



UNIVERSITATEA NAȚIONALĂ
DE ȘTIINȚĂ ȘI TEHNOLOGIE
POLITEHNICA BUCUREȘTI



Școala Doctorală de Electronică, Telecomunicații și
Tehnologia Informației

Decizie nr. 183 din 13-09-2024

REZUMAT TEZĂ
DE DOCTORAT

Ing. Grigore-Robert MUJA

CONTRIBUȚII ÎN DOMENIUL RADARULUI DE ÎNALTĂ
REZOLUȚIE

CONTRIBUTIONS IN THE FIELD OF HIGH-RESOLUTION
RADAR

COMISIA DE DOCTORAT

Prof. Dr. Ing. Ion MARGHESCU Univ. Națională de Știință și Tehnologie Politehnica București	Președinte
Prof. Dr. Ing. Silviu CIOCHINĂ Univ. Națională de Știință și Tehnologie Politehnica București	Conducător de doctorat
Prof. Dr. Ing. Ion BOGDAN Univ. Tehnică Gheorghe Asachi din Iași	Referent
Prof. Dr. Ing. Ioan NICOLAESCU Academia Tehnică Militară Ferdinand I	Referent
Prof. Dr. Ing. Andrei ANGHEL Univ. Națională de Știință și Tehnologie Politehnica București	Referent

BUCUREȘTI 2024

Cuprins

1	Introducere	1
1.1	Prezentarea domeniului tezei de doctorat	2
1.2	Scopul tezei de doctorat	2
1.3	Conținutul tezei de doctorat	4
2	Stadiul actual al cercetării	5
2.1	Stadiul cercetării pentru radarul FMCW în industria automotive	5
2.2	Clasificarea tipurilor de interferență la radarele FMCW	5
2.3	Metode de suprimare a interferențelor	6
2.4	Stadiul cercetării pentru radarul cu apertură sintetică	6
2.5	Metode pentru eliminarea interferențelor de radiofrecvență la SAR	7
3	Instrumente teoretice, software și hardware utilizate în proiect	8
3.1	Descrierea principiului de funcționare al radarului FMCW	8
3.2	Descrierea semnalului chirp în prezența interferenței	9
3.3	Intrumente software și hardware utilizate în teza	10
3.3.1	Intrumente software	10
3.3.2	Intrumente hardware folosite în proiect	10
4	Metoda bazata pe STFT și Statistici de Ordine pentru eliminarea interferențelor la radarul FMCW	11
4.1	Descrierea metodei	11
4.2	Analiza influenței parametrilor ce caracterizează metoda	12
4.3	Evaluarea performanței metodei	12
4.3.1	Evaluarea pe un set de date simulate	12
4.3.2	Compararea profilurilor în distanță	12
4.3.3	Compararea în domeniul Distanță-Doppler	13
4.3.4	Estimarea direcției țintei	13
4.3.5	Evaluarea metodei pe date reale	13
4.3.6	Implementarea și evaluarea metodei în timp real	14
4.4	Concluzii	14

5	Metodă de Atenuare a Interferenței Bazată pe Rotirea Polarizării pentru Radare FMCW în Domeniul Automotive	16
5.1	Tipuri de Polarizare	16
5.2	Descrierea scenariului utilizat în achiziția datelor	16
5.2.1	Analiza rezultatelor privind suprimarea interferenței obținute prin aplicare metodei	17
5.2.2	Compararea performanțelor metodei propuse cu alte metode	17
5.3	Concluzii	17
6	Detecția și eliminarea interferențelor la radarul cu apertură sintetică	18
6.1	Metode pentru eliminarea interferențelor de radiofrecvență la SAR	18
6.2	Suprimarea interferenței la SAR folosind o metoda bazată pe banc de filtre privit ca o distribuție timp frecvență și Statistici de Orinde	19
6.2.1	Descrierea metodei	19
6.2.2	Rezultate experimentale	20
6.2.3	Compararea Performanței Metodelor de Atenuare a Interferenței: FB-TFD și Statistici de Ordine versus Zeroing	20
7	Concluzii	22
7.1	Rezultate obținute	22
7.2	Contribuții originale	23
7.3	Lista lucrărilor originale	23
7.4	Perspectivă de dezvoltare ulterioară	24
	Bibliografie	25

Capitolul 1

Introducere

Radarul FMCW (Frequency Modulated Continuous Wave) este un radar de înaltă rezoluție ce reprezintă o tehnologie avansată esențială în domeniul automotive. Acest tip de radar este proiectat pentru a obține imagini sau măsurători cu o precizie temporală și spațială extrem de ridicată, ceea ce permite distincția clară între obiectele aflate la distanțe foarte mici unele de altele. Radarul FMCW se caracterizează prin capacitatea sa de a detecta și de a distinge obiectele de dimensiuni mici, cum ar fi pietonii sau obstacolele de pe drum, în condiții de mediu dificile, precum ploaie, ceață sau ninsoare.

Un alt tip de radar de înaltă rezoluție este radarul cu apertură sintetică (SAR) ce se remarcă prin abilitatea sa unică de a furniza imagini 2D de înaltă rezoluție, indiferent de condițiile de iluminare sau meteorologice [36]. Această caracteristică îl face un instrument extrem de eficient în domenii precum teledetecție, geoscanare, cartografiere, monitorizare mediului și altele. Rezoluția spațială este un indice de performanță esențial al sistemului SAR, rezoluții mai mari oferind informații mai detaliate care facilitează recunoașterea, descrierea și extragerea țintelor.

În contextul utilizării tot mai extinse a tehnologiilor radar în diverse domenii, apariția fenomenului de interferență reprezintă o provocare semnificativă care influențează performanța radarelor, atât în domeniul automotive, cât și în cel al radarului cu apertură sintetică. Acest context subliniază necesitatea dezvoltării și implementării unor tehnici avansate de atenuare a interferențelor, care să asigure funcționarea optimă a sistemelor radar în fața provocărilor aduse de congestionarea spectrului electromagnetic. În această teză, vom analiza impactul prezenței interferențelor asupra radarelor FMCW din industria automotive și a SAR, vom prezenta noi metode de suprimare a interferențelor și vom analiza metodele actuale de suprimare a interferențelor, cu scopul de a identifica soluții de eliminare a interferențelor care să răspundă eficient unor scenarii cu diferite tipuri de interferență.

1.1 Prezentarea domeniului tezei de doctorat

Radarul FMCW este larg utilizat în industria automotive în cadrul vehiculelor autonome, pentru realizarea sistemelor de asistență a conducătorului auto. Acest radar transmite semnale de tip chirp în undă continuă cu frecvență variabilă în timp, care sunt reflectate de obiectele din jurul vehiculului. Datorită capacității sale de a măsura distanțe și viteze cu precizie foarte ridicată (de ordinul centimetrilor) radarul FMCW este esențial pentru funcționalități precum controlul adaptiv al vitezei de croazieră, asistența la menținerea benzii, detectarea coliziunilor și altele. Rezoluție înaltă pe care o are radarul FMCW a determinat dezvoltarea de aplicații în care acesta este configurat precum un radar SAR (adică este montat pe o platformă aeriană) cu scopul de a obține imagini 2D de înaltă rezoluție precum cele obținute de la un radar cu apertură sintetică.[24].

Radarul cu apertură sintetică este utilizat pentru imagistica de înaltă rezoluție a suprafețelor mari, fiind esențial în aplicații precum cartografierea, monitorizarea mediului și observația terestră. Radarul cu apertură sintetică funcționează prin transmiterea unui semnal radar și recepționarea reflexiilor acestuia în timp ce radarul se deplasează, generând imagini de înaltă rezoluție. Prin utilizarea tehnicilor de sintetizare a aperturii, SAR poate obține imagini detaliate și precise ale suprafețelor terestre.

Una dintre provocările majore în funcționarea radarului FMCW este apariția fenomenului de interferență mutuală ce apare în scenarii de trafic intens, unde sunt prezente un număr ridicat de radare. Aceste interferențe pot compromite performanța sistemelor radar și pot afecta siguranța vehiculului. În cazul radarului SAR, interferențele pot afecta claritatea imaginilor și pot introduce erori în analiza datelor.

1.2 Scopul tezei de doctorat

Apariția fenomenului de interferență de radio-frecvență, la radarele FMCW și la radarele cu apertură sintetică, a devenit o problemă de mare interes datorită creșterii probabilității de apariție a acestei în scenarii uzuale. Scopul principal al acestei teze de doctorat este de a dezvolta și de a evalua tehnici eficiente pentru eliminarea interferențelor la radarul FMCW utilizat în industria automotive și la radarul cu apertură sintetică. Aceasta include identificarea și implementarea de metode inovatoare care pot îmbunătăți calitatea semnalului radar și performanța sistemelor de detecție și imagistică. În mod specific, teza urmărește:

- Dezvoltarea unor metode eficiente de eliminare a interferențelor:
 - Analiza și dezvoltarea de tehnici care pot reduce sau elimina interferențele provenite de la alte radare în industria automotive, unde radarul FMCW este utilizat pe scară largă.

- Analiza și dezvoltarea unor metode de atenuare și eliminare a interferențelor la radarul cu apertură sintetică pentru a îmbunătăți calitatea imaginilor și pentru a facilita identificarea precisă a obiectelor.
- Studiul și analiza interferențelor - Investigarea tipurilor de interferențe care afectează radarul FMCW și radarul SAR precum și analiza impactului diferitelor tipuri de interferențe asupra performanței radarului și identificarea factorilor critici care influențează calitatea semnalului.
- Dezvoltarea unor baze de date sintetice în care sunt simulate scenarii cu ținte mobile în prezența interferențelor precum și achiziția de date experimentale pentru a evalua eficiența metodelor de eliminare a interferențelor pentru scenarii complexe, cu diferite tipuri de interferențe și număr variabil de surse de interferență.
- Evaluarea performanței tehnicilor propuse
 - Testarea și compararea diferitelor metode de eliminare a interferențelor în condiții reale și simulate, pentru a determina eficiența și impactul acestora asupra performanței radarului.
 - Realizarea de experimente și teste pentru a valida eficiența tehnicilor propuse în condiții reale și simulate. Compararea performanței tehnicilor propuse cu metodele existente și evaluarea impactului asupra calității semnalului și a timpului de procesare.
- Optimizarea implementării tehnicilor în hardware-ul radar
 - Investigarea modului în care tehnicile de eliminare a interferențelor pot fi integrate eficient în hardware-ul radar existent pentru radarele FMCW din industria automotive.
 - Evaluarea impactului asupra resurselor hardware și software, precum și optimizarea implementării pentru a asigura compatibilitatea și performanța în timp real.

Prin atingerea acestor obiective, teza își propune să contribuie semnificativ la îmbunătățirea performanței radarului în contextul eliminării interferențelor, având un impact pozitiv asupra aplicațiilor de detecție și imagistică. Acest lucru va facilita dezvoltarea unor soluții radar mai precise și mai fiabile, contribuind astfel la avansarea tehnologiei radar și la îmbunătățirea aplicabilității acesteia în diverse domenii.

1.3 Conținutul tezei de doctorat

Structura tezei de doctorat este împărțită în șapte capitole, în fiecare capitol fiind prezentate aspecte legate de interferența de radio frecvență apărută la radarele de mare rezoluție.

În **Capitolul 1** este prezentată o scurtă introducere legată de radarele de mare rezoluție, după care este prezentat domeniul, scopul și conținutul tezei de doctorat.

În **Capitolul 2** este prezentat stadiul actual al cercetării referitor la interferențele apărute la radarul FMCW din industria automotive și la radarul cu apertură sintetică.

În **Capitolul 3** sunt prezentate instrumentele teoretice, software și hardware utilizate în teza de doctorat.

În **Capitolul 4** este prezentată metoda de eliminare a interferențelor bazată pe Transformata Fourier pe termen scurt și Statistici de Ordine (STFT and L-Statistics). De asemenea, au fost realizate o serie de simulări pentru a analiza performanțele metodei în diferite scenarii, a fost realizată o comparație între performanțelor metodei propuse și a altor metode utilizate în eliminarea interferențelor, iar în finalul capitolului este prezentată implementarea în timp real a metodei pe senzorul radar AWR1843.

În **Capitolul 5** este prezentată o tehnică de eliminare a interferențelor ce se bazează pe rotirea polarizării.

În **Capitolul 6** este prezentată o nouă metodă de eliminare a interferențelor la radarul cu apertură sintetică, ce se bazează pe utilizarea unui banc de filtre privit ca o distribuție timp frecvență (FBTFD) și Statistici de Ordine.

Teza se încheie cu **Capitolul 7** ce este un capitol de concluzii, unde sunt prezentate cele mai importante rezultate obținute, contribuțiile personale, lista lucrărilor publicate precum și perspectivele de dezvoltare ulterioară.

Capitolul 2

Stadiul actual al cercetării

2.1 Stadiul cercetării pentru radarul FMCW în industria automotive

În industria vehiculelor autonome, senzorii radar au devenit indispensabili și joacă un rol esențial în dezvoltarea aplicațiilor precum sistemele de asistență la conducere (ADAS), frânarea automată de urgență (AEB), detectarea unghiului mort (BSD), controlul adaptiv al vitezei de croazieră (ACC) și schimbarea benzii. Pentru implementarea acestor aplicații, este necesar ca pe un singur vehicul să fie montate mai mulți senzori radar, care funcționează în aceeași bandă de frecvență (76-81 GHz). Aceasta implică apariția interferențelor mutuale între senzorii radar ce conduc la scaderea performanțelor senzorilor radar devenind o problemă critică din perspectiva siguranței [28].

2.2 Clasificarea tipurilor de interferență la radarele FMCW

În industria automotive, radarul cu undă continuă modulată în frecvență (FMCW) este cel mai frecvent utilizat. Având în vedere că numărul vehiculelor autonome pe drumuri este tot mai mare și că radarele auto operează într-o bandă de frecvență restrânsă (76–81 GHz), există o probabilitate mare ca senzorii radar să interfereze între ei în condiții de trafic intens. Așadar, într-un scenariu în care este prezentă interferența mutuală avem de a face cu un radar victimă (radarul care recepționează pe lângă semnalul reflectat de țintă și semnalul de interferență) și cel puțin un radar de interferență (radarul care cauzează apariția interferenței)[5]. În funcție de parametrii specifici ai secvențelor chirp utilizate atât de radarul de interferență cât și de radarul victimă, interferențele mutuale se pot clasifica astfel.

- Interferența corelată sau interferență paralelă
- Interferența necorelată sau interferență de tip „Sweeping”

- Interferență continuă

2.3 Metode de suprimare a interferențelor

Pentru a rezolva problema interferențelor mutuale între radarele FMCW din industria automotive, au fost dezvoltati o serie de algoritmi pentru detectarea și atenuarea interferențelor radio fie în domeniul timp, [5], [10], în domeniul frecvență [4], sau în domeniul timp-frecvență,[29].De asemenea au fost dezvoltati algoritmi ce se bazează pe utilizarea rețelelor neuronale[22]), [35], sau algoritmi ce se bazează pe modificarea formei de undă de la un chirp la altul [2]. Însă, de remarcat este faptul că în literatură în literatura de specialitate se regăesc un număr redus de algoritmi de eliminare a interferențelor ce au fost dezvoltati și testate în transceivere radar auto [31], [30].

În cadrul tezei am realizat o analiză a performanțelor unui set de cinci metode de eliminarea a interfrentelor după cum urmează:

- **Metoda bazată pe optimizarea normei L1 în două etape**
- **Metoda Zeroing**
- **Metoda - Modelului Autoregresiv**
- **Metoda - Ramp Filtering**
- **Metoda iterativă cu prag adaptiv (IMAT)**

Aceste metode au fost implementate în programul Matlab și au fost testate și evaluate pe seturi de date simulate și reale, pentru scenarii în care apar diferite tipuri de interferență.

2.4 Stadiul cercetării pentru radarul cu apertură sintetică

Utilizarea radarului cu Apertură Sintetică permite achiziția de date indiferent de condițiile meteorologice și la orice moment de timp. Astfel, acesta este folosit pe scară largă pentru aplicații precum avertizarea privind dezastrele, monitorizarea mediului, cartografierea, gestionarea resurselor naturale, monitorizarea oceanelor. Obținerea de imagini de înaltă rezoluție facilitează utilizarea radarului în domeniul militar, unde acesta poate fi folosit pentru identificarea țintelor specifice și pentru monitorizarea mișcării trupelor și a echipamentelor pe câmpul de luptă. În plus, radarul SAR se dovedește util și în detectarea locațiilor surselor active care operează în aceeași bandă de frecvențe [25].

Cu toate acestea, funcționalitatea radarului SAR poate fi serios afectată atunci când surse externe active, cum ar fi sistemele radar cu bază la sol sau aeropurtate, echipamentele de telecomunicații și rețelele de televiziune, sau chiar de la un alt sistem SAR,

generează interferență de radio frecvență. Acest fenomen de interferență poate compromite semnificativ calitatea și acuratețea imaginilor radar, complicând considerabil procesul de interpretare a datelor și reducând eficiența sistemului SAR în detecția și analiza țintelor [26].

2.5 Metode pentru eliminarea interferențelor de radiofrecvență la SAR

Diverse tehnici au fost concepute pentru a detecta și a atenua efectele interferenței în imaginile SAR. Metoda de filtrare adaptivă se dovedește a fi cea mai practică abordare de procesare a semnalului, caracterizată prin capacitatea sa de a proiecta filtre fie în domeniul frecvenței [21], fie în domeniul timp-frecvență [27]. Detecția interferențelor în domeniul timp este destul de dificilă, mai ales în cazul în care nivelul acestora este asemănător cu ecoul provenit de la o țintă, dar utilizând analiza semnalului afectat de interferență în domeniul timp-frecvență, interferența se poate detecta ușor deoarece lățimea de bandă a acesteia este mica în comparație cu cea a semnalului ecou reflectat de țintă. În [15] este prezentată o metodă inovatoare care atenuază interferența în trei etape: Detectare, Notch și Recuperare. În [14], [33] sunt propuse metode pentru suprimarea interferenței între sistemele SAR spațiale. Alte tehnici inovatoare propun atenuarea interferenței [8] folosind proiecții alternative sau utilizarea unei decompoziții tensoriale [12]. Cu toate acestea, au fost dezvoltate și alte metode pentru localizarea interferenței și, astfel, a surselor de radiație active care funcționează în aceeași bandă de frecvență cu SAR [13], [1], [34]. În general metodele de eliminarea a interferențelor la SAR se clasifică astfel:

- **Metode nonparametrice-**
- **Metode parametrice-**
- **Metode semiparametrice-**
- **Metode bazate pe polarizare**

Capitolul 3

Instrumente teoretice, software și hardware utilizate în proiect

3.1 Descrierea principiului de funcționare al radarului FMCW

Sistemele radar utilizate în industria auto sunt, în general, radare cu undă continuă modulată în frecvență (FMCW). Aceste radare transmit continuu semnale modulate în frecvență pentru a măsura distanța, viteza și unghiul de sosire al unei ținte. Schema bloc a unui radar FMCW este ilustrată în Figura 3.1, pe care se pot identifica principale componente de radio frecvență, analogice și digitale, cu ajutorul cărora se poate descrie modul de funcționare a acestuia.

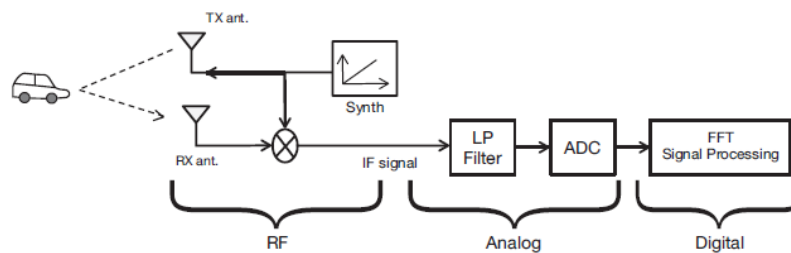


Figura 3.1 Schema bloc a radarului FMCW

Cu ajutorul unui sintetizor de frecvență este generat un semnal chirp, care este transmis cu ajutorul antenei de transmisie (TXant). Semnalul transmis se reflectă la contactul cu un obiect, generând un semnal chirp reflectat ce este capturat cu ajutorul antenei de recepție (RXant). În sistemul de recepție al radarului FMCW cu ajutorul unui mixer, are loc combinarea chirpului transmis și a chirpului recepționat formându-se un semnal de frecvență intermediară IF sau semnal de bătăi.

Pentru a obține reprezentarea semnalului IF în domeniul timp-frecvență obținut la ieșirea mixerului de frecvență, se calculează diferența dintre panta chirpului TX și a

chirpului RX. Semnalul IF este valabil doar în intervalul de timp în care atât chirpului TX cât și chirpului RX se suprapun [6].

3.2 Descrierea semnalului chirp în prezența interferenței

Semnalul transmis de un radar FMCW, $s_T(t)$, într-un interval de repetiție este un semnal chirp cu variație liniară a frecvenței:

$$s_T(t) = \cos \left[2\pi \left(f_c t + \frac{1}{2} k (t - T/2)^2 \right) \right] p \left(\frac{t - T/2}{T} \right) \quad (3.1)$$

, unde

$$p \left(\frac{t}{T} \right) = \begin{cases} 1, & \text{if } |t| \leq \frac{T}{2} \\ 0, & \text{if } |t| > \frac{T}{2} \end{cases} \quad (3.2)$$

este funcția poartă de durată T corespunzătoare unui interval de timp, f_c este frecvența purtătoare iar k reprezintă panta semnalului chirp transmis, ce este egală cu raportul dintre banda semnalului chirp B și durata acestuia notată cu T .

Semnalul transmis este reflectat de țintă și recepționat după un timp τ_i , care este legat de distanța radar-țintă $R_i = c\tau_i/2$ (unde c este viteza luminii în vid). În cazul în care există interferențe, semnalul recepționat de receptorul radarului va conține pe lângă semnalul reflectat de țintă și semnalul transmis de radarul de interferență. Astfel, semnalul recepționat de receptorul radar se poate scrie ca suma dintre semnalul reflectat de la țintă și semnalul transmis de radarul de interferență după cum urmează:

$$s_R(t) = \sum_{i=1}^{N_T} A_{R,i} s_T(t - \tau_i) + \sum_{l=1}^{N_{RFI}} s_{RFI,l}(t), \quad (3.3)$$

unde N_T reprezintă numărul de ținte, $A_{R,i}$ reprezintă amplitudinea corespunzătoare țintei i , iar N_{RFI} reprezintă numărul surselor de interferență.

După mixarea semnalului reflectat de o țintă punctuală cu semnalul transmis, obținem un semnal de frecvență constantă (semnalul clasic de bătaie), în timp ce prin mixarea unei interferențe necorelate cu semnalul chirp transmis se obține un semnal chirp de interferență în banda de bază.

Expresia analitică a semnalului de bătaie rezultat se scrie ca:

$$\begin{aligned}
x(t) = & \left\{ \sum_{i=1}^{N_T} A_i \exp(j2\pi k \tau_i t) + \right. \\
& + \sum_{l=1}^{N_{RFI}} A_{RFI,l} \exp [j\pi(k - k_{RFI,l})(t - t_{RFI,l})^2] \times \\
& \left. \times p \left(\frac{t - t_{RFI,l}}{T_{AAF,l}} \right) \right\} \times p \left(\frac{t - \frac{T}{2}}{T} \right), \tag{3.4}
\end{aligned}$$

unde A_i reprezintă amplitudinea complexă a țintei și $A_{RFI,l}$ este amplitudinea complexă a semnalului de interferență l . Prin urmare, semnalul de bătaie este format dintr-o sumă de exponențiale complexe cu frecvență constantă (corespunzătoare țintelor) și o sumă de semnale chirp în bandă de bază care descriu interferențele.

3.3 Instrumente software și hardware utilizate în teza

3.3.1 Instrumente software

În dezvoltarea metodelor de eliminare a interferențelor au fost utilizate o suită de software specializate după cum urmează:

- **MATLAB**
- **Code Composer Studio**
- **MMWaveStudio**
- **UniFlash**
- **LATEX**

3.3.2 Instrumente hardware folosite în proiect

Dispozitivele hardware folosite pe parcursul elaborării tezei de doctorat sunt următoarele:

- **Senzorul radar AWR1843** - Radarul AWR1843 este un senzor FMCW integrat cu un singur cip, care operează în banda de frecvențe de 76-81 GHz.
- **DCA1000EVM** - este o placă de captură destinată să se conecteze cu radarul AWR1843 oferind utilizatorilor posibilitatea de a transmite datele de la convertorul analog digital (ADC) prin Ethernet.

Capitolul 4

Metoda bazata pe STFT și Statistici de Ordine pentru eliminarea interferențelor la radarul FMCW

În această capitol, este prezentată o metodă inovatoare pentru atenuarea interferențelor necorelate la radarul FMCW folosit în industria automotive, bazată pe Transformata Fourier pe termen scurt (STFT) și Statistici de Ordine, metodă ce a fost propusă și publicată în [17]. De asemenea, în acest capitol este prezentată o comparație între rezultatele obținute prin aplicarea metodei propuse și a altor metode state-of-the-art atât pe seturi de date simulate cât și pe date reale, pentru scenarii cu diferite tipuri de interferență. Capitolul se încheie cu prezentarea implementării în timp real a metodei.

4.1 Descrierea metodei

În această secțiune este prezentat algoritmul dezvoltat pentru atenuarea interferențelor în radarul FMCW, algoritm ce este bazat pe analiza semnalului radar în domeniul timp-frecvență. Diagrama generală a algoritmului este prezentată în Figura 4.1.

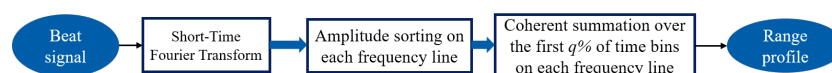


Figura 4.1 Diagrama bloc a algoritmului de eliminare a RFI bazat pe STFT and L-statistics

Conceptul metodei constă în calcularea STFT a semnalului de batăi și sortarea fiecărei linii de frecvență constantă a spectrogramelor în ordine crescătoare. Această abordare plasează bin-urile afectate de interferență spre partea dreaptă a planului timp-frecvență. Ulterior, profilul de distanță fără interferență este calculat printr-o sumare coerentă pe axa timpului a bin-urilor considerate neafectate de interferență (primele $q\%$ din bin-urile de timp din spectrograma sortată).

4.2 Analiza influenței parametrilor ce caracterizează metoda

Profilul de distanță obținut după atenuarea interferenței cu metoda propusă depinde de următorii parametri:

- lungimea ferestrei glisante N_{win} , - ce determină rezoluția temporală și lățimea interferenței în planul timp-frecvență
- dimensiunea pasului cu care este mutată fereastră glisantă N_{step} , - ce determină timpul computațional și rezoluția în frecvență
- procentul de summare q - ce se poate exprima ca

$$q[\%] = \left(1 - M_f \times \frac{N_{win}}{N_{STFT} N_{step}} \right) * 100, \quad (4.1)$$

unde M_f reprezintă un factor de multiplicare ce e legat de numărul de interferențe prezente în semnal.

4.3 Evaluarea performanței metodei

4.3.1 Evaluarea pe un set de date simulate

Pentru evaluarea performanțelor metodei în scenarii complexe a fost utilizată baza de date ARIM-v2 ce a fost propusă în [23]. În această bază de date au fost create scenarii cu multiple surse de interferențe (de la o sursă la trei surse) precum și multiple ținte(de la o țintă până la patru ținte). Utilizând această bază de date s-au analizat performanțele metodei pentru diferite combinații de parametri în termeni de eroare absolută medie (MAE) a amplitudinilor și a fazelor țintelor și s-a observat ca cele mai bune rezultate s-au obținut pentru când factorul de multiplicare este 3 sau 4 și când lungimea ferestrei este $N_{win} = 32$ și $N_{step} = 64$.

4.3.2 Compararea profilurilor în distanță

De asemenea, utilizând baza de date ARIM-V2, am realizat o comparare a profilurilor în distanță obținute prin aplicarea metodei propusă pentru atenuarea interferențelor RFI bazată pe STFT și Statistici de Ordine și a metodei Zeroing[11], [10], metodei ce se bazează pe rețele neuronale "Fully Convolutional Network" (FCN),[7] și a metodei ce se bazează pe optimizarea normei l_1 în două etape [32].Comparația a fost realizată pe baza erorii medi absolute (MAE) a amplitudinii și fazei utilizând baza de date ARIM-v2, unde s-a observat că metoda de reducere a interferenței bazată pe optimizarea normei l_1 în două etape obține performanțe bune pentru o singură sursă de interferență și că MAE-ul crește

atunci când sunt prezente 2-3 surse de interferență, ceea ce degradează performanța generală, în timp ce metoda propusă elimină cu succes interferențele indiferent de numărul surselor de interferență. Ca și o concluzie, se poate spune că metoda propusă demonstrează o performanță superioară față de celelalte trei metode, obținând cele mai bune rezultate cu combinațiile optime de parametri identificați în urma simulărilor realizate.

4.3.3 Compararea în domeniul Distanță-Doppler

Pentru a compara eficacitatea metodei propuse în scenarii care implică ținte mobile cu eficacitatea metodelor Zeroing și a metodei bazate pe optimizarea normei L1 am utilizat un set de date ce a fost prezentat în [32]. În cadrul acestui set de date, este surprins un scenariu în care o bicicletă se mișcă cu o viteză de 5 m/s, în timp ce un radar de interferență este poziționat strategic la o distanță de 4 metri față de radarul victimă. S-a observat că ținta în mișcare este clar vizibilă, în cazul în care sunt aplicate metodele STFT și Statistici de Ordine și metoda bazată pe optimizarea normei L1 în două etape și mai puțin vizibilă în cazul în care este aplicată metoda Zeroing. De asemenea, s-a analizat și modul în care sunt estimate distanțele și vitezele grupului de ținte în prezența unei interferențe de scurtă durată (obținută prin generarea unui chirp de interferență cu o pantă egală cu jumătate din pantă chirp-ului transmis, adică un raport al pantelor de 0.5) și o interferență de lungă durată (obținută cu un chirp de interferență având o pantă apropiată de cea a chirp-ului transmis, adică un raport al pantelor de 0.98) și s-a observat că toate metodele au rezultate bune pentru interferența de scurtă durată în timp ce în cazul prezenței interferenței de lungă durată metoda propusă reduce interferența păstrând vizibile țintele.

4.3.4 Estimarea direcției țintei

Pentru evaluarea preciziei cu care este estimată direcția de unde vine ținta s-a utilizat un set specific de date prezentat în [32]. Datele au fost achiziționate pentru un scenariu în care țintele pentru care s-a determinat poziția unghiulară sunt o mașină și o motocicletă. Pe setul de date obținut pentru scenariul descris mai sus au fost aplicate metoda bazată pe STFT și Statistici de Ordine, metoda Zeroing și metoda bazată pe Optimizarea Normei L1 în două etape. și s-a observat că toate cele trei metode reușesc să elimine interferența fără a afecta negativ estimarea unghiului țintei și că cel mai bun raport semnal-zgomot (SINR) este obținut de metoda bazată pe Optimizarea Normei L1 în două etape, urmată de metoda bazată pe STFT și Statistici de Ordine.

4.3.5 Evaluarea metodei pe date reale

- **Achiziția datelor reale utilizate în evaluarea metodelor**

Pentru evaluarea performanței metodelor de eliminare a interferențelor de radiofrecvență prezentate în secțiunea anterioară, au fost realizate capturi de date radar folosind o placă de achiziție DCA100EVM și doi senzori radar FMCW AWR1843 pentru a obține atât interferență corelată, interferență necorelată cât și interferență continuă.

- **Evaluarea performanțelor metodelor de eliminare a interferențelor de radiofrecvență**

În această secțiune am realizat o comparație a performanțelor a șase metode (STFT and L-Statistics, Zeroing, RampFiltering, IMAT, Bi-Level și Autoregressive) utilizate în eliminarea interferențelor la radarul FMCW și am observat faptul că în funcție de tipul și caracteristicile interferenței, anumite metode pot fi mai eficiente decât altele. În consecință, alegerea metodei optime de atenuare a interferenței trebuie să fie adaptată specificului scenariului de interferență întâmpinat, pentru a asigura cele mai bune rezultate în ceea ce privește calitatea semnalului și performanța sistemului radar.

4.3.6 Implementarea și evaluarea metodei în timp real

În această secțiune este prezentată implementarea metodei dezvoltate de atenuare a interferențelor RFI bazată pe STFT și L-statistics pe senzorul radar AWR1843 Single-Chip și rezultatele testelor efectuate într-un mediu de laborator.

Pașii principali urmați în implementarea metodei bazată pe STFT and L-Statistics pe platforma AWR1843 sunt ilustrați în Figura 4.2.

4.4 Concluzii

Acest capitol introduce o metodă nouă pentru atenuarea interferențelor radio (RFI) ce se bazează pe STFT și Statistici de Ordine. Metoda propusă are scopul de a elimina eficient semnalele de interferență necorelate din semnalul de bătaie, îmbunătățind astfel calitatea generală a semnalului și performanța sistemului radar.

S-a demonstrat că metoda propusă poate atenua multiple surse de interferență de diferite niveluri de intensitate. De asemenea, s-a observat faptul că, prin alegerea pasului cu care are loc mutarea ferestrei la jumătate din lungimea acesteia se obțin performanțe asemănătoare ca atunci când fereastra este mutată cu pas unitar conform definiției clasice a STFT. În plus, prin alegerea acestui pas de mutare a ferestrei are loc o scădere semnificativă a timpului de procesare/calcul, ceea ce face ca metoda să poată fi implementată în timp real pe un procesor digital de semnale.

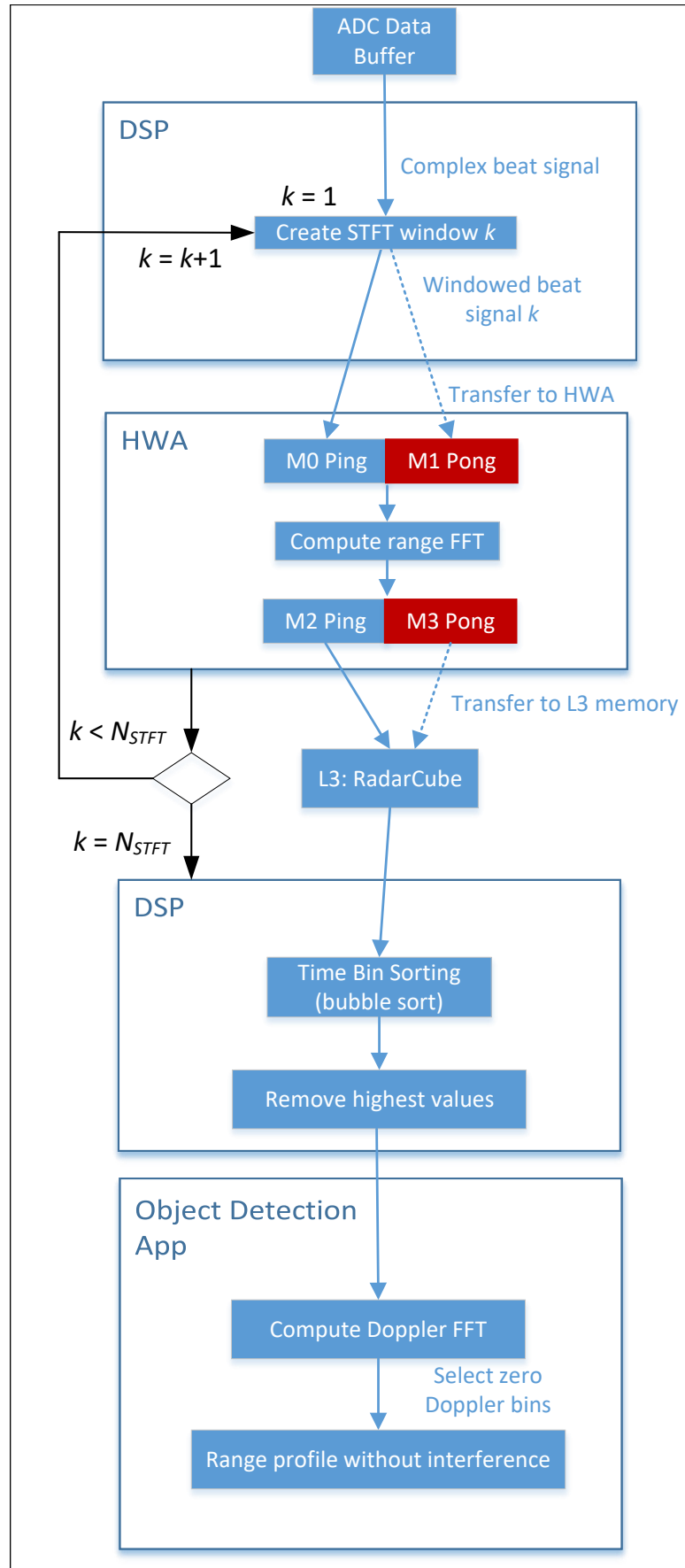


Figura 4.2 Diagrama bloc a algoritmului implementat în timp real pe radarul AWR1843

Capitolul 5

Metodă de Atenuare a Interferenței Bazată pe Rotirea Polarizării pentru Radare FMCW în Domeniul Automotive

În acest capitol, prezentăm un studiu dedicat atenuării interferențelor de radio frecvență (RFI) în sistemele radar FMCW, utilizând orientarea cross-polarizată între antenele radarului victimei și radarului de interferență, în scenarii în care radarul victimă utilizează o configurație MIMO.

5.1 Tipuri de Polarizare

În radarele FMCW, polarizarea undelor electromagnetice poate influența semnificativ performanța sistemului, în special în ceea ce privește detectarea țintelor și reducerea interferențelor:

Majoritatea radarelor FMCW utilizează polarizare liniară, fie verticală, fie orizontală. Aceasta ajută la simplificarea designului radarului și la analiza semnalelor reflectate. Totuși, utilizarea exclusivă a polarizării liniare poate limita capacitatea radarului de a distinge între diferite tipuri de ținte și de a gestiona interferențele.

5.2 Descrierea scenariului utilizat în achiziția datelor

Pentru analiza modului în care utilizarea corss-polarizării ajută la atenuare și chiar eliminarea interferențelor mutuale între radarele FMCW utilizate în industria automotive, am utilizat doua sisteme radar AWR1843 și o placa de achiziție de date DCA100 cu ajutorul cărora am realizat achiziția de date pentru diferite scenarii.

Unul dintre unitățile radar a funcționat ca sursă de interferență, în timp ce cealaltă unitate radar a servit ca radar victimă. În mod notabil, radarul victimă a fost rotit sistematic în pași de 10 grade, acoperind o rotație totală de 90 de grade, pentru a evalua impactul diferitelor orientări asupra susceptibilității la interferență.

5.2.1 Analiza rezultatelor privind suprimarea interferenței obținute prin aplicare metodei

În această secțiune vor fi prezentate rezultatele obținute în urma aplicării metodei de cross-polarizare pentru rotirea radarului victimă față de radarul de interferență cu incremente de 10 grade, în intervalul 0-90 de grade.

Pentru a observa modul în care rotirea polarizării reduce efectul interferenței, am analizat profilurile de distanță ale semnalului de bătaie, afectat de interferență obținute pentru fiecare rotație de 10 grade a radarului victimă în raport cu radarul de interferență, în intervalul de 0-90 de grade. S-a observat faptul că prin utilizarea exclusivă a metodei de rotație a polarizării pentru a elimina interferența permite o reducere notabilă a nivelului de zgomot, depășind 20 dB atunci când unghiul de rotație al radarului victimă depășește 80 de grade.

5.2.2 Compararea performanțelor metodei propuse cu alte metode

În această secțiune vor fi prezentate rezultatele obținute în urma aplicării metodei de cross-polarizare atât singură cât și în combinație cu alte două metode de eliminare a interferențelor în domeniul timp (Zeroing) și în domeniul timp frecvență (STFT and L-statistics). S-a observat că rotația planului de polarizare contribuie semnificativ la creșterea eficienței atenuării interferențelor, îmbunătățind SINR cu aproximativ 8 dB atunci când radarul victimă este rotit cu 90 de grade. Acest rezultat sugerează că integrarea rotației planului de polarizare cu metodele clasice de atenuare poate oferi soluții eficiente pentru gestionarea interferențelor în sistemele radar.

5.3 Concluzii

În acest capitol au fost prezentate avantajele semnificative ale utilizării diversității de polarizare în sistemele radar pentru o atenuare eficientă a interferențelor. Prin alinierea strategică a stărilor de polarizare ale sistemelor radar, putem suprima selectiv semnalele de interferență, ceea ce duce la îmbunătățiri substanțiale ale calității semnalului și performanței generale a sistemului.

Capitolul 6

Detecția și eliminarea interferențelor la radarul cu apertură sintetică

Detecția și eliminarea interferențelor în sistemele radar cu apertură sintetică, reprezintă o provocare semnificativă în domeniul tehnologiei radar.

Interferențele pot fi cauzate de radare adiacente, echipamente de comunicație, sau chiar fenomene naturale. Acestea se manifestă prin creșterea zgomotului de fond și prin distorsionarea semnalelor utile, ceea ce duce la erori în estimarea parametrilor obiectelor detectate, cum ar fi poziția și viteza. Prin urmare, implementarea unor tehnici eficiente de detectare și eliminare a interferențelor este esențială pentru îmbunătățirea performanțelor sistemelor SAR.

6.1 Metode pentru eliminarea interferențelor de radiofrecvență la SAR

Diverse tehnici au fost concepute pentru a detecta și a atenua efectele interferenței în imaginile SAR. Metoda de filtrare adaptivă se dovedește a fi cea mai practică abordare de procesare a semnalului, caracterizată prin capacitatea sa de a proiecta filtre fie în domeniul frecvenței [21], fie în domeniul timp-frecvență [27]. Detecția interferențelor în domeniul timp este destul de dificilă, mai ales în cazul în care nivelul acestora este asemănător cu ecoul provenit de la o țintă, dar utilizând analiza semnalului afectat de interferență în domeniul timp-frecvență, interferența se poate detecta ușor deoarece lățimea de bandă a acesteia este mica în comparație cu cea a semnalului ecou reflectat de țintă. În [15] este prezentată o metodă inovatoare care atenuază interferența în trei etape: Detectare, Notch și Recuperare.

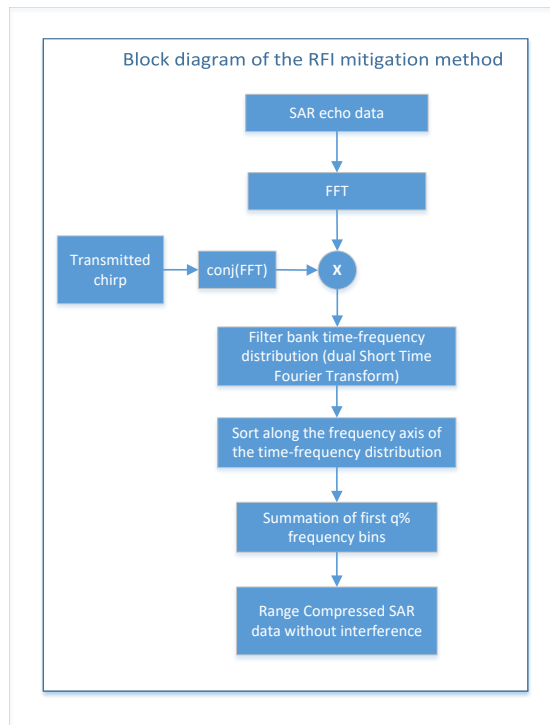


Figura 6.1 Schema bloc a metodei FB TFD and L-Statistics

6.2 Suprimarea interferenței la SAR folosind o metoda bazată pe banc de filtre privit ca o distribuție timp frecvență și Statistici de Orinde

Metoda de suprimare a interferențelor la radarul cu apertură sintetică ce se bazează pe utilizarea unui banc de filtre privit ca o distribuție timp-frecvență (FB-TFD) și Statistici de Ordine, este o metodă nouă, pe care am dezvoltat-o, implementat-o și prezentat-o în [19]. Metoda operează în domeniul timp-frecvență și nu implică localizarea RFI în datele ecoului SAR. În plus, metoda poate suprima, în principiu, orice semnal de interferență care nu este corelat cu chirpul transmis și nu necesită cunoștințe exacte a priori despre tipul de RFI.

6.2.1 Descrierea metodei

Algoritmul metodei de eliminarea a interferenței folosind bancuri de filtre privite ca o distribuție timp-frecvență (FB TFD) și Statistici de Ordine, este prezentat în Figura 6.1 unde se poate observa că semnalul ecou de la SAR (din matricea de achiziție), reprezintă parametrul de intrare al metodei.

Primul pas în lanțul de procesare implică generarea spectrului semnalului comprimat în distanță. Acest lucru se realizează prin înmulțirea spectrului ecoului SAR cu versiunea conjugată a spectrului chirpul transmis. Ulterior, se aplică FB-TFD cu benzi de frecvență

parțial suprapuse pe spectrul semnalului comprimat pe intervalul de distanță. Similar cu Transformata Fourier pe termen scurt (STFT), FB TFD poate fi considerată ca o colecție ordonată de frecvență de semnale de bandă îngustă în domeniul timpului [9] (un astfel de semnal se obține printr-o FFT inversă a spectrului comprimat în distanță, decupat de un filtru de bandă îngustă aplicat în domeniul spectral). După comprimarea în distanță, semnătura unei ținte în matricea FB TFD apare ca o linie constantă în timp pe toate binurile de frecvență (este staționară în planul timp-frecvență).

Presupunând că semnalul de interferență nu este corelat cu chirpul transmis (de exemplu, un chirp cu o pantă diferită), interferența va prezenta o semnătură non-staționară în FB TFD al semnalului comprimat în distanță.

Următorul pas în lanțul de procesare a semnalului afectat de interferență implică sortarea fiecărei linii constante în timp din matricea distribuției timp-frecvență în ordine crescătoare, ceea ce plasează interferența în partea dreaptă a planului timp-frecvență.

Ulterior, profilul în distanță fără interferență este obținut prin sumarea coerentă de-a lungul axei de frecvență a primelor $q\%$ din bin-urile de frecvență din distribuția sortată (bin-uri identificate ca neafectate de interferență).

6.2.2 Rezultate experimentale

Metoda propusă a fost testată pe datele SAR brute afectate de interferențe de radio-frecvență capturate de satelitul Sentinel-1 deasupra orașului Doha, Qatar, pe 26.04.2021.

Conform [3], sursa interferenței a fost un radar al Sistemului de Rachete Patriot care opera în Damman, Arabia Saudită. Când un sistem radar funcționează în banda C, Sentinel-1 primește nu doar reflexia undelor radio emise de acesta, ci și undele radio emise de radarul bazat pe sol. Aceasta se manifestă de obicei ca o bandă strălucitoare de interferență în imaginea SAR, perpendiculară pe traiectoria orbitală a satelitului.

Figura 6.2a, care ilustrează cazul cu interferență, este evident că interferența afectează partea sudică a Doha. În contrast, Figura 6.2b demonstrează succesul aplicării metodei propuse pentru suprimarea interferenței bazată pe bazată pe FB-TFD, în regiunea afectată de RFI.

6.2.3 Compararea Performanței Metodelor de Atenuare a Interferenței: FB-TFD și Statistici de Ordine versus Zeroing

Compararea performanțelor metodei bazată pe FB-TFD și a metodei Zeroing s-a realizat prin compararea spectrelor semnalului obținut după aplicarea metodelor așa cum este exemplificat în Figura 6.3. Aici, se poate observa ca ambele metode reduc interferența, însă atunci când este aplicată metoda FB-TFD se obține un rezultat mai bun decât în cazul aplicării metodei Zeroing.

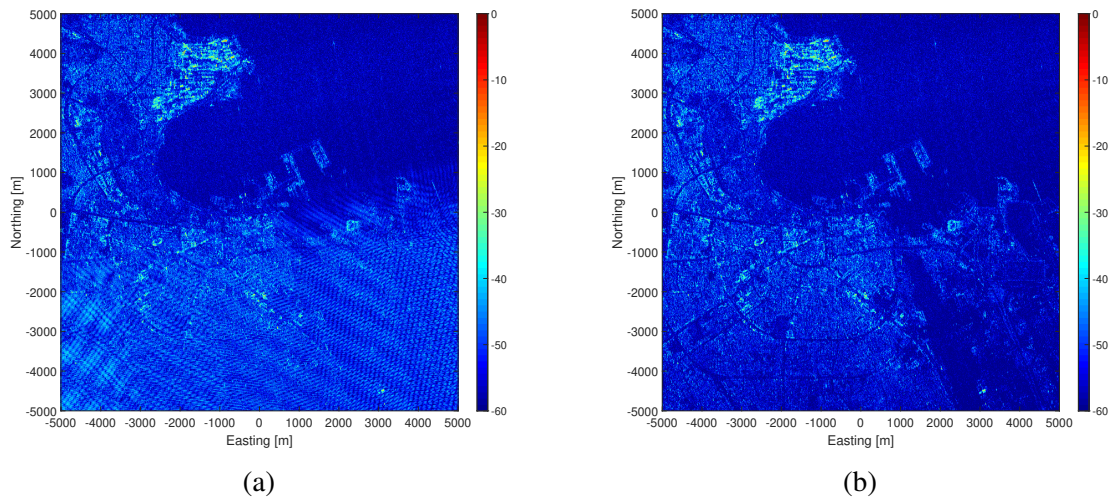


Figura 6.2 Imaginea focusată din setul de date de la Sentinel 1 achiziționat în 26.04.2021 peste orasul Doha din Qatar: (a) cu interferență, (b) fără interferență.

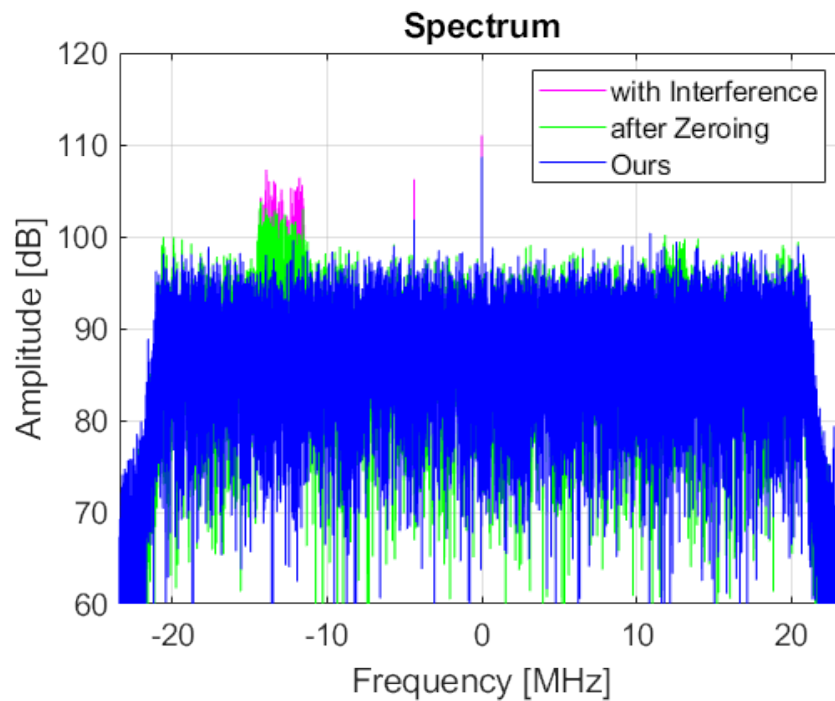


Figura 6.3 Spectrul semnalului comprimat in distanță înainte și după ce au fost aplicate metodele FB-TFD respectiv Zeoring

Capitolul 7

Concluzii

În cadrul acestei teze, am abordat provocările legate de interferențele ce apar la radarele FMCW și SAR, subliniind importanța și complexitatea gestionării acestora, în aplicațiile din industria auto și în multiplele aplicații în care radarul cu apertură sintetică este utilizat. Pentru radarul FMCW, interferențele pot induce erori de măsurare prin suprapunerea semnalelor reflectate, ceea ce poate duce la detectarea falsă a țintelor sau la creșterea nivelului de zgomot. În cazul radarului SAR, interferențele pot afecta calitatea imaginilor prin distorsionarea semnalelor, reducând claritatea și rezoluția imaginii finale.

În cadrul tezei, am prezentat o serie de metode și algoritmi care contribuie la reducerea impactului interferențelor, inclusiv tehnici de detectare și suprimare bazate pe analiza semnalului, precum și abordări bazate pe utilizarea rotirii polarizării. De asemenea, am examinat efectele acestor metode asupra preciziei și fiabilității măsurărilor, evidențiind cum soluțiile propuse pot rezolva eficient problemele de interferență întâmpinate în radarul FMCW și SAR.

7.1 Rezultate obținute

În **Capitolul 4** este prezentată o metodă nouă de eliminare a interferențelor în domeniul radarului FMCW din industria automotive, metodă ce a fost publicată în [17] și [18] (după ce metoda a fost implementată pe senzorul radar AWR1843 în timp real).

În **Capitolul 5** este prezentată o metodă de eliminarea a interferențelor bazată pe rotirea polarizării, ce a fost publicată în [20].

În **Capitolul 6** este propusă o nouă metodă de eliminarea a interferențelor la radarele SAR, ce se bazează pe FB-TFD și Statistici de Ordine. Metoda a fost publicată în [19] unde a fost prezentată eficacitatea metodei propuse pentru îmbunătățirea calității imaginilor SAR de bandă C ale Sentinel-1, afectate de interferențe provenite de la un radar terestru din componența Sistemului de Rachete Patriot.

7.2 Contribuții originale

1. Am dezvoltat o nouă metodă de eliminarea a interferențelor de radio-frecvență la radarele FMCW din industria automotive, ce se bazează pe Transformata Fourier pe termen scurt și Statistici de ordine. Metoda a fost prezentată la conferința Radar Conf din New York in 2022 [17]
2. Am realizat o comparație între performanțele a șase metode de eliminare a interferențelor de radio-frecvență pentru radarele FMCW din industria automotive. Rezultatele obținute au fost publicate în [16]
3. Am realizat implementarea în timp real pe senzorul radar AWR1843 a metodei ce se bazează pe Transformata Fourier pe termen scurt și Statistici de ordine [18].
4. Am analizat modul în care sunt suprimate interferențele în cazul utilizării metodei bazate pe rotirea polarizării și am făcut o analiză a impactului funcționării împreună a metodelor analitice cu metoda bazată pe polarizare. Metoda a fost prezentată la conferința ATOMS2024 unde lucrarea a primit premiul de "Excelent Paper" [20]
5. Am dezvoltat o nouă metodă de eliminare a interferențelor la radarul cu apertură sintetică SAR ce se bazează pe FB-TFD și statistici de Ordine. Metoda a fost prezentată în cadrul conferinței IGARS2024 [19].

7.3 Lista lucrărilor originale

Rapoarte de cercetare:

1. **Primul raport de cercetare** - Sintează privind echipamentele RADAR de pe autovehicule
2. **Al doilea raport de cercetare** - Eliminarea interferențelor la radarele automotive utilizând o metodă ce se bazează pe Transformata Fourier pe termen scurt și Statistici de Ordine.
3. **Al treilea raport de cercetare** - Evaluarea metodelor de eliminarea a interferențelor utilizând date reale
4. **Al patrulea raport de cercetare** -Rezultate experimentale pentru atenuarea interferențelor la radarul FMCW utilizând diferite metode

Lista lucrărilor publicate:

1. R. Muja, A. Anghel, R. Cacoveanu and S. Ciochina, "Interference Mitigation in FMCW Automotive Radars using the Short-Time Fourier Transform and L-Statistics," 2022 IEEE Radar Conference (RadarConf22), New York City, NY, USA, 2022, pp. 1-6, doi: 10.1109/RadarConf2248738.2022.9764271.

2. R. Muja, A. Anghel, R. Cacoveanu and S. Ciochina, "Assessment of RF interference mitigation methods for automotive radars using real data," 2022 14th International Conference on Communications (COMM), Bucharest, Romania, 2022, pp. 1-5, doi: 10.1109/COMM54429.2022.9817371.
3. R. Muja, A. Anghel, R. Cacoveanu and S. Ciochina, "Real-Time Interference Mitigation in Automotive Radars Using the Short-Time Fourier Transform and L-Statistics," in IEEE Transactions on Vehicular Technology, doi: 10.1109/TVT.2024.3400625
4. R. Muja, A. Anghel, R. Cacoveanu and S. Ciochina, "SAR Interference Mitigation using a Filter Bank Time-Frequency Distribution and L-Statistics," IGARSS 2024 - 2024 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Athens, Greece, 2024, pp. 7938-7942, doi: 10.1109/IGARSS53475.2024.10641830.
5. R. Muja, A. Anghel, and S. Ciochina, "RFI mitigation method based on polarization rotation for automotive FMCW radars", "ATOMS 20024 - The 2024 IEEE Conference on Advanced Topics on Measurement and Simulation (ATOMS),28-30 August, 2024, Constanța, România

7.4 Perspective de dezvoltare ulterioară

În continuare, vor fi prezentate cinci direcții principale de cercetare care vizează optimizarea și adaptarea metodelor de eliminare a interferențelor în sistemele radar FMCW și SAR. Fiecare dintre aceste direcții propune o abordare inovatoare care ar putea conduce la rezultate semnificative în suprimarea interferențelor la radarele FMCW și SAR.

1. **Optimizarea metodei bazate pe STFT și Statistici de Ordine folosind diferite tipuri de ferestre:**
2. **Evaluarea implementării în timp real a metodei bazate pe STFT și L-Statistics cu integrarea unui senzor LIDAR**
3. **Analiza performanței metodei de eliminare a interferențelor la radarele FMCW bazată pe polarizare în prezența interferenței corelate**
4. **Aplicarea metodei bazate pe FB-TFD și Statistici de ordin L pe imaginea focusată la radarele SAR**
5. **Realizarea unei comparații detaliate a performanțelor metodei bazate pe FB-TFD și Statistici de Ordine, cu alte metode state-of-the-art utilizate în suprimarea interferențelor la radarul cu apertură sintetică.**

Bibliografie

- [1] Aa Sørensen, K., Heiselberg, P., Kusk, A., and Heiselberg, H. (2023). Radio Frequency Interference in Synthetic Aperture Radar Images. In *IGARSS 2023 - 2023 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*, pages 2145–2148.
- [2] Aydogdu, C., Keskin, M. F., Garcia, N., Wymeersch, H., and Bliss, D. W. (2021). Radchat: Spectrum sharing for automotive radar interference mitigation. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 22(1):416–429.
- [3] Ballinger, O. (2022). Radar Interference Tracker: A new Open Source Tool to Locate Active Military Radar System. *Missile Defense Satellite imagery*.
- [4] Bechter, J., Sippel, C., and Waldschmidt, C. (2016). Bats-inspired frequency hopping for mitigation of interference between automotive radars. In *2016 IEEE MTT-S International Conference on Microwaves for Intelligent Mobility (ICMIM)*, pages 1–4.
- [5] Brooker, G. M. (2007). Mutual interference of millimeter-wave radar systems. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 49(1):170–181.
- [6] Cesar Iovescu, S. R. (2020). *The fundamental of milimeter wave sensors*. Texas Instruments.
- [7] Druml, N., Ryabokon, A., Schorn, R., Koszescha, J., Ozols, K., Levinskis, A., Novickis, R., Nigussie, E., Isoaho, J., Solmaz, S., Stettinger, G., Diaz, S., Marcano, M., Villagra, J., Medina, J., Schwarz, M., Artuñedo, A., Comi, M., Beekelaar, R., Özçelik, O., Taşdelen, E. A., Gürbüz, Y., Saijets, J., Kynnäräinen, J., Morits, D., Debaille, B., Rykunov, M., Escamilla, J., Vanne, J., Korhonen, T., Holma, K., Matzhold, E.-M., Novara, C., Tango, F., Burgio, P., Calafiore, G., Karimshoushtari, M., Boulay, E., Dhaens, M., Praet, K., Zwijnenberg, H., Palm, H., Ortega, D. A., Kalali, E., Pensala, T., Kyytinen, A., Larsen, M., Veledar, O., Macher, G., Lafer, M., Giraudi, L., Reckenzaun, J., Hammer, D., Mohan, N., Schmid, J., Höß, A., Ophir, S., Dubey, A., Fuchs, J., Lübke, M., Anghel, A., Ristea, N.-C., Törngren, M., Musralina, A., Harter, M., Jose, J. M., and Dimitrakopoulos, G. (2021). Programmable systems for intelligence in automobiles (prystine): Final results after year 3. In *2021 24th Euromicro Conference on Digital System Design (DSD)*, pages 268–277.
- [8] Huang, Y., Zhang, R., Liu, J., Hao, Z., Liao, G., and Hong, W. (2022). A Fast RFI Mitigation Approach via Alternating Projection in Real SAR Data. In *2022 3rd URSI Atlantic and Asia Pacific Radio Science Meeting (AT-AP-RASC)*, pages 1–4.
- [9] III, J. O. S. (2011). *Spectral Audio Signal Processing*. W3K Publishing.
- [10] Kunert, M., Bodereau, F., Goppelt, M., Fischer, C., John, A., Wixforth, T., Ossowska, A., Schipper, T., and Pietsch, R. (2010). D1.5 - Study on the state-of-the-art interference mitigation technique, MOre Safety for All by Radar Interference Mitigation (MOSARIM) project. Technical report, Robert Bosch GmbH.

- [11] Laghezza, F., Jansen, F., and Overvest, J. (2019). Enhanced interference detection method in automotive fmcw radar systems. In *2019 20th International Radar Symposium (IRS)*, pages 1–7.
- [12] Lai, S., Liu, Y., Tao, M., Su, J., and Wang, L. (2023). Detecting and Mitigating Radio Frequency Interference Artifacts via Tensor Decomposition of Multi-Temporal SAR Images. In *2023 XXXVth General Assembly and Scientific Symposium of the International Union of Radio Science (URSI GASS)*, pages 1–4.
- [13] Li, J., Tao, M., Zhang, X., Su, J., Fan, Y., and Wang, L. (2021). A Semantic Cognition Enhancement Network for Interference Detection in Sentinel-1 SAR Image. In *2021 CIE International Conference on Radar (Radar)*, pages 1923–1926.
- [14] Li, N., Lv, Z., and Guo, Z. (2022a). Observation and Mitigation of Mutual RFI Between SAR Satellites: A Case Study Between Chinese GaoFen-3 and European Sentinel-1A. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 60:1–19.
- [15] Li, N., Lv, Z., and Guo, Z. (2022b). Pulse RFI Mitigation in Synthetic Aperture Radar Data via a Three-Step Approach: Location, Notch, and Recovery. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 60:1–17.
- [16] Muja, R., Anghel, A., Cacoveanu, R., and Ciochina, S. (2022a). Assessment of rf interference mitigation methods for automotive radars using real data. In *2022 14th International Conference on Communications (COMM)*, pages 1–5.
- [17] Muja, R., Anghel, A., Cacoveanu, R., and Ciochina, S. (2022b). Interference mitigation in fmcw automotive radars using the short-time fourier transform and l-statistics. In *2022 IEEE Radar Conference (RadarConf22)*, pages 1–6.
- [18] Muja, R., Anghel, A., Cacoveanu, R., and Ciochina, S. (2024a). Real-time interference mitigation in automotive radars using the short-time fourier transform and l-statistics. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, pages 1–16.
- [19] Muja, R., Anghel, A., Cacoveanu, R., and Ciochina, S. (2024b). Sar interference mitigation using a filter bank time-frequency distribution and l-statistics. In *IGARSS 2024 - 2024 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*, pages 7938–7942.
- [20] Muja, R., Anghel, A., and Ciochina, S. (2024c). Rfi mitigation method based on polarization rotation for automotive fmcw radars. In *The 2024 IEEE Conference on Advanced Topics on Measurement and Simulation (ATOMS)*.
- [21] Natsuaki, R., Motohka, T., Watanabe, M., Shimada, M., and Suzuki, S. (2017). An Autocorrelation-Based Radio Frequency Interference Detection and Removal Method in Azimuth-Frequency Domain for SAR Image. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 10(12):5736–5751.
- [22] Ristea, N.-C., Anghel, A., and Ionescu, R. T. (2020). Fully convolutional neural networks for automotive radar interference mitigation. In *2020 IEEE 92nd Vehicular Technology Conference (VTC2020-Fall)*, pages 1–5.
- [23] Ristea, N.-C., Anghel, A., and Ionescu, R. T. (2021). Estimating the magnitude and phase of automotive radar signals under multiple interference sources with fully convolutional networks. *IEEE Access*, 9:153491–153507.

- [24] S, S. N. T., S, V. G., Pardhasaradhi, B., and Srihari, P. (2022). Sar imaging with automotive radar: Range migration algorithm, experiment, and future directions in automotive vehicle. In *2022 IEEE 7th International Conference on Recent Advances and Innovations in Engineering (ICRAIE)*, volume 7, pages 382–387.
- [25] Sørensen, K. A., Kusk, A., Heiselberg, P., and Heiselberg, H. (2023). Finding ground-based radars in sar images: Localizing radio frequency interference using unsupervised deep learning. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 61:1–15.
- [26] Tao, M., Li, J., Fan, Y., Su, J., Wang, L., and Huang, Y. (2020). Effects of interference on synthetic aperture radar measurements: An illustrative example. In *2020 XXXIIIrd General Assembly and Scientific Symposium of the International Union of Radio Science*, pages 1–4.
- [27] Tao, M., Zhou, F., and Zhang, Z. (2016). Wideband Interference Mitigation in High-Resolution Airborne Synthetic Aperture Radar Data. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 54(1):74–87.
- [28] Toth, M., Rock, J., Meissner, P., Melzer, A., and Witrisal, K. (2021). Analysis of automotive radar interference mitigation for real-world environments. In *2020 17th European Radar Conference (EuRAD)*, pages 176–179.
- [29] Wang, Y., Huang, Y., Wen, C., Zhou, X., Liu, J., and Hong, W. (2023). Mutual interference mitigation for automotive fmcw radar with time and frequency domain decomposition. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 71(11):5028–5044.
- [30] Wei, J., Huang, L., Tong, P., Tan, B., Bai, J., and Wu, Z. (2020). Realtime multi-target vital sign detection with 79ghz fmcw radar. In *2020 IEEE MTT-S International Wireless Symposium (IWS)*, pages 1–3.
- [31] Wu, Y., Hou, Y. T., Li, A., and Lou, W. (2023). Real-time interference mitigation for automotive radar. In *2023 IEEE Radar Conference (RadarConf23)*, pages 1–6.
- [32] Xu, Z. (2023). Bi-level ll optimization-based interference reduction for millimeter wave radars. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 24(1):728–738.
- [33] Yang, H., Tao, M., Chen, S., Xi, F., and Liu, Z. (2021). On the Mutual Interference Between Spaceborne SARs: Modeling, Characterization, and Mitigation. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 59(10):8470–8485.
- [34] Yang, H., Yang, J., and Liu, Z. (2023). Localizing Ground-Based Pulse Emitters via Synthetic Aperture Radar: Model and Method. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 61:1–14.
- [35] Zhang, H., Wei, S., Wang, M., Hu, Y., Shi, J., and Cui, G. (2024). Fuas-net: Feature-oriented unsupervised network for fmcw radar interference suppression. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 72(4):2602–2619.
- [36] Zhang, H., Wei, S., Wang, M., and Shi, J. (2022). An interference suppression method for spaceborne sar image via space-channel attention network. In *2022 3rd China International SAR Symposium (CISS)*, pages 1–5.