

Analiza semnalelor radar în prezență ecourilor marine

Abordare CFAR-STFT cu adaptări pentru sea clutter real

Ingrid Corobana Teodora Nae

Universitatea din București
Facultatea de Matematică și Informatică
Coordonator: Conf. Dr. Cristian Rusu

Procesarea Semnalelor – 2026

Cuprins

- 1 Introducere și Motivație
- 2 Fundamente Teoretice
- 3 Adaptări pentru Sea Clutter
- 4 Rezultate Experimentale
- 5 Comparație Parametri
- 6 Concluzii

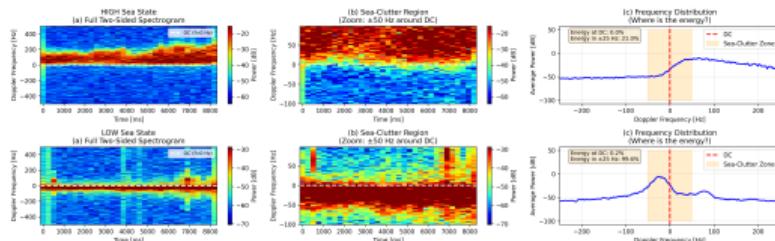
Problema: Detecția în Sea Clutter

Sea Clutter:

- Ecouri de la suprafață mării
- Non-Gaussian cu spike-uri frecvente
- Ascunde ținte mici

Provocări:

- K-distribution statistics
- Corelație temporală
- Ținte slabe sub clutter



SEA CLUTTER INFORMATION:
• Relație pe milior (DC = 0 Hz) = evenimentele statice de la suprafață mării
• Gălbenele verde și jurați DC = clutter și metane în mișcare (vânturi, spuma)
• "Gălbene" = energia este concentrată în anumite zone în raport cu frecvența (riduri)
• "Verde" reprezintă ar apăruta ce binele (lamele deasupra DC +100-800 Hz)

Figura: Spectrogramă IPIX

Soluția: CFAR-STFT (Abratkiewicz 2022)

Ideea cheie: Explotăm structura **timp-frecvență**!

- ① **STFT** → Reprezentare 2D (spectrogramă)
- ② **CFAR 2D** → Detectie adaptivă local
- ③ **DBSCAN** → Clustering puncte detectate
- ④ **Dilatare geodezică** → Extindere mască
- ⑤ **iSTFT** → Reconstucție semnal

Contribuțiile noastre:

- Implementare completă în Python
- **Adaptări pentru sea clutter real:** K-distribution, Hurst boost, DBSCAN asimetric
- Validare pe date IPIX reale

STFT – Transformata Fourier cu Timp Scurt

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

Parametri:

- $N_{fft} = 256$ (pentru IPIX)
- Hop $H = 32$ (87.5% overlap)
- Fereastra Gaussiană $\sigma = 8$

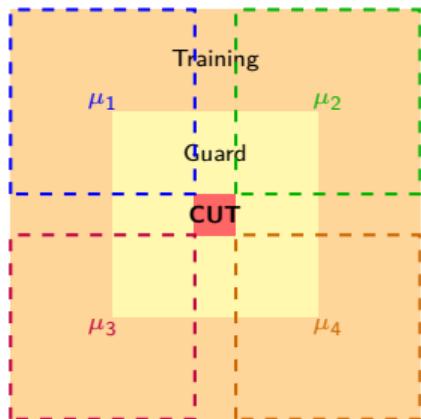
De ce STFT?

- Localizare timp-frecvență
- Semnalele radar = ridges în TF
- Clutter-ul = energie difuză

Two-sided pentru date complexe I/Q

Date IPIX = I + jQ \Rightarrow Frecvențe Doppler pozitive (apropiere) și negative (depărtare)

GOCA-CFAR 2D – Detecție Adaptivă



GOCA = Greatest-Of Cell Averaging

$$\hat{Z} = \max(\mu_1, \mu_2, \mu_3, \mu_4)$$

$$T = R \cdot \hat{Z}$$

$$R = N_T(P_f^{-1/N_T} - 1)$$

Decizie:

$$|X(k, n)|^2 \geq T \Rightarrow \text{Detectat}$$

Parametri IPIX

$N_G = 3, N_T = 12, P_f = 0.001$ (mult mai mic decât paper!)

De ce CFAR nu detectează „toată zona albă”?

Observație: De ce doar puncte localizate și nu regiuni uniforme?

Prag global (naiv):

- Detectează tot peste -20 dB
- ⇒ Mii de alarme false!

CFAR local-adaptiv:

- Compară cu vecinii locali
- Zonă uniformă ⇒ nu detectează
- Doar tranziții bruște de putere

Consecință

CFAR detectează: margini, ridges, ținte reale – NU zone omogene de clutter!

Adaptarea 1: K-Distribution

Sea clutter \neq Gaussian – modelează spike-uri cu K-distribution:

$$p(x) = \frac{4}{\Gamma(\nu)} \left(\frac{\nu x^2}{2\mu} \right)^{(\nu+1)/2} K_{\nu-1} \left(\sqrt{\frac{2\nu x^2}{\mu}} \right)$$

Ajustare prag: ν mic \Rightarrow mai spiky. Estimare $\nu = \mu^2 / (\sigma^2 - \mu^2)$, ajustare multiplicator prag CFAR.

Adaptarea 2: Fractal Boost (Hurst)

Problema: CFAR poate rata ținte slabe sub prag

Observație: Sea clutter are proprietate **fractală** (self-similar)

$$\mathbb{E} [|X(t + \tau) - X(t)|^2] \propto \tau^{2H}$$

- Sea clutter: $H \approx 0.75\text{--}0.85$ (persistent)
- Când apare țintă: structura se perturbă, H scade sub ~ 0.6

Soluție

Calculăm H per bin de frecvență. Dacă $H < 0.6$ și putere mare \Rightarrow potențială țintă!

mască = CFAR \vee (anomalie Hurst \wedge putere mare)

Adaptarea 3: DBSCAN Asimetric

Problema: Tintele apar ca semnături aproape verticale în spectrogramă (energie pe multe binuri de frecvență, pe puține cadre temporale)

DBSCAN standard tinde să fragmenteze aceste semnături în mai multe clustere atunci când există discontinuități.

Soluție: Metrica de distanță asimetrică cu scalare pe frecvență ($s_f = 3.0$):

$$d = \sqrt{(\Delta t)^2 + \left(\frac{\Delta f}{s_f}\right)^2} \quad \text{cu } s_f = 3.0$$

Impact: Tinta întinsă pe aproximativ 50 binuri de frecvență ⇒ un singur cluster coherent

Alte adaptări:

- Mascare componentă DC: ± 8 binuri
 $(\approx \pm 31 \text{ Hz})$

Rezultate pe Date Sintetice (Chirp Neliniar)

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

- 100 rulări Monte Carlo per nivel SNR
- Rata de detectie: 100% în toate cazurile experimentale
- RQF crește monoton cu SNR pentru semnalul sintetic studiat

Detectie pe Date IPIX Reale

Baza de date IPIX (McMaster University, 1993):

- Radar X-band: $f_{RF} = 9.39$ GHz
- PRF = 1000 Hz
- Semnale complexe I/Q
- Tintă de calibrare: sferă 1 m la distanță de 2660 m

Relație Doppler – Viteză radială:

$$v_r = \frac{f_d \cdot c}{2f_{RF}}$$

Exemplu: $f_d = 100$ Hz $\Rightarrow v_r \approx 1.6$ m/s

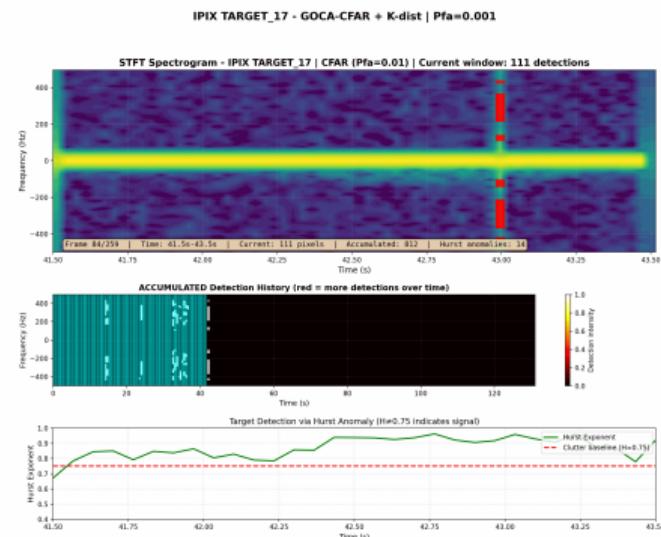
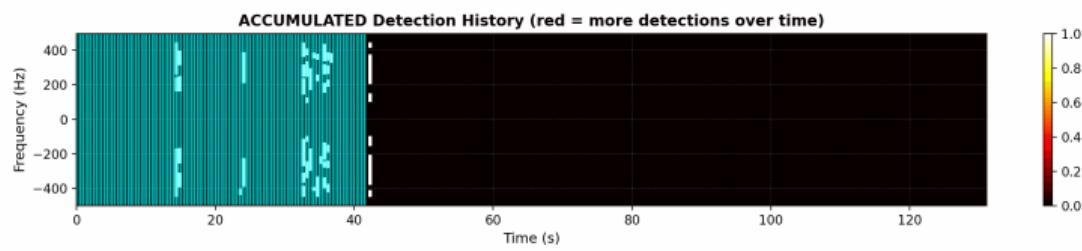
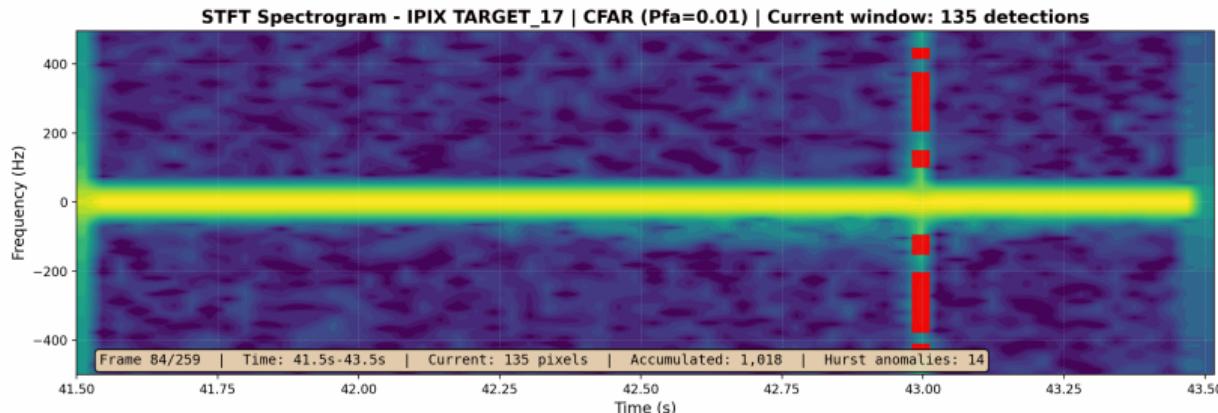


Figura: Detectie GOCA-CFAR pe Target #17

Detectie cu Fractal Boost

IPIX TARGET_17 - GOCA-CFAR + K-dist + Fractal | Pfa=0.001



Target Detection via Hurst Anomaly ($H=0.75$ indicates signal)

Animații de Detecție (GIF-uri)

Disponibile în repository:

- ipix_target_17_goca_*.gif – Detecție cu metoda GOCA standard
- ipix_target_17_fractal_boost_*.gif – Cu amplificare Hurst (anomalie fractală)
- ipix_target_17_asymmetric_*.gif – Cu DBSCAN asimetric
- ipix_target_30_detection.gif – Target #30 (sea state ridicat)

Vizualizare animații

Animațiile arată evoluția detecțiilor în timp, cu suprapunerea măștilor CFAR și semnalelor detectate pe spectrograma STFT.

https://github.com/dirgnic/Radar_Detection_STFT/tree/main/results/animations

Parametri: Paper vs. Implementare

Parametru	Paper	Sintetic	IPIX (real)
f_s	12.5 MSa/s	12.5 MSa/s	1000 Hz (PRF)
N_{fft}	512	512	256
Fereastra STFT	Gauss $\sigma = 8$	Gauss $\sigma = 8$	Gauss $\sigma = 8$
Hop	—	256	32
N_G	16	16	3
N_T	16	16	12
P_f	0.4	0.4	0.001
Model clutter	Gaussian	Gaussian	K-distribution
DBSCAN ε	—	8	8
freq_scale	—	1.0	3.0

Modificări cheie pentru sea clutter: P_f mult mai mic, K-distribution, DBSCAN asimetric

Concluzii și Contribuții

- ① **Implementare completă CFAR-STFT în Python cu API flexibil**
- ② **Validare pe date sintetice:** RQF = 29.17 dB la SNR=30 dB; rata detectie 100% în 100 rulări Monte Carlo
- ③ **Validare pe date reale:** Detectii consistente pe secvențe IPIX (Target #17, #30, #40)
- ④ **Adaptări pentru sea clutter real:**
 - K-distribution pentru modelarea statisticilor non-Gaussiene
 - Amplificare prin anomalie Hurst pentru sensibilitate crescută la ținte slabe
 - DBSCAN asimetric pentru coerența semnăturilor verticale în timp-frecvență
- ⑤ **Performanță:** aproximativ 75 ms/segment pe CPU (13 FPS pentru fereastră 2s, hop 0.5s)

Reproducibilitate

Cod și date: https://github.com/dirgnic/Radar_Detection_STFT

- **Accelerare GPU:** CUDA/OpenCL pentru timp real
- **Optimizare automată:** ML pentru calibrare parametri
- **Multi-target tracking:** Predicție traectorii
- **Integrare sistem real:** Radar operațional

Mulțumim pentru atenție!

Întrebări?

Reconstruction Quality Factor:

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

- $x[n]$ = semnal original (curat)
- $\hat{x}[n]$ = semnal reconstruit
- RQF mai mare \Rightarrow reconstrucție mai bună

Two-sided spectrum:

- $f_d > 0 \Rightarrow$ țintă se apropie
- $f_d < 0 \Rightarrow$ țintă se depărtează
- $f_d \approx 0 \Rightarrow$ sea clutter

Pentru IPIX:

$$v_{max} = \frac{PRF \cdot c}{4f_{RF}} \approx \pm 8 \text{ m/s}$$