



**UNIVERSITATEA POLITEHNICA
DIN BUCUREȘTI**



**Școala Doctorală de Electronică, Telecomunicații
și Tehnologia Informației**

Decizie nr. 908 din 15-09-2022

REZUMAT TEZĂ DE DOCTORAT

Ing. Filip Alexandru ROȘU

**STUDIUL AL CONFIGURATIILOR SAR
MULTISTATIC**

**A STUDY ON MULTISTATIC SAR
CONFIGURATIONS**

COMISIA DE DOCTORAT

Prof. Dr. Ing. Gheorghe BREZEANU Politehnica Univ. of Bucharest	Peședinte
Prof. Dr. Ing. Mihai DATCU Politehnica Univ. of Bucharest	Conducător de Doctorat
Prof. Dr. Marwan YOUNIS Karlsruher Institut für Technologie	Referent
Prof. Dr. Emanuel PUȘCHIȚĂ Technical Univ. of Cluj-Napoca	Referent
Conf. Dr. Ing. Andrei ANGHEL Politehnica Univ. of Bucharest	Referent

BUCUREȘTI 2022

Conținut

1. Introducere	1
1.1 Domeniul tezei de doctorat	1
1.2 Obiectivele tezei de doctorat.....	1
1.3 Conținutul original al tezei de doctorat	2
2. Focalizarea Aperturilor Multiple in sistemele de tip SAR Bistatic.....	3
2.1 Focalizarea folosind aperturi multiple	3
2.2 Detecția Țintelor Stabile	7
3. Eliminarea Propagării Multiple în Sisteme SAR Multistatice	9
3.1 Eliminarea Propagării Multiple în sisteme SAR multistatice.....	9
3.2 Eliminarea Propagării Multiple în Transpondere	11
4. Radar cu Emisie Continua Modulat în Frecvență Multistatic	14
4.1 Oscilator Control in Tensiune Push-Push de bandă largă cu caracteristică liniară..	14
4.2 Filtru Recursiv pentru Divizarea Erorii Filtrelor Kalman	15
4.3 Metodă de Calibrare a Șirurilor de Antene în camp apropiat	16
5. Concluzii	18
5.1 Lista Contribuțiilor Originale	19
5.2.1 Aritcole de Jurnal	20
5.2.2 Articole de Conferință	20
5.2.3 Aplicații de Patent, submise la USPTO	21
5.3 Perspective și Direcții Viitoare	21
Referințe	22

1. Introducere

1.1 Domeniul tezei de doctorat

Radarul cu Aperture Sintentică (SAR) multistatic este o tehnologie emergentă cu beneficii până acum neegalat din multe puncta de vedere de alte metode de teledetecție, care este bazată pe transmiterea semnalelor de microunde. Oferă posibilitatea observațiilor terestre independent de condițiile meteo și de perioadele zi/noapte și permite folosirea unor tehnici avansate cum ar fi interferometria în timp real de-a lungul aceleiasi orbite sau orbitei incrucisate pentru modelarea digitală a elevației, analiza îmbunătățită a oceanelor, și realizarea imaginilor SAR cu rezoluție ridicată. Misiunile existente, cum ar fi TanDem-X, au oferit deja o idee asupra posibilităților oferite de SAR multistatic, dar cu toate acestea, distanța mică de doar câțiva km dintre sateliți limitează performanța ce poate fi obținută. O viitoare misiune cu distanță între sateliți mai mare (>200 km), numită Harmony, este destinată să fie lansată în premieră ca prima misiune SAR multistatică de observare a Pământului, pentru a completa metodele actuale de teledetecție și pentru a permite capabilități de detectare interferometrică în timp real nemaiîntâlnite până acum. Sateliții Harmony vor fi echipați cu receptoare SAR pasive și vor folosi sateliții Sentinel existenți ca transmițător oportunist.

1.2 Obiectivele tezei de doctorat

Această teză se concentrează pe imagistică SAR bistatic folosind Sentinel 1 ca transmițător oportunist și COBIS [1] ca receptor la sol. Sunt abordate mai multe aspecte, cum ar fi extrapolarea golurilor din apertura sintetică pentru a crește rezoluția în azimut, detectia tintelor stabile din sub-aperturi, tehnici de atenuare a căilor multiple din apropiere pentru a rezolva cuplarea nedorită a canalului de sincronizare cu imaginea, un oscilator controlat de tensiune de banda largă (VCO) pentru sisteme SAR multistatice de tip FMCW cu putere redusă și dimensiuni reduse, cu rezoluție înaltă, și diferite tehnici de calibrare a ariilor de antene fazate și a transponderelor. Activitatea viitoare este de a adapta metodele și tehnicile nou dezvoltate la sisteme SAR multistatice aeropurtate și spațiale, cum ar fi Harmony, sau misiuni similare care ar putea exista în viitor.

Motivația de a alege SAR multistatic ca subiectul principal al tezei mele, a fost importanța subiectului. Multistatic SAR este o tehnologie emergentă care a fost studiată în profunzime la nivel de concept în ultimele două decenii, dar a fost introdusă doar recent în practică și în industrie. Configurațiile care utilizează un singur emițător de

înalță performanță și mai mulți receptori pasivi, sunt de interes deosebit deoarece prezintă o soluție elegantă și rentabilă de implementare a unui sistem SAR multistatic.

1.3 Conținutul original al tezei de doctorat

Lucrarea originală prezentată în această teză poate fi clasificată în trei părți.

Prima parte este un studiu privind posibilitățile de îmbunătățire a rezoluției încrucișate într-un sistem SAR multistatic prin captarea semnalului de la TX din lobi lateralii ai antenei, cât și din semnalul capturat de la regiunile adiacente. Rezultatele experimentale și analitice dovedesc caracterul practic al metodologiei propuse. Un nou algoritm de detecție CFAR (rata de alarma falsă constantă) este prezentat și aplicat ca o schemă de detecție a tintelor stabile, pentru îmbunătățirea analizei aperturilor multiple.

A doua parte este un studiu asupra efectului de cuplare găsit între canalul de sincronizare și canalul de imagistică al receptoarelor SAR multistatice pasive. O metodologie nouă este propusă folosind filtre adaptate ca mijloc de deconvoluție în domeniul timp, capabil să elimine interferențele de căi multiple. Sistemele SAR folosesc în general ținte active pentru calibrare, cum ar fi transponderele, care sunt, de asemenea, susceptibile la aceleași erori. Metoda este evaluată experimental și analitic pentru ambele aplicații.

A treia parte este un studiu privind fuziunea SAR multistatic și radarul FMCW. Este prezentată o nouă arhitectură VCO concepută pentru a îmbunătăți sistemele multistatice FMCW SAR plasate pe UAV pentru detectarea de înaltă rezoluție, la distanță apropiată. În continuare, este prezentat un filtru Kalman eficient, adaptat pentru radar, care poate fi utilizat pentru a îmbunătăți sincronizarea TX-RX, necesară pentru SAR multistatic. În cele din urmă, este prezentată o tehnică de calibrare a ariei de antene făcute în câmp apropiat, care poate fi utilizată pentru calibrarea sistemului MIMO-SAR pe teren, fără a demonta senzorul radar sau vreuna dintre antene.

2. Focalizarea Aperturilor Multiple in sistemele de tip SAR Bistatic

În acest capitol este propusă o metodologie [2] pentru sistemele SAR multistatice, care realizează focalizarea azimutală a datelor radar cu deschidere sintetică bistatică (SAR) de la emițător-receptorul staționar aflat în spațiu pe mai multe deschideri de-a lungul căii pentru a crește rezoluția azimutală. Procedura folosește informația de la mai multe sub-aperturi (fiecare sub-apertura constă într-un set de impulsuri radar comprimate în distanță) de la unul sau mai multe trenuri de impulsuri generate de satelit și cuprinde următoarele etape: compensarea caracteristicii de radiație a antenei, re-eșantionarea în timp lent, reconstrucția eșantioanelor de azimut ce lipsesc între seturi învecinate de impulsuri folosind un model auto-regresiv (AR) și de asemenea folosind algoritmul back-projection pentru focalizarea imaginii radar. Este propusă o metodă nouă, foarte eficientă, pentru a estima ordinea optimă pentru modelul AR. Diferă de abordarea tradițională care utilizează criteriul informațional Akaike pentru a estima direct ordinea, deoarece metoda propusă estimează ordinea indirect prin detectarea numărului de ținte folosind analiza componentelor principale. Spatial Smoothing este utilizată pentru a obține o matrice de corelație inversabilă, ale cărei valori proprii sunt apoi analizate folosind criteriul Minimum Description Length. Ordinea optimă este un multiplu întreg al numărului de ținte, care depinde de SNR. Abordarea este evaluată cu date bistatice reale achiziționate pe o zonă a orașului București, România. De asemenea este prezentată o schema de detecție [3] de tip CFAR [4] pentru detecția tintelor stabile prezente în toate sub-aperturile.

2.1 Focalizarea folosind aperturi multiple

Atunci când Sentinel-1A/B care operează în modul de imagistică de observare a terenului prin scanări progresive (TOPSAR) este utilizat ca transmițător de oportunitate, un receptor staționar captează trenuri de impulsuri corespunzătoare sub-swath-ului în care este plasat receptorul, și de asemenea de la trenuri de impulsuri ce aparțin altor sub-swath-uri. În ambele cazuri, impulsurile primite pot fi impulsuri care au fost transmise prin fasciculul principal sau prin lobi lateralii ai antenei satelitului. Datele disponibile de la mai multe trenuri de impulsuri pot fi utilizate în diferite moduri pentru caracterizarea țintei prin exploatarea diversității prin azimut. Geometria imaginată este prezentată în Fig. 2.1.

În geometria SAR bistatică propusă, evoluția frecvenței azimutale este aproape liniară, așa cum se arată în Fig. 2.2. Motivul este că intervalul dintre scenă și receptor este constant, iar rata de schimbare a intervalului dintre receptor și transmițător este

foarte apropiată de rata de schimbare dintre emițător și scenă. Acest lucru ne permite să aproximăm semnalul ca o undă sinusoidală, care este o ipoteză cheie pentru tehnica propusă de reconstrucție a semnalului, prezentată în Fig. 2.3.

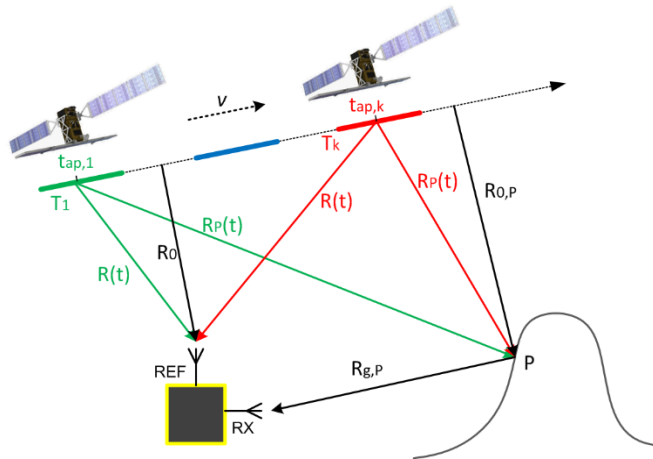


Figure 2.1 Ansamblul propus folosind un transmițător plasat în spațiu și un receptor plasat pe Pământ.

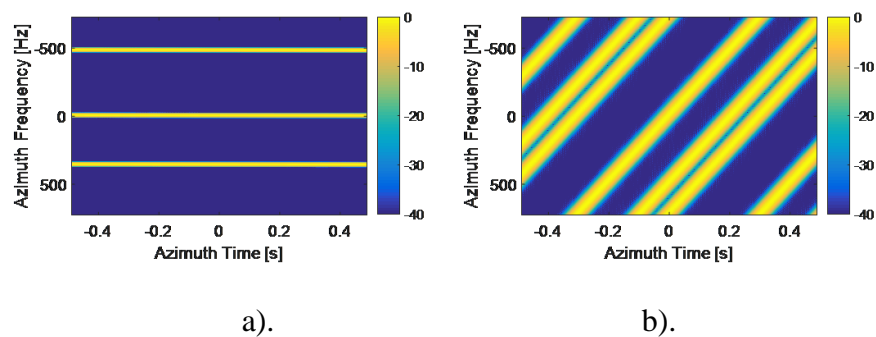


Figure 2.2 Spectrograma semnalului în dimensiunea azimut, a) 3Hz/in cazul sistemului SAR bistatic, b) 2400 Hz/s în cazul sistemului SAR monostatic

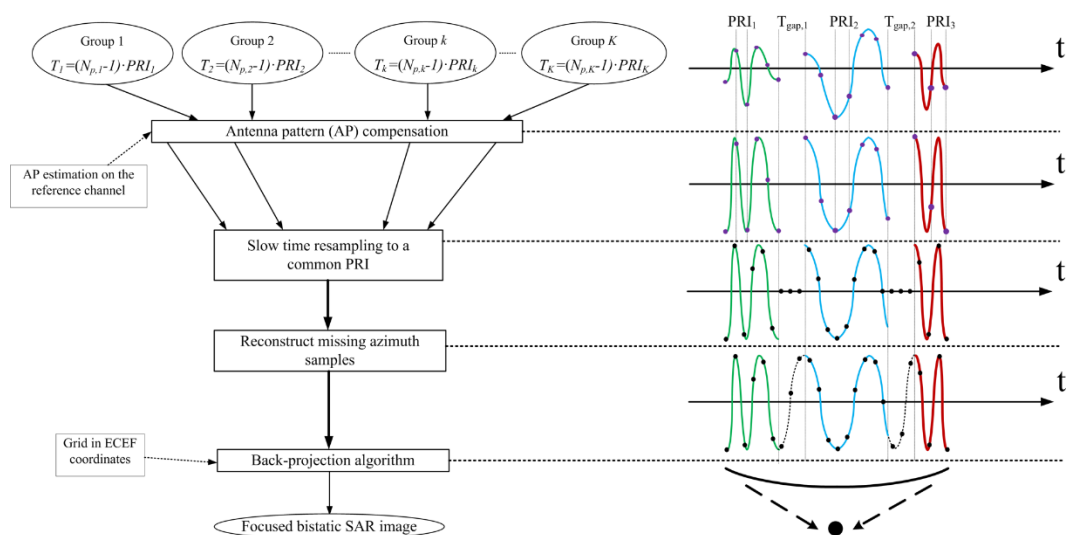


Figure 2.1 Diagrama metodei propuse pentru reconstrucția imaginii SAR din mai multe sub-aperturi.

Algorithm 2. 1: Lanțul de procesare a metodei propuse

Input: \mathbf{x}, SNR

Output: \mathbf{y}

Choose K, α_{SNR} based on system requirements

$\hat{\mathbf{R}}_s = FB\ Spatial\ Smoothing(\mathbf{x}, K)$

$\boldsymbol{\lambda} = EigenDecomposition(\hat{\mathbf{R}}_s)$

$\hat{N}_c = MDL(\boldsymbol{\lambda}, S)$

$\dim(\hat{\boldsymbol{\theta}}) = \alpha_{SNR} \hat{N}_c$

$\mathbf{y} = AR(\mathbf{x}, \dim(\hat{\boldsymbol{\theta}}))$

O abordare suficientă a fost propusă este de a estima numărul de reflexii provenite de la țintă în cadrul unei linii de azimut constant utilizând analiza componentelor principale (PCA - analiza componentelor principale) și principiul lungimii minime de descriere (MDL) și apoi construirea unui model bine adaptat folosind metoda Burg ce mai târziu a fost folosită pentru a extrapola mostrele lipsă în multi-apertura. MDL este o funcție de cost care constă din doi termeni, funcția de probabilitate și un termen de penalizare, utilizat pentru a evita supra-estimarea datelor.

$$MDL(\hat{\boldsymbol{\theta}}) = -\log\left(\left[L\left(\mathbf{X}\middle|m(\hat{\boldsymbol{\theta}})\right)\right]\right) + \eta \log(S) \quad (2.10)$$

Primul pas al abordării propuse este extragerea valorilor proprii ale matricei de covarianță. Deoarece există o singură achiziție disponibilă, se aplică algoritmul Spatial Smoothing, pentru a reduce rangul matricei de covarianță în scopul de a o face inversabilă, așa cum se arată în Fig. 2.4. Ulterior, cele mai semnificative valori proprii sunt găsite folosind MDL ca metodă de prag. Numărul de valori proprii este interpretat ca numărul de componente spectrale necesare pentru reconstrucție. În Fig. 2.11 se arată că metoda de estimare a modelului propusă oferă rezultate mai bune decât metodele tradiționale de estimare a ordinului, care pot fi să sub-adapteze, fie să supra-adapteze datele. Mai mult, utilizarea abordării propuse are ca rezultat o complexitate redusă, de aproximativ de 1000 ori față de metodele tradiționale. Câștigul de rezoluție în azimut oferit de metodologia de alipire a mai multor sub-aperturi, folosind tehnicile de procesare a semnalului propuse, poate fi observat vizual din Fig. 2.13, unde este comparat cu focalizarea cu o singură apertură.

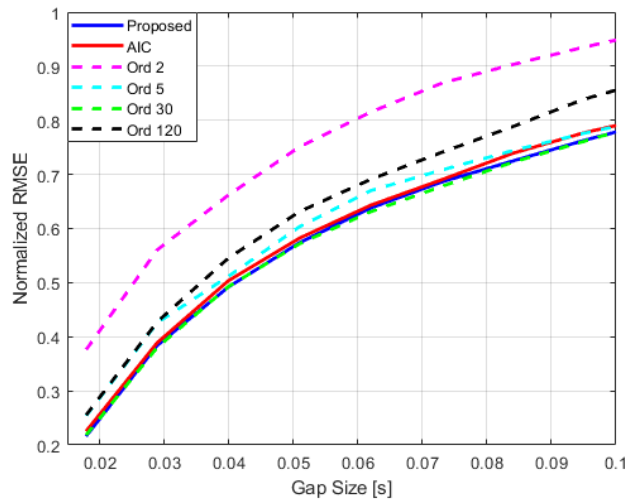
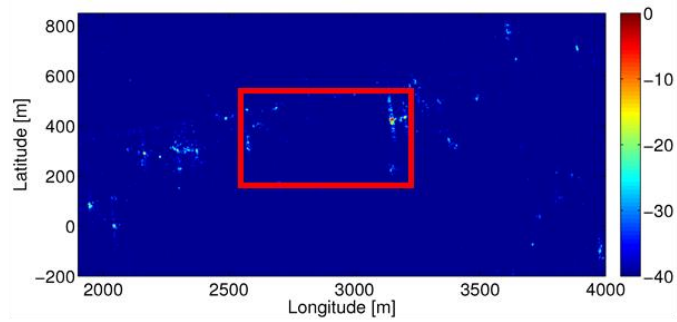


Figure 2.11 Eroarea RMS a semnalului reconstruit pentru diverse ordine ale modelului AR.



a)



b)



c)

Figure 2.13 Evaluarea performantei pentru metoda propusă. a) imaginea SAR reconstruită, b) Zoom-in a imaginii SAR originale, c) Zoom-in a imaginii SAR reconstruite din sub-aperturi multiple.

2.2 Detecția Țintelor Stabile

Detecția Țintelor stabile [5] poate oferi o perspectivă asupra zonelor care pot beneficia de focalizarea cu mai multe aperturi. Țintele care sunt stabile și coerente între toate sub-aperturile vor fi focalizate cu rezoluție maximă, în timp ce Țintele care nu sunt coerente și care pot fi văzute numai în cadrul unor anumite sub-aperturi nu vor fi focalizate cu o rezoluție maximă și mai mult vor produce artefacte în imaginea SAR. Metodologia de detectare a Țintelor permanente propusă se bazează pe construirea unor bit-map-uri generate în urma detectiilor CFAR pentru fiecare sub-apertură. Bit-map-ul final se produce aplicând logic-SI pe bit-map-urile fiecărei sub-aperturi. Un exemplu de prag CFAR este prezentat în Fig 2.16.

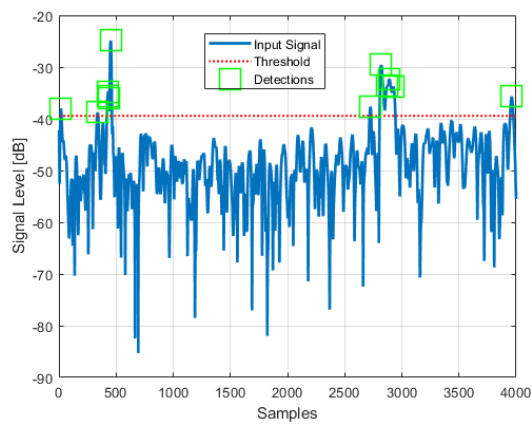
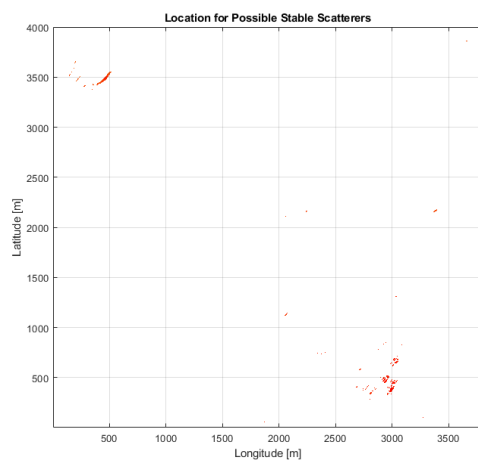
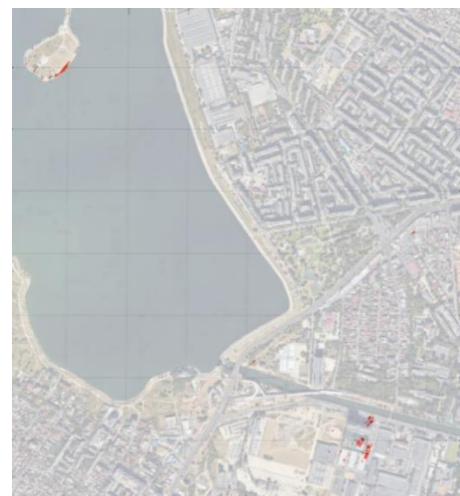


Figure 2.16 Aplicarea algoritmului CFAR care folosește Mediana-Mediilor pentru realizarea pragului de detecție pe datele achiziționate.

Țintele stabile ce pot fi regăsite în toate sub-aperturile sunt reprezentate în Fig 2.17.



a)



b)

Figure 2.17 a) Distribuția Țintelor stabile găsite folosind metoda propusă, b) Țintele sunt suprapuse peste imaginea optică a scenei preluată din Google Earth.

Algoritmul CFAR propus pentru detectarea țintelor stabile [4] este bazat pe aflarea unei statistici de tipul Mediana Mediilor și este prezentată în Fig. 2.20. Algoritmul a fost dezvoltat pentru a oferi o probabilitate mare de detectare chiar și în medii dense, pentru o probabilitate dată de alarma falsă. Există două aspecte noi, primul a fost găsierea unui prag analitic pentru datele trecute printr-un detector logaritmic, ecuația (2.30), iar al doilea constă în secvența de procesare prezentată în Fig. 2.20.

Ecuția (2.30) prezintă legătura dintre distribuția zgomotului termic trecut printr-un detector patric, z și cea a zgomotului trecut printr-un detector logaritmic, λ .

$$\log\left(\int_0^{\infty} z p_Z(z) dz\right) = \int_{-\infty}^{\infty} \lambda p_{\Lambda}(\lambda) d\lambda + \frac{1}{2} \log(\pi) \quad (2.30)$$

Folosind ecuația (2.30), se poate găsi pragul CA-CFAR dorit în funcție de probabilitatea dorită de alarmă falsă și dimensiunile ferestrei așa cum se arată în ecuația (2.31).

$$T_{CA(log)} = \log\left(N\left[P_{FA}^{-1/N} - 1\right]\right) + \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \lambda_n + \frac{1}{2} \log(\pi) \quad (2.31)$$

În continuare, folosind teorema limitei centrale se poate folosi mediana mediilor ca o măsură a puterii zgomotului, evitând în același timp regiunile din semnal care contin reflexii de la tinte, rezultând o estimare foarte precisă a pragului CFAR.

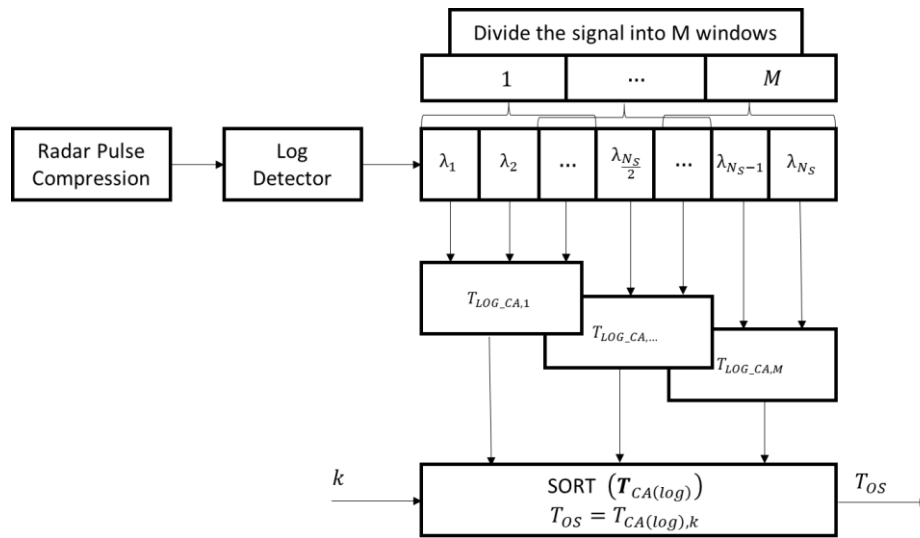


Figure 2. 2 Proposed Schema bloc al algoritmului CFAR propus.

3. Eliminarea Propagării Multiple în Sisteme SAR Multistatice

Acest capitol prezintă o metodologie bazată pe filtre adaptive-adaptate, care este utilizată pentru a atenua efectul căii multiple nedorite existente în sisteme radar multistatice sau în transpondere. Este o provocare să construiești fizic un receptor bistatic, în așa fel încât semnalul de referință să nu fie cuplat în semnalul recepționat, fie prin cuplare în circuite, fie prin reflexii de pe obiecte din vecinătatea receptorului. Datorită amplitudinii sale mult mai mari, semnalul de referință poate masca cu ușurință ținte din apropiere cu lobii săi laterali. O degradare similară a semnalului se observă la transponderele active care sunt utilizate pentru calibrarea sistemelor radar, atunci când există obiecte în vecinătatea lor, sau dacă antenele de TX și RX sunt cuplate. În acest capitol abordăm aceste două probleme: cuplarea dintre canalul de referință și canalul de imagistică și ecourile parazite prezente în răspunsul transponderului. Se propune o metodologie nouă care este capabilă să filtreze în domeniul timp componentele nedorite în timp real. Noutatea constă în combinarea filtrelor adaptate și adaptive ca mijloc de creștere a performanței și a estimării căilor multiple, rezultând o metodă de curățare a semnalului extrem de precisă. Metodologia propusă este evaluată experimental și optimizată pentru fiecare dintre cele două probleme menționate anterior. Lucrările originale prezentate în acest capitol au fost publicate în: [6] [7] [8].

3.1 Eliminarea Propagării Multiple în sisteme SAR multistatice

Geometria unui sistem SAR bistatic este ilustrată în Fig 3.1. Cuplajul și reflexiile nedorite sunt reprezentate cu roșu. Pentru a elimina efectul căilor multiple este folosit un filtru adaptat-adaptiv RLS plasat într-o configurație de estimare de canal, astfel încât coeficienții filtrului adaptiv, \mathbf{w} , să descrie canalul RF, \mathbf{h} . Schema bloc a filtrului propus este prezentată în Fig. 3.5. Odată ce coeficienții \mathbf{w} au fost estimați, semnalul de referință este convoluționat cu \mathbf{w} și scăzut din semnalul recepționat. Semnalul filtrat este prezentat în Fig. 3.10. Se arată că componentele mari din apropiere sunt filtrate, împreună cu lobii lor laterali asociați. Este demonstrat experimental că abordarea propusă este atât mai rapidă, cât și mai performantă decât abordarea tradițională folosind doar filtre adaptive în domeniul timp.

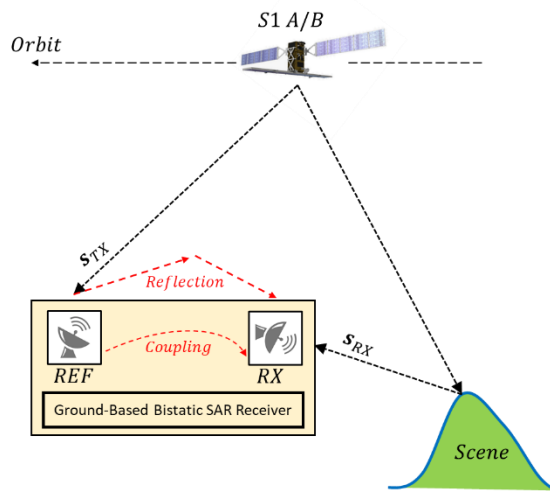


Figure 3.1 Ilustrarea unui sistem SAR bistatic afectat de cuplaj și propagare multiplă.

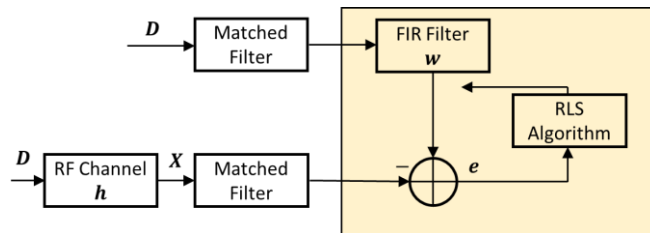


Figure 3.2 Schema bloc a metodei propuse folosind filtre adaptiv-adaptate adaptat pentru eliminarea propagării multiple.

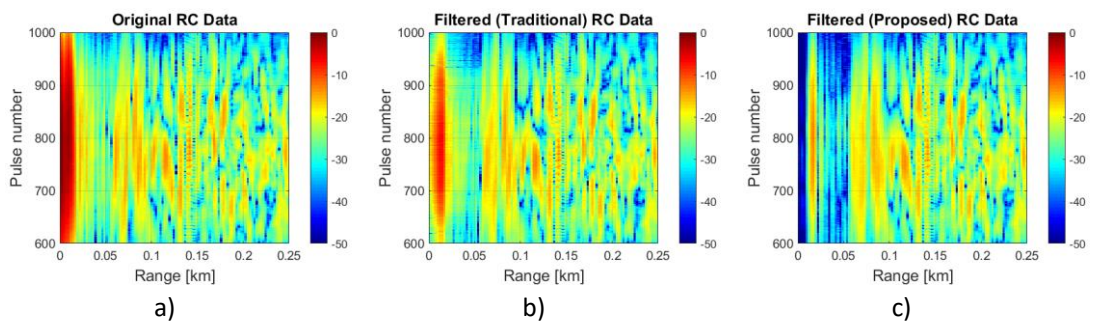


Figure 3.10 Imaginea comprimată în distanță, a) neprocesată, b) procesată folosind doar filtre adaptive, c) procesata folosind metoda propusa cu filtre adaptive si adaptate.

3.2 Eliminarea Propagării Multiple în Transpondere

Un transponder poate fi introdus în sistemul de la sol în scopuri de calibrare, așa cum se arată în Fig. 3.2. Și, în mod similar, cuplajul și propagarea prin căi multiple pot provoca degradarea performanței. Totuși, diferența este că modelul căii multiple în transponder nu mai urmează un model de medie mobilă, ci un model auto-regresiv. Pentru a rezolva acest lucru, filtrul adaptat-adaptiv propus este acum configurat ca un anulador de ecou, așa cum se arată în Fig. 3.6.

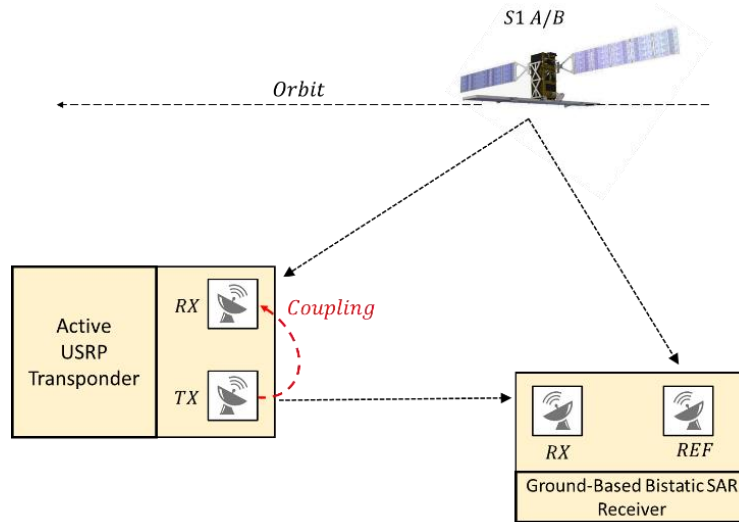


Figure 3.2 Ilustrarea cuplajului într-un sistem Radar-Transponder.

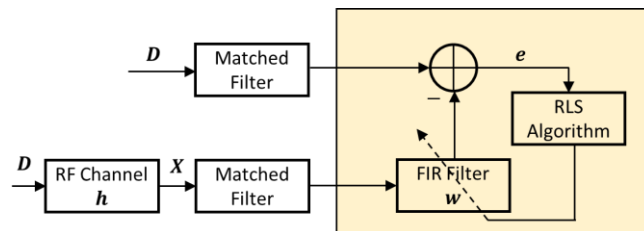


Figure 3.6 Schema bloc a metodei propuse folosind filtre adaptiv-adaptate pentru eliminarea reacției dintre TX și RX-ul transponderului.

Filtrul propus va modifica faza fiecărui impuls și o va seta la faza semnalului de referință, făcând imposibilă măsurarea evoluției fazei de la puls-la-puls, necesară pentru realizarea imaginii SAR. O soluție la această problemă este să configurăm filtrul să fie adaptiv numai pentru primul impuls, și iar pentru toate celelalte pulsuri coeficienții să fie statici. Schema bloc este reprezentată în Fig. 3.14.

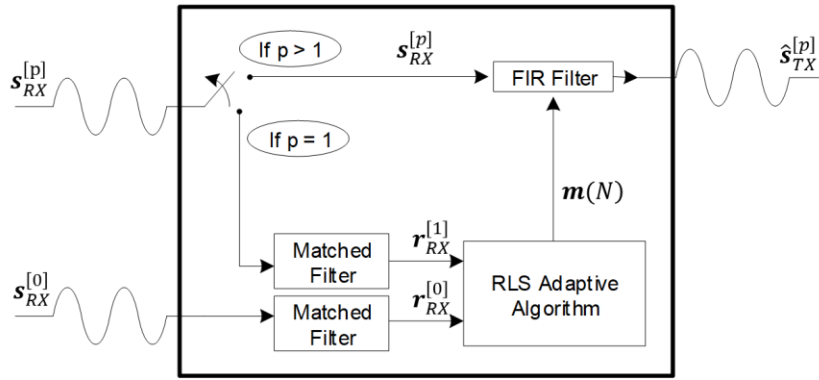


Figure 3.14 Schema bloc pentru implementarea propusă. $s_{RX}^{[p]}$ este semnalul recepționat de transponder, iar $s_{TX}^{[p]}$ este cel transmis.

Metoda ilustrată în Fig. 3.14 a fost implementată pe USRP, iar rezultatele experimentale sunt prezentate în [8]. Lobii nedorți au fost eliminați, așa cum se arată în figurile următoare. În Fig. 3.15, raportul teoretic lob principal-la-lob secundar este prezentat în funcție de SNR, folosind mai multe rezultate simulate Monte Carlo.

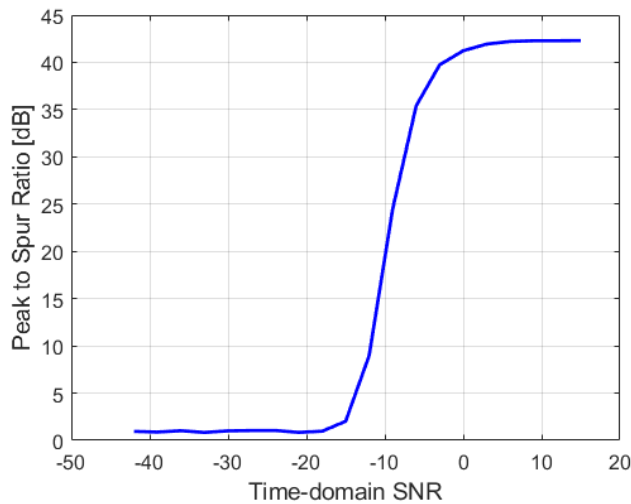


Figure 3.15 Raportul varf-lob secundar pentru metoda propusa la diferite valori ale raportului raport-zgomot.

Configurația experimentală este prezentată în Fig. 3.18 și 3.19. Răspunsul transponderului după focalizarea SAR, cu și fără metoda propusă implementată, este prezentat în Fig. 3.24. Coeficienții utilizați pentru filtrarea datelor au fost procesați cu o săptămână înainte de achiziția prezentată, arătând că abordarea propusă nu necesită actualizarea frecventă a coeficienților. Chiar și cu coeficienții vechi de o săptămână, raportul vârf-spur este îmbunătățit cu 10 dB în comparație cu nicio filtrare aplicată.

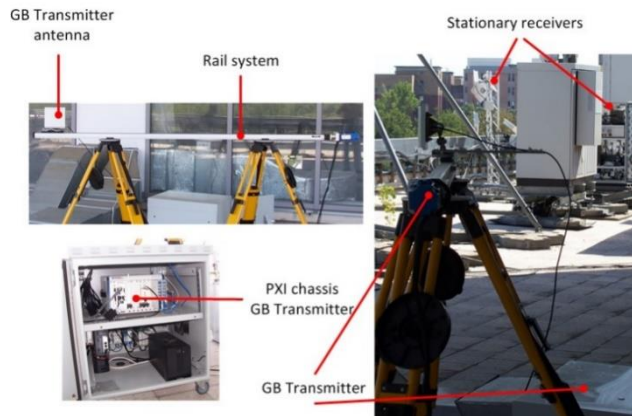


Figure 3.18 Imagini cu receptorul radarul bistatic poziționat pe clădirea rectoratului UPB.



Figure 3.19 Sistemul prezentat pe o imagine din Google Maps.

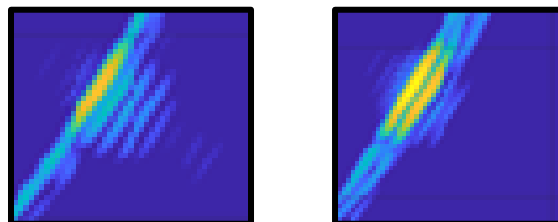


Figure 3.24 Raspunsul transponder-ului cu și fără procesarea propusă.

4. Radar cu Emisie Continua Modulat în Frecvență Multistatic

Sistemele radar cu undă continuă modulată în frecvență (FMCW) sunt în general utilizate pentru distanțe apropiate, folosind arhitecturi hardware rentabile și de consum redus. Astfel de radare pot obține cu ușurință lățimi de bandă mai mari decât sistemele radar cu impulsuri, dar sunt în general limitate din cauza multiplilor constrângeri de a funcționa în intervale de sub 10 km. Acest tip de radare sunt utilizate în principal în aplicații civile, cum ar fi auto și IoT, dar cu toate acestea, au fost folosite și pentru observații terestre, echipate pe platforme aeriene [9]. Acest capitol prezintă un nou design de oscilator controlat în tensiune, o versiune eficientă a filtrului Kalman și o metodă de calibrare a șirurilor de antene active folosite în sistemele FMCW SAR [10]. Rezultatele originale prezentate în acest capitol pot fi regăsite în publicațiile: [11] [12] [13] [14].

4.1 Oscilator Control in Tensiune Push-Push de bandă largă cu caracteristică liniară

În această secțiune [11] este prezentat un oscilator control în tensiune push-push de complexitate redusă care realizează o bandă reglabilă de peste 17%, cu o caracteristică MHz/V liniară. Spre deosebire de VCO-urile tradiționale, designul propus nu necesită componente dedicate de reactanță sensibile la tensiune, cum ar fi varactorii sau alți tranzistori. Frecvența este controlată cu tensiunea de polarizare a tranzistoarelor SiGe care sunt plasate în configurație push-push. VCO este implementat folosind componente discrete și ocupă 81 [mm]^2 pe PCB. Zgomotul de fază măsurat @1MHz este de -103 dBc/Hz , consumul mediu de energie este de 18 mW , puterea de ieșire RF este de -1 dBm și tensiunea de alimentare este de $3,3 \text{ V}$. Intervalul de reglare este de $5,15 \text{ GHz} - 6,15 \text{ GHz}$, iar figura de Merit cu acordare (FoMT) la frecvența centrală este -170 . Lățimea de bandă mare reglabilă se obține fără a utiliza tensiuni mai mari decât tensiunea de alimentare. Linearitatea și lățimea de bandă de reglare sunt evaluate prin implementarea designului într-un radar de imagine FMCW în bandă C de putere redusă.

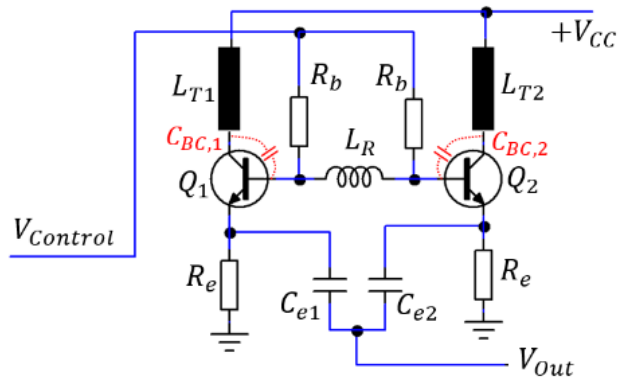


Figure 4.5 Schema circuitului propus. Frecvența este controlată de $V_{Control}$, tensiunea peste capacitățile parazite $C_{BC,1}$ și $C_{BC,2}$.

În continuare este prezentat un caz de utilizare a oscilatorului propus implementat într-un sistem radar pentru imagistică. În Fig. 4.11 două ținte sunt reprezentate în domeniul distanță [m] - Azimut [deg]. Antenele Horn de bandă largă RX utilizate în prototipul prezentat sunt distanțate la 85 mm, rezultând un câmp vizual non-ambiguu de ~ 80 grade și o rezoluție unghiulară $\delta\varphi \cong \frac{0,89\lambda}{D\cos(\varphi)}$ de ~ 40 grade. Două ținte sunt plasate la 2.2 și 3.2 metri, la 5 și respectiv -20 de grade.

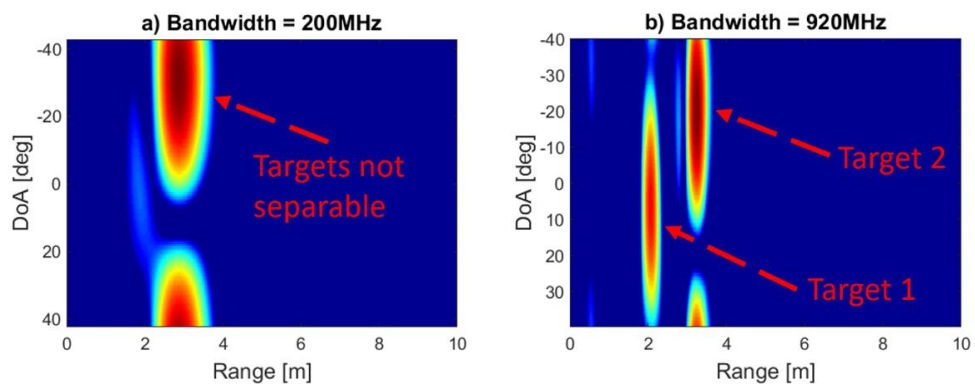


Figure 4.11 Reprezentarea a două ținte atunci când radarul operează cu două benzi de frecvență diferite a) 200 MHz, țintele nu sunt separabile, b) 920 MHz, țintele sunt separabile.

4.2 Filtru Recursiv pentru Divizarea Erorii Filtelor Kalman

În această secțiune [13] este prezentată o analiză în domeniul timp pentru filtrele digitale cu răspuns infinit la impuls utilizate în aplicațiile de urmărire, împreună cu modul în care un astfel de filtru poate fi utilizat ca estimator în timp discret ce este sincronizat cu achiziția. De exemplu, filtrul propus poate îmbunătăți performanța sistemelor de asistență pentru șofer bazate pe radar, precum și sincronizarea sistemului radar FMCW multistatic. Filtrul este responsabil pentru estimarea vitezei și accelerației

țintelor urmărite, care sunt apoi introduse într-un interval numai Kalman Filter (KF) Tracker. Fuziunea algoritmului propus cu cea a filtrului Kalman nu numai că reduce complexitatea de calcul, dar îmbunătățește și performanța. Spre deosebire de filtrele alfa-beta-gamma, prezenta metodă poate fi extinsă și la distribuții non-Gaussiene folosind filtrele Kalman extinse (EKF). Rezultatele sunt prezentate în Fig. 4.17 și 4.18

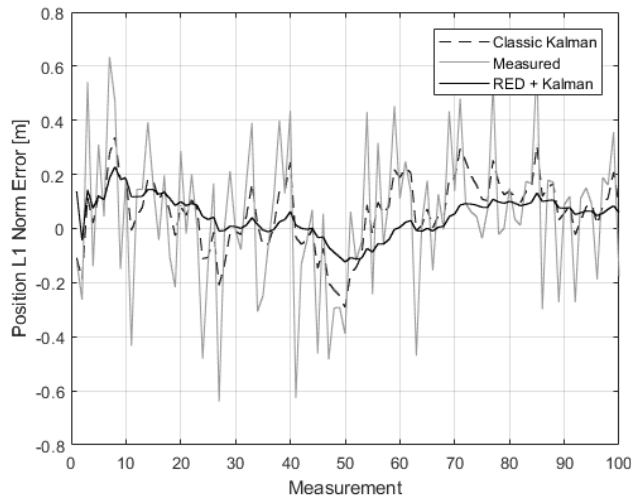


Figure 4.18 Erorile absolute ale estimării poziției pentru semnalul măsurat, filtrul Kalman, și metoda propusă.

4.3 Metodă de Calibrare a Șirurilor de Antene în camp apropiat

În această secțiune este prezentată o soluție de calibrare a șirurilor de antene în câmp apropiat. Metoda prezentată rezolvă cuplajul dintre elemente cât și diferențele de lungime ale traseelor conectate la fiecare element sau a câștigurilor în putere a acestora. Măsurătorile de câmp departat sunt mereu preferate, dar rareori posibile, motiv pentru care în practică majoritatea metodelor de calibrare funcționează în câmp apropiat. Acest tip de măsurători necesită dispozitive specializate de poziționare a antenei de referință pentru a estima corect fronturile de undă sferică.

Modelul semnalului recepționat este: $\mathbf{z} = (\mathbf{C}(\mathbf{x} \odot \mathbf{A})) \odot \mathbf{g} \odot \exp\left(j2\pi \frac{\mathbf{r}}{\lambda}\right)$

unde \mathbf{x} este semnalul dorit, \mathbf{A} conține informații despre faza și câștigul elementelor, \mathbf{g} reprezintă diferența de câștig dintre trasee, \mathbf{r} reprezintă diferența de lungime dintre trasee, și \mathbf{C} este matricea de cuplaj.

Odată ce elementele nedorite au fost estimate prin metoda de calibrare propusă,

$$\text{semnalul dorit este obținut astfel: } \mathbf{x} = \hat{\mathbf{C}}_{cal} \left(\mathbf{z} \odot \frac{1}{g} \odot \exp \left(2\pi j \frac{-\hat{r}}{\lambda} \right) \right)$$

Procedura de calibrare prin care se obțin parametri necesari rezolvării lui \mathbf{x} este parțial prezentată în Fig. 4.21, iar rezultatele simulate ale calibrării sunt prezentate în Fig. 4.25.

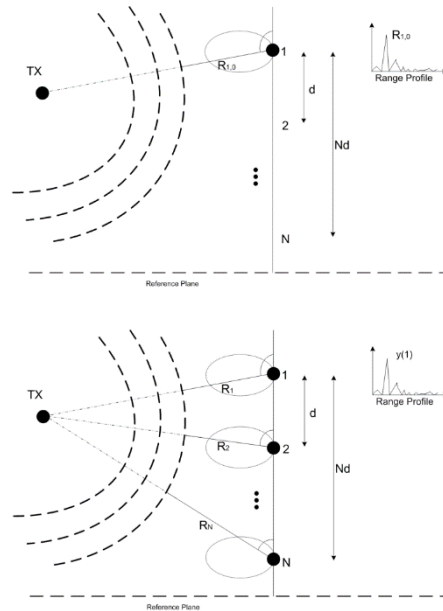


Figure 4.21 Ilustrare a masuratorilor necesare pentru procedura de calibrare.

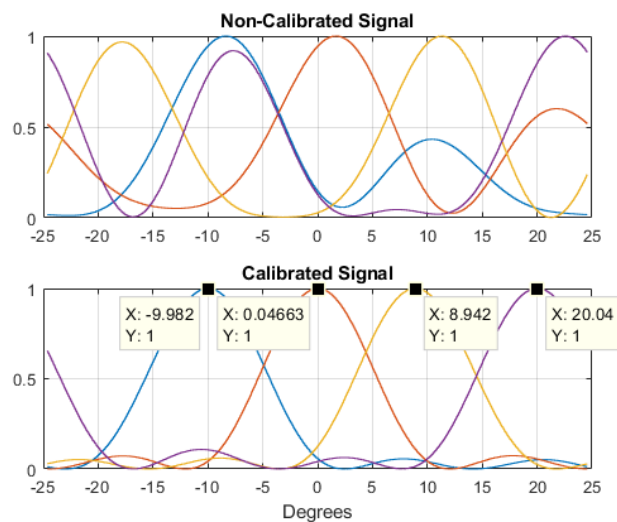


Figure 4.25 Rezultatul obținut în urma calibrării

5. Concluzii

Multistatic SAR este o tehnologie emergentă capabilă să ofere performanțe excepționale în comparație cu sistemele SAR tradiționale. Există totuși o serie mare de provocări în ceea ce privește sincronizarea, calibrarea și proiectarea sistemului, provocări ce trebuie abordate în așa fel încât un astfel de sistem să funcționeze corect. Puterea de calcul în continuă creștere și performanțele ridicate ale circuitelor cu semiconductori, au redus costurile pentru SAR multistatic, rezultând din ce în ce mai multe aplicații precum și domenii industriale ce beneficiază de aceasta tehnologie. Dintre toate aplicațiile, teledetecția EO (observații terestre) are cel mai mult de profitat de pe urma SAR multistatic, în principal din cauza amplitudinii geometriei. Aceasta constă în senzori plasați pe sateliți, pe avioane, precum și pe sol, ce permite utilizarea unei distanțe mari între emițător și receptor profitând la maximum de pe urma detectării și procesării multistatice a informațiilor.

În această teză a fost prezentat un studiu de SAR multistatic. Tehnicile și metodologiile originale din diverse domenii ale ingineriei, inclusiv procesarea semnalului, detectarea, estimarea, urmărirea, rețelele fazate, arhitecturile de sisteme RF, circuitele active cu microunde și multe altele, au fost dezvoltate pentru a aborda multiplele provocări ce afectează sistemele SAR multistatice.

Tehnica de îmbunătățire a rezoluției în azimut a sistemului SAR bistatic, folosind focalizarea cu mai multe deschideri pentru transmițătorul plasat pe satelit și a receptorului plasat la sol, a fost implementată și evaluată experimental folosind platforma COBIS. Rezultatele au fost promițătoare și arată că, utilizând radiațiile de la lobi laterali ai antenei precum și a radiațiilor reflectate de către zonele terestre adiacente ce au fost capturate de un receptor bistatic, poate fi construită o apertură sintetică mult mai mare, ceea ce duce la o rezoluție în azimut îmbunătățită. În plus, golurile din multi-apertură trebuie să fie umplute pentru a evita apariția artefactelor nedorite ce pot afecta semnificativ imaginea SAR focalizată. Este propusă o tehnică de estimare și extrapolare a comenzilor pentru a umple aceste goluri în mod eficient în timp real. Mai departe, a fost dezvoltată o schemă de detectare a dispersării permanente folosind un algoritm CFAR recent introdus, care poate fi utilizat pentru a îmbunătăți și mai mult procesarea SAR cu aperturi multiple, prin procesarea doar a țintelor prezente în toate sub-aperturile.

În general, o problemă comună care afectează sistemele radar bistatice este cuplarea între canalul de sincronizare sau de referință și canalul de primire primar. O metodă capabilă de atenuare a căilor multiple în domeniul timpului și a feedback-ului este dezvoltată folosind o nouă tehnică de filtrare adaptată. Se arată că metodologia propusă oferă simultan performanțe superioare și un cost de calcul redus, în comparație cu alte metode. Metoda este evaluată experimental pentru două aplicații diferite folosind sistemul UPB de transpondere active și receptoare SAR pasive de observare a Pământului (EO) plasate la sol și sincronizate cu sistemul de satelit Sentinel 1 EO-SAR al ESA.

Radarele multistatice și tehnologia SAR multistatic, sunt utilizate și în aplicații la distanță apropiată, cum ar fi cele echipate pe drone. În general, arhitectura radar FMCW este adaptată în astfel de sisteme pentru rezoluția sa mult mai mare și pentru consumul de energie mai mic. A fost prezentată o nouă arhitectură VCO (oscilator controlat în tensiune) pentru aplicații radar FMCW cu costuri reduse, putere redusă și dimensiuni reduse. Noutatea constă în folosirea tensiunii de polarizare a tranzistorilor ce formează oscilatorul, ca tensiune de reglare a frecvenței de oscilație, eliminând necesitatea utilizării unui circuit de rezonanță separat precum a diodelor varicap. Acest lucru reduce semnificativ complexitatea circuitului, consumul și de asemenea, îmbunătățește liniaritatea funcției de transfer a oscilatorului de tip VCO. În plus, este prezentat un algoritm de urmărire extrem de eficient, care se bazează pe filtrul Kalman și poate fi utilizat pentru a îmbunătăți localizarea radarelor multistatice amplasate pe drone sau alte platforme similare. Un astfel de filtru este util pentru compensarea decalajelor de frecvență dintre diferite oscilatoare locale locale în sistemele SAR multistatice în timpul etapei de sincronizare, procedură care este necesară pentru interferometrie.

Receptoarele bistatice, precum COBIS, pot fi de asemenea utilizate pentru a obține informații în timp real despre altitudine sau înălțime. Acest lucru necesită utilizarea unei arii de antene făcute ce trebuie calibrată cu o precizie ridicată. În multe aplicații, calibrarea trebuie făcută periodic, iar demontarea ariei de antene nu este întotdeauna o opțiune. Este prezentată o nouă tehnică de calibrare în câmp apropiat pentru ariile de antene folosite în comunicațiile wireless sau în radare. Aceasta tehnica, rezolvă nepotrivirea lungimii liniilor de transmisiune ce alimentează elementele ariei de antene, precum și cuplarea dintre elemente, și nu necesită măsurători în camera anecoică sau o poziționare precisă.

5.1 Lista Contribuțiilor Originale

My original contributions presented in this thesis are fully available within my list of publications and patents from section 5.2. The contributions are as follows: [J] = Journal paper, [C] = Conference paper, [P] = US Patent Application.

5.2.1 Aritcole de Jurnal

[J1] **F. Rosu**, A. Anghel, R. Cacoveanu, B. Rommen and M. Datcu, "Multiaperture Focusing for Spaceborne Transmitter/Ground-Based Receiver Bistatic SAR," in IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, vol. 13, pp. 5823-5832, Oct. 2020.

[J2] **F. Rosu** and I. Rosu, "SiGe Push–Push VCO for Low-Power C-Band FMCW High-Resolution Radar Applications," in IEEE Microwave and Wireless Components Letters, vol. 31, no. 10, pp. 1150-1153, Oct. 2021.

[J3] **F. Rosu**, A. Anghel, S. Ciochina, R. Cacoveanu, M. Datcu, "Near-Range Multipath Mitigation Methodology for Multistatic SAR Applications using Matched Adaptive Filters," in IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, vol. 15, pp. 3204-3214, Apr. 2022.

5.2.2 Articole de Conferință

[C1] **F. Rosu**, A. Anghel, R. Cacoveanu, S. Ciochină and M. Datcu, "Deconvolution Method for Eliminating Reference Signal Coupling/Reflections in Bistatic SAR," 2021 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium IGARSS, 2021, pp. 2715-2718.

[C2] **F. Rosu**, A. Anghel, R. Cacoveanu, M. Datcu, "Stable Scatterer Detection in Multi-Aperture Spaceborne-TX / Ground based-RX Bistatic SAR", CENTERIS SARwatch, Procedia Computer Science, Volume 181, 2021, Pages 255-260.

[C3] **F. Rosu**, A. Anghel and S. Ciochina, "Sub-Resolution Multipath Mitigation in Radar Transponders by Range Compression and Adaptive Filtering," 2019 International Symposium on Signals, Circuits and Systems (ISSCS), 2019, pp. 1-4.

[C4] **F. Rosu**, "Cartesian Tracking for Advanced Driver Assistance Imaging Radar Systems," 2020 13th International Conference on Communications (COMM), 2020, pp. 37-41.

[C5] **F. Rosu**, "Recursive Error Division Kalman Filter for Advanced Driver Assistance Radar Systems," 2020 13th International Conference on Communications (COMM), 2020, pp. 31-35.

5.2.3 Aplicații de Patent, submise la USPTO

[P1] **Rosu, Filip Alexandru** (Bucharest, RO), Bogatu, Tudor (Bucuresti, RO)
2022 CALIBRATION OF A PHASED ARRAY United States NXP USA,
Inc. (Austin, TX, US) 20220128654

[P2] **Rosu, Filip Alexandru** (Bucharest, RO) 2022 CELL-AVERAGE
AND ORDERED-STATISTIC OF CELL-AVERAGE CFAR ALGORITHMS FOR
LOG DETECTORS United States NXP USA, Inc. (Austin, TX, US)
20220120855

[P3] Wu, Ryan Haoyun (San Jose, CA, US), **Rosu, Filip Alexandru**
(Bucharest, RO), Sillion, Daniel (Bucharest, RO), Bogatu, Tudor (Bucharest, RO)
2022 AUTOMOTIVE MIMO RADAR SYSTEM USING EFFICIENT
DIFFERENCE CO-ARRAY PROCESSOR United States NXP USA, Inc. (Austin,
TX, US) 20220094397

5.3 Perspective și Direcții Viitoare

Principala direcție de studiu în viitor pentru mine constă în optimizarea soluțiilor dezvoltate/evaluate în această teză referitoare la configurația SAR multistatică RX la sol – TX transportată în spațiu pentru sistemele SAR multistatice complet aeroportate, astfel încât să poată fi utilizate de misiuni viitoare precum Harmony.

Recent, radarul cu apertură sintetică și-a făcut apariția și în lumea automobilelor, pentru aplicații de rezoluție înaltă, cum ar fi parcare automată. Din cauza cerințelor de funcționare în timp real și a geometriei diferite față de aplicațiile de observație terestră, va fi nevoie de un întreg set de metode și algoritmi noi pentru a realiza un astfel de sistem la standardele domeniului automat.

Referințe

- [1] A. Anghel, R. Cacoveanu, A. -S. Moldovan, B. Rommen și M. Datcu, „COBIS: Opportunistic C-Band Bistatic SAR Differential Interferometry,” *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, vol. 12, nr. 10, pp. 3980-3998, 2019.
- [2] F. Rosu, A. Anghel, R. Cacoveanu, B. Rommen și M. Datcu, „Multiaperture Focusing for Spaceborne Transmitter/Ground-Based Receiver Bistatic SAR,” *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, vol. 13, pp. 5823-5832, 2020.
- [3] F. Rosu, A. Anghel, R. Cacoveanu și M. Datcu, „Stable Scatterer Detection in Multi-Aperture Spaceborne-TX / Ground based-RX Bistatic SAR,” în *CENTERIS 2020 - International Conference on ENTERprise Information Systems / ProjMAN*, Lisbon, Portugal, 2021.
- [4] F. A. Rosu, „CELL-AVERAGE AND ORDERED-STATISTIC OF CELL-AVERAGE CFAR ALGORITHMS FOR LOG DETECTORS”. United States NXP USA, Inc. (Austin, TX, US) Brevet 20220120855, April 2022.
- [5] A. Ferretti, C. Prati și F. Rocca, „Permanent scatterers in SAR interferometry,” *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 39, nr. 1, pp. 8-20, Jan. 2001.
- [6] F. Rosu, A. Anghel, R. Cacoveanu, S. Ciochină și M. Datcu, „Deconvolution Method for Eliminating Reference Signal Coupling/Reflections in Bistatic SAR,” în *2021 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium IGARSS*, Brussels, Belgium, 2021.
- [7] F. Rosu, A. Anghel și S. Ciochina, „Sub-Resolution Multipath Mitigation in Radar Transponders by Range Compression and Adaptive Filtering,” în *2019 International Symposium on Signals, Circuits and Systems (ISSCS)*, Iasi, Romania, 2019.
- [8] F. Rosu, A. Anghel, S. Ciochina, R. Cacoveanu și M. Datcu, „Near-Range Multipath Mitigation Methodology for Multistatic SAR Applications using Matched Adaptive Filters,” *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2022.
- [9] W. Chang, H. Tian și C. Gu, „FMCW SAR: From design to realization,” în *2016 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS)*, Beijing, 2016.

- [10] A. Meta, P. Hoogeboom și L. P. Ligthart, „Signal Processing for FMCW SAR,” *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 45, nr. 11, pp. 3519-3532, 2007.
- [11] F. Rosu și I. Rosu, „SiGe Push–Push VCO for Low-Power C-Band FMCW High-Resolution Radar Applications,” *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, vol. 32, nr. 10, pp. 1150-1153, 2021.
- [12] F. Rosu, „Cartesian Tracking for Advanced Driver Assistance Imaging Radar Systems,” în *2020 13th International Conference on Communications (COMM)*, Bucharest, Romania, 2020.
- [13] F. Rosu, „Recursive Error Division Kalman Filter for Advanced Driver Assistance Radar Systems,” în *2020 13th International Conference on Communications (COMM)*, Bucharest, Romania, 2020.
- [14] „Rosu, Filip Alexandru (Bucharest, RO), Bogatu, Tudor (Bucuresti, RO) 2022 CALIBRATION OF A PHASED ARRAY United States NXP USA, Inc. (Austin, TX, US) 20220128654".
- [15] V. Kubica, X. Neyt și H. Griffiths, „Along-track resolution enhancement for bistatic imaging in burst-mode operation,” *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, vol. 52, nr. 4, pp. 1568-1575, 2016.