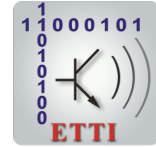




# UNIVERSITATEA POLITEHNICA DIN BUCUREȘTI



## Școala Doctorală de Electronică, Telecomunicații și Tehnologia Informației

Decizie nr. 938 din 21-10-2022

## REZUMAT TEZĂ DE DOCTORAT

**Ing. Adrian FOCȘA**

---

METODE AVANSATE DE IMAGISTICĂ RADAR CU APERTURĂ  
SINTETICĂ PENTRU CONFIGURAȚII MONOSTATICE ȘI  
BISTATICE

ADVANCED SYNTHETIC APERTURE RADAR COMPUTATIONAL  
IMAGING METHODS FOR MONOSTATIC AND BISTATIC  
CONFIGURATIONS

---

### COMISIA DE DOCTORAT

<b>Prof. Dr. Ing. Ion MARGHESCU</b> Univ. Politehnica din București	Președinte
<b>Prof. Dr. Ing. Mihai DATCU</b> Univ. Politehnica din București	Conducător de doctorat
<b>Prof. Dr. Ing. Tudor-Petru PALADE</b> Univ. Tehnică din Cluj-Napoca	Referent
<b>Prof. Dr. Ing. Andrei ANGHEL</b> Univ. Politehnica din București	Referent
<b>Conf. Dr. Ing. Paco DEKKER LOPEZ</b> Univ. Tehnică din Delft, Olanda	Referent
<b>Conf. Dr. Ing. Ștefan-Adrian TOMA</b> Acad. Tehnică Militară "Ferdinand I", București	Referent

**BUCUREȘTI 2022**

---

# Cuprins

<b>1</b>	<b>Introduction</b>	<b>1</b>
1.1	Prezentarea domeniului tezei de doctorat . . . . .	1
1.2	Scopul tezei de doctorat . . . . .	1
1.3	Conținutul tezei de doctorat . . . . .	1
<b>2</b>	<b>Baza teoretică</b>	<b>2</b>
2.1	Geometria SAR și rezoluția spațială . . . . .	2
2.2	Modelul semnalului SAR . . . . .	3
2.2.1	Procesoare SAR clasice . . . . .	3
2.3	Eșantionare Compresivă . . . . .	3
2.3.1	Baza teoretică a CS . . . . .	3
2.3.2	Algoritmi pentru rezolvarea problemei CS . . . . .	3
2.3.3	Focalizare SAR cu CS . . . . .	4
2.4	Îmbunătățirea imaginilor SAR . . . . .	4
<b>3</b>	<b>Procesor SAR bazat pe BP și CS: CS-BP-2D</b>	<b>5</b>
3.1	Introducere . . . . .	5
3.2	Algoritmul Back-projection în context CS . . . . .	5
3.3	Elemente cheie în eșantionarea compresivă . . . . .	5
3.4	Lanțul de procesare CS-BP-2D . . . . .	6
3.4.1	Obținerea bazei de sparsitate . . . . .	6
3.4.2	Aspecte ale reconstrucției CS . . . . .	6
3.5	Experimente și validare . . . . .	7
3.5.1	Date simulate . . . . .	7
3.5.2	Date reale . . . . .	7
3.6	Concluzii . . . . .	8
<b>4</b>	<b>Procesor SAR bistatic cu date multi-apertură și reconstrucție CS</b>	<b>9</b>
4.1	Sistem SAR bistatic cu receptor de oportunitate . . . . .	9
4.2	Modelul semnalului brut . . . . .	9
4.2.1	Transformata Keystone pentru corecția migrației celulelor . . . . .	9
4.2.2	Refacerea fazei parabolice în azimut . . . . .	10

4.3	Reconstrucția cu CS . . . . .	10
4.3.1	Dicționarul de sparsitate propus . . . . .	10
4.4	Explorarea multi-apertură . . . . .	10
4.4.1	Modelul auto-regresiv . . . . .	10
4.4.2	CS-FFT . . . . .	10
4.4.3	Algoritmul propus: CS-CHIRP . . . . .	10
4.5	Experimente și validare . . . . .	11
4.5.1	Determinarea empirică a extinderii scenei . . . . .	11
4.5.2	Date bistatice simulate . . . . .	11
4.5.3	Date bistatice reale . . . . .	11
4.6	Concluzii . . . . .	13
<b>5</b>	<b>Procesor SAR cu grid la sol invariant la modurile de scanare bazat pe factorizarea BP</b>	<b>14</b>
5.1	Factorizarea BP . . . . .	14
5.2	Creșterea vitezei BP . . . . .	14
5.2.1	Procesarea pe sub-aperturi . . . . .	14
5.2.2	Generarea gridului planar polar/eliptic . . . . .	15
5.3	Procesare SAR invarianta la scanare bazata pe FBP . . . . .	16
5.4	Validare pe date reale . . . . .	16
5.4.1	Date brute in cazul monostatic . . . . .	16
5.4.2	Achiziția bistatică . . . . .	17
5.4.3	Rezultate . . . . .	18
5.5	Concluzii . . . . .	19
<b>6</b>	<b>Diminuarea zgomotului pentru modul TOPSAR</b>	<b>20</b>
6.1	Descrierea problemei și soluții actuale . . . . .	20
6.2	Soluția propusă . . . . .	20
6.2.1	Regresie bazată pe procese Gaussiene . . . . .	21
6.2.2	Corecția reflectivității cu unghiul de incidență . . . . .	21
6.3	Rezultate . . . . .	21
6.4	Concluzii . . . . .	21
<b>7</b>	<b>Conclusions</b>	<b>23</b>
7.2	Contribuții originale . . . . .	23
7.3	Lista de publicații . . . . .	24
	<b>Bibliografie</b>	<b>25</b>

# Capitolul 1

## Introduction

### 1.1 Prezentarea domeniului tezei de doctorat

Majoritatea misiunilor radar cu apertură sintetică (SAR) utilizează procesoare SAR adaptate, care beneficiază de particularitățile configurației de achiziție. Studii recente demonstrează ca procesoarele SAR din domeniul timp [26] sunt cele mai potrivite pentru misiunile SAR viitoare [6, 16], datorită capacității lor de adaptare la scenariile de scanare și a ușurinței de incorporare a unor module (ex., compensarea mișcării, auto-focus) de îmbunătățire a calității produselor finale.

### 1.2 Scopul tezei de doctorat

Teza vizează dezvoltarea de metode de formare a imaginilor SAR eficiente precum și algoritmi de îmbunătățire a acestora.

### 1.3 Conținutul tezei de doctorat

Capitolul 2 prezintă substratul teoretic al metodelor propuse. Capitolul 3 prezintă o soluție pentru focalizarea SAR care implică utilizarea unui număr redus de eșantioane utilizând avantajele algoritmului Back-Projection. Capitolul 4 introduce o metodă de focalizare potrivită în contextul bistatic creat de un emițător operat pe modul TOPSAR și un receptor cu baza la sol care captează date în mod intermitent de la mai multe aperturi. Capitolul 5 prezintă un procesor SAR care operează în domeniul timp în conjuncție cu un grid de imagine elliptic special adaptat și în care proiecția inversă se realizează având o constrângere unghiulară. Capitolul 6 introduce o rutină nouă în vederea eliminării zgomotului din imaginile obținute pe polarizare ortogonală în modul TOPSAR.

# Capitolul 2

## Baza teoretică

### 2.1 Geometria SAR și rezoluția spațială

Scenariul din Fig. 2.1 prezintă platforma purtătoare, care conține atât emițătorul( $T_x$ ) cât și receptorul( $R_x$ ). Această se deplasează pe o traiectorie rectilinie, timp în care emite impulsuri periodice (PRI- interval de repetiție a impulsurilor) către scenă și recepționează răspunsurile de la obiecte.

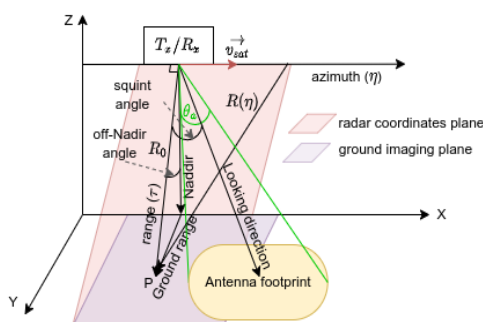


Figura 2.1 Geometrie simplificată a SAR monostatic

Principalele elemente ale unei achiziții monostatică sunt afișate în Fig. 2.1. Direcția azimut este paralelă cu vectorul vitezei al platformei purtătoare și împreună cu direcția range formează coordonatele radar (bidimensionale). Prin modificarea unghiului de squint și a celui făcut de direcția de vizare cu axa Nadir se obțin diverse moduri de scanare (STRIPMAP, TOPSAR, SCANSAR, SPOTLIGHT). Rezoluția pe direcția range este invers-proportională cu banda semnalului transmis iar cea în azimut se află în legătură directă cu timpul de iluminare.

## 2.2 Modelul semnalului SAR

### 2.2.1 Procesoare SAR clasice

Filtrul adaptat (MF) este procesorul care produce imaginea SAR ideală. Totuși, acesta are un cost computațional foarte mare din moment ce fiecare locație necesită coeficienți diferiți ai filtrului. Algoritmi precum Range-Doppler, Chirp-Scaling sau w-K formează imaginea SAR având costuri computaționale mai reduse datorită utilizării transformatei Fourier rapide și procesărilor în domeniul frecvență. Chiar și așa, acești algoritmi nu pot prelucra direct date SAR brute ale căror spectru în azimut este aliat (eng. folded).

## 2.3 Eșantionare Compresivă

### 2.3.1 Baza teoretică a CS

Teoria eșantionării compresive (CS) [7] garantează reconstrucția unui semnal  $\mathbf{x}$  dintr-un număr de măsurători mai mic decât limita stabilită prin teorema Nyquist. Modelul clasic de CS este descris de ec. (2.26). În (2.26),  $\Phi \in \mathbb{C}^{p \times n}$  reprezintă matricea de măsurare,  $\Psi \in \mathbb{C}^{n \times n}$  este baza algebrică care asigură sparsitatea,  $x \in \mathbb{C}^n$  și  $y \in \mathbb{C}^p$  reprezintă semnalul original și eșantioanele disponibile, cu  $p < n$  unde  $\varepsilon \in \mathbb{C}^p$  este un vector care modelează perturbațiile.

$$y = \Phi\Psi\alpha + \varepsilon = \Theta\alpha + \varepsilon \quad (2.26)$$

Reprezentarea rară a lui  $x$  este descrisă prin (2.27).

$$\mathbf{x} = \Psi\alpha, \|\alpha\|_0 = K \quad (2.27)$$

În (2.27),  $K$  reprezintă gradul de sparsitate al semnalului descris prin norma  $L_0$  (cardinalitatea multi-mii coordonatelor nenule). Problema reconstrucției semnalului  $x$  presupune rezolvarea (2.28) iar apoi înlocuirea soluției în ecuația (2.27).

$$\min_{\alpha} \|y - \Theta\alpha\|_2^2 \quad s.t. \quad \|\alpha\|_0 = K \quad (2.28)$$

### 2.3.2 Algoritmi pentru rezolvarea problemei CS

În principiu, algoritmi de rezolvare ai problemei CS pot fi grupați în trei categorii: soluții greedy (ex., Orthogonal Matching Pursuit (OMP), Regularized OMP, Generalized OMP), soluții cu relaxare convexă care de regulă înlocuiesc norma  $L_0$  cu norma  $L_1$  (ex., SPGL1-BPDN) și soluții cu relaxare non-convexă (ex., Iterative Jumping Thresholding, Bayesian CS), care pot folosi fie norme sub-unitare fie pun problema reconstrucției în termeni de estimare Bayesiană.

### **2.3.3 Focalizare SAR cu CS**

Abordarea focalizării SAR prin intermediul tehnicilor de CS presupune identificarea domeniului care asigură sparsitatea, selecția unui mecanism de sub-eșantionare precum și alegerea unui algoritm de rezolvare adecvat. Cel mai adesea, soluțiile din state-of-the-art pornesc de la un procesor SAR convențional și transformă etapele acestuia în probleme de CS.

## **2.4 Îmbunătățirea imaginilor SAR**

În afară de corecțiile radiometrice clasice de conversie din valorile digitale ale pixelilor în valori de suprafață efectivă de reflexie, recent, o nouă problemă de calibrare a fost raportată în comunitatea din domeniu. Aceasta se produce pe modul de operare TOPSAR, în zone cu reflectanță scăzută (deșert, întinderi de apă fără valuri). Acest efect apare cu precădere în imaginea de polarizare ortogonală, astfel, înainte de a livra imaginea SAR detectată unor algoritmi de clasificare sau de inversiune de parametri, trebuie aplicată o procedură de diminuarea a zgomotului. Chiar dacă au apărut câteva soluții [28, 18, 20, 4, 19], acestea nu au un grad mare de generalitate.

# Capitolul 3

## Procesor SAR bazat pe BP și CS: CS-BP-2D

### 3.1 Introducere

Acest capitol propune un procesor SAR care combină CS și BP și care formează imaginea SAR pe un grid definit de utilizator utilizând un număr redus de date brute. Această procedură consideră ipoteza de sparsitate spațială a unor scene monostatice și bistatice. Din algoritmul BP se determina baza de sparsitate. Spre deosebire de alte procesoare SAR care folosesc tehnica CS[1], [8], CS-BP-2D nu necesită decuplarea celor două direcții, range și azimut și de asemenea nu realizează corecție de deplasare a celulelor în distanță. Pentru rezolvarea problemei de CS am optat pentru o soluție greedy, OMP [5]. Lanțul de procesare presupune și existența unui filtru neliniar pentru reducerea artefactelor, bazat pe răspunsul la impuls al sistemului.

### 3.2 Algoritmul Back-projection în context CS

Implementările în MATLAB ale BP [17],[27] conțin următorii pași:

A1. Aplicarea filtrului adaptat pe direcția range (fie în domeniul timp fie în domeniul frecvența) generând astfel semnalul range compressed.

A2. Interpolarea liniară a semnalului range compressed pe gridul de formare a imaginii SAR.

A3. Adunarea coerentă a proiecțiilor de la pasul A2 realizând și compensarea componentei de faza dată de frecvența purtătoare.

### 3.3 Elemente cheie în eșantionarea compresivă

În vederea transpunerii algoritmului BP în problemă de CS, am utilizat o matrice de sub-eșantionare aleatoare, ca bază de sparsitate s-a folosit operatorul BP iar rezolvarea



problemei de CS a fost realizată cu algoritmul greedy OMP. Ca urmare a utilizării filtrului neliniar bazat pe nucleul dat de răspunsul simulat al sistemului la impuls (PSF), precizia de estimare a indicelui de sparsitate nu trebuie să fie foarte bună.

### 3.4 Lanțul de procesare CS-BP-2D

Diagrama din Fig. 3.3 ilustrează lanțul de procesare propus. În funcție de dimensiunile operatorului asociat BP (eng. STM-System Transformation Matrix), reconstrucția cu CS se poate aplica fie la nivel de patch-uri sau se poate aplica pentru toată imaginea SAR. În primul caz, rezultatele date de OMP sunt asamblate la final pentru obținerea imaginii SAR.

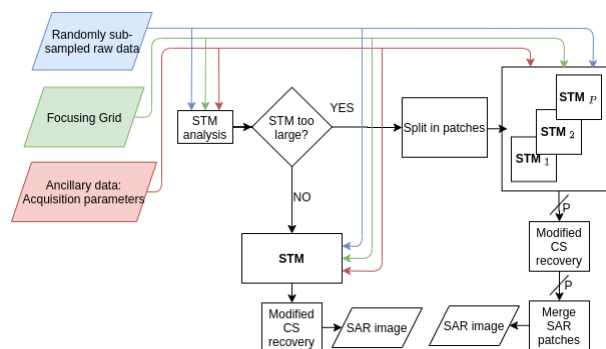


Figura 3.3 Lanțul de procesare CS-BP-2D

Principalele caracteristici ale lanțului de procesare sunt: (i) este invariant la modul de scanare, (ii) CS-BP-2D nu necesită operația de decuplare a direcțiilor range și azimut, (iii) se poate utiliza atât pentru configurații monostatică cât și bistatice și (IV) conține o soluție de reconstrucție CS care implică utilizarea PSF pentru reducerea artefactelor. De asemenea, filtrul bazat pe PSF tratează erorile de ne-potrivire de grid. Procesorul propus este flexibil în privința datelor de intrare, putând fi aplicat direct pe date cu compresie în range efectuată.

#### 3.4.1 Obținerea bazei de sparsitate

Dicționarul de sparsitate este construit în concordanță cu pașii BP și implică utilizarea următoarelor informații: coordonatele gridului, regula de sub-eșantionare a datelor brute și informații auxiliare legate de achiziție.

#### 3.4.2 Aspecte ale reconstrucției CS

Întrucât reconstrucția este realizată prin intermediul unui algoritm greedy, este importantă estimarea nivelului de sparsitate ( $K$ ). În cazul procesării propuse, nu este nevoie de o estimare precisă a acestui parametru ca urmare a utilizării filtrării neliniare cu PSF.

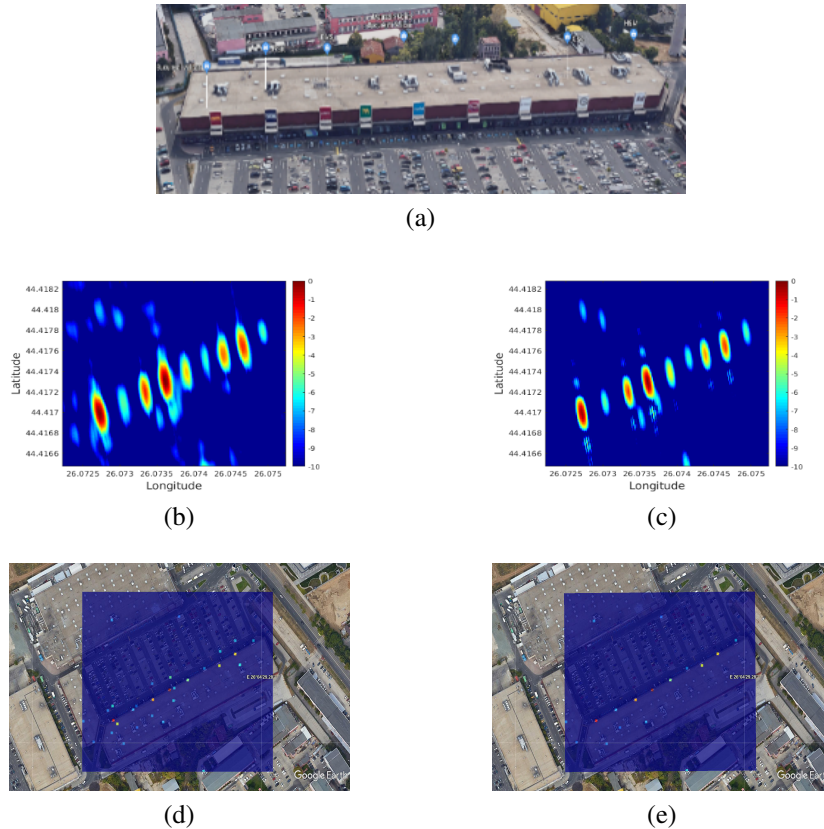


Figura 3.15 Rezultate pe VVC: a) Imagine optică, b) Rezultat BP [dB], c) Imagine SAR CS-BP-2D (cu PSF) [dB], d) CS-BP-2D (fără filtrare) și e) CS-BP-2D (cu filtrare) suprapuse peste imaginile optice

## 3.5 Experimente și validare

### 3.5.1 Date simulate

Pentru verificarea capacității de conservare a amplitudinii și a fazei imaginii SAR produse de CS-BP-2D s-au folosit în primă fază date simulate. În plus, au fost efectuate teste prin care să se evalueze robustețea metodei în raport cu nivelul de zgomot și gradul de sparsitate al scenei.

### 3.5.2 Date reale

În cele ce urmează, pentru o regiune de  $200m \times 240m$  conținând centrul comercial Vulcan Value Center (VVC) s-au efectuat experimente cu CS-BP-2D. Această scenă a fost aleasă pentru că îndeplinește ipoteza de sparsitate spațială, conținând un număr restrâns de reflexii quasi-punctiforme. Rezultatul oferit de CS-BP-2D constă dintr-un ansamblu de puncte izolate (superpoziție de impulsuri Delta) afișate în varianta brută și după filtrare în Fig. 3.15d și Fig. 3.15e. Pentru o vizualizare mai bună (comparare cu BP), rezultatelor Fig. 3.15c li s-a adugat un PSF simulat [9].

Așa cum se poate observa în Fig. 3.15, după filtrarea cu PSF, punctele rămase se potrivesc cu pozițiile panourilor comerciale.

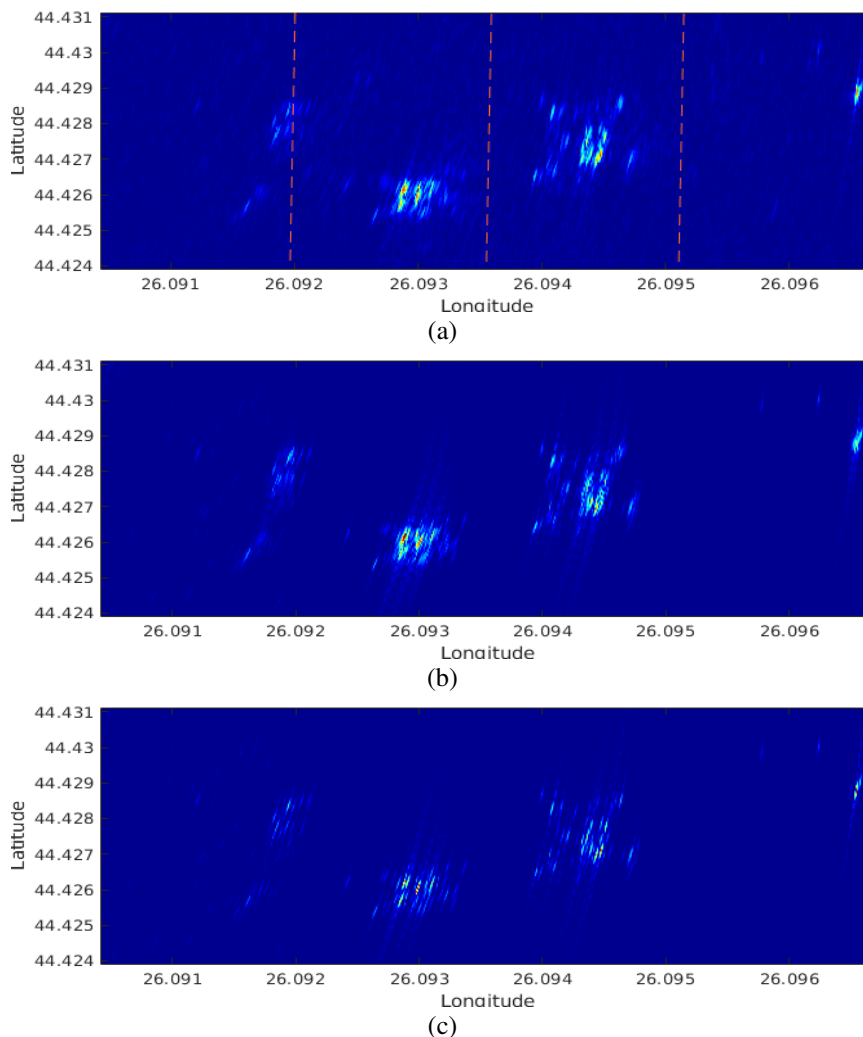


Figura 3.20 Rezultate obținute pentru cazul bistatic. a) BP, b) CS-BP (fără filtru), c) CS-BP-2D

Evaluarea metodei CS-BP-2D a fost realizată și pe cazul bistatic format din emițătorul Sentinel 1 și receptorul cu baza la sol COBIS [2]. Rezultatele sunt prezentate în Fig. 3.20.

### 3.6 Concluzii

În acest capitol a fost prezentată o soluție pentru focalizarea imaginilor SAR combinând algoritmul BP cu teoria CS și exploatând beneficiile din ambele metode. S-a propus ca bază de sparsitate operatorul linear BP și de asemenea a fost introdus un filtru neliniar pentru rejecția artefactelor. Imaginile SAR pot fi formate pe griduri georeferentiate, în principiu ne mai fiind nevoie de coregistrare pentru aplicații în interferometrie.

# Capitolul 4

## Procesor SAR bistatic cu date multi-apertură și reconstrucție CS

În cadrul acestui capitol este prezentată o soluție de îmbunătățire a rezoluției SAR bazată pe CS în contextul unei achiziții bistatice multi-apertură. Schemă propusă exploatează sparsitatea spațială a scenei vizate în care se utilizează modul de scanare TOPSAR.

### 4.1 Sistem SAR bistatic cu receptor de oportunitate

Datele de tip multi-apertură provin atât de la lobii secundari ai emițătorului cât și din secțiuni laterale ale lobului principal al caracteristicii de directivitate a antenei de emisie, atunci când aceasta este orientată către sub-fășiile (eng. sub-swaths) scanate.

### 4.2 Modelul semnalului brut

Receptorul cu baza la sol (COBIS) cuprinde un canal de recepție orientat către emițătorul Sentinel-1 (canal de sincronizare) și cel puțin un canal orientat către scena de interes. Întrucât semnalul de sincronizare este folosit pentru compresia în distanță, banda pe direcția azimut a semnalului cu compresie în range devine foarte îngustă și de asemenea amprenta unei ținte în datele brute se caracterizează printr-un cuplaj liniar între range și azimut.

#### 4.2.1 Transformata Keystone pentru corecția migrației celulelor

Procesarea propusă care implică reconstrucția profilelor de azimut, realizează înainte de aceasta decuplarea celor două direcții, range și azimut, asigurând astfel corecția migrației în range a celulelor.

### **4.2.2 Refacerea fazei parabolice în azimut**

Un element important în procesare îl constituie utilizarea dicționarului chirp. Astfel, înainte de reconstrucția CS, se redă semnalului variația semi-hiperbolică a fazei în azimut.

## **4.3 Reconstrucția cu CS**

Scopul metodei propuse este acela de a reconstrui semnalul multi-apertură în regiunile caracterizate de un raport semnal-zgomot scăzut folosind ipoteza de sparsitate spațială. Reconstrucția este realizată cu diverși algoritmi CS.

### **4.3.1 Dicționarul de sparsitate propus**

Baza de sparsitate  $\Psi$  se formează utilizând răspunsul mediu de tip chirp (faza hiperbolică) generat de un punct imaginar situat în mijlocul scenei. Fiecare vector al bazei reprezintă o varianta deplasată în timp a acestui semnal de referință.

## **4.4 Explorarea multi-apertură**

### **4.4.1 Modelul auto-regresiv**

O metodă uzuală pentru reconstrucția semnalelor uni-dimensionale care conțin date lipsa este aplicarea unui model auto-regresiv (AR) pentru predicție. Totuși, acest model funcționează pentru intervale lipsa relativ mici.

### **4.4.2 CS-FFT**

Implicația directă a benzii înguste în azimut, obținută după compresia în range este posibilitatea utilizării bazei Fourier ca dicționar de sparsitate însă această aproximație nu implică o corespondență 1-1 (sau apropiată) între țintă și spectru.

### **4.4.3 Algoritmul propus: CS-CHIRP**

Lanțul de procesare propus pentru formare imaginilor SAR bistatice este prezentat în Fig. 4.5.

Anterior aplicării algoritmului BP clasic, profilele de azimuth sunt reconstruite cu CS.

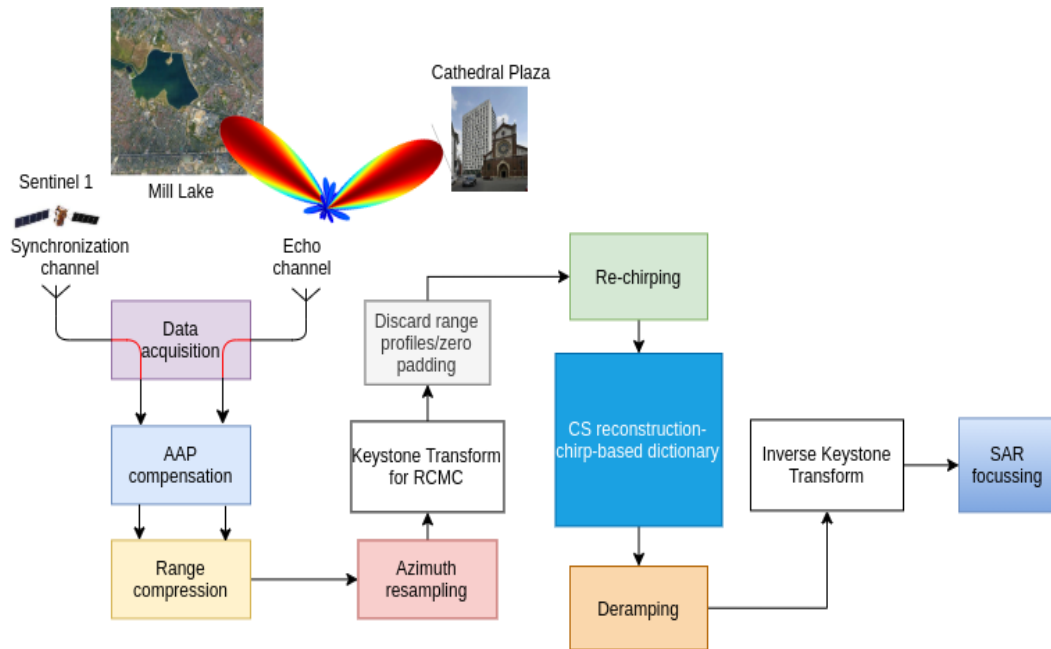


Figura 4.5 Procesorul propus bazat pe CS-CHIRP

## 4.5 Experimente și validare

### 4.5.1 Determinarea empirică a extinderii scenei

Datele simulate dovedesc că utilizarea unui punct din mijlocul scenei pentru formarea bazei de sparsitate asigură o reconstrucție adecvată.

### 4.5.2 Date bistatice simulate

Din moment ce nu există date multi-apertură complete (eng. ground truth), am folosit date simulate pentru evaluarea calitativă a mai multor algoritmi de rezolvare a problemei CS.

### 4.5.3 Date bistatice reale

În ceea ce privește datele reale, au fost analizate două cazuri. Un caz general și unul particular, în care proiecția segmentului emițător-receptor pe gridul planar de focalizare este coliniară cu direcția de vizare a receptorului (canalul imagine).

Imaginile SAR bistatice din Fig. 4.10 prezintă o scenă urbană de  $950 \text{ m} \times 2350 \text{ m}$  din București, România. Imaginea din Fig. 4.10a este rezultatul obținut cu o singură apertură ( $0.323 \text{ s}$ ). Integrarea naivă a datelor multi-apertură ( $1.7905 \text{ s}$ ) este ilustrată în Fig. 4.10b. Imaginile SAR obținute după reconstrucția profilelor de azimut sunt prezentate în Fig. 4.10c - Fig. 4.10i. Toate aceste metode reușesc să diminueze efectul lobilor secundari ai funcției sistemului, totuși, rezultatele CS-FFT sunt mai slabe decât cele obținute cu CS-CHIRP folosind aceiași parametri pentru algoritmi CS testați.

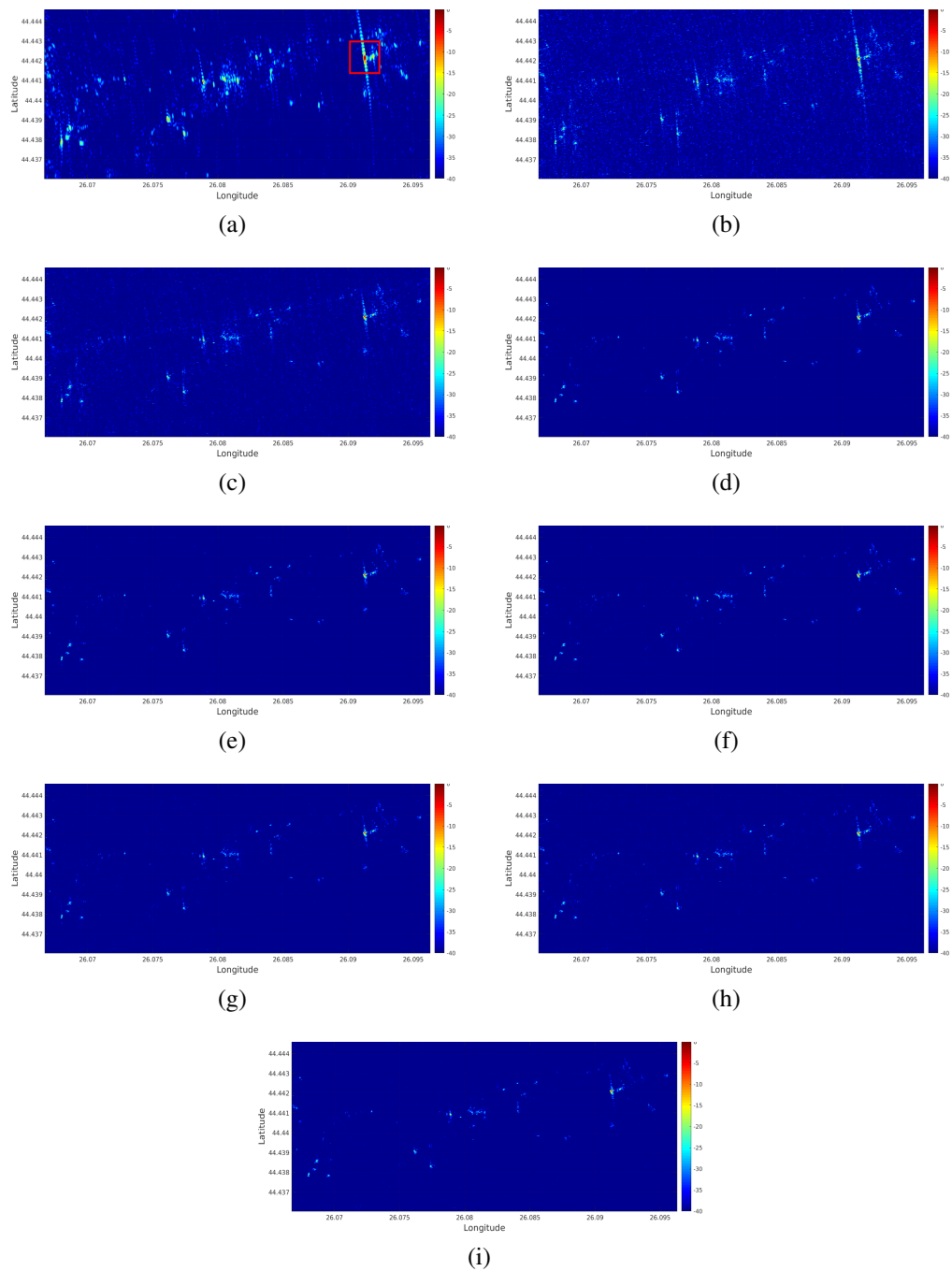


Figura 4.10 Rezultate pe imagine extinsă: a) O singură apertură, b) Date multi-apertură, c) AR, d) GOMP- $\Psi^{CHIRP}$ , e) CoSaMP- $\Psi^{CHIRP}$ , f) SWAP- $\Psi^{CHIRP}$ , g) IJT- $L_{2/3}$ - $\Psi^{CHIRP}$ , h) SPGL1-BPDN- $\Psi^{CHIRP}$ , și i) FISTA- $\Psi^{FFT}$

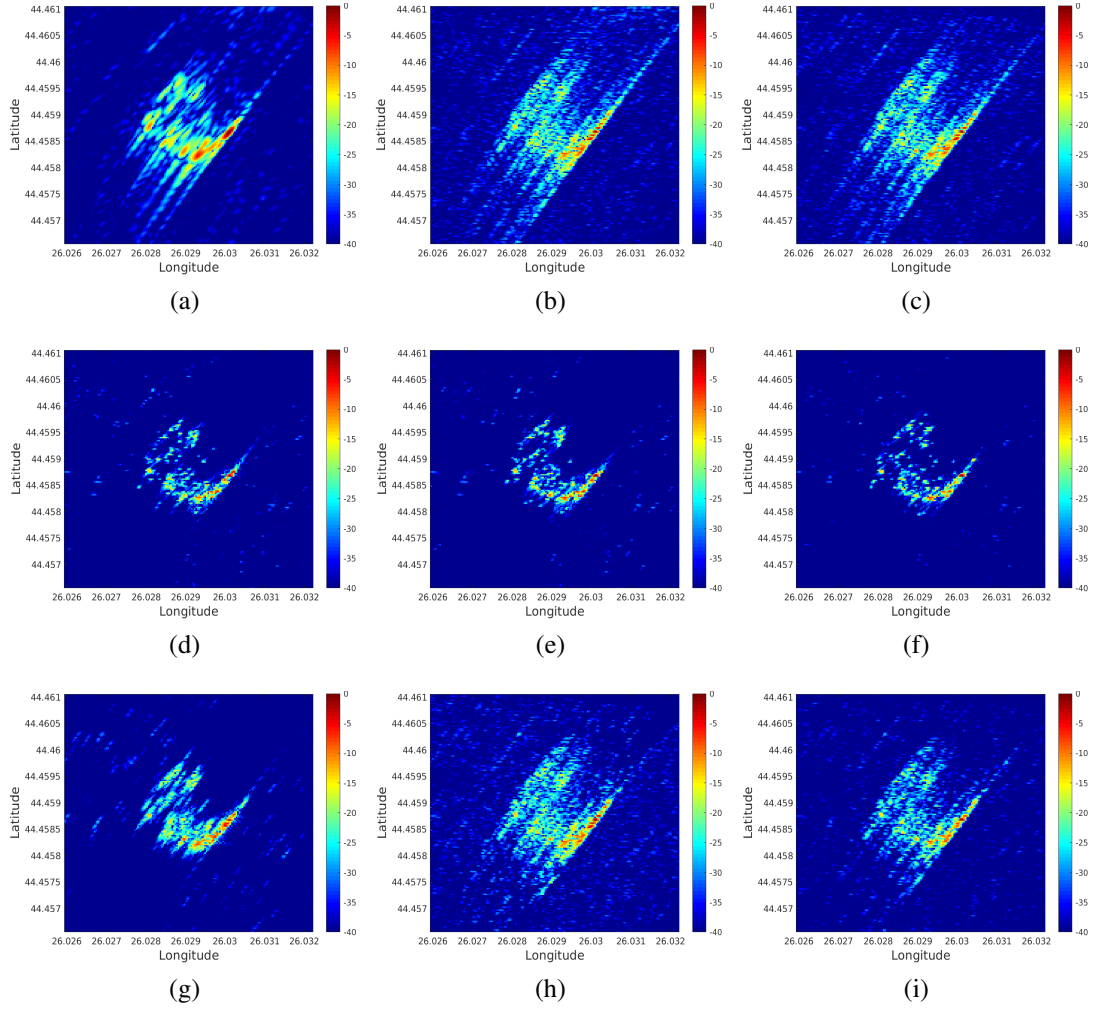


Figura 4.20 Imagini SAR normalizate (în dB [-40, 0]): a) O singură apertură, b) Date multi-apertură c) AR d) CoSaMP- $\Psi^{CHIRP}$ , e) GOMP- $\Psi^{CHIRP}$ , f) CMP- $\Psi^{CHIRP}$ , g) GOMP- $\Psi^{FFT}$ , h) IJT- $L_{2/3}$ - $\Psi^{CHIRP}$ , i) SPGL1-BPDN- $\Psi^{CHIRP}$

În cazul al doilea (mai general), imaginile din Fig. 4.20 prezintă o scenă (Peninsula Lacul Morii) de  $500m \times 500m$ , cu centrul în [44.45881 N, 26.02909 E]. Fără reconstrucție, lobi secundari ocupă o bună parte din luciul de apă.

## 4.6 Concluzii

În acest capitol s-a prezentat un procesor SAR bistatic multi-apertură capabil să realizeze atât îmbunătățirea rezoluției cât și reducerea efectului lobilor secundari în contextul creat de receptorul COBIS și emițătorul de oportunitate Sentinel 1. Folosirea teoriei CS se bazează pe ipoteza de sparsitate spațială a fiecărui profil de iso-range și pe crearea unui baze de sparsitate cu semnale chirp.



# Capitolul 5

## Procesor SAR cu grid la sol invariant la modurile de scanare bazat pe factorizarea BP

### 5.1 Factorizarea BP

Chiar dacă BP este mai eficient computațional decât filtrul adaptat ( $\mathcal{O}(n^4)$ ), s-au depus eforturi considerabile în vederea accelerării implementărilor BP. Printre primele soluții au fost introduse în [30]  $\mathcal{O}(n^{2.5})$  și în [29].

### 5.2 Creșterea vitezei BP

BP factorizat (FBP) [29] are la baza ideea formării imaginii SAR pe un grid special care să diminueze cerințele de eșantionare pe direcția azimuth. Mai exact, pentru cazul monostatic este nevoie de un grid polar iar pentru cazul bistatic se impune folosirea unui grid elipsoidal.

#### 5.2.1 Procesarea pe sub-aperturi

Așa cum este prezentat în [30], imaginea SAR se poate forma cu ajutorul BP prin combinarea (sumarea) coerentă a imaginilor obținute pe subaperturi (5.3).

$$I_{BP}(P) = \sum_{l=1}^L \int_{-\frac{T}{2}+(l-1)\Delta T}^{-\frac{T}{2}+l\Delta T} s_{rc}(\Delta R_P, \eta) \cdot \exp(jk_r \Delta R_P) d\eta \quad (5.3)$$

În [30], este specificat faptul că fiecare imagine pe sub-apertură se formează pe un grid polar individual.

## 5.2.2 Generarea gridului planar polar/eliptic

În cele ce urmează, este introdusă într-o manieră vectorial-geometrică procedura pentru generarea gridului polar/eliptic într-un plan oarecare (ex., grid la sol). Această rutină determină cele trei coordonate pentru punctele dispuse în lungul arcelor de elipsă necesare procesoarelor de tip FBP.

Punctele de pe grid sunt determinate în două etape. În primul rând, se determina centrul local al coordonatelor eliptice ( $\vec{r}_C$ ). Apoi, a doua etapă constă în determinarea coordonatelor punctelor de pe grid rezolvând ecuația elipsoidului cu constrângeri. Primul pas este important întrucât favorizează existența unei soluții unice pentru cel de-al doilea pas. În Fig. 5.3 sunt evidențiate elementele geometrice implicate în determinarea centrului  $\vec{r}_C$  în timp ce Fig. 5.4 prezintă elementele pentru calculul coordonatelor unui punct  $\mathbf{P}$  având coordonatele eliptice  $(\Delta R_P, \theta)$ .

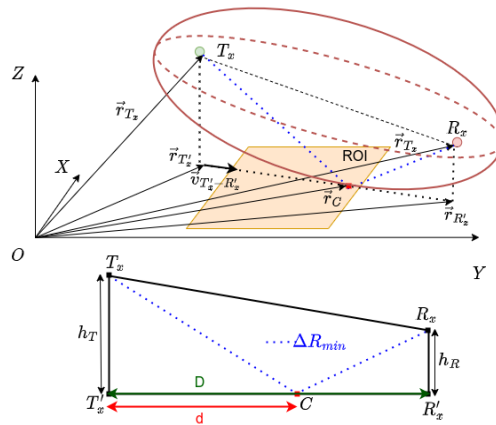


Figura 5.3 Elementele geometrice necesare determinării centrului coordonatelor eliptice ( $\vec{r}_C$ ) în planul de focalizare

Întrucât suprafața iso-range pentru bistatic este un elipsoid de rotație, calcularea originii  $\vec{r}_C$  poate fi redusă la analiza trapezului din partea de jos a Fig. 5.3. Astfel  $\vec{r}_C$  se calculează cu (5.4) și reprezintă intersecția dintre elipsoidul de minim iso-range ( $\Delta R_{min}$ ) și planul care conține regiunea de interes (ROI). În (5.4),  $\vec{v}_{T'_x - R'_x}$  reprezintă versorul direcției  $T'_x - R'_x$ .

$$\vec{r}_C = \vec{r}_{T'_x} + d\vec{v}_{T'_x - R'_x} \quad (5.4)$$

Coeficientul  $d$  din (5.4) se determină cu (5.5).

$$d = \operatorname{argmin} \{ \Delta R(d) \} \quad (5.5)$$

Forma explicită a  $\Delta R(d)$  împreună cu lista de constrângeri sunt evidențiate în trapezul  $T_x T'_x R'_x R_x$  din Fig. 5.3.

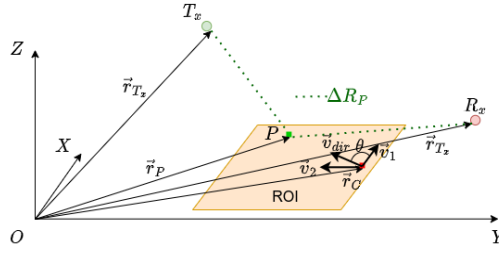


Figura 5.4 Elementele geometrice pentru determinarea coordonatelor eliptice

Odată ce  $\vec{r}_C$  este obținut, se pot determina punctele de pe grid cu (5.8).

$$\vec{r}_P = \vec{r}_C + \gamma \vec{v}_{dir} \quad (5.8)$$

În (5.8),  $\vec{v}_{dir}$  este un versor care sugerează partiționarea unghiulară a gridului și poate fi calculat cu (5.9) folosind un set de versori ortogonali  $\vec{v}_1$  și  $\vec{v}_2$  din planul care conține ROI.

$$\vec{v}_{dir} = \vec{v}_1 \cos(\theta) + \vec{v}_2 \sin(\theta) \quad (5.9)$$

Pentru o valoare fixată a  $\Delta R$  și o direcție selectată prin  $\vec{v}_{dir}$ ,  $\gamma$  se obține prin rezolvare (5.10) și înlocuirea  $\vec{r}_P$  din (5.8).

$$\|\vec{r}_P - \vec{r}_{T_x}\| + \|\vec{r}_P - \vec{r}_{R_x}\| = \Delta R \quad (5.10)$$

### 5.3 Procesare SAR invarianta la scanare bazata pe FBP

Procesorul propus funcționează astfel. Prima dată se crează gridul adaptat eliptic (fin și grosier). Apoi întreaga apertură este împărțită în L sub-aperturi (SA) din care se formează imaginile cu rezoluție grosieră folosind proiecția inversă a datelor brute fără să fi fost procesate cu UFR (eng. Unfolding and Resampling). În special pentru modul TOPSAR, pentru a satisface distanța de maximă ambiguitate în azimut, pasul de proiecție inversă se efectuează într-un interval unghiular (condiție unghiulară). Această condiție unghiulară face ca procesorul propus să poată fi aplicat direct pe orice mod de scanare. După formarea imaginilor pe sub-aperturi, acestea se interpolează și se adună coerent pe gridul fin formând imaginea finală.

### 5.4 Validare pe date reale

#### 5.4.1 Date brute in cazul monostatic

Nivelul de performanță al procesorului este evaluat pe date reale achiziționate de Sentinel 1 pe modul IW. Datele conțin răspunsul sistemului la impuls (IRF) produs de un

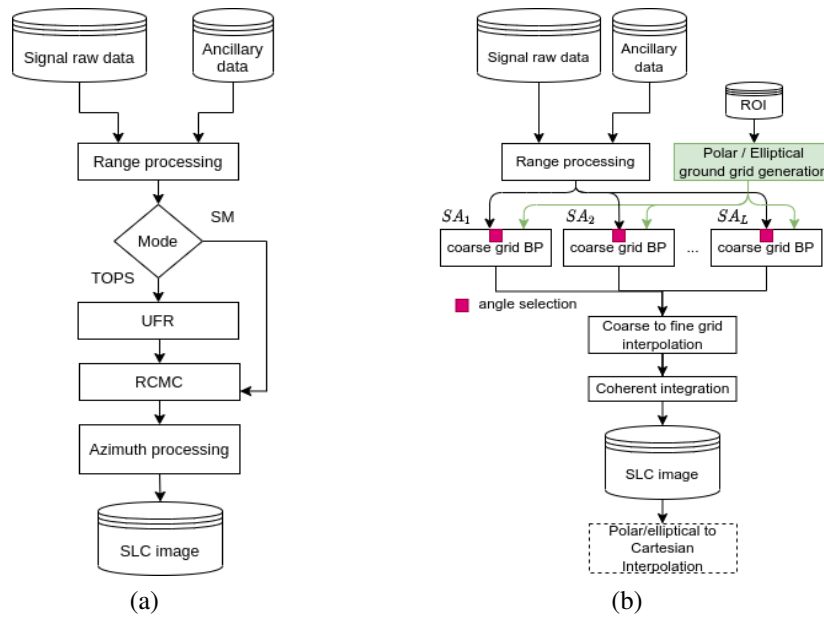


Figura 5.7 Procesoare SAR: a) Procesor RDA simplificat al Sentinel 1 [23] și, b) procesor propus

transponder ESTEC (European Space Research and Technology Centre) localizat la [52.252830 N, 4.11069 E], lângă Noordwijk, Olanda.

Tabela 5.1 INDICI DE PERFORMANTA PE IRF-CAZUL MONOSTATIC

		PSLR [dB]	ISLR [dB]	$\delta_{-3dB}$ [m]
produs L1 IRF ideal	range	>21.2	<-16.1	3.10
	azimut	>21.2	<-16.1	22.7
produs L1 IRF real	range	20.70	-16.40	3.07
	azimut	20.90	-16.68	22.83
procesor propus IRF real	range	19.99	-16.56	3.10
	azimut	20.17	-16.94	22.80

Au fost evaluați următorii indici de calitate: PSLR (eng. the peak to side-lobe ratio), ISLR (the integrated to side-lobe ratio) și rezoluția la -3dB ( $\delta_{-3dB}$ ). Rezultatele obținute sunt în concordanță cu [21].

### 5.4.2 Achiziția bistatică

Scenariul de achiziție bistatică este format din Sentine-1 ca emițător și COBIS ca receptor cu baza la sol.

### 5.4.3 Rezultate

#### Monostatic

Evaluarea pe modul SM (S6) a fost realizată focalizând datele SAR conținând insula Fogo, Cape Verde. În Fig. 5.9a este prezentat rezultatul ( $30 \text{ km} \times 30 \text{ km}$ ). Pentru modul TOPSAR au fost focalizate date pe modul IW și EW pentru o fâșie ce conține capitala României, București și respectiv orașul Sisimiut, Groenlanda.

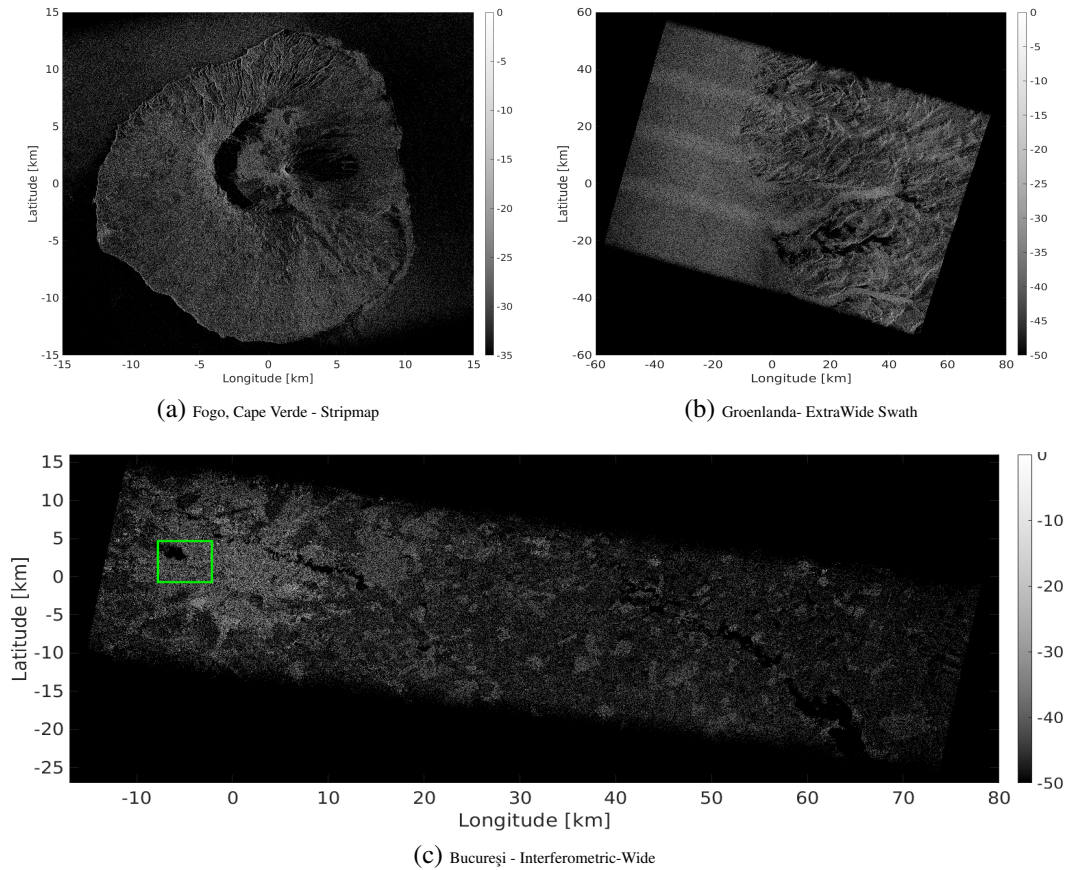


Figura 5.9 Rezultate pe modul monostatic (magnitudine în dB) obținute din date fără UFR

Fig. 5.9c și Fig. 5.9b prezintă rezultatele obținute cu procesorul propus pentru focalizarea unui burst întreg și respectiv a patru burst-uri. Cele două achiziții au fost realizate pe 3.03.2020 (IW) și pe 12.04.2021 (EW).

#### Bistatic

Lanțul de formare a imaginilor SAR, care implică un modul de selecție după unghi a pixelilor și un grid de imagine adaptat la sol este comparat cu algoritmul clasic BP aplicat pe grid uniform Fig. 5.14. Selecția pixelilor, realizată folosind amprenta la sol a antenei emițătorului Sentinel 1 este evidențiată în Fig. 5.14a pentru gridul uniform. Pentru gridul eliptic, această etapă este prezentată în Fig. 5.14b. Pixelii cărora li se aplică

actualizarea prin proiecție inversă folosind ultimul profil de distanță se află între curbele de culoare roșie. Imaginea finală SAR pe grid eliptic Fig. 5.14d poate fi interpolată pe grid uniform la sol 5.14c. Distanță dintre pixeli folosită a fost de 5m atât pe direcția latitudine cât și pe longitudine.

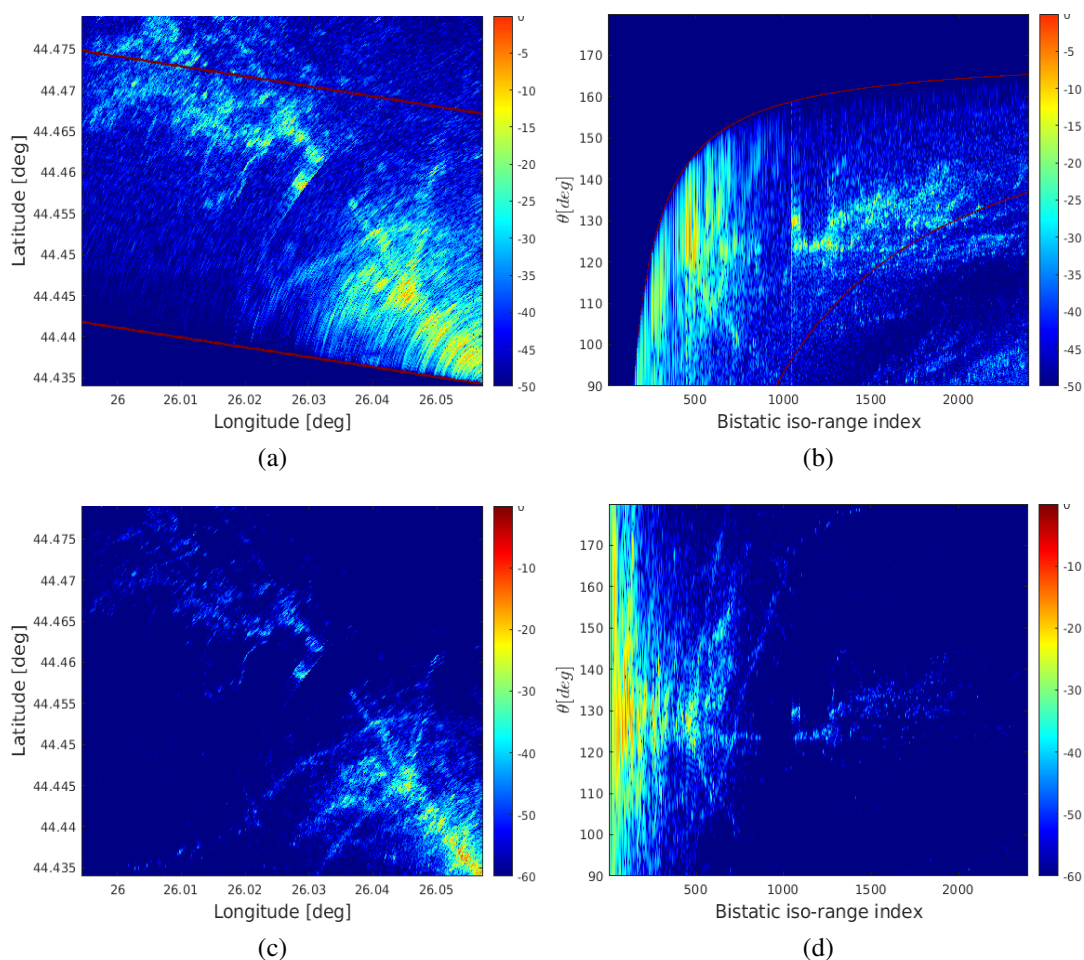


Figura 5.14 Rezultatele pentru configurația bistatică: a) Imagine intermediară pentru grid uniform la sol, b) imagine intermediară pentru grid eliptic la sol, c) imagine SAR finală pe grid uniform d) imagine SAR finală pe grid eliptic

## 5.5 Concluzii

În acest capitol, a fost propus un procesor SAR în domeniul timp bazat pe FBP, contribuțiile principale fiind rutina de formare a gridului eliptic la sol și constrângerea privind selecția pixelilor în pasul de proiecție inversă.

# Capitolul 6

## Diminuarea zgomotului pentru modul TOPSAR

### 6.1 Descrierea problemei și soluții actuale

În cadrul programului Copernicus, există două platforme satelitare, Sentinel 1 A/B, echipate cu senzori SAR în banda C, având capabilități de scanare pe 4 moduri STRIPMAP, Interferometric Wide (IW), ExtraWide (EW) și Wave Mode (WV), fie în cu polarizare singulară fie cu polarizare duală. Dintre toate produsele, în condiții de reflectanță scăzută (ex., întinderi de apă fără valuri, deșert), recepția pe polarizare ortogonală pe modurile TOPSAR este afectată (imaginea detectată - GRDM) de zgomot termic amplificat de procesorul SAR. Chiar dacă după versiunea 2.90 a Instrument Processing Facility, au fost puși la dispoziție vectorii de zgomot ca date auxiliare, precum și o metodă de reducere a zgomotului folosindu-i pe aceștia [24], rezultatele obținute nu sunt întotdeauna satisfăcătoare.

### 6.2 Soluția propusă

Metoda de diminuare a zgomotului propusă se bazează pe reconstrucția datelor pierdute prin aplicarea metodei ESA [24], estimându-le prin intermediul metodei de regresie cu procese Gaussiene (GPR). Inițial, atât imaginea pe co-polarizare cât și cea pe polarizare ortogonală sunt corectate folosind [24]. Apoi, se aplică o corecție după unghiul de incidență. Folosind zonele cu raport semnal+zgomot pe zgomot (definit în [22]) relativ mare se antrenează modelul GPR. Procesul de antrenare învață trecerea de la semnăturile pe co-polarizare la cele pe polarizare ortogonală. Datele de intrare sunt reprezentate de imaginile co-pol parțial corectate prin metoda ESA și cărora li s-a aplicat și compensare cu unghiul de incidență în timp ce ieșirea este reprezentată de datele de pe polarizare ortogonală. În cadrul metodei propuse, imaginea finală se formează combinând ieșirea GPR cu rezultatul [24] în care ponderea vectorilor de zgomot este supra-unitară, folosind

o mască. Această mască se obține în două etape. În prima se rețin pozițiile unde metoda ESA ar genera valori nule sau negative apoi, acestei măști binare i se aplică un nucleu circular  $7 \times 7$  pentru extinderea influenței rezultatelor GPR.

### 6.2.1 Regresie bazată pe procese Gaussiene

Chiar dacă regresia bazată pe procese Gaussiene reprezintă o tehnică puternică de predicție Bayesiană, a fost prezentată relativ recent [25] ca metodă de Machine Learning. Anterior, GPR era cunoscută ca interpolator Kriegering, fiind cu succes aplicată în maparea parametrilor fizici în contextul polarimetriei SAR [3]. În cazul nostru, GPR este folosit la modelarea corespondenței dintre datele achiziționate pe co-polarizare și cele de pe polarizare ortogonală.

### 6.2.2 Corecția reflectivității cu unghiul de incidență

Întrucât unghiul de incidență nu a fost inclus ca dată de intrare în modelul GPR, atât imaginii co-pol cât și celei pe polarizare ortogonală i s-a aplicat această corecție.

## 6.3 Rezultate

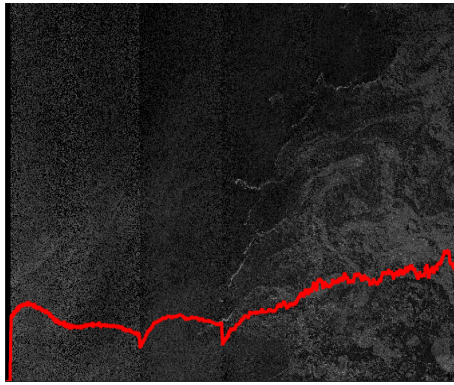
În această secțiune, sunt prezentate rezultatele obținute după aplicarea metodei propuse în contrast cu cele obținute aplicând metoda [24]. Cele patru exemple prezentate în Fig. 6.8 corespund următoarelor produse:

- S1A\_EW\_GRDM\_1SDH\_20210621T072157\_20210621T072257\_038435\_04890F\_A9C0
- S1A\_EW\_GRDM\_1SDH\_20210620T064151\_20210620T064251\_038420\_0488A2\_65A8
- S1B\_EW\_GRDM\_1SDH\_20190124T074426\_20190124T074526\_014633\_01B458\_E8F5
- S1A\_EW\_GRDM\_1SDH\_20210307T070530\_20210307T070630\_036889\_0456BB\_881C

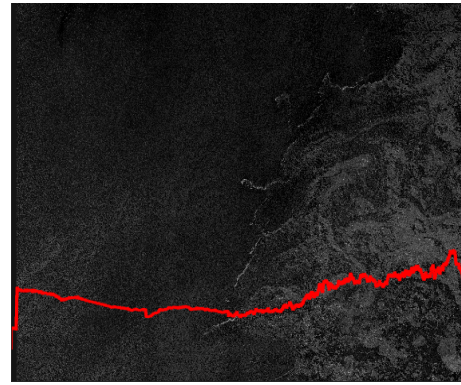
## 6.4 Concluzii

În cadrul acestui capitol a fost propusă o metodă de reducere a zgomotului termic din produsele GRDM TOPSAR achiziționate cu Sentinel 1 pe scene cu indici de reflectivitate scăzuți. Aceasta este prima astfel de metodă care beneficiază de informațiile furnizate de canalul de co-polarizare pentru îmbunătățirea imaginii pe polarizare ortogonală. Pe lângă efectul vizual care demonstrează îmbunătățirea, au fost evaluate profilele de distanță medii (curbele roșii din Fig. 6.8) care demonstrează diminuarea discrepanțelor dintre fasiile de scanare.

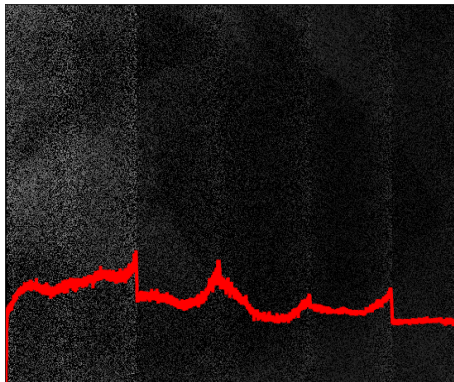




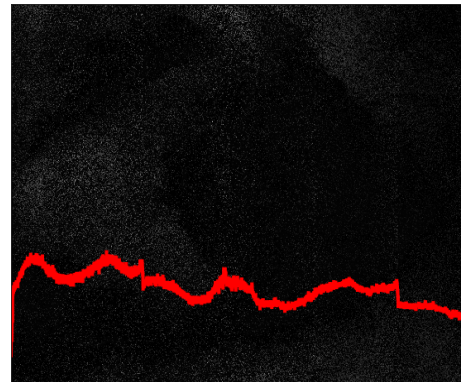
(a) metoda ESA



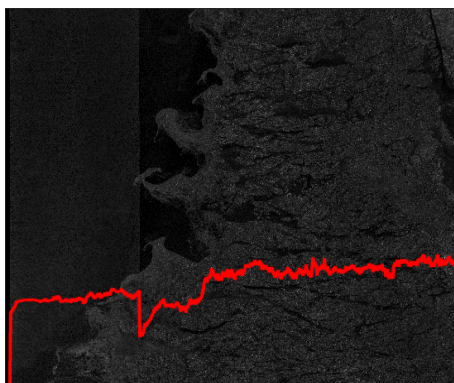
(b) metoda propusă



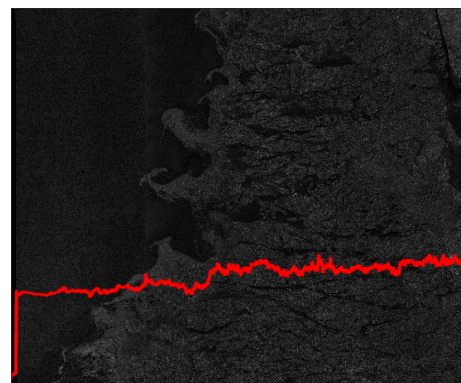
(c) metoda ESA



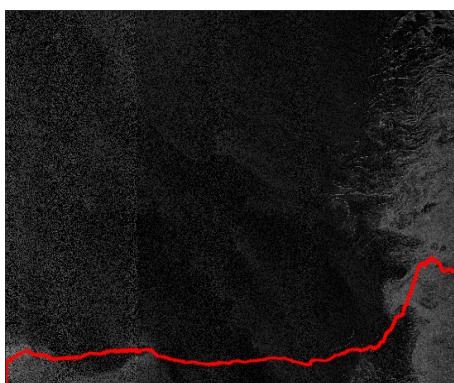
(d) metoda propusă



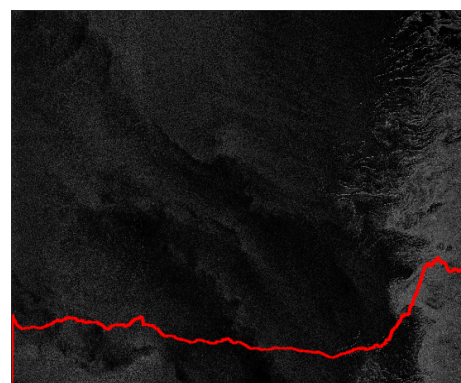
(e) metoda ESA



(f) metoda propusă



(a) metoda ESA



(b) metoda propusă

Figura 6.8 Rezultate comparative între metoda ESA și metoda propusă

# Capitolul 7

## Conclusions

### 7.2 Contribuții originale

Principalele contribuții ale tezei sunt:

- Determinarea operatorului de proiecție inversă asociat algoritmului clasic de focalizare SAR Back-Projection folosit ca bază de sparsitate în context CS și modificarea soluției greedy CS prin introducerea unui filtru neliniar bazat pe PSF [14, 13];
- Dezvoltarea unui procesor SAR bistatic pentru contextul special de achiziție multi-apertură bazat pe reconstrucția CS a profilelor de azimut folosind ca bază un dicționar format din semnale chirp [15, 11];
- Studiul performanței diversilor algoritmi de rezolvare CS pentru procesorul bistatic multi-apertură [11];
- Introducerea unei proceduri de determinare a gridurilor eliptice situate în plane oarecare pentru FBP [10]
- Dezvoltarea unui procesor SAR invariant la modurile de scanare pentru care gridul polar/eliptic este calculat direct într-un plan la sol [10]
- Introducerea unei metode noi pentru diminuarea zgomotului din imaginile obținute pe polarizare ortogonală pe modul TOPSAR care implică imaginile de pe co-polarizare [12].

## 7.3 Lista de publicații

### Reviste:

1. **A. Focsa**, A. Anghel, M. Datcu and S. -A. Toma, "Mixed Compressive Sensing Back-Projection for SAR Focusing on Geocoded Grid," in IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, vol. 14, pp. 4298-4309, 2021, doi: 10.1109/JSTARS.2021.3072208. (**Impact Factor:3.784 - Q2**)

2. **A. Focsa**, A. Anghel and M. Datcu, "A Compressive-Sensing Approach for Opportunistic Bistatic SAR Imaging Enhancement by Harnessing Sparse Multiaperture Data," in IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, vol. 60, pp. 1-14, 2022, Art no. 5205914, doi: 10.1109/TGRS.2021.3071861.(**Impact Factor:5.6 - Q1**)

3. **A. Focsa**, A. Anghel and M. Datcu, "Bistatic planar grid generation for Factorized Back-Projection SAR focusing," in IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters (Under review)

### Conferințe:

1. Ș. Toma, S. Bogdan, **A. Focșa** and M. Pura, "On Anomalous Deformation Profile Detection Through Supervised and Unsupervised Machine Learning," IGARSS 2019 - 2019 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2019, pp. 7419-7422, doi: 10.1109/IGARSS.2019.8898459.

2. **A. Focsa**, S. -A. Toma and D. Gorgoteanu, "On the Interferometric Capabilities of the Pulson P440 UWB Radar," 2021 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium IGARSS, 2021, pp. 8201-8204, doi: 10.1109/IGARSS47720.2021.9553329.

3. **A. Focșa**, A. Anghel, Ș. -A. Toma and M. Datcu, "Synthetic Aperture Radar Focusing Based on Back-Projection and Compressive Sensing," IGARSS 2020 - 2020 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2020, pp. 2376-2379, doi: 10.1109/IGARSS39084.2020.9323775.

4. **A. Focsa**, M. Datcu, S. -A. Toma, A. Anghel and R. Cacoveanu, "Opportunistic Bistatic SAR Image Classification Using Sub-aperture Decomposition," 2020 13th International Conference on Communications (COMM), 2020, pp. 203-207, doi: 10.1109/COMM48946.2020.9141953.

5. S. -A. Toma, B. Sebacher, D. Teleagă and **A. Focșa**, "Deformation Profile Analysis Using Uniform Manifold Approximation and Projection," IGARSS 2020 - 2020 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2020, pp. 4227-4230, doi: 10.1109/IGARSS39084.2020.9323279.

6. **A. Focsa**, M. Datcu and A. Anghel, "Compressed sensing-based multi-aperture focusing of spaceborne transmitter/stationary receiver bistatic SAR data," 2020 IEEE Radar Conference (RadarConf20), 2020, pp. 1-4, doi: 10.1109/RadarConf2043947.2020.9266567.

7. **A. Focșa**, A. Anghel, and M. Datcu, "Inter-polarization Mapping via Gaussian Process Regression for Sentinel-1 EW Denoising," IGARSS 2022 - 2022 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2022 (Accepted and presented).

# Bibliografie

- [1] Alonso, M. T., Lopez-Dekker, P., and Mallorqui, J. J. (2010). A novel strategy for radar imaging based on compressive sensing. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 48(12):4285–4295.
- [2] Anghel, A., Cacoveanu, R., Moldovan, A.-S., Rommen, B., and Datcu, M. (2019). COBIS: Opportunistic C-band bistatic SAR differential interferometry. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 12(10):3980–3998.
- [3] Blix, K., Espeseth, M. M., and Eltoft, T. (2020). Machine Learning for Arctic Sea Ice Physical Properties Estimation Using Dual-Polarimetric SAR Data. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 59(6):4618–4634.
- [4] Chlailly, S., Kramer, T., Eltoft, T., and Marinoni, A. (2021). A wavelet-based thermal noise removal approach for Sentinel-1 records on polar areas. In *EUSAR 2021; 13th European Conference on Synthetic Aperture Radar*, pages 1–5.
- [5] Cohen, A., Dahmen, W., and DeVore, R. (2017). Orthogonal matching pursuit under the restricted isometry property. *Constructive Approximation*, 45(1):113–127.
- [6] Davidson, M., Gebert, N., and Giulicchi, L. (2021). ROSE-L – The L-band SAR Mission for Copernicus. In *EUSAR 2021; 13th European Conference on Synthetic Aperture Radar*, pages 1–2.
- [7] De Maio, A., Eldar, Y. C., and Haimovich, A. M. (2019). *Compressed sensing in radar signal processing*. Cambridge University Press.
- [8] Dong, X. and Zhang, Y. (2013). A novel compressive sensing algorithm for sar imaging. *IEEE Journal of selected topics in applied earth observations and remote sensing*, 7(2):708–720.
- [9] Dongyang, A., Rui, W., Cheng, H., and Li, Y. (2017). A sparse sar imaging method based on multiple measurement vectors model. *Remote Sensing*, 9(297).
- [10] Focsa, A., Anghel, A., and Datcu, M. (2022a). Bistatic planar grid generation for Factorized Back-Projection SAR focusing. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, –(—):0000–0000.
- [11] Focsa, A., Anghel, A., and Datcu, M. (2022b). A compressive-sensing approach for opportunistic bistatic sar imaging enhancement by harnessing sparse multiaperture data. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 60:1–14.
- [12] Focsa, A., Anghel, A., and Datcu, M. (2022c). Inter-polarization Mapping via Gaussian Process Regression for Sentinel-1 EW Denoising. In *IGARSS 2022 - 2022 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*, pages 0000–0000.

- [13] Focsa, A., Anghel, A., Datcu, M., and Toma, S.-A. (2021). Mixed compressive sensing back-projection for sar focusing on geocoded grid. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 14:4298–4309.
- [14] Focsa, A., Anghel, A., Toma, S.-A., and Datcu, M. (2020a). Synthetic Aperture Radar Focusing Based on Back-Projection and Compressive Sensing. In *IGARSS 2020 - 2020 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*, pages 2376–2379.
- [15] Focsa, A., Datcu, M., and Anghel, A. (2020b). Compressed sensing-based multi-aperture focusing of spaceborne transmitter/stationary receiver bistatic sar data. In *2020 IEEE Radar Conference (RadarConf20)*, pages 1–4.
- [16] Geudtner, D., Tossaint, M., Davidson, M., and Torres, R. (2021). Copernicus Sentinel-1 Next Generation Mission. In *2021 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium IGARSS*, pages 874–876.
- [17] Gorham, L. A. and Moore, L. J. (2010). Sar image formation toolbox for matlab. In *Algorithms for Synthetic Aperture Radar Imagery XVII*, volume 7699, page 769906. International Society for Optics and Photonics.
- [18] Korosov, A., Demchev, D., Miranda, N., Franceschi, N., and Park, J.-W. (2021). Thermal Denoising of Cross-Polarized Sentinel-1 Data in Interferometric and Extra Wide Swath Modes. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. (Early Access).
- [19] Lee, P. Q., Xu, L., and Claudi, D. A. (2020). Sentinel-1 additive noise removal from cross-polarization extra-wide TOPSAR with dynamic least-squares. *Remote Sensing of Environment*, 248:111982.
- [20] Lee, P. Q., Xu, L., and Claudi, D. A. (2021). Estimating Noise Floor in Sentinel-1 Images With Linear Programming and Least Squares. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, pages 1–14.
- [21] M. Bourbigot, H. Johnsen, R. Piantanida, G. Hajduch, and J. Poullaouec (2016). Sentinel-1 Product Definition. Technical Report S1-RS-MDA-52-7440, Collecte Localisation Satellites (CLS).
- [22] Park, J.-W., Won, J.-S., Korosov, A. A., Babiker, M., and Miranda, N. (2019). Textural noise correction for Sentinel-1 TOPSAR cross-polarization channel images. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 57(6):4040–4049.
- [23] Piantanida, R., Hajduch, G., and Poullaouec, J. (2016). Sentinel-1 level 1 detailed algorithm definition. *ESA, techreport SEN-TN-52-7445*.
- [24] Piantanida, R., Miranda, N., and Hadjduch, G. (2017). Thermal Denoising of Products Generated by the S-1 IPF. *Sentinel-1 Mission Perform. Centre, Ramonville-Saint-Agne, France, Tech. Rep. MPC-0392*.
- [25] Rasmussen, C. E. (2003). Gaussian processes in machine learning. In *Summer school on machine learning*, pages 63–71. Springer.
- [26] Rodriguez-Cassola, M., Prats-Iraola, P., Krieger, G., and Moreira, A. (2019). On the use of time-domain SAR focusing in spaceborne SAR missions. In *IGARSS 2019-2019 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*, pages 755–758. IEEE.

- [27] Soumekh, M. (1999). *Synthetic aperture radar signal processing*, volume 7. New York: Wiley.
- [28] Sun, Y. and Li, X.-M. (2021). Denoising Sentinel-1 Extra-Wide Mode Cross-Polarization Images Over Sea Ice. *IEEE Trans. Geosci. Remote. Sens.*, 59(3):2116–2131.
- [29] Ulander, L. M., Hellsten, H., and Stenstrom, G. (2003). Synthetic-aperture radar processing using fast factorized back-projection. *IEEE Transactions on Aerospace and electronic systems*, 39(3):760–776.
- [30] Yegulalp, A. F. (1999). Fast backprojection algorithm for synthetic aperture radar. In *Proceedings of the 1999 IEEE Radar Conference. Radar into the Next Millennium (Cat. No. 99CH36249)*, pages 60–65. IEEE.