsezima većim od 6 MHz, što je pokazano u [49], gde je razvijena tehnika za ublažavanje ovih smetnji. U širem smislu, tehnike za mitigaciju RFI opisane su u [50] i primenjene su u radarima u posmatranoj mreži u Gvinejskom zalivu, pa RFI ne predstavlja temu od presudnog interesa, kao izvor lažnih alarma. Uobičajeno, daleko veći problem predstavlja jonosferski i morski klater, koji su predmet proučavanja više istraživanja, sumiranih u [23] i njima će biti posvećena određena pažnja.

Praćenje ciljeva kod HFSW radara pogađa još jedan fenomen, čija priroda nije u spoljnim smetnjama, već u samom kretanju mete, koja izlaže različitu refleksionu površ prema radarskom snopu, izazivajući tako neizbežne fluktuacije amplituda primljenog povraćaja. Ovaj efekat može izazvati i iščezavanje mete pod određenim okolnostima i svakako predstavlja jedan od uzroka fragmentacije tragova. Efekat se ne može eliminisati niti ublažiti na jednostavan način, ali je potrebno o tome voditi računa prilikom dizajna pravila menadžmenta tragova procedure praćenja.

### 2. 3. 1 Morski klater kod HFSW radara

Za radar, odbici, tj. povraćaji odaslatog signala od elemenata morske površine često predstavljaju ozbiljnu limitaciju za detekciju povraćaja od strane brodova, aviona, projektila i drugih meta koje dele rezolucionu ćeliju sa morskom površinom. Ove smetnje se združeno zovu

morski klater ili morski eho. Istraživanja ove štetne pojave počela su prikupljanjem i analizom podataka operativnih radara, sa ciljem da se uspostavi veza između klaterskih signala i operativnih parametara radara i morskog okruženja. Većina ranijih istraživanja obavljena je tokom II svetskog rata, ali većina podataka o klateru potiče iz izolovanih eksperimenata, često sa lošim, nepotpunim ili potpuno pogrešnim opisom modela morske površine. Učiniti ove radove korisnijim i verodostojnijim na žalost, nije lak zadatak. Dok se parametri radara mogu menjati, parametri sredine su sasvim drugačiji slučaj. Kao prvo, u momentu kreiranja rezultata nije bilo dovoljno jasno koji su parametri sredine bili važni i na koji način bi se oni kvantifikovali. Na primer, brzina vetra sigurno utiče na nivo klatera, ali je korelacija očitavanja brodskih anemometara često nedosledna. Step en agitacije morske površine (tzv. stanje mora) takođe bitno utiče na nivo klatera, ali je to subjektivna veličina i njena relacija sa jačinom lokalnih vetrova često je nepoznata ili, najblaže rečeno, nesigurna. Takođe, utvrđeno je u međuvremenu da temperatura mora i vazduha iznad morske površine mogu uticati na način na koji merena brzina vetra utiče na genezu morskih talasa koji prouzrokuju klater. Konačno, i ako bi važnost parametara sredine bila pravilno prepoznata, često bi se pokazalo da je precizno merenje ovih parametara bilo preskupo ili previše teško izvodljivo u realnim uslovima na otvorenom moru.

Iako su mnogi aspekti morskog klatera ostali loše definisani, prethodni rad ipak je doveo do razotkrivanja nekih generalnih trendova, kao što su, na primer, tendencija povećanja srednjih snaga klatera na niskim ili srednjim uglovima zračenja radara, pri povećanju ugla zračenja i brzine vetra (ili stanja mora). Srednje snage klatera su u opštem slučaju veće kod vertikalne polarizacije i smerovima uz i protiv smera vetra. Morski klater ostaje kompleksan fenomen, prezentujući različita “lica” u zavisnosti od toga na koji način radarski senzor vidi scenu. Na primer, često se primećuje, posmatrajući tzv. A dijagrame (zavisnost amplituda od rastojanja od radara), da je pojavljivanje morskog klatera veoma zavisi od veličine rezolucione ćelije radara (otiska radara). Za velike ćelije, ono se pojavljuje distribuirano po rastojanju i može se opisati kao površinski usrednjene sekcije sa moguće znatnim odstupanjima od srednje vrednosti. Kako se rezoluciona ćelija smanjuje, tako morski klater sve više dobija “formu” pojavljivanja sekvenci diskretnih odbitaka, koje veoma podsećaju na povraćaje pravih brodova, tj. meta. Na visokim rezolucijama, klaterski povraćaji teže povećanju svojih amplituda, javljajući se pri svim polarizacijama, ali najveći uticaj imaju pri horizontalnoj polarizaciji i malim uglovima zračenja u odnosu na morsku površinu. Pojedinačni izolovani povraćaji nose naziv morski izboji (engl. *see spikes*) i predstavljaju uobičajen deo klaterske komponente u operativnom radu radara.

Istorijski gledano, raniji modeli karakterizacije morskog klatera nisu davali zadovoljavajući opis ponašanja. Ipak, 1956. godine Krombi je uočio da rasejavanje HF talasnih dužina (nekoliko desetina metara) raste usled rezonantne interakcije sa morskim talasima na polovini talasne dužine,

tj. da je Bragovog tipa [51]. Tada je usledilo uvođenje Bragovog modela, pa i u mikrotalasnom režimu, uz izvesne aproksimacije. Takvi događaji doveli su do sasvim novog pristupa problemu morskog klatera, uvodeći u razmatranje tzv. spektar morskih talasa, stvarajući vezu između fizike rasejanja elektromagnetnih talasa i okeanografije, tj. kreirajući polje radio okeanografije.

Postoje dva tipa površinskih talasa, kapilarni i gravitacioni, u zavisnosti koja sila izaziva ponovno pojavljivanje talasa: gravitacija ili perturbacije površine. Tranzicija između svakog od ova dva tipa talasa odigrava se na talasnim dužinama manjim od 2 cm, tako da se može reći da manji kapilarni talasi fino oblikuju površinu, dok gravitacioni talasi daju najveći deo vidljive površinske strukture. Morski talasi svoje poreklo duguju pre svega vetru. Da bi formirao morsku površinu do stanja punog razvoja ili ekvilibrijuma, vetar mora duvati dovoljno dugo vremena, preko dovoljno dugog rastojanja (eng. *fetch distance*). Deo talasne strukture, koji potiče od vetra naziva se more. Morski talasi propagiraju, iako lokalno ne postoji vetar, čemu uzrok može biti udaljena oluja, tj. uzročnik im je takođe vetar. Ovakve talase zovemo oteklim (engl. *swell*). Kako se površ kroz koju prolaze ovi talasi ponaša kao propusnik niskih učestanosti, otekle komponente talasa često uzimaju formu zašiljenih niskofrekventnih sinusoida.

Taladni spektar okeana se prikazuje u nekoliko formi. Ukoliko se sa jedne fiksne tačke posmatra vremenska istorija površinskih elevacija, dobijeni podaci obezbeđuju frekvencijski spektar  $S(f)$  površinskih elevacija, gde je  $S(f)d(f)$  mera protoka energije talasa u frekvencijskom intervalu  $(f, f+df)$ . Snimanje talasnog spektra na otvorenom moru primarno se obavlja zbog gravitacionih talasa do talasnih dužina od 1m.

Za gravitacioni talas, frekvencija  $f$  i talasni broj  $K$ , povezani su disperzionom relacijom [23]

$$f = \frac{1}{2\pi} (gK)^{\frac{1}{2}} \quad (2.4)$$

gde je  $g$  gravitaciono ubrzanje,  $K=2\pi/\lambda$  je talasni broj, dok je  $\lambda$  talasna dužina. Iako se svi gravitacioni talasi povinuju gornjoj jednakosti, u posmatranoj tački mora oni moći iz bilo kog pravca, pa se moraju opisati i dvodimenzionim propagacionim vektorom, koji se najčešće pridružuje talasnom broju, pa važi:

$$K = |\vec{K}| = (K_x^2 + K_y^2)^{1/2} \quad (2.5)$$

$K_x$  i  $K_y$  predstavljaju ortogonalne komponente propagacionog vektora. Spektar  $S(f)$  u odnosu na zadati, distribucionim vektorom prošireni, talasni broj  $\vec{K} = (K_x, K_y)$ , nazivamo direkcionim talasnim spektrom, u oznaci  $W(K_x, K_y)$ , pomoću kojeg se uočavaju asimetrije povezane sa vetrom, strujama, refrakcijom, izolovanim komponentama oteklih talasa itd.

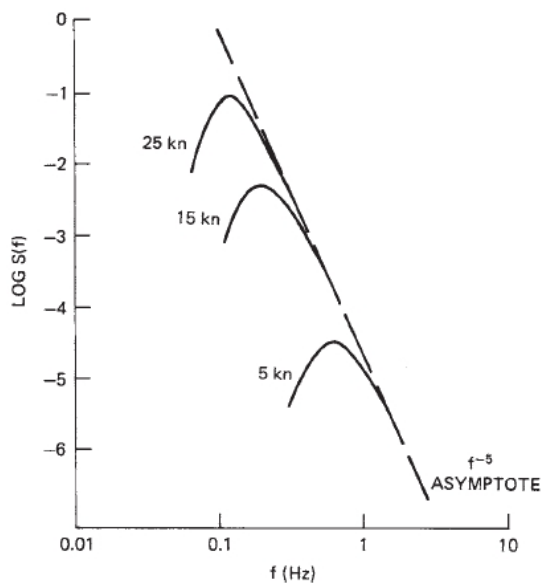
Za zadati izvor asimetrije, na primer vetar, razni delovi spektra će pokazati različito direkciono ponašanje. Na primer, u potpuno razvijenom moru, veći talasi će težiti kretanje uz vetar, dok će manji talasi pokazivati izotropnost po smeru kretanja. Direkciono spektralno ponašanje je mnogo teže meriti, a dobijaju se eksperimentalnim metodama, na primer akcelerometrijskim bovama, stereo fotografijom itd. Međutim, frekvencijski spektralni broj  $W(K)$  često definiše upravo preko frekv. spektra relacijom

$$W(K) = S(f(K))(df/dK) \quad (2.6)$$

Okeanografi nikad nisu bili složni oko forme frekvencijskog spektra. Neuravnoteženi talasni uslovi, neadekvatne periode uzorkovanja podataka i drugi faktori često kontaminiraju validnost podataka. Ali, pažljivom selekcijom podataka iz više izvora, osiguravajući da jedino ekvilibrijumski uslovi stanja mora dolaze u obzir, dok se brzina vetra uvek izvodi sa iste referentne visine, uspostavljena je Pirson-Moskovič empirijska formula spektra koja je i danas veoma popularna [52]. Ona ima formu:

$$S(f) = Af^{-5}e^{-B(f_m/f)^4} \quad (2.7)$$

gde je  $f_m = g/2\pi U$ , odgovarajući frekvenciji talasa koji se kreće brzinom jednakom brzini vetra  $U$ .  $A$  i  $B$  su empirijske konstante. Spektralni broj je ilustrovan na slici (2.7), za nekoliko brzina vetra. Treba primetiti da je najveći deo okeanografskog spektra baziran na merenjima na relativno malim frekvencijama, pa se za ozbiljno može uzeti samo deo spektra ispod 2 Hz. Ipak se ove spektralne forme koriste do frekvencija od 20 Hz u predikciji radarskog klatera pod Bragovom hipotezom.



Slika 2.7. Talasni spektralni broj mora, tipa Pirson-Moskovič, brzina vetra data je u čvorovima (kn) [52]

Konvertovanje ovog spektra u spektar talasnog broja, koristeći jednakost (2.4), dobija se slična kriva, ali sa  $K^{-4}$  asimptotom. U [53] je izvedeno asimptotsko ponašanje na dimenzionim površinama, kao i aproksimativna formula, dobijena zamenom glatkog pika krive sa slike (2.7) oštrim vrhom, koji nazivamo Filipsovim spektrom:

$$W(K) = \begin{cases} 0.005K^{-4} & K > g/U^2 \\ 0 & K < g/U^2 \end{cases} \quad (2.8)$$

gde presečni talasni broj  $K$  odgovara vršnoj frekvenciji  $f_m$  u jednakosti (2.7).

Prilikom diskusije o karakterizaciji morske površine preko sopstvenog spektra mora se imati na umu da je talasni spektar visoko usrednjen opis kako je energija površine distribuirana na talasne brojeve ili frekvencije talasa koji su prisutni na morskoj površini. Kako nemamo podatke o fazama ovih talasa, spektar ne daje nikakve informacije o morfologiji same površine, tj. kompleksnim detaljima površine koji su odgovorni za rasipno polje.

Oblik krivih na slici (2.7) implicira da talasni sistem ima oštar vrh, pa bi se mogla steći slika o ponašanju velikih talasa na površini, uzimajući vrednosti periode  $1/f$  i talasne dužine ( $2\pi/K$ ), određene spektralnim maksimumom. Ove vrednosti su dodeljene talasu, zadovoljavajući disperzionu relaciju (2.4), i dobijajući faznu brzinu  $C=2\pi f/K$ , jednaku brzini vetra  $U$ . Koristeći istu relaciju, period  $T'$  i talasna dužina  $\lambda'$  dobijaju formu:

$$T'=0,64U \quad \lambda'=0,64U^2 \quad (2.9)$$

gde se brzina vetra  $U$  meri u m/s. Na primer, najveći talasi na potpuno razvijenom moru sa brzinom vetra od 8 m/s će imati talasnu dužinu od 41 m sa periodom od 5 sekundi.

Statistička distribucija visina talasa na površini okeana približno ima normalnu raspodelu, sa srednje-kvadratnom vrednošću visine talasa koja se dobija integracijom talasnih visina spektra preko svih frekvencija, tj. talasnih brojeva. Za spektre koji imaju oblik sličan onom na slici (2.7), srednje-kvadratna vrednost visine talasa je približno data sa:

$$h_{rms}=0.005U^2 \text{ [m]} \quad (2.10)$$

Ovako dobijena vrednost sadrži doprinose svih talasa na površini mora, ali je često mnogo važnija veličina za velike talase visina od vrha do propada talasa (engl. *peak-to-through*). To je pogotovo slučaj za brodove koji su u tzv. senci morske površine pri niskim uglovima zračenja radara. Značajna visina talasa, ili *peak-to-through* visina jedne trećine najvećih talasa daje dobru meru visine talasa i kvantifikuje njihov uticaj na detekciju brodova. Označava se sa  $H_{1/3}$  i uzima se da je približno 6 puta veća od spektralne srednje-kvadratne amplitude (Kinsmanova empirijska relacija)

[54]. To bi značilo da za vetar brzine 8 m/s, značajna visina iznosi oko 0.6 m, dok za olujne vetrove brzine bar 20 m/s, vrednost ove visine poraste na impresivnih 4.5 m.

Posmatrajući more, posmatrač može opisati morsku površinu subjektivnom veličinom o njegovom stanju (engl. *see state*). Ukoliko se utvrdi set deskriptora, poređan po nivou uređenosti stanja površine mora, sa dodeljenim brojevima, tada ovi brojevi definišu stanje mora. Slična numerička skala postoji za brzine vetra, tzv. Bofortova skala vetrova.

Dakle, postoje još dve veličine koje se često koriste za kvalifikaciju stanja aktivnosti morske površine: subjektivno stanje mora i merena brzina vetra. Samo kada vetar duva dovoljno dugo i na dovoljno velikom rastojanju da izazove potpuno razvijeno more, tada se visina talasa može povezati i jednoznačno opisivati stanje morske površine. Deskriptori površine mora, povezani sa morskim klaterom, stanje mora, brzina vetra i ekvilibrijumska (značajna) visina talasa, dati su u tabeli (2.2). Interesantan podatak je da je srednja brzina vetrova na svim svetskim okeanima oko 8 m/s, što odgovara stanju mora 3 [23].

Tabela 2.2. Stanje mora i odgovarajuće brzine vetra i značajna visina talasa [23]

Stanje mora	Brzina vetra [m/s]	Visina talasa $H_{1/3}$ [m]
1 (mirno)	< 3.7	0.3
2 (blago)	3.7-6.5	0.3-0.9
3 (osrednje)	6.5-8.6	0.9-1.5
4 (talasno)	8.6-10.3	1.5-2.4
5 (veoma talasno)	10.3-12.4	2.4-3.6
6 (Visoko talasno)	12.4-16.2	3.6-6
7 (Izuzetno visoko talasno)	16.2-24.2	6-12

Morski klater je viđen kao površinski distribuiran proces, a kao bazični parametar se uzima normalizovana radarska kros-sekcija (engl. *Normalized Radar Cross Section- NRCS*) površine ili tzv. sigma-zero parametar  $\sigma^0$ . Ovaj parametar se izražava u dB, relativno u odnosu na  $1 \text{ m}^2 / \text{m}^2$ . Dobija se ekperimentalno, deljeći merenu kros-sekciju radara ozračenog dela površine sa normalizovanom oblasti, tako da razlike u definiciji ove oblasti mogu dovesti do neusaglašenosti između različitih raporta merenja NRCS. Rasejanje od bilo koje distribuirane mete uključuje proizvod odaslanog i primljenog otiska, integrisanih nad metom. Ovi otisci prekrivaju jednaku površ za monostatički radar i zavisiće od širine impulsa i snopa, rastojanja i ugla zračenja. Ako se predpostavi da su otisci tipa cookie-cutter (konstanta amplituda, koja oštro pada na nulu na tačkama polovine snage), onda je relacija između stvarne kros-sekcije radarskog klatera  $\sigma_c$ , nasledene od izračene snage preko radarske jednačine i NRCS  $\sigma^0$  data jednakošću:

$$\sigma^0 = \sigma_c / A_f \quad (2.11)$$

gde je za radar sa propusnim opsegom antena  $B$  i pravougaonim impulsom trajanja  $\tau$ , koji osmatra površinu na rastojanju  $R$  uglom zračenja  $\varphi$ , oblast  $A_r$  je

$$A_r = \pi(BR)^2/4\sin\varphi \quad (2.12)$$

za uslove limitirane snopom zračenja (na primer, kontinualni talas (engl. *Continuous Wave*) ili radar sa impulsom dugog trajanja sa velikim uglom zračenja).

Realni radari ne proizvode “cookie-cutter” otiske, pa se efektivno  $A$  mora dobiti površinskom integracijom stvarnog amplitudskog profila otiska, koji će težiti da smanji  $A$ , u odnosu na vrednosti dobijene jednakoću (2.12). To za posledicu ima dobijanje većih vrednosti  $\sigma^0$ . U većini eksperimenata danas uzima se HPBW (engl. *Half-power Beam Widht*) u gornjim jednakostima sa greškom koja je obično samo 1 do 2 dB.

U razvoju modela morskog klatera baziranog na fizičkim teorijama, postoje dva bazična ali različita pristupa. Istorijski gledano, prvi pristup je predpostavljao da je poreklo morskog klatera u rasejnim objektima, preprekama, prisutnim na ili blizu morske površine. Međutim, izbor ovih prepreka je povezan više sa predpostavkom o njihovom postojanju, nego sa stvarnim posmatranjem stanja mora, bez obzira što je modelovanje rasipnih objekata sa godinama postajalo sve kompleksnije.

Drugi pristup teoretskom modelovanju izvodi polje rasejanja iz problema globalna granica-vrednost (engl. *Global Boundary-Value Problem - GBVP*), u kome se more kao celina tretira kao granična površ, čije su perturbacije opisane nekom vrstom statističkog procesa. Zbog toga što GBVP pristup dovodi do analitičkih rezultata za Bragovu hipotezu rasejanja koja trenutno dominira teorijom morskog rasejanja od kasnih 1960. godina, ovoj teoriji je potrebno posvetiti određenu pažnju.

Formulacije GBVP, iako elegantne, su od male praktične vrednosti, pa su potrebne određene aproksimacije da bi se iz njih izvukli korisni kvantitativni rezultati. Važan slučaj je aproksimacija vezana za male amplitude, tj. predpostavlja se da su talasne dužine morskih talasa mnogo manje od talasnih dužina radarskog snopa, i kod kojih se inicijalno predpostavlja da važi Rejljeva hipoteza, u kojoj su granični uslovi površine primenjeni tako da odgovaraju uglovnom spektru odlaznih ravanskih talasa incidentnog polja. U toj formulaciji, ponekad nazvanoj metod malih perturbacija (engl. *Small Perturbation Method - SPM*) i povezanoj često sa [55], predpostavljeno je da su površinski poremećaji svuda manji od radarske talasne dužine, pa je metod primenjiv samo na takve slučajeve kao što je HF rasejanje, kod kojeg su talasne dužine nekoliko desetina metara, do manjih brzina vetra i visina talasa do nekoliko metara. Rešenje problema je u formi razvoja u red u opsegu talasnih dužina od visine talasa do radarske, a ono predviđa postojanje Bragovih linija prvog reda i

sadržaj spektra drugog reda oko njih. Simplifikovan izraz za raspodelu morskog klatera (kros-sekciju) u zavisnosti od ugla zračenja radara dat je u [56]:

$$\sigma^0(\psi) = Ak^2 F_p(\psi) \int_{-\infty}^{+\infty} dy e^{i2k_1 y} [e^{4k_2^2 h^2 [1-C(y)]} - e^{-4k_2^2 h^2}] \quad (2.13)$$

gde je A konstanta,  $k_1 = k \cos \Psi$  i  $k_2 = k \sin \Psi$ , k je talasni broj radara,  $F_p(\Psi)$  je funkcija polarizacije p,  $\Psi$  je ugao zračenja radara; h je rms vrednost visine morskih talasa; C(y) je površinski korelacioni koeficijent.

Statističke osobine morske površi su u gornjoj relaciji unesene preko korelacionog koeficijenta C(y) u eksponencijalnom članu, čijim se razvojem u red dobija:

$$\sigma^0(\psi) = Ak^2 F_p(\psi) e^{-4k_2^2 h^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(4k_2^2 h^2)^n}{n!} W^{(n)}(2k_1) \quad (2.14)$$

$$W^{(n)}(2k_1) = \int_{-\infty}^{\infty} d\tau e^{i2k_1 \tau} [h^2 C(\tau)]^n$$

Sad se moguće uneti aproksimaciju malih amplituda visina talasa:

$$2kh \ll 1 \quad (2.15)$$

Sada, približno, samo prvi član reda u jednakosti (2.14) opstaje, pa se za kros-sekciju dobija veoma prosta forma:

$$\sigma^0(\psi) = 4\pi k^4 F_p'(\psi) W^{(1)}(2k \cos \psi) \quad (2.16)$$

gde je konstanta A dobila eksplicitnu vrednost, a  $F_p$  je absorbovalo  $\sin^2$  član iz razvoja.  $W^{(1)}$  je Furijeova transformacija površinske korelacione funkcije, što čini da se talasni spektar evaluira sa duplo većim radarskim talasnim brojem, kojim se definiše Bragova (ili polutalaska) rezonanca.

Iako jednakost (2.16) uspešno predviđa (barem do 1. reda) klaterske povraćaje na HF frekvencijama, na mikrotalasnim frekvencijama aproksimacija malih visina talasa više ne važi.

Za razliku od naglih promena u ponašanju rasejanja koje se javlja u priobalnom području i preko kompleksnog terena, amplituda radarskog ehoa sa otvorenog okeana, tj. koeficijent rasejanja teži laganim varijacijama po rastojanju i azimutu, kao posledica, pre svega, vremena odziva okeanske površine na različite poremećaje usled dejstva vetra. Za snagu ehoa, za najveći deo vremena važi solidna aproksimacija da je ta amplituda proporcionalna površi rezolucione ćelije.

Od mnogo većeg interesa od srednje amplitude ehoa radara je bogatstvo informacija ugrađenih u Doplerov spektar. Talasi na površini mora uvode kompleksnu modulaciju reflektovanog signala, koja se manifestuje upravo u doplerovom spektru eha. Estimacija i interpretacija ove modulacije



daje informacije o vremenski promenljivoj površinskoj geometriji sa velikim implikacijama na proces detekcije brodova.

Ukoliko stanje mora nije previše loše, često se uzima model morskog klatera koji u praksi daje zadovoljavajuće rezultate, a koji se bazira na sledećoj pretpostavci [57]:

Morska površina može biti predstavljena, kao dobrom aproksimacijom, superpozicijom spektra  $S(\mathbf{k})$  površinskih gravitacionih talasa, tako da je zadovoljena relacija

$$\omega^2 = g\kappa \tanh(\kappa d) \quad (2.17)$$

gde je  $\omega$  kružna učestanost talasa,  $g$  gravitaciono ubrzanje,  $k$  je talasni broj morskog talasa a  $d$  je dubina vode. Za duboke vode, ova formula se svodi na

$$\omega^2 = g\kappa \quad (2.18)$$

odakle fazna brzina morskog talasa može biti napisana kao:

$$v = \frac{\omega}{\kappa} = \sqrt{\frac{gL}{2\pi}} \quad (2.19)$$

gde je  $L$  talasna dužina morskog talasa.

Sa stanovišta talasnih dužina morska površ se može posmatrati kao blago hrapava površ, što povlači za sobom jedno aproksimativno rešenje za rasipno polje u formi razvoja perturbacija u red po parametru  $ka$ , gde je  $a$  reprezentativna amplituda okenaskog talasa, a  $k$  talasni broj. Ovaj pristup je proširen na slučaj kada površina evolvirava prema gore navedenoj disperzionoj relaciji, što dovodi do jednakosti za doplerov spektar reflektovanih talasa - Rajs-Barikova relacija [55][58]:

$$\begin{aligned} \sigma(\omega) = & 2^6 \pi k_0^4 \sum_{m=\pm 1} S(-m(\vec{k}_{scat} - \vec{k}_{inc})) (\delta(\omega - \omega_B)) \\ & + 2^6 \pi k_0^4 \sum_{m_1, m_2 = \pm 1} \iint \Gamma(m_1 \vec{k}_1, m_2 \vec{k}_2)^2 S(m_1 \vec{k}_1) S(m_2 \vec{k}_2) \\ & \delta(\omega - m_1 \sqrt{g\kappa_1} - m_2 \sqrt{g\kappa_2}) d\vec{k}_1 d\vec{k}_2 \end{aligned} \quad (2.20)$$

gde su  $\vec{k}_{inc}$  i  $\vec{k}_{scat}$  incidentni i rasipni radio-talasni vektori,  $k_0 = |\vec{k}_{inc}|$ ,  $\omega$  je Doplerova frekvencija,  $S(\mathbf{k})$  je morski direkcioni talasni spektar, a Bragova frekvencija je data izrazom  $\omega_B = \sqrt{g|\vec{k}_{scat} - \vec{k}_{inc}|}$ .  $\delta(\cdot)$  je Dirakova delta funkcija. Kernel funkcija  $\Gamma$  biće pojašnjena u nastavku teksta. Gornja jednakost otkriva da Rajs-Barikovo rešenje ima jednostavnu interpretaciju u pogledu prostorne rezonanse Bragovog rasipanja. Iako je dezorganizovana površina okeana predstavljena beskonačnom Furijeovom sumom sinusoidalnih talasnih oblika, svaki sa svojim talasnim brojem i smerom, najveći, tako reći, doprinos prvog reda rasipnom polju potiče od samo dve komponente Furijeove sume, za one talasne vektore za koje važi:

$$\vec{k}_{\pm} = \pm(\vec{k}_{scat} - \vec{k}_{inc}) \quad (2.21)$$

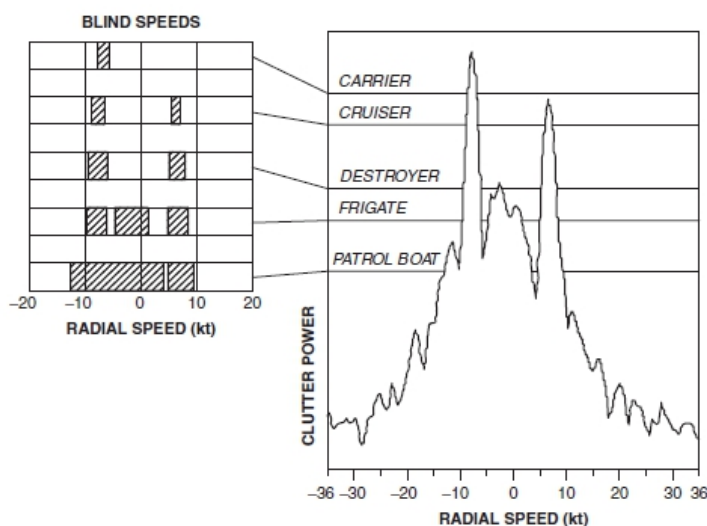
Za jednostavan slučaj rasipanja pri vrlo malim uglovima zračenja, geometrija monostatičkog radara sa površinskim talasom nalaže  $\vec{k}_{scat} = -\vec{k}_{inc}$ , pa su rezonantni okenaski talasi na talasnoj dužini jednakoj polovini radarske talasne dužine, sa jednim rešenjem koje odgovara talasu koji se direktno približava radaru i jednom talasu koji se od njega udaljava. Odgovarajući Doplerovi pomeraji su povezani sa faznom brzinom rezonantnih talasa na sledeći način:

$$f_d = \pm \sqrt{\frac{g}{\pi\lambda}} = \pm \sqrt{\frac{gf}{\pi c}} \approx \pm 0.102 \sqrt{f(MHz)} \quad (2.22)$$

gde je Doplerov pomak dat u Hz, g je gravitaciono ubrzanje, f je frekvencija radara, a c brzina svetlosti.

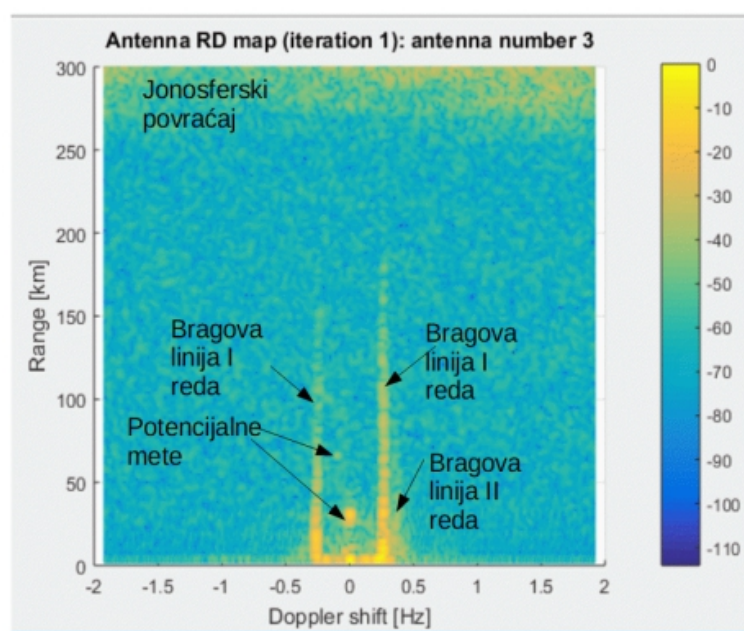
Za drugi član jednakosti (2.20) Barik je pokazao da je bazna funkcija  $\Gamma$  sastavljena iz dva člana, elektromagnetskog i hidrodinamičkog [58]:  $\Gamma = \Gamma_{EM} + \Gamma_{HYD}$ . Naravno, postoji beskonačno mnogo talasnih parova u okviru drugog faktora koji mogu zadovoljiti gornje uslove, ali je njihov doprinos bitno manji. Rezultujući doprinos Doplerovom spektru drugog člana obično je 20-30 dB niži od harmonika prvog reda, ali je po Dopleru rasejan, pa ima potencijal da zamaskira eho brodova.

Jednakost (2.20) je od fundamentalnog značaja za mnoge HF primene, uključujući i detekciju brodova. Na primer, slika (2.8) pokazuje izmereni Doplerov spektar gde se estimiraju amplitude ehoa koje bi mogle biti primljene od strane brodova različitih klasa, za isti dizajn radara i iste parametre radarskog snopa [23].



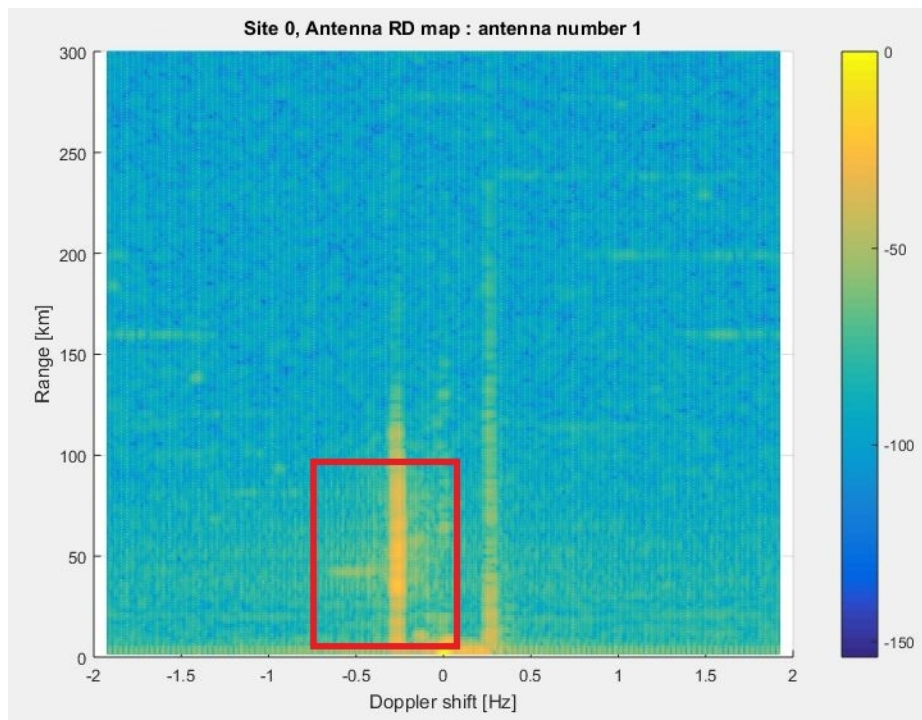
Slika 2.8. Šematska prezentacija slepih brzinskih opsega u kojima su brodski ehoi maskirani morskim klaterom [23]

Na slici (2.9) prikazan je Doplerov spektar jedne od antena antenskog niza, sa uobičajenom predstavom RD mape. Na ordinati je rastojanje od radara u kilometrima, a na apscisi Dopler frekvencija. Normalizovana amplituda je kolor-kodirana, sa prikazanom skalom. Frekvencija radara je  $f = 6.9$  MHz, a talasna dužina radarskog signala  $\lambda = 43,47$  m. Koristeći relaciju (2.22), dobija se da je Doplerova učestanost Bragovih linija prvog reda  $f_d = \pm 0.268$  Hz. Ovakva predstava daje veoma jasnu sliku kakav uticaj imaju Bragove linije 1. reda na prijemni signal, a potencijalno i na detekciju brodova. Sa druge strane, one se veoma jasno vide na izračunatoj Doplerovoj učestanosti. Jasno je da one predstavljaju svojevrsnu “slepu” zonu praćenja HFSWR. Potencijalne mete se mogu očekivati najčešće između Bragovih linija I reda. Na istoj slici obeležen je i efekat jonosferske interferencije, a o njemu će biti više reči u sledećem odeljku.



Slika 2.9. Tipična RD mapa antene HF radara. Na apscisi je Doplerova frekvencija u Hz, a ordinatu predstavlja udaljenost od radara.

Povećana agitacija morske površine usled dejstva jakog vetra, vezana za pojavu jakih oluja, izaziva rezonantne efekte pri kojima se morski talasi većih visina ponašaju kao tačkasti ciljevi. Kao posledica ovih rezonantnih efekata, na RD mapama se javljaju tačke, koje CFAR algoritmi interpretiraju kao potencijalne mete. Na slici (2.10) prikazana je RD mapa, generisana sa jednog od antenskih ulaza pri oluji. U uokvirenoj oblasti uočava se efekat oluje, u vidu pojačanog morskog klatera i velikog broja tačkastih ciljeva, u oblasti udaljavanja od radara. Ovaj primer će između ostalog, biti razmatran u poglavlju 4 disertacije, gde će biti prikazana i posledice, koje će imati po proceduru praćenja.



Slika 2.10. RD mapa uzorkovana pri dejstvu oluje, na dan 25.05.2018. godine

### 2. 3. 2 Radarska krossekcija i njen uticaj na proces praćenja ciljeva

Svaki objekat izložen elektromagnetnom zračenju rasipa incidentnu elektromagnetnu energiju u svim pravcima. Prostornu distribuciju ove energije nazivamo rasejanjem. Energiju rasejanu nazad prema izvoru talasa nazivamo povratnim rasejanjem i ona sačinjava radarski eho. Intenzitet tog ehoa se opisuje radarskom kros-sekcijom (engl. *Radar Cross-Section* - RCS). Postoji veliki broj konvencija za definiciju RCS, što je opisano i sumirano u [23], što zavisi od položaja mete prema ravni na kojoj se situacija proučava. Uzeće se u obzir razmatranje dato u [59], u kome se RCS definiše kao da je merena u otvorenom prostoru, u kontekstu HFSW radara. Da bi meta bila detektovana, njena RCS mora biti veća od RCS morskog klatera na Doplerovoj frekvenciji koja odgovara brzini mete. U [60] izvedena je aproksimativna empirijska formula za RCS za brodove velike tonaže (veće od 1000 tona):

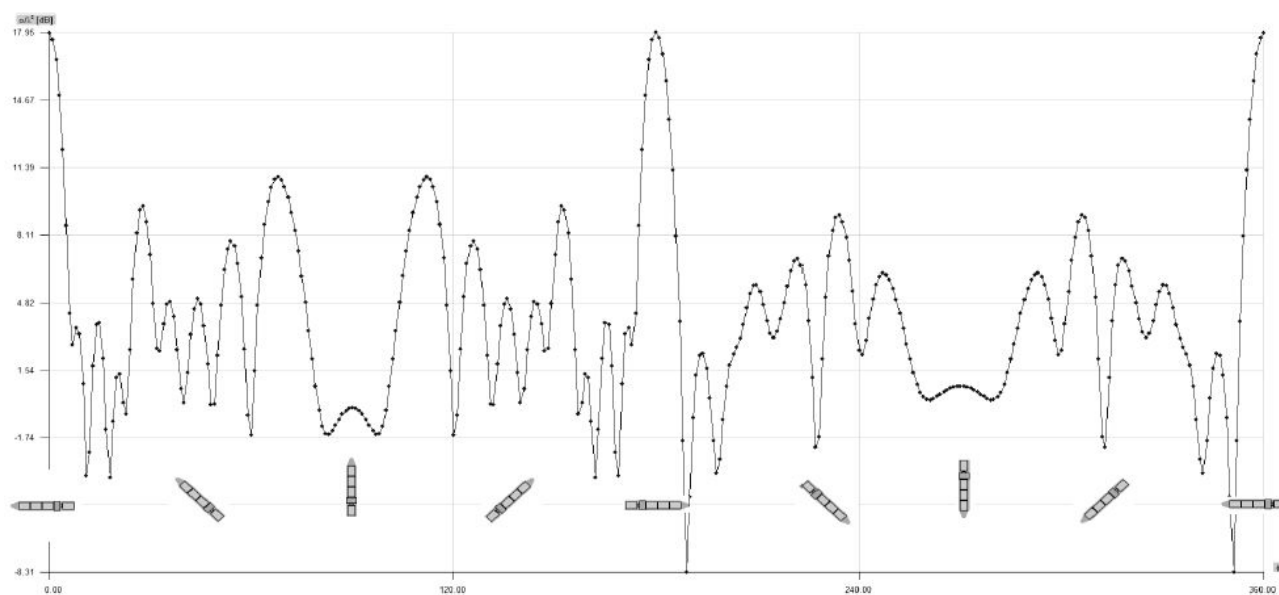
$$\sigma = 52 f^{1/2} D^{3/2} [\text{m}^2] \quad (2.23)$$

gde je  $\sigma$  RCS mete,  $f$  je frekvencija radara u MHz, a  $D$  veličina broda u hiljadama metričkih tona. U istom radu analizira se aproksimativno RCS manjih plovila kod kojih dominira vertikalna metalna superstruktura. Ukoliko je ta superstruktura u ravni sa površinom mora, tada se RCS mete može aproksimirati onom koja odgovara prizemljenoj monopolnoj anteni [61]. Kada je vertikalna superstruktura izolovana od podloge, tada se RCS aproksimira prema modelu dipolne antene.

Prisustvo više struktura imaće aditivni efekat, koji će rezultirati višim amplitudama vrednosti RCS, ali i dubljim nulama. Manja plovila bez značajnih vertikalnih superstrukture će imati veoma mali RCS. Takva plovila mogu biti detektovana samo u slučajevima kada je njihova radijalna brzina dovoljna da rezultantni Doplerov pomak dovoljno odmaknut od zone u Doplerovom spektru u kome dominira morski klater, uz uslov da je amplituda RCS iznad nivoa ostalih šumova u sistemu.

Kod HFSW radara su uočene abnormalne fluktuacije u detektovanim nivoima snage pojedinih meta [62]. Kod većine površinskih meta, nivoi snage fluktuirali su u nivoima greške merenja od nekoliko dB. Međutim, kod velikih naftnih platformi i okolnih tankera, ove fluktuacije iznosile su oko 15 dB. Priroda ovih fluktuacija drugačija je u odnosu na one kod mikrotalasnih radara, koje se modeluju drugačijim tipom meta Sverlingovog tipa [63]. Pokazano je da u slučajevima interakcije meta koje manevrišu, postoje fluktuacije uzajamne RCS u opsegu od 10 dB do 20 dB, pogotovo u RCS rezonantnom režimu. Rezonantni režim predstavlja RCS režim HFSWR meta, gde su dimenzije mete i talasne dužine radara istog reda veličine. U takvom RCS regionu meta najviše doprinosi svojoj RCS vrednosti u celini [64].

U [65] urađena je analiza radarске površine za HFSWR na frekvenciji od 7 MHz, tj. talasne dužine  $\lambda$  od 42.83 metara. Pri tome je za simulaciju i merenje RCS u zavisnosti od relativnog ugla između položaja plovila i položaja radara korišćen model, čija je dužina  $5.5 \lambda$ , širina  $0.75 \lambda$  a visina  $0.65 \lambda$ . Rezultati simulacije pokazani su na slici (2.11), pri čemu je na ordinati data normalizovana vrednost RCS  $\sigma/\lambda^2$ . Dobijen rezultat pokazao je da je neskaliрана maksimalna vrednost RCS (rezonantni režim) za 26.6 dB viša u odnosu na svoj minimum. Na osnovu ovih podataka moguće je vršiti analizu detektabilnosti meta, ali je jasno i kakav uticaj radarska kros-sekcija može imati na praćenje ciljeva.

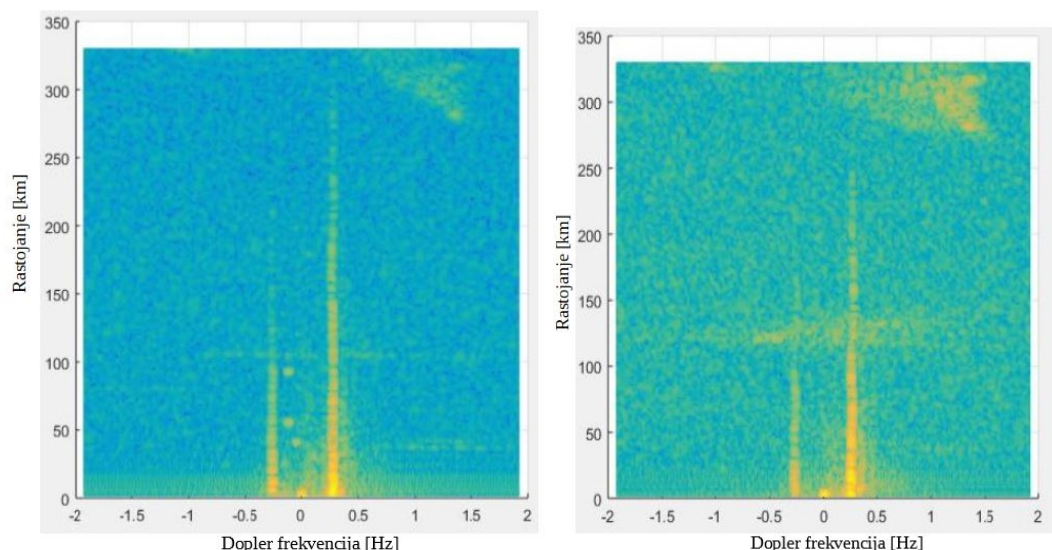


Slika 2.11. Dijagram normalizovane RCS simulirane mete u odnosu na relativni ugao položaja mete i radara [65]

### 2. 3. 3 Jonosferski klater u okruženju HFSW radara

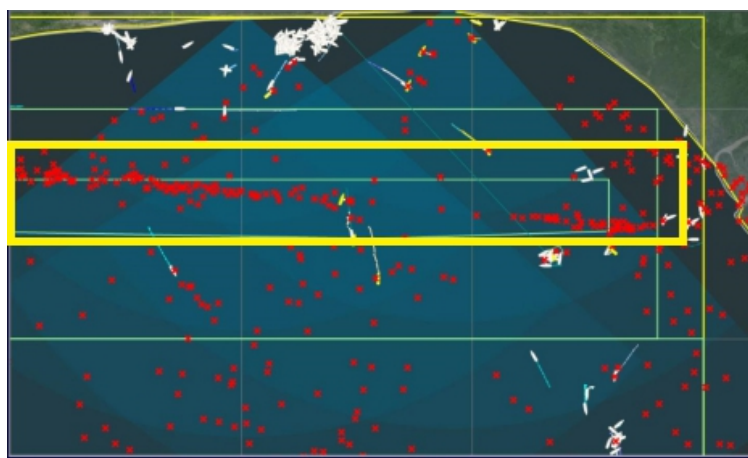
Jonosferski klater predstavlja štetni povraćaj signala HFSWR od jonosferskih slojeva [48] nazad ka izvoru, čija je direktna posledica činjenica da se energija koju emituje radar ne propagira u potpunosti preko površine okeana. Jedan deo ove energije je usmeren naviše i može se reflektovati od jonosfere. U toku dnevnih časova apsorbivne osobine D sloja sprečavaju reflektovanje značajnog dela energije prema zemlji. Međutim, u toku noći D sloj nestaje i najveći deo energije reflektuje se preko E i F sloja jonosfere. Prema [59], postoje 3 glavne kategorije jonosferskog klatera. Jednorefleksioni ili odbitak prvog reda predstavlja rezultat jedne refleksije. Odbitak drugog reda je slučaj u kome se signal inicijalno odbija od jonosfere, pa nazad ka okeanu, a zatim, kao površinski talas nazad prema radaru (ili obrnuto). Odbitak trećeg reda predstavlja putanju signala koji se inicijalno odbija od jonosfere prema okeanu, zatim opet prema jonosferi i na kraju, prema radaru. Zbog geometrije rasejanja trećeg reda, ukupna dužina putanje ovog klatera tipično je veća od maksimalnog dometa radara, a zbog slabljenja na putanji ne predstavlja problem za HFSWR. Kod klatera drugog reda, potencijalan uticaj na HFSWR imaju samo one putanje koje su kraće od maksimalnog dometa radara, što praktično ograničava realne slučajeve na uglove zračenja prema radaraskom položaju bliske vertikalnoj osi [59]. Da bi se desile jake refleksije od okeana, potrebno je da bude ispunjen uslov Bragovog rezonantnog rasejanja. Pri uglovima zračenja bliskim vertikalnoj osi, potrebno je, dakle, da je talasna dužina okeanskih talasa bliska talasnoj dužini radarskog snopa. Međutim, na donjem delu HF opsega, to je moguće samo pri vrlo velikoj agitaciji morske površine, tj. visokom stanju mora, pa se ova vrsta povraćaja najčešće manifestuje na rastojanjima koja odgovaraju jonosferskom F sloju i dalje, održavajući približno istu snagu signala. Jonosfersko rasejanje prvog reda se javlja u uskom opsegu rastojanja koji odgovaraju visini E i F slojeva i predstavlja najveći problem od razmatranih vrsta povraćaja. Jedan od načina ublažavanja problema je emisija radarskih snopova na više radarskih frekvencija [66], koje mogu rezultirati povraćajima na različitim visinama.

Modelovanje jonosferskog klatera se bazira na dva pristupa, stohastičkim modelovanjem signala i teorijom propagacije radio talasa. Prvi pristup, baziran na pretpostavci Gausove raspodele, analiziran je u [67] i [11], a simulacioni model zasnovan na teoriji propagacije radio talasa, koji uzima u obzir efekte neregularnosti gustine jonosferske plazme, predstavljen je u [68]. Detaljna izlaganja ovih modela nisu od značaja za ovu disertaciju, ali će biti ukazano na manifestaciju same pojave i njene posledice u CFAR algoritmu. Na slici (2.12) prikazane su RD mape, kao primer manifestacije pojave kroz refleksije iz E i F sloja, istovremeno.



Slika 2.12. Lokalizacija interferentnih pojava u RD mapama za različite uglove u odnosu na MRA osu, za  $\theta_{A.MRA} = 0^\circ$  (levo) i  $\theta_{A.MRA} = 60^\circ$  (desno)

Slika (2.12) pokazuje da jonosferski odbici imaju lokalno svojstvo, pošto su prikazane RD mape napravljene nakon bimforming procesa, za razliku u uglovima od  $60^\circ$ . Na slici levo je prikazana situacija za  $\theta_{A.MRA} = 0^\circ$  gde se može primetiti da interferencija postoji u malim tragovima. Sa druge strane, na desnoj strani slike uočava se prisustvo pojave na rastojanju od oko 120 km od radara, što odgovara refleksijama prvog reda iz E sloja. Na daljinama od 300 km i visokim Doppler frekvencijama lokalizovana je refleksija iz F sloja. U oblastima pogođenim interferencijom javljaju se velike amplitude povraćaja, koju su u mogućnosti da maskiraju koristan signal. Tipična posledica je povećanje gustine klatera na izlazu CFAR, koja se mora uzeti u obzir prilikom konstrukcije procedure praćenja, koja mora biti ispravno lokalizovana i detektovana. To implicira upotrebu estimatora lokalne gustine klatera, čija je uloga procena modifikacije gustine klatera i verovatnoće lažnog alarma. Manifestacija jonosferskog klatera iz E sloja prikazana je na primeru na slici (2.13). Žutim pravougaonikom oivičena je pogođena oblast, a crvenim markerima izlaz CFAR detektora.



Slika 2.13. Manifestacija jonosferske interferencije u vidu klatera na izlazu CFAR algoritma (crvene tačke) za HFSWR 0, uzorak 10.05.2020. godine

## 2.4 Metodologija ocene performansi procedura praćenja ciljeva

Način ocene performansi procedura praćenja oslanja se na AIS podatke, kao jedinu moguću upotrebljivu istinitu referencu na terenu. Korisne AIS informacije predstavlja set statičkih i dinamičkih informacija predstavljen u odeljku (2.2). Ove informacije se transformišu u set mernih vektora pridruženih radaru sa čijim podacima praćenja poredimo AIS informacije. Svaki merni vektor se proširuje podacima o poziciji i pridružuje mu se jedinstvena oznaka o identifikaciji (MMSI broj). Na osnovu pozicije, COG i SOG informacija i pozicije radarskog položaja, određuju se parametri mernog vektora prema radaru, pa se za zadati skup od  $N$  zabeleženih različitih MMSI brojeva u datom uzorku, definišu skupovi vektora stanja za svaki MMSI. Neka je broj zabeleženih podataka za dati MMSI broj  $N_{\text{MMSI}}(n)$ . Tada se AIS podaci za ovu metu predstavljaju skupom vektora:

$$\begin{aligned}\varphi_k &= \{\rho_k, \theta_k, v_{\rho,k}\} \\ \pi_k &= \{x_{\text{LAT},k}, x_{\text{LON},k}\} \\ \vartheta_{\text{AIS},k}^{\text{MMSI}_n} &= \{\pi_k; \varphi_k\}, k = 1..N_{\text{MMSI}}(n), n = 1..N\end{aligned}\quad (2.24)$$

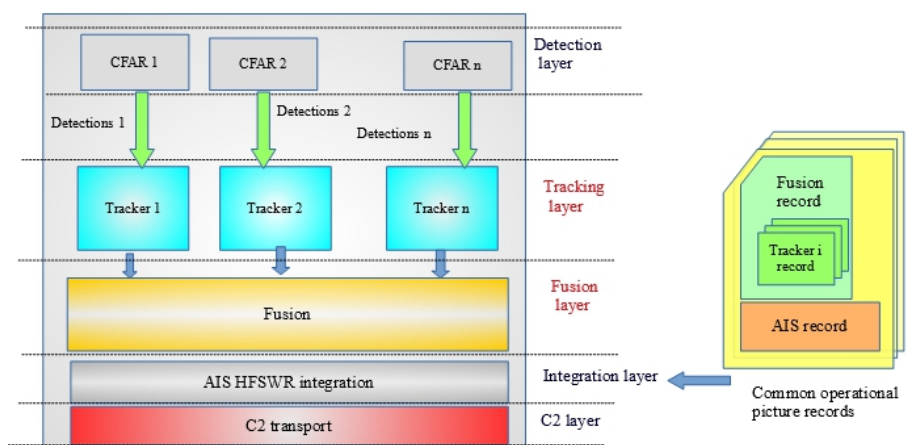
gde  $x_{\text{LAT},k}, x_{\text{LON},k}$  predstavljaju geografsku širinu i dužinu mete,  $\rho_k$  je rastojanje od radara,  $\theta_k$  je azimut AIS mete u odnosu na usvojeni koordinatni sistem pridružen radaru, a  $v_{\rho,k}$  je radijalna brzina AIS mete u usvojenom koordinatnom sistemu, za  $k$ -ti element skupa podataka sa datom identifikacijom MMSI. Emisija AIS poruka je očekivano veća od CIT intervala ( $T_{\text{CIT}}$ ) radara. Ovi podaci se filtriraju na takav način da se ili interpolira pozicija za zadato vreme  $t_r$  koje odgovara radaru ili se usvaja maksimalno vreme za koje se može smatrati da se pozicija AIS neće promeniti za prosečnu dužinu mete. S obzirom na veličinu brodova i njihovu relativno malu brzinu, može se smatrati da se bez interpolacije, kao validni za zadato vreme radara  $t_r$  mogu usvojiti svi podaci za čije vreme  $t_{\text{AIS}}$  je ispunjeno  $|t_r - t_{\text{AIS}}| \leq \Delta T_{\text{max}}$ , pri čemu se za  $\Delta T_{\text{max}}$  ne usvaja vrednost veća od 5 s.

Procedura praćenja ciljeva obezbeđuje podatke o tragovima u formi kao u jednakosti (2.24), pa se lokalizacioni kapacitet detektovanih meta određuje grafikom distribucije greške odstojanja i distribucije greški po svakom od članova vektora  $\varphi_k$ , u okvirima posmatranog uzorka, za svaki CIT interval u kome postoji poklapanje AIS mete sa posmatranim tragom, generisanim procedurom praćenja. Parametri distribucije greški, srednja vrednost i standardna devijacija, poređeni sa veličinom rezolucione ćelije radara, ukazuju na lokalizacione mogućnosti procedure praćenja. Odstojanje AIS mete i radarskog traga računa se po modelu WGS-84 elipsoida [69]. Pomoćni način



provere lokalizacionog kapaciteta procedure praćenja je vizuelna prezentacija otisaka promovisanih (potvrđenih) tragova sa perzistencijom na ekranu, u toku određenog vremenskog perioda, tipično 1 dan.

Način asocijacije AIS tragova i tragova procedure praćenja radara obavlja se preko pravila integracije AIS i fuzionisanih tragova, opisanih u [8] i [6]. Na slici (2.14) je prikazana uprošćena šema nivoa obrade u sistemu za osmatranje meta u Gvinejskom zalivu. Procedure praćenja čine tzv. prateći sloj, čiji se podaci kombinuju u fuzionom sloju. Podaci fuzionog sloja se u integracionom sloju obrade uparuju sa AIS podacima, zadržavajući pri tome i informacije o tragovima iz sloja praćenja, utisnutim u fuzione podatke. Integracioni podaci, prikazani sa desne strane slike (2.14), sadrže sve informacije o tragovima, potrebne za ocenu kvaliteta praćenja i pojedinačnih radara. Kada se ispituju pojedinačni radari, fuzioni sloj je potpuno transparentan u odnosu na tragove iz nižeg sloja praćenja, pa je na taj način omogućeno direktno poređenje AIS podataka i tragova procedure praćenja radara.



Slika 2.14. Postupak ekstrakcije AIS i podataka procedure praćenja iz integracionog sloja sistema za monitoring HFSWR mreže u Gvinejskom zalivu

Generalni parametri za ocenu performansi HFSW radara definisani su i primenjeni u [26] i predstavljaju ukupnu ocenu kvaliteta praćenja meta HFSW radarima u najgorem slučaju. Odnos vremena praćenja mete (engl. *Time-on-Target* - ToT) predstavlja odnos između vremena za koje procedura praćenja prati zadatu metu, potvrđenu AIS podacima i ukupnog vremena koje je meta provela u zoni pokrivanja radara, prema dostupnim AIS podacima [26]. Izražava se u procentima. Ukoliko vreme iskažemo u broju CIT ciklusa  $N_{CIT}$ , tada se, za uzorak praćenja određenog trajanja u kome je prijavljena pojava  $m_{AIS}$  meta u zoni pokrivanja radara  $\alpha_i, i = 1..m_{AIS}$ , ToT parametar izračunava na sledeći način:

$$ToT = \frac{\sum_{i=1}^{m_{AIS}} N_{CIT}^P(\alpha_i)}{\sum_{i=1}^{m_{AIS}} N_{CIT}^T(\alpha_i)} \cdot 100 [\%], \quad (2.25)$$

gde  $N_{CIT}^P(\alpha_i)$  predstavlja ukupan broj događaja CIT intervala u kojima je zabeleženo praćenje AIS cilja  $\alpha_i$ , a  $N_{CIT}^T(\alpha_i)$  je ukupan broj CIT intervala u kome je zabeleženo praćenje AIS mete unutar zone pokrivanja radara, od prvog pojavljivanja do poslednjeg zabeleženog intervala u vremenskim okvirima posmatranog uzorka. U ovaj broj ulaze i CIT ciklusi u kojima nije zabeleženo ažuriranje AIS pozicije, ali je, na osnovu susednih ažuriranja sigurno tvrditi da AIS meta u takvim ciklusima boravi u zoni praćenja, na osnovu interpolacije rute mete. Pri tome je potrebno usvojiti kritično vreme bez ažuriranja AIS pozicije, za koje smatramo da takva interpolacija ima prihvatljiv rezultat. S obzirom na tipične brzine brodova koji su predmet praćenja HFSW radara do 20 m/s (mada je realno, brzina znatno manja), razumno je usvojiti kritično vreme validnosti interpolacije od 1 h. Tipično, vreme uzorka za koji se meri ToT je 1 dan, a jedna od prihvaćenih metodologija za ocenu performansi praćenja, takođe primenjena u [26] je zavisnost ToT od rastojanja i ugla u odnosu na MRA osu radara. Ona se dobija na većem broju uzoraka, tipičnog trajanja od 1 dan,  $N_s$ , pri čemu se, za usvojeni korak podele skale rastojanja odnosno ugla, zbrajaju svi CIT ciklusi pogodaka praćenja unutar zadatog koraka podele i porede sa brojem ciklusa AIS pogodaka unutar zadatog koraka. Zatim se vrši usrednjavanje podataka po uzorcima. Neka je korak podele po rastojanju  $\Delta r$  [km]. ToT se računa u intervalima  $r \in [k\Delta r, (k+1)\Delta r)$  za uzorak  $n_s=1..N_s$ , u skladu sa definicijom (2.25):

$$ToT^{n_s}(r) = \frac{\sum_{i=1}^{m_{AIS}} N_{CIT}^P(\alpha_i, r)}{\sum_{i=1}^{m_{AIS}} N_{CIT}^T(\alpha_i, r)} \cdot 100 [\%], n_s = 1..N_s, \quad (2.26)$$

Usrednjena zavisnost  $ToT(r) = \overline{ToT^{n_s}(r)}$  po svim uzorcima predstavlja krivu zavisnosti ovog parametra od rastojanja od radara. Na analogan način definiše se raspodela ToT po uglu u odnosu na MRA osu, ali i bilo koju drugu veličinu od interesa, na primer, brzinu mete.

Stopa lažnih alarma (engl. *False Alarm Rate* - FAR) se definiše kao ukupan broj pojava praćenja meta  $N_{CIT}^{PF}$  koje su označene kao lažni tragovi u toku trajanja uzorka koji se sastoji od  $K_{CIT}$  iteracija, normalizovana ukupnim vremenom trajanja uzorka  $T_U$  i površinom zone pokrivanja radara  $P_C$ :

$$FAR = \frac{1}{T_U P_C} \sum_{1 \leq k \leq K_{CIT}} N_{CIT}^{PF}(k) \left[ \frac{1}{\text{skmm}^2} \right] \quad (2.27)$$

Na sličan način kao i ToT i ovaj parametar se može prikazati kroz zavisnost od rastojanja i ugla u odnosu na MRA osu radara, pri čemu se dodatno normalizuje rezultat korakom  $\Delta r$ . Prateći već opisanu notaciju, ova zavisnost se može iskazati sledećim jednakostima:

$$FAR^{n_s}(r) = \frac{1}{\Delta r T_U P_C} \sum_{1 \leq k \leq K_{CIT}} N_{CIT}^{PF}(k, r) \left[ \frac{1}{\text{skmm}^2} \right], \quad (2.28)$$

$$FAR(r) = \overline{FAR^{n_s}(r)} \quad (2.29)$$

pri čemu je  $N_{CIT}^P(k, r)$  broj praćenja lažnih ciljeva u k-tom CIT ciklusu uzorka  $n_s$  u opsegu rastojanja  $r$  od radara. Na analogan način definiše se i zavisnost FAR parametra od ugla u odnosu na MRA osu.

ToT i FAR parametri predstavljaju generalnu ocenu kvaliteta sveukupnog praćenja HFSW radarima i primenjuju se i na detekcije radara, pored analize tragova koje formira procedura praćenja. Naročito su korisni za generalnu ocenu praćenja procesa fuzije HFSWR mreža. Jasno je da u idealnom sistemu ToT parametar ima vrednost 100%, i ne postoje lažni alarmi. Međutim, oni ne mogu pružiti dobar uvid u probleme koji se mogu trenutno ili kratkotrajno javljati prilikom aktivnog praćenja. Za takve potrebe potrebno je definisati parametre koji ispravno ukazuju na stanje praćenja u maniru ToT i FAR parametara. Neka je IToT (engl. *Immediate ToT*) parametar kumulativnog karaktera, definisan kao odnos skupa svih pogodaka praćenja AIS meta u intervalu  $[mT_{CIT}, (m+k)T_{CIT}]$ , sa proizvoljnim stepenom preklapanja između susednih izračunavanja i skupa svih AIS prijavljenih pozicija u posmatranom intervalu vremena:

$$IToT(m, k) = \frac{\sum_{i=mT_{CIT}}^{(m+k)T_{CIT}} N_{CIT}^P(i)}{\sum_{i=mT_{CIT}}^{(m+k)T_{CIT}} N_{CIT}^T(i)} \quad (2.30)$$

U slučaju nepostojanja AIS meta, IToT parametar ima vrednost nula. Ovaj parametar je pogodan za opis situacija kada postoji problem sa komunikacijom između HFSWR položaja ili sa izvorom AIS signala, koji su veoma čest slučaj, s obzirom na lokacije na kojima se ovakvi sistemi instaliraju.

Za ocenu i detekciju eventualnih problema u praćenju, koji su posledica uticaja morskog klatera ili jonosferske interferencije, definiše se IFAR (engl. *Immediate FAR*) parametar, na sličan način kao IToT parametar

$$IFAR(m, k) = \frac{1}{kT_{CIT}P_c} \sum_{i=mT_{CIT}}^{(m+k)T_{CIT}} N_{CIT}^{PF}(i) \left[ \frac{1}{sm^2} \right], \quad (2.31)$$

## 2.5 Integrisano osmatranje mora primenom HFSWR mreža

Sistem za integrisano osmatranje mora baziran na HFSWR sensorima predstavlja sistem koji vrši funkcionalnu sintezu raznih nautičkih senzora, a pre svega HFSWR, AIS i elektro-optičkih senzora, kako bi se dobila tzv. jedinstvena operaciona slika pomorskog osmatranja, integrisale radio-veze različitih tipova i omogućio objedinjeni pristup podacima korisnicima različitog profila preko dostupnog komunikacionog kanala. Prvi poznati opis implementiranog IMS sistema, zajedno sa opisom fizike HFSW radara i parametara koji ovakav sistem definišu, dali su A. Ponsford i L. Sevgi u [11] i [12]. Sistem je definisan za osmatranje površine i vazdušne aktivnosti na malim visinama u okvirima EEZ. Instaliran je na kanadskoj istočnoj obali u okolini Njufaundlend ostrva i

sastoji se od dva HFSWR i tzv. operacionog komandno-kontrolnog centra. Region osmatranja je Grend Benks, Kanada, poznat po bogatstvu resursa, kao što su nafta i riba. Sistem može biti korišćen za praćenje plovila i ledenih bregova, spasilačke operacije, zaštitu resursa i okeanografska merenja. Njegova funkcija je da vrši detekciju praćenje i klasifikaciju površinskih i vazdušnih meta (u opštem slučaju) u zoni senzorskog pokrivanja. Sastoji se od 4 primarne komponente:

1) HFSWR senzori, čija je uloga detekcija i praćenje površinskih i vazdušnih meta unutar EEZ.

2) Automatski identifikacioni sistem, koji automatski prijavljuje identifikaciju i poziciju kooperativnih objekata u pravilnim vremenskim intervalima.

3) Komplementarni senzori i sistemi: uključen je širok spektar senzora koji obezbeđuju dodatne informacije ili drugi sistemi koji obezbeđuju ad hoc informacije o metama.

4) Multi-senzorski asocijativni procesor (engl. *Multi-Sensor Association Processor* - MSAP). Njegova uloga je asocijacija detekcija HFSWR, čime se formiraju tragovi i kombinuju sa podacima dobijenim od strane automatskog identifikacionog sistema i drugih senzora da bi se obezbedila kompletna jedinstvena operaciona slika aktivnosti u zoni osmatranja. Izlaz MSAP se skladišti u bazu podataka, čiji se podaci prikazuju na različitim monitorima korisnika.

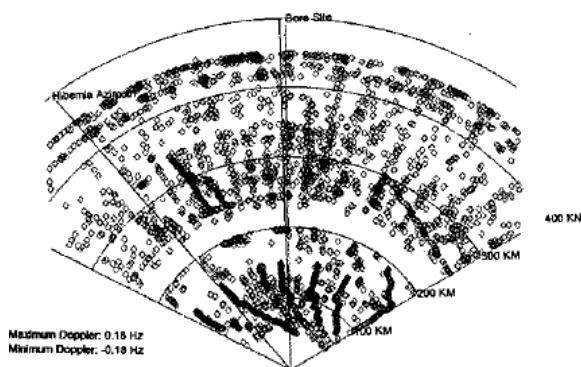
U istom radu [12] navodi se pregled parametara koji su bitni za evaluaciju performansi ili pojave koje mogu negativno uticati na performanse:

- Performanse HFSW radara mere se njihovom sposobnošću da detektuju i prate mete na velikim rastojanjima i da razlikuju mete koje su na bliskim međusobnim rastojanjima. *Domet* HFSW radara je limitiran bilo eksternim šumom bilo nivoima interferencije.
- *Rezolucija* je sposobnost radara da razlikuje dve mete na bliskom međusobnom rastojanju. Većina HFSW radara detektuje mete u trodimenzionom prostoru rastojanje-azimut-radikalna brzina (Doplerov pomak). Njihova rezolucija na prvi pogled nije velika, na primer, tipična rezolucija po rastojanju je od 1 km do 7 km. Međutim, dve mete mogu biti razlučene iako imaju isto rastojanje ukoliko su razdvojene po druge dve dimenzije. Verovatnoća postojanja dve mete na bliskom rastojanju po sve tri dimenzije ipak nije velika. U slučaju da dve mete ne mogu biti razlučene, radar će pratiti veću metu ili kompozitni povraćaj obe.

Rezolucija po rastojanju je direktno proporcionalna propusnom opsegu transmitovanog signala. Na primer, impulsni HFSW radari primenjeni u ovom primeru tipično rade u opsegu širokom 20 KHz, pri čemu je rezolucija oko 7 km. Sa druge strane, tipični propusni opseg HFSW radara sa primenjenim FMCW signalom je 100 kHz, pri čemu je rezolucija oko 1.5 km. Rezolucija po uglu je direktno proporcionalna veličini aperture antenskog niza. Apertura se izražava u talasnim dužinama radarskog emitujućeg signala. Za antenski niz sa separacijom od  $1/2$  talasne dužine i 16 antena u nizu, širina snopa na položaju upravnom na osu niza (engl. *boresight*) iznosi oko  $9^\circ$ . Međutim, na daljini od 370 km od radara, tolika širina snopa ima

dužinu luka od preko 54 km. Problem postaje još veći kako se ugao u odnosu na položaj upravan na osu niza povećava, jer se i širina snopa povećava.

- *Verovatnoća detekcije*  $P_D$  je mera očekivanja da će meta sa datim odnosom signal-šum biti detektovana. Varijacije u snazi signala i nivoa šuma ili nivoa klatera određuju verovatnoću da li će signal na graničnoj vrednosti odnosa signal-šum biti detektovan. *Verovatnoća lažnog alarma*  $P_F$  je određena očekivanjem da će šum ili klater premašiti datu graničnu vrednost. Što je granična vrednost veća, niža je verovatnoća lažnog alarma. Broj lažnih alarma za dato vreme skeniranja tj. koherentno integraciono vreme jednak je proizvodu verovatnoće lažnog alarma i broja nezavisnih ćelija po sve 3 dimenzije rezolucije. Kao posledica, čak i za relativno male vrednosti  $P_F$ , broj nezavisnih ćelija može biti i nekoliko miliona, što dovodi do velikog broja lažnih detekcija. Uzročnik najvećeg broja lažnih detekcija je jonosferski klater, koji se u detekcionom izlazu radara karakteriše kao više skupova detekcija koje odgovaraju vertikalnom rastojanju od raznih jonosferskih slojeva. Izlaz CFAR detektora se, eventualno, može dodatno obraditi blokom za ekstrakciju tačkastih ciljeva, tzv. plot-ekstraktorom. Samo one detekcije koje po svakoj dimenziji formiraju otisak kakav se očekuje od tačkaste mete, se prosleđuju narednom bloku, kao centroidni pogotci, koji reprezentuju estimiranu poziciju mete. Ovaj naredni blok je blok praćenja, koji vrši asocijaciju sukcesivnih pogodaka, kako bi formirao tragove. Veliki broj lažnih alarma povezanih sa HFSW radarom dovodi do moguće pojave lažnih tragova. Autori u [12] navode primer na uzorku od samo 75 minuta praćenja (30 perioda koherentne integracije), u toku kojeg postoji samo desetak realnih nautičkih meta i na hiljade lažnih alarma, slika (2.15). Ovako visok broj lažnih alarma je neizbežan, ukoliko se želi minimizirati broj propuštenih detekcija. Dužnost je dizajnera procedure praćenja da se toj situaciji prilagodi i da obezbedi da blok za praćenje ne dozvoli propagaciju lažnih tragova u narednim blokovima obrade.



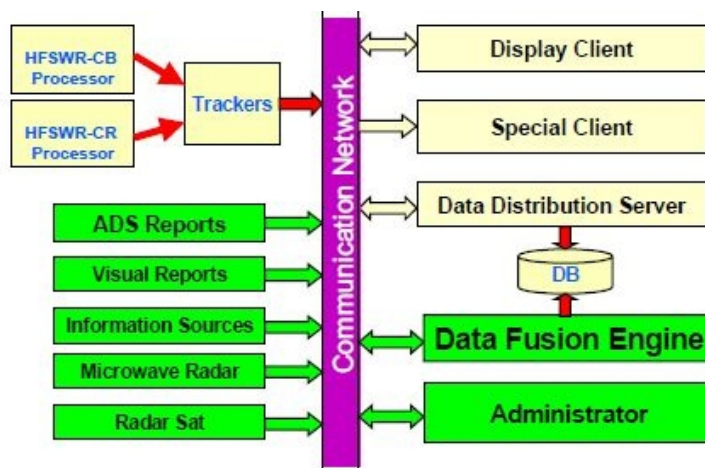
Slika 2.15. Skup detekcija u toku 75 minuta praćenja (30 ciklusa) Kejp Rejs HFSW radarom, zabeležen 02.02.1999. godine, koji pokazuje izuzetno visok nivo lažnih alarma, preuzeto iz [12]

- Procedura praćenja* ima ulogu asocijacije sukcesivnih detekcija kako bi se formirali tragovi. Ovaj zadatak obavlja MSAP, koji se, prema [12], sastoji od tri komponente, multi-senzorskog fuzionog procesora (MSFP), multi-hipoteznog praćenja (MHT) [15] i estimatora baziranog na adaptivnom proširenom Kalmanovom filtru (AEKF). MSAP preduzima kombinovani zadatak senzorske fuzije, praćenja, fuzije tragova i kalibracije. Asocijacija na nivou senzora podataka u realnom vremenu obavlja se po principu asocijacije raporta i tragova. Ovaj proces inkorporira karakteristike individualnih senzora i procenjuje značaj pojedinačnih raporta prema tim specifičnostima. U tom smislu, raporti AIS sistema imaju veću težinu od HFSWR raporta, jer se smatraju preciznijim, pa će se njima dodeliti veća težina. Senzorski raporti koji se pojavljuju u nepravilnim vremenskim intervalima se korelišu na nivou traga i služe da obezbede identifikaciju traga i njegov menadžment.
- Verovatnoća lažnog traga  $P_{FT}$  i verovatnoća propuštanja traga  $P_{MT}$*  predstavljaju odličnu meru ukupnih performansi HFSW radara. Verovatnoća lažnog traga je mera poverenja da je izlaz procedure praćenja zaista trag koji potiče od realne mete. Ta verovatnoća bi, podrazumevano, trebalo da raste sa sve više asociраних detekcija. Ona bi trebalo biti specificirana za dve različite klase pojava, koje odgovaraju detekcijama koje su produkt šuma ili produkt klatera. Ova dva slučaja se razlikuju u tome što je u slučaju produkta šuma, detekcija nije vezana za transmisioni signal, dok je to svakako slučaj za detekcije nastale usled klatera. Na vrednost  $P_{FT}$  dominantno utiče klater koji potiče od refleksija iz E i F jonosferskog sloja, kao i pikovi morskog klatera. Jonosferski klater se akumulira u odgovarajućem nazivnom opsegu rastojanja, koji odgovara udaljenosti jonosferskog sloja, obuhvatajući oblast od nekoliko desetina ćelija po rastojanju, najčešće po svim uglovima i većim delom Doplerovog opsega.

Asocirane detekcije prolaze kroz dva prelazna stanja pre nego što se proglase validnim tragovima. Ovakva šema je upotrebljena radi spuštanja vrednosti  $P_{FT}$  na što manju vrednost, zadržavajući pritom relativno visoku verovatnoću iniciranja tragova za konačnu vrednost verovatnoće detekcije. Na taj način, ističe se, sve prednosti M/N pravila [15], koja se klasično koriste za inicijaciju tragova, mogu biti iskorišćene u svim slučajevima.
- Klasifikacija tragova* kod HFSW radara je u dobroj meri limitirana. Taj proces se ograničava na vrlo širok opseg, određen procenom, na osnovu vrednosti radijalne brzine i procene vrednosti RCS. Nije moguće, dakle, obezbediti pozitivnu identifikaciju mete. Identifikacija mete je ključ efektivnog menadžmenta osmatranja i, za mete koje ne žele da se identifikuju (tzv. nekooperativne mete), potrebno je obezbediti direktna izviđačka sredstva. Kada se mete identifikuju, dužnost je procedure praćenja da održi dobijeni identitet mete dokle god je detektovana unutar zone osmatranja.

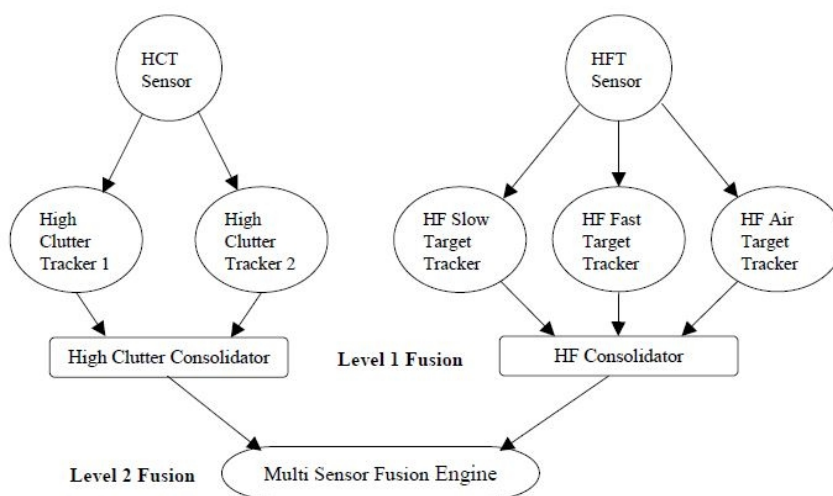
- *Operacioni kontrolni centar* (Operational Control Center - OCC) ili, kraće, komandno-kontrolni centar (C2 centar), predstavlja srce IMS sistema. Podaci sa HFSW radara se prebacuju u OCC putem dostupnog komunikacionog kanala i obrađuju da bi se kao rezultat dobila jasna i kompletna operaciona slika osmatranja (engl. *Common operational Picture - COP*). Relevantne informacije se zatim distribuiraju odgovarajućim organizacijama. Konfiguracija OCC i način interakcije sa organizacijama zaduženim za nacionalnu bezbednost, osmatranje, spasilačke operacije itd. se dizajniraju prema individualnim potrebama. MSAP generiše i klasifikuje tragove poreklom od HFSW radara. One mete koje su praćene AIS sistemom su automatski identifikovane. MSAP koristi druge dostupne informacije da automatski identifikuje tragove. Identifikacija preostalih tragova se vrši manuelno. Ovo se postiže preko radnih operatorskih stanica, koje prikazuju sve tragove koje proizvede MSAP i imaju mogućnost prikaza informacija iz drugih izvora kako bi se pomoglo procesu identifikacije. Ti drugi izvori mogu biti komunikacioni izviđački raporti patrolnih čamaca ili avijacije, kao i podaci o rutama brodova i njihov vremenski raspored.

U pomenutim radovima [11][12] izložen je i obrazložen niz parametara kojim se ocenjuju performanse jednog složenog sistema osmatranja. Zbog svoje opštosti, priloženih eksperimentalnih podataka i prihvaćenosti u naučnim krugovima i praksi, tom radu je u ovoj disertaciji posvećena odgovarajuća pažnja. Na žalost, autori se ne bave u odgovarajućoj meri načinom eliminacije lažnih tragova, pogotovo onih koji su posledica jonosferske interferencije, koji se javljaju na većim, izahorizontskim daljinama, niti proučavaju efekte koji se javljaju pri uzburkanom moru i kakve posledice ostavljaju u procesu praćenja ciljeva. Sa druge strane, sam koncept IMS je izuzetno opšti i u kratkim crtama. Novi predlog i razrada koncepta IMS baziranog na HFSWR mreži nalazi se u [32], u kome se uvode pojmovi lokalnog, regionalnog i nacionalnog IMS sistema i predstavlja novi fuzioni model, po analogiji na opisani MSAP [12]. Arhitektura IMS prikazana je na slici (2.16).



Slika 2.16. Arhitektura IMS sistema, prema [32].

Po autorima, lokalni IMS sistem je sistem koji sadrži grupu HFSW radara, obeleženih na slici (2.16) sa HFSWR-CB i HFSWR-CR prema simbolima lokacija opisane mreže na istočnoj kanadskoj obali, i drugih senzora. Pod specijalnim klijentima podrazumeva se poverljivi klijent koji ima potrebu za podacima mreže preko sigurnog komunikacionog kanala. Raspodelu podataka svim klijentima obavlja distribucioni server podataka. U literaturi se fuzioni procesi često kategorišu kao fuzije niskog, međuslojnog i visokog nivoa, koju su usvojili i autori u [32]. Fuzija niskog nivoa kombinuje nekoliko izvora sirovih podataka da bi proizvela izlaznu informaciju koja bi trebalo da je na višem nivou informativnosti od ulaza. Ova fuzija se obavlja samo sa relevantnim podacima različitih senzora. Međuslojna fuzija kombinuje razne osobine senzora i njihovih podataka. Fuzija visokog nivoa kombinuje odluke koje potiču iz više ekspertskih izvora. Može se govoriti o fuziji odluka, čak i kad ekspertski izvor vraća parametar uverenja u odluku umesto same odluke. U predlogu [32], dvonivoska fuzija bi se obavljala na nižem i međuslojnom nivou, sa mogućnošću povezivanja komponente višeg nivoa. Fuzija na prvom nivou se obavlja sa strane radara, razdvojenih u dve grupe. Prvu grupu čine HFSW radari i njihove procedure praćenja (tzv. HFT) za spore, brze i vazdušne ciljeve. Drugu grupu čine mikrotalasni radari i senzori za detekciju malih meta, tj. njihove procedure praćenja (tzv. HCT). Obe grupe poseduju konsolidator tragova ili kombajner, čija je uloga spajanje i sortiranje podataka. Kada svaki sistem obavi fuziju prvog nivoa, poslaće konsolidovane podatke multi-senzorskoj fuziji na finalnu integraciju. Blok dijagram ovih procesa prikazan je na slici (2.17). Prema [32], prednost ove šeme što bi omogućila bilo kojem HCT ili HFT podsistemu nesmetan samostalan rad, čime se ovi podsistemi čine međusobno nezavisnim. Dodavanje novih podsistema podrazumevalo bi samo dodavanje modula za slanje podataka multi-senzorskoj fuziji.



Slika 2.17. Blok šema dvonivoske fuzije senzora, primenjene u [32]

Komunikacija između senzora i modula multi-senzorske fuzije obavlja se preko TCP/IP protokola i soketa. TCP/IP je izabran za transfer protokol kao pouzdaniji nego UDP protokol.



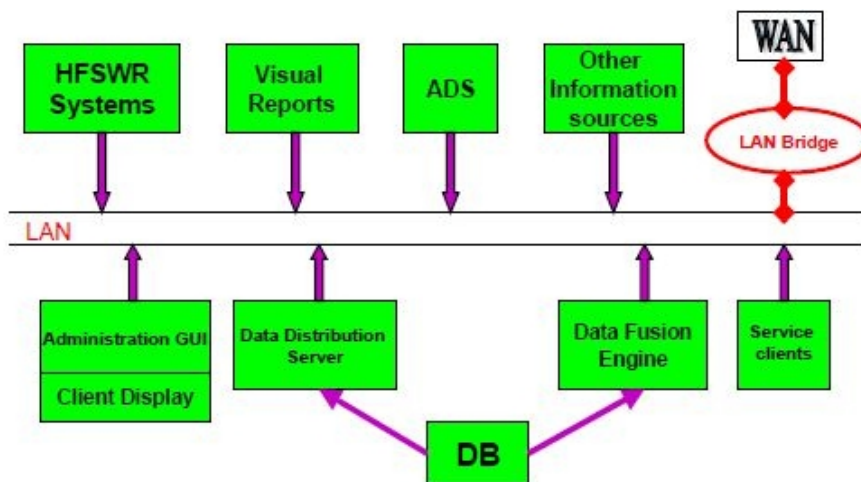
Dizajn predložene arhitekture IMS, slika (2.18), predviđa postojanje lokalnih IMS (LIMS) i regionalnih IMS (RIMS) centara, a sama arhitektura bi se mogla lako konfigurirati kao LIMS ili RIMS sistem.



Slika 2.18. Hijerarhija IMS, preuzeto iz [32]

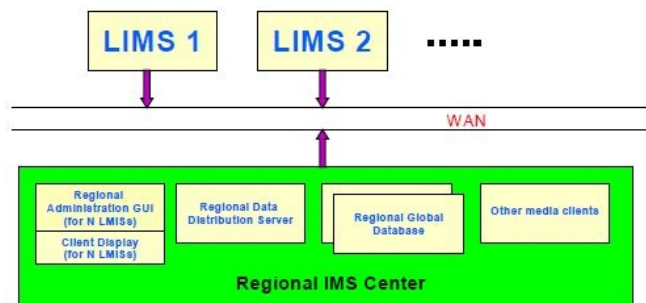
Predložena hijerarhija je tronivoski sistem, čiji nivoi predstavljaju redom klijentski, servisni i nivo podataka. Separacija ovih nivoa dovodi do lakšeg održavanja i nadogradnje sistema.

Struktura LIMS IMS predložena u [32] je data na slici (2.19).



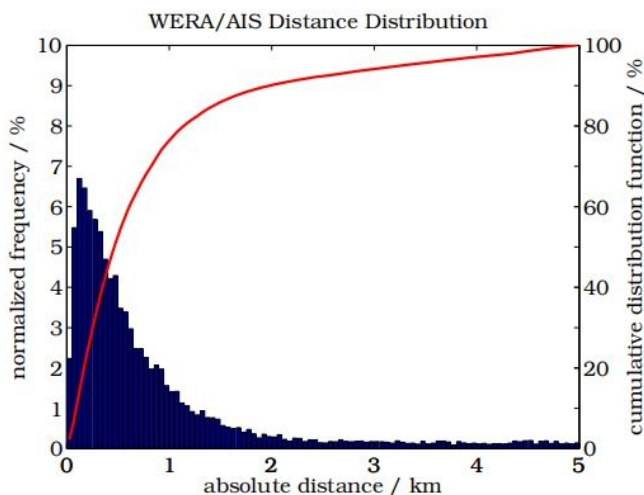
Slika 2.19. Predložena arhitektura lokalnog IMS sistema, prema [32]

Regionalni IMS može imati ulogu koordinacije nekoliko LIMS sistema. Koordinacija se obavlja preko WAN mreže (engl. *Wide Area Network*). Generalna struktura je prikazana na slici (2.20).



Slika 2.20. Predložena arhitektura regionalnog IMS, preuzeto iz [32].

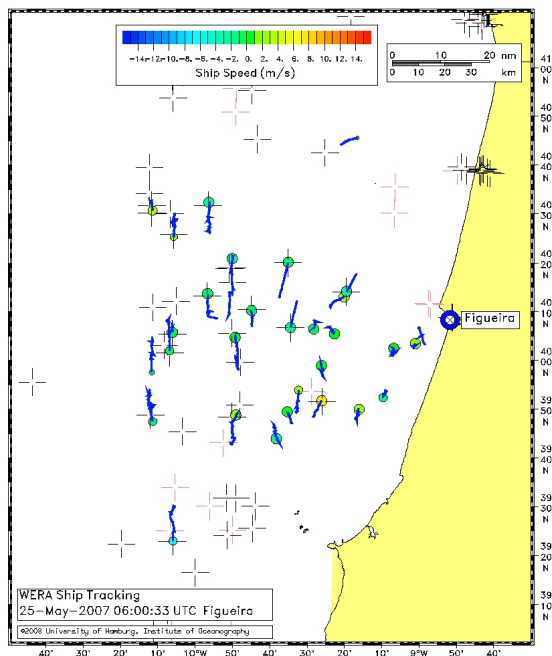
HFSW radari opisani u [12] imaju impulsnu emisiju, ali su fenomeni i tipovi smetnji isti kao i kod kontinualnih emisija. Važan primer HFSW radara sa kontinualnom emisijom signala je WERA, razvijena na univerzitetu u Hamburgu, 1996. godine [70]. U pitanju je radar koji je predviđen da emituje malog snagom i da prvenstveno ima okeanografsku primenu, obezbeđujući simultana merenja površinskih morskih struja, morskih talasa i parametara vetra. U Evropi postoji nekoliko instalacija ovog tipa radara, na primer, u Nemačkoj, Danskoj, Holandiji i Portugaliji. Međutim, WERA ima mogućnost i praćenja pomorskih ciljeva, omogućavajući širok spektar radnih učestanosti u HF opsegu, prostornih rezolucija i antenskih konfiguracija, zahvaljujući svom modularnom dizajnu, što je opisano u [70]. Tu su iskorišćeni AIS raporti pozicije kao referenca za procenu klasifikacija brodova i performansi praćenja. HFSW radari imaju relativno malu azimutnu rezoluciju, visoku nelinearnost i izuzetno visoku verovatnoću lažnog alarma. Način na koji se u [13] pokušalo izboriti sa ovim problemima je primena jednostavnog MTT algoritma, baziranog na “najbliži sused” (*Nearest Neighbor* - NN) pravilima asocijacije podataka [15]. Model praćenja izveden je u polarnom koordinatnom sistemu, pri čemu se od CFAR algoritma [13], dobijaju podaci o rastojanju, azimutu i radijalnoj brzini potencijalnih meta. WERA koristi snagu zračenja od oko 30 W, sa tipičnom radnom učestanošću od oko 8 MHz. Maksimalni zabeležen domet, potvrđen AIS podatkom je 160 km. Test je urađen na prilično malom uzorku od 12 h rada, slika (2.21):



Slika 2.21. Histogram i kumulativna funkcija raspodele apsolutne greške pozicija HFSWR i AIS podataka na uzorku od 12 h, preuzeto iz [13]

Da bi se dobila greška lociranja, uspostavljena je tabela radarskih lociranja uspostavljenih tragova i AIS, pri čemu je tražena minimalna distanca kao kriterijum uparenja. Maksimalni nivo kao kriterijum za razmatranje uparenja podataka je postavljen na 5 km. U toku 12 h upareno je 17700 podataka, a rezultati su pokazali da je kumulativna distribucija apsolutne greške pozicije na nivou od 77 % za razlike u rastojanju manje od 1 km. Prikazan je i detalj uporednog praćenja ciljeva na slici (2.22), gde se može primetiti poklapanje HFSWR tragova sa AIS podacima, ali i veći broj

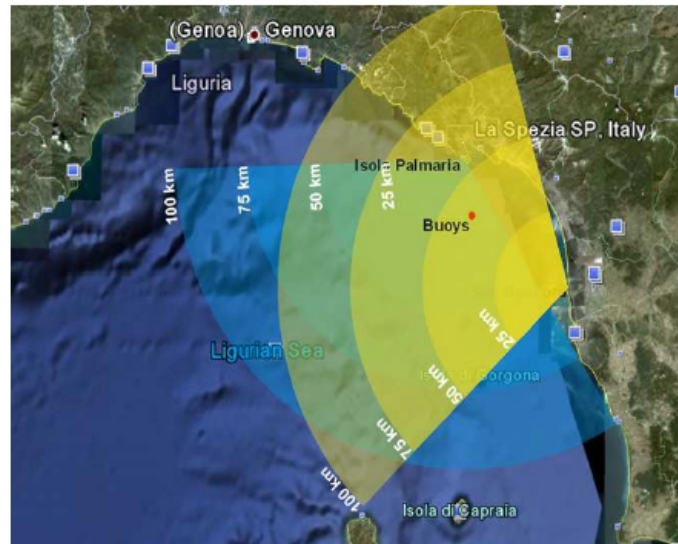
nepokrivenih ciljeva od strane oba senzora, čije poreklo može biti od slabih odraza, koje WERA ne može da detektuje (mala refleksiona površ mete), lažni trag ili nekooperativni cilj, koji ne emituje AIS podatke.



Slika 2.22. Rezultati praćenja (kružići) i AIS podaci (krstići) od WERA HFSW radara, preuzeto iz [13]

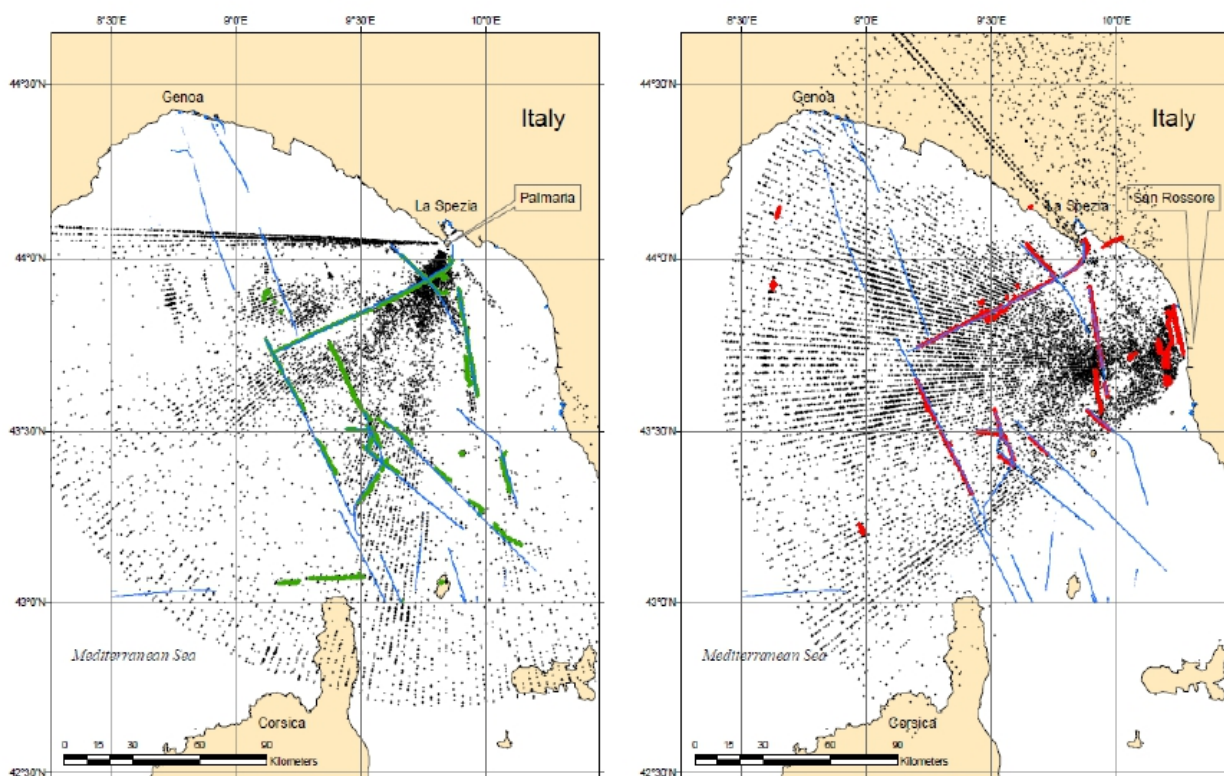
Autori se ne bave efikasnošću svog predloženog rešenja u smislu odbrane od interferentnih pojava niti opisuju način na koji se procedura praćenja treba izboriti sa ovim pojavama. Takođe, nije uzet u obzir ni faktor stanja mora, odnosno pojave visokog nivoa morskog klatera i njihov uticaj na proceduru praćenja. Problemu prisutnog povremenog nestajanja meta pristupaju kroz proceduru menadžmenta tragova, dodavanjem brojača kvaliteta traga [15].

Prvi pokušaj potpune karakterizacije performansi detekcionog procesa, praćenja i senzorske fuzije, primenom MTT algoritma i fuzione strategije na podacima snimljenim sa dva WERA sistema napravljen je u [71],[5], [14] i [19]. Izveden je od strane ogranka NATO organizacije za nauku i tehnologiju za pomorska istraživanja STO-CMRE, sa sedištem u La Speziji, Italija, 2009. godine, u okviru koga su instalirana dva WERA radara u Ligurskom moru. Zona pokrivanja ova dva HFSW radara prikazana je na slici (2.23). U pitanju su sistemi sa radnom učestanošću od 12.5 MHz, čiji prijemni niz sadrži 16 antena. Kao pobudni signal koristi se linearni FMCW, ali je upotrebljena ortogonalna šema modulacije, kako bi se sprečila međusobna interferencija dva sistema. Rezolucija po rastojanju iznosi 1.5 km, pri propusnom opsegu čirp signala od 100 kHz. Oba sistema zrače sa 35 W snage, a domet ovih radara je oko 100 km. Radari su pozicionirani u mestima Palmaria i San Rosore, Italija.



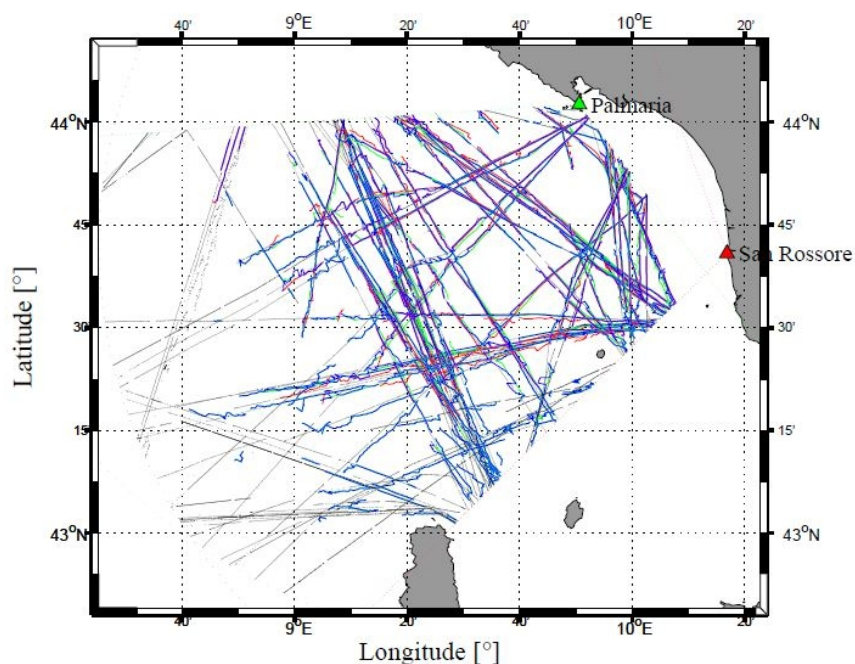
Slika 2.23. Mapa zone pokrivanja dva WERA HFSW radara u Tirenskom moru, preuzeto iz [14].

U [14] je izložen predlog primene JPDA asocijacije podataka sa UKF estimatorom, kako bi se poboljšale performanse praćenja u odnosu na NN  $\alpha$ - $\beta$  filter, primenjen u [13]. Rezultati eksperimenta predstavljeni su obrađenim setom od skoro dva sata (200 skenova) simultanog rada oba radara i prikazani na slici (2.24). I na levoj i desnoj strani slike (2.24) crnim tačkama date su CFAR detekcije, registrovane u svih 200 skenova. Primenjen je CFAR algoritam opisan u [13]. Interesantno je primetiti ogroman broj lažnih alarma u odnosu na realan broj ciljeva datih AIS tragovima plavom bojom. Ta pojava očigledno dovodi do povećanja verovatnoće lažnog traga, što je naročito izraženo na desnoj strani slike (2.24), gde se mogu uočiti mnogobrojni kratkotrajni tragovi, koji nemaju potvrdu u AIS podacima, niti su detektovani od strane drugog radara. AIS tragovi su u velikoj meri poklopljeni sa HFSWR tragovima, ali postoje i situacije gde oba radara koherentno prate ciljeve koji nemaju potvrdu u AIS podacima, što svakako ukazuje na postojanje nekooperativnih ciljeva. Sledeća interesantna pojava je vidna fragmentacija tragova, pri kojoj postoji niz propuštenih uzastopnih detekcija mete, kojom se i autori u [14] bave, tvrdeći da su mogući razlozi pad radarske kros-sekcijske vrednosti, usled moguće promene ugla mete u odnosu na radar. Sledeći mogući razlog je smanjenje nivoa signala prema klateru, pri kome meta ulazi u oblast visokog Bragovog rasejanja I ili II reda u RD mapi. Jedan od pogodnih načina za rešavanje problema fragmentacije tragova je aspektni diverzitet, koji omogućava prisustvo preklopljenih zona osmatranja više radarskih sistema, pa se postupkom fuzije dolazi do poboljšanja performansi, što je i istaknuto u [5].



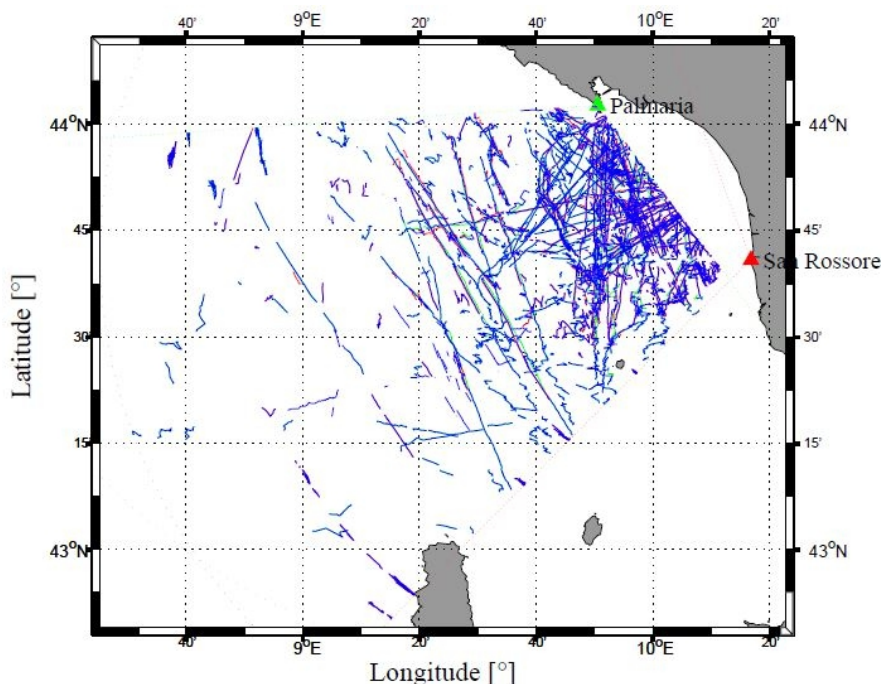
Slika 2.24. Rezultati praćenja ciljeva HFSW radarima u Ligurskom moru [14], u trajanju od dva sata (200 skenova).

Ozbiljniji ekperiment sa istom postavkom napravljen je u [26], gde su merene performanse procedure praćenja opisane u [14] i fuzionog algoritma na mnogo većem uzorku. Izlazni tragovi algoritma fuzije i AIS tragovi su prikazani u zoni poklapanja osmatranja oba radara sa plavom i crnom bojom, respektivno, slika (2.25).



Slika 2.25. Aktivne tačne potvrđene mete u prostoru zone preklapanja dva HFSW radara na dan 8.05.2009. godine, preuzeto iz [26]

Izlazi procedura praćenja partikularnih HFSW radara dati su zelenom (Palmaria HFSWR) i crvenom bojom (San Rosore). Na istoj slici prikazani su samo potvrđeni tačni tragovi, overeni AIS podacima, za jedan dan osmatranja, izvršen 8.5.2009. godine. Uočava se dobro poklapanje sa AIS podacima. Međutim, sposobnost praćenja značajno opada na distancama većim od 100 km i pri uglovima bližim graničnim oblastima. Ovakav rezultat i ne iznenađuje zbog primenjene učestanosti emisije, kojom je domet radara ograničen, i algoritma formiranja snopa, kome performanse opadaju sa porastom uglovnog rastojanja u odnosu na glavnu osu zračenja. Na slici (2.26) prikazani su aktivni lažni tragovi sa kolornim označavanjem kao u prethodnom primeru.

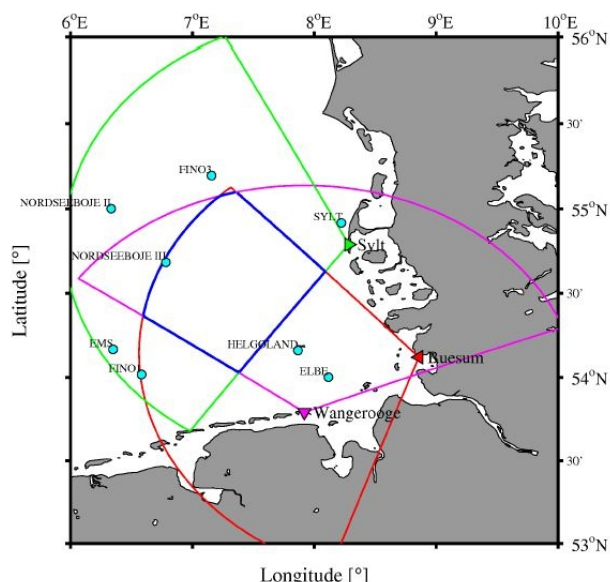


Slika 2.26. Lažne potvrđene mete u regionu fuzije dva HFSW radara na dan 8.05.2009. godine, preuzeto iz [26]

Značajan broj aktivnih lažnih tragova ima dobru vremensku koherenciju ali nema asociiran AIS podatak. Primetno je da mnogi od ovih tragova prate ustaljene morske rute, a na većim udaljenostima takvi tragovi imaju fragmentirano ponašanje. Dodatno, postoji i značajan broj lažnih tragova koji se gomila ispred obale, a koji verovatno potiče od brodova koji ne nose AIS transpondere, što je čest slučaj sa ribarskim brodovima i vojnim plovilima, ili jednostavno nisu kooperativna plovila. Sa druge strane, postoji i veliki broj lažnih tragova koji se radijalno udaljavaju ili približavaju radarima, obično na velikim daljinama, ali je posebno uočljivo u slučaju Palmaria radara, pa i na bliskim rastojanjima. Autori objašnjavaju ovu pojavu odbicima od zemlje, ali se ne bave detaljnije niti daju bilo kakve podatke o statistici takvih tragova. Takođe, uočljiv je ogroman broj kratkotrajnih tragova koji nemaju nikakvo uporište u bilo kakvom smislenom objašnjenju vezanom za fiziku prostiranja talasa i uticaj ambijenta, raštrkanih po celoj oblasti osmatranja. Jedna pretpostavka je da je u pitanju loše odabrana pravila menadžmenta tragova, tj. isuviše slabo M/N

pravilo za potvrđivanje traga [15], u ovom slučaju 6/5, koje dovodi do prebrze potvrđivanja traga. Pravilo za brisanje traga (4/4) će možda dovesti do bržeg brisanja ovakvih tragova, ali će sa druge strane i doprineti fragmentaciji pravih potvrđenih tragova, upravo zbog efekta nestajanja mete, koji je itekako prisutna pojava.

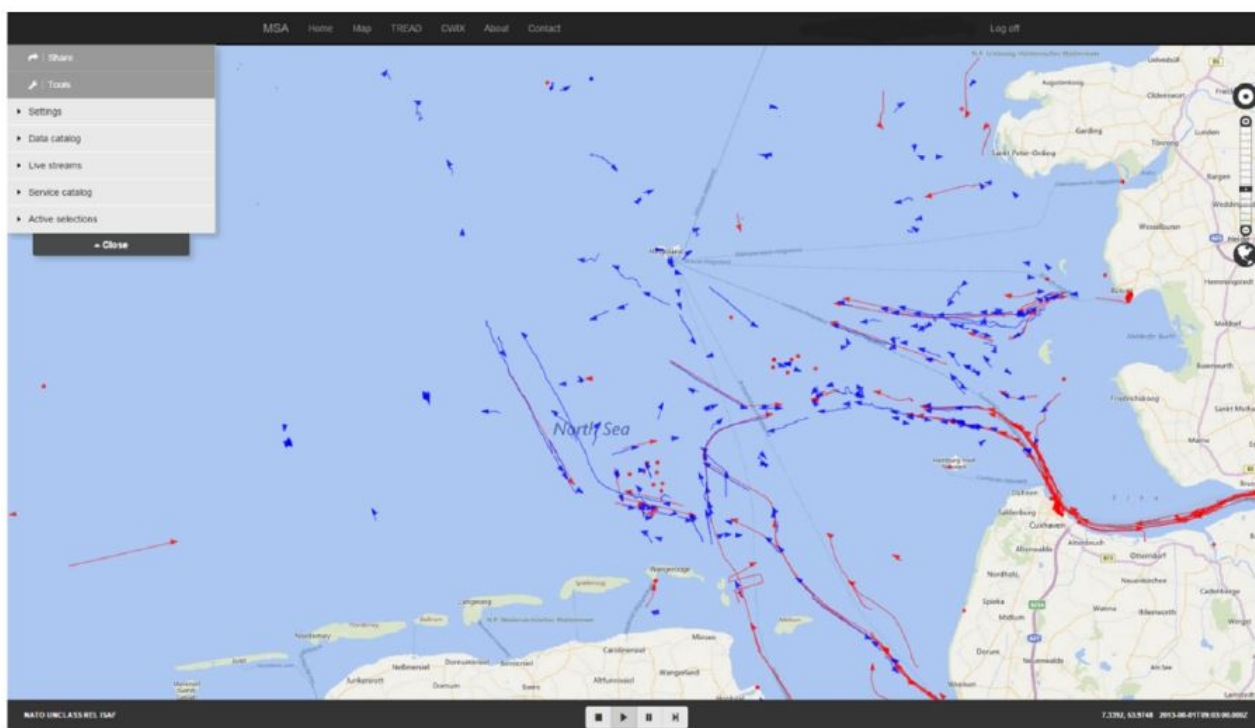
Na severu Nemačke, kao i u širem regionu Severnog mora funkcioniše tzv. COSYNA mreža senzora [72], čiji integralni deo čini mreža WERA HFSW radara, koja se sastoji od 3 HFSW radara, čiji je geografski raspored predstavljen na slici (2.27). WERA radari postali su operativni 2010. godine. Nominalni domet radara iznosi 150 km. Saradnici instituta STO-CMRE su uspostavili saradnju sa Univerzitetom u Hamburgu i prva snimanja na pomenutom sistemu obavili 2013. godine, iz kojih je napravljeno nekoliko istraživanja. Merene su performanse procedure praćenja, opisane u [14], na podacima ove mreže. Rezultati su sumirani u [19].



Slika 2.27. Geografski raspored 3 WERA HFSWR na severnoj obali Nemačke, deo COSYNA mreže. Plavom bojom obeležena je oblast preklapanja zona pokrivanja 3 senzora [26]

U [19] porede se performanse tzv. VS-IMM JPDA-UKF algoritma, predstavljenog u [73] i spomenutog JPDA-UKF. VS-IMM algoritam predstavlja verziju IMM algoritma [18], baziranu na poznavanju pomorskih ruta, gde se to znanje iskorišćava za inicijaciju i održavanje tragova, pa algoritam, po autorima daje izvesno bolje rezultate od JPDA-UKF šeme praćenja. Takođe, vršeni su eksperimenti sa M/N pravilima menadžmenta traga, ali u svrhu međusobnog poređenja ovih algoritama. Primer prikaza praćenja COSYNA mrežom HFSW radara dat je na slici (2.28). Uzorak je napravljen 1.9.2013. godine u trajanju od 1. časa, gde su crvenom bojom dati AIS tragovi, a plavom fuzionisani tragovi HFSWR. Slično kao u prethodnim primerima, uočava se velika fragmentiranost tragova, ali i izuzetno visok broj lažnih tragova, koji se ne može asociirati sa pojavom nekooperativnih ciljeva bez AIS traspondera. U istom radu autori komentarišu performanse algoritma u realnom vremenu, gde priznaju da je praćenje moguće samo uz restriktivan

saobraćaj, pošto je poznato da kompleksnost JPDA eksponencijalno raste sa porastom broja aktivnih tragova. Sa druge strane, čini se da je potrebno pri izboru procedure praćenja dobro izučiti osobine okruženja praćenja HFSWR, pre usvajanja skupa pravila menadžmenta tragova i konačnog usvajanja tipa procedure praćenja. Ovi problemi biće adresirani u glavi 3 ove disertacije, u kojoj će biti predstavljeno rešenje koje ima za cilj smanjenje broja lažnih tragova i izuzetno efikasan algoritam, baziran na istraživanju osobina praćenja u HFSWR okruženju.



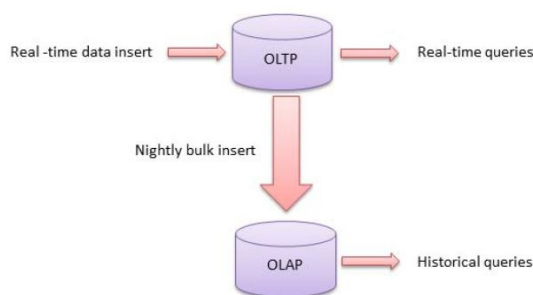
Slika 2.28. Praćenje ciljeva u Severnom moru, COSYNA mreža HFSW radara, primenom aplikacije razvijene u CMRE institutu [19].

Interesantno je da u naučnim radovima nema direktnog bavljenja tematikom uticaja stanja mora i jonosferske interferencije na proces praćenja i tako važan parametar, kakav je verovatnoća lažnog traga, koji je ključan za funkcionalnost ovog senzora. Doduše, jonosferske interferentne pojave najčešće se javljaju na udaljenostima većim od 90 km, pa se kod nekih sistema malog dometa, kakav je onaj opisan u [71], takve pojave ni ne mogu uočiti. Istraživanja se pre svega zasnivaju na merenjima uticaja stanja mora na detektabilnost pomorskih meta različitih dimenzija. Prvo istraživanje tog tipa sprovedeno je u [27], u kome se došlo do zaključka da povećani nivo stanja mora ne utiče bitno na detekcione sposobnosti većih plovila, ali utiče bitno na manja plovila. U [28] je vršena analiza uticaja različitih značajnih visina talasa na ukupno vreme praćenja meta, ToT parametar. Na žalost, ne postoji odgovarajuća analiza o stanju lažnih alarma pri povišenom nivou stanja mora. Dalje, na problem povećanog nivoa klatera usled jonosferske interferencije ili stanja mora gleda se, sasvim ispravno, kao problem menadžmenta tragova, čija bi pravila trebalo da eliminišu lažne tragove i uglavnom se samo konstatuje da se to i dešava. Međutim, već i sami



priloženi rezultati praćenja govore suprotno, a za primenjena pravila menadžmenta tragova, gde su najzastupljenija i najanaliziranija prosta M/N pravila, čak i za znatno striktnije izabrane vrednosti parametara M i N, se lako može dokazati da jednostavno nisu dovoljna u brojnim slučajevima, da bi se regulacija problema lažnih tragova mogla nazvati uspešnom. Analiza uticaja i ublažavanje pojave lažnih tragova u uslovima pojačane interferencije u HFSWR okruženju će biti predmet glave 4 ove disertacije.

O implementaciji IMS sistema u Ligurskom moru, čije su performanse praćenja opisivane ipak postoje izvesne informacije. U [19] opisan je grafički interfejs na kojem se vrši osmatranje zona pokrivanja HFSWR, tzv. MSA viewer (engl. *Maritime Situational Awareness* - MSA). Aplikacija je napisana u C# programskom jeziku, ali je algoritamski kernel implementiran u Matlabu. Njegove rutine interaguju sa .NET frejmwork okruženjem korišćenjem interoperabilnog modula razvijenog u CMRE institutu. Informacije na sistemskom nivou projekta implementacije IMS sistema mogu se naći u [33]. Cilj ovog projekta bio je razvoj algoritama za multi-senzorsku fuziju, praćenje cljeva i detekciju pomorskih anomalija. Ovi ciljevi su ostvareni korišćenjem servisno-orijentisane arhitekture (SOA) softvera, kako bi se omogućila što brža adaptivnost i integrativnost u okruženjima NATO mreža. Za implementaciju SOA, iskorišćena je WCF tehnologija[74]. U istom radu se apostrofira važnost dobre konstrukcije baza podataka, za koje su odabrali relacioni tip baza podataka, a strukturu su odabrali tako da su formirali dve konkurentne relacione baze, jednu za transakciono procesiranje (engl. *On-Line Transaction Processing* - OLTP), a drugu za analitičku obradu (engl. *On-Line Analytical Processing* - OLAP). Ideja međusobne i interakcije sa spoljnim korisnicima prikazana je na slici (2.29). Analitička baza služi za dostavu podataka iz prošlosti, za potrebe analize, dok transakciona baza služi za svakodnevnu upotrebu i prikaz podataka u realnom vremenu. Analitička baza se dopunjava podacima u toku noći, jedanput dnevno. Za nosač baze izabran je Microsoft SQL Server R2, instaliran na Windows Server 2008 R2 operativnom sistemu.



Slika 2.29. Dijagram toka podataka između sistemskih baza IMS sistema u [33]

U prikazima arhitektura sistema za nadgledanje pomorskih ciljeva uočava se da su podaci u ogromnoj meri dati krajnje generalno i na nivou najvišeg stepena koncepta. Otežavajuća činjenica je što ovakvih sistema u svetu ima veoma malo, a dokumentacija o detaljima implementacije uglavnom nije dostupna ili je dostupnost ograničena, pa i političkim razlozima, kao što je slučaj kod

sistema opisanog u [71], gde su pojedini dokumenti još uvek klasifikovani kao tajna ili im je dostupnost ograničena na institucije unutar NATO saveza. Svakako da je jasno koliki značaj ova tema predstavlja sa bezbednosnog aspekta, pa je utoliko važnije ponuditi dobro i potpuno rešenje. U prikazu IMS sistema datog u [12] i [32], može se naslutiti da je optimalno rešenje arhitekture IMS sistema ono koje omogućava potpuno ili bar deo-po-deo centralizovani model toka podataka, u kome se podaci svih senzora slivaju u jednu tačku u kojoj se obavljaju fuzioni i integracioni procesi. Pitanje koje možemo otvoriti je šta se dešava sa ostalim sensorima sekundarne važnosti u ovakvim sistemima, a koji imaju ulogu kontrole rada uređaja, vrše merenja potrošnje električne energije, ambijenta itd. Potrebno je ponuditi jedan integrativni pristup koji bi konceptualno kompletirao tretman svih senzora u sistemu za praćenje ciljeva, bez obzira na ulogu, što je bio predmet istraživanja, koje će biti obrazloženo u glavi 5.

## 3 Heurističke metode za praćenje ciljeva u okruženju izahorizontskih radara

Praćenje ciljeva u HFSWR mrežama predstavlja kritičan faktor za uspješnu implementaciju celokupnog koncepta integrisanog praćenja pomorskog praćenja, zasnovanog na HFSW radarima. Stabilno i pouzdano praćenje ciljeva pojedinačnih HFSW radara svakako je primarni cilj cele senzorske mreže, pa je jedno od važnih pitanja kakva će MTT (engl. *Multi-Target Tracking* - MTT) procedura praćenja biti implementirana. Osnovu MTT procedura predstavlja usvojeni algoritam asocijacije podataka (engl. *Data Association* - DA). Kompleksnost DA algoritma, dakle, njegova pogodnost za aplikacije u realnom vremenu u pojedinačnim HFSW radarima, kao i optimalnost cele MTT procedure, biće predmet ove glave. Kao rezultat, predstavljena je nova heuristička metoda praćenja, zasnovana na osobinama okruženja u kome rade HFSW radari [75]

### 3.1 O izboru MTT procedure

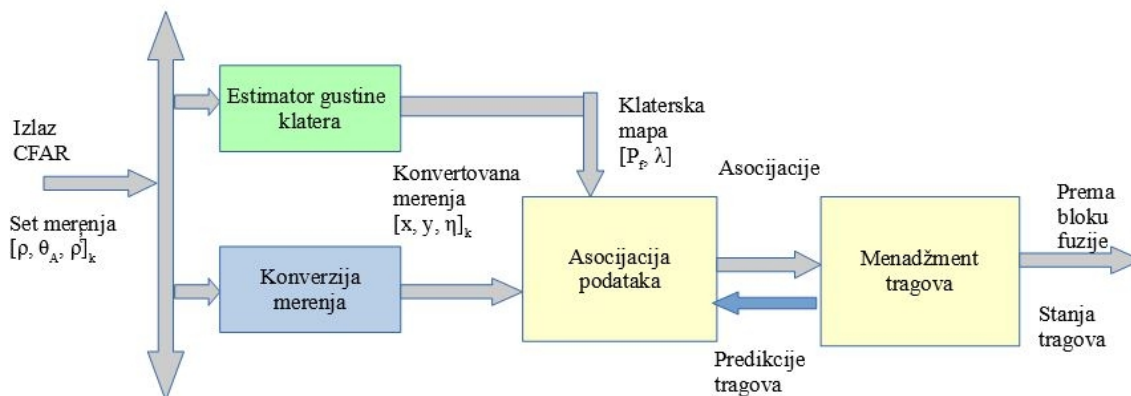
U teoriji praćenja ciljeva definisane su brojne MTT procedure za združenu asocijaciju podataka, kao što su MHT [15], JPDA [18] ili JIPDA [76]. Da li je bilo koja od njih pogodna za aplikacije na HFSW radarima je pitanje koje u najvećoj meri zavisi od broja detekcija i tragova u svakom koraku asocijacije. Pošto se u svakom asocijacionom koraku može pojaviti na stotine tragova i individualnih merenja, gore pomenute metode se pokazuju neprikladnim za praktičnu upotrebu, jer vreme egzekucije jednog koraka dobija daleko veće vrednosti od vremena integracije koje se koriste u akvizicionom procesu HFSW radara, tipično zbog eksponencijalne složenosti primenjenog DA algoritma u odnosu na broj tragova i merenja. Sa druge strane, postoje MTT procedure sa linearnom kompleksnošću, kao što su LM IPDA [77] ili LM ITS [78], čije vreme izvršavanja raste znatno sporije sa porastom pomenutih parametara. Drugi pristup je korišćenje heurističkih metoda i aproksimacija MTT procedura za združenu asocijaciju podataka, kao što su intidžer programiranje [79], DFS[80], Roeker-Filis suboptimalna JPDA [81] ili njene modifikacije [82] i brojne druge. Jedan potpuno novi aspekt, koji itekako treba da utiče na izbor i konstrukciju MTT procedure je taktička situacija u oblasti osmatranja HFSW radara. Kako se HFSW radar koristi uglavnom za osmatranje dubokog mora, gde postoji znatna disperzija potencijalnih meta na velikoj površini, a sam radar poseduje relativno malu uglovnu i rezoluciju po daljini, što znači da su velike koncentracije meta retko prisutne, a i ako jesu, najčešće ne mogu biti pravilno detektovane. Ovo može indikovati mogućnost da se tragovi i individualne detekcije mogu grupisati u klastere relativno malih veličina. Pod klasterom podrazumevaće se skup tragova i merenja, formiran na takav način da dva različita

klastera nemaju zajednički asocirana merenja [76]. Ovakva definicija klastera implicira korišćenje metoda za grupisanje podataka zasnovanih na gustini [83], gde se statističko rastojanje (tzv. gejt rastojanje) između individualnog merenja i predikcione pozicije traga koristi kao kriterijum grupisanja ili metoda zasnovanih na DBSCAN algoritmima [84].

Pristup zasnovan na grupisanju, tj. klasterizaciji podrazumeva združivanje tragova i merenja u grupe sa malom verovatnoćom međugrupne asocijacije. Ta činjenica bi omogućila primenu arbitrarne DA metode, u zavisnosti od kompleksnosti klastera, na svaki klaster zasebno, kako bi se odredile asocijacije merenja sa postojećim tragovima. Imajući u vidu taktički aspekt velike disperzije meta na otvorenom moru, uticaj grešaka u asocijaciji podataka bi trebalo biti minimalan. Ako većina klastera može biti rešena određenom DA metodom koja će proizvesti približno optimalne vrednosti dodela merenja tragovima, tada bi ovaj pristup mogao predstavljati optimalno rešenje koje tražimo. Kako struktura tj. kompleksnost klastera, određuje izbor DA metode, ona će biti analizirana u više detalja u nastavku teksta, sa naglaskom na eksperimentalne rezultate analize.

### 3. 2 Procedura praćenja ciljeva

Izlaz CFAR bloka, set detekcija, predstavljen u odeljku (2.1.2) se smatra ulaznim setom podataka procedure praćenja HFSW radara, prikazane na slici (3.1). Ulazni set merenja se prvo obrađuje u blokovima za estimaciju gustine klatera i konverziju merenja. Blok za konverziju merenja transformiše ulazni set detekcija u pogodniju formu i njegov izlaz, zajedno sa predikcionim stanjem traga, formira ulaz u blok za asocijaciju podataka. Rezolvirane asocijacije podataka se prebacuju u blok menadžmenta tragova, gde se formiraju informacije o stanju traga i dostavljaju sledećim stepenima obrade nakon praćenja ciljeva, obično bloku fuzije podataka. Uloga svakog bloka, implementacioni detalji i diskusija o izazovima sa kojima se dizajn ovih blokova suočava su prikazani u daljem tekstu.



Slika 3.1. Blok šema procedure praćenja tragova jednog HFSW radara

### 3. 2. 1 Estimator gustine klatera

Izlaz bloka za estimaciju gustine klatera se koristi u proceduri za asocijaciju podataka. U proceduri praćenja primenjen je prostorni estimator gustine klatera (*Spacial Clatter Density Estimator* - SCDE) sa autoregresivnim usrednjavanjem na  $L = 10$  iteracija, opisan jednakošću (37) u [85], za posmatranu ćeliju  $c$ , u kojoj je registrovano  $\mu_k(c)$  merenja u  $k$ -toj iteraciji:

$$N_k(c) = \alpha_k N_{k-1}(c) + (1 - \alpha_k) \mu_k(c), \quad (3.2.1.1)$$

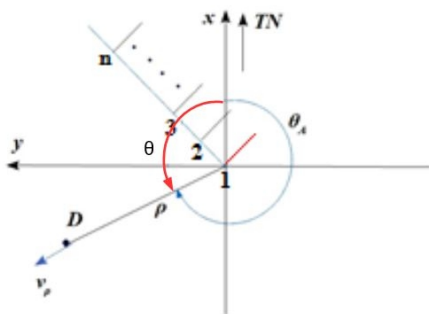
$$\alpha_k = \begin{cases} \frac{k}{k-1}, & k < L \\ \frac{L}{L-1}, & k \geq L \end{cases}$$

Ovaj estimator upotrebljen je zbog dejstva jonosferske interferencije, koja izaziva lokalizovane, relativno sporopromenljive visoke gustine klatera, što odgovara primeni autoregresivnog usrednjavanja. Kratkotrajne lokalne promene gustine klatera do nekoliko skenova, koje su takođe česta pojava ne utiču na kvalitet praćenja. Prvi problem pred ovim estimator je pravilna lokalizacija interferentnih pojava, kako bi estimator bio pravilno upotrebljen. Za tu svrhu, 3-D prostor  $(\rho, \theta_A, \dot{\rho})$ , ograničen ekstremnim opservacionim vrednostima iz tabele (2.1), je podeljen u ćelije jednakog volumena, shodno jednakostima (5) i (6) u [85]. Usvojene su ekstremne vrednosti standardnih devijacija za rastojanje, azimut i radijalnu brzinu iz tabele (2.1), da bi se omogućila jednakoprostorna podela, koja vodi do dimenzija ćelija, izraženih u broju rezolucionih ćelija, zaokruženih ka većem celom broju:  $\Delta N_\rho = 7$ ,  $\Delta N_{\theta_A} = 6$  and  $\Delta N_{\dot{\rho}} = 7$ , kojima je definisana zapremina klaterske ćelije  $c$ ,  $V(c)$ .

Izlaz ovog bloka u formi mape  $[P_f, \lambda](\rho, \theta_A, \dot{\rho})$  se dostavlja proceduri za asocijaciju podataka.  $P_f$  i  $\lambda$  predstavljaju verovatnoću lažnog alarma i estimiranu gustinu klatera, respektivno.

### 3. 2. 2 Modelovanje kretanja ciljeva

Modelovanje kretanja ciljeva u metodi dato je u [86]. Ulazna merenja je potrebno pre uvođenja u sledeći blok procedure praćenja potrebno transformisati u pogodnu formu u bloku za konverziju merenja. Merenja se konvertuju iz polarnih u kartezijanske koordinate u procesu opisanom u [87]. Koordinatni sistem za proceduru praćenja za sve HFSW radare orijentisan je prema pravcu pravog severa, prema slici (3.2), u skladu sa koordinatnim sistemom pridruženim radaru sa slike (2.6).



Slika 3.2. Koordinatni sistem vezan za antenski prijemni niz HFSW radara, vezan za proceduru praćenja

Unutar konverzionog bloka, usvaja se pozitivan azimut  $\theta$  kao mera uglovnog rastojanja u odnosu na pravi sever, koji je sa azimutom koji prati kurs detekcije ili mete u očiglednoj relaciji:

$$\theta_A = 2\pi - \theta \quad (3.1)$$

Ekspresija pozicije u kartezijanskim koordinatama ima prednosti u odnosu na polarnu predstavu, naročito ako vodi do daljne linearizacije jednačina kretanja. Takva transformacija omogućava čitljivije rezultate i lakše kombinovanje izlaza više senzora u fuzionom procesu. Radijalna brzina se meri sa relativno velikom preciznošću i trebalo bi se koristiti u modelovanju. Prateći dobru praksu u literaturi, na primer u [88], definiše se nova merna veličina, kao proizvod rastojanja  $\rho_m$  i radijalne brzine  $\dot{\rho}_m$ ,  $\eta_m = \rho_m \dot{\rho}_m$ . Vektor stanja u modelu uključivaće poziciju  $(x_k, y_k)$  i brzinu mete  $(\dot{x}_k, \dot{y}_k)$ , gde  $k$  predstavlja tekući indeks skeniranja, i definisan je jednakošću:

$$x = [x_k, y_k, \dot{x}_k, \dot{y}_k]^T \quad (3.2)$$

Jednačina stanja modela je linearna i data je jednakošću:

$$X_{k+1} = FX_k + v_k = f(X_k) + v_k \quad (3.3)$$

gde je  $F$  tranziciona vremenski stacionarna matrica:

$$F = \begin{bmatrix} 1 & T & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & T \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.4)$$

$T$  je vreme skeniranja HFSW radara (tipično oko 33 sekunde) and  $v_k$  je procesni šum.

Model kretanja je, dakle, dvodimenzioni model u x-y ravni. To je u suštini model sa približno konstantnom brzinom u kome je ubrzanje praktično u domenu slučajnog šuma. Ono je predstavljeno Singerovim modelom ubrzanja [15], gde su parametri modela, kao što su manevarska vremenska konstanta, verovatnoća ravnomernog kretanja i maksimalno ubrzanje

izabrani tako da reflektuju situaciju iz realnosti kretanja velikih brodova, koji su primarna meta radara: male vrednosti ubrzanja i spori i tupi manevri.

Kovarijansa matrice procesnog šuma  $v_k$  je data u [15]:

$$Q = 2\sigma_m \tau_m \begin{bmatrix} q_{11} & q_{12} & 0 & 0 \\ q_{12} & q_{22} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & q_{11} & q_{12} \\ 0 & 0 & q_{12} & q_{22} \end{bmatrix} \quad (3.5)$$

gde je  $\tau_m$  izabrana maneverska konstanta,  $\sigma_m$  je varijansa ubrzanja mete, definisane u Singerovom modelu, a  $q_{ij}$  su koeficijenti dati nizom jednačina u [15]. Proces konverzije polarnih koordinata je detaljno objašnjen u [87], pri čemu se vrši nepristrasna konverzija merenja uslovljena dobijenim merenjem u intervalu  $k$ ,  $D_{m,k} = [\rho \ \theta \ \dot{\rho} \ \sigma_\rho \ \sigma_\theta \ \sigma_{\dot{\rho}} \ SNR]$ , prema jednakosti (2.2). Krajnji rezultat pomenutog procesa konverzije je dat sledećim izrazima:

$$\begin{bmatrix} x_{m,k} \\ y_{m,k} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \rho \cos \theta \\ \rho \sin \theta \end{bmatrix} - \mu_a$$

$$\mu_a = \begin{bmatrix} E[x | \rho, \theta] \\ E[y | \rho, \theta] \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \rho \cos \theta (e^{-\sigma_\theta^2} - e^{-\sigma_\theta^2/2}) \\ \rho \sin \theta (e^{-\sigma_\theta^2} - e^{-\sigma_\theta^2/2}) \end{bmatrix} \quad (3.6)$$

gde  $x_{m,k}$  and  $y_{m,k}$  predstavljaju kartezijske koordinate konvertovanih polarnih merenja. Jednačina merenja modela data je prema [88]:

$$Z_{m,k} = \begin{bmatrix} x_{m,k} \\ y_{m,k} \\ \eta_{m,k} \end{bmatrix} = h(X_k) + w_k \quad (3.7)$$

pri čemu je  $w_k$  merni šum,  $\eta_{m,k} = \rho \dot{\rho}$  a  $h(X_k)$  je nelinearna funkcija, definisana sledećom jednakošću [88]:

$$h(X_k) = \begin{cases} x_{m,k} = & x_k \\ y_{m,k} = & y_k \\ \eta_{m,k} = & x_k \dot{x}_k + y_k \dot{y}_k \end{cases} \quad (3.8)$$

Matrica kovarijanse mernog šuma  $w_k$ , prema [88], ali svedena na dvodimenzionalni slučaj kretanja može se predstaviti u obliku:

$$R_k = \begin{bmatrix} R_{a11} & R_{a12} & \sigma_{x\eta} \\ R_{a12} & R_{a22} & \sigma_{y\eta} \\ \sigma_{x\eta} & \sigma_{y\eta} & \sigma_\eta^2 \end{bmatrix} \quad (3.9)$$

gde je  $\sigma_\eta^2 = \sigma_\rho^2 \sigma_\rho^2 + \rho^2 \sigma_\rho^2 + \dot{\rho}^2 \sigma_\rho^2$ ,  $\sigma_{x\eta} = \sigma_\rho^2 \cos \theta$  i  $\sigma_{y\eta} = \dot{\rho} \sigma_\rho^2 \sin \theta$ . Koeficijenti  $R_{aij}$  su definisani u [87].

Izbor estimatora zavisi pre svega od tipa modela i naravno, performansi. S obzirom na nelineranost, prisutnu u jednačini merenja (3.8), prvo razmatranje bi se odnosilo na EKF filter. Interesantno je da je u [87] vršeno poređenje ovog estimatora sa CMKF (engl. *Converted Measurement Kalman Filter* - CMKF), upravo u kontekstu primenjene konverzije merenja, pri čemu se došlo do zaključka da CMKF filter ima velike prednosti u odnosu na EKF: dovodi do manjih grešaka i procesira merenja sa približno optimalnim pojačanjem. Dalje se navodi da se EKF loše ponaša pri većim rastojanjima od radara pri većim greškama po azimutu, što i jeste slučaj kod HFSW radara. Međutim, nelinearnost merne jednačine sprečava upotrebu CMKF filtra, koji je linearan. UKF filter ima bolje performanse od oba pomenuta filtra uz cenu povećane kompleksnosti izračunavanja, koja je ipak manja od PF filtra. Između ove dve grupe, izbor ipak pada na UKF filter da bi se izbegli mogući implementacioni problemi zbog mogućeg velikog procesnog opterećenja u toku obrade. Pošto je poreklo šuma u sistemu višestruko i generalno nije poznata njegova raspodela, smatraće se da šumovi aditivni. Usvojena je tzv. NA (*Non-Augmented*) verzija UKF filtra u formi predstavljenoj u [16] i [89]. Drugi razlog primene ovog estimatora je eksperiment izveden u [14], koji je pokazao solidne rezultate u praćenju ciljeva HFSW radarima u poređenju sa dostupnim AIS podacima, doduše, na vremenski kratkom uzorku. Zbog toga će jednačine primenjenog estimatora biti predstavljene kao razlika u odnosu na pomenuti rad, pošto one postoje, kako u modelu kretanja, tako i svakoj fazi rada UKF filtra.

Estimator se inicijalizuje nakon prijema prvog mernog vektora  $Z_{m,0} = [x_{m,0} \ y_{m,0} \ \eta_{m,0}]$ . Inicijalni vektor stanja formira na način da rezultatni vektor brzine bude blizak merenom vektoru, dok je inicijalna pozicija sačuvana:

$$\begin{aligned} x_0 &= x_{m,0}, y_0 = y_{m,0}, \\ \dot{x}_0 &= \left( \eta_{m,0} / \sqrt{x_{m,0}^2 + y_{m,0}^2} \right) \cos(\text{atan}(y_{m,0}/x_{m,0})), \\ \dot{y}_0 &= \left( \eta_{m,0} / \sqrt{x_{m,0}^2 + y_{m,0}^2} \right) \sin(\text{atan}(y_{m,0}/x_{m,0})) \end{aligned} \quad (3.10)$$

Cilj ovog pristupa je održanje predikcije merenja vektorske komponente  $\eta_m$  blizu inicijalne merne vrednosti, uzimajući u obzir osobine kretanja velikih pomorskih meta i relativno precizna merenja radijalne brzine meta.

Kako vektor stanja filtera ima  $n_x = 4$  člana, potrebno je izračunati 9 sigma tačaka u svakom predikcionom koraku. Predikcioni korak obavlja se na način sličan postupku, opisanom u jednakostima (7)-(11) u [14]. Razlika je u observacionoj kovarijansi  $S_k$ , koju je potrebno izračunavati u toku koraka ažuriranja za svako pridruženo merenje jer se kovarijansa merenja  $R_k$  razlikuje od merenja do merenja. Usvojivši notaciju iz [14], prvi korac predikcije j-te mete u k-tom koraku je kalkulacija matrice  $\tilde{X}^j$ , koja se sastoji od sigma tačaka  $X_{k-1|k-1}^j$ , propagiranih kroz linearnu jednačinu stanja (3.3), predikcije stanja  $x_{k|k-1}^j$  i kovarijanse šuma stanja  $P_{k|k-1}^j$ . Izvlače



se nove sigma tačke koristeći novi vektor predikcije stanja i propagiraju kroz nelinearnu jednačinu merenja (3.8) da bi se dobio vektor  $\gamma_{k|k-1}^j$ . Ovaj vektor se koristi za kalkulaciju predikcije observacije za posmatranu j-tu metu [14]:

$$z_{k|k-1}^j = \sum_{n=0}^{2n_x} \omega_n \gamma_{k|k-1}^j(n) \quad (3.11)$$

gde je  $\omega_n$  vektor nemodiranih težinskih koeficijenata. Vektor  $\Gamma_k^j$ , korišćen kasnije u koraku ažuriranja računa se na sledeći način:

$$\Gamma_k^j = \sum_{n=0}^{2n_x} \omega_n (\gamma_{k|k-1}^j(n) - z_{k|k-1}^j) (\gamma_{k|k-1}^j(n) - z_{k|k-1}^j)^T \quad (3.12)$$

Estimator može prihvatati više merenja u jednom koraku, u opštem slučaju. Merenja, tj. ažuriranja, se predstavljaju parom vrednosti  $(z_{m,k}, R_k)$ . Za i-to primljeno merenje u estimatoru j-te mete, njena verzija observacione kovarijanse se računa kao:

$$S_k^j(i) = R_k(i) + \Gamma_k^j \quad (3.13)$$

gde je  $\Gamma_k^j$  dato jednačinom (3.12). Kalmanovo pojačanje, ažuriranja vektor stanja i kovarijanse vektora stanja izračunavaju se slično kao u jednakostima (13) i (14) u [14]:

$$\begin{aligned} K_k^j(i) &= \sum_{n=0}^{2n_x} \omega_n (X_{k|k-1}^j(n) - x_{k|k-1}^j) (\gamma_{k|k-1}^j(n) - z_{k|k-1}^j)^T (S_k^j(i))^{-1} \\ x_{k|k}^j &= x_{k|k-1}^j + K_k^j(i) (z_{m,k}(i) - z_{k|k-1}^j) \\ P_{k|k}^j &= P_{k|k-1}^j + K_k^j(i) S_k^j(i) (K_k^j(i))^T \end{aligned} \quad (3.14)$$

Finalni korak ažuriranja UKF filtra identičan je načinu opisanom u [14].

### 3. 2. 3 Procedura za asocijaciju podataka

Procedura za asocijaciju podataka izvršava se nakon izvršene konverzije merenja i estimacije nivoa gustine klatera. Kao metod klasterizacije usvojeno je grupisanje po gustini po kriterijumu gejt rastojanja. Kao prvi korak u proceduri je preciziranje načina određivanja gejt rastojanja. Gejting će se bazirati na kvadratu Mahalanobis rastojanja i vršiće se u elipsoidnom obliku [15], datom jednakošću (3.15):

$$(z_{m,k} - z_{k|k-1}) (S_k(R_k))^{-1} (z_{m,k} - z_{k|k-1})^T < \gamma \quad (3.15)$$

gde je, prateći notaciju iz prethodne sekcije poglavlja,  $(z_{m,k}, R_k)$  par vrednosti merenja pod testom i njegove kovarijanse mernog šuma,  $S_k$  je observaciona kovarijanse za dato merenje, računata prema (3.13), a  $z_{k|k-1}$  predstavlja predikciju merenja tekućeg traga. Proces gejt selekcije određen je opštom graničnom vrednošću  $\gamma$ .

Nakon uspešnog validacionog koraka svakoj asocijaciji se dodeljuje marginalna verovatnoća asocijacije između merenja  $m$  i traga  $t$  na sledeći način:

$$p_{m,t} = \frac{p_d(z_{m,k} - z_{k|k-1})}{p_d(\vec{0})} \quad (3.16)$$

pri čemu je  $p_d$  funkcija gustine verovatnoće multivarijabilne normalne raspodele  $N(\vec{0}, S_k(R_k))$ , gde se pretpostavlja da su merenja koja potiču od realnih meta normalno distribuirana u okolini predikcije merenja traga.

Kako je kalkulacija Mahalanobis rastojanja vremenski zahtevan proces u slučaju velikog broja tragova i/ili merenja u jednom koraku, usvaja se posebna gejting strategija, koja ima za cilj drastično smanjenje broja potrebnih operacija. Potrebno je primeniti prostorni selektor merenja za izabrani trag i njegovu procene rastojanja i azimuta. Zatim se vrši (min, max) pretraga za svaku poziciju merenja kako bi se dobila preselekciona lista za gejting test. Vreme egzekucije gejtinga se na ovaj način drastično redukuje i nema značajan uticaj na ukupno vreme izvršavanja DA procedure. Ovu proceduru je nadalje moguće dodatno optimizovati primenom KD-Tree metoda [90] (binarna pretraga) radi dalje drastične redukcije broja (min, max) komparacija.

Neka svaki trag održava svoju listu indeksa asociраних merenja i neka svako merenje održava svoju listu asociраних indeksа tragova. Proces klasterizacije je relativno pravolinijski i počinje od liste dostupnih tragova, prema slici (3.3). Ako je tekući trag već deo drugog klastera, preskače se. Na prvi nedodeljen trag formira se novi klaster i trag se smatra iskorišćenim, a njegov index u listi tragova i indeksi njegovih asociраних merenja se dodaju u listu članova klastera, obeležavajući ih kao iskorišćene u isto vreme.



Slika 3.3. Dijagram procedure grupisanja

Proces se nastavlja i ponavlja rekurzivno, iterirajući kroz listu nepridruženih asociiranih tragova za svako merenje u listi asociiranih merenja inicijalnog traga, a zatim i preko drugih tragova, sve dok se svi korelisani tragovi i merenja ne pridruže tekućem klasteru, tj. listi njegovih članova. Ovaj algoritam je prikazan na slici (3.4). Potrebno je napomenuti da se klasteri koji sadrže samo jedan trag i nijedno asociirano merenje smatraju trivijalnim u smislu asocijacije podataka i ignorišu se u budućoj analizi. Neasocirana merenja ne učestvuju u proceduri asocijacije podataka i dostavljaju se bloku menadžmenta tragova kao kandidati za inicijaciju novih tragova.



Slika 3.4. Rešavanje svih asocijacija za tekući trag i dodela novih članova klastera

Bolje vrednosti medjuklasterne izolacije znače i manje uticaja na greške u proceduri asocijacije podataka. Izolacija klastera zavisi od statističkih rastojanja elemenata susednih klastera. Takođe zavisi i od volumena gejt oblasti, određene verovatnoćom obuhvata validnih observacija koje zadovoljavaju gejt kriterijum,  $P_G$  [15]. Kvadratno Mahalanobis rastojanje  $d_m^2$  se statistički opisuje

kao  $\chi^2$  raspodela sa tri stepena slobode. Birajući relativno veliku gejt granicu  $\gamma=61$ , dolazi se do gejt kriterijuma  $d_m^2 < 61$ , pa je verovatnoća neobuhvata validnog merenja gejt površinom  $\bar{P}_G = 1 - P_G = P(\chi_3^2 > \gamma) \approx 3 \cdot 10^{-13}$ . Drugim rečima, može se smatrati da praktično ne postoje veze između susednih klastera. Ukoliko bi se kvadratno Mahalanobis rastojanje računalo koristeći ekstremne vrednosti za  $\sigma$  iza tabele (2.1), u različitim scenarijima i posle konverzije merenja, može se steći utisak o veličini volumena gejt oblasti. U slučaju dva merenja koja se razlikuju samo po udaljenosti, može se pokazati da se granične udaljenosti nalaze u opsegu od 8 km do 32 km za ekstremne slučajeve preciznosti merenja. Na analogan način, razlike po azimutu su od  $5^\circ$  do  $16^\circ$ , a za razlike u radijalnoj brzini se kreću od 1.8 m/s do 8 m/s. Ovi podaci svakako ukazuju na vrlo veliki volumen oblasti gejta, kao i da će merenja izvan gejt oblasti traga imati male verovatnoće asocijacije. Naravno, treba uočiti da su ove vrednosti izračunate koristeći ekstremne vrednosti standardnih devijacija merenja. Greške u asocijaciji nastale kao rezultat grupisanja bi trebalo biti minimalne, čime bi se povećala izolacija klastera. Iz ovog razloga, pomenuta granična vrednost gejta se usvaja i koristiće se tokom eksperimentalnih potvrda koje će uslediti.

Neka je broj tragova u individualnom klasteru označen sa  $N_{tc}$ , broj merenja  $N_{mc}$ , a broj asocijacija trag-merenje  $N_{ac}$ . Par vrednosti  $(N_{tc}, N_{mc})$  nazivaćemo veličinom klastera. Predpostavka je da klasteri formiraju približno nezavisne regione. Ako usvojimo JPDA kao proceduru za asocijaciju podataka po klasteru, tada bi njena primena, uz gornju predpostavku, dovela do približno optimalnih težinskih vrednosti asocijacija unutar klastera. U tom slučaju, uobičajena ograničenja, vezana za formiranje mogućih združenih događaja dodele se takođe primenjuju, a vezana su za formiranje tzv. validacione matrice: svako merenje je moguće dodeliti tačno jednoj meti, a svaku metu je moguće dodeliti tačno jednom merenju. Više detalja o načinu formiranja ove matrice može se pronaći u [87].

Ako JPDA metodu primenimo na klaster razumno male veličine, tada bi vreme izvršavanja, posmatrajući najgori scenario, moglo biti prihvatljivo. Pod najgorim scenarijem podrazumevaju se sve jedinice u validacionoj matrici za posmatrani klaster. Pošto je kompleksnost eksponencijalno zavisna od broja tragova i merenja u validacionoj matrici, predpostavimo da je maksimalni dozvoljeni broj tragova i merenja u klasteru  $N_{tc,max}$ , odnosno  $N_{mc,max}$  za koji bi vreme izvršenja JPDA metode bilo prihvatljivo. Na svaki klaster koji bi ispunjavao ove uslove bila bi direktno primenjena JPDA metoda, što bi vodilo do približno optimalnih vrednosti asocijacionih težinskih faktora. Pogodan kriterijum za izbor ovih veličina je broj mogućih događaja združenih dodela, označen sa  $C_{max}$ , pošto gotovo proporcionalno pogađa vreme izvršavanja metode, potrebno za rešavanje asocijacija u jednom klasteru. Potrebno je primetiti da je broj događaja združenih dodela  $C$  u

klasteru isti i ako  $N_{tc}$  i  $N_{mc}$  zamene vrednosti, što je posledica pretpostavke vezane za formiranje mogućih događaja združene dodele. Isto tako, nijedan od ovih parametara nije kritičan sam po sebi.

Ukoliko klaster ima takvu veličinu da je broj mogućih združenih dodela veći od usvojenog  $C_{max}$ , tada je potrebno primeniti robustniju aproksimaciju. Dobri kandidati za ove suboptimalne metode dati su u radovima [79], [80], [81] i, u radu novijeg datuma [92]. Generalno gledano, dobri kandidati su algoritmi sa tendencijom ka linearnom kompleksnošću, pošto veličina klastera i broj internih asocijacija nemaju ograničenja. Iz tog razloga, robustan, jednostavan i brzi Roekеров suboptimalni JPDA metod [81] će se koristiti u ovim slučajevima, pri čemu se varijabla  $B$  iz jednačine (29) u [81] računa koristeći Helmikov predlog [93].

Izložena procedura bi trebalo da obezbedi optimalne asocijacije tragova i merenja unutar uspostavljenih limitacija o veličini klastera. Ove limitacije su visoko zavisne od implementacije usvojenog algoritma za asocijaciju podataka, usvojenog programskog jezika implementacije, kompajlera i hardvera. Dok je implementacija Roekеровe suboptimalne JPDA metode relativno jednostavna i jasna, implementacija JPDA ima ključnu ulogu u celoj proceduri, pošto ona određuje granice za izvršavanje u realnom vremenu. Konvencionalna implementacija predpostavlja formiranje validacione matrice iz liste asocijacija tragova i merenja za partikularni klaster. Matrica se koristi za ekstrakciju izvodljivih združenih događaja asocijacije, odnosno hipoteza, pod ranije navedenim pravilima. Ekstrakcija hipoteza se jednostavno implementira rekurzivnom selekcijom ekskluzivnog seta jedinica u kolonama validacione matrice (izuzetak je prva kolona, koja predstavlja dodele merenja klasteru), sve dok sva merenja nisu dodeljena samo jednom tragu (i obrnuto) ili su deklarirana kao klaster. Ovaj proces se grana u svakom koraku sa više kombinacija i može se predstaviti kao problem prolaza kroz čvorno drvo (engl. node tree) iz teorije grafova, uz dodatne limitacije. Proces takođe ima i svoju iterativnu implementaciju koja može obezbediti malo bržu egzekuciju u određenim slučajevima. Postoje implementacije kojima se izbegava korišćenje matrica izvodljivih događaja, kao što je projekciono bazirana JPDA [94], za koju je prijavljeno brže vreme izvršavanja nego kod konvencionalnih metoda implementacije. Međutim, konvencionalna implementacija je usvojena kao referentna i limitacije koje ona unosi za izvršavanje procedure u realnom vremenu će takođe biti predmet ispitivanja.

### 3. 2. 4 Pravila menadžmenta tragova

Usvojena pravila menadžmenta tragova bazirana su uglavnom na prethodnim radovima i dobroj praksi, sumarno prikazanoj u [15]. Tragovi prolaze kroz 4 “životna” stanja: tentativno, preliminarno, konfirmaciono i stanje brisanja. Stanja su kontrolisana preko potvrđujućih i brišućih M/N pravila i

brojača kvaliteta traga. Inicijaciju traga započinje svako merenje  $m$ , sa svojim skupom asocijacija prema tragovima  $T_m$  (ukoliko ih ima) za koje je potrebno da se ostvari uslov:

$$\sum_{t \in T_m} p_{m,t} < p_\gamma \quad (3.27)$$

gde je  $p_{m,t}$  marginalna verovatnoća asocijacije, data jednakošću (3.26).  $p_\gamma$  je granični inicijacioni parametar. Inicijator traga se dakle, dobija iz jednog merenja, a UKF filter se inicijalizuje prema jednakostima (3.10). Po dobijanju validne asocijacije u narednom koraku, tentativni trag postaje preliminarni. Ukoliko preliminarni trag prođe potvrdna M/N pravila, postaje potvrđen trag. Za potvrđujuća M/N pravila usvajaju se restriktivnije vrednosti nego u [14], tipično 7/8 ili 11/13 daju bolje rezultate u smislu pojave lažnih tragova. Tragu se od nastanka, pridružuje brojač kvaliteta traga [15], iniciran na vrednost -50, čija se vrednost menja u skokovima po  $\pm 5$  u zavisnosti da li postoji ažuriranje traga. Izuzetak je ažuriranje po obodima i udaljenim zonama, tipično pogođenim visokim klaterom, kada se inkrementira vrednošću +4. Maksimalna vrednost brojača je 50. Brisanje potvrđenih tragova obavlja se prema sledećim pravilima:

- Kada su zadovoljena  $M^*/N^*$  brišuća pravila potvrđenih tragova
- Kada brzina mete dostigne određenu graničnu vrednost  $v_{g,max}$
- Kada se dostigne minimum brojača kvaliteta traga

Za brišuća  $M^*/N^*$  pravila potrebno je usvojiti restriktivnije vrednosti, da bi se sprečila fragmentacija tragova, ali i produženje života traga povremenim ažuriranjem klaterom. Zbog toga se, uz njih dodaje brojač kvaliteta traga. Tipične vrednosti  $M^*/N^*$  pravila koje mogu delimično odgovoriti na fenomen iščezavanja meta su 8/8.

### 3.3 Eksperimentalni rezultati

Svrha analize asocijacije podataka je da se ispituju karakteristike scenarija praćenja u okruženju HFSW radara i da se potvrdi hipoteza da se većina asocijacija formira u klasterima malih veličina, koje je zatim, moguće jednostavno rešiti optimalnim procedurama za asocijaciju podataka. Ova pretpostavka je izvedena iz taktičkih razloga korišćenja samog senzora, koji se koristi za osmatranje ciljeva na daljinama preko linije horizonta, gde postoji velika disperzija meta na velikoj morskoj površini, kao karakteristika pomorskog saobraćaja, pa su velike koncentracije meta na maloj površi relativno redak slučaj. To znači da mala rezolucija HFSW radara i nemogućnost razlučivanja većih koncentracija meta praktično i neće imati većih efekata na kvalitet praćenja. Drugi važan aspekt je vreme egzekucije procedure praćenja, koje određuje njenu praktičnu upotrebljivost. Za ovo istraživanje obezbeđen je kontinualni set detekcija za oba HFSW radara.

Svaki set sadrži najmanje 100000 uzastopnih koraka skeniranja po radaru, što predstavlja preko 41 dan neprekidnog rada oba senzora.

U tabeli (3.1) sumirane su sve vrednosti parametara, bitnih za izvršavanje procedure praćenja.

Tabela 3.1. Parametri procedure praćenja

Parametar	Vrednost	Značenje
$T_{\text{CIIT}}$	33.28 s	Koherentno vreme integracije (vreme skeniranja)
$\sigma_{\rho, \text{min-max}}$	0.75-3 km	Raspon std. devijacije merenja rastojanja (videti tabelu 2.1)
$\sigma_{\theta, \text{min-max}}$	0.5-1.5°	Raspon std. devijacije merenja azimuta (videti tabelu 2.1)
$\sigma_{\dot{\rho}, \text{min-max}}$	0.16-0.64 m/s	Raspon std. devijacije merenja radijalne brzine (videti tabelu 2.1)
$P_D$	0.8	Verovatnoća detekcije
$\lambda_0$	$3.5 \cdot 10^{-7}$	Nominalna gustina klatera
$P_V$	0.1	Granična vrednost asocijacije merenja
$\gamma$	61/9.81	Gejting kriterijum
$v_{g, \text{max}}$	20 m/s	Maksimalna (granična) brzina tragova
M/N	7/8	Konfirmirajuće M/N pravilo
M*/N*	8/8	Brišuće M/N pravilo

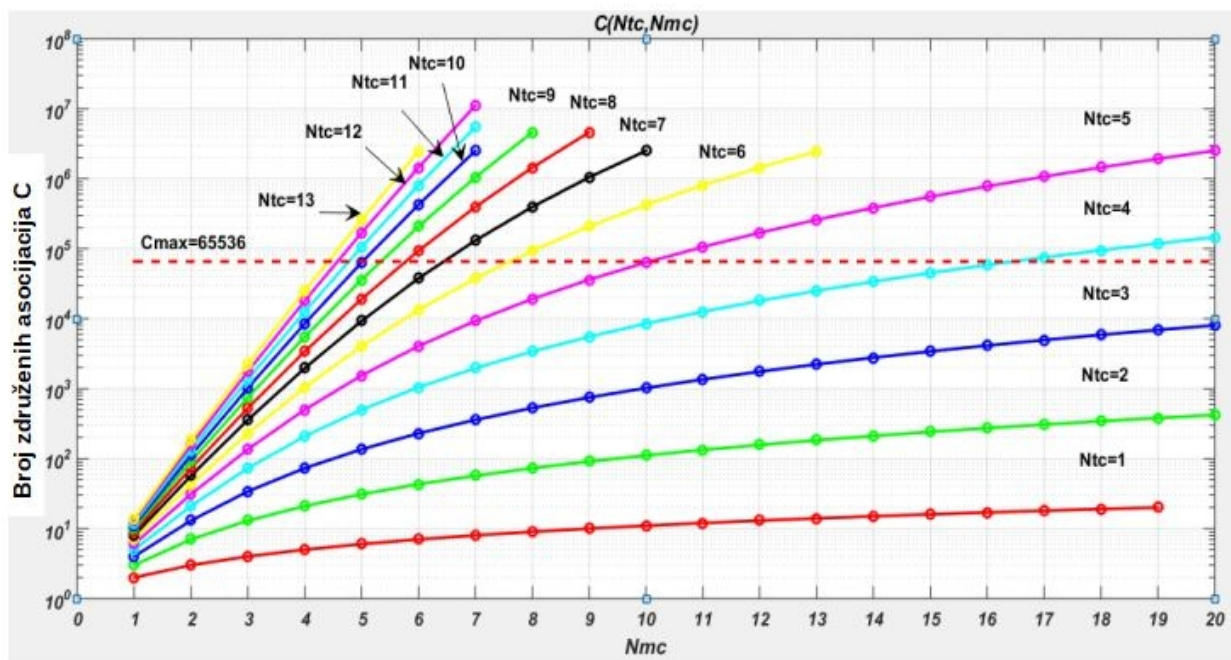
### 3. 3. 1 Statistička analiza i analiza performansi

Da bi se uradila statistička analiza, potreban je dodatni softverski blok u proceduri za asocijaciju podataka. Ovaj blok sakuplja statističke informacije o formiranim klasterima i vremenu egzekucije tokom svakog individualnog koraka. Podaci koji su od interesa su:

- $N_{\text{tc}}$  – broj tragova u klasteru,
- $N_{\text{mc}}$  – broj merenja koja su asocirana sa tragovima unutar klastera,
- $N_{\text{ac}}$  – broj asocijacija trag-merenje unutar klastera
- $C$  – ukupan broj događaja združenih dodela (hipoteza) u klasteru i
- $t_{\text{exec}}$  – vreme potrebno za izvršenje svih operacija u klasteru.

Eksperiment se izvršava na kompjuteru sa Intel Quad Core i5-7200 @2.5 GHz procesorom, pri čemu se procedura praćenja izvršava na jednoj programskoj niti. Program je napisan u C# programskom jeziku bez korišćenja SIMD (Single Instruction Multiple Data) instrukcijskog seta i koncepta paralelizma. Da bi se procesiranje vršilo u realnom vremenu, nije dovoljno da se procedura praćenja završi pre dolaska sledećeg seta podataka. Potrebno je dozvoliti i potencijalnim narednim stepenima obrade, kao što je senzorska fuzija, da se izvrše za pogodno vreme. Zbog toga je potrebno odrediti

granice za koje se smatra da je algoritam praćenja efikasan. U tu svrhu može se primeniti i izvestan statistički pristup problemu. Vreme skeniranja radara iznosi oko 33 sekunde, pa se može usvojiti granica izvršenja algoritma na 15 % ovog vremena - 5 s. Zbrajanjem svih formiranih klastera u uzorcima u toku preliminarnih istraživanja, dolazi se do podatka da je prosečan broj klastera po jednom skenu oko 50. Zbog toga je usvojeno da prosečno vreme izvršavanja klastera ne bi trebalo da pređe granicu od 100 ms. Za tako utvrđenu granicu, na eksperimentalnom računaru je urađen test sa JPDA algoritmom i rešavanjem validacione matrice, koji je pokazao da je za operacije asocijacije podataka potrebno za kompleksnost klastera u najgorem slučaju (sve jedinice u validacionoj matrici) bude takva da maksimalni broj mogućih događaja združenih asocijacija (hipoteza) ne prelazi  $2^{16}$ , da bi vreme egzekucije ostalo ispod 100 ms. Zbog toga je usvojeno da je glavni parametar kompleksnosti klastera  $C_{max}=2^{16}$ . Slika (3.5) pokazuje vezu između broja hipoteza za klasterne različitih veličina ( $N_{tc}, N_{mc}$ ) i uspostavljene granice  $C_{max}$ , prikazane crvenom isprekidanom linijom.



Slika 3.5. Broj združenih asocijacija C kao funkcija broja merenja  $N_{mc}$  i broja tragova  $N_{tc}$  u klasteru

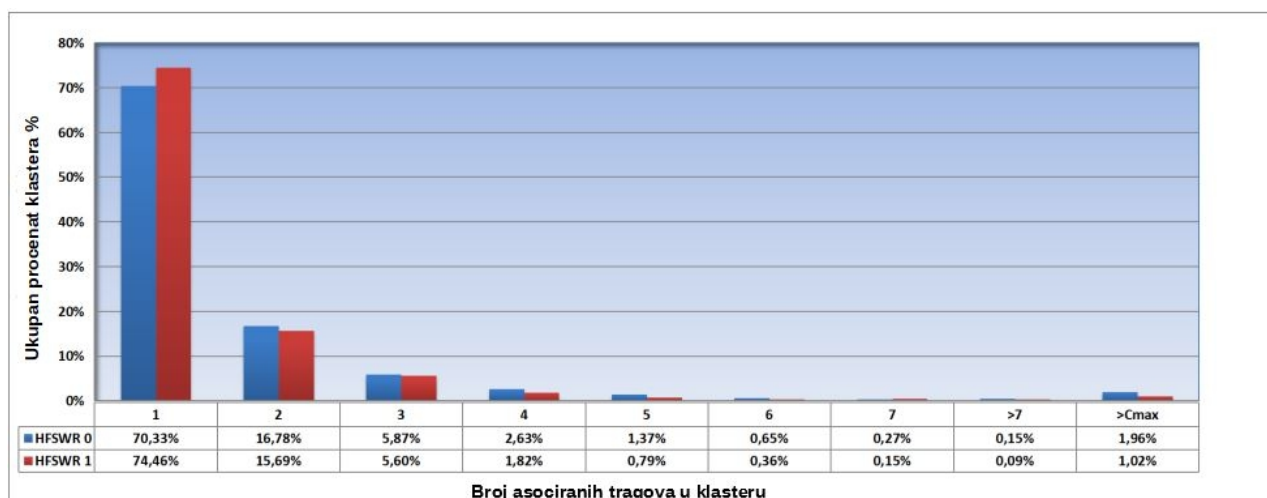
Tabela (3.2) pokazuje veličine klastera na koje se JPDA metoda može direktno primeniti. Potrebno je napomenuti da bilo koja kombinacija ( $N_{tc}, N_{mc}$ ) i obrnuto, može biti adresirana kao granična veličina klastera. Može se učiniti da je margina za klaster koji sadrži 6 tragova previše striktna ( $N_{mc}=7$ ), s obzirom da takav klaster sadrži 37633 hipoteza u najgorem slučaju. Ali, ako bi veličinu klastera pomerili samo za 1, tada bi, za klaster veličine (7,7), broj hipoteza porastao na 130922, dok bi za klaster veličine (8,6) broj hipoteza iznosio 93286, što je daleko više od predviđenog maksimalnog broja od 65536 hipoteza po klasteru.



Tabela 3.2. Dozvoljene veličine klastera za dati broj maksimalnih združenih asocijacija  $C_{max}=65536$

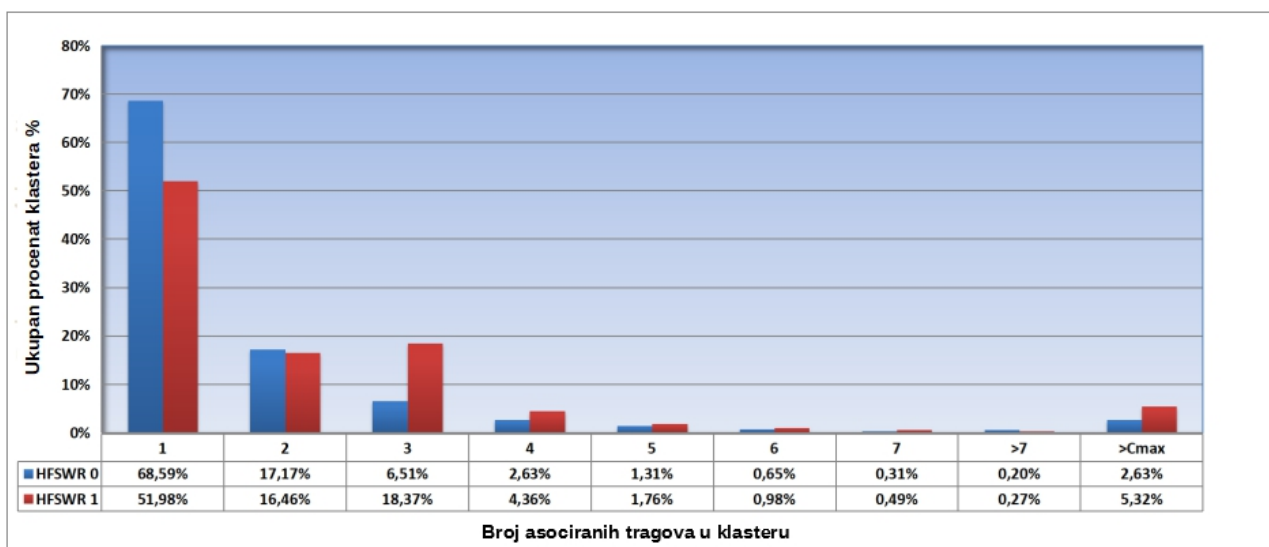
Broj tragova u klasteru $N_{tc}$	Maksimalni broj asociiranih merenja $N_{mc,max}$	Maksimalni broj združenih asocijacija $C$
1	65535	65536
2	255	65281
3	40	64081
4	16	58625
5	10	63591
6	7	37633
7	6	37633
8	5	19081
9	5	36046
10	5	63591

Prikupljeni rezultati za oba HFSW radara se prvo svrstavaju u dve grupe, po kriterijumu maksimalnog dozvoljenog broja hipoteza  $C_{max}$ . U prvu grupu spadaju oni klasteri koji ne zadovoljavaju kriterijum ( $C \leq C_{max}$ ), dok se druga grupa dodatno klasifikuje prema broju tragova u klasteru. Slika (3.6) prikazuje ovu distribuciju, a zadnji podatak ( $>C_{max}$ ) pokazuje procenat klastera (prvu grupu) nad kojima se primenjuje suboptimalna procedura za asocijaciju podataka, kako bi se vreme izvršavanja držalo u zadatim granicama. Može se uočiti da klasteri tipa “1 trag-više merenja” dominiraju u kalkulacijama, sa 70.33 % za HFSWR 0, i 74.46 % za HFSWR 1 u svim klasterima. Klasteri koji ispunjavaju uslove za direktnu aplikaciju JPDA metode čine 98.04% i 98.98% svih klastera, respektivno po HFSW radarima. Postoji mali procenat klastera koji sadrže neuobičajeno veliki broj objekata i u većini slučajeva je posledica dejstva jonosferske interferencije i uzburkanog mora, tj. loših meteoroloških uslova.



Slika 3.6. Distribucija veličine klastera za oba HFSW radara, bazirana na broju asociiranih tragova za sva merenja, dobijena u oblasti osmatranja

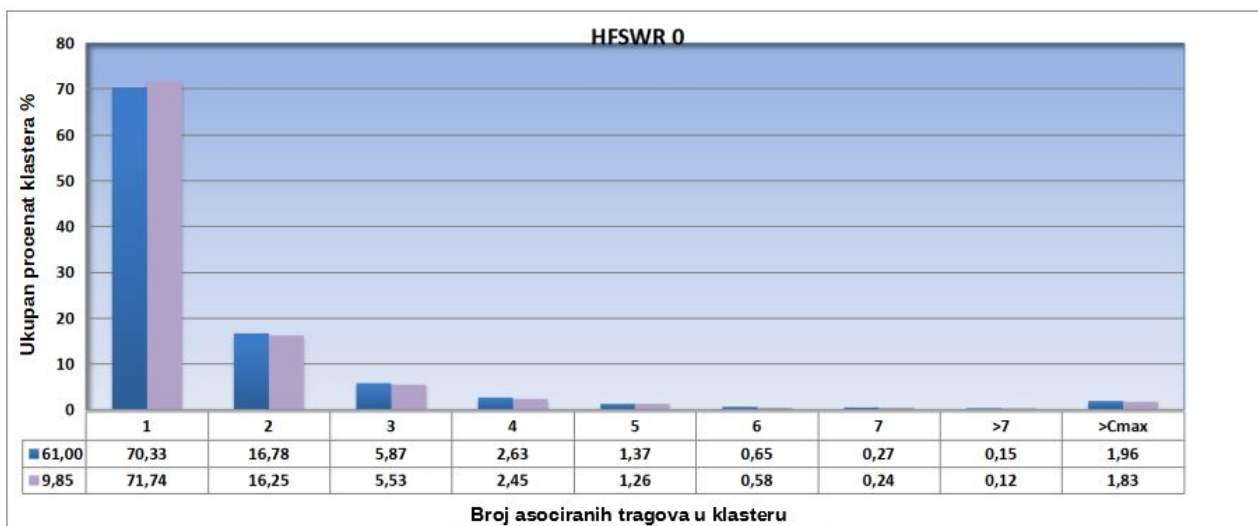
Kod HFSW radara je takođe uobičajena pojava velikih povremenih lokalnih skokova nivoa gustine klatera, koji takođe doprinose formiranju klastera velikih dimenzija koji se rešavaju suboptimalnom metodom i predstavljaju dodatnu poteškoću procedurama praćenja. S druge strane, veliki klasteri mogu biti kreirani u oblastima blizu velikih luka ili naftnih platformi, gde postoje velike koncentracije plovila na relativnoj maloj površini. Da bi se kvantifikovao uticaj svih pobrojanih faktora vrši se dodatni eksperiment, koji uzima u obzir operacije asocijacije podataka isključivo kod potvrđenih tragova. Za svaki potvrđeni trag tokom svog života, beleži se veličina klastera u kome je asociiran sa jednim ili više merenja u svakom koraku. Ukupno, postojalo je 25991 i 32826 potvrđenih tragova po HFSW radaru u datim setovima podataka. Ovde se pod pojmom “potvrđeni trag” smatra trag koji može poticati od lažne ili stvarne mete, kao što je definisano u [85]. Slika (3.7) prikazuje distribuciju veličine klastera za potvrđene tragove u kojima su ti tragovi bili ažurirani, koja je formirana na analogan način kao u prethodnom slučaju. Na prvi pogled, može se uočiti da je za oba HFSW radara broj klastera u kojima se primenjuje suboptimalna metoda neznatno povećan. Međutim, ova analiza broji ažuriranja potvrđenih tragova kroz klaster, što je indikacija da postoji više potvrđenih tragova koji se ažuriraju kroz isti klaster, na koji se primenjuje suboptimalna procedura. Ipak, broj optimalno rešenih asocijacija kod potvrđenih tragova i dalje je veoma visok: 97.37 % slučajeva za HFSWR 0 i 94.68 % slučajeva za HFSWR 1.



Slika 3.7. Distribucija veličine klastera bazirana na broju asociраних трагова u onim klasterima u kojima je vršeno ažuriranje potvrđenih tragova unutar oblasti pokrivanja oba HFSW radara

Razmotrimo sada slučaj kada se za gejt granicu bira znatno manja, ali uobičajena vrednost u literaturi,  $\gamma=9.85$ . Visoka vrednost gejt granice se može na prvi pogled učiniti nerazumno velikom, pogotovo jer su na to ukazivali dati primeri, koji su davali indicije o vrlo velikom volumenu gejt oblasti. Potrebno je primetiti da su te vrednosti ipak računate za ekstremne slučajeve grešaka merenja,

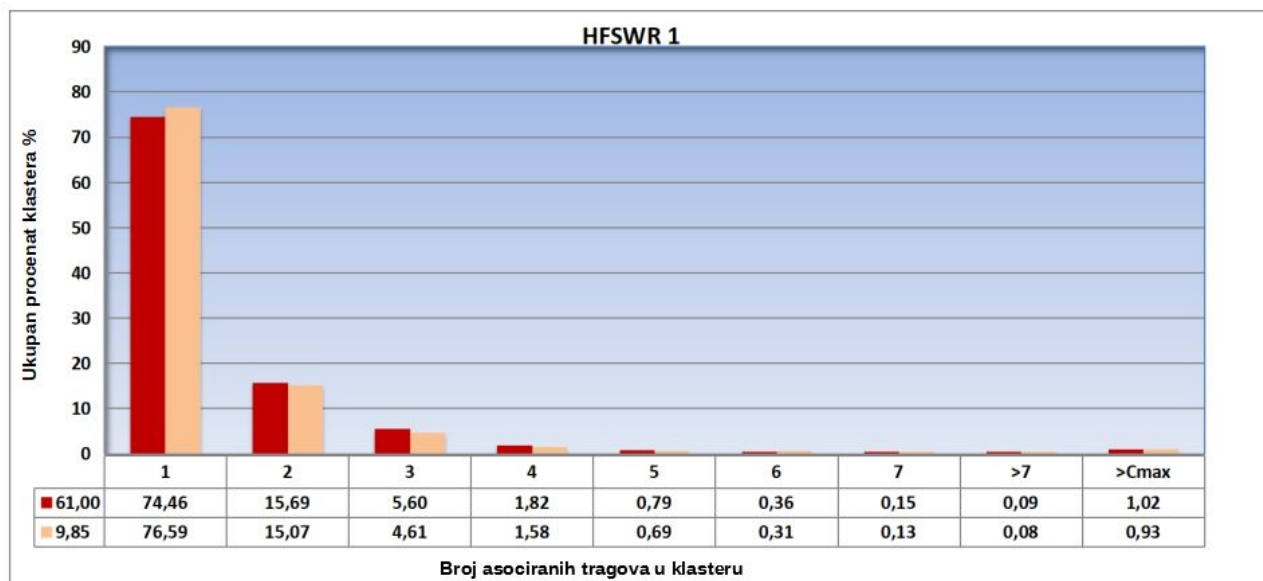
koji se ne mogu smatrati uobičajenom situacijom. Drugi autori, pri razmatranju sličnih problema, često koriste takve vrednosti gate granica koje obezbeđuju verovatnoće obuhvata validnog traga  $P_G$  u opsegu 0.99-0.999, kao na primer [14]. Da bi se potvrdili prethodni eksperimentalni rezultati, poređenje rezultata korišćenjem uobičajene i korišćene gejt granice se čini neophodnom, jer drastično povećanje volumena gejt oblasti može, prilično opravdano, dovesti do zaključka da je distribucija veličina klastera više u korist kompleksnijih klusterskih struktura. Zbog toga je urađen dodatni eksperiment sa usvojenom gejt granicom  $\gamma=9.85$ , iz koje se dobija verovatnoća obuhvata validnog merenja  $P_G=0.9916$ . Rezultati za oba HFSW radara su upoređeni sa prethodnim slučajem uvećane gejt granice  $\gamma=61$  i prezentovani na slikama (3.8) i (3.9). Ova poređenja pokazuju da u oba slučajeva distribucija veličine klastera ima veoma slične osobine. Razlika leži u tome da se broj klastera tipa “1 trag-više merenja” povećao za 1 do 2 %, dok je broj kompleksnijih klastera neznatno opao. Prema rezultatima, velike vrednosti gejt granice bi trebalo da se koriste jer obezbeđuju bolju izolaciju klastera na taj način, dok je udeo kompleksnijih klastera skoro identičan kao u slučaju gejt granice  $\gamma=9.85$ .



Slika 3.8. Komparacija distribucije veličine klastera bazirana na broju asociiranih tragova za dve različite vrednosti gejt granice  $\gamma=61$  i  $\gamma=9.85$ , for HFSWR 0.

Sada razmotrimo vreme potrebno za izvršenje procedure za asocijaciju podataka. Ukoliko bi i jedan klaster imao takve dimenzije koje prevazilaze uspostavljene granice, ukupno vreme za egzekuciju procedure praćenja za zadati korak prevazišlo bi zacrtanu granicu prihvatljivosti metode (5 s). Na primer, klaster sa 8 tragova i 9 merenja u najgorem slučaju ima 4.5 miliona hipoteza i zahteva skoro 13s za egzekuciju. Međutim, u opštem slučaju, u jednom koraku može se pojaviti više ovakvih primera. Kao što se može videti sa slika (3.8) i (3.9), velika većina klastera (preko 98 % u najgorem slučaju) se može procesirati u okviru vremenskih limitacija, dok mali broj (manji od 2 %) zahteva primenu suboptimalnih metoda, kakav je Roekеров algoritam. Ovaj algoritam, zbog svoje

robustnosti ne predstavlja egzekucioni problem za velike klasterne. Na datom eksperimentalnom uzorku, zabeleženo je prosečno vreme izvršavanja cele procedure praćenja ispod 300 ms, sa ispadima koji ne prelaze 1.2 s, što je daleko niže od zadate granice realnog vremena od 15 % vremena skeniranja od 5 s.



Slika 3.9. Komparacija distribucije veličine klastera bazirana na broju asociраних трагова za dve različite vrednosti gejt granice  $\gamma=61$  i  $\gamma=9.85$ , for HFSWR 1.

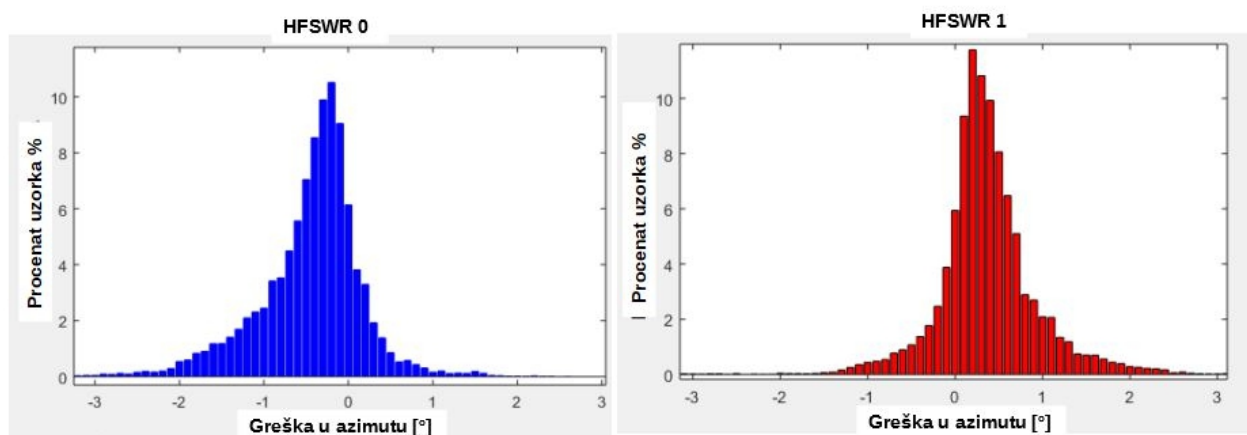
### 3. 3. 2 Ispitivanje rezultata rada heurističke procedure praćenja u terenskim uslovima

Potvrda rezultata definisane heurističke procedure praćenja obaviće se eksperimentalno, uz korišćenje AIS podataka, kao jedine moguće reference u terenskim uslovima. Prvo je ispitivana preciznost praćenja meta pojedinačnih HFSW radara. Ova preciznost može biti procenjena poređenjem sa AIS podacima, preko fuzionih algoritama HFSWR senzora [6] i integracionog algoritma AIS i HFSWR senzora [8]. Svaki fuzionisani trag sadrži informaciju o tragovima partikularnih HFSW radara od kojih je sačinjen. Kada se uspostavi AIS integracija sa odgovarajućim fuzionisanim tragom, umesto podataka o fuzionisanom HFSWR tragu, uparuju se AIS podaci sa podacima tragova partikularnih HFSW radara. Informacije o poziciji AIS mete se uzimaju kao istinite, i zajedno sa informacijama o brzini i unapred poznatoj lokaciji HFSW radara, koriste se za računanje rastojanja, azimuta i radijalne komponente brzine AIS mete, kako bi se vršilo direktno poređenje sa izlaznim informacijama traga.

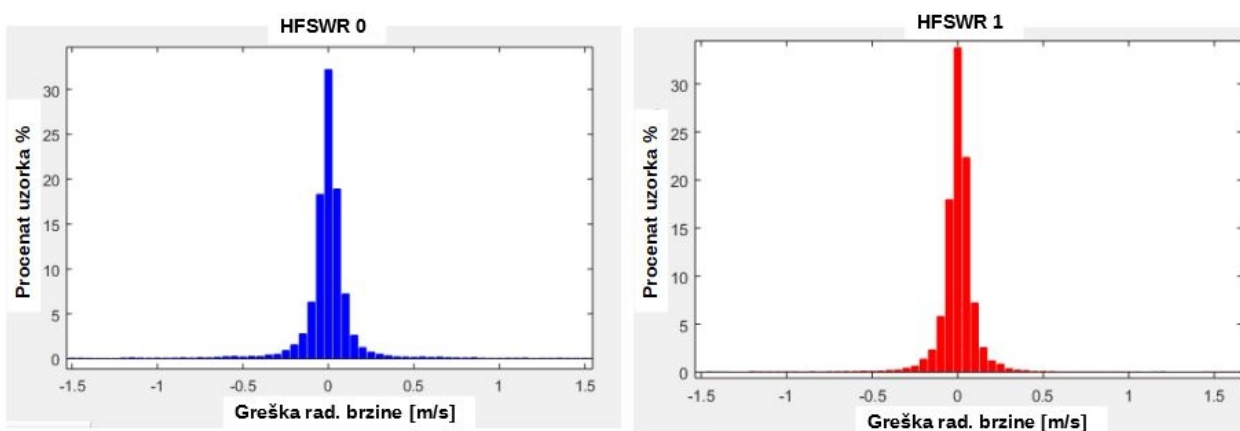
Nisu svi parovi tačaka AIS-trag pogodni za evaluaciju preciznosti praćenja. Prvi problem predstavlja međusobni tajming podataka. Maksimalno odstupanje vremena emitovanja AIS i traga je limitirano na 5 sekundi, kako bi se izbegle ekstrapolacije pozicije AIS u vremenu, za duže periode.

Smatra se dobrom pretpostavkom da tako male vremenske razlike ne dovode do ozbiljnijih grešaka zbog veličine, male manuverabilnosti i brzine meta. Drugi problem jesu integracije sa niskim nivoom verovatnoće. Kada integraciona verovatnoća AIS i HFSWR mete opada prema integracionoj granici, koja je postavljena na 51 %, kao što je opisano u [8], događaj dezintegracije postaje sve izvesniji, pošto dve mete imaju znatno različite parametre kretanja i povećavaju međusobnu udaljenost. Da bi se izbegle situacije bliske dezintegraciji ili čak pogrešnoj integraciji, u obzir za analizu se uzimaju samo oni AIS-HFSWR parovi za koje je prijavljena verovatnoća integracije veća od 55 %.

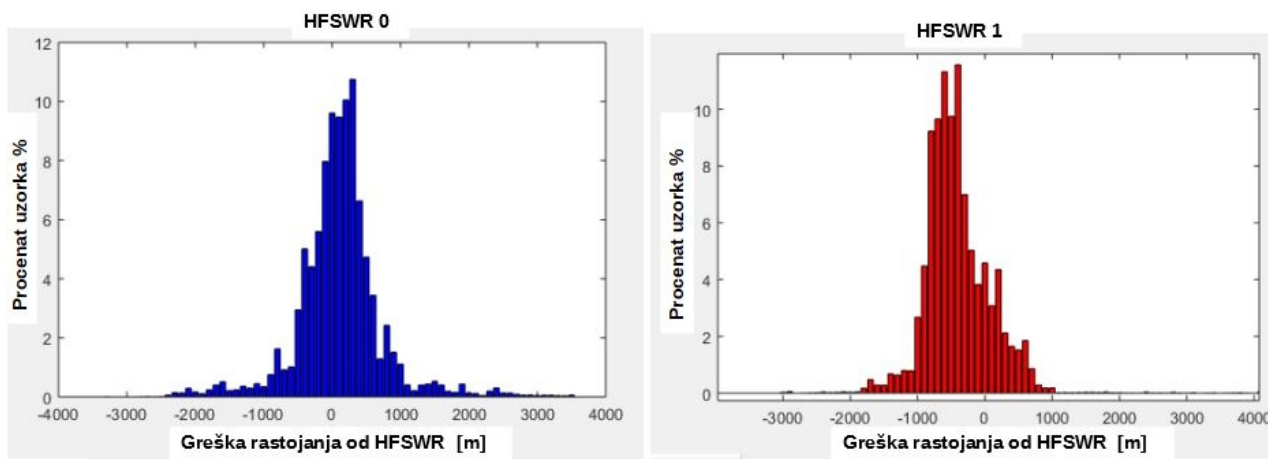
Preko 15000 AIS-HFSWR parova vrednosti se koristi u analizi preciznosti procedure praćenja. Distribucije grešaka parametara kretanja prikazane su na slikama (3.10)-(3.13). Ukupno 16424 AIS-HFSWR parova je zabeleženo za HFSWR 0 i 19100 za HFSWR 1. Uzorak je formiralo 90 različitih AIS meta, koje su integrisane sa HFSWR tragovima pod gore navedenim uslovima, a koje su praćene sa po ukupno 134, odnosno 150 različitih tragova HFSWR 0 i HFSWR 1, respektivno.



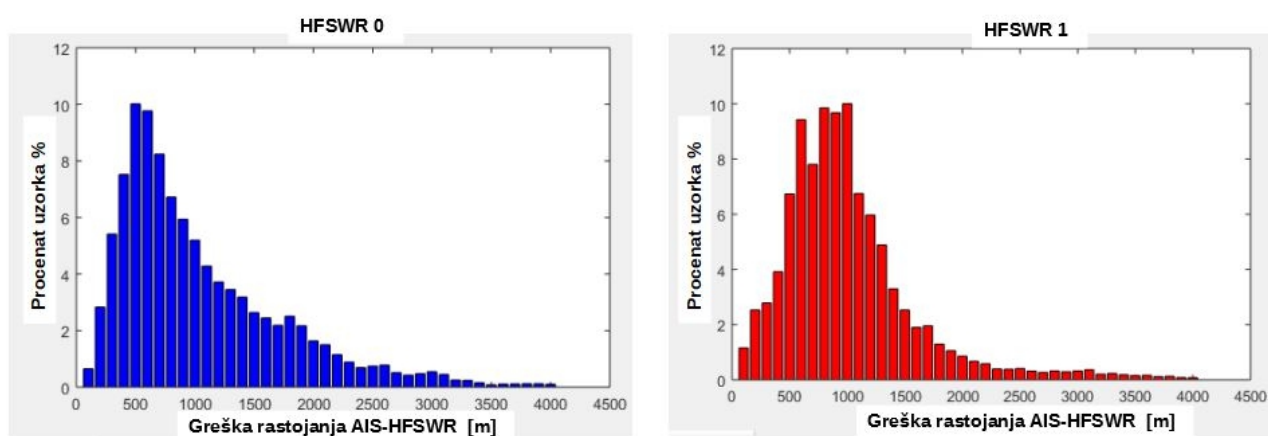
Slika 3.10. Distribucija greške po azimutu za oba HFSW radara



Slika 3.11. Distribucija greške po radialnoj brzini za oba HFSW radara



Slika 3.12. Distribucija greške rastojanja od HFSW radara, data za oba HFSW radara



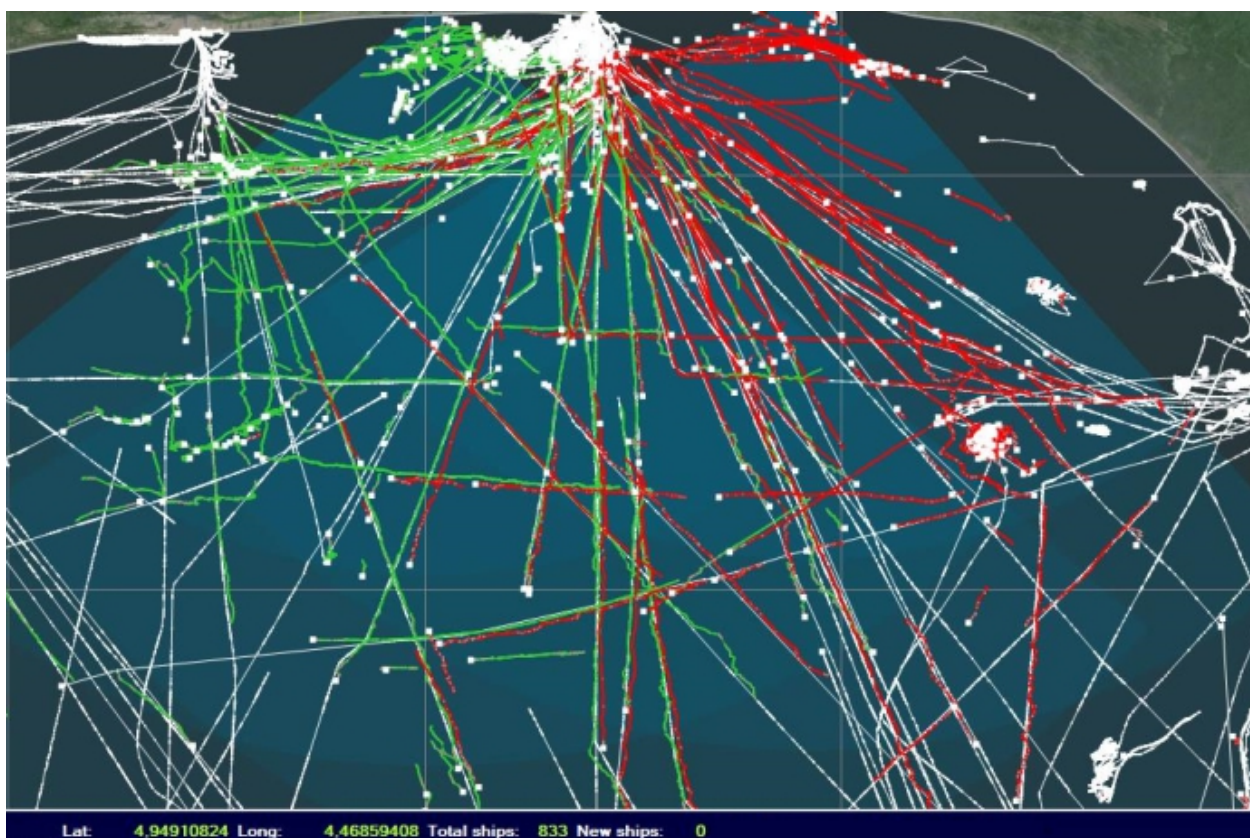
Slika 3.13. Distribucija greške rastojanja AIS-HFSWR data za oba HFSW radara

Parametri greške praćenja sumirani su u tabeli (3.3). Može se primetiti da su standardne devijacije grešaka duboko unutar odgovarajućih veličina rezolucionih ćelija senzora. Greške u rastojanju HFSWR-AIS su, u proseku, manje od 1 km, što je indikacija poboljšanja preciznosti kao posledica primenjene procedure praćenja.

Tabela 3.3. Pregled parametara grešaka u poređenju AIS-HFSWR trag

Veličina	HFSWR	Srednja vrednost $\mu$	Standardna devijacija $\sigma$
Greška azimuta [°]	0	-0.52	0.79
	1	0.32	0.61
Greška u rastojanju od HFSWR [m]	0	60.02	641.83
	1	-453.51	499.48
Greška radijalne brzine [m/s]	0	-0.0114	0.5527
	1	-0.0026	0.3951
Greška međusobnog rastojanja [m]	0	992.70	695.7901
	1	964.39	589.4618

Svrha narednog eksperimenta je generalna vizuelna ocena kvaliteta praćenja. Na slici (3.14) prikazane su obe oblasti pokrivanja radara sa svim metama čiji su tragovi formirani tokom prolaska kroz zone oba radara tokom 24 h observacionog perioda. Tragovi crvene boje potiču od HFSWR 0, a zelene potiču od HFSWR 1. Tokom 24 h pojavilo se preko 750 potvrđenih tragova za HFSWR 0 i preko 650 potvrđenih tragova za HFSWR 1. Belom bojom označeni su tragovi koji potiču od zemaljskih i satelitskih AIS izvora podataka. Treba istaći da u ovom regionu sveta nisu postojala regulatorna tela koja bi primorala propisno korišćenje AIS uređaja na brodovima. To je dovelo do situacija da se AIS podaci razlikuju od HFSWR podataka, i to zbog toga što su ti uređaji jednostavno u toku praćenja bili povremeno ili stalno isključivani. Dodatno, AIS podaci mogu imati znatnu latenciju, što opet dovodi do znatne razlike između trenutnih AIS i HFSWR podataka. Ove napomene su bile potrebne samo kao dodatno objašnjenje, kako bi se bolje razumela situacija na slici (3.14). Ukupna oblast pokrivanja oba radara zauzima površ od oko 100000 km<sup>2</sup>, pokrivajući zapadni deo Gvinejskog zaliva. Na kraju eksperimenta aktivno je bilo 833 AIS i HFSWR mete, što približno daje jednu metu na svakih 100 km<sup>2</sup> površine. Iz ovakvih podataka i rezultata eksperimenta može se ustanoviti osnovanost pretpostavki o disperziji meta na velikoj površini a, izuzev u oblastima gušće koncentracije meta, mala rezolucija radara nema previše štetan uticaj na proces praćenja.



Slika 3.14. Oblast pokrivenosti oba HFSW radara i svi tragovi kreirani u toku 24 h.

## 4 Redukcija lažnih tragova u algoritmima praćenja u okruženju izahorizontskih radara

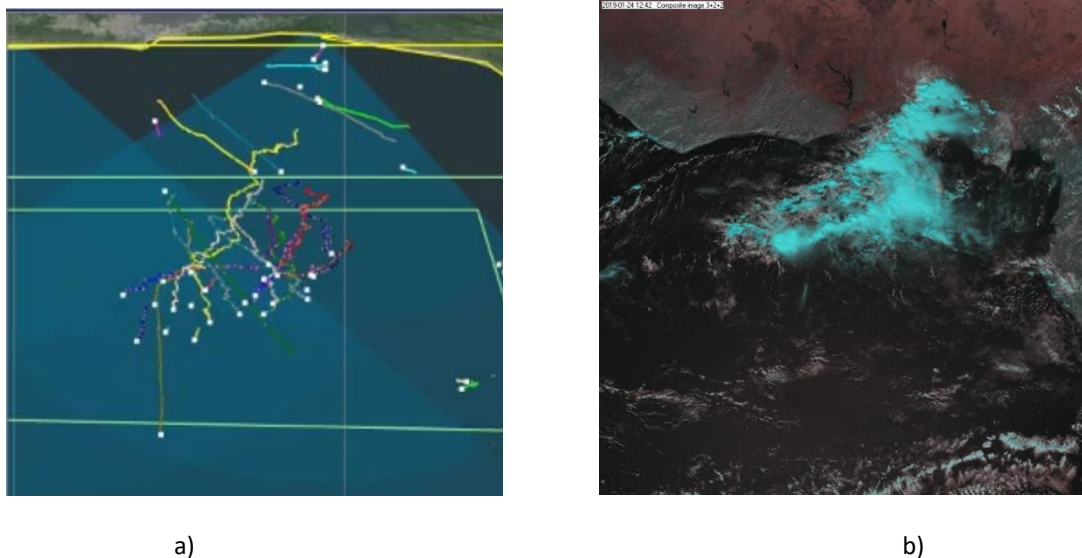
U ovoj glavi biće izložen problem promocije lažnih tragova nastalih kao posledica klaterskih povraćaja. U glavi 2 je vršen pregled postojećih sistema, pri čemu su prikazivani rezultati praćenja gde je ukazano na očigledne probleme sa kojima se suočavaju algoritmi praćenja tih rešenja, kao što su veliki broj lažnih kratkotrajnih tragova, njihova fragmentiranost i neuobičajeno velik broj tragova koji se pružaju u radijalnim pravcima u odnosu na radarski položaj. Cilj tih istraživanja prevashodno je dokaz upotrebljivosti HFSWR senzora za potrebe praćenja pomorskih ciljeva, pa ekstremne situacije, kao što su pogoršani meteorološki uslovi, nisu direktno proučavane kao uzročnici lažnih tragova. Međutim, upravo je ponašanje senzora u ekstremnim situacijama ono što i definiše njegovu upotrebnu vrednost, jer je svrha ovih senzora konstantan monitoring u često kritično važnim sistemima, pa i vojnim primenama. Zbog toga će se proučiti kakav uticaj povišeni morski klater prilikom velikih perturbacija morske površine (visokog stepena stanja mora) ima na proces praćenja tragova, kao i izuzetno snažni jonosferski povraćaji. Na osnovu tih razmatranja biće predložena procedura eliminacije lažnih tragova, a zatim će biti izvršena razmatranja o načinu i mogućnostima primene IPDA klase algoritama, prilagođenih uslovima rada u OTHR okruženju i daljoj redukciji kompleksnosti izvršavanja algoritma praćenja. Na kraju, biće izvršena evaluacija poboljšanja generalnih i kratkoročnih performansi praćenja HFSW radarima.

### 4.1 Uslovi praćenja ciljeva u slučajevima nepovoljnih vremenskih prilika

U poglavlju 2.3.1 ukazano je na manifestaciju morskog klatera, na slici (2.10), na RD mapama, u slučajevima povišenog stanja mora, koja je ukazivala na postojanje mnoštva tačkastih ciljeva. Pokazuje se da CFAR algoritam tada izbacuje visokokorelisane detekcije u susednim skenovima, koje za posledicu imaju formacije lažnih tragova prikazanih na slici (4.1 (a)), uz primenjenu proceduru praćenja iz poglavlja 3. Ova pojava obesmišljava proces praćenja ciljeva i čini OTHR nepouzdanim senzorom, pa je potrebno ispitati načine za njenu eliminaciju. Jasno je da pravila menadžmenta tragova, data u glavi 3, ali i u [14], nisu dovoljna za rešavanje ovog problema, za koji je potrebno ispitati mogućnost primene sekvencijalnih tehnika ocene pouzdanosti traga [15], kao što su  $\chi^2$  sume i njihove modifikacije ili SPRT (engl. *Sequential Probability Ratio Test* - SPRT) testove, bazirane na istoriji asocijacija merenja i tragova, na primer [95]. Postoje i drugi pristupi, bazirani na neuralnim mrežama, kao na primer [39], u kome je napravljen pokušaj eliminacije



formacija lažnih tragova korišćenjem trenirane PNN mreže (engl. *Probabilistic Neural Network* - PNN), koja u fuzionom sloju obrade prepoznaje formaciju i eliminiše ovu pojavu, u simulaciji modela. Ipak, ovu pojavu je moguće i potrebno eliminisati na nižem nivou obrade, jer cilj uvođenja nove metode za ublažavanje pojave lažnih tragova mora biti sprečavanje njihove promocije.



a) b)  
Slika 4.1. Izgled lažnih tragova nastalih kao posledica pikova morskog klatera usled olujnog vremena a) za HFSWR 0, na dan 24.01.2019. Na slici b) prikazan je satelitski izveštaj oblačnosti i nivoa prosipacije u Gvinejskom zalivu, izvor [96]

Da bi se ispitale osobine okruženja u kojima se formiraju ovi tragovi, prikupljeni su uzorci značajnih poremećaja meteoroloških prilika i pojave snažnog dejstva jonosferske interferencije u zonama koje odgovaraju refleksijama iz E-sloja, prikazani u tabeli (4.1). Oznaka uzorka predstavlja godinu i broja dana u godini, dakle, referencira datum pojave. Refleksije iz E-sloja uglavnom uspešno regulišu postojeća pravila menadžmenta traga, ali postoje slučajevi izuzetno snažnih refleksija, koji se manifestuju uglavnom kratkotrajnim serijama solidno korelisanih detekcija, izazivajući značajno povećanje broja lažnih tragova. Značajniji uticaj refleksija iz F-slojeva jonosfere na pojavu lažnih tragova nije primećen, zbog manifestacije pojave na samom obodu oblasti pokrivanja radara.

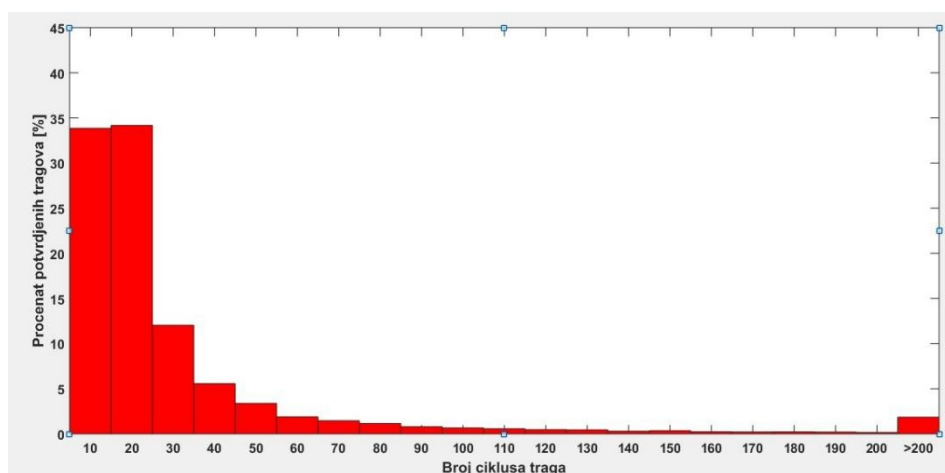
Tabela 4.1. Selektovani uzorci sa nepovoljnim meteorološkim prilikama u trajanju od 1 dan

Uzorak	Glavni uzročnik poremećaja	Trajanje pojave u toku uzorka
2018118	Visoko stanje mora	7h-13h
2018121	Visoko stanje mora	13h-21h
2018145	Visoko stanje mora	8h-13h
2018283	Visoko stanje mora	7h-13h
2018289	Visoko stanje mora	9h-14h
2019024	Visoko stanje mora	9h-14h
2019039	Jonosferska interferencija iz E sloja	14h-19h
2019049	Visoko stanje mora	12h-19h

Uslovi eksperimenta identični su onima iz glave 3, izuzev M/N pravila potvrđivanja traga, postavljenog na vrednost 5/6, slično kao u [19], da bi se dobio veći skup potvrđenih lažnih tragova i izvršila odgovarajuća analiza. U svakom koraku ažuriranja svih tragova beležiće se Mahalanobis rastojanje najbližeg suseda. Na osnovu ovih informacija biće izvršen dizajn procedure za eliminaciju lažnih tragova, poređenjem sa AIS rezultatima, a zatim i analiza poboljšanja opštih i trenutnih performansi praćenja za oba HFSW radara.

## 4.2 Dizajn procedure za eliminaciju lažnih tragova uzrokovanih nepovoljnim vremenskim uslovima

Dizajn procedure za eliminaciju lažnih tragova određen je izborom metode za ocenu kvaliteta traga, čiji će kraći pregled biti izvršen u odeljku (4.2.1). Međutim, bitnu ulogu predstavlja i analiza ponašanja samih lažnih tragova, pre svega, njihovo vreme života, tj. postojanja. Vreme života potvrđenih lažnih tragova koji potiču od jonosferske interferencije je u većini slučajeva do 30 ciklusa, međutim, lažni tragovi od agitacije morske površine mogu biti daleko dugotrajniji. Na slici (4.2) prikazana je distribucija trajanja lažnih tragova iz seta uzorka iz tabele (4.1). Pokazuje se da u preko 68% slučajeva, njihovo trajanje nije duže od 20 iteracija, odnosno u preko 80% slučajeva ne traje duže od 30 iteracija. U ovom domenu dominiraju tragovi koji su posledica jonosferskih povraćaja i kratkotrajnih izboja morskog klatera. U preostalim slučajevima, uzročnici su posledica snažne agitacije morske površine i nekooperativni ciljevi, koji se ne mogu isključiti iz analize analitičkim putem. Njihov uticaj na rezultate svakako postoji, ali je njihov broj ipak daleko manji od broja tragova nastalih posmatranim poremećajima.



Slika 4.2. Distribucija života potvrđenih lažnih tragova za sve uzorke i oba radara.

## 4. 2. 1 Primena pouzdanosti traga i postojećih sekvencijalnih tehnika promocije traga u praćenju ciljeva

Osnovne sekvencijalne tehnike za ocenu kvaliteta traga predstavljaju SPR testovi, kriterijumi verodostojnosti i pokazatelji kvaliteta traga. SPR test se koristi da bi se izabralo između dve hipoteze, da je prava meta prisutna ili da povraćaji potiču od lažnih alarma ili klatera. Svaki put po prijemu podataka, moguća su 3 ishoda, da se prihvati jedna od dve hipoteze ili da se odluka odloži do prijema novog seta podataka. Bazična forma testa zasnovana je na verovatnoći detekcije i lažnog alarma, ali su razvijene metode koje uključuju i istoriju rezidualnih informacija ažuriranja traga, kao na primer [95].

Bajesov pristup je relativno jednostavna sekvencijalna tehnika koja, za razliku od bazičnog SPR testa, uključuje i rezidualne informacije ažuriranja traga [15]. Zasnovana je na formiranju, tj. definisanju kriterijuma verodostojnosti  $L(K)$  za sve skenove povezane sa posmatranim tragom, kao proizvodu verodostojnosti  $L_k$  individualnih iteracija skeniranja, u skupu od  $K$  uzastopnih skenova:

$$L(K) = \prod_{k=1}^K L_k \quad (4.1)$$

Aposteriorna verovatnoća pojavljivanja istinite mete za dati sken  $k$  se u ovom procesu ažurira na sledeći način:

$$P_k(T) = \frac{L_k P_{k-1}(T)}{L_k P_{k-1}(T) + 1 - P_{k-1}(T)} \quad (4.2)$$

Test se smatra uspešnim ukoliko je, za izabranu graničnu vrednost  $P_A$  i zadatu inicijalnu apriornu verovatnoću pojavljivanja istinite mete u datom skenu  $P_0(T)$  ispunjeno:

$$P_k(T) \geq P_A, L(k) \geq \frac{P_A(1-P_0(T))}{(1-P_A)P_0(T)} \quad (4.3)$$

Izraz za individualne verodostojnosti  $L_k$  se dobija preko Gausove funkcije verodostojnosti [15] za pridruženo merenje i trag, a inicijalna verovatnoća istinitog traga se definiše preko gustine verovatnoća lažnih i istinitih tragova  $\beta_{FT}$  i  $\beta_{TN}$ :

$$P_0(T) = \frac{\beta_{TN}}{\beta_{TN} + \beta_{FT}} \quad (4.4)$$

U slučaju nepostojanja pridruženih detekcija, individualna verodostojnost traga se računa kao:

$$L_k = \frac{1-P_D}{1-P_F} \quad (4.5)$$

gde su  $P_D$  i  $P_F$  verovatnoće detekcije i lažnog alarma, respektivno.

Kvalitet traga je poželjno izraziti na određeni način, a u prethodnom tekstu je dat opis sekvencijalnih tehnika, gde je kvalitet traga izražavan preko verovatnoće postojanja traga. Međutim, mogući su i drugačiji pristupi, koji se oslanjaju na definisanje parametara pouzdanosti, prema određenim pravilima. Jedno od takvih pravila dato je u [15], tzv. kumulativna  $\chi^2$  pouzdanost traga

(engl.  $\chi^2$  score), a koje se računa uz pomoć primenjenog kvadratnog statističkog Mahalanobis odstojanja predikcije traga i asociiranog merenja  $d^2$ . To rastojanje poseduje, uz izvesne uslove,  $\chi^2_M$  raspodelu sa  $M$  stepeni slobode, pri čemu je  $M$  dimenzija mernog vektora. Pravilo je orijentisano prema korelaciji najjačeg (najbližeg) suseda. Jedna pogodna forma ovog pravila je data uz upotrebu kumulativnog pokretnog prozora od  $N_k$  zadnjih iteracija traga:

$$C_k = \frac{1}{N_k} \sum_{i=1}^{N_k} d_i^2 \quad (4.6)$$

Prema [15], veličina  $N_k C_k$  ima  $\chi^2_{N_k M}$  raspodelu sa srednjom vrednošću  $i$  i standardnom devijacijom:

$$E(C_k) = M, \sigma(C_k) = \sqrt{\frac{2M}{N_k}} \quad (4.7)$$

Postavljanje graničnih vrednosti pouzdanosti traga može se izvesti aproksimacijom Gausove raspodele, koja je validna za  $MN > 10$ . Za gornju graničnu vrednost može se usvojiti  $M + \alpha\sigma(C_k)$ ,  $\alpha \geq 3$ . Kada se ova vrednost pređe, tada je ili došlo do pogrešne asocijacije podataka ili je u pitanju netačan model filtriranja.

#### 4. 2. 2 Dizajn metode za potvrdu i brisanje tragova zasnovane na najjačem susedu

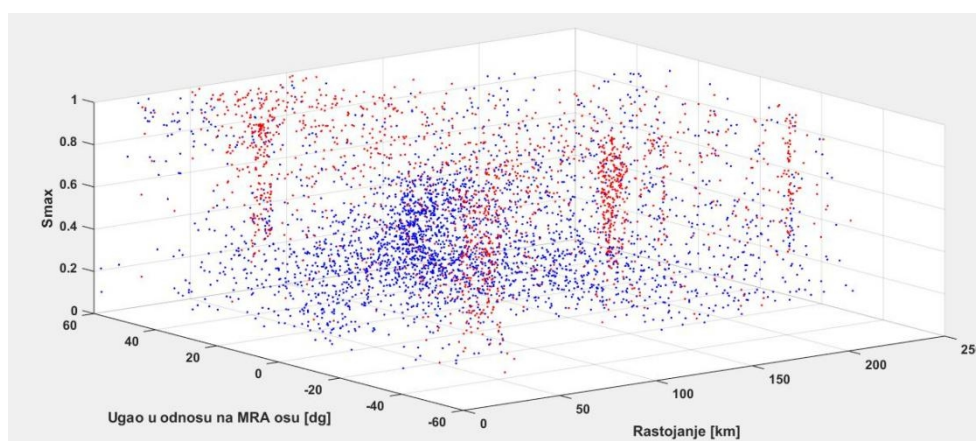
Parametar pouzdanosti traga, u daljem tekstu s-parametar, zasniva se na paradigmi najjačeg suseda i sumi normalizovanih pdf asocijacija traga i merenja, prema jednakosti (3.16), analogno (4.6). Tragu se pridružuje pokretni prozor veličine  $N_{sw}$  u kome se računa parametar kvaliteta traga  $s(k)$ , u iteraciji  $k$  života traga, kao srednja vrednost zadnjih  $N_s(k)$  najboljih rezultata asocijacija:

$$s(k) = \frac{1}{N_s(k)} \sum_{i=k-N_s(k)+1}^{N_s(k)} p_{n,max}(i) = \frac{1}{N_s(k)} \sum_{i=k-N_s(k)+1}^{N_s(k)} e^{-\frac{d_{min}^2(i)}{2}} \quad (4.8)$$

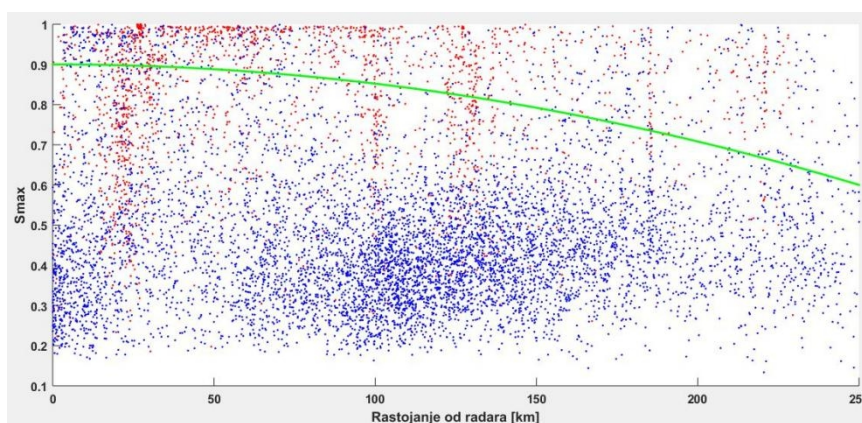
$$N_s(k) = \begin{cases} k, & k < N_{sw} \\ N_{sw}, & k \geq N_{sw} \end{cases}$$

Da bi s-parametar dobijao relevantne vrednosti, potrebno je usvojiti minimalno vreme života, potrebno za akumulaciju istorije kretanja  $N_{s,min}$ , nakon čega se smatra da se može primeniti. S obzirom na raspodelu života lažnih tragova sa slike (4.2), usvaja se vrednost  $N_{s,min} = 15$ , kojom se pokušava s jedne strane izbeći uticaj čestih neažuriranja tragova na vrednost parametra, a sa druge strane podstaći eliminaciju kratkotrajnih lažnih tragova, po cenu malog smanjenja ToT performansi radara. Uočeno je da postoji veliki broj kratkotrajnih tragova sa vrlo visokim s- parametrom, koji zatim nestaju zbog nedostatka ažuriranja. Potrebno je postići efekat da se prvo potvrđuju tragovi najviših performansi, pa se granične vrednosti potvrde traga postavljaju na maksimum. Usvojena je strategija postepenog spuštavanja graničnih vrednosti sa brojem iteracija života traga do

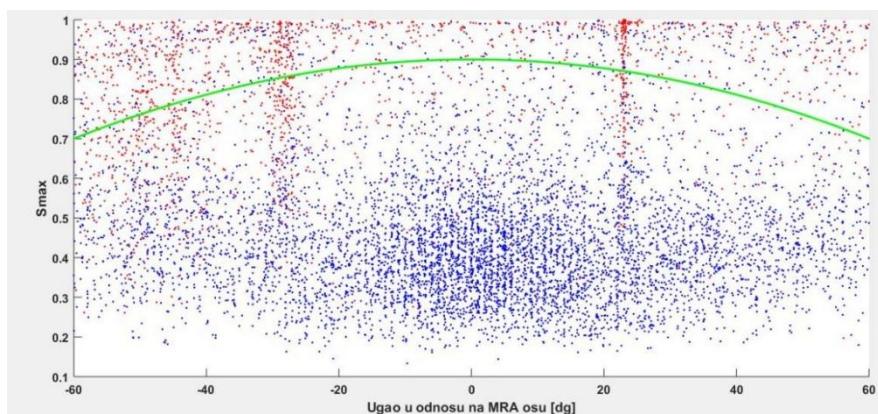
iteracije  $N_{s,A}=30$ , kada granični kriterijumi postaju fiksni. To je ujedno i vrednost za koju je najveći broj lažnih tragova ukinut uz važeća pravila menadžmenta traga iz poglavlja 3. Preostali tragovi su u najvećem broju nekooperativni ciljevi i rezultati klaterskih povraćaja usled oluja. Potrebno je obezbediti mogućnost ispravke greške u slučaju potvrde lažnog traga. Očekuje se da će većina kooperativnih i nekooperativnih ciljeva imati relativno stabilno ažuriranje i visoke vrednosti s parametra, pa uz dovoljno širok prozor  $N_{sw}$ , manji nedostaci ažuriranja traga ne bi trebalo da imaju presudan uticaj, a potrebno je sprečiti dodatnu fragmentaciju tragova. Zato se usvaja šira vrednost  $N_{sw}=40$ , a domet metode ublažavanja pojave lažnih tragova  $N_{s,max}$  se postavlja na vrednost 120. Prioritet metode jeste konfirmacija tragova pokrivenih AIS podacima, jer postoji velika verovatnoća njihovog postojanja. Svakako, i ovde su moguće greške, u smislu slučajnog vezivanja tragova u procesu integracije. Sa definicijom skupa  $\{N_{s,min}, N_{s,max}, N_{sw}, N_{sA}\}$  i usvojenim vrednostima, potražen je maksimum s-parametra u opsegu  $N_{s,min} \leq k \leq N_{s,max}$ , za potvrđene lažne i stvarne mete za oba radara. Raspodela ovih maksimuma data je na slici (4.3), a rezultati u zavisnosti od rastojanja i ugla u odnosu na MRA osu radara prikazani su na slikama (4.4) i (4.5).



Slika 4.3. Pozicije maksimuma s parametra za  $N_{s,min} \leq k \leq N_{s,max}$  u zavisnosti od rastojanja od radara i ugla u odnosu na MRA osu radara.



Slika 4.4. Pozicije maksimuma s parametra za  $N_{s,min} \leq k \leq N_{s,max}$  u zavisnosti od rastojanja od radara.



Slika 4.5. Pozicije maksimuma s parametra za  $N_{s,\min} \leq k \leq N_{s,\max}$  u zavisnosti od ugla u odnosu na MRA osu radara.

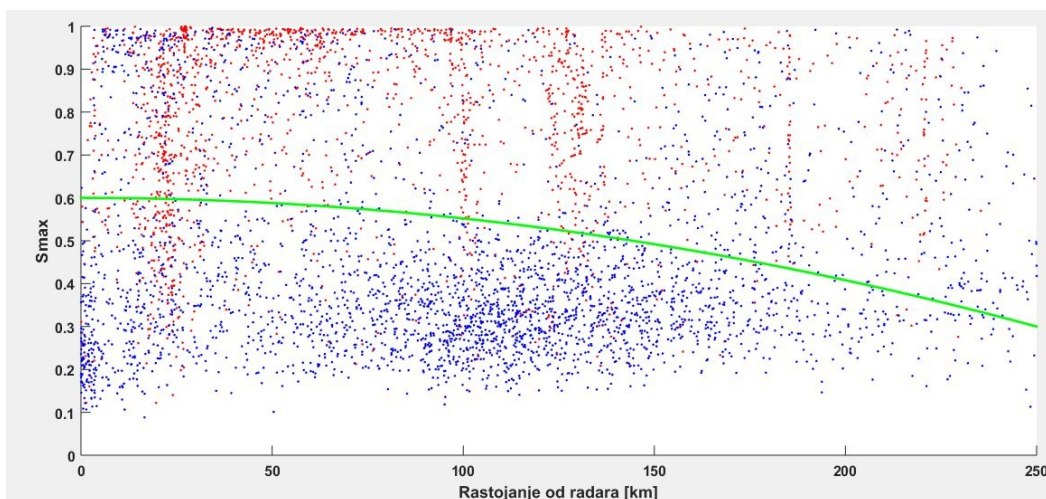
Tačkice crvene boje predstavljaju tragove potvrđene AIS podacima, a plave lažni tragovi. Na oba grafika uočava se nagomilavanje maksimuma s-parametra za potvrđene mete pretežno u zoni  $S_{\max} > 0.6$ . U toj zoni postoji i određeni deo raspodele amplituda lažnih tragova. S obzirom na raspodelu vezanu za tragove potvrđene sa AIS, razumno je pretpostaviti da je poreklo većine ovih tačaka od nekooperativnih ciljeva. Najveće nagomilavanje amplituda lažnih tragova se nalazi u okolini MRA ose, na rastojanjima od 80-150 km od radara, kao i u zoni bližoj radaru, što je i očekivano, zbog većeg broja manjih plovila u relativnoj blizini obale, sa tipično slabim odrazima. Uočava se da amplitude potvrđenih tragova imaju trend opadanja po udaljenju od MRA ose. Uzimajući u obzir da greške merenja tipično rastu sa povećanjem rastojanja i ugla, očekuju se i slabije vrednosti asocijacija. Pošto ne postoji mogućnost efektivnog razdvajanja nekooperativnih ciljeva i lažnih alarma od pravih, konstrukcija kriterijumske funkcije se mora izvršiti vođena ovim empirijskim zapažanjima, na taj način da omogući konfirmaciju skoro svih pravih meta, a da maksimalno smanji stepen konfirmacije lažnih tragova. Za oblik kriterijumske funkcije usvaja se familija površina obrnutog elipsoidnog polu-paraboloida ograničenog maksimalnim vrednostima  $\rho_{\max} = 250$  km i  $|\theta_{A,MRA}|_{\max} = 60^{\circ}$  definisanih na sledeći način za  $k \in \{N_{s,\min} \cdot N_{s,\max}\}$ :

$$s_g(\rho, \theta_{A,MRA}, k) = -\frac{\rho^2}{a^2} - \frac{\theta_{A,MRA}^2}{b^2} + A(k) \quad (4.9)$$

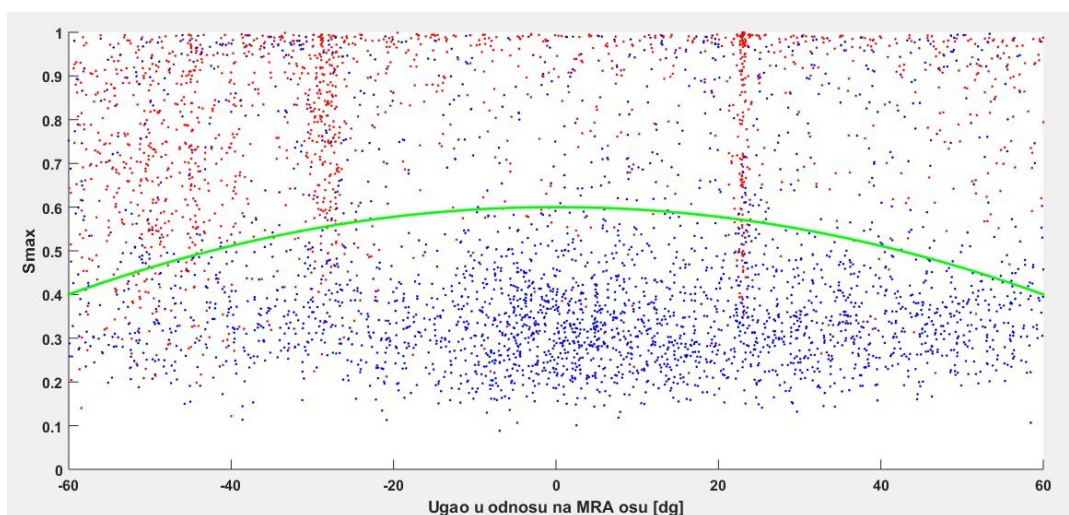
pri čemu je  $A(k)$  amplitudska funkcija, čija vrednost linearno opada sa datim opsegom koraka života traga  $k$  u opsegu  $[0.6, 0.9]$ , dok za vrednosti  $k > N_{SA}$  ima konstantnu vrednost:

$$A(k) = \begin{cases} 0.9 + \frac{0.3}{N_{SA} - N_{s,\min}} \cdot (k - N_{s,\min}), & N_{s,\min} \leq k \leq N_{SA} \\ 0.6, & k > N_{SA} \end{cases} \quad (4.10)$$

Vrednosti koeficijenata  $a$  i  $b$  biraju se tako da je vrednost kriterijumske funkcije na obodu površi  $s(k = N_{SA}, \rho_{\max}, \theta_{A,MRA, \max}) = 0.3$ . Na slikama (4.4-4.7) zelenom bojom označen je presek kriterijumske površi sa odgovarajućim ravnima.



Slika 4.6. Pozicije maksimuma s parametra za  $N_{s,A} \leq k \leq N_{s,max}$  u zavisnosti od rastojanja od radara.



Slika 4.7. Pozicije maksimuma s parametra za  $N_{s,A} \leq k \leq N_{s,max}$  u zavisnosti od ugla u odnosu na MRA osu radara.

Sa datom kriterijumskom površi, kriterijum potvrde traga  $t$  sa parametrima pozicije  $\{\rho, \theta_A\}$  svodi se na ispitivanje relacije, kao dodatnog potrebnog uslova promocije:

$$t(k): \{\rho, \theta_A\}, s(k) > s_g(\rho, \theta_A, k), N_{s,min} \leq k \leq N_{s,max} \quad (4.11)$$

Trag koji se ne potvrdi u zadatom intervalu se briše. Brisanje potvrđenog traga, u formi ispravljanja grešaka konfirmacije lažnih tragova, zahteva definisanu kriterijumsku funkciju  $s_d(\rho, \theta_A, k)$ , za koju se usvaja ista forma površi, spuštena za određenu vrednost  $\Delta s$ , za koju se usvaja vrednost 0.2, tj. menja se samo amplitudski faktor iz jednakosti (4.10):

$$A_d(k) = A(k) - \Delta s \quad (4.12)$$

Usvojena vrednost za  $\Delta s = 0.2$  može delovati mala, ali je njena svrha da eliminiše tragove koji nemaju stabilno praćenje u prvih  $N_{s,max}$  iteracija života traga, što neće doprineti poboljšanju pitanja fragmentacije tragova, ali bi trebalo da podigne pouzdanost sistema za praćenje. Formalno, dodatni uslov brisanja potvrđenog traga, koji je u važenju za  $N_{s,min} \leq k \leq N_{s,max}$  je:

$$t(k): \{\rho, \theta_A\}, s(k) \leq s_d(\rho, \theta_A, k), N_{s,\min} \leq k \leq N_{s,\max} \quad (4.13)$$

Uslov se pridodaje pravilima menadžmenta tragova i u važnosti je, kao i uslov potvrde (4.11), za  $N_{s,\min} \leq k \leq N_{s,\max}$  i potvrđene tragove, nakon čega u važnosti ostaju stara pravila brisanja traga.

### 4.3 Razmatranja primene integrativnog pristupa u praćenju ciljeva u okruženju izahorizontskih radara

Na osnovu izloženih istraživanja u glavi 3 i u odeljku (4.2), može se postaviti pitanje na koji način se mogu upotrebiti algoritmi zasnovani na integrativnom pristupu, tj. koji združeno regulišu asocijacije merenja i tragova i verodostojnost, tj. kvalitet traga, a da budu primenljivi na uslove koji važe u okruženju izahorizontskih radara. Takvi algoritmi bi trebalo da imaju mogućnost:

- a) Podesivih parametara modela, u zavisnosti od trenutne iteracije života traga, rastojanja i ugla u odnosu na MRA osu radara, u skladu sa opažanjima iz odeljka (4.2), tj. mora biti obezbeđeno da se ne dozvoli prerana potvrđivanje potencijalno lažnih tragova, što je tipičan slučaj za primer loših meteoroloških uslova i jake jonosferske interferencije, naročito u prvih  $N_{s,\min}$  iteracija (usvojena je vrednost 15 u odeljku (4.2) na osnovu raspodele života lažnih tragova i uočene pojave visoke korelisanosti merenja i predikcija lažnih tragova u početnom stadijumu preliminarnih tragova). Nakon toga, zahtev je da se izvrši što brža potvrđivanje traga, u zavisnosti od stepena korelacije.
- b) Mora se obezbediti da se u postupku terminacije potvrđenog traga vodi računa da postoji mogućnost trenutne nedetektabilnosti prave mete, iz razloga navedenih u glavi 2 (pojava iščezavanja mete), kako ne bi dolazilo do fragmentacije tragova, koja ugrožava proces osmatranja ciljeva. Ublažavanje ove pojave se u glavi 3 vršilo povećanjem M/N pravila na vrednost 8/8 u odnosu na 4/4, primenjenu u [19], koja je bila previše restriktivna.

Na oba postavljena zahteva može odgovoriti primena STT (engl. *Single Target Tracking* - STT) algoritma u formi predstavljenoj u [97], tzv. IPDA VMC algoritam, pa će on biti posebno razmotren. U tu svrhu biće razmotrene i date preporuke za određivanje vrednosti parametara modela na kojima je zasnovano ponašanje traga, na osnovu prethodnih zapažanja, a zatim će biti ispitana primena MTT (engl. *Multi Target Tracking* - MTT) varijanti sa redukovanom kompleksnošću algoritma, zasnovana na verovatnoći postojanja cilja.

Potrebno je napomenuti da je cilj izvršenih razmatranja da se pokaže da je moguće svrsishodno primeniti integrativne metode, kojim bi se afirmisao pristup združene ocene kinematskog stanja traga i stanja njegove egzistencije, kroz parametar verovatnoće postojanja traga, kao jedinstvene ocene njegove pouzdanosti, što je karakteristika IPDA klase algoritama. Razmatranja i zaključci u



vezi primene integrativnog pristupa u ovoj disertaciji vršeni su na osnovu simulacija, oslanjajući se i na rezultate, koji su prezentovani u [20] i [97].

### 4. 3. 1 IPDA VMC algoritam

IPDA VMC algoritam [97] predstavlja STT algoritam sa varijabilnim modelom verovatnoće postojanja cilja, u zavisnosti od stanja traga. Osnovna ideja je data u [20], gde su razmatrani slučajevi Markovljevih lanaca sa dva ili tri stanja kao osnovom za modelovanje verovatnoće postojanja cilja. Verovatnoća postojanja cilja, u slučaju modelovanja skrivenim Markovljevim lancem sa dva stanja, se modeluje kao slučajna promenljiva dva uzajamno isključiva stanja, u oznaci  $\{E_k, \bar{E}_k\}$ , gde  $E_k$  događaj predstavlja događaj da meta postoji i da je detektabilna, a  $\bar{E}_k$  predstavlja događaj da meta ne postoji. Pojava ovih događaja modeluje se skrivenim Markovljevim lancem sa dva stanja, čija je prelazna matrica data izrazom:

$$\Pi = \begin{bmatrix} \pi_{11} & \pi_{12} \\ \pi_{21} & \pi_{22} \end{bmatrix} \quad (4.14)$$

Gde su koeficijenti matrice definisani kao:  $\pi_{ij} = P(E_k = j | E_{k-1} = i)$ ,  $i, j \in \{1, 2\}$ , gde  $P()$  ima notaciju verovatnoće događaja. Neka je  $m_k$  broj validiranih merenja u okviru gejta proizvoljnog traga. Tada je, prema [97], očekivani broj validiranih klaterskih merenja  $\widehat{m}_k$  jednak:

$$\widehat{m}_k = \begin{cases} 0, & m_k = 0 \\ m_k - P_D P_G P(E_k | Y^{k-1}), & m_k > 0 \end{cases} \quad (4.15)$$

pri čemu  $P_D$  i  $P_G$  predstavljaju verovatnoću detekcije i verovatnoću validacije, tj. obuhvata merenja gejtom volumena  $V_k$ .  $P(E_k | Y^{k-1})$  predstavlja predikciju verovatnoće postojanja cilja uslovljenu setom podataka u prethodnom koraku skeniranja  $Y^{k-1}$ . Ona se dobija preko aposteriorne verovatnoće postojanja cilja  $P(E_{k-1} | Y^{k-1})$  i prelazne jednačine Markovljevog lanca:

$$P(E_k | Y^{k-1}) = \pi_{11} P(E_{k-1} | Y^{k-1}) + \pi_{21} (1 - P(E_{k-1} | Y^{k-1})) \quad (4.16)$$

Iz jednačina asocijativnih verovatnoća, datih u [20], ove verovatnoće zavise od tzv. asocijativnog faktora, definisanog relacijom:

$$\delta_k = \begin{cases} P_D P_G, & m_k = 0 \\ P_D P_G (1 - \frac{V_k}{\widehat{m}_k} \sum_{i=1}^{m_k} \Lambda_k^i), & m_k > 0 \end{cases} \quad (4.17)$$

gde je  $\Lambda_k^i$  verodostojnost  $i$ -tog validiranog merenja, definisana relacijom (4.18),  $\Delta z$  inovacija merenja prema predikciji traga, a  $S_k$  kovarijansa predikcionog merenja, koja, u ovom slučaju, može biti data izrazom (3.13).

$$\Lambda_k^i = \frac{1}{P_G} N(\Delta z; 0, S_k) \quad (4.18)$$

Aposteriorna verovatnoća egzistencije traga data je jednakošću (4.19) i predstavlja meru kvaliteta traga u IPDA smislu za usvojeni Markovljev model sa dva stanja:

$$P(E_k|Y^k) = \frac{(1-\delta_k)P(E_k|Y^{k-1})}{1-\delta_k P(E_k|Y^{k-1})} \quad (4.19)$$

Ova varijantu IPDA označena je kao IPDA-M1, pa će na dalje tako biti i referisana.

Ukoliko proširimo model egzistencije traga skrivenim Markovljevim lancem 3. stepena, postojanje mete se modeluje slučajnom varijablom sa 3 moguća stanja. U ovom modelu uzima se u obzir da meta koja stvarno postoji može ili ne mora biti detektovana od strane senzora, a mogući događaji postojanja mete definisani su na sledeći način:

$$E_k \cap E_k^0 = E_k^0 - \text{meta postoji i detektabilna je,}$$

$$E_k \cap E_k^n = E_k^n - \text{meta postoji ali je privremeno nedetektabilna}$$

$$\bar{E}_k - \text{meta ne postoji}$$

Dinamika ovih događaja se, dakle, modeluje kao trostatički Markovljev lanac, sa tranzicionom matricom, definsanom na način analogan prethodnom primeru. Sa poznatim aposteriornim verovatnoćama iz prethodnog koraka  $P(E_{k-1}^0|Y^{k-1})$  i  $P(E_{k-1}^n|Y^{k-1})$ , predikcije ovih verovatnoća dobijaju se pomoću skupa jednakosti (4.20):

$$P(E_{k-1}^0|Y^{k-1}) = \pi_{11}P(E_{k-1}^0|Y^{k-1}) + \pi_{21}P(E_{k-1}^n|Y^{k-1}) + \pi_{31}P(\bar{E}_{k-1}|Y^{k-1})$$

$$P(E_{k-1}^n|Y^{k-1}) = \pi_{12}P(E_{k-1}^0|Y^{k-1}) + \pi_{22}P(E_{k-1}^n|Y^{k-1}) + \pi_{32}P(\bar{E}_{k-1}|Y^{k-1}) \quad (4.20)$$

$$P(\bar{E}_{k-1}|Y^{k-1}) = 1 - P(E_{k-1}^0|Y^{k-1}) - P(E_{k-1}^n|Y^{k-1})$$

Aposteriorne verovatnoće postojanja mete su date u [20] sledećim jednakostima:

$$P(E_k^0|Y^k) = \frac{(1-\delta_k)P(E_k^0|Y^{k-1})}{1-\delta_k P(E_k^0|Y^{k-1})}, \quad (4.21)$$

$$P(E_k^n|Y^k) = \frac{P(E_k^n|Y^{k-1})}{1-\delta_k P(E_k^0|Y^{k-1})}, \quad (4.22)$$

$$P(E_k|Y^k) = P(E_k^0|Y^k) + P(E_k^n|Y^k), \quad (4.23)$$

pri čemu je  $\delta_k$  definisani asocijacioni faktor, dat jednakošću (4.17). Poslednja jednakost predstavlja meru kvaliteta traga u IPDA smislu za usvojeni trostatočki Markovljev model, a algoritam se obično predstavlja kao IPDA-M2.

Formulacija algoritma IPDA-VMC, data u [97], zasniva se na činjenici da je u idealnom slučaju potrebno da se tragovi suočavaju sa kraćim tranzijentnim periodima za potvrđivanje potrebnim za potvrdu traga koji potiče od prave (istinite) mete, a većom i podesivom terminacionom marginom zbog održavanja potvrđenom traga. Pokazano je da je IPDA-M1 bolja od IPDA-M2 po pitanju prvog dela ove tvrdnje, a IPDA-M2 po pitanju odložene terminacije traga. To znači da u identičnoj situaciji, IPDA-M1 poseduje viši porast verovatnoće postojanja traga u prisustvu merenja koja potiču od pravih meta, dok IPDA-M2 ima niži pad verovatnoće postojanja traga kada nema validiranih merenja.

### 4. 3. 2 Razmatranja dizajna koeficijenata modela egzistencije traga i graničnih vrednosti

Strategija konfirmacije tragova kod modela egzistencije traga, opisanog dvostatičkim skrivenim Markovljevim lancem (slučaj IPDA-M1) se može formulirati ili preko konstantne granične vrednosti konfirmacije  $P_c$  i promenljivih koeficijenata tranzicione matrice (4.14) ili obrnutim pristupom. U oba slučaja potrebno je uzeti u obzir i položaj merenja u odnosu na radar, jer merenja pod velikim uglom u odnosu na MRA osu radara i na velikim rastojanjima, odlikuju se i većim varijansama, pa će i matrica kovarijanse šuma imati značajnije vrednosti, što se dodatno naglašava u procesu konverzije merenja. Taj efekat dovodi do tipično manjih vrednosti pdf merenja prema predikciji traga, a uočava se posredno i na slici (4.3), uzvratajući manjim apsolutnim vrednostima faktora asocijacije  $\delta_k$ , a time i sporijom konfirmacijom u odnosu na tragove bliže MRA osi radara. Ukoliko se usvoji da konfirmacija poseduje fiksnu vrednost koeficijenata, graničnu vrednost konfirmacije je moguće podešavati u odnosu na rastojanje  $\rho$  i ugao prema radaru  $\theta$  i zadati momenat života traga  $k$ . Ne postoji način da se utvrdi egzaktna zavisnost  $P_c(\rho, \theta, k)$ , već se taj proces mora obaviti eksperimentalno. Pojedina ograničenja se mogu usvojiti iz preporuka datih u [98] i [99], tako što se za minimalnu vrednost  $P_c$  usvaja restriktivniji uslov od optimalnog rešenja, datog jednakošću (13) u [99]:

$$P_{c,min} \geq \frac{(1-P_D P_G)\pi_{11}}{1-P_D P_G \pi_{11}}, \pi_{21} < \pi_{11} \quad (4.24)$$

$\pi_{21}$  koeficijent treba držati na niskoj vrednosti iz analognog razloga koji je naveden u [99] za tranzicije persivabilnost/nepersivabilnosti. Za krivu zavisnosti  $P_c(\rho, \theta, k)$  može se predložiti skup površi oblika polu-elipsoida, na sličan način kao u odeljku (4.2), kojim je definisana kriterijumska funkcija za konfirmaciju tragova, data jednakošću (4.9). Na obodima krive za  $\rho_{max}$  i  $|\theta_{max}|$  iz prethodnog odeljka definisan je skup tačaka  $P_{c,min}(k)$ ,  $1 \leq k \leq N_{s,min}$ , ograničen opštim uslovom iz prethodne jednakosti. U centrima skupa površi definisan je skup tačaka  $P_{c,max}(k)$ ,  $1 \leq k \leq N_{s,min}$ , pri čemu se može usvojiti  $P_{c,max}(0) \rightarrow 1$ . Time je definisana kriterijumska funkcija za konfirmacionu verovatnoću egzistencije traga u formi koja je slična onoj u jednakosti (4.9), a koja bi omogućila potencijalno bržu konfirmaciju tragova na obodima zone pokrivanja i u isto vreme otežala konfirmaciju tragova u prvim  $N_{s,min}$  iteracija života traga.

Koeficijenti tranzicionih matrica su, pod gornjim uslovima, konstantni. Njihove vrednosti se mogu izabrati, na primer, u skladu sa simulacijom izvedenom u [97] i predstavljaju slobodne parametre dizajna.

Terminaciona vrednost  $P_t$  traga bira se tako da bude omogućeno praćenje potvrđenog cilja u najmanje  $M_n$  iteracija od interesa. S obzirom na odabrano terminirajuće pravilo 8/8 u glavi 3, za očekivati je da potreban uslov za izbor granične verovatnoće egzistencije traga  $P_t$  bude takav da se obezbedi barem  $M_n=8$  sukcesivnih iteracija tek potvrđenog traga, pre dostizanja granične verovatnoće brisanja. Dodatno, uslov za izabranu vrednost  $P_t$  bi trebalo da bude restriktivniji i od relacije za  $P_t$  date u [99]:

$$P_t \leq \frac{(1-P_D P_G) P_e}{1-P_D P_G P_e} \quad (4.25)$$

$P_e$  predstavlja inicijalnu verovatnoću egzistencije traga, koja se uobičajeno postavlja na vrednost 0.5.

### 4. 3. 3 MTT pristup sa redukovanom kompleksnošću algoritma

MTT pristup biće razmotren na primeru LM-IPDA algoritma, izloženog u [77]. U pitanju je algoritam sa linearnom kompleksnošću u odnosu na broj tragova i merenja. LM-IPDA prati proceduru opisanu u [20], ali proširuje svoju važnost na MTT slučaj. U osnovnoj verziji, opisanoj u [77], model egzistencije traga zasnovan je na Markovljevom lancu prvog reda, a izraz za aposteriornu verovatnoću egzistencije traga identičan je kao u jednakosti (4.19), za slučaj IPDA-M1:

$$P(E_k|Y^k) = \frac{(1-\delta_k)P(E_k|Y^{k-1})}{1-\delta_k P(E_k|Y^{k-1})} \quad (4.26)$$

Sada je  $\delta_k$  dato sledećim izrazom:

$$\delta_k = P_D P_G \left(1 - \sum_{i=1}^{m_k} \frac{p_{k,i}}{\tilde{p}_{k,i}}\right) \quad (4.27)$$

a sa verodostojnošću asocijacije trag-merenje  $\Lambda_k$  povezano je relacijom:

$$\Lambda_k = 1 - \delta_k \quad (4.28)$$

Kao što se može uočiti iz jednakosti (4.27), sada je gustina klatera  $\rho_{k,i}$  zamenjena modifikovanom gustinom klaterskih merenja  $\tilde{p}_{k,i}$ . Na ovaj način je omogućeno da se uzme u obzir prisustvo drugih bliskih meta pri računanju verovatnoće postojanja mete. Ovaj korak ima efekat smanjenja asocijacije merenja i traga ako je verovatnije da je merenje detekcija neke druge mete, bez potrebe za upotrebom združenih asocijacionih postupaka. U jednakosti (4.27),  $p_{k,i}$  predstavlja pdf i-tog merenja  $z_{k,i}$  prema datom tragu u iteraciji  $k$ . Izraz za ovu modifikovanu gustinu klatera, povezanu za trag  $\tau$  dat je jednakošću (4.29), za  $i$ -to merenje u  $k$ -toj iteraciji, pri čemu se uzima u obzir skup svih tragova  $T$ , sa kojim je dato merenje asociirano, izuzev posmatranog traga  $\tau$ :

$$\tilde{\rho}_{k,i} = \rho_{k,i} + \sum_{\sigma=1, \sigma \neq \tau}^T P_{k,i}^{\sigma} \frac{P_{k,i}^{\sigma}}{1 - P_{k,i}^{\sigma}} \quad (4.29)$$

Veličina  $P_{k,i}^{\sigma}$  predstavlja apriornu verovatnoću da je merenje  $i$  u iteraciji  $k$  potiče od traga  $\sigma$  i ona se približno može iskazati na sledeći način:

$$P_{k,i}^{\sigma} \approx P_D P_G P(E_k | Y^{k-1})^{\sigma} \left( \frac{P_{k,i}^{\sigma}}{\rho_i^{\sigma}} / \sum_{j=1}^{m_k^{\sigma}} \frac{P_{k,j}^{\sigma}}{\rho_j^{\sigma}} \right) \quad (4.30)$$

gde je  $\rho_i^{\sigma}$  dato jednakošću (4.31):

$$\rho_i^{\sigma} = \rho_{k,i} + \sum_{\sigma=1, \sigma \neq \tau}^T P_D^{\sigma} P_G^{\sigma} P(E_k | Y^{k-1})^{\sigma} P_{k,i}^{\sigma} \quad (4.31)$$

Jednakost (4.30) predstavlja osnovu na osnovu koje je izveden ovaj algoritam, a opravdanost aproksimacije data je u [77]. Konačni izrazi za aposteriornu verovatnoću postojanja traga i asocijacione koeficijente mogu se pronaći u istom radu.

LM IPDA se u slučaju jednog traga i više asociiranih merenja svodi na IPDA slučaj. Međutim, u slučaju dva traga i proizvoljnog broja merenja, greške ove suboptimalna metode su veoma male, a jednakosti (4.27)-(4.31) se svode na vrlo jednostavne relacije. Metoda vrši svojevrsnu suboptimalnu klasterizaciju zasnovanu na gustini, pri čemu se klasteri dobijeni metodologijom kao u glavi 3 dodatno ograničavaju podklasterima koji se preklapaju, a podgrupisanje unutar klastera se vrši orijentisano prema posmatranom tragu, uzimajući u obzir njegova asociirana merenja i asocijacije tih merenja sa ostalim tragovima, na sličan način na koji funkcioniše Roeker-Filisov suboptimalni JPDA, upotrebljen kao suboptimalna metoda za rešavanje kompleksnih klastera u glavi 3. Na osnovu istraživanja u glavi 3, može se videti da je za JPDA slučaj, raspodela klastera takva da je u oko 70% slučajeva klaster tipa “jedan trag-jedno ili više merenja”, što odgovara STT slučaju, a sa druge strane postoji i oko 15 % slučajeva klastera tipa “dva traga-jedno ili više merenja” (slika (3.6)). Uz razumnu pretpostavku da bi struktura klastera u slučaju primene LM-IPDA, sa razmatranjima o vrednostima koeficijenata i graničnih vrednosti konfirmacije traga iz odeljka (4.3.2) i pri istim uslovima ostala slična, može se zaključiti da će u najvećem broju slučajeva rešavanja asocijacija tragova i merenja biti dobijene približno optimalne vrednosti. Sa druge strane, sam algoritam ima linearnu kompleksnost i mogućnost paralelizacije, pa bi vreme izvršenja algoritma, zbog raspodele veličina klastera, bilo manje nego u slučaju primene JPDA.

#### 4. 4 Eksperimentalni rezultati

Svrha izvođenja eksperimenta je dokaz efikasnosti metode za ublažavanje pojave lažnih tragova u dovoljnoj meri da se može izvući zaključak da je sačuvana upotrebljivost senzora u svim

vremenskim uslovima. U tabeli (4.2) je prikazan kratak pregled zabeleženih pojava činilaca eksperimenta.

Tabela 4.2. Pregled eksperimenta sa 8 uzoraka sa registrovanim smetnjama

Uzorak	Broj AIS meta u zoni pokrivanja		Broj potvrđenih tragova bez metode ublažavanja pojave lažnih tragova		Broj potvrđenih tragova sa metodom ublažavanja pojave lažnih tragova	
	HFSWR 0	HFSWR 1	HFSWR 0	HFSWR 1	HFSWR 0	HFSWR 1
2018118	162	97	1286	1347	351	417
2018121	132	89	1417	1085	244	269
2018145	168	118	1367	1046	421	205
2018283	162	104	1430	1434	416	400
2018289	167	87	1142	1145	227	261
2019024	197	115	1071	1065	303	253
2019039	182	91	1167	1275	494	549
2019049	196	90	784	1146	231	209

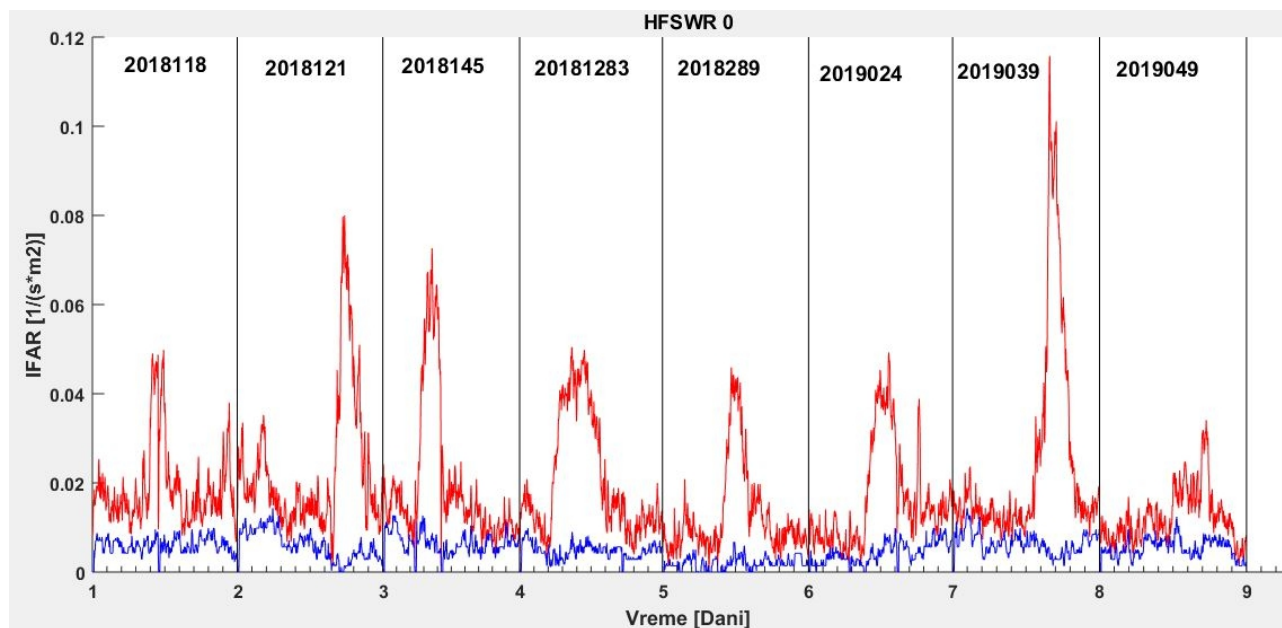
Za ocenu ToT parametra je važno razumeti da postoji veliki broj AIS meta koje su grupisane jugoistočno i jugozapadno od luke Lagos, a koje ne mogu biti adekvatno praćene zbog male rezolucije radara. Takve grupe meta se tipično manifestuju jednom ili dve registrovane mete kod HFSW radara, a problem je dodatno izražen jer su pomenute grupe na obodu zona osmatranja radara. HFSWR 0 je dodatno pogođen velikim brojem udaljenih grupisanih meta u okolini naftnih platformi južno od radarskog položaja. Pre svega zbog tog razloga ToT parametre treba shvatiti kao najgore moguće slučajeve, a nikako kao odraz stvarnih performansi, kakvi bi bili primenljivi na usamljene tačkaste ciljeve u zoni posmatranja.

Eksperimentom se prvo vrši evaulacija trenutnih performansi procedure praćenja sa upotrebljenom metodom ublažavanja pojave lažnih tragova u odnosu na situaciju bez primene. U tabeli (4.2) su prikazani podaci koliko je ukupno promocija tragova zabeleženo u oba slučaja. Može se uočiti veliki pad broja promocija tragova, koji će se reflektovati na performanse sistema kroz redukciju broja lažnih tragova. Nakon toga, biće izvršeno poređenje merenja generalnih performansi radara za oba slučaja. U svim merenjima usvojena je konvencija da se crvenom bojom na grafikonima označavaju rezultati koji potiču od merenja bez primene metode, a plavom sa metodom ublažavanja pojave lažnih tragova.

#### 4. 4. 1 Merenje poboljšanja trenutnih performansi procedure praćenja

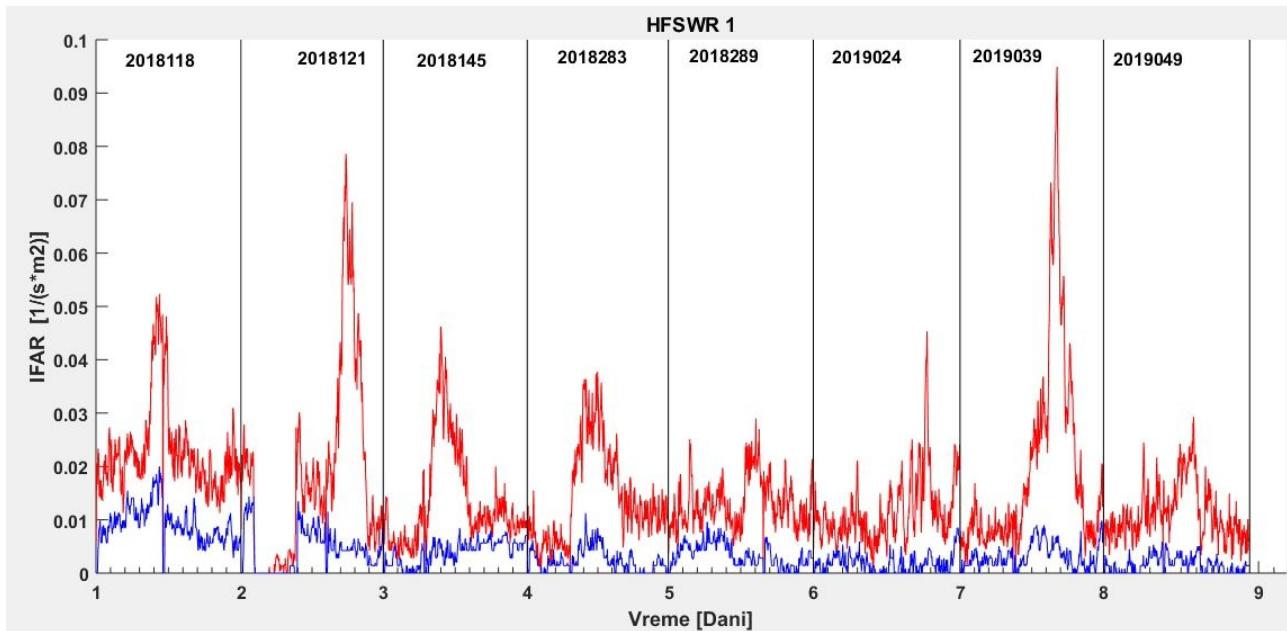
Merenje poboljšanja trenutnih performansi rezultata praćenja izvodi se kvantitativnom ocenom pomoću IFAR parametra, definisanog jednakošću (2.31), sa kumulativnim faktorom  $k=5$ , bez preklapanja. Zadati kumulativni faktor odgovara sumiranju svih pojava praćenja lažnih ciljeva u periodu od nešto više od 2 minuta i 45 sekundi. Na taj način se ističu kratkoročni negativni trendovi

u performansama, koji remete ispravan rad senzora. Na slici (4.8) prikazano je poređenje vrednosti IFAR parametra u vremenu po svim uzorcima bez primene metode ublažavanja pojave lažnih tragova i sa primenjenom metodom za HFSWR 0. Po svakom uzorku uočava se izuzetno oštar skok lažnih tragova u određenim periodima vremena, koji se, sa druge strane, ne vidi kod primene metode ublažavanja pojave lažnih tragova. Kriva IFAR sa primenom metode ublažavanja pojave lažnih tragova je relativno ujednačena oko svoje srednje vrednosti po svakom uzorku i što je najvažnije, ne pokazuje znakove kratkoročnih poremećaja u procesu praćenja ciljeva.



Slika 4.8. Poređenje IFAR parametra za sve uzorke bez primene metode (crvena boja) i sa primenom metode ublažavanja pojave lažnih tragova (plava boja) za HFSWR 0.

Na slici (4.9) je prikazano isto merenje za HFSWR 1. Identično ponašanje IFAR parametra se može uočiti za svaki uzorak, tj. postoji nagli skok IFAR u pojedinim delovima dana. Druga kriva, koja pokazuje IFAR sa primenom metode jasno uklanja ove poremećaje, pri čemu je srednja vrednost po uzorku dosta niža u odnosu na situaciju bez primene metode i naravno, nižim odstupanjima. Kod oba izvršena merenja mogu se uočiti povremeni prekidi u komunikaciji, koji uzrokuju resetovanje procedure praćenja, ukoliko su duži od 5 minuta. Treba imati na umu da su uzorci dobijeni u uslovima ozbiljnih vremenskih poremećaja, koji su ometali satelitsku komunikaciju sa udaljenih sajtova. Najteže je “pogođen” uzorak 2018121 kod HFSWR 1, slika (4.9), na kome se može uočiti taj nedostatak u trajanju od nekoliko časova. Prekidi se povremeno javljaju i u ostalim uzorcima, što se može primetiti vrlo ostrim padom na nulu IFAR parametra, što je posebno vidljivo kod primene metode za ublažavanje pojave lažnih tragova, jer je zbog nje proceduri praćenja potrebno više vremena za potvrdu tragova nakon resetovanja procedure praćenja. Posledica ovih, srećom, retkih prekida, je izvesna manja degradacija ukupnog ToT parametra kod slučaja sa primenom metode, upravo zbog većeg vremena potvrde tragova.

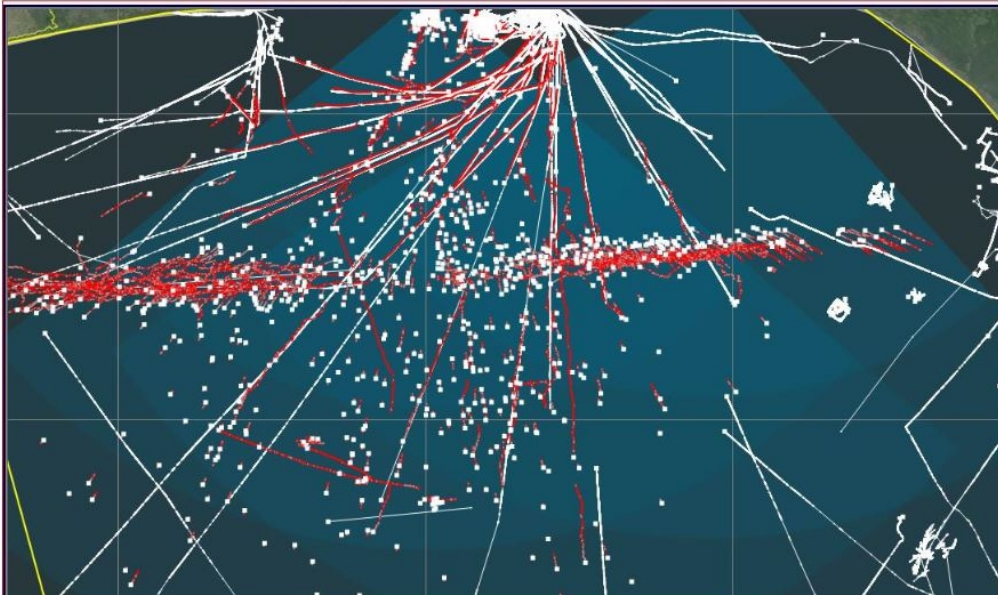


Slika 4.9. Poređenje IFAR parametra za sve uzorke bez primene metode (crvena boja) i sa primenom metode ublažavanja pojave lažnih tragova (plava boja) za HFSWR 1.

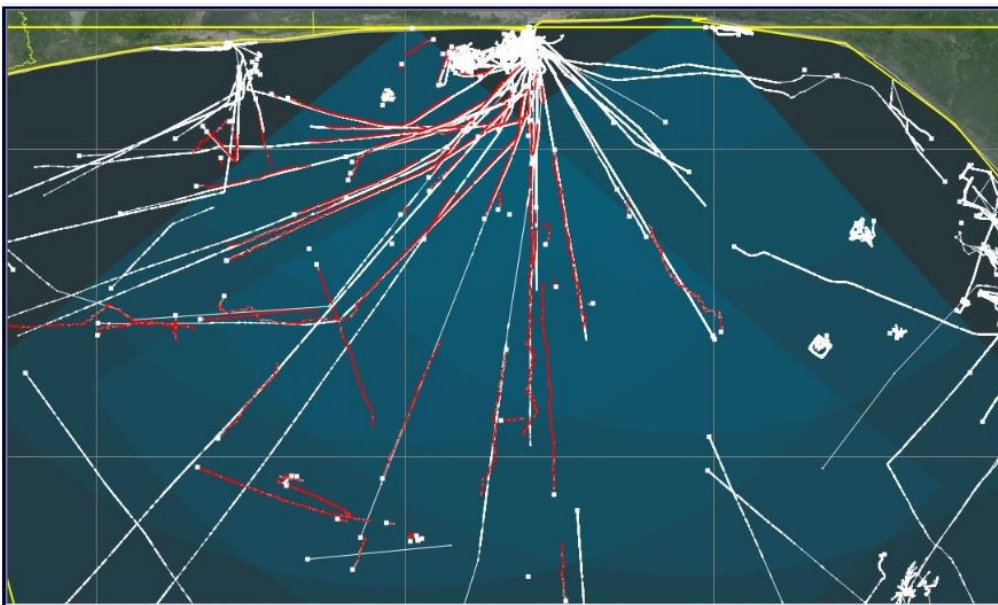
Efektivnost metode najbolje se može uočiti vizuelno, na prikazima na nivou dnevnog uzorka sa perzistencijom svih potvrđenih tragova na ekranu, uključujući i AIS podatke. Pri tome, crvenom bojom prikazana je istorija kretanja HFSWR traga, a belom bojom istorija kretanja AIS tragova. Malim belim markerima označena je zadnja registracija svih tragova. Prva situacija koja se razmatra je izuzetno snažna jonosferska interferencija u uzorku 2019039, na primeru HFSWR 1, koja se javlja na udaljenostima u opsegu od 100 do 150 km od radarskog položaja, po svim uglovima. Na slici (4.10) je prikazan dnevni nalaz praćenja ovog uzorka na kome se može uočiti ogroman broj lažnih tragova, formiranih u interferencijom pogođenoj zoni. Tragovi su relativno kratkog trajanja, ali su detekcije koje ih formiraju dobro korelisane. Ispred radarskog položaja takođe se formira velika grupa potvrđenih lažnih tragova.

Efekat metode se jasno vidi na slici (4.11), gde je prisustvo ovih lažnih tragova u zoni dejstva jonosferske interferencije i ispred radarskog položaja drastično redukovano. Takav zaključak se može doneti za celu oblast pokrivanja radara. Postoji relativno dobra pokrivenost AIS tragova sa HFSWR tragovima, ali se uočava fragmentiranost pojedinih tragova, koja nije posledica metode, što se može overiti i pregledom prethodne slike. Broj kratkotrajnih lažnih tragova u toku celog dana je veoma mali. Takođe se uočava prisustvo veoma pravilnih, pravolinijskih i vremenski dugih tragova bez AIS potvrde, a koji se kreću u pravcima prema okolnim lukama. Velika je verovatnoća da su u pitanju nekooperativni ciljevi, sa isključenim AIS transponderima. S obzirom na njihov broj i postojanost, takvi ciljevi u velikoj meri određuju vrednost IFAR parametra za slučaj upotrebe metode.





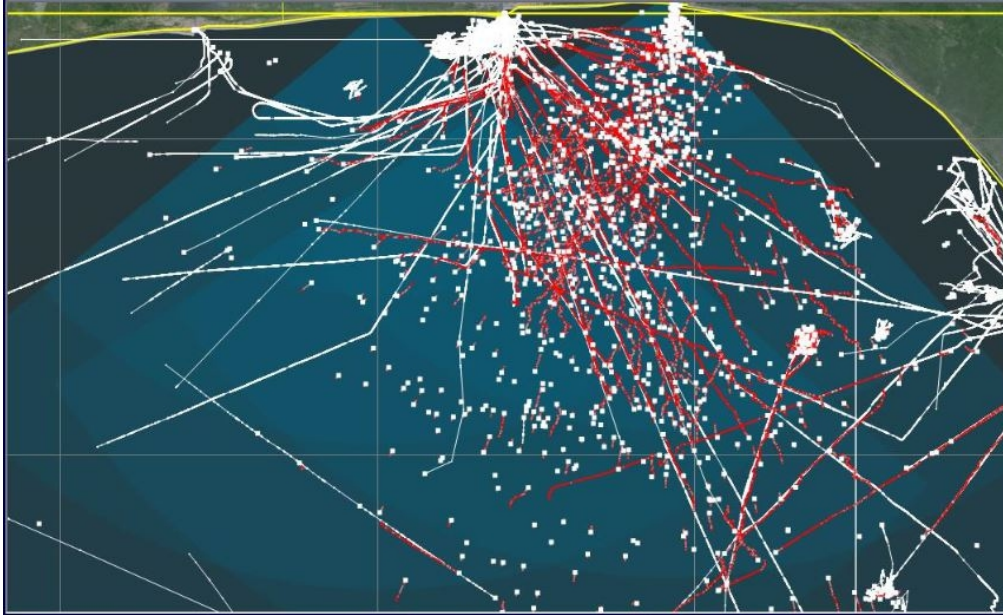
Slika 4.10. Ispis svih potvrđenih tragova za uzorak 2019039 za HFSWR 1 (crvena boja) i zabeleženih AIS tragova (bela boja) bez primene metode ublažavanja lažnih tragova, pri dejstvu snažne jonosferske interferencije



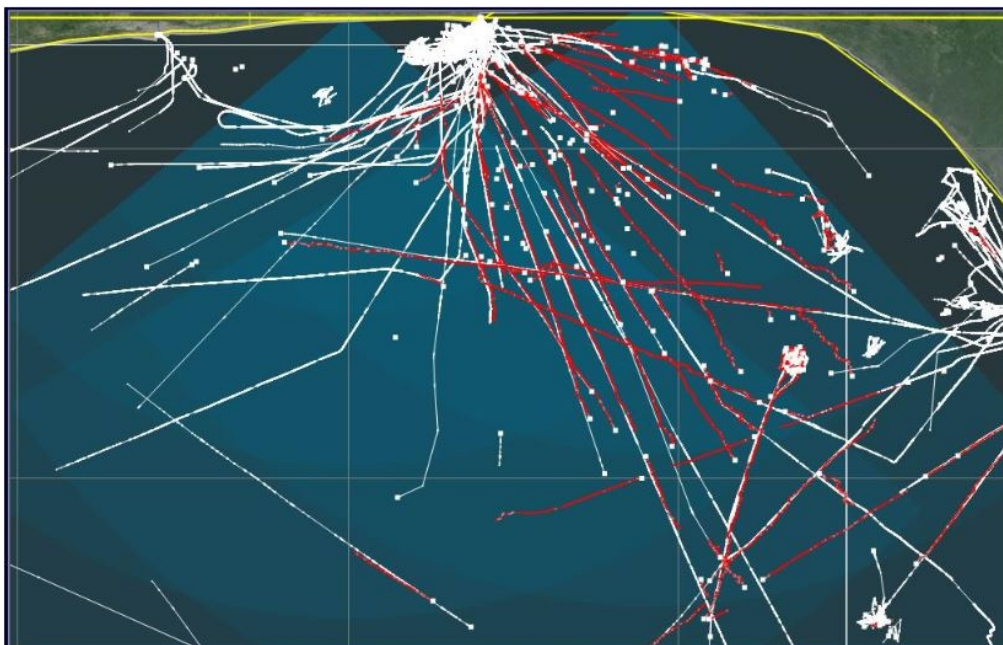
Slika 4.11. Ispis svih potvrđenih tragova za uzorak 2019039 za HFSWR 1 (crvena boja) i zabeleženih AIS tragova (bela boja) sa primenom metode ublažavanja pojave lažnih tragova, pri dejstvu snažne jonosferske interferencije

Sledeći primer je obrada uzorka 2018145, u toku koga se desila velika oluja u područjima pokrivanja oba radara. Na slici (4.12) prikazan je dnevni ispis uzorka za HFSWR 0. Uočavaju se strukture tragova, opisane u uvodu ovog poglavlja, na slici (4.1), koje imaju dugo i uporno trajanje. Postoji i ogroman broj kratkotrajnih potvrda lažnih tragova preko cele površine pokrivanja radara. Primena metode daje rezultat prikazan na slici (4.13). Uočava se gotovo potpuna eliminacija pojave, osim prisustva nekoliko desetina veoma kratkotrajnih potvrđenih lažnih tragova, koji se brzo

eliminišu kao posledica usvojene strategije provere potvrđenih tragova u metodi ublažavanja pojave lažnih tragova. Na istoj slici je moguće uočiti veliki broj tragova bez potvrde u AIS podacima koji imaju pravolinijski oblik i putanje prema lukama u okolini, pa je razumno pretpostaviti da su u pitanju nekooperativni ciljevi.



Slika 4.12. Ispis svih potvrđenih tragova za uzorak 2018145 za HFSWR 0 (crvena boja) i zabeleženih AIS tragova (bela boja) bez primene metode ublažavanja pojave lažnih tragova, pri dejstvu snažne oluje

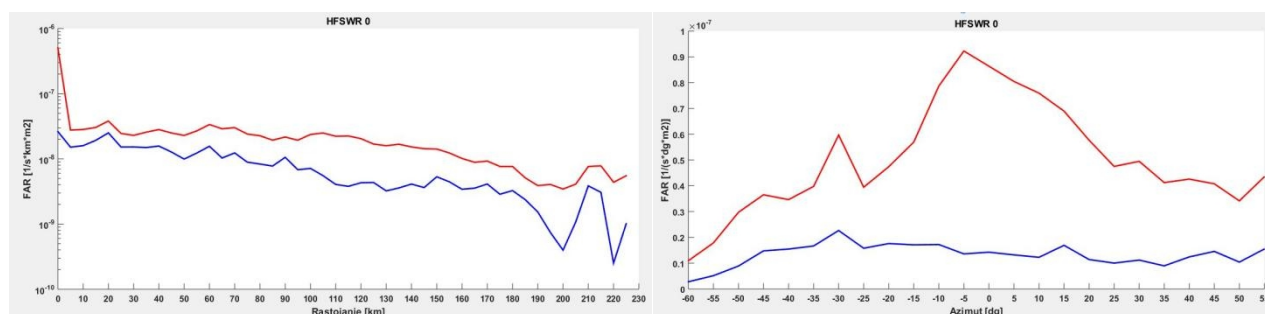


Slika 4.13. Ispis svih potvrđenih tragova za uzorak 2018145 za HFSWR 0 (crvena boja) i zabeleženih AIS tragova (bela boja) sa primenom metode ublažavanja pojave lažnih tragova, pri dejstvu snažne oluje

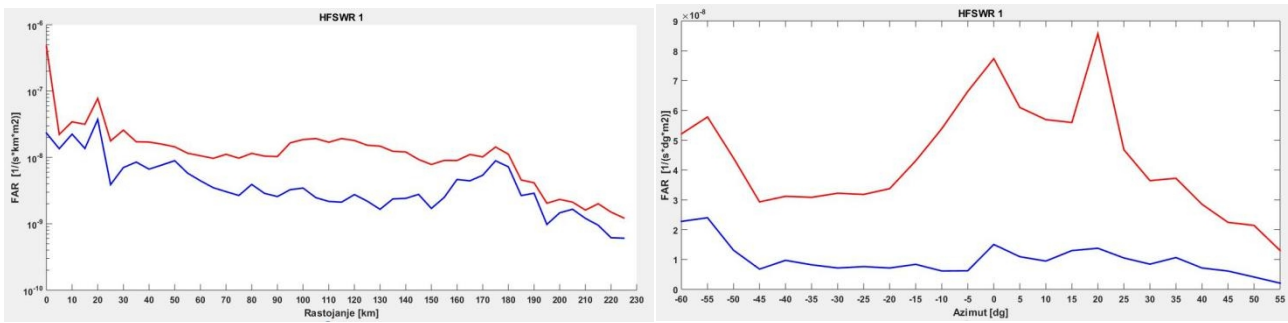
#### 4. 4. 2 Merenje poboljšanja generalnih performansi procedure praćenja

Generalne performanse procedure praćenja mere se totalnim FAR i ToT parametrima, a posebno se analiziraju krive zavisnosti FAR parametra od rastojanja i ugla u odnosu na MRA osu, koje su prikazane na slikama (4.14) za HFSWR 0 i (4.15) za HFSWR 1. Grafikoni sa leve strane ovih slika prikazuju zavisnost FAR od rastojanja od radara. Kriva se dobija postupkom opisanim u odeljku (2.4), primenom jednakosti (2.27), za  $\Delta r = 5$  km. Vrlo visoke vrednosti FAR parametra u prvih 5 km rastojanja uspešno su suzbijene primenom metode. Najveći napredak napravljen je u opsegu 80-160 km od radara. Krive zavisnosti FAR od ugla dobijaju se za  $\Delta\theta = 5^\circ$ , prikazane na desnoj strani slika (4.14) i (4.15), i predstavljaju veoma zanimljiv rezultat. Krive su za oba radara, za slučaj sa primenom metode, prilično zaravljene u odnosu na prvobitne slučajeve, koji imaju veoma izražen pik u okolini MRA ose. Naravno, u idealnom slučaju bi bilo poželjno da kriva ima vrednost nula, što nije izvodljivo zbog postojanja nekooperativnih ciljeva. Međutim, očekuje se da u najboljem slučaju raspodela FAR po uglu koja potiče od ovih nekooperativnih ciljeva bude ujednačena na velikom uzorku po svim uglovima, što je u dobroj meri i postignuto za oba radara.

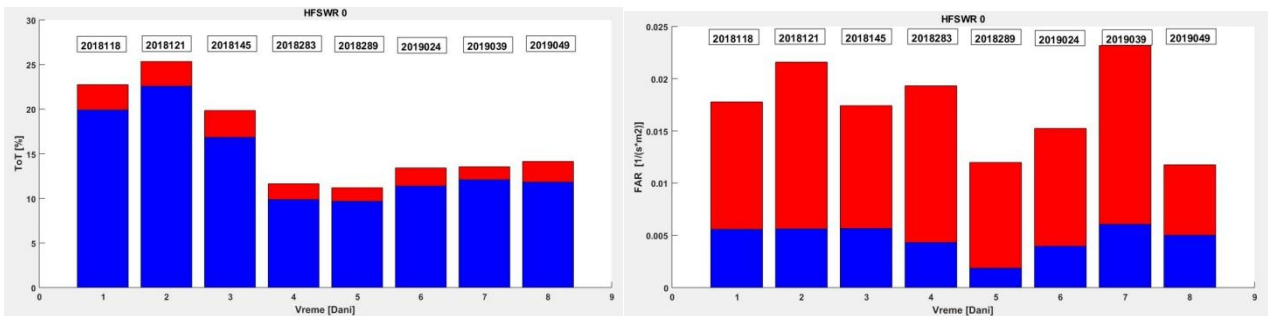
Merenja ukupnog ToT i FAR parametra, po jednakostima (2.25) i (2.27) sprovedeno je uzimajući u obzir pojedinačne uzorke u trajanju od 1 dan. Rezultati su prikazani na slikama (4.16) za HFSWR 0 i (4.17) za HFSWR 1. Dobijene niske vrednosti ToT parametra nisu iznenađenje, zbog velikog broja grupisanih AIS meta u okolini naftnih platformi i luka, kao i pojave ukidanja AIS transmisija u toku plovidbe. Zbog toga važe napomene koje su date i u [19] da ToT parametre treba posmatrati isključivo kao najgori mogući slučaj. Ukupni gubici ToT parametra za HFSWR 0 iznose od 1 do 2 % po danu sa primenom metode, ali je zato postignuto potiskivanje ukupnog FAR parametra u rasponu od 2 do 5 puta. Gubici ToT parametra za HFSWR 1 su u istom rasponu, zavisno od uzorka, ali je i potiskivanje FAR parametra bolje nego u slučaju HFSWR 0 i iznosi od 2.5 do 8 puta.



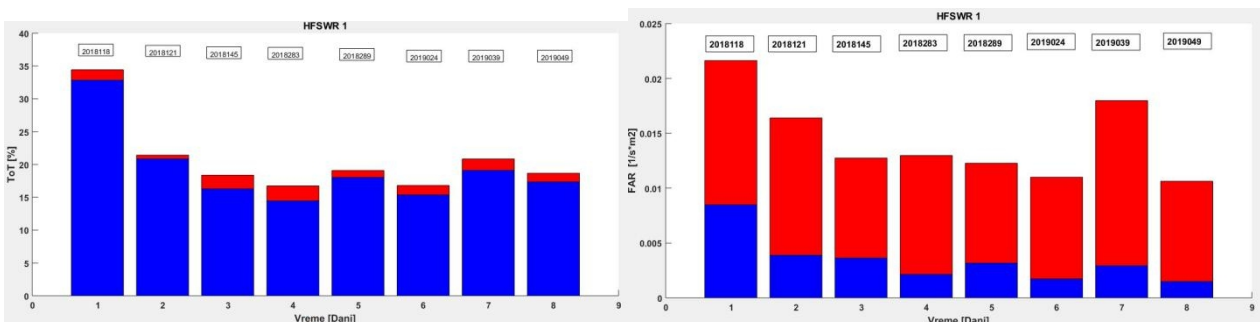
Slika 4.14. Poređenje zavisnosti generalnog FAR parametra po rastojanju (levo) i azimutu u odnosu na MRA osu (desno) za HFSWR 0.



Slika 4.15. Poređenje zavisnosti generalnog FAR parametra po rastojanju (levo) i azimutu u odnosu na MRA osu (desno) za HFSWR 1.



Slika 4.16. Poređenje ukupnog ToT parametra (levo) i ukupnog FAR parametra (desno) za HFSWR 0.



Slika 4.17. Poređenje ukupnog ToT parametra (levo) i ukupnog FAR parametra (desno) za HFSWR 1.

Veliko potiskivanje ukupnog FAR parametra dolazi po cenu izvesnog gubitka ToT, koji je prihvatljiv sa stanovišta upotrebljivosti senzora, a posledica je primene pravila metode za ublažavanje pojave lažnih tragova. Metoda je, pre svega, omogućila konstantnu upotrebnu vrednost HFSWR senzora, čak i pri najgorim mogućim uslovima rada. Iako su se prethodna istraživanja bavila generalnom parametrizacijom HFSWR kao senzora i pokazivanjem njegove upotrebljivosti za misije praćenja pomorskog saobraćaja, akcenat nije stavljan na kritične situacije, uslovljene lošim radnim uslovima. S obzirom da ovi senzori predstavljaju izuzetno bitne instrumente u misijama pomorskog osmatranja, potrebno je obezbediti kontinuiran i nesmetan rad, uklanjanjem nesavršenosti koje potiču od samog senzora i sredine u kojoj senzor radi. Primenom metode taj cilj je u velikoj meri ispunjen.

## 5 Dizajn sistema za praćenje pomorskih ciljeva

U ovom poglavlju izložen je postupak dizajna sistema za praćenje pomorskih ciljeva baziranih na mreži HFSW radara. Sam postupak se oslanja na definisane koncepte integrisanog pomorskog osmatranja izložene u poglavlju 2. Na žalost, primera realizacije sličnih sistema o kojima postoje objavljeni naučni radovi ima veoma malo, ali, sa druge strane, otvara se mogućnost za preciznije definisanje koncepta ovih sistema u skladu sa modernim tehnološkim okvirima. Zato je prvo predložen bazičan koncept IoT (engl. *Internet of Things* - IoT) arhitekture ovog sistema, u kome je predstavljena njegova topologija, definicije elemenata i arhitektura. Zatim je dat pregled realizovanih funkcionalnosti i postupak izgradnje alarmnog sistema mreže. Pored praćenja ciljeva pojedinačnih HFSWR senzora, procesiranje podataka podrazumeva i druge procese, kao što su fuzija HFSWR podataka i njihova integracija sa drugim mornaričkim sensorima, kondicioniranje podataka, selekcija i konačno, realizacija onih funkcionalnosti koje raznorodnim operaterima, tj. korisnicima sistema omogućava efektivnu kontrolu situacije u oblasti pokrivanja senzora i stanja same opreme koja taj sistem sačinjava. Funkcionalna sinteza svih segmenata u celinu predstavlja veliki izazov i najteže je dostignut rezultat ove teme, a opis implementacije sistema i način funkcionisanja aplikativnog softvera za monitoring i pomorsko izviđanje opisani su u nastavku. Na kraju poglavlja, izvršena je demonstracija realizovanih funkcionalnosti, a korišćeni su snimci sa aktivnog sistema za praćenje ciljeva, instaliranog u Gvinejskom zalivu, u Africi. Dizajn i implementacija ovog sistema opisani su u [100] i [46].

### 5.1 Koncept sistema za praćenje ciljeva baziranom na HFSWR mrežama

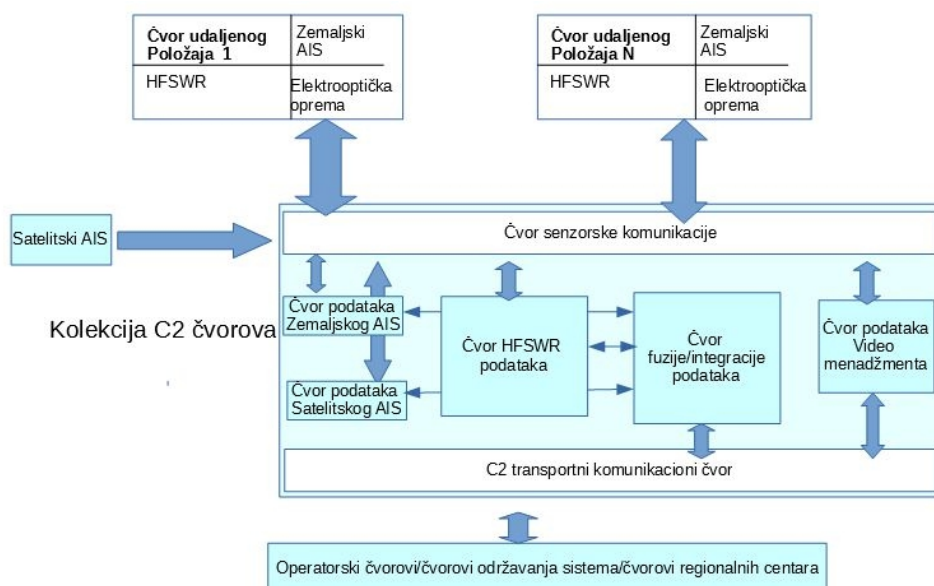
HFSWR mreža je, u opštem slučaju, podsistem sistema za integrisano pomorsko osmatranje, pa se konformira sa IMS konceptom, baziranim na HFSW radarima, definisanom u [11] i [12]. Iz ove usklađenosti mogu se izvesti određene pretpostavke o topologiji i rasporedu čvorova HFSWR mreže. Pre svega, IMS koncept pretpostavlja postojanje agregacionog čvora za obradu podataka i proizvoljan broj udaljenih čvorova, kao izvora rezultata osmatranja. Ovo svakako implicira zvezdastu topologiju mreže. Opet, pojedine specifičnosti topologije je potrebno definisati. Svaki udaljeni čvor ovog podsistema IMS poseduje potencijalni problem sa dodeljenim komunikacionim kanalom, pošto se udaljeni čvorovi često instaliraju na lokacijama na kojima postoji nedostatak potrebne telekomunikacione infrastrukture, potrebne za održiv rad senzorskih elemenata čvora

unutar HFSWR mreže. Pored osmatračkih mernih podataka, merni senzori emituju i podatke sekundarnog značaja, vezane za stanje infrastrukture, kao što su rezultati kalibracije uređaja ili dijagnostičke informacije, a koje je potrebno preneti do procesnih čvorova. Pored glavnih mernih senzora, postoje i drugi senzori i kontrolabilni uređaji, kao što su ambijentalni senzori, senzori za merenje emitovane snage i potrošnje, ruteri, letve za distribuciju el. energije (*Power Distribution Unit* - PDU), pojačavači snage itd. Sve ove činjenice karakterišu HFSWR mrežu kao komplikovan sistem za distribuirano merenje i upravljanje, čiji su elementi često resursno ograničeni bilo po pitanju komunikacionog kanala ili po samoj konstrukciji senzora ili po oba navedena faktora. Ovo je i razlog za kreiranje detaljne koncepcije mehanizma za kontrolu i monitoring, koja bi trebalo da obezbedi funkcionalan i neprekidan protok podataka i raporta stanja mreže. Za ovu svrhu će biti iskorišćena IoT konceptualna šema [30], uglavnom bazirana na paradigmi servisno-orijentisane arhitekture [31]. Do određenog stepena biće ispraćeni principi interakcije sa resursno limitiranim sensorima, opisani u [101] i primeri dobre prakse izgradnje infrastrukturnog monitoringa, na primer [102] ili [103]. Potrebno je primetiti da je HFSW radar senzor čija resursna limitacija dominantno potiče od komunikacionih ograničenja nego od računarskih sposobnosti. Ta činjenica mora biti uzeta u obzir prilikom izgradnje IoT infrastrukture sistema za osmatranje baziranih na HFSWR mrežama.

Senzori i uređaji u sistemu poseduju raznovrsne ugrađene interfejsne, a da bi se obezbedio unifikovani eksterni pristup, uvode se implementacije interfejsa preko Web servisa, kao prelaza prema ograničenim senzorskim interfejsima [101]. Dodatno, HFSWR mreže se često kontrolišu preko SNMP protokola [104] i, da bi se tome prilagodilo, midlver sloj [29] mora sadržati jedan ili više SNMP agenata [105] za one komponente koje ne poseduju takav interfejs.

### 5. 1. 1 Topologija HFSWR mreža

HFSWR mreže tipično imaju zvezdastu topologiju u kojima spoljni čvorovi predstavljaju individualne udaljene senzorske instalacije ili operatorske čvorove, sa kolekcijom centralnih čvorova, koji predstavljaju lokaciju komandno-kontrolnog centra, kao što je prikazano na slici (5.1).



Slika 5.1. Tipična zvezdasta topologija HFSWR mreže

Udaljeni senzorski čvorovi (čvorovi udaljenih instalacija, tj. sajtova) generalno predstavljaju instalacije jednog ili više homogenih ili heterogenih senzora. Dakle, po konstrukciji oni mogu biti elementarni ili mešoviti. Mešoviti udaljeni senzorski čvorovi obično sadrže kombinaciju dva ili čak svih vrsta elementarnih sajtova. Tipovi elementarnih sajtova su:

- **Sajt prijema satelitskog AIS signala.** Ovaj sajt sadrži opremu za satelitski prijem, neophodnu za ostvarivanje veze sa servisima obezbeđivača satelitskih AIS podataka. Ovaj čvor može biti instaliran i u neposrednoj blizini objekata C2 centra.
- **HFSWR sajt.** Čvor sadrži HFSWR senzor, tačnije, opremu koja omogućuje njegovu funkciju, druge senzore za ambijentalna i merenja snage, kao i kompjutersku opremu za primarnu obradu senzorskih podataka unutar čvora.
- **Sajt zemaljske AIS bazne stanice.** Čvor sadrži AIS transiver baznu stanicu i mrežnu opremu za dalju razmenu podataka.
- **Sajt elektrooptičkog izviđanja.** U ovom čvoru instalirane su kamere za video nadzor različitog tipa i namene (termalne kamere, kamere za prigušen osvetljaj itd.), koje omogućavaju detekciju i vizuelnu identifikaciju pomorskih objekata na relativno velikim rastojanjima.

Druga grupa eksternih čvorova je posvećena organizovanim korisničkim instalacijama, u formi centralnih ili regionalnih operacionih centara, koji se mogu podeliti u tri grupe: operatorski centri za pomorsko izviđanje, supervizioni i operatorski centri održavanja sistema i kolekcije čvorova regionalnih centara za izviđanje i superviziju.

Svi čvorovi HFSWR mreže, locirani u instalaciji C2 centra su predstavljeni na slici (5.1) kao kolekcija čvorova C2 centra i oni formiraju centralnu tačku topologije. Ovi čvorovi se mogu klasifikovati u sledeće kategorije:

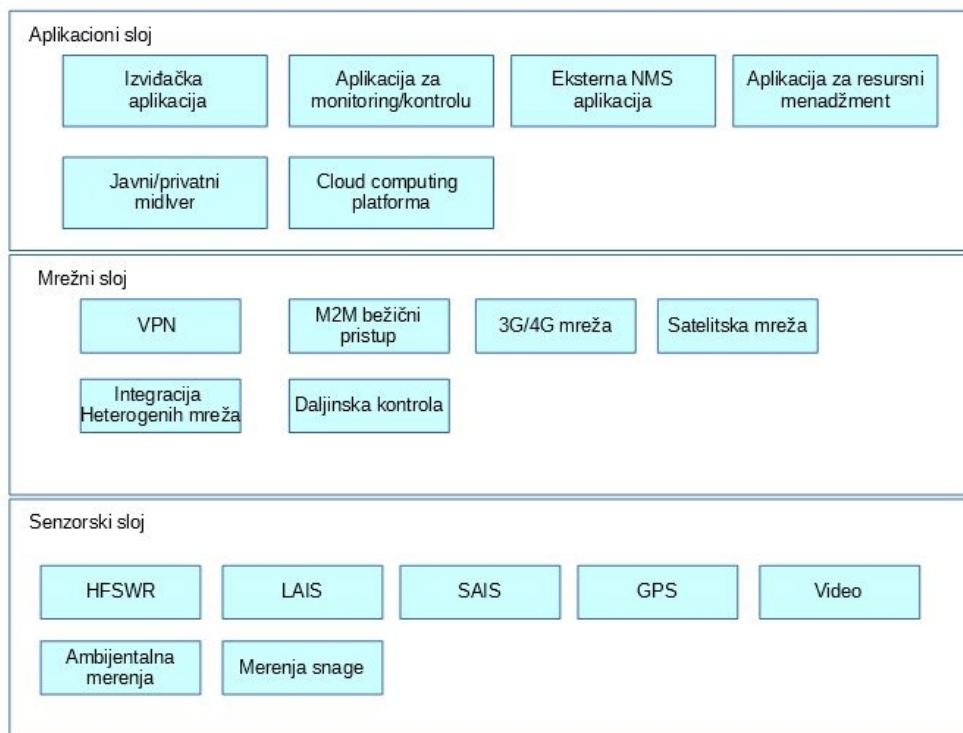
- **Čvorovi senzorske komunikacije.** Ovi čvorovi sadrže komunikacione veze, kao deo telekomunikacione infrastrukture C2 centra, sa zadatkom prijema svih senzorskih podataka mreže.
- **C2 transportni čvorovi.** Finalni rezultati integralne obrade podataka, uključujući i informacije o stanju sistema, se dostavljaju ovom skupu čvorova, kojima se pridružuju komunikacione veze prema korisničkim čvorovima, obično u formi ethernet mreže. Finalno kondicioniranje podataka i njihov transport prema krajnjem korisniku se obavlja u ovom čvoru.
- **Agregacioni AIS čvorovi.** Sve LAIS (*Land AIS*) i SAIS (*Satellite AIS*) veze se ostvaruju preko ovih čvorova, u kojima se svi podaci obrađuju i dostavljaju u koncentrovanom maniru.
- **Fuziono-integracioni senzorski čvorovi.** Ovi procesni čvorovi vrše fuzione procese nad različitim ili istorodnim tipovima senzorskih podataka, prvenstveno HFSWR i AIS podacima.
- **Čvorovi video-menadžmenta.** Njihova glavna uloga je prijem i resurni menadžment video slike sa udaljenih senzora za pomorsko i bezbednosno izviđanje.

Postoje i druge moguće topologije HFSWR mreža, na primer, regionalno grupisane varijante, sa više regionalnih procesnih čvorova, ali zvezdasta topologija je najčešći primer i omogućava značajne prednosti u smislu dostupnosti i implementacije. HFSWR mreža instalirana u Gvinejskom zalivu takođe prati zvezdastu topologiju sa slike (5.1).

### 5. 1. 2 Detalji IoT arhitekture HFSWR mreža

Uobličavanje IoT arhitekture HFSWR mreža može početi delimičnim ugledanjem na najbolje primere IoT arhitekturnih okvira datim u [106] i radarskih IoT aplikacija [107]. Blok šema IoT arhitekture sastoji se od senzorskog, mrežnog i aplikacionog sloja, kao što je prikazano na slici (5.2).





Slika 5.2. Bazični Iot koncept arhitekture IMS sistema baziranog na HFSW radarima

Senzorski sloj se sastoji od već spomenutih uređaja i servisa: HFSWR, LAIS, SAIS, video osmatranja, GPS (engl. *Global Positioning System* - GPS) i senzora za merenje snage i potrošnje el. energije. Mrežni sloj predstavlja most između senzorskog i aplikacionog sloja [102]. On se sastoji iz sledećih blokova:

- **Virtuelna privatna mreža** (engl. *Virtual Private Network* - VPN) [108]. Krajnji korisnik sistema je, najverovatnije, vojna mornarica ili specijalizovana državna organizacija, što implicira potrebu za bezbednošću u razmeni podataka u HFSWR mreži.
- **Satelitska mreža.** Često je upravo satelitska veza jedini način komunikacije između udaljenih čvorova mreže i C2 centra. Detalji vezani za ulogu satelitske mreže u IoT konceptu HFSWR mreže instalirane u Gvinejskom zalivu u Africi mogu se pronaći u [109].
- **GSM/3G/4G mreža.** Odličan izbor za alternativno adresiranje pitanja komunikacionih veza je dostupna mreža mobilne telefonije, koja je u isto vreme višestruko jeftinije rešenje od satelitske veze. Problem sa ovim izborom je što je broj pristupnih tačaka na udaljenim čvorovima HFSWR mreže najčešće jedan ili ih nema, dok je kvalitet konekcije obično veoma loš.
- **Integracija heterogenih mreža.** Generalno postoji mnogo različitih mrežnih rešenja, prisutnih u HFSWR mreži. Od korišćenja VPN u nekim ili svim domenima mreže, preko satelitske ili mobilne veze. Ovo su faktori heterogene mreže čija integracija predstavlja kompleksan zadatak.

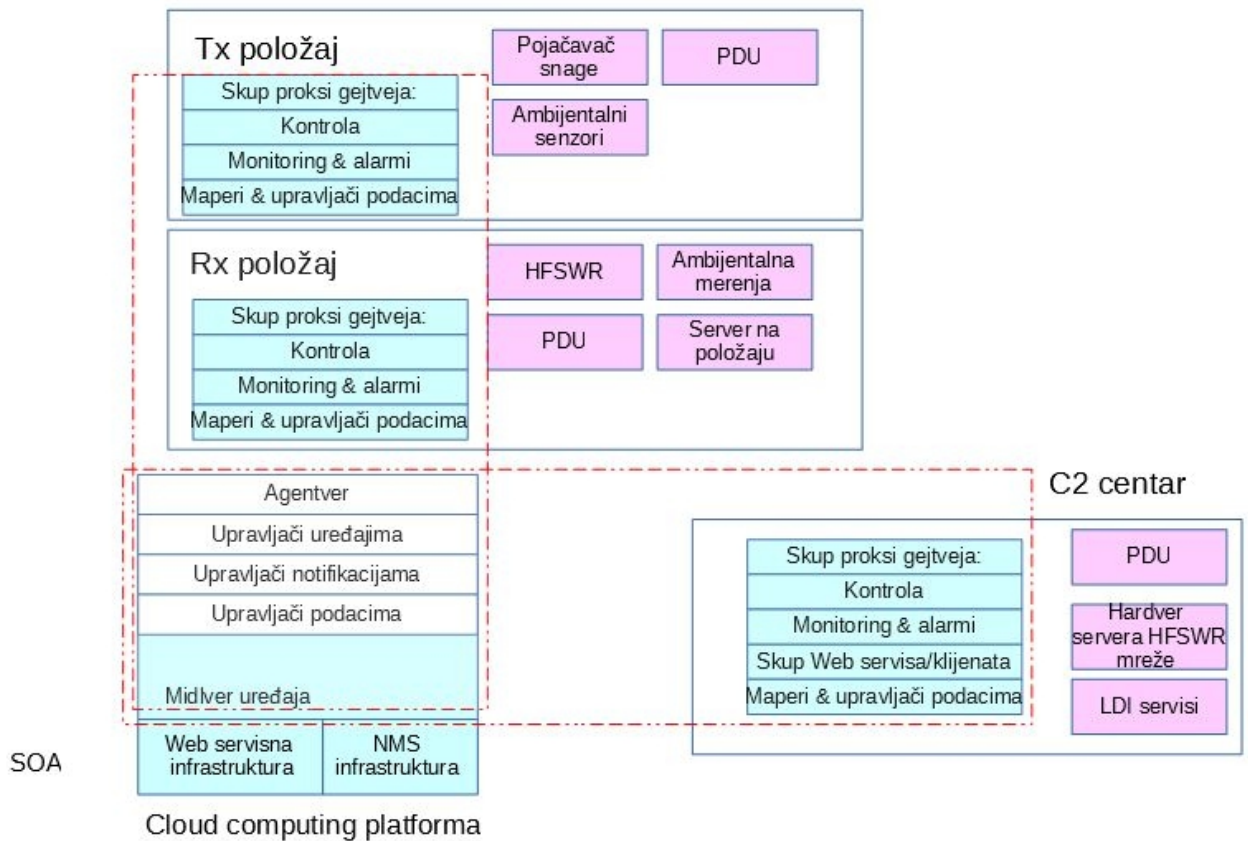
- **Daljinski pristup.** Daljinski pristup je princip monitoringa HFSWR mreže u kome su senzori i različiti uređaji kontrolisani i nadgledani preko internet mreže od strane klijentskih aplikacija ili mašinskih procesa, dakle, upravljani od strane ljudskog faktora ili ekspertskih sistema.
- **M2M bežični pristup** (*Machine-to-Machine* - M2M). Pojedini delovi HFSWR mreže na udaljenim čvorovima, tj. sajtovima mogu imati bežični interfejs ili im se omogućava pristup HFSWR mreži preko fiksnih ili čak mobilnih pristupnih tačaka.

Aplikacioni sloj se sastoji iz sledećih blokova:

- **Izviđačka aplikacija.** Ova aplikacija za opservaciju površina pokrivanja senzora, čiji je zadatak da na prigodan i pouzdan način predstavi trenutnu pomorsku situaciju.
- **Aplikacija za nadzor/kontrolu HFSWR mreže.** Ova aplikacija uključuje pregled svih monitornih tačaka, koje bi morale biti hijerarhijski predstavljene.
- **Eksterna NMS aplikacija.** Uvažavajući činjenicu da HFSWR mreža može biti podsistem kompleksnije mreže i zbog popularnosti NMS baziranog na SNMP protokolu, postoji potreba za dodatnim interfejsom baziranim na SNMP protokolu, koji bi koristile spoljne NMS aplikacije, kao što je, na primer, Centerity Monitor [110]. Pomenuti interfejs predstavlja funkcionalno ogledalo Web servisnog interfejsa u pozadini.
- **Aplikacija za resursni menadžment.** Ova aplikacija bi trebalo imati mogućnost da konfiguriše softverske elemente, vezane za postprocesiranje senzorskih podataka, kompjuterski hardver i da vodi računa o korektnosti konfiguracija uređaja i pristupnim parametrima korisnika.
- **“Cloud Computing” platforma.** Cloud computing (CC) platforma ima zadatak da obezbedi resurse za implementaciju sistema u privatnom oblaku. Njenu fizičku bazu čini nekoliko fizičkih servera, skladište podataka, ruteri i mrežni prekidački elementi.
- **Privatni i javni midlver.** Distribuirani midlver je softver, instaliran na udaljenim sajtovima i u C2 centru, koji interaguje sa drugim delovima softvera instaliranim na CC platformi. Ovaj segment predstavlja privatni midlver. Drugi deo distribuiranog midlvera interaguje sa sa aktivnim, eksternim korisnicima sistema i naziva se javnim midlverom.

### 5. 1. 3 Distribuirani midlver

Generalisana šema distribuiranog midlvera data je na slici (5.3), na primeru HFSWR sajta.



Slika 5.3. Generalisana šema distribuiranog midlvera na primeru HFSWR sajta

Distribuirani privatni midlver na udaljenim sajtovima i čvorovima C2 centra predstavljen je setom tzv. proksi gejtvej komponenti koje sadrže mapere i upravljače podacima, a omogućavaju pristup kontrolabilnim parametrima, monitornim tačkama i alarmnim definicijama. Ove komponente imaju ulogu u prevođenju, mapiranju i pakovanju ulaza i izlaza prema potrebama komunikacionog kanala. CC platforma ima zadatak implementacije glavne IoT infrastrukture, bazirane na SOA, koja se sastoji od skupa Web servisa. Ona implementira privatni i javni midlver, čija funkcionalnost može biti podeljena u 4 grupe, pri čemu sve komponente mogu imati svoj udeo i u privatnom i u javnom delu distribuiranog midlvera:

- **Agentver.** One softverske komponente koje transformišu polirajuće ili kontrolne SNMP zahteve spoljnih NMS aplikacija ili koje uređuju interne informacije transformacijom interfejsa kontrolisanih komponenti u informacije pogodne za SNMP interfejs, kolektivno se nazivaju agentver komponentama.
- **Upravljači uređajima.** Ove komponente vrše konfigurisanje, poliranje, start, deaktivaciju, kao i direktnu kontrolu individualnih uređaja u HFSWR mreži.
- **Notifikacioni menadžeri.** U slučaju senzora sa jednosmernom komunikacijom (tzv. “One-way” senzori), koji imaju limitiran interfejs i šalju svoja merenja i eventualne statusne

poruke, notifikacioni menadžeri su odgovorni za prijem takvih poruka, njihovu obradu i genezu odgovora, u koordinaciji sa agentver komponentama.

- **Upravljači podacima.** Oni primarno odgovorni za implementaciju interfejsa ka različitim skladištima podataka. Ovo se odnosi pre svega, na baze podataka za pomorsko izviđanje, sistemske korisničke baze i sistemske monitoring baze, koje skladište informacije vezane za dijagnostiku HFSWR mreže.

## 5.2 Implementacija softverske infrastrukture IoT arhitekture sistema

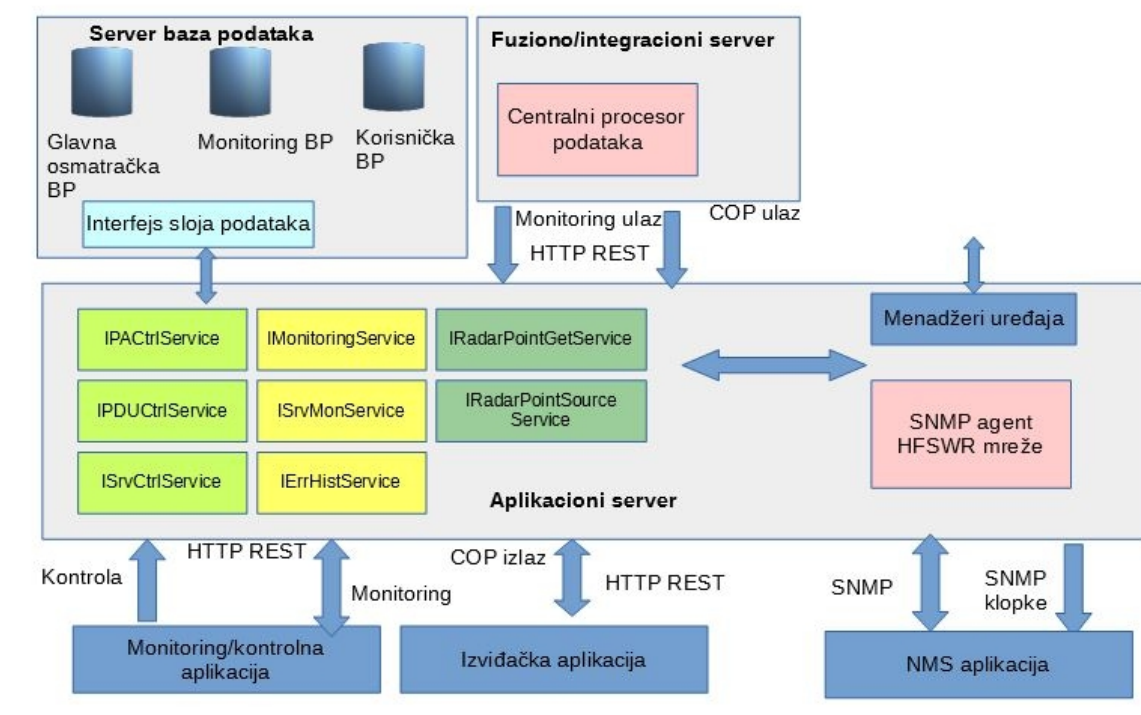
Implementacija softvera IoT arhitekture na CC platformi može početi opisom konfiguracije hardverske i softverske platforme. U logičkoj prezentaciji CC platforme je jasno da je potreban aplikacioni server, koji će biti nosilac implementacija Web servisa i velikog dela privatnog i javnog midlvera. Zbog potreba za bazama podataka, jedna od logičkih jedinica CC platforme mora biti server baza podataka. Ova dva logička servera, ne računajući njihove redundanse, formiraju bazis logičke arhitekture CC platforme. Postoje 3 baze podataka u sistemu:

- Sistemska korisnička baza. Skladišti korisničke informacije, role, alocirane resurse i specifične korisničke zadatke.
- Baza podataka pomorskog osmatranja. Ova baza skladišti podatke o tzv. zajedničkoj operacionoj slici (engl. *Common Operational Picture - COP*), o kojoj će biti više reči u sekciji (5.3.1), u svakoj njenoj iteraciji. Pored COP podataka, individualna merenja svakog HFSW radara i tabele AIS podataka takođe ažuriraju ovu bazu.
- Mrežna sistemska baza. U ovu bazu se beleži sistemska konfiguracija i logovi grešaka u midlveru, analogno ulozi midlver historian modela u [111].

Aplikacioni server implementira Web servisni skup, zatim, glavnog SNMP agenta za komunikaciju sa eksternom NMS aplikacijom i deo privatnog i javnog midlvera, koji se odnosi na menadžere uređaja i kontrolere podataka. Softver je organizovan kao multi-komponentna Web aplikacija, postavljena na Microsoft Internet Information Services (IIS) nosaču Web aplikacija, sa direktnom konekcijom prema glavnom SNMP agentu i Web servisnom skupu. Eksterni zahtevi prema SNMP agentu se prevode od strane agentvera ili u pozive odgovarajućih Web servisnih metoda, gde se obavlja dalja egzekucija, ili u direktne pozive menadžera uređaja ka specifičnim uređajima na mreži. Notifikacioni mehanizam dostavlja poruke uređaja preko reda poruka, gde notifikacioni izvršitelji generišu odgovor preko inicijalnog pozivnog interfejsa. Unutar C2 centra, čvorovi za proces podataka instaliraju se serveri na kojima se izvršava softver koji izvršava sve ove zadatke. Fuziono-integracioni server, koji sadrži centralni proces za obradu senzorskih podataka i

komponentu agregacionog monitoringa, pristupa Web servisima aplikacionog servera uglavnom preko Web klijenata. Većina monitoring podataka potiče od senzora koji imaju komunikaciju u jednom smeru i koji se prikupljaju na ovom serveru. Pored monitorne uloge, ovi podaci se takođe koriste u procesiranju senzorskih podataka, u izvesnom delu, a što je direktna prednost zvezdaste topologije HFSWR mreže.

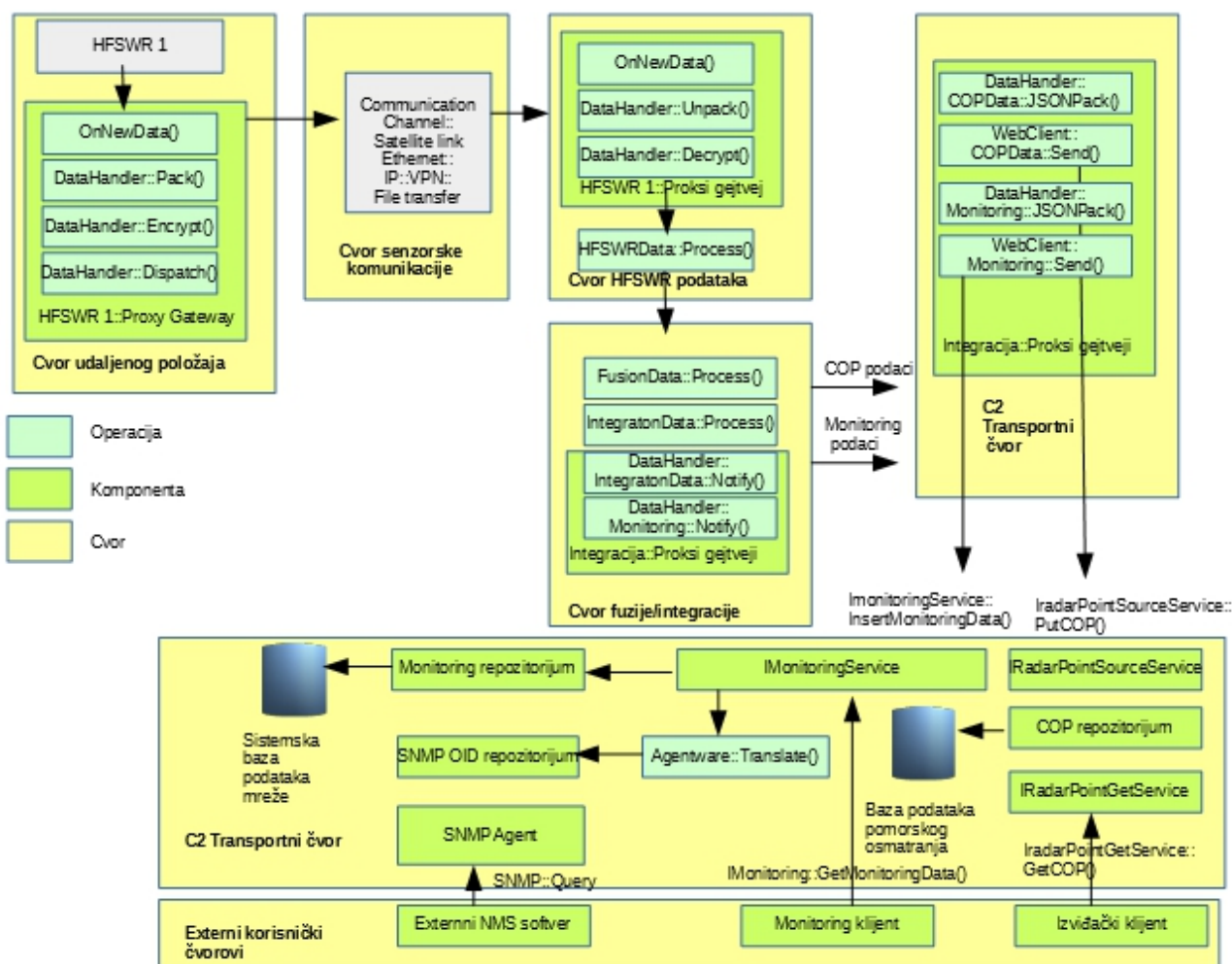
Korisnička komunikacija je bazirana na HTTP REST (engl. *REpresentational State Transfer - REST*) softverskom arhitekturnom stilu [112]. Podaci se emituju u JSON (engl. *JavaScript Object Notation - JSON*) formatu [113]. Ovo važi za sve interne i spoljne čvorove kod kojih postoji potreba za razmenom informacija sa aplikacionim serverom. Izuzetak je, naravno, eskterna NMS aplikacija. Web servisni skup je implementiran u C# programskom jeziku i postavljen na IIS. Postoje 3 glavne grupe servisa: kontrolni, monitorni i osmatrački servisi. Kontrolni servisi, prikazani na slici (5.4) svetlo zelenom bojom i opisani imenom servisnog ugovora, su posvećeni kontroli pojačavača snage, PDU letvi i konfigurisanju i kontroli njihovog procesnog stanja. Monitoring servisi (obeleženi žutom bojom na slici (5.4)) su posvećeni monitoringu opreme, alarmima i trenutnim stanjima procesa i toka podataka, uključujući i logovanje grešaka, dijagnostiku i pristup midlver istoriji. Osmatrački servisi (obeleženi zelenom bojom na slici (5.4)), posvećeni su operacionoj razmeni osmatračkih podataka između unutrašnjih i spoljašnjih čvorova mreže.



Slika 5.4. Logička arhitektura CC platforme

Tipični tok informacija biće demonstriran na scenariju gde jedan HFSW radar emituje podatke na kraju svog skeniranja i primarne obrade, što je prikazano na slici (5.5). Pri dolasku novog seta

merjenja, proksi gejtvaj komponenta aktivira svoj upravljač podacima, koji pakuje podatke i šalje kroz komunikacioni kanal, u ovom slučaju FTP (engl. *File Transfer Protocol* - FTP) protokolom i ethernet mrežom. Po prijemu paketa u čvoru HFSWR podataka, podaci se obrađuju i prolaze kroz rutine fuzije i integracije sa ostalim podacima od različitih senzora, kada se formira izlaz zajedničke operacione slike, mogući alarmi i druge informacije. Preko notifikacionog mehanizma, notifikacioni menadžeri komponenti agregacionog monitoringa i Web klijenti iz C2 transportnog čvora obrađuju i pakuju poruke u JSON format i šalju ih preko Web klijenata na servise monitoringa i podataka aplikacionog servera. Monitoring podaci se dalje prevode agentver komponentom u format pogodan za SNMP OID (engl. *Object Identifier* - OID) skladište podataka, gde mehanizam SNMP klopki generiše notifikacije klopki, ukoliko je potrebno. Podaci repozitorijuma monitoringa, SNMP OID i osmatranja (tzv. COP repozitorijum) su tada dostupni za eksterne klijente, koji ih čitaju putem odgovarajućih servisnih i SNMP poziva.



Slika 5.5. Dijagram toka informacija za scenario slanja podataka jednog HFSWR radara

## 5.3 Struktura softvera za osmatranje i monitoring stanja mreže

Struktura softvera za osmatranje i monitoring stanja mreže se sastoji iz jednog ili više modula, posvećenih praćenju ciljeva, fuzionim i integracionim zadacima i monitoring komponenti. U osnovi, najviši nivo softverske strukture se može predstaviti jednim centralnim procesorskim modulom, koji sadrži definicije alarma, u okviru svog skupa pravila monitoringa. Kratak opis glavnih softverskih komponenti će biti dat u nastavku teksta.

### 5.3.1 LDI modul

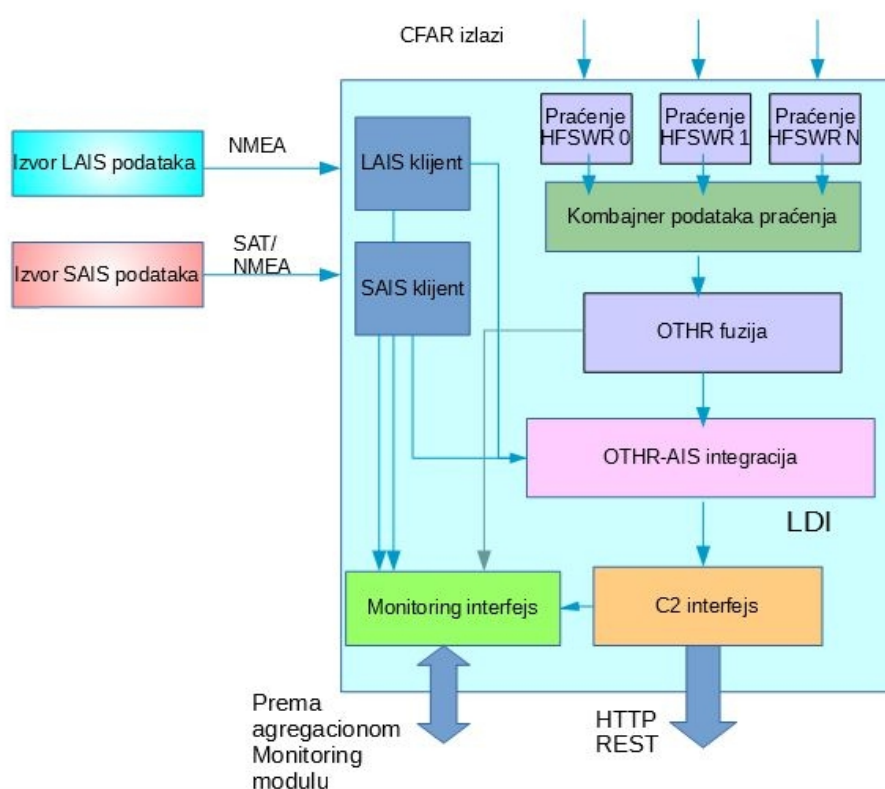
Softverski modul koji će u glavnom čvoru obrade obavljati funkcije praćenja ciljeva, fuzije i integracije u odgovarajućim čvorovima mreže, a čija je primarna uloga puna integracija meta na većim daljinama nazivamo LDI modul (engl. *Long Distance Integrator* - LDI). Razlog za takav naziv leži u činjenici da su bliže mete obično predmet razmatranja miktrotalasnih radara, pod uslovom da pomenuti radari postoje u kompleksnijim IMS sistemima. Strukturna šema modula prikazana je na slici (5.6).

Ulazni podaci LDI modula potiču od HFSWR i AIS senzora i poseduju odgovarajući format, a obrađuju ih posebne komponente, čiji je rad potrebno na neki način nadgledati. Pre svega, potrebno je opisati rad svake komponente pojedinačno, opisati formate i interfejsa i sagledati kakve notifikacije i alarmi su pogodni za poslove monitoringa. LDI modul se sastoji iz sledećih komponenti:

- LAIS i SAIS klijent. Komponenta se povezuje na LAIS/SAIS link na osnovu predefinisanih pristupnih parametara (IP adresa, port). Nakon uspostavljanja konekcije, tip komunikacije je jednostran, u pravcu klijenta. Tip interfejsa je baziran na IP protokolu i standardnoj socket komunikaciji.
- Komponente praćenja ciljeva. Svako ulaznoj vezi sa HFSWR senzorom dodeljuje se po jedna komponenta praćenja. Njen ulazni interfejs prihvata CFAR izlaz od pridruženog senzora i izvršava algoritam praćenja objekata [75]. Izlazni produkt komponente je lista registracija tragova sa zadatom vremenskom oznakom, nasleđenom iz primljenog skupa CFAR detekcija
- Kombajner podataka praćenja. Ova komponenta prihvata registracije tragova iz komponenti praćenja ciljeva i vrši vremensko preslaganje podataka. Podaci u ovu komponentu pristižu markirani različitim vremenskim oznakama, a pri tome i međusobno proizvoljno kasne, u zavisnosti od stanja komunikacionog kanala i obrade. Komponenta vrši uparivanje podataka sa svih ovih komponenti prema određenim vremenskim kriterijumima.
- OTHR fuziona komponenta. Obavlja fuziju kombinovanih informacija koje dobija od

komponente kombajnera podataka praćenja, po algoritmu izloženom u [6]. Posедуje sopstveni mehanizam vremenskog označavanja, oslonjen na referentnu informaciju na ulazu i obezbeđuje jedinstvenu HFSWR operacionu sliku za pridruženi skup HFSWR senzora, tzv. UHP sliku (engl. *Unified HFSWR Picture* - UHP).

- OTHR-AIS integraciona komponenta. Vršі fuziju jedinstvene HFSWR operacione slike i svih AIS senzorskih podataka, po algoritmu izloženom u [8]. Ova komponenta obezbeđuje jedinstvenu operacionu sliku (COP) za zadati skup pridruženih HFSWR senzora.
- C2 interfejs komponenta. Služi za kondicioniranje izlaznih podataka. Ona transformiše podatke u JSON format. Zatim se HTTP klijent, kao njen integralni deo, povezuje na odgovarajući servis u C2 centru i dostavlja podatke HTTP REST metodama.
- Monitoring interfejs. Služi da prikupi notifikacije i alarme sa svake pojedinačne komponente LDI modula. Zatim se ovi podaci na pogodan način predstavljaju u drugom formatu i prosleđuju dalje višem nivou obrade.



Slika 5.6. Struktura LDI modula

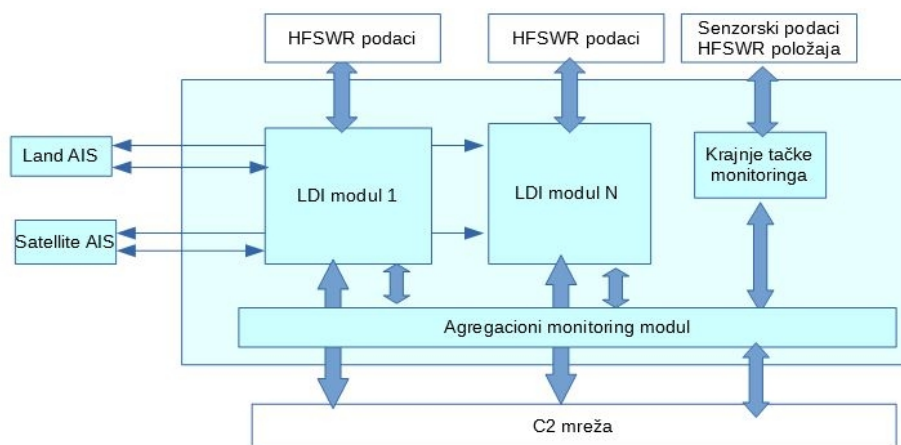
### 5. 3. 2 Centralni proces

Centralni proces (CP) je proces čija je funkcija analogna onoj koju ima multi-senzorski asocijacioni procesor u [12]. CP asocira izlazne detekcije HFSW radara, kako bi formirao



asocijacije meta na više nivoa i kombinovao HFSWR i AIS podatke da bi bilo omogućeno formiranje parcijalnih ili kompletnih operacionih slika.

Uloga centralnog procesa obrade je centralizovan tretman senzorske obrade i monitoringa cele HFSWR mreže, što je omogućeno zbog specifične zvezdaste topologije takvih mreža. U opštem slučaju široko distribuirane mreže HFSWR, moguće je usvojiti princip da pojedini LDI moduli prikupljaju podatke sa onih skupova HFSWR senzora, čije se zone pokrivanja preklapaju, pa je iz tog razloga potrebna fuzionisana slika za takve pojedinačne regione. Za pojedinačne fuzionisane slike u opštem slučaju ne postoji potreba za međusobnom korelacijom, jer se mogu posmatrati kao izdvojeni podsistemi mreže. Pojedinačna, ostala senzorska merenja, kalibracioni rezultati itd. mogu se dostavljati posebnom setu krajnjih tačaka, različitim interfejsima, pogodnim za scenario i uslove komunikacije na terenu. Realizacija centralnog procesa obrade se zasniva na smeštanju (engl. *hosting*) procesa na klasičnim windows servisima, a broj procesa i razdvajanje po funkcionalnostima (na primer, LDI moduli u jednom procesu, monitoring senzora u mreži u drugom) je stvar preferencije. U najjednostavnijem slučaju, kao i u slučaju topologija sa manjim brojem krakova, jednoprocesna verzija, prikazana na slici (5.7), predstavlja i optimalno rešenje. Kod ovakvih realizacija moguća je potpuna agregacija monitoring informacija i kreiranje jedinstvenog raportnog sistema, pred poslednji, aplikativni stepen.



Slika 5.7. Struktura centralnog procesa obrade i monitoringa - jednoprocesna realizacija

Agregacioni monitoring modul obezbeđuje kompletnu monitoring sliku HFSWR mreže u prethodno opisanom slučaju. Jedini izuzetak je sistemski monitoring samog centralnog procesa, koji je ili zaduženje posebne komponente, ili može biti prepušten, na primer, Windows menadžment interfejsu. Informacije koje prihvata CP preko svojih monitornih krajnjih tačaka su generalno informacije u jednom smeri po prirodi i različitog tipa, od jednostavnih ambijentalnih merenja, okupiranosti hard-diskova na serverima sajta do signalnih kalibracionih merenja za svaki prijemni antenski niz HFSW radara. Notifikacije koje kreira HFSW radar se primaju od strane centralnog

procesa, čiji opsluživač događaja aktivira određene alarme. Temperaturni događaji, događaji povezani sa neuspešnim kalibracionim procedurama na individualnim kanalima prijema, kao i oni višeg prioriteta, podižu opšti nivo alarma održavanja HFSW radara.

### 5. 3. 3 Pregled mernih i kontrolnih tačaka i izgradnje alarmnog sistema

Sve merne i kontrolne tačke unutar HFSWR mreže, za potrebe monitoringa stanja mreže, mogu se svrstati u 9 grupa, prema tabeli (5.1). U sistemu, pored opisanih senzora koji vrše glavnu funkciju mreže, postoje i brojni drugi, čija je uloga takođe važna, samo u drugim aspektima. Sistem monitoringa poseduje alarmni mehanizam koji ima za cilj da izazove korisničku reakciju pri određenim kritičnim otkazima. Priroda alarma je dominantno povezana sa sensorima, ali, takođe postoje i operacioni izviđački alarmi, povezani sa zonama od posebnog interesa, pravilima ponašanja na moru ili pravilima izviđanja.

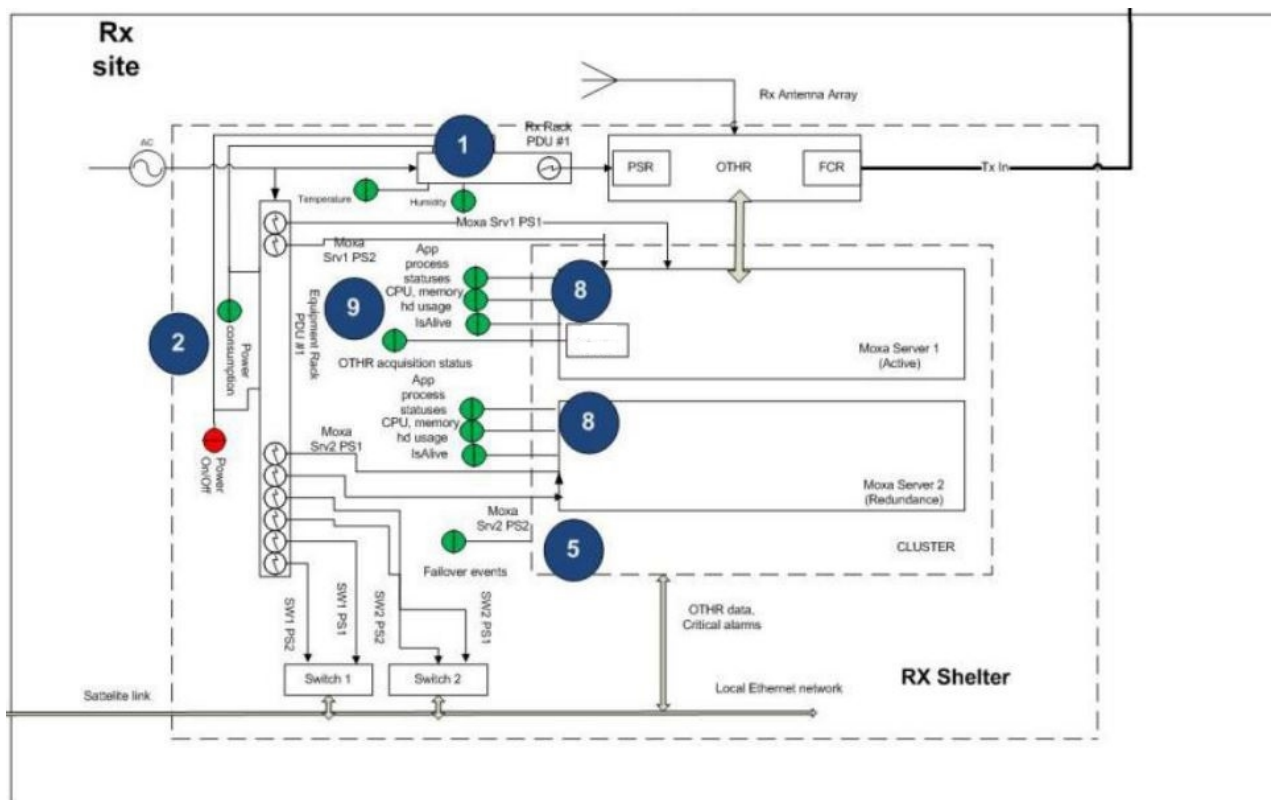
Tabela 5.1. Merne i kontrolne grupe u HFSWR mreži

Grupa	Opis
1	Ambijentalna merenja
2	PDU kontrola i merenje potrošnje el. energije
3	Merenje reflektovane i izračene snage
4	Testovi kalibracije/validacije Rx ulaza
5	Multi-serverske klaster informacije i failover indikacije
6	Kontrola i status pojačavača snage
7	Kontrola, notifikacije i monitoring u C2 centru
8	Monitoring/kontrola servera/PC mašina
9	HFSWR status akvizicije

Da bi se pojasnio položaj mernih i kontrolnih tačaka i uloga u HFSWR mreži, kao primer data je blok šema Rx dela HFSWR sajta instaliranog u Gvinejskom zalivu, na slici (5.9). Predajni položaj sadrži pojačavač(e) snage, kao osnovni element, dok je u Rx položaju smeštena kompletna procesna oprema HFSWR: sintetizator FMCW signala, prijemni elementi antena i serverska oprema za digitalnu obradu signala. U svakom položaju postoje elementi koji su kontrolabilni ili koji poseduju neku vrstu senzora bitnu za monitoring sistema. Od interesa za sam proces monitoringa spadaju sledeći elementi:

1) PDU letve (*Power Distribution Unit* - PDU). Ove “pametne” letve za distribuciju el. energije poseduju više utičnica za napajanje opreme u rekovima. Svaka utičnica se kontroliše i omogućen je monitoring potrošnje el. energije. Pored toga, poseduje temperaturni senzor, koji se koristi za ambijentalna merenja. Pristup PDU se obavlja preko Web HTTP interfejsa ili SNMP interfejsa i zaštićen je korisničkim nalogom i šifrom.

- 2) Pojačavač snage sa mernim instrumentom za merenje reflektovane i direktne snage. PA (engl. *Power Amplifier* - PA) ima ugrađen Web HTTP interfejs za kontrolu i monitoring rada PA, sa koga se PA može uključivati ili isključivati, podešavati pojačanje, a time i izlazna snaga, očitavati status i vreme aktivnosti. Interfejs je obezbeđen korisničkim nalogom i šifrom. Pored toga, preko njega se pristupa mernom uređaju za merenje direktne, izračene snage i reflektovane snage, koji predaje rezultat u procentima nominalne snage, koja iznosi 1 kW.
- 3) Ruteri i svičevi. Ova standardna mrežna oprema tipično je opskrbljena Web HTTP interfejsom, zaštićenim korisničkim nalogom i šifrom.
- 4) HFSWR Web interfejs. Pomoću ovog interfejsa HFSWR se pušta u rad ili se prekida njegovo dejstvo i omogućeno je očitavanje statusa akvizicije.



Slika 5.8. Pregled mernih i kontrolnih tačaka Rx dela HFSWR sajta.

Ne proizvodi svaki alarm isti odgovor od softvera ili od operatora. Postoji potreba za definisanjem različitih nivoa ozbiljnosti alarmne situacije, tj. stanja koje izazivaju u sistemu. Zbog toga se alarmima pridružuje nova osobina, koja ih karakteriše kao dvostatičke, trostatičke ili multi-statičke. Sa druge strane korisnicima sistema je često potrebna neka vrsta brze vizuelne inspekcije svih vitalnih delova sistema. Iz ovog razloga se uvode generalizovani alarmi, koji su rezultat logičkih operacija serija “jednostavnijih” alarma, koji poseduju više nivoa ozbiljnosti. Ovi alarmi se karakterišu kao agregacioni alarmi i pokrivaju najvažnije aspekte sistema: generalno stanje udaljenog sajta, konekciju prema AIS izvorima podataka, status softverskih komponenti i status

toka podataka od udaljenih čvorova ka C2 centru. Tabela (5.2) definiše jedan podskup agregacionih alarma u mreži sa informacijama o načinu njihovog generisanja i opisima stanja.

Tabela 5.2. Podskup agregacionih alarma HFSWR mreže

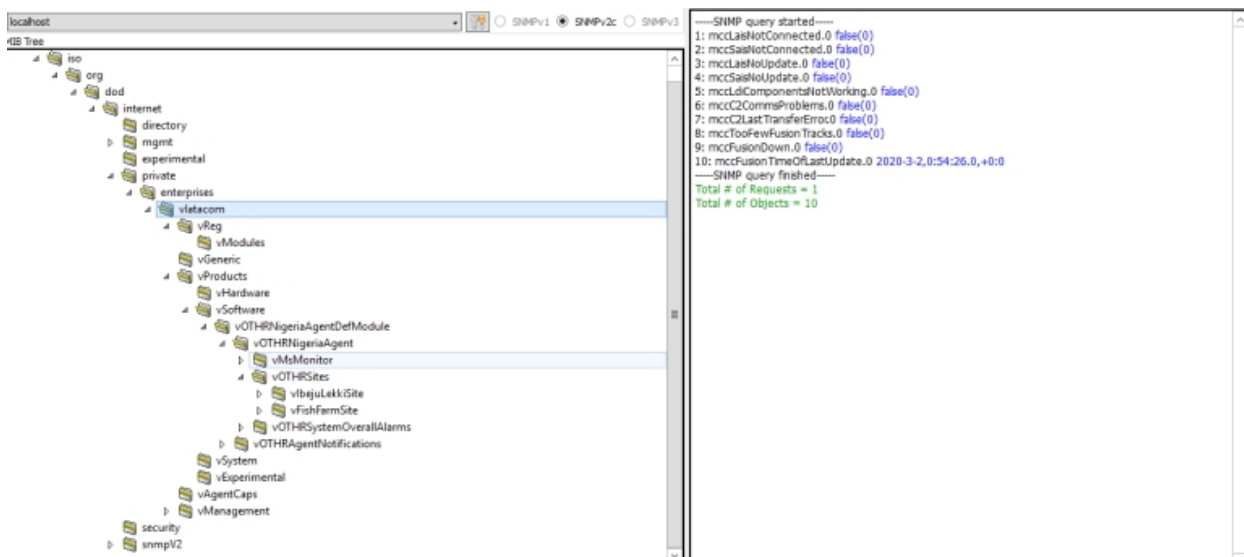
Ime alarma	Broj stanja	Opis stanja alarma	
Generalno stanje HFSWR sajta	4	mali	Kombinacija malih alarma: indikacija propalog testa kalibracije jednog Rx kanala, srednji kritični nivo zauzeća hard-diska servera itd.
		ozbiljni	Kombinacija ozbiljnih alarma: indikacija zasićenja na više Rx kanala pri testu kalibracije, nedostatak prijavljivanja komponente (prva iteracija)
		kritični	Kombinacija kritičnih alarma: temperaturni problem, kritično zauzeće hard-diska servera, propali test kalibracije na više Rx kanala, neuspešno prijavljivanje komponenti u više iteracija, problem sa naponima napajanja i DC referencama, nepostojanje saobraćaja na komunikacionom linku sa HFSWR sajta itd.
LAIS-SAIS alarms	3	mali	Nema ažuriranja LAIS (SAIS) podataka
		kritični	Postoji problem sa konekcijom na odgovarajući AIS link
LDI component problem	3	mali	Detektovan otkaz softverske komponente sekundarnog značaja
		kritični	Detektovan otkaz softverske komponente primarnog značaja
C2 connection	3	mali	Problem sa zadnjim transferom podataka zajedničke operacione slike u C2 transportnom čvoru
		kritični	Ne postoji konekcija prema infrastrukturi C2 transportnog čvora

## 5. 4 Demonstracija rada sistema za praćenje pomorskih ciljeva

Implementacija sistema instaliranog u Gvinejskom zalivu trenutno zauzima resurse jednog fizičkog servera sa 2 CPU (engl. *Central Processing Unit* - CPU) sa po 24 jezgra. Način demonstracije rada sistema podrazumeva testiranje funkcionalnosti SNMP interfejsa mreže i prikaz funkcionalnosti pomorskog izviđanja i monitoringa sistema, kroz snimke rada alata iz aplikativnog sloja IoT arhitekture HFSWR mreže.

### 5. 4. 1 Demonstracija funkcionalnosti SNMP interfejsa eksternom NMS aplikacijom

SNMP interfejs testira se aplikacijom SNMPB [114], instaliranom na aplikacionom serveru. Ova aplikacija se koristi kao MIB [115] (engl. *Management Information Base* - MIB) fajl pretraživač i tester SNMP agenata. MIB fajl HFSWR mreže se učitava u SNMPB aplikaciji, nakon čega je omogućen pregled objektnih identifikatora u hijerarhiji, što se može uočiti na slici (5.9), levo. U hijerarhijskom prikazu selektovan je OID pod nazivom vMsMonitor, koji sadrži glavne alarme fuziono-ntegracijskog servera, vezane za rad HFSWR mreže. Izvršeno je čitanje OID-a, a rezultati upisa su prikazani sa desne strane slike (5.9).



Slika 5.9. SNMP upitni test glavnog SNMP agenta HFSWR mreže u SNMPB alatu

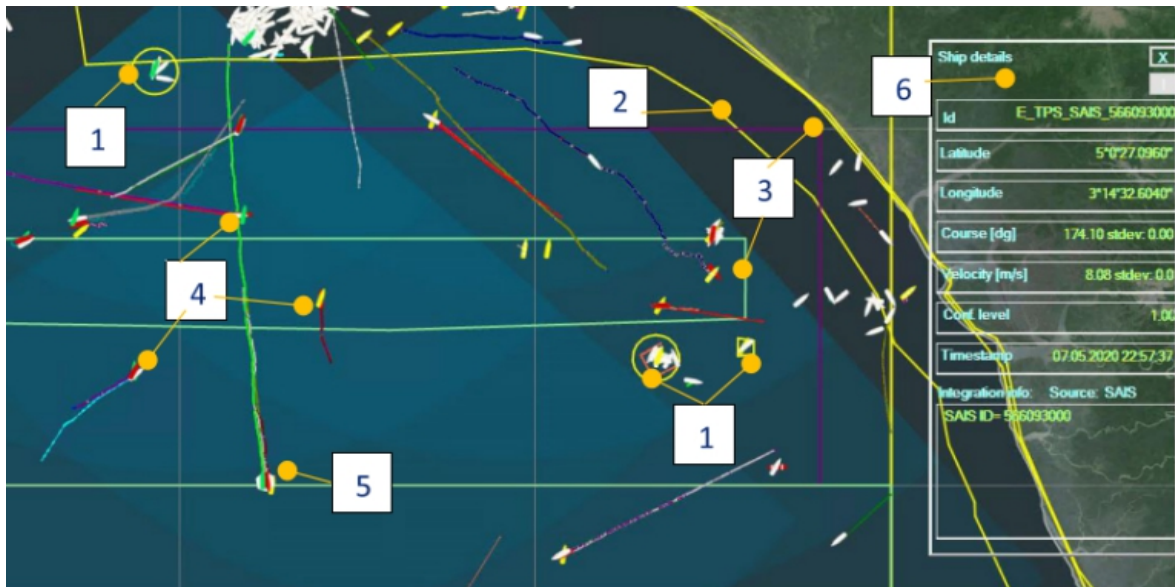
## 5. 4. 2 Demonstracija procesa osmatranja i monitoringa stanja sistema

Svrha demonstracije je prezentovanje funkcionalnosti izviđačke aplikacije, koje reflektuju akcije različitih blokova u LDI modulu, kao i prikaz aplikacije za monitoring stanja sistema, koji bi trebalo da omogući uvid u glavne mogućnosti monitoringa i alarmni mehanizam. Na slici (5.10) prikazani su elementi aplikacije osmatranja, u tzv. pregledu svih slojeva. Postoje 4 bazična pregleda slojeva:

- Pregled sloja praćenja. Ovo je najniži sloj pregleda i oslikava stanje praćenja pojedinačnih HFSW radara.
- Pregled UHP sloja. Ovaj pregled odgovara izlazu OTHR fuzione komponente, koja izbacuje unifikovanu HFSWR sliku.
- Pregled AIS sloja. Pregled prikazuje sve LAIS i SAIS mete.
- Pregled COP sloja. Pregled omogućava prikaz jedinstvene operacione slike pomorskog osmatranja.

Svaki od slojeva odgovara jednom od odgovarajućih procesnih koraka u LDI komponenti sa slike (5.6). Moguće je, svakako, izabrati prikaz više, pa i svih slojeva odjednom, što dovodi do pregleda svih slojeva u isto vreme sa slike (5.10).

Markirane su zaštićene pomorske oblasti (1), uključujući i poligon za ekskluziju HFSWR u teritorijalnim vodama, koje su rezervisane isključivo za operacije sa mikrotalasnim radarima (2), zatim, interferentne alarmne zone (3), koje imaju zadatak da alarmiraju operatora na prisustvo štetnih interferencija u radu HFSW radara. Ove markirane oblasti predstavljaju zone posebnih pravila operatorskog i alarmnog delovanja.



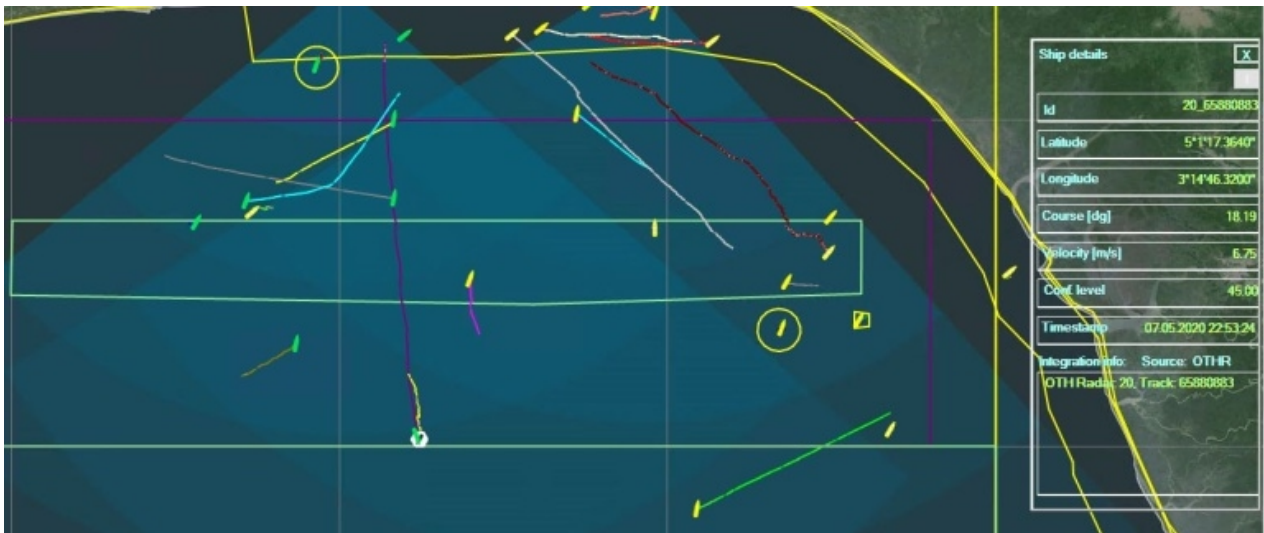
Slika 5.10. Pregled elemenata osmatračkog ekrana alata za izviđanje

Potrebno je primetiti da se u zaštićenim oblastima elementi UHP slike isključuju iz osmatranja. Razlog za to leži u tome što se HFSWR koristi za detekciju meta koje ulaze ili izlaze iz takvih zona, dok su zone u dometu mikrotalasnih radara bolje pokrivena pomenutim radarima zbog svoje bolje rezolucije. Individualne mete, označene sa (4), predstavljaju se markerima u obliku broda različitih boja. Zeleni i žuti markeri su rezervisani za prikaz meta partikularnih HFSW radara. Crveni markeri predstavljaju UHP mete, dok beli predstavljaju AIS mete. Detalji selektovane mete (beli heksagonalni marker, označen brojem (5)) se predstavljaju na panelu podataka o meti, desno (6).

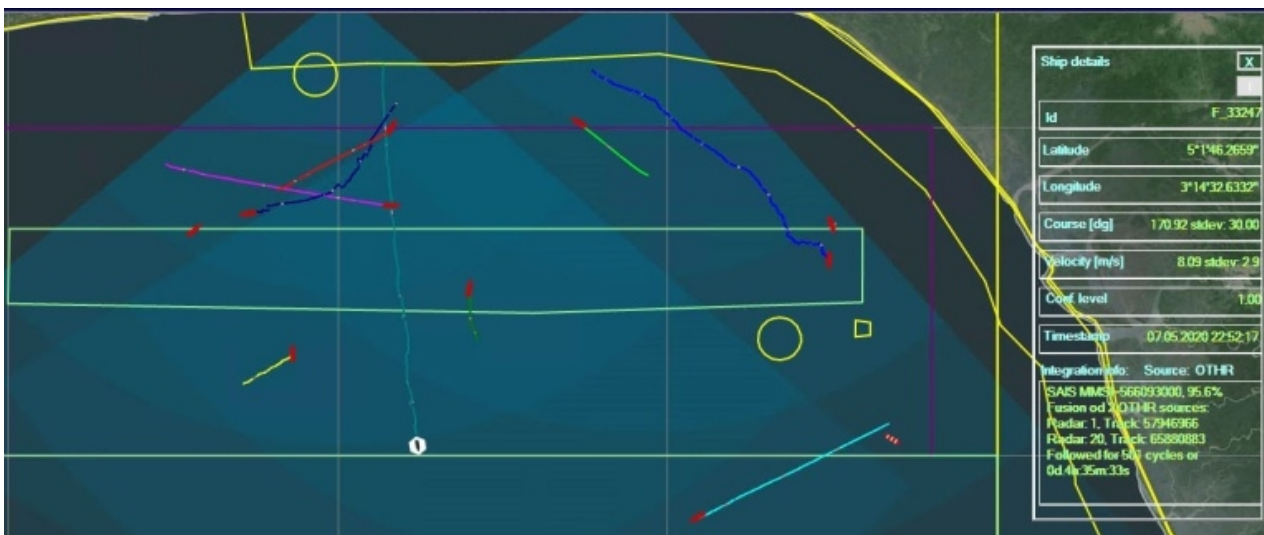
Važan aspekt pomorskog osmatranja upravo je slojeviti prikaz. Pokazalo se u praksi veoma korisnim imati mogućnost razlikovati mete u COP pregledu i prikazati putanje i podatke praćenja od strane različitih senzora i internih procesnih obrada, što će biti demonstrirano na primeru. Na slici (5.10), u prikazu svih slojeva postoje markeri koji u stvarnosti potiču od samo jedne realne mete, ali pripadaju različitim slojevima prikaza.

Pregled primarnog sloja praćenja je rezultat komponente praćenja ciljeva u LDI modulu, koja postoji za svaki HFSW radar u mreži. Primer slike prikaza dat je na slici (5.11). Kurs meta se ne određuje u ovom procesnom sloju, već u fuzionoj obradi, otuda markeri uzimaju proizvoljan pravac.

Posle fuzionog procesa, OTHR fuziona komponenta LDI modula formira UHP sliku. Taj rezultat je prikazan na slici (5.12). Poredeći sliku (5.12) sa onom sa slike (5.11), može se lako uočiti pravilno grupisanje meta.



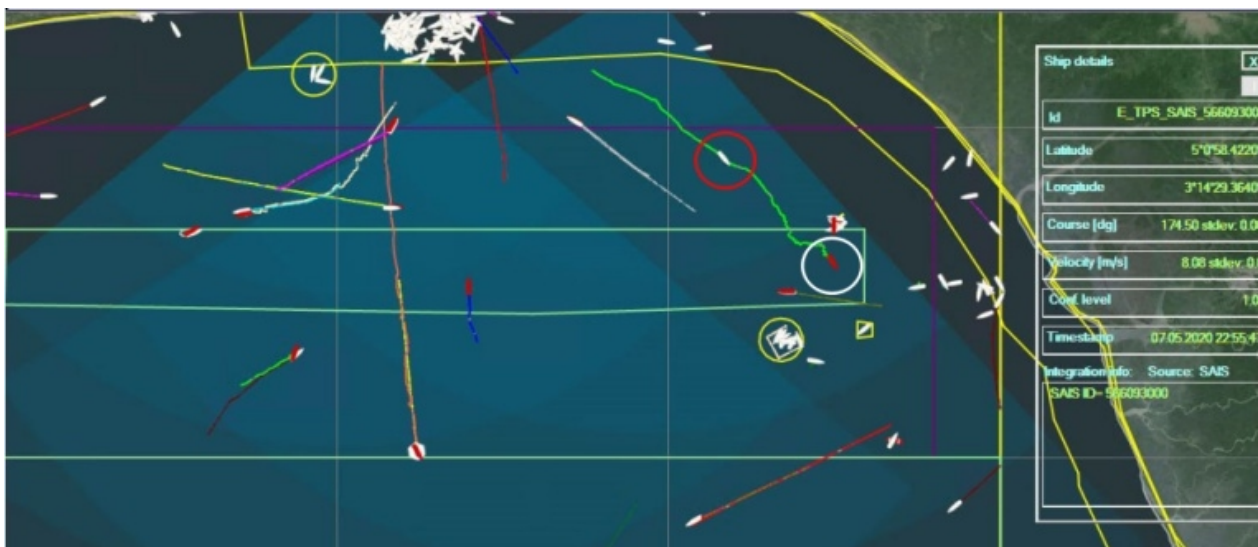
Slika 5.11. Pregled nižeg nivoa praćenja sa dva HFSW radara



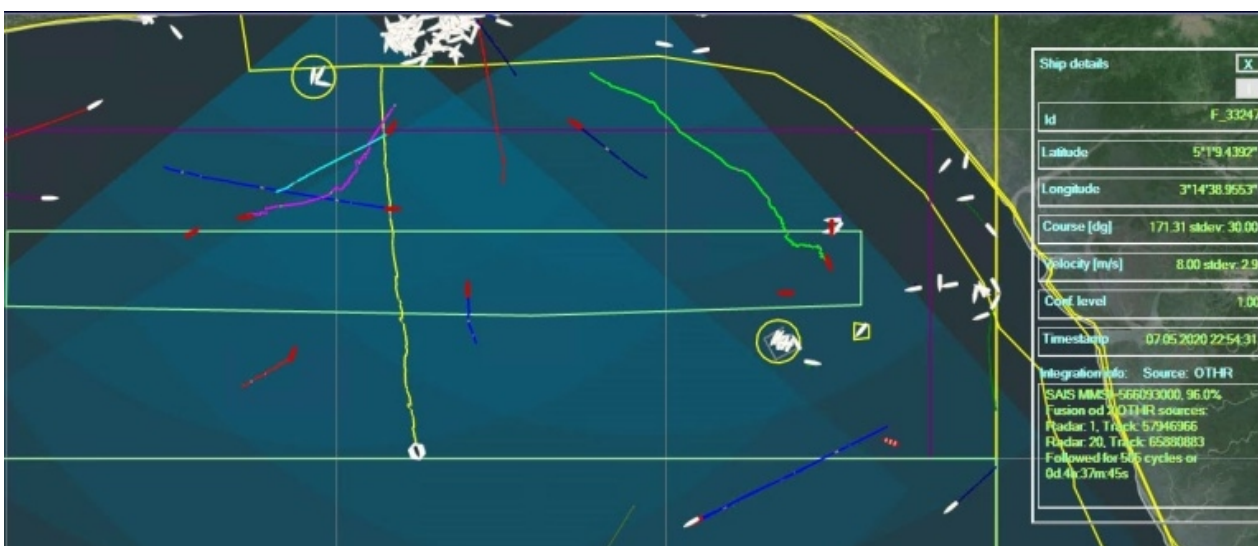
Slika 5.12. Pregled UHP sloja

Slika (5.13) prikazuje kombinovani UHP i AIS pregled. Ova slika je pokazana samo da bi bila upoređena sa pregledom COP sloja, datom na slici (5.14). U ovoj tački obrade, sve partikularne UHP i AIS mete su potpuno integrisane, formirajući pouzdanu operacionu sliku. Boja markera indikuje poreklo mete, davajući prednost HFSWR (crveni markeri) u slučaju da meta vodi poreklo od više izvora. Kao primer, selektovana meta na slici (5.13) potiče od više senzora. Praćena je od strane 2 HFSW radara, od čijih je tragova formirana jedna UHP meta, zatim od AIS, i na kraju, u COP pregledu, samo je jedna meta formirana. Na slici (5.13), jedna AIS meta, obeležena crvenim krugom, je prestala da emituje svoju AIS poziciju. Sa druge strane, jasno je praćena HFSW radarom, što je markirano belim krugom. Ako pogledamo COP pregled na slici (5.14), može se primetiti da AIS meta sa slike (5.13) nedostaje. Razlog za to leži u pravilima HFSWR-AIS integracije [8], gde integracioni link ostaje aktivan do 6 sati nakon zadnje emitovane AIS pozicije. Ovaj primer ne samo

da naglašava važnost slojevitog prikaza u izviđačkim aplikacijama, već takođe prikazuje velike probleme sa kojima se suočavaju operatori na terenu.



Slika 5.13. Kombinovani UHP i AIS pregled

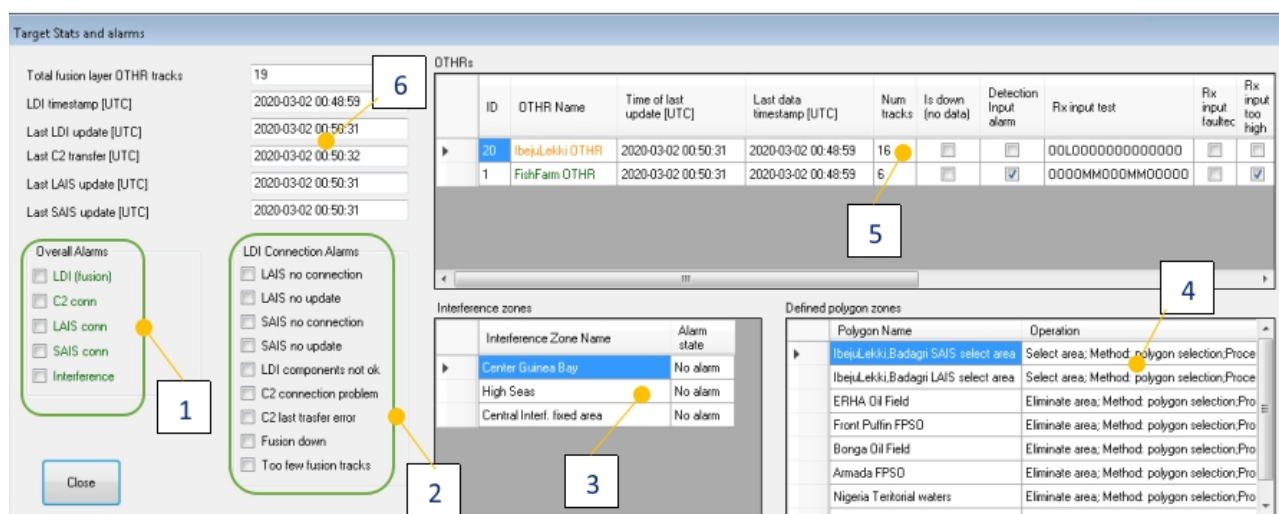


Slika 5.14. Jedinstvena operaciona slika - COP pregled

Prikaz funkcija monitoringa biće izvršen pojašnjenjem glavnog preglednog panela na slici (5.15), gde su označene glavne monitorne grupe. Najvažniji alarmi cele HFSWR mreže označeni su labelom (1) i omogućavaju brzi uvid u sveukupno stanje mreže. Ova grupa alarma, zajedno sa sveukupnim alarmima udaljenih sajtova, se obično postavlja na grafički korisnički interfejs operatora. LDI alarmi (2) informišu o generalnom stanju LDI komponenti. Zonalni alarmi interferencije (2) informišu korisnika o mogućnosti veoma jake jonosferske interferencije u definisanim zonama. Alarmi u ovim oblastima imaju za eventualnu posledicu nižu verovatnoću detekcije, probleme sa praćenjem, pa i povećanu verovatnoću pojave lažnih tragova.



Specijalizovane poligonalne zone (4) uključuju zaštićene zone (na primer, naftne platforme) ili razne ekskluzivne ili selekzione poligone. Zaštićene zone, ako su konfigurisane, omogućavaju alarmiranje uzrokovano ulaskom ili izlaskom iz zone, zavisno od pravila praćenja. Grupa udaljenih sajtova (5) omogućava uvid u generalno stanje i pregled najvažnijih mernih alarma i notifikacija, koji potiču od instalirane opreme, na primer rezultate testa kalibracije HFSWR, aktivne alarme održavanja radara itd. Notifikaciona grupa (6) pokazuje informacije o tajmingu unutar mrežnog centralnog procesa. Birajući razna polja, na primer, jedan red posvećen udaljenim sajtovima, otvara se drugi panel sa alarmima nižeg reda, povezan sa poljem, sa mogućnošću dalje dijagnostike ili kontrole drugih komponenti ili senzora. Na ovaj način je monitoring HFSWR mreže operaterima održavanja olakšan i omogućava jednostavnu i brzu dijagnostiku mogućih problema.



Slika 5.15. Glavni alarmni panel monitoringa

## 6 Zaključak

U ovoj disertaciji izučavane su osobine okruženja za praćenje ciljeva HFSW radarima i na osnovu njih, izveden je predlog procedure praćenja koja uspješno može rešiti probleme izvršavanja u realnom vremenu, minimizirati uticaj najgorih meteoroloških uslova na proces praćenja ciljeva i pri tome, obezbediti znatno višu pouzdanost sistema bez obzira na spoljašnje uslove rada kojima je izložen radar. Takođe je izučavan sistemski dizajn HFSWR mreža i date su osnove koncepta IoT arhitekture mreže, principi i način softverske realizacije monitoringa kako primarnih, tako i sekundarnih senzora u HFSWR mreži, čime se podiže sveukupna pouzdanost cele mreže.

Problem izbora algoritma tj. konstrukcija procedure praćenja, koja bi bila primenjiva u realnim uslovima rada postaje otežan u okvirima okruženja HFSW radara, praćenim visokim nivoom gustine klatera i velikim brojem realnih meta. Takvo okruženje dovodi do pojave velikog broja tragova, koji, bez obzira na poreklo, u sadejstvu sa velikim brojem merenja u svakoj iteraciji, forsiraju ogroman broj događaja asocijacije kod algoritama združene asocijacije, kakav je, na primer, JPDA. Time se otežava izvršenje algoritma u realnom vremenu, bez obzira na dugo vreme skeniranja. Međutim, pokazano je na reprezentativnom uzorku da tragovi i merenja u ovakvom okruženju formiraju dobro izolovane klasterne, primenom metode grupisanja po gustini, gde je iskorišćeno Mahalanobis rastojanje između predikcije traga i merenja, kao kriterijum grupisanja. Pri tome, radi poboljšanja izolacije klastera, gejtng kriterijum je višestruko uvećan, u odnosu na standardne vrednosti, koje se mogu naći u mnogim naučnim radovima. Dobro izolovani klasteri mogu se rešavati združenim metodama, kakav je upravo JPDA, što je i izabrano kao preferentni metod. Klasteri su grupisani po veličini, u zavisnosti od broja elemenata, pri čemu su uspostavljeni kriterijumi koje veličine klastera su prihvatljive sa stanovišta izvršavanja u realnom vremenu, na relativno prostom hardveru, bez upotrebe paralelizacije. Raspodela klastera je takva, da i u slučaju povećanog i uobičajenog gejtng kriterijuma, postoji vrlo mali broj, do 2 % svih klastera u uzorcima po radaru, koji ne bi zadovoljio kriterijume izvršavanja u realnom vremenu, formirane po broju maksimalno mogućih događaja asocijacija. Za takve slučajeve koristi se izuzetno robustan Roekero algoritam. Pokazano je takodje, da se ogromna većina asocijacija potvrđenih tragova obavlja u klasterima optimalnih dimenzija. Na taj način, omogućena je približno optimalna dodela asocijacija traga i merenja u preko 95 % slučajeva i obezbeđeno je izvršavanje u realnom vremenu

na jednostavnom hardveru. Merenje performansi procedure pokazalo je dobra lokalizaciona svojstva, na osnovu poređenja sa AIS podacima, kao jedinom mogućom istinitom referencom na terenu, sa odstupanjima po svakoj merenoj veličini duboko unutar veličine respektivne rezolucione ćelije radara.

Složeni meteorološki uslovi i izuzetno snažni jonosferski povraćaji predstavljaju dodatni izazov za proceduru praćenja kod HFSW radara, izazivajući veliki broj lažnih tragova, čime se obesmišljava proces praćenja ciljeva. Na osnovu dostupnih radova drugih autora, uočeno je prisustvo velikog broja fragmentiranih kratkotrajnih tragova u relativno povoljnim uslovima osmatranja. Takve pojave eskaliraju upravo u otežanim uslovima rada, u slučajevima oluja ili snažnih neželjenih povraćaja, a mogu rezultirati i kreiranjem formacija lažnih tragova karakterističnog oblika putanja, što je posledica specifičnog ponašanja morskog klatera, koji uzrokuje pikove u RD mapama radara, koji su vremenski korelisani i ponašaju se kao tačkasti ciljevi. Takve pikove registruje CFAR algoritam kao lažne detekcije, koje procedura praćenja sa neprilagođenim pravilima menadžmenta tragova koreliše u lažne tragove. Ovim pitanjem se u raspoloživim javnim podacima nije konkretno bavilo, već je akcenat stavljan na same performanse praćenja radara, iz kojih se ne mogu očitati kratkotrajni poremećaji u praćenju ciljeva, ili su proučavane posledice po detektabilnost i praćenje realnih meta u takvim uslovima. Na žalost, neke pojave koje se manifestuju na većim udaljenostima nisu ni mogle biti adekvatno ispraćene zbog ograničenog dometa korišćenih senzora u tim naučnim radovima. Prikupljanjem uzoraka rada u ovim nepovoljnim uslovima, pokazalo se da primenjena pravila menadžmenta traga, kao što su M/N pravila, ma koliko restriktivna, nisu dovoljna da efektivno spreče pojavu lažnih tragova. Zbog toga su primenjene sekvencijalne tehnike za ocenu kvaliteta traga i definisan je parametar kvaliteta traga zasnovan na sumi normalizovane pdf asocijacije traga i merenja. Pokazano je da potvrđeni tragovi pokriveni AIS podacima uzimaju visoke vrednosti maksimuma ovog parametra, a nešto niže pri većim uglovima i rastojanjima od radara, dok se velika većina lažnih tragova nalazi neposredno ispod njih, sa izrazitim nagomilavanjem oko MRA ose radara i najvišim vrednostima parametra pouzdanosti traga. Analizu narušava prisustvo velikog broja nekooperativnih ciljeva, za koje je uvedena razumna pretpostavka da se ponašaju slično kao i ciljevi pokriveni AIS podacima. Na osnovu raspodele vremena života lažnih ciljeva, uočilo se da je u više od 2/3 slučajeva period života kraći od 20 ciklusa skeniranja, kao i da mnogobrojni takvi lažni tragovi pokazuju visok stepen korelacije, a samim tim i visoke vrednosti parametra pouzdanosti traga, a zatim im se ažuriranje merenjima prekida. Uvažavajući navedeno, usvojena je jedinstvena kriterijumska funkcija za svaki trag, kao granična vrednost potvrde tragova, čiji je cilj da obezbedi konfirmaciju pre svega istinitih tragova i minimizira konfirmaciju lažnih tragova, uz mogućnost ispravke odluke u narednim iteracijama, forsirajući redovno kvalitetno ažuriranje tragova. Ovaj uslov konfirmacije se pridodaje

kao potreban već usvojenim pravilima menadžmenta traga. Na osnovu rezultata ove analize izvedena je i metoda koja primenjuje varijante IPDA algoritama sa varijabilnim Markovljevim lancima, čiji je dizajn parametara prilagođen rezultatima istraživanja, posvećenim eliminaciji lažnih tragova, kroz upotrebu verovatnoće egzistencije traga na način koji odgovara rezultatima istraživanja, a razmotrena je i upotreba MTT varijanti sa linearnom kompleksnošću, koja može pružiti velika poboljšanja u smislu brzine izvršavanja procedure praćenja ciljeva. Na osnovu utvrđenih kriterijuma izabrana je IPDA VMC varijanta IPDA algoritma, pri čemu je dizajn graničnih vrednosti verovatnoće egzistencije traga i njegove terminacije prilagođen dobijenim rezultatima u vezi konfirmacije lažnih tragova i potrebom za ublažavanjem problema fragmentacije tragova. Potrebno je napomenuti i da je metod proveravan samo u simulaciji i nije potvrđen u praktičnom radu sistema, ali predstavlja osnovu za buduća unapređenja procedure praćenja.

Analiza performansi praćenja je vršena uz primenu pomenute metode za ublažavanje pojave lažnih tragova u najgorim vremenskim uslovima, gde su poredjena poboljšanja generalnih i kratkoročnih performansi praćenja kod oba senzora u mreži. Za potrebe ocene kratkoročnih performansi definisani su novi parametri koji pokazuju stepen prisustva lažnih tragova u kraćim vremenskim intervalima, koji direktno pogađaju operatera pomorskog izviđanja. Pokazan je veliki napredak u kratkoročnim performansama radara, kroz veliko smanjenje IFAR parametra, a dnevni prikazi ispisa potvrđuju visok kvalitativni skok procesa praćenja. Za ocenu generalnih performansi radara poređeni su totalni ToT i FAR parametri, kao i krive FAR parametara u zavisnosti od rastojanja i ugla u odnosu na MRA osu radara. Primena metode uticala je na smanjenje ToT parametra radara, što je i očekivano, s obzirom na način njene konstrukcije, ali je taj gubitak do 2% ukupnog ToT parametra prihvatljiv, s obzirom na veliki pad FAR parametra radara, od 2 do 8 puta u odnosu na početnu vrednost i činjenicu da se obrađuju slučajevi najgorih uslova pomorskog osmatranja. Na ovaj način, postignuta je velika pouzdanost praćenja ciljeva HFSW radarima u svim meteorološkim uslovima i drastično podignuta njegova upotrebna vrednost.

Na kraju, izložen je koncept sistema za integrisano osmatranje mora primenom HFSWR mreža i specifičnosti koje se odnose na njenu implementaciju. Realizacija ovog sistema podrazumevala je funkcionalnu sintezu algoritama za praćenje ciljeva, fuziju HFSW radarskih podataka i algoritama integracije fuzionisane slike HFSWR i AIS senzora, koja kao rezultat daje jedinstvenu operacionu sliku ukupne oblasti pokrivenosti sensorima. Primenjena je zvezdasta topologija mreže, kao optimalno rešenje za primenu u praksi sa stanovišta softverske implementacije i procesa monitoringa i integracije podataka različitih senzora, čime se omogućuje agregacioni monitoring svih procesa iz jednog centralnog čvora, tipično smeštenog u C2 centru sistema. Ovakva realizacija omogućava jednostavniju kontrolu i dostupnost mernih podataka u uslovima kakvi tipično vladaju na lokacijama instalacija senzora, kao što su loši komunikacioni i infrastrukturni uslovi. U mreži je

primenjena i kontrola i monitoring preko SNMP protokola i uz izgrađenu SOA infrastrukturu, omogućen je daljinski monitoring svih aspekata HFSWR mreže od strane proizvoljnog broja korisnika u privatnom okruženju, putem interneta. Pokazan je test mreže SNMP protokolom i prikazane su funkcionalnosti prikaza grafičkih aplikacija iz aplikativnog sloja arhitekture sistema. Realizacija ovakvih sistema je veoma slabo pokrivena naučnim radovima. Postoji tek nekoliko sistema u svetu koji imaju publikovane izvesne detalje svojih implementacija. U disertaciji su pokriveni pojedini primeri i oni su uglavnom na visoko konceptualnom nivou. Utoliko je veći značaj obrade jedne ovakve teme, zbog povećanog interesa za realizaciju ovih sistema u svetu poslednjih godina.

Glavni rezultati ove disertacije, kao njen originalni naučni doprinos mogu se iskazati u sledećem:

1. Vršena su istraživanja osobina okruženja za praćenje pomorskih ciljeva, u kojima je pokazano da raspodele asocijacija merenja i predikcija tragova formiraju dobro izolovane klasterne velikom većinom malih dimenzija, po kriterijumu grupisanja Mahalanobis rastojanja merenja i predikcije traga. Takvi klasteri se mogu procesirati algoritmima praćenja ciljeva visoke kompleksnosti, dok je u malom broju slučajeva potrebno koristiti suboptimalne metode, da bi se očuvala mogućnost izvršenja algoritma praćenja u realnom vremenu. Istraživano je i poreklo i osobine lažnih tragova, tipičnih za proces praćenja HFSW radarima, pogotovo u nepovoljnim meteorološkim uslovima, na osnovu kojih je pokazano da formirani lažni tragovi poseduju, pored, u najvećoj meri, kratkog vremena trajanja, i niže usvojene pokazatelje kvaliteta traga od potvrđenih istinitih tragova, u zavisnosti od rastojanja i ugla prema HFSW radaru, sa kritičnim vrednostima koncentrisanim u okolini glavne ose zračenja radara.
2. Formulirana je suboptimalna heuristička metoda za rešavanje problema praćenja u realnom vremenu u OTHR okruženju, zasnovana na istraživanjima osobina okruženja za praćenje pomorskih ciljeva, koristeći metode klasterizacije podataka.
3. Formuliran je predlog metode za ublažavanje pojava lažnih tragova uzrokovanih štetnim refleksijama od morske površine i jonosferskih slojeva u zabeleženim slučajevima velikih agitacija morske površine i jonosferskih povraćaja, baziran na istraživanjima osobina lažnih tragova. Koncipiran je i metod baziran na varijantama IPDA algoritma, kojim je ustanovljena verovatnoća egzistencije traga, kao jedini pravi faktor za ocenu kvaliteta traga, čiji dizajn graničnih vrednosti konfirmacije i eliminacije traga prati rezultate istraživanja, u smislu prilagođenja uslovima praćenja ciljeva u okruženju izahorizontskih radara.
4. Izvršene su analiza poboljšanja generalnih i kratkoročnih performansi praćenja izahorizontskih radara u najgorim meteorološkim uslovima i analiza preciznosti, tj. lokalizacionih svojstava procedure praćenja istinitih tragova u odnosu na referentne AIS

podatke. Analiza lokalizacionih svojstava procedure praćenja je pokazala dobru preciznost procedure praćenja, sa odstupanjima po svakoj merenoj veličini duboko unutar rezolucione ćelije radara. Analiza performansi pokazala je drastično poboljšanje kratkoročnih performansi radara u najgorim meteorološkim uslovima pri primeni metode ublažavanja pojave lažnih tragova, dok su generalne performanse, merene preko ToT i FAR parametara, pokazale prihvatljiv mali pad ToT parametra, naspram višestrukog smanjenja FAR, i do 8 puta.

5. Izložen je koncept sistema za integrisano osmatranje mora primenom HFSWR mreža i specifičnosti koje se odnose na njenu implementaciju. Predložen je koncept i realizacija rešenja koje obezbeđuje sveukupnu kontrolu i monitoring ne samo pojedinačnih procesa za obradu podataka, već i sekundarnih senzora i kontrolabilnih hardverskih elemenata. Izložena topologija sistema omogućava agregacioni monitoring svih procesa i senzora preko jednog, zajedničkog čvorišta, čime se olakšava softverska implementacija, podela odgovornosti ljudskog faktora, kao i sam proces monitoringa, a opet omogućava centralizovani pristup svim informacijama. Omogućena je i divezifikacija načina pristupa sistemu, kome se, pored servisnog, može, potpuno ravnopravno, pristupiti i izabranim SNMP protokolom, čime se olakšava integracija monitoringa HFSWR mreže sa eksternim sistemima monitoringa i kontrole. Softverska realizacija obezbeđuje implementaciju IoT koncepta u HFSWR mreži, čime se omogućuje daljinski monitoring svih aspekata HFSWR mreže od strane proizvoljnog broja korisnika u privatnom okruženju, putem interneta. Dodatno, ona predstavlja i originalan i samostalno ostvaren inženjerski doprinos autora, koji, sa prethodno navedenim naučnim rezultatima, predstavlja jedinstvenu i zaokruženu celinu, čime se stavlja akcenat na praktični značaj i upotrebnu vrednost. Primer praktične primene svih rezultata disertacije upravo je sistem za nadzor pomorskog saobraćaja u Gvinejskom zalivu, opisan u disertaciji.

Relevantni naučni radovi u neposrednoj ili posrednoj vezi sa temom disertacije, objavljeni u međunarodnim i domaćim naučnim časopisima i saopšteni na međunarodnim konferencijama su sledeći:

1. **N. Stojkovic**, D. Nikolic, S. Puzović, "Density Based Clustering Data Association Procedure for Real-Time HFSWRs Tracking at OTH Distances" in *IEEE Access*, vol. 8, pp. 39907-39919, 2020.
2. D. Nikolic, **N. Stojkovic**, Z. Popovic, N. Tosic, N. Lekic, Z. Stankovic, N. Doncov, "Maritime over the horizon sensor integration: HFSWR data fusion algorithm", *Remote Sensing*, vol. 11, no. 7, p. 852, Apr. 2019.
3. D. Nikolic, **N. Stojkovic**, and N. Lekic, "Maritime over the horizon sensor integration: High frequency Surface-Wave-Radar and automatic identification system data integration algorithm", *Sensors*, vol. 18, no. 4, p. 1147, Apr. 2018.

4. M.A.R. Mohamed Mostafa, M. Vucetic, **N. Stojkovic**, N. Lekić, A. Makarov, "Fuzzy Functional Dependencies as a Method of Choice for Fusion of AIS and OTHR Data". *Sensors* 2019, 19, 5166
5. D. Nikolic, **N. Stojkovic**, P. Petrovic, N. Tosic, N. Lekic, Z. Stankovic, "The high frequency surface waveradar solution for vessel tracking beyond the horizon", *Facta Univ. Electron. Energetics*, 2020,33, 37–59.
6. **N. Stojkovic**, D. Nikolic, P. Petrovic, N. Tosic, 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, 2019.
7. **N. Stojković**, D. Nikolić, V. Orlić, B. Džolić and N. Lekić, "Implementation of the Monitoring System for HFSWR-based Maritime Surveillance Networks", *Proc. of IcETRAN*, Sept. 2020, pp 163-168
8. **N. Stojkovic**, D. Nikolic, B. Dzolic, N. Tosic, V. Orlic, N. Lekic, and B. M. Todorovic, "An implementation of tracking algorithm for over-the-horizon surfacewave radar" in *Proc. 24th Telecommun. Forum (TELFOR)*, Belgrade, Serbia, Nov. 2016, pp. 1-4.
9. **N. Stojkovic**, V. Orlic, M. Peric, D. Drajić, A. Rakic "Concept of System for Surveillance and Monitoring of IoT HFSWR Network", *Proc. of IcETRAN*, Sept. 2020, pp 157-162
10. D. Nikolic, **N. Stojkovic**, N. Lekic, V. Orlic, B. Todorovic, "Integration of AIS data and HF—OTHR tracks in unfavorable environment at OTH Distances", In *Proceedings of the IcETRAN 2016*, Zlatibor, Serbia, 13–16 June 2016
11. D. Nikolic, Z. Popovic, M. Borenovic, **N. Stojkovic**, V. Orlic, A. Dzvonskaya, B. Todorovic, "Multi-Radar Multi-Target Tracking Algorithm for Maritime Surveillance at OTH Distances", In *Proceedings of the 2016 17th International Radar Symposium (IRS)*, Krakow, Poland, 11–15 May 2016, pp 153-159
12. P. Petrović, N. Grbić, **N. Stojković**, D. Nikolić, N. Lekić, "Implementation of algorithm for excision of point targets from distributed radar detections", In *Proc. of 6th IcETRAN 2019*, Srebrno Jezero, Serbia, 3 - 6 June 2019, pp. 1000–1004
13. N. Grbić, P. Petrović, D. Nikolić, **N. Stojković**, V. Orlić, "Analysis of different window function effects on DBF in HFSWR signal processing", In *Proc. of 6th IcETRAN 2019*, Srebrno Jezero, Serbia, 3 - 6 June 2019, pp 1005-1009

Praktične primene rezultata u vreme pisanja disertacije obuhvataju direktnu primenu opisanih metoda na instaliranoj HFSWR mreži u Nigeriji, koja predstavlja prvu instalaciju takve vrste na međunarodnoj sceni, u čijoj realizaciji je učestvovao tim istraživača i inženjera Instituta Vlatkom iz Beograda, čiji je deo tima bio i autor disertacije. Metode za praćenje ciljeva pokazale su dobre rezultate u praksi, kroz višegodišnji rad sistema, čime je obavljena i njihova verifikacija. Softverska

realizacija koncepta pomorskog izviđanja omogućila je uspešnu eksploataciju rezultata mreže, trenažni proces korisnika i olakšanje procesa održavanja sistema. Pored toga, omogućena je i jednostavna nadgradnja mreže, koja je trenutno u toku i u postojećoj HFSWR mreži u Nigeriji. Važno je takođe istaći da je HFSWR mreža instalirana u Nigeriji jedino rešenje sa javno verifikovanim rezultatima od opšteg bezbednosnog interesa u svetu. Svi pomenuti doprinosi danas predstavljaju deo znatno složenijeg rešenja sistema integrisanog nadzora mora, kao proizvoda Instituta Vlatakom, koji je kompetitivan po performansama i ceni u odnosu na rešenja drugih, inostranih kompanija.

Pravci budućih istraživanja se odnose na proširenje IoT koncepta HFSWR mreža, kroz uvođenje drugih senzora koji se mogu koristiti u okviru IMS baziranog na HFSWR mrežama. Tu je pre svega potrebno uvesti i integrisati radio-relejne linkove za direktnu komunikaciju između operatera i plovila, druge vrste identifikacionih sistema plovila, podršku za VOIP komunikaciju itd. Posebno interesantna tema je istraživanje vezano za optimalnu agentnu komunikaciju između udaljenih čvorova mreže u uslovima otežane komunikacije kroz link malog kapaciteta, što je čest slučaj kod instalacija HFSWR mreža.

Ubrzanje procedure praćenja, uvođenjem paralelizacije i prevođenje u C++, omogućiće znatno veći broj izvršenja optimalnih asocijacija i manju primenu aproksimacionih metoda, čime će se povećati optimalnost predložene metode. Potrebno je detaljnije ispitati mogućnost primene drugih algoritama asocijacije, kao i potpunu implementaciju i primenu integrativnog pristupa problemu praćenja, a s tim u vezi, mogućnost primene algoritama sa linearnom kompleksnošću. Na kraju, pretpostavke vezane za statističke osobine šuma u sistemu, za koje je pretpostavljeno da se konformiraju Gausovoj raspodeli, je potrebno preispitati i podvrgnuti drugačijem modelu, što bi uslovalo i primenu drugačijeg modela filtriranja, a sa tim i drugim kriterijumima ocene pouzdanosti traga, čime bi se otvorila mogućnost bolje i brže karakterizacije lažnih tragova, a time i poboljšanje parametara ocene performansi sistema u procesu praćenja ciljeva.



## 7 Literatura

- [1] G. Fabrizio, "High Frequency Over-the-Horizon Radar: Fundamental Principles", Signal Processing, and Practical Applications. New York, NY, USA: McGraw-Hill, 2013.
- [2] H. You, X. Jianjuan, G. Xin, "Radar Data Processing with Applications", Publishing House of Electronics Industry, 2016
- [3] H. Rohling, "Radar CFAR Thresholding in Clutter and Multiple Target Situations," in IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, vol. AES-19, no. 4, pp. 608-621, July 1983
- [4] 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 2017, 17,1588.
- [5] P. Braca, M. Vespe, S. Maresca и J. Horstmann, „A novel approach to high frequency radar ship tracking exploiting aspect diversity,“ In Proceedings of the IEEE Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS), Munich, Germany,2012.
- [6] D. Nikolic, N. Stojkovic, Z. Popovic, N. Tosic, N. Lekic, Z. Stankovic, and N. Doncov, "Maritime over the horizon sensor integration: HFSWR data fusion algorithm", Remote Sensing, vol. 11, no. 7, p. 852, Apr. 2019.
- [7] IMO Resolution MSC.74 Annex 3 Recommendation on Performance Standards AIS, IMO, London, U.K., 1998.
- [8] D. Nikolic, N. Stojkovic, and N. Lekic, "Maritime over the horizon sensor integration: High frequency Surface-Wave-Radar and automatic identification system data integration algorithm", Sensors, vol. 18, no. 4, p. 1147, Apr. 2018.
- [9] M.A.R. Mohamed Mostafa, M. Vucetic, N. Stojkovic, N. Lekić, A. Makarov, "Fuzzy Functional Dependencies as a Method of Choice for Fusion of AIS and OTHR Data". Sensors 2019, 19, 5166
- [10] A. N. Ince, E. Topuz, E. Panayirci, C. Isik, "Principles of Integrated Maritime Surveillance Systems", Springer Science, 1998
- [11] L. Sevgi, A. Ponsford, and H. C. Chan, "An integrated maritime surveillance system based on high-frequency surface-wave radars. 1. Theoretical background and numerical simulations", IEEE Antennas Propag. Mag., vol. 43, no. 4, pp. 28-43, Aug. 2001.
- [12] A. Ponsford, L. Sevgi, and H. C. Chan, "An integrated maritime surveillance system based on high-frequency surface-wave radars. 2. Operational status and system performance", IEEE Antennas Propag. Mag., vol. 43, no. 5, pp. 52-63, Oct. 2001.
- [13] A. Dzvonkovskaya, K.-W. Gurgel, H. Rohling, and T. Schlick, "Low power high frequency surface wave radar application for ship detection and tracking," in Proc. of the IEEE Radar Conference, Vilnius, Lithuania, 2010.
- [14] P. Braca, R. Grasso, M. Vespe, S. Maresca, and J. Horstmann, "Application of the JPDA-UKF to HFSW radars for maritime situational awareness", in Proc. 15th Int. Conf. Inf. Fusion (FUSION), pp. 2585-2592, Jan. 2012.

- [15] S. Blackman, and R. Popoli, "Design and Analysis of Modern Tracking Systems". Norwood, MA, USA, Artech House, 1999.
- [16] S. J. Julier, J. K. Uhlmann, "A New Extension of the Kalman Filter to Nonlinear Systems", In The Proceedings of the American Control Conference, Seattle, Washington, pp 1628-1632, 1995
- [17] F. Gustafsson et al., "Particle filters for positioning, navigation, and tracking," in IEEE Transactions on Signal Processing, vol. 50, no. 2, pp. 425-437, Feb. 2002.
- [18] Y. Bar-Shalom, and T. E. Fortmann, Tracking and Data Association. Orlando, FL, USA: Academic, 1988.
- [19] P. Braca, S. Maresca, R. Grasso, K. Bryan and J. Horstmann, "Maritime surveillance with multiple over-the-horizon HFSW radars: An overview of recent experimentation," in IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine, vol. 30, no. 12, pp. 4-18, December 2015
- [20] D. Musicki, R. Evans, S. Stankovic, "Integrated probabilistic data association (IPDA)." IEEE Trans. Automatic Control, 39(6):1237–1241, Jun 1994.
- [21] X. Xie, R.J. Evans, "Multiple target Tracking and Multiple Frequency Line Tracking Using Hidden Markov Models", IEEE Transactions on Signal Processing, Vol. SP-39, N. 12, pp. 2659-2676, 1991.
- [22] X. Wang, D. Musicki, "Evaluation of IPDA type filters with a low elevation sea-surface target tracking," Sixth International Conference of Information Fusion, 2003. Proceedings of the Cairns, QLD, Australia, 2003, pp. 1156-1163
- [23] M. Skolnik, "Radar handbook", 3. izdanje, Mc Grow Hill, 2008.
- [24] A. Dzvonkovskaya, D. Nikolic, V. Orlic, M. Peric, and N. Tomic, "Remote observation of a small meteotsunami in the bight of Benin using HF radar operating in lower HF band", IEEE Access, vol. 7, pp. 88601-88608, Jul. 2019.
- [25] S. Maresca, P. Braca, J. Horstmann, R. Grasso, "A network of HF surface wave radars for maritime surveillance: preliminary results in the German Bight", In Proceedings of IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP), May 2014.
- [26] S. Maresca, P. Braca, J. Horstmann, R. Grasso, "Maritime Surveillance Using Multiple High-Frequency Surface-Wave Radars," in IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, vol. 52, no. 8, pp. 5056-5071, Aug. 2014
- [27] H. Leong, A. Ponsford, "The effects of sea clutter on the performance of HF surface wave radar in ship detection," in Radar Conference, 2008. RADAR '08. IEEE, May 2008, pp. 1–6.
- [28] S. Maresca, P. Braca, R. Grasso, J. Horstmann, "The impact of sea state on HF surface-wave radar ship detection and tracking performances," OCEANS 2015 - Genova, Genoa, 2015, pp. 1-5
- [29] "What is middleware", <https://web.archive.org/web/20050507151935/http://middleware.objectweb.org/> , dostupno na internetu 1.2.2021.
- [30] S. Greengard, "The Internet of Things", The MIT Press Essential Knowledge, 2015
- [31] T. Erl, "Service-Oriented Architecture: Concepts, Technology, and Design", The Pearson Service Technology Series, 1st Edition, 2016
- [32] Z. Ding, G. Kannappan, K. Benameur, T. Kirubarajan, M. Farooq, "Wide area integrated maritime surveillance: An updated architecture with data fusion". In Proceedings of the 6th International Conference of Information Fusion–FUSION 2003, Cairns, Australia, 8–11 July 2003; pp. 1324–1333.
- [33] G. Cimino, G. Arcieri, S. Horn, K. Bryan, Technical Report CMRE-FR-2014-017, "Sensor Data Management to Achieve Information Superiority in Maritime Situational Awareness". NATO

Science and Technology Organization Centre for Maritime Research and Experimentation: La Spezia, Italy, 2014

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

[35] Institut Vlatacom d.o.o., <https://www.vlatacominstitute.com/> Dostupno na internetu 01.02.2021.

[36] D. Nikolic, N. Stojkovic, P. Petrovic, N. Tosic, N. Lekic, Z. Stankovic, "The high frequency surface waveradar solution for vessel tracking beyond the horizon". Facta Univ. Electron. Energetics, 2020, 33, 37–59.

[37] H. Van Trees, "Optimum Array Processing: Part IV of Detection, Estimation, and Modulation Theory", Wiley-Interscience; 1st edition, 2002

[38] B. Dzolic, M. Veinovic, D. Nikolic, N. Grbic, N. Lekic and V. Orlic, "Tailoring HFSWR Transmitting Antenna Array for Environment of the Equatorial Area: Gulf of Guinea Experiences," in IEEE Sensors Journal, vol. 21, no. 5, pp. 6973-6981, 2021

[39] D. Nikolić, "Nadgledanje ciljeva iza linije horizonta integracijom podataka sa OTH radara i drugih mornaričkih senzora", doktorska disertacija, Elektronski fakultet, Niš, 2020.

[40] N. Stojkovic, D. Nikolic, P. Petrovic, N. Tosic, 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, 2019.

[41] A. Gupta, "Theory and Measurement Validation of Novel HF SWR Receiver Architecture: Antenna Design, Clutter Suppression and Detection", doctoral dissertation, Helmut Schmidt University, Hamburg, Germany, 2015.

[42] M. Erić, N. Vukmirović, "Uvod u antensku obradu signala sa antenskih nizova", Akademski misao, 2019

[43] P. Last, C. Bahlke, M. Hering-Bertram, L. Linsen, "Comprehensive Analysis of Automatic Identification System (AIS) Data in Regard to Vessel Movement Prediction", The Journal of Navigation, 2014, 67, pp. 791–809

[44] NMEA 0183 standard overview, web stranica: [https://www.nmea.org/content/STANDARDS/NMEA\\_0183\\_Standard](https://www.nmea.org/content/STANDARDS/NMEA_0183_Standard), dostupna na Web-u: 10.05.2020

[45] OrbCom Satellite AIS, <https://www.orbcomm.com/en/networks/satellite-ais>, dostupno na internetu 1.1.2021. godine

[46] N. Stojković, D. Nikolić, V. Orlić, B. Džolić and N. Lekić, "Implementation of the Monitoring System for HFSWR-based Maritime Surveillance Networks", Proc. of IcETRAN, Sept. 2020, pp 163-168

[47] ITU 1374, <https://www.itu.int/rec/R-REC-M.1371/en>, dostupno na internetu 11.02.2021.

[48] M. Kelley, "The Earth's Ionosphere", Volume 96, 2nd Edition, Academic Press, 2009

[49] N. Tosic, A. Samcovic, D. Nikolic, D. Drajić, and N. Lekic, "An algorithm for detection of electromagnetic interference in high frequency radar range-Doppler images caused by LEDs", IEEE Access, vol. 7, pp. 84413-84419, Jun. 2019.

[50] K.-W. Gurgel, Y. Barbin, and T. Schlick, "Radio frequency interference suppression techniques in FMCW modulated HF radars", in Proc. OCEANS Eur., Jun. 2007, pp. 1-4.

[51] D. Crombie, "Doppler spectrum of sea echo at 13.56 Mc/s", Nature, Vol. 175, pp. 681-683, 1955

- [52] W.J. Pierson, L. Moskowitz, "A proposed spectral form for fully developed seas based on similarity theory of S.A. Kitaigorodskii", *J. Geophys. Res.*, Vol. 69, pp 5181-5190, 1964
- [53] O.M. Phillips, "Spectral and statistical properties of the equilibrium range in wind-generated gravity waves", *J. Fluid Mech.*, vol 156, pp 505-531, 1985
- [54] B. Kinsman, "Wind waves", Englewood cliffs, NJ, Prentice Hall, 1965
- [55] S.O. Rice, "Reflection of electromagnetic waves from slightly rough surfaces", *Commun. Pure Appl. Math.*, vol 4, 361-378, 1951
- [56] 4.P.Beckman, A. Spizzino, "The scattering of electromagnetic waves from rough surfaces", New York, Macmillan Company, 1963
- [57] D.E. Barrick, J.M. Headrick, R. W. Bogle, D.D. Crombie,"Sea backscatter at HF: interpretation and utilization of the echo", *Proc. IEEE*, vol 62, pp 673-680, 1974.
- [58] D.E. Barrick, "First order theory and analyses of MF/HF/VHF scatter from the sea", *IEEE Trans. Vol AP-20*, pp 2-10, 1972
- [59] A. Ponsford, J. Wang, "A review of High Frequency Surface Wave Radar for detection and tracking of ships", *Turkish Journal of Electrical Engineering and Computer Sciences*, May 2010
- [60] A. M. Ponsford, "Surveillance of the 200 nautical mile exclusive economic zone (EEZ) using high frequency surface wave radar (HFSWR)" , *Canadian Journal of Remote Sensing*, Vol. 27, No. 4, Aug. 2001, Special Issue on Ship Detection in Coastal Waters, pp. 354-360.
- [61] R. W. Bogle, D. B. Trizna, "Small boat HF radar cross sections", *NRL Memorandum Report 3322*, July 1976.
- [62] L. Sevgi, "Target Reflectivity and RCS Interaction in Integrated Maritime Surveillance Systems Based on Surface Wave HF Radar Radars," *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, V.43, N.1, pp. 36-51, Feb. 2001
- [63] P. Swerling, „Probability of detection for fluctuating targets“, *IRE Transactions on information theory*, pp. 269-308, 1960.
- [64] L. Sevgi, "EM Modeling and Simulation Strategies in HFSWR-Based IMS System Design," *EUROCON 2007 - The International Conference on "Computer as a Tool"*, Warsaw, 2007, pp. 50-55
- [65] N. Lekic. e. al., „Impact of Radar Cross Section on HF Radar Surveillance Area: Simulation Approach“, *IEEE Radar Conference*, Johannesburg, 2015
- [66] J. F. Vesecky, K. Laws and J. D. Paduan, "Monitoring of Coastal Vessels Using Surface Wave HF Radars: Multiple Frequency, Multiple Site and Multiple Antenna Considerations," *IGARSS 2008 - 2008 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*, Boston, MA, USA, 2008, pp. I-405-I-408,
- [67] G. Fabrizio, "Space-time characterization and adaptive processing of ionospherically propagated HF signals," *Ph.D. dissertation*, The University of Adelaide, 2000.
- [68] M. Ravan, R. S. Adve, "Ionospheric clutter model for high frequency surface wave radar," *2012 IEEE Radar Conference*, Atlanta, GA, USA, 2012, pp. 0377-0382
- [69] WGS-84, <https://earth-info.nga.mil/GandG/update/index.php?dir=wgs84&action=wgs84>.  
dostupno na internetu 10.02.2021
- [70] K.-W Gurgel, G Antonischki, H.-H Essen, T Schlick, *Wellen Radar (WERA): a new ground-wave HF radar for ocean remote sensing*, *Coastal Engineering*, Volume 37, Issues 3–4, 1999, pp 219-234

- [71] S. Maresca, M. Greco, F. Gini, R. Grasso, S. Coraluppi and J. Horstmann, "Vessel detection and classification: An integrated maritime surveillance system in the Tyrrhenian sea", 2010 2nd International Workshop on Cognitive Information Processing, Elba, 2010, pp. 40-45
- [72] COSYNA network, information page [https://www.climate-service.eu/institutes\\_platforms/cosyna/research\\_topics/index.php.en](https://www.climate-service.eu/institutes_platforms/cosyna/research_topics/index.php.en), dostupno na internetu 1.1.2021. godine
- [73] G. Vivone, P. Braca, J. Horstmann, „Knowledge-Based Multitarget Ship Tracking for HF Surface Wave Radar Systems“, IEEE Trans. Geosci. Remote Sens, т. 53, бр. 7, pp. 3931-3941, 2015
- [74] J. Sharp, “Windows Communication Foundation 4 Step by Step”, Microsoft Press, 1st edition, 2010
- [75] N. Stojkovic, D. Nikolic, S. Puzović, "Density Based Clustering Data Association Procedure for Real-Time HFSWRs Tracking at OTH Distances" in IEEE Access, vol. 8, pp. 39907-39919, 2020.
- [76] D. Musicki and R. Evans, “Joint integrated probabilistic data association: JIPDA,” in Proc. FUSION Conf., Annapolis, MD, USA, vol. 2, Jul. 2002, pp. 1120-1125.
- [77] D. Musicki and B. La Scala, “Multi-target tracking in clutter without measurement assignment,” IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst., vol. 44, no. 3, pp. 877-896, Jul. 2008.
- [78] D. Musicki and R. J. Evans, “Multiscan multitarget tracking in clutter with integrated track splitting filter,” IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst., vol. 45, no. 4, pp. 1432-1447, Oct. 2009.
- [79] S. H. Rezatofighi, A. Milan, Z. Zhang, Q. Shi, A. Dick, and I. Reid, “Joint probabilistic data association revisited,” in Proc. IEEE Int. Conf. Comput. Vis. (ICCV), Dec. 2015, pp. 3047-3055.
- [80] B. Zhou and N. K. Bose, “Multitarget tracking in clutter: Fast algorithms for data association” IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst., vol. 29, no. 2, pp. 352-363, Apr. 1993
- [81] J. A. Roecker and G. L. Phillis, “Suboptimal joint probabilistic data association” IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst., vol. 29, no. 2, pp. 510-517, Apr. 1993.
- [82] E. Aoki and K. Kienitz, “Suboptimal JPDA for tracking in the presence of clutter and missed detections” in Proc. 12th IEEE Int. Conf. Inf. Fusion, Seattle, WA, USA, Jul. 2009, pp. 818-825.
- [83] Charu C. Aggarwal and Chandan K. Reddy, “Data Clustering: Algorithms and Applications”, Boca Raton, FL, USA, Chapman & Hall, 2014
- [84] M. Ester, H.-P. Kriegel, J. Sander, and X. Xu, “A density based algorithm for discovering clusters in large spatial databases with noise” in Proc. AAAI, 1996, pp. 226-231.
- [85] T. Hanselmann, D. Musicki, and M. Palaniswami, “Adaptive target tracking in slowly changing clutter” in Proc. 9th Int. Conf. Inf. Fusion, Florence, Italy, Jul. 2006, pp. 1-8.
- [86] N. Stojkovic, D. Nikolic, B. Dzolic, N. Tosic, V. Orlic, N. Lekic, and B. M. Todorovic, “An implementation of tracking algorithm for over-the-horizon surface wave radar” in Proc. 24th Telecommun. Forum (TELFOR), Belgrade, Serbia, Nov. 2016, pp. 1-4.
- [87] Y. Bar Shalom and X. R. Li, “Multitarget-Multisensor Tracking: Principles and Techiques”. Bradford, U.K.: YBS Publishing, 1995.
- [88] S. Zolo and B. Ristic. “On the Choice of the Coordinate System and Tracking Filter for the Track-While-Scan Mode of an Airborne Pulse Doppler Radar”. DSTO Research Laboratory, Salisbury, SA, Australia. <https://www.dtic.mil/cgi-bin/GetTRDoc?AD=ADA375838>, Dostupno na internetu 20.02.2021
- [89] J. Hartikainen, A. Solin, S. Sarkka, “Optimal filtering with KalmanFilters and Smoothers”, Aalto University School of Science, Espo, Finland (2011).

[https://www.researchgate.net/publication/228683456\\_Optimal\\_filtering\\_with\\_Kalman\\_filters\\_and\\_smoother-a\\_Manual\\_for\\_Matlab\\_toolbox\\_EKFUKF](https://www.researchgate.net/publication/228683456_Optimal_filtering_with_Kalman_filters_and_smoother-a_Manual_for_Matlab_toolbox_EKFUKF), dostupno na internetu 20.02.2021

- [90] J. K. Uhlmann, "Introduction to the algorithmics of data association in multiple-target tracking" in Handbook of Multisensor Data Fusion. Boca Raton, FL, USA: CRC Press, 2017, pp. 89-108.
- [91] T. Fortmann, Y. Bar-Shalom, and M. Scheffe, "Sonar tracking of multiple targets using joint probabilistic data association", IEEE J. Ocean. Eng., vol. 8, no. 3, pp. 173-184, Jul. 1983.
- [92] J. Williams and R. Lau, "Approximate evaluation of marginal association probabilities with belief propagation", IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst., vol. 50, no. 4, pp. 2942-2959, Oct. 2014.
- [93] R. Helmick, "IMM estimator with nearest-neighbor joint probabilistic data association" Multitarget-Multisensor Tracking: Applications and Advances vol. 3, Y. Bar-Shalom, and W. D. Blair, Eds. Norwood, MA, USA: Artech House, 2000, ch. 3.
- [94] B. J. Van Wyk, M. A. Van Wyk, and G. Noel, "A projection-based joint probabilistic data association algorithm" in Proc. IEEE AFRICON, Gaborone, Botswana, Sep. 2004, pp. 13-17.
- [95] X. R. Li, Ning Li, V. P. Jilkov, "SPRT-Based track confirmation and rejection," Proceedings of the Fifth International Conference on Information Fusion. FUSION 2002. (IEEE Cat.No.02EX5997), Annapolis, MD, USA, 2002, pp. 951-958 vol.2
- [96] EUMETSAT data store, <https://data.eumetsat.int/>
- [97] X. Wang, D. Musicki, "Low elevation sea-surface target tracking using IPDA type filters," in IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, vol. 43, no. 2, pp. 759-774, April 2007.
- [98] Ning Li, X. R. Li, "Target perceivability and its applications," in IEEE Transactions on Signal Processing, vol. 49, no. 11, pp. 2588-2604, Nov. 2001.
- [99] Ning Li, X. R. Li, "Tracker design based on target perceivability," in IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, vol. 37, no. 1, pp. 214-225, Jan 2001
- [100] N. Stojkovic, V. Orlic, M. Peric, D. Drajić, A. Rakic "Concept of System for Surveillance and Monitoring of IoT HFSWR Network", Proc. of IcETRAN, Sept. 2020, pp 157-162
- [101] C. Buckl, S. Sommer, A. Scholz, A. Knoll, A. Kemper, J. Heuer, A. Schmitt, 2009. "Services to the field: an approach for resource constrained sensor/actor networks". In: Proceedings of WAINA, Bradford, United Kingdom.
- [102] S. Enji, X. Zhanga, Z. Lib, 2012. "The internet of things (IOT) and cloud computing (CC) based tailings dam monitoring and prealarm system in mines". Saf. Sci. 50 (4), 811–815.
- [103] A. Drenoyanis, R. Raad, I. Wady, C. Krogh, "Implementation of an IoT Based Radar Sensor Network for Wastewater Management". Sensors 2019, 19, 254.
- [104] SNMP protocol specification RFC1157, <https://tools.ietf.org/html/rfc1157>, dostupno na internetu 20.02.2021
- [105] H. Nwana, "Software agents: An overview," Knowl. Eng. Rev. J., vol. 11, no. 3, 1996.
- [106] A. Ouaddah, H. Mousannif, A. Abou Elkalim and A. Ait Ouahman, "Access control in IoT: Survey & state of the art," 2016 5th International Conference on Multimedia Computing and Systems (ICMCS), Marrakech, 2016, pp. 272-277
- [107] A. Gameiro, D. Castanheira, J. Sanson et al. "Research Challenges, Trends and Applications for Future Joint Radar Communications Systems", Wireless Pers Commun 100, 81–96 (2018).
- [108] M. Erwin, C. Scott, P. Wolfe, "Virtual Private Networks: Turning the Internet Into Your Private Network", O'Reilly Media, Second edition (1998)

- [109] R.Petrovic, D. Simic, D. Drajić, Z. Cica, D. Nikolic, M. Peric, “Designing Laboratory for IoT Communication Infrastructure Environment for Remote Maritime Surveillance in Equatorial Areas Based on the Gulf of Guinea Field Experiences”. *Sensors*. 2020; 20(5):1349.
- [110] Centerity Monitor information page, <https://www.centerity.com>, dostupno na internetu 17.04.2020
- [111] P. Spiess, S. Karnouskos, D. Guinard, D. Savio, O. Baecker, L. Souza, V. Trifa, 2009. “SOA-based integration of the internet of things in enterprise services”. In: *Proceedings of IEEE ICWS*, Los Angeles, Ca, USA.
- [112] Foundations of RESTful Architecture, <https://dzone.com/refcardz/rest-foundations-restful?chapter=1>, dostupno na internetu 20.02.2021.
- [113] JSON, <https://www.json.org/json-en.html>, dostupno na internetu 20.2.2021
- [114] SNMPB application download page, <https://sourceforge.net/projects/snmpb>, dostupno na internetu 27.04.2020
- [115] Cisco MIB, [https://www.cisco.com/c/en/us/td/docs/voice\\_ip\\_comm/pgw/7/mibs/guide/7MIB\\_Ch1.html](https://www.cisco.com/c/en/us/td/docs/voice_ip_comm/pgw/7/mibs/guide/7MIB_Ch1.html), dostupno na internetu 20.02.2021

# Biografija autora

Nikola D. Stojković rođen je 31.05.1978. u Beogradu, u Republici Srbiji. U periodu od 1993 do 1997. godine pohađao je srednju elektrotehničku školu “Nikola Tesla” u Beogradu. Upisao je osnovne studije na elektrotehničkom fakultetu 1997. godine, koje je završio 2005. godine na odseku za elektroniku, sa prosečnom ocenom 8.24.

Zapošljava se u Institutu Mihajlo Pupin, u Beogradu, 2005. godine, na poziciji razvojnog inženjera. Na toj poziciji se bavio razvojem mikrokontrolerskog firmvera za AVR industrijske mikrokontrolere. Tokom 2006. godine, prelazi u firmu “AP Company”, Beograd, na poziciju inženjera elektronike i bavi se programiranjem i instalacijom SCADA uređaja i senzora. Učestvuje u projektu merenja opterećenja brodske prevodnice brane HE “Đerdap 2”. Potom, 2007. godine, prelazi u Bezbednosno-informativnu agenciju, gde, kao softverski inženjer provodi 8 godina u radu na projektima zatvorenog tipa. 2015. godine, pridružuje se Institutu Vlatakom, na projektu izahorizontski radar (HF-OTHR), prvom takve vrste u Srbiji, kao stariji softverski inženjer. U toku rada na projektu bavio se izradom algoritama za praćenje ciljeva ovog radara, digitalnoj obradi radarskih podataka, fuzijom senzora i softverskim sistemom za integrisano nadgledanje morske površine primenom mreže ovih radara.

U toku doktorskih studija napisao je ili učestvovao kao koautor na 4 rada kategorije M21, jednom radu kategorije M24, 8 konferencijskih radova i 4 tehnička rešenja, uglavnom iz oblasti izahorizontskih radara. Posедуje najviše profesionalne sertifikate iz oblasti programiranja kompanije Microsoft. Oženjen je i otac dve devojčice.



### Изјава о ауторству

Име и презиме аутора Никола Стојковић

Број индекса 5004/2016

#### Изјављујем

да је докторска дисертација под насловом

СИСТЕМ ЗА НАДГЛЕДАЊЕ ПОМОРСКОГ САОБРАЋАЈА ПРИМНОМ МРЕЖЕ  
ИЗ ХОРИЗОНТСКИХ РАДАРЪ

- резултат сопственог истраживачког рада;
- да дисертација у целини ни у деловима није била предложена за стицање друге дипломе према студијским програмима других високошколских установа;
- да су резултати коректно наведени и
- да нисам кршио/ла ауторска права и користио/ла интелектуалну својину других лица.

#### Потпис аутора

У Београду, 03.04.2021

Stojkovic N

**Изјава о истоветности штампане и електронске верзије докторског рада**

Име и презиме аутора Никола Стојковић

Број индекса 500412016

Студијски програм ЕЛЕКТРОТЕХНИКА И РАЧУНАРСТВО  
СИСТЕМ ЗА НАДГЛЕДАЊЕ ПОНОРСКОГ СЛОБМ БАЗА  
Наслов рада ПРИМЕНА МРЕЖНЕ ИЗАХОРИЗОНТСКИХ РАДАТА

Ментор ПРОФ. ДР. СРЂАН СТАНКОВИЋ

Изјављујем да је штампана верзија мог докторског рада истоветна електронској верзији коју сам предао/ла ради похрањивања у **Дигиталном репозиторијуму Универзитета у Београду**.

Дозвољавам да се објаве моји лични подаци везани за добијање академског назива доктора наука, као што су име и презиме, година и место рођења и датум одбране рада.

Ови лични подаци могу се објавити на мрежним страницама дигиталне библиотеке, у електронском каталогу и у публикацијама Универзитета у Београду.

**Потпис аутора**

У Београду, 03.04.2021

Stojkovic N

## PRILOG 3

### Изјава о коришћењу

Овлашћујем Универзитетску библиотеку „Светозар Марковић“ да у Дигитални репозиторијум Универзитета у Београду унесе моју докторску дисертацију под насловом:

СИСТЕМ ЗА НАДГЛЕДАЊЕ ПОГОРСКОГ САОБРАЋАА ПРИМЕНОМ  
МРЕЖНЕ ИЗНОРИЗОНТСКИХ РАДАРА

која је моје ауторско дело.

Дисертацију са свим прилозима предао/ла сам у електронском формату погодном за трајно архивирање.

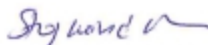
Моју докторску дисертацију похрањену у Дигиталном репозиторијуму Универзитета у Београду и доступну у отвореном приступу могу да користе сви који поштују одредбе садржане у одабраном типу лиценце Креативне заједнице (Creative Commons) за коју сам се одлучио/ла.

1. Ауторство (CC BY)
2. Ауторство – некомерцијално (CC BY-NC)
- ③ Ауторство – некомерцијално – без прерада (CC BY-NC-ND)
4. Ауторство – некомерцијално – делити под истим условима (CC BY-NC-SA)
5. Ауторство – без прерада (CC BY-ND)
6. Ауторство – делити под истим условима (CC BY-SA)

(Молимо да заокружите само једну од шест понуђених лиценци.  
Кратак опис лиценци је саставни део ове изјаве).

**Потпис аутора**

У Београду, 03.04.2021



1. **Ауторство.** Дозвољаваате умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, и прераде, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце, чак и у комерцијалне сврхе. Ово је најслободнија од свих лиценци.
2. **Ауторство – некомерцијално.** Дозвољаваате умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, и прераде, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце. Ова лиценца не дозвољава комерцијалну употребу дела.
3. **Ауторство – некомерцијално – без прерада.** Дозвољаваате умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, без промена, преобликовања или употребе дела у свом делу, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце. Ова лиценца не дозвољава комерцијалну употребу дела. У односу на све остале лиценце, овом лиценцом се ограничава највећи обим права коришћења дела.
4. **Ауторство – некомерцијално – делити под истим условима.** Дозвољаваате умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, и прераде, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце и ако се прерада дистрибуира под истом или сличном лиценцом. Ова лиценца не дозвољава комерцијалну употребу дела и прерада.
5. **Ауторство – без прерада.** Дозвољаваате умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, без промена, преобликовања или употребе дела у свом делу, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце. Ова лиценца дозвољава комерцијалну употребу дела.
6. **Ауторство – делити под истим условима.** Дозвољаваате умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, и прераде, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце и ако се прерада дистрибуира под истом или сличном лиценцом. Ова лиценца дозвољава комерцијалну употребу дела и прерада. Слична је софтверским лиценцама, односно лиценцама отвореног кода.