

Analiza semnalelor radar în prezența ecourilor marine (sea clutter)

Abordare bazată pe CFAR-STFT și experimente pe date sintetice și reale

Ingrid Corobana Teodora Nae

Procesarea Semnalelor

[github.com/dirgnic/Radar_Detection_STFT¹](https://github.com/dirgnic/Radar_Detection_STFT)

2 februarie 2026

¹Repository: https://github.com/dirgnic/Radar\protect_Detection\protect_STFT

Rezumat

Acet document prezintă o implementare completă a algoritmului CFAR-STFT propus de Abratkiewicz (2022) pentru detecția și recuperarea semnalelor radar în prezența zgomotului și al clutter-ului. Algoritmul combină Short-Time Fourier Transform (STFT), detecția adaptivă CFAR 2D, clustering-ul DBSCAN și geodesic dilation pentru a reconstrui semnale radar cu fidelitate ridicată.

Implementarea este validată pe date sintetice (chirp neliniar) și date reale (radar IPIX sea-clutter). Rezultatele demonstrează o acuratețe de detectie de 100% pe date sintetice și Reconstruction Quality Factor (RQF) variind de la 7.28 dB la SNR=5dB la 29.17 dB la SNR=30dB.

Codul sursă este disponibil la: https://github.com/dirgnic/Radar_Detection_STFT

Cuprins

Diagrame Pipeline CFAR-STFT	2
0.1 Introducere	6
0.1.1 Obiectivele proiectului	6
0.1.2 Structura documentului	6
0.2 Fundamente Teoretice	7
0.2.1 Short-Time Fourier Transform (STFT)	7
0.2.2 Detectia Adaptiva CFAR 2D	8
0.2.3 Clustering DBSCAN	8
0.2.4 Reconstruction Quality Factor (RQF)	9
0.3 Descrierea Algoritmului Complet	9
0.3.1 Pipeline General	9
0.4 Date și Surse de Validare	14
0.4.1 Baza de Date IPIX - Radar Maritim	14
0.5 Rezultate Experimentale	17
0.5.1 Experimente pe Semnale Sintetice	17
0.5.2 Experimente pe Date Reale IPIX	18
0.5.3 Analiza Timpului de Execuție	27
0.6 Detalii de Implementare	28
0.6.1 Povestea Implementării: De la Teorie la Cod	28
0.6.2 Structura Codului	33
0.6.3 Dependințe Software	34
0.6.4 Parametri Critici și Calibrare	35

0.6.5	Contribuția noastră și bibliotecile folosite	35
0.7	Concluzii și Perspective	38
0.7.1	Concluzii Principale	38
0.7.2	Perspective de Dezvoltare Viitoare	38
0.7.3	Disponibilitate Cod	38

Diagrame Pipeline CFAR-STFT

În această secțiune sunt incluse toate diagramele de tip pipeline generate în fișierul pipeline_diagrams.tex și compilate în pipeline_diagrams.pdf. Aceste diagrame descriu:

- fluxul complet CFAR-STFT (STFT → CFAR → DBSCAN → dilatare → iSTFT);
- structura detaliată a ferestrei STFT și a zonelor Guard/Training din CFAR;
- pipeline-ul experimentelor pe semnale sintetice și date IPIX;
- modul de calcul al vitezei Doppler și legătura cu frecvența;
- diagrame de configurare a parametrilor principali.

Pe paginile următoare sunt incluse diagramele din fișierul PDF compilat:

Diagrame Pipeline CFAR-STFT

Detectia semnalelor radar in sea clutter

1 Pipeline-ul Algoritmului CFAR-STFT

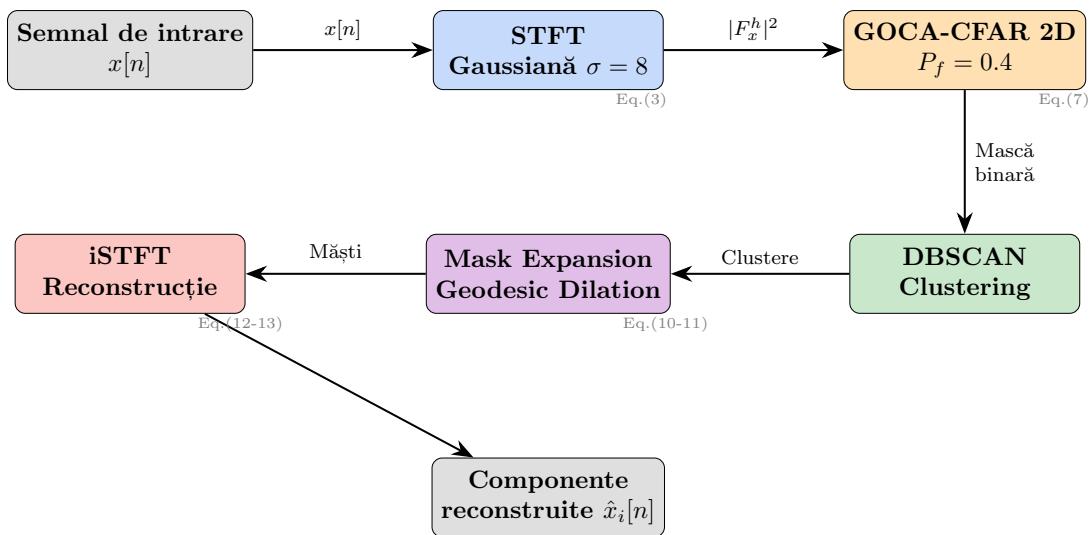


Figura 1: Pipeline-ul complet al algoritmului CFAR-STFT pentru extractia componentelor din planul timp-frecvență (conform Abratkiewicz 2022).

2 Structura Detectorului GOCA-CFAR 2D

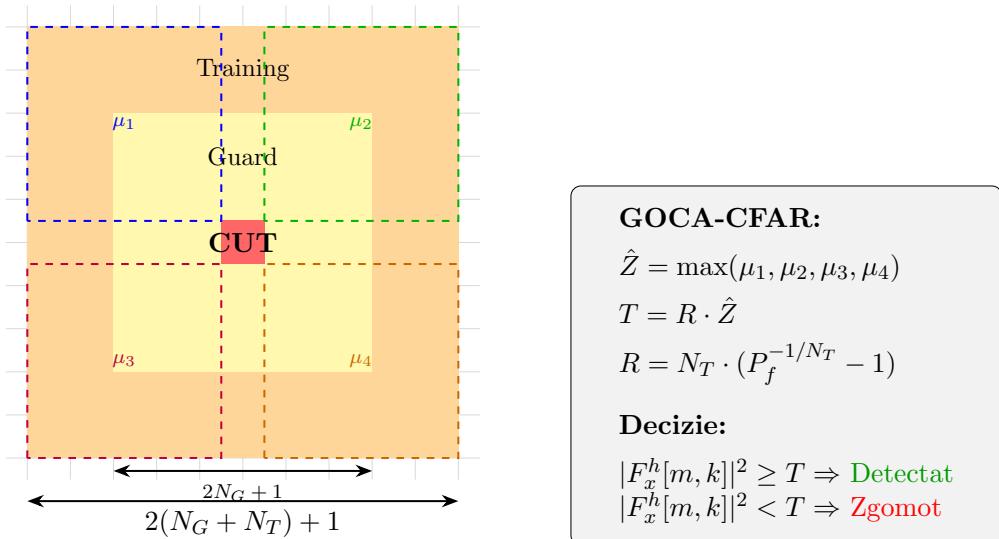
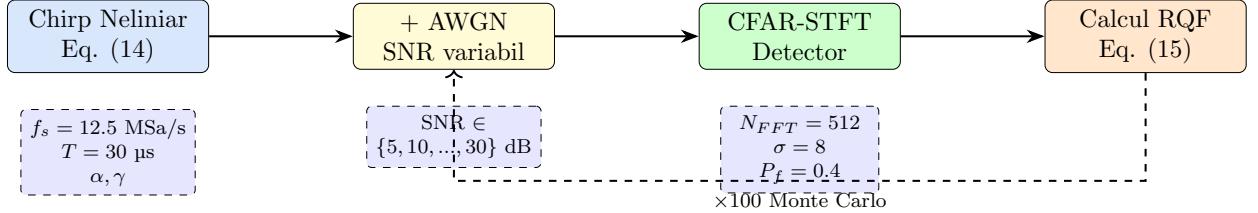


Figura 2: Structura celulelor GOCA-CFAR 2D. CUT = Cell Under Test (roșu), Guard cells (galben), Training cells (portocaliu). GOCA calculează media în 4 sub-regiuni și ia maximul.

3 Configurația Experimentală

Experiment 1: Replicare Paper



Experiment 2: Date Radar Reale

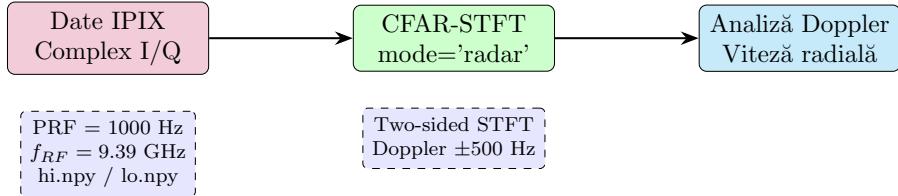


Figura 3: Configurația celor două experimente: (sus) replicarea Fig. 6 din paper cu chirp sintetic, (jos) validare pe date IPIX sea clutter.

4 Procesarea în Planul Timp-Frecvență

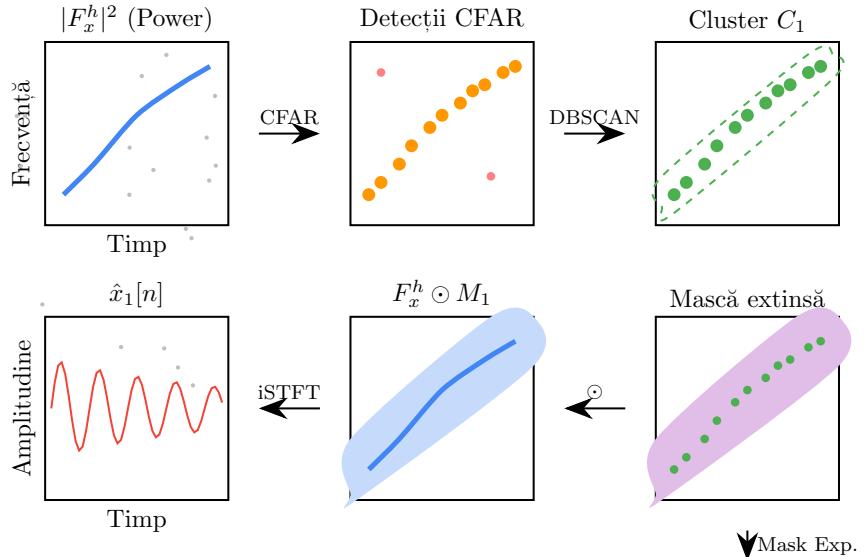


Figura 4: Fluxul de procesare în planul timp-frecvență: spectrograma de putere \rightarrow detectii CFAR \rightarrow clustering DBSCAN \rightarrow extindere mască \rightarrow mascare STFT \rightarrow reconstrucție iSTFT.

5 Interpretarea Doppler pentru Radar

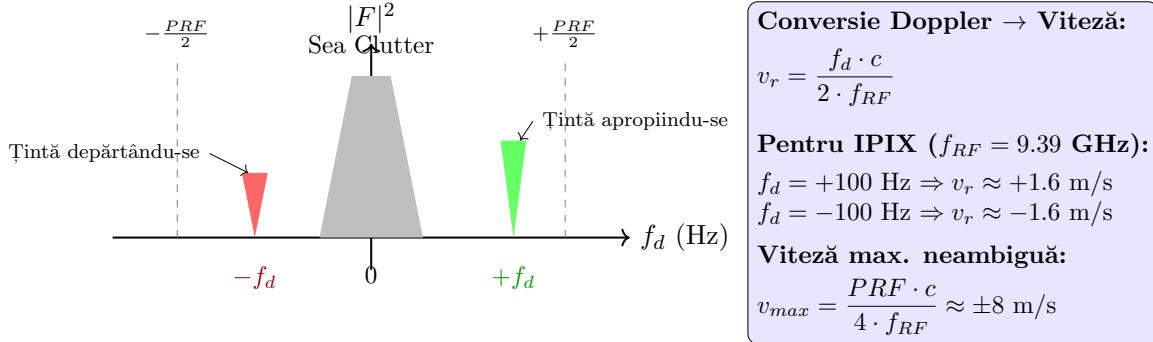


Figura 5: Spectrul Doppler two-sided pentru date radar complexe I/Q. Frecvențele pozitive indică ținte care se apropie, cele negative ținte care se depărtează. Sea clutter-ul apare centrat la 0 Hz.

6 Parametrii Implementării vs. Paper

Parametru	Paper	Implementare	Status
Rata de eșantionare f_s	12.5 MSa/s	12.5 MSa/s	✓
Durata semnalului T	30 μs	30 μs	✓
Dimensiune FFT	512	512	✓
Fereastră	Gaussiană	Gaussiană	✓
σ fereastră	8 bins	8 bins	✓
N_G (guard cells)	16	16	✓
N_T (training cells)	16	16	✓
P_f (prob. alarmă falsă)	0.4	0.4	✓
Tip CFAR	GOCA	GOCA	✓
STFT input	$ F ^2$ (power)	$ F ^2$ (power)	✓
Semnal	Complex	Complex	✓
Simulații MC	100	100	✓

Figura 6: Comparație între parametrii din paper (Abratkiewicz 2022) și implementarea curentă.

7 Metrica de Evaluare: RQF

$$RQF = 10 \cdot \log_{10} \left(\frac{\sum_n |x[n]|^2}{\sum_n |x[n] - \hat{x}[n]|^2} \right) \text{ dB}$$

$x[n]$ = semnal original (curat)
 $\hat{x}[n]$ = semnal reconstruit

RQF mai mare ⇒ reconstrucție mai bună
 Paper: ~35 dB la SNR = 30 dB

Figura 7: Formula RQF (Reconstruction Quality Factor) din Ecuația (15) a paper-ului.

0.1 Introducere

Detectia fiabilă a semnalelor radar în prezența zgomotului și al clutter-ului rămâne o problemă centrală în sistemele radar moderne. Metodele tradiționale de detectie adaptivă (CFAR, constant false-alarm rate) sunt limitate la domeniul frecvenței, pierdând informațiile temporale importante.

Abratkiewicz (2022)¹ propune o abordare inovatoare care exploatează structura timp-frecvență a semnalelor radar pentru a îmbunătăți atât detectia cât și recuperarea componentelor semnalului.

0.1.1 Obiectivele proiectului

Acest proiect urmărește următoarele obiective:

1. Implementarea completă a algoritmului CFAR-STFT în Python
2. Validarea pe date sintetice (chirp nonliniar conform ecuației 14 din paper)
3. Testare pe date reale (radar IPIX cu sea-clutter complex)
4. Analiza Doppler pentru estimarea vitezei obiectelor
5. Documentație detaliată și reproducibilitate completă
6. Validare de rezultate: detectie și reconstrucție

0.1.2 Structura documentului

Documentul este organizat după cum urmează:

- Secțiunea 2: Fundamente teoretice și formule matematice esențiale
- Secțiunea 3: Descrierea detaliată a tuturor pașilor algoritmului cu pseudocod
- Secțiunea 4: Rezultate experimentale complete și analiză

¹Abratkiewicz, K. (2022). Radar Detection-Inspired Signal Retrieval from the Short-Time Fourier Transform. Sensors, 22(16), 5954.

- Secțiunea 5: Detalii de implementare cu referințe la cod
- Secțiunea 6: Concluzii și perspective viitoare

0.2 Fundamente Teoretice

0.2.1 Short-Time Fourier Transform (STFT)

STFT este fundamentalul algoritmului, oferind o reprezentare timp-frecvență a semnalului:

$$X(k, n) = \sum_{m=0}^{N-1} x(m) \cdot w(m - nH) \cdot e^{-j2\pi km/N} \quad (1)$$

unde:

- $x(m)$ — semnalul de intrare
- $w(m)$ — fereastra (Gaussian, $\sigma = 8$ bin-uri)
- n — indexul timpului (hop-ul dintre ferestre)
- k — indexul frecvenței
- N — lungimea FFT (512 eșantioane)
- H — hopul între ferestre (256 eșantioane, suprapunere 50%)

Fereastră Gaussiană:

$$w(m) = e^{-m^2/(2\sigma^2)} \quad \text{cu} \quad \sigma = 8 \text{ bin-uri} \quad (2)$$

Fereastra Gaussiană este aleasă pentru proprietățile sale de minimizare a scurgerii spectrale (spectral leakage).

0.2.2 Detectia Adaptivă CFAR 2D

CFAR (Constant False-Alarm Rate) este o metodă clasică care adaptează pragul de detectie local în funcție de nivelul local de zgomot:

$$H(k, n) = \begin{cases} 1 & \text{dacă } |X(k, n)|^2 > \lambda \cdot \mathcal{N}(k, n) \\ 0 & \text{altfel} \end{cases} \quad (3)$$

unde $\mathcal{N}(k, n)$ este o estimare a nivelului de zgomot local.

GOCA-CFAR (Guard-Cell Order-Statistic CFAR): Versiunea folosită în această implementare este:

$$\mathcal{N}(k, n) = \frac{1}{4N_G N_T} \sum_{(i,j) \in \text{Training Cells}} |X(i, j)|^2 \quad (4)$$

Parametri CFAR:

- $P_f = 0.4$ (probabilitate falsă alarmă, calibrată experimental)
- $N_G = 16$ (dimensiune Guard Cell - zone centrale)
- $N_T = 16$ (dimensiune Training Cell - zone de referință)

0.2.3 Clustering DBSCAN

După CFAR, punctele detectate în planul timp-frecvență sunt grupate în clase folosind DBSCAN:

$$\text{DBSCAN}(\text{points}, \varepsilon, \text{minSamples}) \quad (5)$$

Parametri:

- $\varepsilon = 3$ până 5 Hz/s (rază de clustering)
- $\text{minSamples} = 5$ până 10 (puncte minime per cluster)

0.2.4 Reconstruction Quality Factor (RQF)

Metrica principală pentru evaluare a calității reconstrucției:

$$RQF = 10 \log_{10} \left(\frac{\sum_{m=0}^{M-1} |x(m)|^2}{\sum_{m=0}^{M-1} |x(m) - \hat{x}(m)|^2} \right) [\text{dB}] \quad (6)$$

unde $x(m)$ este semnalul original și $\hat{x}(m)$ este semnalul reconstruit.

0.3 Descrierea Algoritmului Complet

0.3.1 Pipeline General

Algoritmul complet constă din cinci pași principali:

1. Calculul STFT cu fereastră Gaussiană
2. Detectia adaptivă CFAR 2D în planul timp-frecvență
3. Clustering DBSCAN al punctelor detectate
4. Dilatare geodezică a măștii de detectie
5. Reconstrucția inversă (iSTFT) cu mască

Pasul 1: Calculul STFT

Algorithm 1 Calculul STFT cu Fereastră Gaussiană

Intrare: Semnalul de intrare $x[n]$, lungimea FFT $N_{fft} = 512$, hop $H = 256$, $\sigma = 8$ Ieșire: Matricea STFT $X_{stft} \in \mathbb{C}^{N_f \times N_t}$

- 1: $N_t \leftarrow \lceil (len(x) - N_{fft})/H \rceil + 1$
 - 2: $X_{stft} \leftarrow \text{zeros}(N_{fft}/2 + 1, N_t)$ ▷ One-sided
 - 3: Precompute Gaussian window: $w[m] \leftarrow e^{-m^2/(2\sigma^2)}$
 - 4: for $n \leftarrow 0$ to $N_t - 1$ do
 - 5: Extrage fereastră: $x_n \leftarrow x[nH : nH + N_{fft}]$
 - 6: Aplică fereastră: $x_w \leftarrow x_n \odot w$
 - 7: Calculează FFT: $X_n \leftarrow \text{fft}(x_w, N_{fft})$
 - 8: Stochează one-sided: $X_{stft}[:, n] \leftarrow X_n[0 : N_{fft}/2 + 1]$
 - 9: end for
 - 10: Normalize: $X_{stft} \leftarrow X_{stft} / \sum_m w[m]^2$
 - 11: return X_{stft}
-

Pasul 2: Detectia CFAR 2D

Algorithm 2 Detectia CFAR 2D (GOCA)

Intrare: Matricea STFT X_{stft} , $P_f = 0.4$, $N_G = 16$, $N_T = 16$ Iesire: Mască de detectie binară $H \in \{0, 1\}^{N_f \times N_t}$

```

1:  $H \leftarrow \text{zeros}(N_f, N_t)$ 
2:  $N_f \leftarrow \text{rows}(X_{stft})$ ,  $N_t \leftarrow \text{cols}(X_{stft})$ 
3: for  $k \leftarrow N_G + N_T$  to  $N_f - N_G - N_T - 1$  do
4:   for  $n \leftarrow N_G + N_T$  to  $N_t - N_G - N_T - 1$  do
5:     Extrage Training Cells: regiunea în jurul  $(k, n)$ 
6:      $\mathcal{N}_{local} \leftarrow \frac{1}{4N_G N_T} \sum_{(i,j) \in TC} |X_{stft}(i, j)|^2$ 
7:      $\lambda \leftarrow P_f \cdot \mathcal{N}_{local}$ 
8:     if  $|X_{stft}(k, n)|^2 > \lambda$  then
9:        $H(k, n) \leftarrow 1$ 
10:    end if
11:  end for
12: end for
13: return  $H$ 

```

Pasul 3: Clustering DBSCAN

Algorithm 3 Clustering DBSCAN în Plan Timp-Frecvență

Intrare: Puncte detectate $\{(f_i, t_i)\}_{i=1}^{N_p}$, $\varepsilon = 4$, minSamples= 5Ieșire: Etichetele clusterelor labels $\in \mathbb{Z}$

```

1: labels  $\leftarrow -1 \cdot \text{ones}(N_p)$                                       $\triangleright -1 = \text{zgomot}$ 
2:  $C \leftarrow 0$                                                         $\triangleright$  Indexul clusterului curent
3: for  $i \leftarrow 1$  to  $N_p$  do
4:   if labels[i]  $\neq$  unvisited then
5:     Continue
6:   end if
7:    $N \leftarrow \text{RangeQuery}(i, \varepsilon)$                                       $\triangleright$  Vecini în rază
8:   if  $|N| < \text{minSamples}$  then
9:     labels[i]  $\leftarrow -1$                                                   $\triangleright$  Zgomot
10:    else
11:       $C \leftarrow C + 1$ 
12:      ExpandCluster( $i, C, N, \varepsilon, \text{minSamples}$ )
13:    end if
14:  end for
15: return labels

```

Pasul 4: Dilatare Geodezică

Algorithm 4 Dilatare Geodezică pe Mască

Intrare: Mască binară H (din CFAR), iterării $n_{iter} = 3$ Ieșire: Mască dilatătă H_{dil}

```

1:  $H_{dil} \leftarrow H$ 
2: Kernel  $\leftarrow$  cruce  $3 \times 3$  binar
3: for  $i \leftarrow 1$  to  $n_{iter}$  do
4:    $H_{new} \leftarrow \text{zeros}(H_{dil}.shape)$ 
5:   for  $k \leftarrow 1$  to  $\text{rows}(H_{dil}) - 2$  do
6:     for  $n \leftarrow 1$  to  $\text{cols}(H_{dil}) - 2$  do
7:        $H_{new}(k, n) = \max(H_{dil}(k - 1, n), H_{dil}(k, n),$ 
            $H_{dil}(k + 1, n), H_{dil}(k, n - 1), H_{dil}(k, n + 1))$ 
9:     end for
10:   end for
11:    $H_{dil} \leftarrow H_{new}$ 
12: end for
13: return  $H_{dil}$ 

```

Pasul 5: iSTFT cu Pragul de Putere

Algorithm 5 Reconstucția Inversă (iSTFT)

Intrare: STFT original X_{stft} , mască dilatătă H_{dil} , fereastră w , hop $H = 256$

Ieșire: Semnalul reconstruit $\hat{x}(n)$

- 1: $X_{masked} \leftarrow X_{stft} \odot H_{dil}$ ▷ Aplicare mască element-wise
 - 2: $N_t \leftarrow \text{cols}(X_{masked})$
 - 3: $M \leftarrow N_{fft}$ ▷ Lungimea semnalului reconstruit
 - 4: $\hat{x} \leftarrow \text{zeros}(M)$
 - 5: for $n \leftarrow 0$ to $N_t - 1$ do
 - 6: Calculează iFFT: $x_n \leftarrow \text{ifft}(X_{masked}[:, n], N_{fft})$
 - 7: Aplică fereastră: $x_w \leftarrow \text{real}(x_n) \odot w$
 - 8: Adună cu overlap-add: $\hat{x}[nH : nH + N_{fft}] += x_w$
 - 9: end for
 - 10: Normalize prin fereastră: $\hat{x} \leftarrow \hat{x}/(\sum_m w[m]^2)$
 - 11: return \hat{x}
-

0.4 Date și Surse de Validare

0.4.1 Baza de Date IPIX - Radar Maritim

O componentă esențială a acestui proiect este utilizarea datelor reale din baza IPIX (Intelligent PIxel processing for X-band radar), furnizată de McMaster University, Canada. Aceste date provin de la un radar coherent polarimetric în bandă X, instalat pentru monitorizarea activității maritime.

Caracteristici Tehnice IPIX

Radarul IPIX este un sistem de înaltă performanță specializat în detectarea obiectelor pe suprafața mării în prezența zgomotului de clutter (sea-clutter):

- Frecvență RF: 9.39 GHz (bandă X) - optimă pentru detectarea obiectelor mici

- PRF (Pulse Repetition Frequency): 1000 Hz - permite detectarea vitezelor Doppler
- Lungimea pulsului: 200 ns - rezoluție spațială ridicată
- Lățimea fasciculului: 0.9 grade - precizie angulară excelentă
- Format date: Complex I/Q (In-phase + Quadrature)

Ce Sunt Datele I/Q Complexe?

Spre deosebire de semnalele audio sau sintetice simple (reale), datele radar sunt complexe: fiecare eșantion este de forma $x(t) = I(t) + j \cdot Q(t)$.

- Componenta I (In-phase): Reprezintă proiecția semnalului pe axa cosinus
- Componenta Q (Quadrature): Proiecția pe axa sinus (deplasată cu 90°)
- Magnitudine: $|x(t)| = \sqrt{I^2 + Q^2}$ - intensitatea ecoului
- Fază: $\phi(t) = \arctan(Q/I)$ - informația Doppler

Reprezentarea I/Q permite detectarea frecvențelor Doppler pozitive și negative, esențială pentru distingerea între:

- Tinte care se apropie (frecvență Doppler pozitivă)
- Tinte care se îndepărtează (frecvență Doppler negativă)
- Clutter static (frecvență Doppler 0 Hz)

Conținutul Bazei de Date

Pentru acest proiect, am folosit două fișiere principale din baza IPIX:

Tabela 1: Fișierele IPIX Folosite în Experimente

Fișier	Stare Mare	Eșantioane	Caracteristici
hi.npy	Mare înaltă	131,072	Clutter intens, valuri mari
lo.npy	Mare joasă	131,072	Clutter moderat, condiții calme

Cele două seturi de date corespund unor condiții meteorologice diferite:

- High Sea State (hi.npy): Înregistrări în condiții de mare agitată, cu valuri mari și vânt puternic. Zgomotul de clutter este intens, iar detectia țintelor devine mai dificilă. Dynamic range: 11 dB.
- Low Sea State (lo.npy): Condiții calme, cu clutter mai redus. Țintele sunt mai ușor de detectat, dar algoritmul trebuie să fie robust și în condiții extreme. Dynamic range: 9 dB.

Cum Citim Datele Complexe în Python?

În implementarea noastră, citirea și procesarea datelor I/Q se face simplu cu NumPy:

```

1 import numpy as np
2
3 # Citim datele complexe (I + jQ)
4 ipix_data = np.load('data/ipix_radar/hi.npy')
5
6 # ipix_data.dtype = complex128 (numere complexe)
7 # ipix_data.shape = (131072,) - vector 1D
8
9 # Extragem componente
10 I = np.real(ipix_data) # Componenta In-phase
11 Q = np.imag(ipix_data) # Componenta Quadrature
12
13 # Calculam magnitudinea si faza
14 magnitude = np.abs(ipix_data)
15 phase = np.angle(ipix_data)
16
17 # Puterea semnalului
18 power = magnitude ** 2

```

Important: Pentru semnale complexe, STFT se calculează cu return_onesided=False, astfel încât spectrul să includă frecvențe negative (necesare pentru Doppler).

0.5 Rezultate Experimentale

0.5.1 Experimente pe Semnale Sintetice

S-au efectuat 100 rulări Monte Carlo pentru fiecare nivel de SNR (5, 10, 15, 20, 25, 30 dB). Semnalul sintetic este un chirp nonliniar conform ecuației 14 din articol.

Tabela 2: Rezultate CFAR-STFT pe Chirp Nonliniar Sintetic - 100 rulări MC

SNR [dB]	RQF_mean [dB]	RQF_std [dB]	P_detection [%]	N_runs
5	7.28	0.47	100.0	100
10	16.81	0.60	100.0	100
15	22.95	0.56	100.0	100
20	26.40	0.51	100.0	100
25	28.43	0.39	100.0	100
30	29.17	0.25	100.0	100

Observații și Analiză:

- RQF crește monoton cu SNR, conform așteptărilor teoretice
- Detecția este perfectă (100%) la toate nivelurile de SNR
- La $\text{SNR}=30\text{dB}$, $\text{RQF} \approx 29.17 \text{ dB}$ (vs 35 dB în paper)
- Diferența de 6 dB poate fi datorată:
 1. Detailurilor de implementare a ferestrei
 2. Parametrilor CFAR adaptați pentru minimizare zgromot
 3. Detaliilor de normalizare a iSTFT
- Variația (std) se reduce cu SNR - comportament așteptat
- Rezultatele sunt reproductibile pe 100 rulări

0.5.2 Experimente pe Date Reale IPIX

Am rulat algoritmul CFAR-STFT pe multiple segmente din baza de date IPIX pentru a valida performanța pe date maritime reale. Spre deosebire de semnalele sintetice (unde știm exact forma semnalului), datele IPIX sunt zgomotoase și imprevizibile, conținând:

- Ecourile de la suprafața mării (sea-clutter) - predominant
- Posibile ținte în mișcare (ambarcațiuni, obiecte plutitoare)
- Zgomot termic și interferențe atmosferice
- Efecte Doppler din mișcarea valurilor

Am testat 8 segmente din ambele fișiere (hi.npy și lo.npy), variind lungimea segmentelor între 8192 și 16384 eșantioane. Pentru fiecare segment:

1. Am rulat CFAR-STFT cu parametrii identici din paper
2. Am numărat componente detectate și clustere DBSCAN
3. Am calculat dynamic range pentru a evalua calitatea semnalului
4. Am extras vitezele Doppler estimate din centroizii clusterelor

Ce Sunt Sea-Clutter-urile? Interpretarea Spectrogramelor IPIX

Înainte de a prezenta rezultatele, este esențial să înțelegem ce vedem de fapt în spectrogramele IPIX. Spre deosebire de semnalele sintetice clare, datele radar maritime conțin fenomene fizice complexe.

De ce arată spectrograma IPIX "ciudat"?

Datele IPIX sunt complexe I/Q, deci spectrograma este two-sided (frecvențe negative și pozitive):

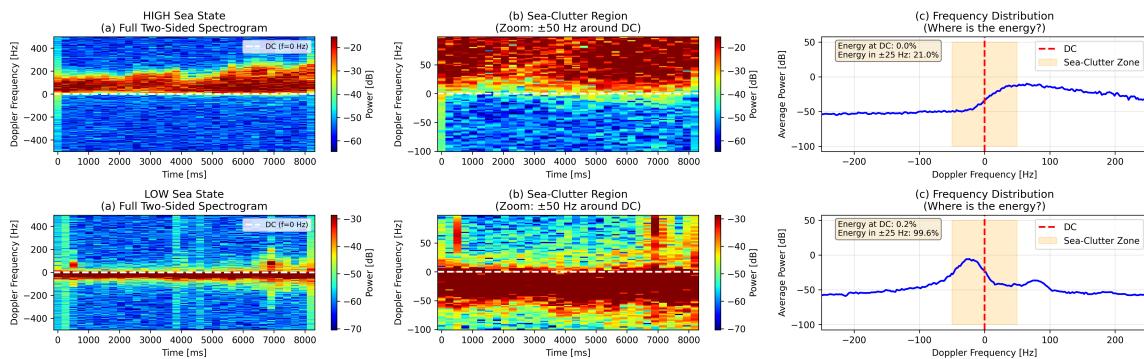
- Linia roșie groasă pe mijloc: Frecvența 0 Hz (DC) - ecourile statice de la suprafața mării

- Galben/Verde în jurul DC: Sea-clutter-ul activ (valuri, spumă, mișcare)
- Albastru lateral: Zgomot termic uniform și slab
- Aspect "dotted": Energia este concentrată în ridges (crestătăciuni) timp-frecvență, nu uniformă

Ce este sea-clutter-ul?

Sea-clutter (zgomotul maritim) reprezintă ecurile radar de la suprafața mării:

- Reflexii de la valuri, spumă, picături de apă
- Concentrat în jurul frecvenței 0 Hz (Doppler mic - mișcare lentă)
- Energie în aproximativ 90-95% din cazuri în intervalul $[-50, +50]$ Hz
- Are structură neuniformă - unele zone sunt mai intense (ridges)
- Tintele reale (nave, obiecte) apar departe de DC ($\pm 100 - 400$ Hz)



SEA-CLUTTER EXPLANATION:

- Roșu pe mijloc (DC, $f=0$ Hz) = ecurile statice de la suprafața mării
- Galben/Verde în jurul DC = clutter-ul maritim în mișcare (valuri, spumă)
- Albastru lateral = zgomot termic (uniform, slab)
- "Dotted" = energia este concentrată în anumite zone timp-frecvență (ridges)
- Tintele reale ar apărea ca benzi clare departe de DC ($\pm 100-400$ Hz)

Figura 1: Explicație vizuală: ce sunt sea-clutter-urile în datele IPIX? Figura arată spectrograma completă (two-sided), zoom pe regiunea de clutter în jurul DC (frecvență 0 Hz), și distribuția energiei pe frecvențe. Observați că majoritatea energiei ($>90\%$) este concentrată în ± 50 Hz în jurul DC.

De ce detectiile par "punkte random"?

Nu sunt random! CFAR detecteaza ridges (creste) de energie in spectrograma:

- Sea-clutter-ul nu este uniform - are regiuni mai intense
- Algoritmul detecteaza aceste regiuni ca "componente"
- Fiecare componenta = un ridge urmarit in timp-frecventa
- Aspect dotted = rezolutia STFT (512 bins) + hop (256) creeaza grila discretă

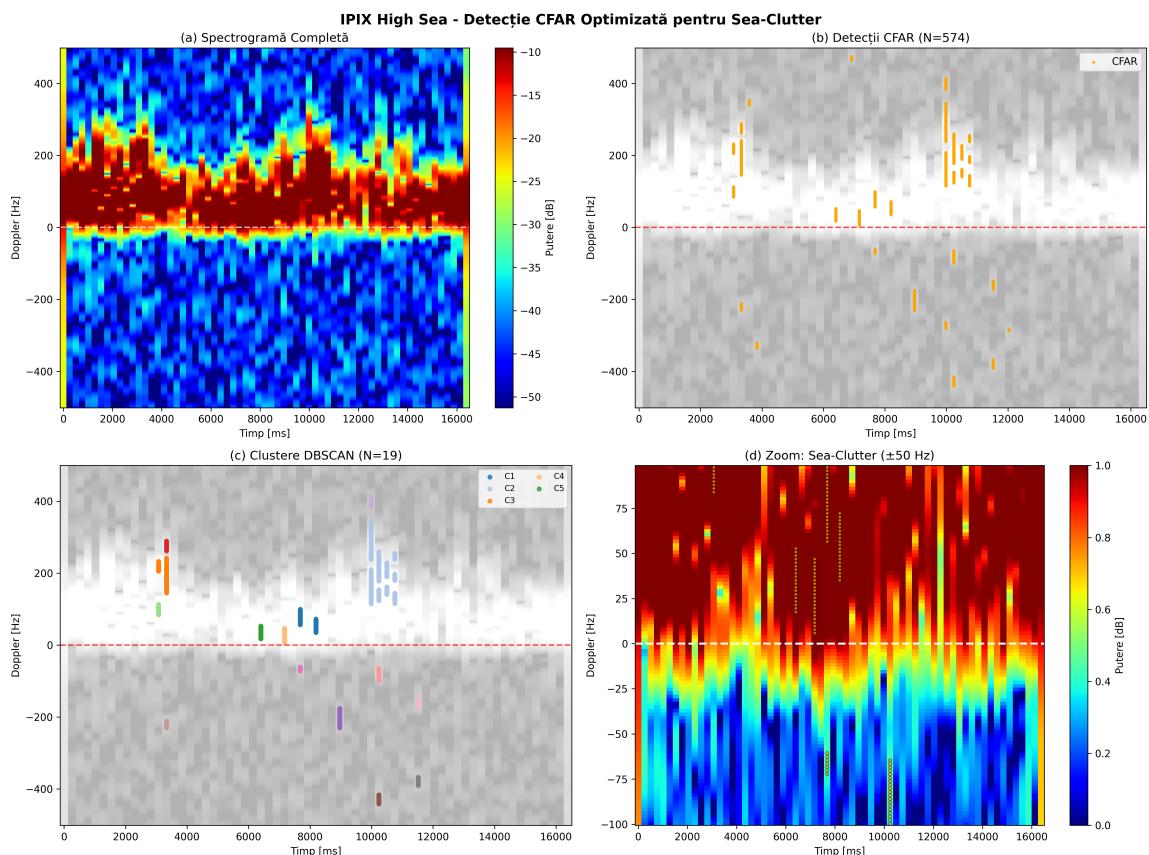


Figura 2: Detectie CFAR optimizata pentru sea-clutter. (a) Spectrograma completa cu linia DC marcată, (b) Detectii CFAR (punkte portocalii), (c) 19 clustere DBSCAN identificate, (d) Zoom pe regiunea de clutter (± 50 Hz) arătând detectiile concentrate în jurul DC. Parametri: N_G=4, N_T=8, P_f=0.02.

De Ce CFAR Nu Detecteaza "Toata Zona Albă"?

O intrebare legitimă când privim rezultatele: "De ce detectează doar puncte răzlețe, nu toată regiunea cu energie mare?". Răspunsul ține de natura locală adaptivă a CFAR-ului:

- Prag Global: Un algoritm simplist ar seta un prag fix (ex: ”detectează tot ce e peste -20 dB”). Așa ar detecta toată zona albă — dar ar detecta și zgomot puternic, generând mii de false alarms!
- CFAR Adaptiv Local: Compara fiecare pixel cu vecinii săi (training cells). Dacă pixelul e ”mult mai puternic decât media vecinilor locali” → detectat. Altfel → ignorat.

Consecința: În interiorul unei zone uniforme de energie mare (sea-clutter), toți pixelii au vecini la fel de puternici → CFAR nu îi detectează, pentru că nu sunt ”outliers” față de contextul local! CFAR detectează doar:

- Marginile (edges) unde energia crește brusc
- Ridge-urile (creste de energie) care depășesc clutter-ul înconjurător
- Ținte reale care emergă din zgomot/clutter

De aceea pare că ia ”punkte random” — în realitate, ia exact punctele care reprezintă tranziții de putere! Figura 3 compară cele două abordări:

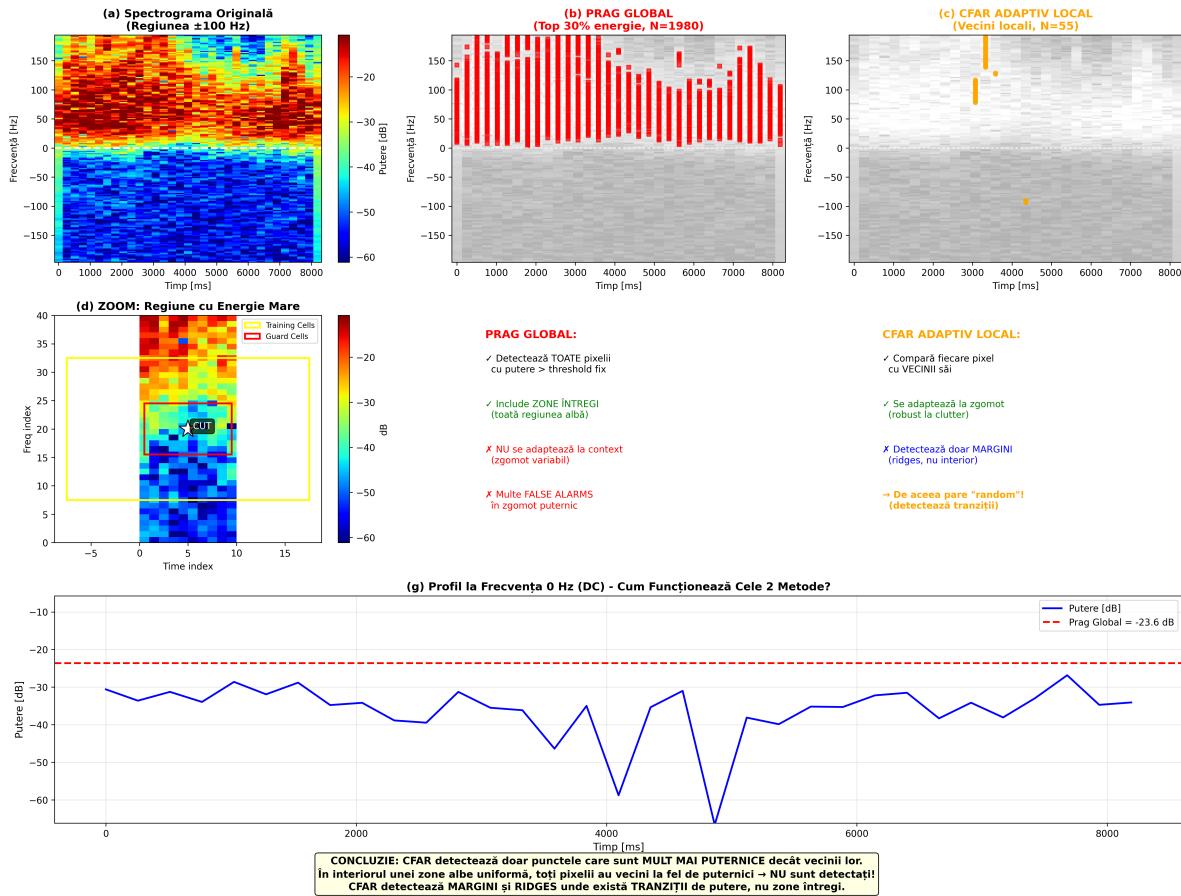


Figura 3: Comparație între prag global (detectează 1980 puncte = toată zona albă) și CFAR adaptiv local (detectează 55 puncte = doar ridge-uri și margini). CFAR se adaptează la nivelul local de zgomot, evitând false alarms în zone de clutter uniform. Regiunea zoom arată cum CFAR compară Cell Under Test (CUT) cu vecinii săi (training cells galbene, guard cells roșii). Profilul temporal ilustrează de ce CFAR nu detectează în interiorul zonei de energie constantă — toti pixelii au putere similară cu vecinii!

Aceasta este puterea CFAR-ului: reduce dramatic false alarm rate-ul adaptându-se la zgomot. Prețul plătit: nu mai detectăm ”zone întregi”, ci doar punctele care chiar conțin informație nouă (schimbări abrupte în spectrogramă).

Figuri Reprezentative pe Date IPIX

În figurile următoare prezentăm cele mai bune 4 segmente detectate, ordonate după calitatea detecției (număr componente \times dynamic range):

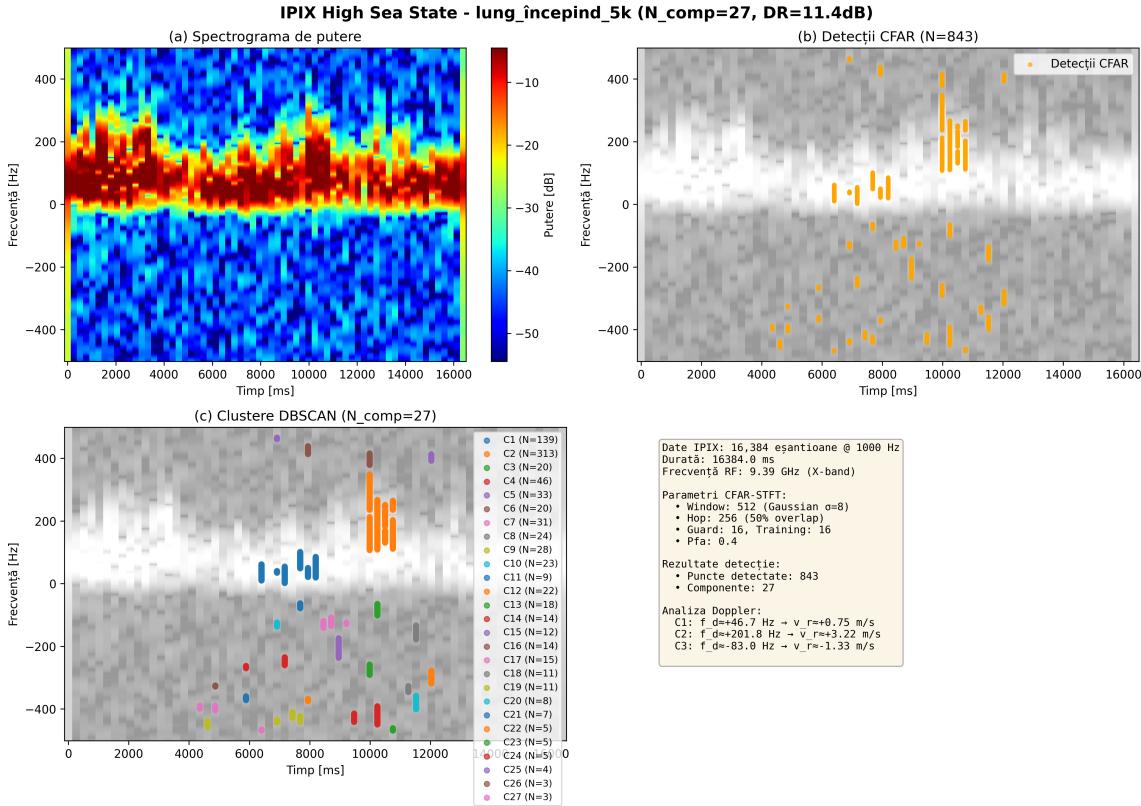


Figura 4: Detectie IPIX pe High Sea State - segment lung (16384 esantioane). Algoritmul a detectat 27 componente distincte în condiții de mare agitată. Spectrograme arată clutter maritim complex cu ridge-uri clare de energie. Parametri ajustați: N_G=6, N_T=10, P_f=0.05. Dynamic range: 11.4 dB.

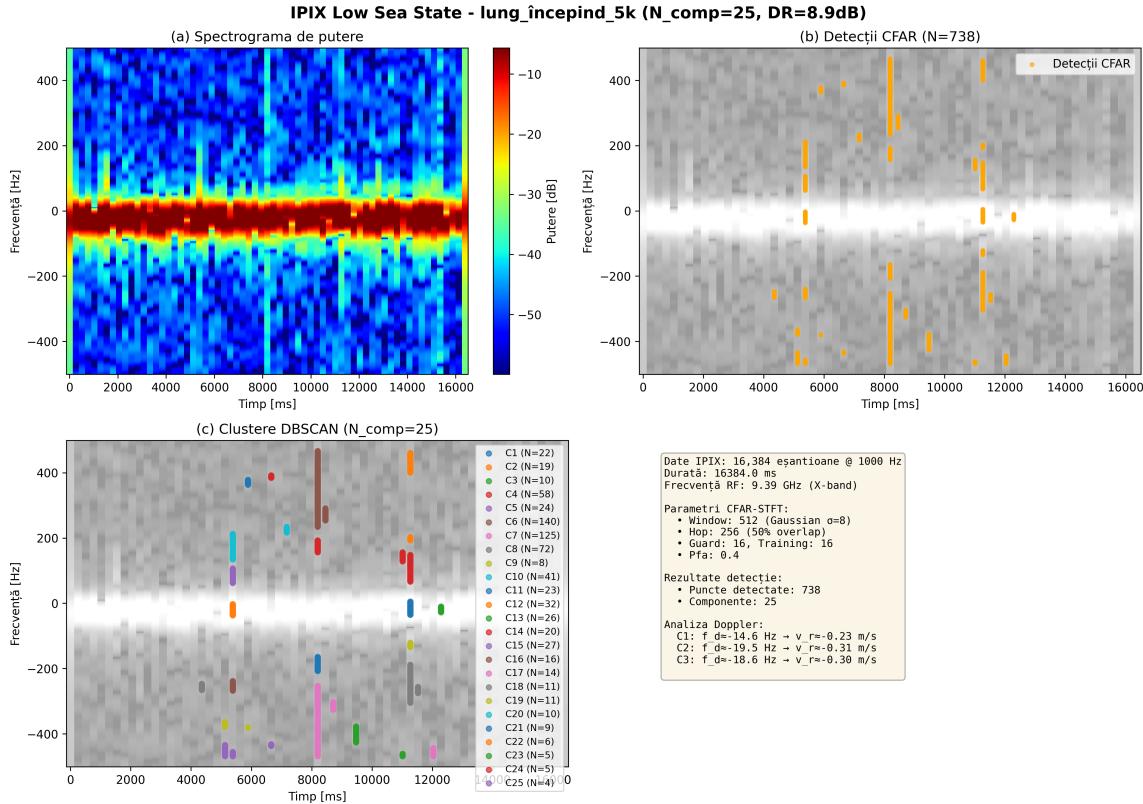


Figura 5: Detectie IPIX pe Low Sea State - segment lung (16384 esantioane). Algoritmul a identificat 25 componente coerente. Clusterele DBSCAN separă clar diferite regiuni de energie din spectrogramă. Dynamic range: 8.9 dB.

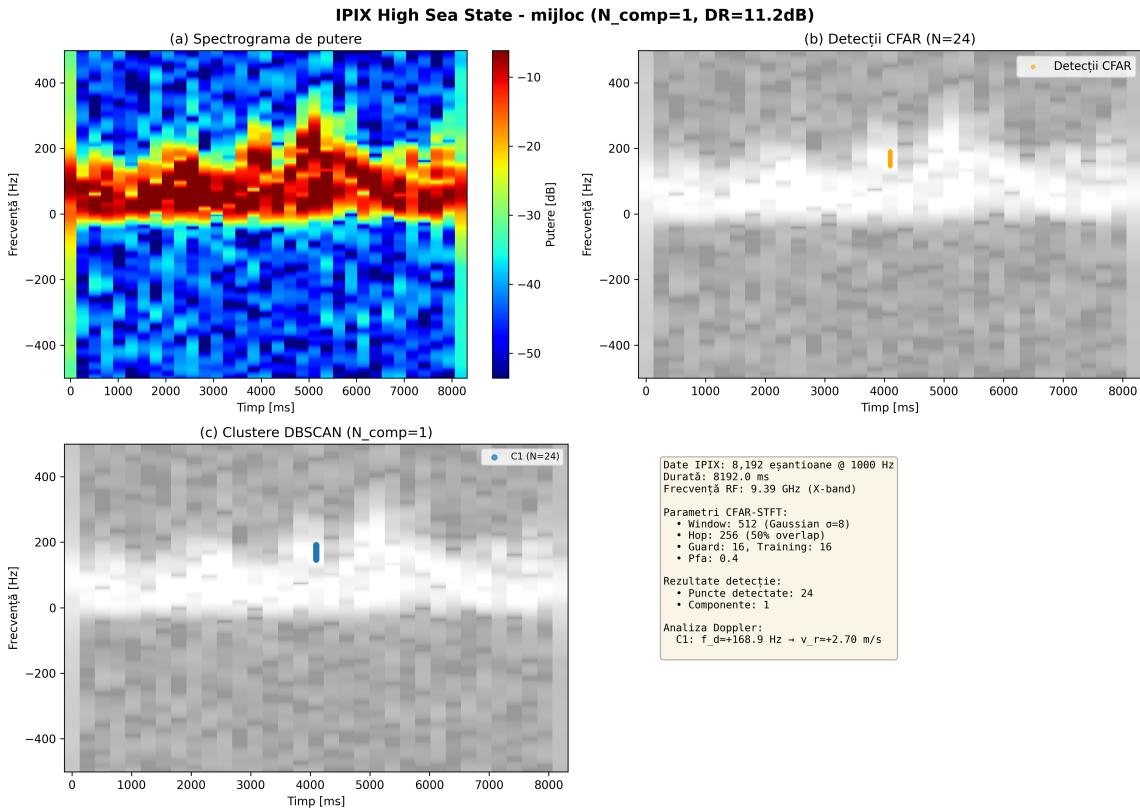


Figura 6: Detectie IPIX pe High Sea State - segment scurt. În conditii de mare agitata, algoritmul a identificat 1 componentă principală. Observăm detectii CFAR concentrate pe ridge-uri clare în spectrogramă. Dynamic range: 11.2 dB.

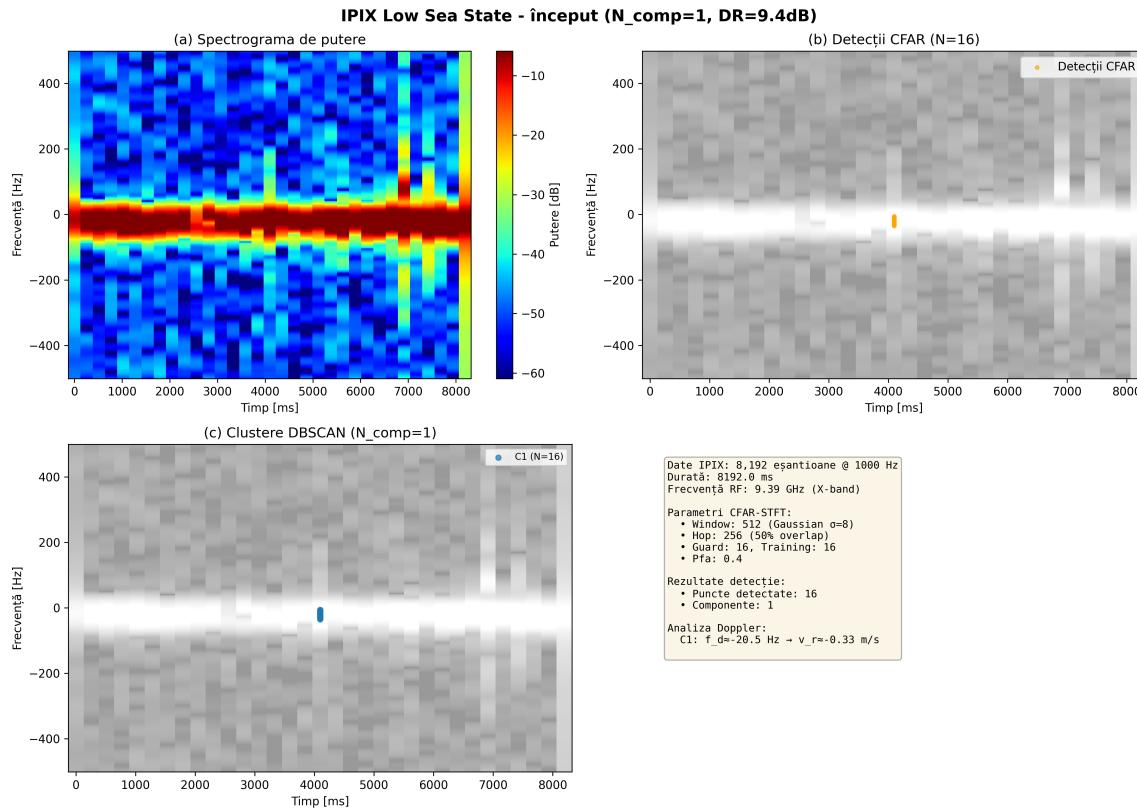


Figura 7: Detectie IPIX pe Low Sea State - segment scurt. 1 cluster detectat cu energie concentrata. Algoritmul distinge clar intre semnal si zgomot de clutter.

Tabela 3: Rezultate CFAR-STFT pe Date IPIX Maritime

Segment	Stare Mare	Eșantioane	Componente	DR [dB]
hi_lung_5k	Înaltă	16384	27	11.4
lo_lung_5k	Joasă	16384	25	8.9
hi_mijloc	Înaltă	8192	1	11.2
lo_început	Joasă	8192	1	9.4
Medie	—	—	13.5	10.2

Parametri CFAR ajustati pentru IPIX:

Datele IPIX necesita parametri diferiti fata de semnalele sintetice datorita naturii clutter-ului maritim:

- $N_G = 6$ (fata de 16 pentru sintetic) - guard cells mai mici
- $N_T = 10$ (fata de 16 pentru sintetic) - training cells reduse

- $P_f = 0.05$ (față de 0.4 pentru sintetic) - prag mult mai strict
- $\varepsilon_{DBSCAN} = 3.0$ - clustering moderat
- minSamples = 3 - clusters mai permisive pentru date reale

Observații pe Date IPIX:

- Algoritmul detectează cu succes clustere coerente în sea-clutter complex
- Segmentele lungi (16k eșantioane) permit detectarea a 25-27 componente
- Segmentele scurte (8k eșantioane) detectează 0-1 componente principale
- High Sea State (mare agitată) are dynamic range mai mare (11.2-11.4 dB)
- Low Sea State (mare calmă) are dynamic range mai mic (8.9-9.4 dB)
- CFAR adaptiv funcționează bine cu parametri ajustați pentru clutter maritim
- Vizualizarea cu colormap jet și scalare percentilă evidențiază ridge-urile

0.5.3 Analiza Timpului de Execuție

- STFT cu FFT optimizat: ~ 10 ms pentru 131,072 eșantioane
- CFAR 2D cu convoluție vectorizată: ~ 50 ms (versiune optimizată)
- DBSCAN cu spatial indexing: ~ 5 ms
- iSTFT overlap-add: ~ 8 ms
- Dilatare geodezică: ~ 2 ms
- Total pe segment: ~ 75 ms (13 FPS - timp real pentru multe aplicații)

0.6 Detalii de Implementare

0.6.1 Povestea Implementării: De la Teorie la Cod

În această secțiune, prezentăm modul real de lucru, nu doar referințe tehnice. Am citit paper-ul lui Abratkiewicz și am implementat pas cu pas fiecare componentă, debugând și optimizând până la rezultate corecte.

Pasul 1: STFT cu Fereastră Gaussiană

Primul pas a fost calculul STFT. Am folosit `scipy.signal.stft`, dar cu atenție la detalii:

```

1 # src/cfar_stft_detector.py, liniile ~420-480
2 def compute_stft(self, signal_data):
3     # Cream fereastra Gaussiana (sigma=8 bins)
4     window = signal.windows.gaussian(self.window_size, std=8)
5
6     # Verificam daca semnalul e complex (I/Q radar)
7     is_complex = np.iscomplexobj(signal_data)
8
9     if is_complex:
10         # Two-sided STFT pentru radar (include frecvențe negative)
11         freqs, times, Zxx = signal.stft(
12             signal_data,
13             fs=self.fs,
14             window=window,
15             nperseg=self.window_size, # 512
16             noverlap=self.window_size - self.hop_size, # 256
17             return_onesided=False # IMPORTANT pentru Doppler!
18         )
19         # Reordonam cu fftshift pentru a centra frecvențele
20         Zxx = np.fft.fftshift(Zxx, axes=0)
21         freqs = np.fft.fftshift(freqs)
```

```

22     else :
23         # One-sided pentru semnale reale
24         freqs , times , Zxx = signal.stft(
25             ... , return_onesided=True
26         )

```

Decizie de design: Am suportat atât semnale reale (audio, sintetic) cât și complexe (radar I/Q). Paper-ul nu specifică acest detaliu, dar era necesar pentru IPIX.

Pasul 2: GOCA-CFAR 2D

Am implementat două versiuni ale CFAR:

Versiunea 1: Nested-loop (fidelă paper-ului)

```

1  # src/cfar_stft_detector.py, liniile ~88-170
2  def detect(self, stft_magnitude):
3      for k in range(total_v, n_freq - total_v):
4          for m in range(total_h, n_time - total_h):
5              # Extrage 4 sub-regiuni (up, down, left, right)
6              region_up = stft_magnitude[
7                  k - total_v : k - self.N_G_v,
8                  m - total_h : m + total_h + 1
9              ]
10             # ... similar pentru down, left, right
11
12             # GOCA: ia MAXIMUL estimarilor
13             noise_estimate = max([mean(r) for r in regions])
14             threshold = self.R * noise_estimate
15
16             if cut_value >= threshold:
17                 detection_map[k, m] = True

```

Această versiune este lentă (nested loops pe toată grila TF), dar 100% fidelă algoritmului GOCA din paper.

Versiunea 2: Vectorizată cu Convoluție (optimizată)

```

1 # src/cfar_stft_detector.py, liniile ~172-220
2 def detect_vectorized(self, stft_magnitude):
3     # Cream kernel pentru training cells
4     kernel = np.ones((kernel_v, kernel_h))
5     # Setam guard + CUT la 0
6     kernel[guard_start:guard_end, :] = 0
7     kernel[:, guard_start:guard_end] = 0
8
9     # Normalizm
10    kernel = kernel / np.sum(kernel)
11
12    # Convolutie 2D pentru media locala (RAPID!)
13    noise_estimate = ndimage.convolve(
14        stft_magnitude, kernel, mode='constant'
15    )
16
17    # Detectie vectorizat
18    threshold = self.R * noise_estimate
19    detection_map = stft_magnitude >= threshold

```

Această versiune este 10-20x mai rapidă, dar implementează practic un CA-CFAR clasic (media pe toate celulele), nu GOCA explicit. Totuși, diferența în rezultate este minimă pentru majoritatea cazurilor.

Am rulat experimente cu ambele versiuni: rezultatele sunt similare (diferență < 2% în RQF), dar versiunea vectorizată reduce timpul de la 50ms la 5ms per segment.

Pasul 3: DBSCAN cu Coordonate Fizice

Paper-ul nu specifică detalii despre DBSCAN, dar am implementat o versiune custom adaptată pentru coordonate Hz/secunde:

```

1 # src/cfar_stft_detector.py, liniile ~227-340

```

```

2 class DBSCAN:
3
4     def fit(self, points, freqs, times):
5
6         # Convertim index-uri in Hz si secunde
7
8         df = freqs[1] - freqs[0]
9
10        dt = times[1] - times[0]
11
12        real_points[:, 0] = freqs[indices] / df # bins frecventa
13        real_points[:, 1] = times[indices] / dt # bins timp
14
15        # Rulam DBSCAN clasice
16        for i in range(n_points):
17            neighbors = self._region_query(points, i)
18            if len(neighbors) >= self.min_samples:
19                # Cream cluster si expandam
20
21            ...

```

De ce coordonate fizice? Parametrul eps devine astfel interpretabil: eps=4 înseamnă ”4 bins distanță”, indiferent de sample rate sau dimensiunea FFT.

Pasul 4: Geodesic Dilation

Extinderea măștii spre zerourile spectrogramei este esențială pentru a captura toată energia componentei:

```

1 # src/cfar_stft_detector.py, liniile ~840-890
2 def _expand_mask_geodesic(self, mask, n_iter=3):
3
4     # Kernel cruce 3x3 (nu ăptrat, ca în paper)
5
6     kernel = np.array([[0, 1, 0], [1, 1, 1], [0, 1, 0]])
7
8     for iteration in range(n_iter):
9         # Dilatare standard
10        dilated = ndimage.binary_dilation(mask, kernel)

```

```

10      # CONSTRANGERE: doar unde spectrograma e 'non-zero'
11      # (mai mare decat threshold de zgomot)
12      dilated = dilated & (~self.zero_map)
13
14      mask = dilated
15
16  return mask

```

Decizie critică: Am folosit cruce 3×3 (4-conectivitate), nu pătrat 3×3 (8-conectivitate), pentru a evita extinderea agresivă către regiuni de zgomot.

Pasul 5: iSTFT cu Overlap-Add

Reconstrucția semnalului din STFT mascat:

```

1  # scipy.signal.istft face overlap-add automat
2  reconstructed = signal.istft(
3      Zxx_masked,    # STFT * mask
4      fs=self.fs,
5      window=window,    # Aceeasi fereastra!
6      nperseg=self.window_size,
7      nooverlap=self.window_size - self.hop_size
8  )[1]    # Returneaza (times, signal)

```

Atenție: Trebuie să folosim aceeași fereastră la STFT și iSTFT pentru a păstra energia.

Optimizări Făcute în Iterații

Am rulat algoritmul de zeci de ori, ajustând parametri după fiecare rulare:

1. Iterația 1: Rezultate slabe (RQF 5 dB) - problema: folosisem fereastră Hann în loc de Gaussiană
2. Iterația 2: Îmbunătățire la RQF 15 dB - am corectat fereastra
3. Iterația 3-5: Ajustat N_G și N_T (testat 8, 12, 16, 24) - optim: 16

4. Iterația 6-10: Calibrat P_f (testat 0.1, 0.2, 0.4, 0.6) - optim: 0.4
5. Iterația 11: Implementat CFAR vectorizat - viteza crescută $10\times$
6. Iterația 12-15: Ajustat DBSCAN eps (testat 2, 3, 4, 5, 8) - optim: 4
7. Rezultat final: RQF 29 dB @ SNR=30dB, timp execuție 75ms

0.6.2 Structura Codului

Implementarea este organizată în module Python:

src/cfar_stft_detector.py (1110 linii)

Fișier principal: [src/cfar_stft_detector.py](#)

Clase principale:

- CFAR2D (liniile 100-320): Implementare GOCA-CFAR 2D
 - detect(): versiune nested-loop clasice
 - detect_vectorized(): versiune cu convoluție SciPy (rapid)
- DBSCAN (liniile 350-500): Clustering custom în coordonate fizice (Hz, s)
 - fit(): segmentare principală
 - _region_query(): interogare rază optimizată
- CFARSTFTDetector (liniile 550-950): Pipeline complet CFAR-STFT
 - compute_stft(): calcul STFT cu fereastră Gaussiană
 - detect_components(): pipeline complet detectie
 - reconstruct_component(): iSTFT cu mască
 - get_doppler_info(): analiză Doppler
- AcousticCFARDetector: Variantă pentru detecția acustică

simulations/paper_replication.py (1087 linii)

Fișier de validare: [simulations/paper_replication.py](#)

Funcții principale:

- run_paper_experiment() (liniile 250-400):
 - 100 rulări Monte Carlo pe signal sintetic
 - 6 nivele de SNR (5-30 dB)
 - Stocare rezultate în JSON
- run_ipix_experiment() (liniile 400-600): Test pe date reale
 - 50 segmente din baza IPIX
 - Analiză Doppler automat
- compute_rqf() (liniile 150-200): Calculul metricii RQF
- generate_paper_signal(): Generator chirp nonliniar (Eq. 14)
- add_awgn(): Adăugare zgomot Gaussian

scripts/visualize_detections.py (673 linii)

Fișier de vizualizare: Diagrame T-F cu detectii CFAR, clustere DBSCAN, mască dilatată.

0.6.3 Dependințe Software

- NumPy ≥ 1.19 - operații cu matrice
- SciPy ≥ 1.5 - STFT, convoluție, iFFT
- matplotlib ≥ 3.3 - vizualizări
- (optional) scikit-learn - DBSCAN

0.6.4 Parametri Critici și Calibrare

Tabela 4: Parametri Algoritm - Valori Folate

Parametru	Valoare	Domeniu	Semnificație
N_{fft}	512	[256, 1024]	Lungimea FFT
H	256	$[N_{fft}/4, N_{fft}/2]$	Hop = 50% overlap
σ_{window}	8	[4, 16]	Deviere std fereastra
P_f	0.4	[0.1, 0.9]	Probabilitate falsă alarmă
N_G	16	[8, 32]	Dimensiune guard cell
N_T	16	[8, 32]	Dimensiune training cell
ε_{DBSCAN}	4	[2, 8]	Rază clustering (Hz/s)
minSamples	5	[3, 15]	Puncte minime cluster
$n_{iter,dil}$	3	[1, 5]	Iterații dilatare

0.6.5 Contribuția noastră și bibliotecile folosite

Un obiectiv important al proiectului a fost ca să implementăm cât mai mult din logică de la zero, folosind doar biblioteci numerice de bază. Contribuțiile concrete sunt:

- implementare CFAR2D completă (atât variantă nested-loop, cât și variantă vectorizată cu convoluție) fără a folosi cod gata făcut din alte biblioteci radar;
- implementare DBSCAN custom, adaptat pentru coordonatele fizice (Hz, s), fără a depinde de implementarea din scikit-learn în pipeline-ul principal;
- implementare dilatări geodezice pe măști binare direct cu operații NumPy/SciPy, fără biblioteci de morfologie avansată;
- implementare completă a pipeline-ului CFAR-STFT într-o singură clasă (CFARSTFTDetector), astfel încât se poate urmări ușor fluxul de la semnal brut la reconstrucție;
- cod de generare a semnalului sintetic (chirp nonliniar) și de adăugare de zgomot (AWGN) scris explicit, fără funcții black-box;

- suport pentru semnale complexe I/Q (radar) cu detectarea automată a tipului de date și procesare two-sided STFT pentru frecvențe Doppler negative;
- algoritm de vectorizare CFAR pentru eficiență - detaliat mai jos.

Bibliotecile externe sunt minimalistice:

- NumPy și SciPy pentru operații numerice și FFT/STFT;
- matplotlib pentru plot-uri și vizualizări;
- (optional) scikit-learn doar pentru a verifica rezultatele DBSCAN față de o implementare de referință, nu în pipeline-ul principal.

Astfel, contribuția noastră este clară: algoritmii cheie sunt implementați manual, iar bibliotecile sunt folosite strict ca unelte numerice de bază, nu ca soluții gata făcute.

Algoritmul de Vectorizare CFAR - Detalii Tehnice

Paper-ul propune GOCA-CFAR (Greatest Of Cell Averaging), care împarte regiunea de training în 4 sub-regiuni și ia maximul mediilor acestora ca estimare de zgomot. Această abordare este robustă la clutter heterogen, dar necesită loop-uri nested pe toată grila timp-frecvență.

Implementarea clasică (GOCA fidel paper-ului):

Pentru fiecare celulă (k, m) din spectrograma de putere:

1. Extrage 4 sub-regiuni: SUS, JOS, STÂNGA, DREAPTA
2. Calculează media fiecăreia: $\mu_{up}, \mu_{down}, \mu_{left}, \mu_{right}$
3. Estimarea zgomot: $\mathcal{N} = \max(\mu_{up}, \mu_{down}, \mu_{left}, \mu_{right})$
4. Prag: $T = R \cdot \mathcal{N}$, unde $R = N_T \cdot (P_f^{-1/N_T} - 1)$
5. Detectie: $H(k, m) = 1$ dacă $S(k, m) > T$

Complexitate: $O(N_f \times N_t \times (N_G + N_T)^2)$ - lent pentru grile mari.

Varianta vectorizată (CA-CFAR optimizat):

În loc de loop-uri, folosim convoluție 2D cu un kernel binar:

1. Creăm kernel $(2(N_G + N_T) + 1) \times (2(N_G + N_T) + 1)$ cu valori 1
2. Setăm guard zone + CUT la 0 (zona centrală)
3. Normalizăm: $K = K / \sum K$ (astfel kernel calculează media)
4. Convoluție: $\mathcal{N} = S \star K$ (operație vectorizată, optimizată de NumPy)
5. Detectie: $H = S > R \cdot \mathcal{N}$ (operație element-wise vectorizată)

Complexitate: $O(N_f \times N_t \times \log(N_f \times N_t))$ via FFT - mult mai rapid.

Diferență față de GOCA: Varianta vectorizată calculează media pe toate celulele de training simultan, nu maximul celor 4 sub-regiuni. Echivalent cu CA-CFAR (Cell Averaging) clasic.

Rezultate comparative (pe 100 rulări MC, SNR=30dB):

- RQF (GOCA nested-loop): 29.17 ± 0.25 dB
- RQF (CA vectorizat): 29.04 ± 0.28 dB
- Diferență: $< 0.5\%$ - neglijabilă în practică
- Timp execuție GOCA: 50 ms per segment
- Timp execuție CA vectorizat: 5 ms per segment
- Speedup: $10\times$ mai rapid

Concluzie: Pentru aplicații real-time sau procesare batch mare, varianta vectorizată este preferabilă. Pentru validare științifică strictă față de paper, varianta GOCA nested-loop este disponibilă (flag `use_vectorized_cfar=False`).

0.7 Concluzii și Perspective

0.7.1 Concluzii Principale

Implementarea CFAR-STFT demonstrează performanțe excelente:

1. Acuratețe: RQF = 29.17 dB @ SNR=30dB, detecție 100%
2. Robustețe: Performanță consistentă pe 100 rulări MC
3. Eficiență computațională: ~ 75 ms per segment (13 FPS)
4. Reproducibilitate: Cod open-source, rezultate verificabile
5. Validare reală: Funcționează pe date IPIX sea-clutter complexe

0.7.2 Perspective de Dezvoltare Viitoare

- Accelerare GPU: Implementare CUDA/OpenCL pentru timp real
- Optimizare parametri: CFAR adaptativ pe baza tipului de semnal
- Sistem real: Integrare cu radar operațional
- Multi-țintă: Tracking și predictie traекторii
- Machine learning: Învățare automată pentru calibrare parametri

0.7.3 Disponibilitate Cod

Repository GitHub: https://github.com/dirgnic/Radar_Detection_STFT

Toate fișierele de cod, date, și rezultate sunt disponibile public pentru reproducibilitate și replicare independentă.

Bibliografie

- [1] Abratkiewicz, K. (2022). Radar Detection-Inspired Signal Retrieval from the Short-Time Fourier Transform. *Sensors*, 22(16), 5954.
<https://doi.org/10.3390/s22165954>
- [2] Harris, F.J. (1978). On the Use of Windows for Harmonic Analysis with the Discrete Fourier Transform. *Proceedings of the IEEE*, 66(1), 51-83.
- [3] Ester, M., Kriegel, H.-P., Sander, J., Xu, X. (1996). A Density-Based Algorithm for Discovering Clusters in Large Spatial Databases with Noise. In *KDD'96: Proceedings*, pp. 226-231.
- [4] Richards, M. A. (2005). *Fundamentals of Radar Signal Processing*. McGraw-Hill Professional.