



Semnan University

Journal of Modeling in Engineering

Journal homepage: <https://modelling.semnan.ac.ir/>

ISSN: 2783-2538



Research Article

Proposing an Iterative Method Based on Constant False Alarm Rate for Detecting Long Radar Targets in the Presence of Heavy Sea Clutter

Alireza Emadi Amiri ^a, Seyed Mehdi Hosseini Andargoli ^{a,*}, Iman Esmaili ^b

^a Faculty of Electrical and Computer Engineering, Babol Noshirvani University of Technology, Babol, Iran

^b Faculty of Engineering and Technology, University of Mazandaran, Babolsar, Iran

PAPER INFO

Paper history:

Received: 2024-05-07

Revised: 2024-09-20

Accepted: 2024-09-25

Keywords:

Radar target detection;
Constant false alarm rate;
Surveillance radar;
Sea clutter;
High resolution range.

ABSTRACT

The principal aim of utilizing maritime surveillance radar systems is to radar target detection (RTD) in the maritime setting, and to make informed decisions regarding their presence or absence. Numerous techniques have been put forth for the detection of radar targets, with constant false alarm rate (CFAR) methods serving as the most extensively accepted and prevalent. However, Despite the good performance exhibited by the previously mentioned methods in detecting narrow (impulsive) targets, the high amplitude of several successive range-gates renders them incapable of detecting long targets. In this article, an iterative recurrent method founded on the smallest cell of the constant false alarm rate (ISO-CFAR) has been proposed, which enables the detection of long radar targets. To achieve this, range gates produced by each radar processing are regarded as the input for CA, GO, SO, and proposed ISO CFAR and the performance of the aforementioned detectors is assessed and contrasted for detecting the start, end, and length of the target cells. The results reveal a noteworthy enhancement in the probability of detecting target cells through the use of the proposed CFAR detector as compared to the aforementioned CFAR detectors that are commonly employed in radar systems.

DOI: <https://doi.org/10.22075/jme.2024.34057.2662>

© 2025 Published by Semnan University Press.

This is an open access article under the CC-BY 4.0 license. (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

* Corresponding author.

E-mail address: smh_andargoli@nit.ac.ir

How to cite this article:

Emadi Amiri, A, Hosseini Andargoli, S. M., and Esmaili Pain Efrakoti, I. (2025). Proposing an Iterative Method Based on Constant False Alarm Rate for Detecting Long Radar Targets in The Presence of Heavy Sea Clutter. Journal of Modeling in Engineering, 23(Special Issue 81), 249-263. doi: 10.22075/jme.2024.34057.2662

ارائه یک روش تکرار شونده مبتنی بر نرخ هشدار نادرست ثابت جهت آشکارسازی اهداف طویل در حضور کلاتر سنگین دریا

علیرضا عمادی امیری^۱، سید مهدی حسینی اندارگلی^{۱*}، ایمان اسماعیلی پایین افراکتی^۲

اطلاعات مقاله	چکیده
دریافت مقاله: ۱۴۰۳/۰۲/۱۸	هدف اصلی استفاده از سیستم‌های رادار مراقبت دریایی، آشکارسازی اهداف در محیط دریا است که بر اساس آن وجود یا عدم وجود هدف (اهداف) تصمیم‌گیری می‌گردد. تاکنون روش‌های مختلفی جهت آشکارسازی اهداف راداری ارائه گردیدند که روش‌های مبتنی بر نرخ هشدار نادرست ثابت (CFAR) از پذیرفته‌شده‌ترین و رایج‌ترین آن‌ها به شمار می‌روند. بالا بودن دامنه‌ی چندین دروازه‌برد متوالی سبب می‌گردد که روش‌های مذکور علی‌رغم عملکرد مناسب در آشکارسازی اهداف سوزنی در محیط واقعی راداری، قادر به آشکارسازی اهداف طویل نباشند. در این مقاله، روشی تکرار شونده مبتنی بر آشکارساز کوچک‌ترین میانگین نرخ هشدار نادرست ثابت (ISO-CFAR) پیشنهاد می‌گردد که براساس آن اهداف طویل راداری قابل آشکارسازی باشند. به این منظور دروازه‌بردهای شکل‌گرفته‌ی حاصل از هر پردازش راداری، به عنوان ورودی آشکارسازهای میانگین سلول، بزرگ‌ترین میانگین، کوچک‌ترین میانگین و کوچک‌ترین میانگین تکرار شونده‌ی مبتنی بر نرخ هشدار نادرست ثابت پیشنهادی در نظر گرفته می‌شوند و عملکرد آشکارسازی مذکور در آشکارسازی ابتدا، انتها و طول سلول‌های هدف ارزیابی و با یکدیگر مقایسه می‌گردد. نتایج نشان می‌دهد که احتمال آشکارسازی سلول‌های هدف در آشکارساز پیشنهادی در مقایسه با آشکارسازهای مذکور، که معمولاً در سیستم‌های راداری استفاده می‌شوند، به طرز قابل توجهی بهبود یافته است.
بازنگری مقاله: ۱۴۰۳/۰۶/۳۰	
پذیرش مقاله: ۱۴۰۳/۰۷/۰۴	
واژگان کلیدی: آشکارسازی اهداف طویل، نرخ هشدار نادرست ثابت، رادار مراقبت دریایی، کلاتر دریا، حد تفکیک برد رادار.	

DOI: <https://doi.org/10.22075/jme.2024.34057.2662>

© 2025 Published by Semnan University Press.

This is an open access article under the CC-BY 4.0 license. (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

۱- مقدمه

مشخصات سیگنال مذکور با یک سطح آستانه است؛ جایی که از آن به عنوان آشکارسازی اهداف^۳ (RTD) یاد می‌شود [۱]. آشکارسازی و تشخیص اهداف راداری در محدوده هوایی/ دریایی هر کشور از اهمیت به‌سزایی برخوردار است، چراکه با آشکارسازی اهداف راداری می‌توان امنیت پروازی/ دریایی یک کشور را تضمین نمود. در آشکارسازی اهداف راداری چالش‌ها و مشکلاتی همچون

رادار^۲ یک سیستم الکترومغناطیسی است که برای آشکارسازی، شناسایی و تعیین موقعیت اهداف به‌کار می‌رود و جهت پیشبرد قابلیت‌های حسی چندگانه انسانی برای مشاهده‌ی محیط‌های اطراف، مخصوصاً حس بصری، استفاده می‌شود. اساسی‌ترین وظیفه رادار تعیین وجود یا عدم وجود هدف در سیگنال بازگشتی، به‌وسیله اندازه‌گیری

* پست الکترونیک نویسنده مسئول: smh_andargoli@nit.ac.ir

۱. دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، بابل، ایران

۲. دانشکده مهندسی و فناوری، دانشگاه مازندران، بابلسر، ایران

استناد به این مقاله:

امیری عمادی، علیرضا، حسینی اندارگلی، سید مهدی و اسماعیلی پایین افراکتی، ایمان. (۱۴۰۴). ارائه یک روش تکرار شونده مبتنی بر نرخ هشدار نادرست ثابت جهت آشکارسازی اهداف طویل در حضور کلاتر سنگین دریا. مدل سازی در مهندسی، ۲۳ (شماره ویژه ۸۱)، ۲۴۹-۲۶۳. doi: 10.22075/jme.2024.34057.2662

آشکارساز میانگین سلولی^{۱۳} [CA-CFAR] ۸، ۹ و ۱۰، بزرگترین میانگین^{۱۴} (GO-CFAR) [۱۱ و ۱۰] و کوچکترین میانگین^{۱۵} (SO-CFAR) [۱۳ و ۱۰] اشاره داشت. آشکارساز میانگین سلولی در شرایط خاص نظیر محیط همگن^{۱۵} (نویز حرارتی و غیر کلاتری) بهینه است. با این حال در یک رادار مراقبت-دریایی^{۱۶} (MSR) که بر روی یک محدوده وسیعی کنترل و نظارت دارد، این مفروضات بطور معمول نقض می‌شوند [۱۴] و ویژگی‌های آماری بازگشتی‌های رادار حتی پس از فیلتر کردن، متنوع و غیرقابل پیش‌بینی هستند [۱۱] و در نتیجه آشکارساز میانگین سلولی ممکن است هشدارهای نادرست بیش از حدی تولید کند و کارایی و دقت خود را از دست بدهد. آشکارساز بزرگترین میانگین نیز به علت در نظر گرفتن بزرگترین میانگین از سلول‌های همسایه‌ی منتخب در محیط‌های کلاتری سنگین، هدف طویل^{۱۷} و سناریوهای چند هدفه نامناسب است [۱۵] و تعداد اهداف از دست رفته^{۱۸} در این آشکارساز در شرایط فوق‌الذکر به طرز قابل توجهی افزایش می‌یابد.

آشکارساز کوچکترین میانگین در سناریوهای چند هدفه و محیط‌های کلاتری نسبت به سایر آشکارسازهای نرخ هشدار نادرست ثابت، کارآمدتر است [۱۰ و ۱۳]؛ با این حال زمانی که طول هدف/اهداف از حد تفکیک راداری^{۱۹} بزرگتر می‌گردد (هدف طویل)، عملکرد آشکارساز به طرز محسوسی افت می‌کند؛ به گونه‌ای که تنها سلول ابتدایی و انتهایی هدف طویل قابل آشکارسازی خواهد بود [۱۶]. پر واضح است که طراحان سیستم‌های راداری، به خصوص رادارهای مراقبت-دریایی، علاقمند به دستیابی به حدتفکیک پایین جهت آشکارسازی اهداف نزدیک به هم هستند که این خصیصه در بهبود عملکرد آشکارساز کوچکترین میانگین مغایرت ایجاد خواهد کرد. این موارد سبب شده‌است که علی‌رغم مطالعات تحقیقاتی پرشماری که در زمینه‌ی آشکارسازهای مبتنی بر نرخ هشدار نادرست ثابت برای آشکارسازی اهداف هم‌تراز یا کوچک‌تر از حدتفکیک راداری

نویز، اغتشاشات جوی، پارازیت^۴، کلاتر^۵ و نهایتاً تضعیف دامنه‌ی سیگنال بازگشتی سبب عدم قطعیت و دقت بالا در صحت آشکارسازی می‌گردد. به جهت کمرنگ‌تر نمودن تاثیرات چالش‌های فوق‌الذکر در تصمیم‌گیری پیرامون سیگنال بازگشتی، مهم است که یک آستانه مناسبی تعریف گردد تا میزان قطعیت نسبت به وجود یا عدم وجود هدف در سیگنال اشاره‌شده به بالاترین حالت خود دست یابد. از آنجایی که این آستانه تابعی از احتمال آشکارسازی^۶ (P_D) و احتمال هشدار نادرست^۷ (P_{fa}) است، در بسیاری از سیستم‌ها برای جلوگیری از نرخ هشدارهای کاذب، داشتن آستانه‌ای مطلوب است که احتمال تشخیص را به حداکثر رسانده و احتمال هشدارهای کاذب را زیر مقداری از پیش تعیین شده نگه می‌دارد [۲].

تکنیک وفقی رایجی که می‌تواند آستانه آشکارسازی را با توجه به ویژگی‌های آماری محلی محاسبه کرده و با ثابت نگه‌داشتن P_{fa} مقدار P_D را بیشینه کند، آشکارساز نرخ هشدار نادرست ثابت^۸ (CFAR) نام دارد [۳ و ۲] که در این روش سیگنال دریافتی، سلول به سلول ارزیابی می‌شود [۳]. هر سلول آزمایشی^۹ (CUT) با میانگینی که از سلول‌های همسایه‌ی منتخب^{۱۰} محاسبه شده است، مقایسه می‌شود و اگر مقدار سیگنال در سلول آزمایشی (با یک حاشیه معین^{۱۱}) از میانگین تعیین‌شده بیشتر شود، یک آشکارسازی اعلام می‌گردد [۴]. آشکارسازهای نرخ هشدار نادرست ثابت در دهه‌های گذشته با جزئیات زیاد مورد مطالعه قرار گرفته‌اند [۷ و ۵]. با این وجود، بین تکنیک‌های مختلف CFAR یک مبادله وجود دارد، زیرا بهبود احتمال آشکارسازی اغلب به قیمت افزایش نرخ هشدار نادرست تمام می‌شود و بالعکس. روشن است که در مقایسه‌ی آشکارسازهای مختلف هرکدام که در P_{fa} ثابت، P_D بیشتری داشته باشند عملکرد بهتری دارند [۴].

چندین نسخه رایج و متداول از آشکارسازهای نرخ هشدار نادرست ثابت وجود دارد که هرکدام بسته به شرایط خاص محیط استفاده می‌شوند که از جمله‌ی آنها می‌توان به

¹³ Greatest of Constant false alarm rate (GO-CFAR)

¹⁴ Smallest of Constant false alarm rate (SO-CFAR)

¹⁵ Homogeneous Environment

¹⁶ Maritime Surveillance Radar (MSR)

¹⁷ Extended target

¹⁸ Miss Detection

¹⁹ Resolution range

⁴ Jammer

⁵ Clutter

⁶ Probability of Detection (P_D)

⁷ Probability of False alarm (P_{fa})

⁸ Constant false alarm rates (CFAR)

⁹ Cell under test

¹⁰ Reference delay cell

¹¹ Guard cell

¹² Cell averaging Constant false alarm rate (CA-CFAR)

نادرست ثابت پیشنهاد می‌گردد و ساختار آن بیان می‌شود. در نهایت ضمن بیان نتایج شبیه‌سازی عددی و ارزیابی مدل پیشنهادی در بخش ۵، جمع‌بندی کلی از عملکرد مدل پیشنهادی در بخش ۶ آورده می‌شود.

۲- مدل سیستم

در این بخش مدل سیستم شامل مدل سیگنال هدف، نویز و کلاتر دریایی سنگین بیان می‌گردد. فرض می‌شود که $y(t)$ سیگنال باند پایه دریافتی رادار است:

$$y(t) = s(t) + n(t) + c(t) \quad (1)$$

با فرض اینکه رادار مفروض از مدولاسیون فشرده‌سازی پالس فرکانس خطی^{۲۸} (LFM) جهت دستیابی به حدتفکیک راداری مناسب استفاده می‌کند، در آن صورت $s(t)$ ، که بیانگر سیگنال باند پایه دریافتی هدف است، بصورت زیر تعریف می‌شود:

$$s(t) = \sum_{i,j} A e^{j2\pi(f_{d_{i,j}}t + 0.5(\frac{w}{\tau})(t - \zeta_{i,j})^2)} \cdot \text{rect}\left(\frac{t - \zeta_{i,j}}{\tau}\right) \quad (2)$$

در معادله فوق، i و j به ترتیب بیانگر اندیس شماره اهداف و پالس‌ها هستند که برابر خواهند بود با:

$$\begin{cases} i = 1, 2, \dots, i_{max} \\ j = 1, 2, \dots, j_{max} \end{cases} \quad (3)$$

که i_{max} و j_{max} به ترتیب بیانگر تعداد کل اهداف و پالس‌های ادغام شونده^{۲۹} هستند.

همچنین در معادله ۲، $f_{d_{i,j}}$ فرکانس داپلر به ازای هدف i ام و پالس j ام، w پهنای باند سیگنال مدوله‌شده فرکانس خطی، τ عرض پالس و A دامنه‌ی پالس دریافتی مرتبط با پیک سیگنال دریافتی از هدف i ام و پالس j ام است که برابر خواهد بود با:

$$A_{i,j} = \sqrt{2p_{r_{i,j}}} \quad (4)$$

در معادله ۴، $p_{r_{i,j}}$ توان دریافتی هدف i ام و پالس j ام است که بصورت زیر تعریف می‌شود:

$$p_{r_{i,j}} = \frac{p_t G_t G_r \lambda^2 \sigma_i}{(4\pi)^3 R_i^4 l} \quad (5)$$

که p_t توان ارسالی، G_t و G_r به ترتیب بهره‌ی آنتن فرستنده و گیرنده، λ طول موج، σ_i سطح مقطع راداری^{۳۰}

(اهداف سوزنی^{۲۰}) صورت گرفته‌است، تعداد موارد مطالعاتی پیرامون آشکارسازی اهداف طویل ناچیز باشد. برای یک رادار مراقبت-دریایی با حد تفکیک راداری پایین، اهدافی نظیر کشتی‌های باری^{۲۱}، تهاجمی^{۲۲}، نفت‌کش‌ها^{۲۳}، کروزهای تفریحی^{۲۴} و ... به عنوان اهداف طویل در نظر گرفته می‌شوند [۱۷].

در [۱۸] یک آشکارساز هدف طویل^{۲۵} با طراحی یک روش جستجوی جدید برای یافتن اندازه هدف پیشنهاد شد که بر اساس آن اگرچه حضور کلاتر در نظر گردید اما سناریوی موردبررسی محدود به تک هدفه بود. همچنین آشکارساز پیشنهادی عملکرد CFAR را لزوماً در همه‌ی شرایط تضمین نمی‌کرد.

در [۱۹] آشکارسازی اهداف طویل دریایی غوطه‌ور در کلاتر توزیع K مورد بررسی قرار گرفت که براساس آن، حد تفکیک راداری ۰.۷۵ متر بود و حداکثر ۲ هدف در نظر گرفته شد. برای ارزیابی آشکارساز پیشنهادی مبتنی بر توزیع K که تعداد سلول‌های نگهبان و تاخیر یافته مرجع آن به ترتیب ۱۶۰ و ۲۴۰ بودند، جمعاً ۱۲۰ مجموعه داده دارای دست‌کم یک هدف در نرم‌افزار MATLAB در ۴ سناریو نویزی تک‌هدفه، کلاتری تک‌هدفه، نویزی چندهدفه و کلاتری چندهدفه تولید گردید. در نهایت نتایج ناامیدکننده‌ای حاصل شد و زمانی که احتمال هشدار نادرست روی ۰.۰۱ تنظیم شده بود، ۱۷ مجموعه داده آشکارسازی نشد و ۱۱ هشدار نادرست کاذب روی داد.

در این مقاله، روشی تکرارشونده مبتنی بر آشکارساز کوچک‌ترین میانگین نرخ هشدار نادرست ثابت (ISO-CFAR)^{۲۶} پیشنهاد می‌گردد که عملکرد آشکارسازی اهداف طویل در رادارهای مراقبت-دریایی با حدتفکیک پایین در حضور کلاتر دریایی سنگین و سناریوهای تک هدفه و چند هدفه بهبود خواهد یافت. به این منظور پس از این‌که در بخش ۲ مدل سیگنال هدف، نویز و کلاتر دریایی سنگین بیان گردید، در بخش ۳ ملاحظات پردازش سیگنالی^{۲۷} رادار برای تولید مجموعه داده‌های ورودی آشکارسازها ذکر می‌گردد. در بخش ۴ نیز روشی تکرارشونده مبتنی بر آشکارساز کوچک‌ترین میانگین نرخ هشدار

²⁶ Iterative Smallest of Constant false alarm rate (ISO-CFAR)

²⁷ Signal Processing consideration

²⁸ Linear Frequency Modulation (LFM)

²⁹ Integrated pulses

³⁰ Radar Cross Section (RCS)

²⁰ Single-point target

²¹ Cargo Ship

²² Warship

²³ Oil Tanker

²⁴ Cruise Ship

²⁵ Extended target Constant false alarm rate detector

$$C(t) = \sum_{i,j} \sqrt{s_{w_i} \times p_c} e^{-j2\pi f d_{i,j} t} \quad (۷)$$

در معادله فوق، s_{w_i} طیف توان نرمالیزه داپلر به ازای هدف i ام است که بصورت:

$$s_{w_i} = \frac{S_c(f_i)}{\sum_i S_c(f_i)} \quad (۸)$$

تعریف می‌شود که در آن، $S_c(f_i)$ چگالی طیف توان داپلر به ازای هدف i ام می‌باشد که مطابق با تئوری وینر-کین چاین^{۳۱} در [۲۱] بصورت معادله ۹ تعریف شده است:

$$S_c(f_i) = \frac{m}{\sqrt{2\pi}\sigma_f} \cdot e^{-\frac{f_i^2}{2\sigma_f^2}} \quad (۹)$$

که در معادله فوق m میانگین شدت کلتر و σ_f پهنای باند موثر داپلر است.

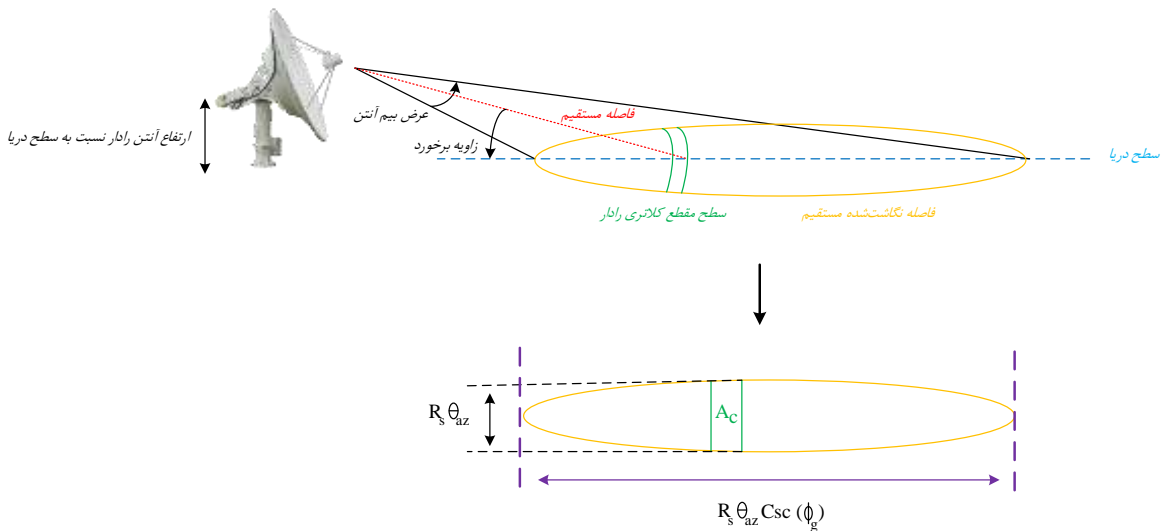
(RCS) هدف i ام، R_i فاصله‌ی هدف i ام از رادار و l مجموع تلفات می‌باشد.

در معادله ۲، $\zeta_{i,j}$ بیانگر تاخیر زمانی ارسال تا دریافت پالس j ام از هدف i ام می‌باشد که برابر است با:

$$\zeta_{i,j} = \frac{2R_i}{c} \quad (۶)$$

که در معادله فوق، c سرعت نور است.

در معادله ۱، $n(t)$ بیانگر نویز حرارتی دریافتی در گیرنده است که بصورت یک فرایند تصادفی با میانگین صفر و واریانس σ_n تعریف می‌گردد. همچنین در این معادله، $C(t)$ بیانگر سیگنال کلتر دریا می‌باشد که براساس [۲۰] توزیع تصادفی دامنه‌ی کلتر، گاوسی در نظر گرفته شده و بصورت زیر مدل می‌گردد:



شکل ۱- مدل مفهومی کلتر دریا برای رادار زمین پایه مراقبتی نمونه

معادله ۱۲ تعریف می‌گردد:

$$\sigma_0 = 10 \times \log(3.9 \times 10^{-6} \lambda \phi_g^{0.4} G_a G_u G_w) \quad (۱۲)$$

که G_a ، G_u و G_w در معادلات ۱۳-۱۵ تعریف شده‌اند:

$$G_a = \frac{a^4}{1 + a^4} \quad (۱۳)$$

$$G_u = e^{0.2 \cos \phi_w (1 - 2.8 \phi_g) (\lambda + 0.015)^{-0.4}} \quad (۱۴)$$

$$G_w = \left(\frac{1.94 u_w}{1 + \frac{u_w}{15.4}} \right)^q \quad (۱۵)$$

در معادله ۷، p_c توان کلتر است که بصورت:

$$p_c = \frac{p_t G_t G_r \lambda^2 \sigma_{tot}}{(4\pi)^3 R^4} \quad (۱۰)$$

بیان می‌گردد. در این معادله، σ_{tot} مجموع بازگشتی‌های ناشی از سطح مقطع راداری در یک المان از سطح روشن‌شده^{۳۲} از عرض بیم^{۳۳} است که از معادله ۱۱ بدست خواهد آمد:

$$\sigma_{tot} = \sigma_0 A_c \quad (۱۱)$$

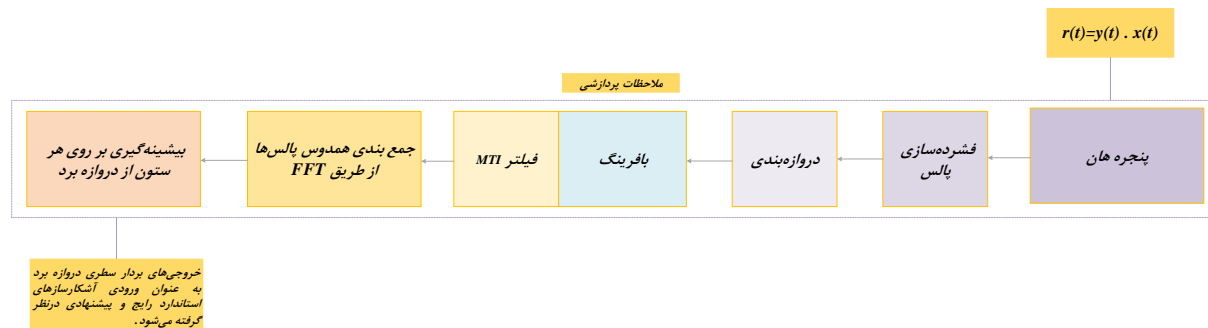
در معادله ۱۱، σ_0 بازگشتی‌های نرمالیزه‌شده سطح دریا است که براساس [۲۰] در زوایای برخورد^{۳۴} کم بصورت

³³ Beam width
³⁴ Grazing angle

³¹ Wiener-Khinchin theorem
³² Sea illuminated patch

و سرعت باد هستند که بسته به وضعیت دریایی در [۲۲] مقداردهی شده‌اند. در زوایای برخورد متوسط و زیاد نیز σ_0 از مدل تجربی IET^{۳۶} که در [۲۲] معرفی شده است، تبعیت می‌کند.

در معادلات ۱۳ و ۱۵، a و q بیانگر ضریب مدل GIT^{۳۵} هستند که در [۲۰] تعریف شده‌اند. همچنین ϕ_w و u_w پارامترهای وابسته به جهت باد نسبت به جهت حرکت هدف



شکل ۲- زنجیره‌ی پردازش سیگنال رادار زمین پایه مراقبتی مفروض

در معادله ۱۸، θ_{az} نشان دهنده‌ی عرض بیم آنتن در راستای سمت^{۳۹} برحسب رادیان و ΔR بیانگر حد تفکیک برد رادار است که در حالت کلی بصورت زیر تعریف می‌شود:

$$\Delta R = \frac{c\tau_{ef}}{2} \quad (۱۹)$$

از آنجایی که در مدلسازی سیگنال ارسالی رادار نمونه از فشرده‌سازی پالس مدوله‌شده با فرکانس خطی استفاده شده است، معادله ۱۹ بصورت معادله زیر خواهد شد:

$$\Delta R = \frac{c}{2\mathbb{W}} \quad (۲۰)$$

۳- مدل پردازش سیگنالی رادار

مدل پردازشی در نظر گرفته‌شده برای رادار نمونه در شکل (۲) نشان داده شده است. اگر فرض شود که T و $D.C$ به ترتیب بیانگر بازه‌ی تکرار پالس^{۴۰} و نرخ و وظیفه^{۴۱} رادار باشند، مطابق با معادله ۲۱ عرض پالس سیگنال ارسالی محاسبه شده و از حاصلضرب آن با فرکانس نمونه برداری، تعداد نمونه‌های سیگنال دریافتی در پردازش هر پالس براساس معادله ۲۲ بدست خواهد آمد.

$$\tau = D.C \times T \quad (۲۱)$$

$$\tilde{n} = f_s \times \tau \quad (۲۲)$$

در این صورت مطابق با معادله ۲۲، نمونه‌های سیگنال دریافتی به ازای هر پالس بصورت یک برداری به شکل $y =$

در معادله ۱۲، ϕ_g زاویه‌ی برخورد را نشان می‌دهد که بصورت معادله ۱۶ تعریف می‌شود:

$$\phi_g = \sin^{-1} \left(\frac{h_r}{R_s} + \frac{h_r^2}{2r_e R_s} - \frac{R_s}{2r_e} \right) \quad (۱۶)$$

که h_r ارتفاع آنتن رادار نسبت به سطح زمین، r_e شعاع موثر کره زمین و R_s فاصله مستقیم بین آنتن فرستنده و کلاتر^{۳۷} است که همانطور از معادله ۱۷ مشخص است، به ارتفاع آنتن رادار و فاصله نگاهت‌شده‌ی مستقیم (R_g) هر سلول بستگی دارد.

$$R_s = \sqrt{h_r^2 + R_g^2} \quad (۱۷)$$

این مفهوم در شکل (۱) نیز به نمایش درآمده است. در معادله ۱۱، A_C سطح مقطع راداری کلاتر را نشان می‌دهد که از معادله ۱۸ بدست خواهد آمد:

$$A_C = \tilde{Y} \times \Delta R \times R_s \times \theta_{az} \times \sec(\phi_g) \quad (۱۸)$$

در معادله فوق، \tilde{Y} پارامتر وابسته به شکل بیم و پالس فشرده‌شده^{۳۸} است که بر اساس [۲۰]، برای پالس مستطیلی و شکل بیم گوسی، برابر با 0.753 انتخاب می‌گردد؛ این در حالیست که اگر هم پالس و هم شکل بیم مستطیلی باشند، \tilde{Y} برابر با ۱ خواهد بود.

³⁹ Azimuth

⁴⁰ Pulse Repetition Interval (PRI)

⁴¹ Duty Cycle

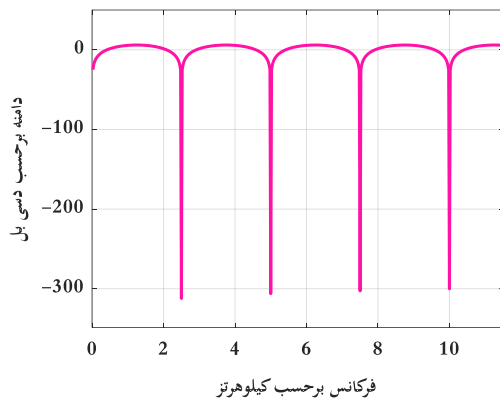
³⁵ Institution of Engineering and Technology (IET)

³⁶ Georgia Institute of Technology (GIT)

³⁷ Slant range

³⁸ Beam shape and Pulse compression

معادله ۲۲، برداری با اندازه‌ی $1 \times \tilde{n}$ خواهد بود. در گام بعدی، جهت تضعیف توان کلاتر، فیلتر بالاگذر با پاسخ ضربه محدود^{۴۵} مرتبه ۱۹ طراحی می‌گردد که پاسخ فرکانسی آن در شکل (۴) آورده شده است. این فیلتر به نمونه‌های حاصلضرب دروازه‌گذاری‌شده‌ی هر پالس اعمال می‌شود.



شکل ۴- پاسخ فرکانسی فیلتر بالاگذر با پاسخ فرکانسی محدود جهت تضعیف توان کلاتر

اگر فرض شود که w_r بیانگر سرعت چرخش آنتن رادار^{۴۶} باشد، مطابق با معادله ۲۵ زمان رویارویی هدف و رادار برابر خواهد بود با:

$$T_D = w_r \times \theta_{az} \quad (25)$$

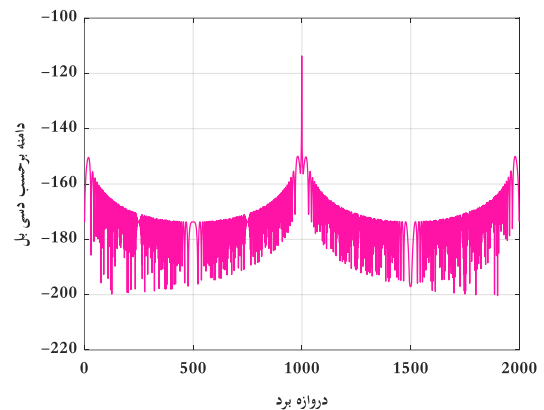
که حاصلضرب معادله فوق با فرکانس تکرار پالسی^{۴۷}، تعداد کل پالس‌های دریافتی در هر پردازش را مطابق معادله ۲۶ مشخص می‌کند.

$$j_{max} = f_p \times T_D \quad (26)$$

به جهت بهبود نسبت سیگنال به کلاتر و نویز^{۴۸} (SCNR) و افزایش دقت آشکارسازی، j_{max} پالس دریافتی در هر \tilde{n} دروازه‌برد از طریق یک تبدیل فوریه سریع^{۴۹} (FFT) j_{max} نقطه‌ای بصورت هم‌دوس^{۵۰} جمع‌بندی می‌گردند و به موازات آن بردارهای نمونه‌های حاصلضرب دروازه‌گذاری‌شده ناشی از پردازش هر پالس از طریق یک بافر به طول \tilde{n} ذخیره خواهد شد که در نهایت یک ماتریس $j_{max} \times \tilde{n}$ شکل می‌گیرد. بسته به داپلر هدف، در یکی از سلول‌های تبدیل فوریه سریع j_{max} نقطه‌ای بیشترین بهره جمع‌بندی

$[y_1 y_2 \dots y_{\tilde{n}}]$ تعریف می‌شوند که با نمونه‌های سیگنال مرجع ارسالی، که بصورت یک برداری به شکل $x = [x_1 x_2 \dots x_{\tilde{n}}]$ هستند، مطابق با شکل (۲) ضرب نقطه‌ای می‌گردند که سیگنال حاصلضرب بصورت یک برداری به شکل $r = [r_1 r_2 \dots r_{\tilde{n}}]$ خواهد بود. سیگنال مرجع ارسالی نیز بر اساس معادله ۲۳ تعریف خواهد شد:

$$x(t) = e^{j\pi\left(\frac{w}{T}\right)t^2} \quad (23)$$



شکل ۳- دامنه‌ی حاصلضرب سیگنال بازگشتی از هدف با سیگنال مرجع پس از اعمال پنجره هان

به جهت کاهش سطح گلبرگ‌های کناری^{۴۲} سیگنال حاصلضرب در حوزه زمان، پنجره هان^{۴۳} با طول \tilde{n} بر روی نمونه‌های سیگنال حاصلضرب مورد بحث اعمال می‌شود. شکل (۳)، دامنه‌ی حاصلضرب سیگنال بازگشتی از هدف با سیگنال مرجع ارسالی را پس از اعمال پنجره‌ی مذکور به نمایش در می‌آورد که بر اثر آن، اختلاف ۴۰ دسی‌بلی بین گلبرگ اصلی و گلبرگ‌های کناری ایجاد خواهد شد.

در ادامه برای دستیابی به حدتفکیک مناسب از فشرده‌سازی پالس مدوله‌شده فرکانس خطی استفاده شده است؛ جایی که

$$\tau_{ef} = \frac{1}{W} \quad (24)$$

در این شرایط حد تفکیک راداری برابر با معادله ۲۰ خواهد بود.

در ادامه بر روی سیگنال‌های بازگشتی، عملیات دروازه‌بندی برد صورت می‌گیرد که نمونه‌های حاصلضرب دروازه‌گذاری‌شده^{۴۴} در پردازش هر پالس $(r(t))$ ، براساس

⁴⁷ Pulse Repetition Frequency (PRF)

⁴⁸ Signal to Clutter plus Noise ratio (SCNR)

⁴⁹ Fast Fourier Transform (FFT)

⁵⁰ Coherent Integration

⁴² Side lobe level

⁴³ Hann windows

⁴⁴ Range Gates

⁴⁵ Finite Impulse Response (FIR)

⁴⁶ Rotation speed

مرحله‌ی اول، حذف‌فصل بین این دروازه‌بردها را همانند مرحله‌ی اول، با سنجش نسبت سلول تحت آزمون محتوی هدف با کوچک‌ترین میانگین از سلول‌های تاخیر یافته‌ی مرجع طرفینی که بر اثر سرکوب در مرحله‌ی قبل ممکن است، تغییر کرده باشند، بررسی می‌کند و در صورتی که همچنان هدف طویل تا دروازه‌بردهای بیشتری ادامه‌دار بود، نسبت به آشکارسازی تعداد دیگری از دروازه‌برد ابتدایی و انتهای جدید که شامل همان هدف است، اقدام می‌کند. این مرحله به‌صورت تکرارشونده ادامه می‌یابد و هر بار که تعدادی دروازه‌برد ابتدایی و انتهای هدف آشکارسازی گردید، دامنه‌ی آن دروازه‌بردها هم‌تراز با کف نویز/کلاتر شده و حذف‌فصل آن‌ها هر بار با آستانه‌های جدید مقایسه می‌شود و در صورتی که دامنه آن‌ها از کوچک‌ترین میانگین بین میانگین نیم‌پنجره‌ها بزرگ‌تر باشد، آشکارسازی صورت خواهد گرفت. پر واضح است که اگر شرط فوق ارضا نشود، فرایند آشکارسازی خاتمه یافته و دو هدف مجزا اعلام می‌گردد. در آشکارساز پیشنهادی تعداد سلول‌های نگهبان و تاخیر یافته مرجع به ترتیب ۲ و ۱۰ سلول از طرفین در نظر گرفته می‌شود که ساختار کلی عملکرد آن در شکل (۶) ارائه شده است. لازم به ذکر است که با توجه به تعداد سلول‌های نگهبان و تاخیر یافته مرجع آشکارساز پیشنهادی، تعداد دروازه‌بردهای آشکارساز در هر مرحله از فرایند آشکارسازی از یک تا حداکثر ۱۰ دروازه‌برد (۵ دروازه‌برد از طرفین)، با توجه به عوامل مختلفی نظیر سناریوی مورد بررسی، نسبت SCNR هدف، محل پیک هدف و ... متغیر خواهد بود.

شکل (۷) نیز عملکرد مفهومی آشکارساز پیشنهادی را توصیف می‌کند که براساس آن انتظار می‌رود آشکارساز پیشنهادی حتی در سناریوهایی که اهداف سوزنی را شامل می‌شوند، به خوبی عمل کند.

۵- نتایج شبیه‌سازی و ارزیابی عددی مدل

پیش‌نیاز ارزیابی درست آشکارساز پیشنهادی، وجود مجموعه داده‌هایی از دروازه‌بردهای سطری $1 \times \bar{n}$ که در بخش ۳ بیان گردید، در سناریوهای گوناگون است. به این منظور یک رادار مراقبت-دریایی زمین پایه در نرم افزار MATLAB شبیه‌سازی گردیده است که مشخصات رادار مفروض در جدول ۱ آمده است.

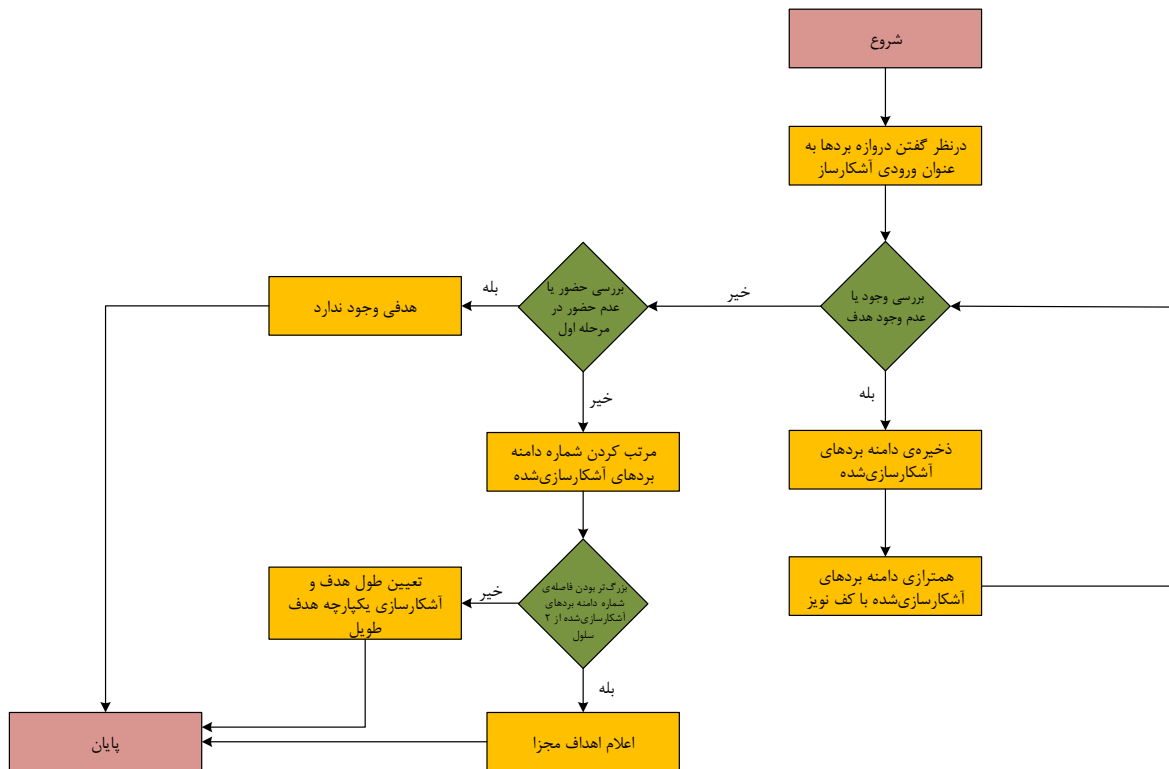
همدوس مشاهده می‌شود. جهت حصول بهترین نتیجه از جمع‌بندی همدوس، سلولی که بیشترین دامنه در بین هر J_{max} پالس از دروازه‌برد Z ام را دارد، انتخاب می‌شود و یک بردار سطری با طول $1 \times \bar{n}$ تشکیل می‌گردد که به عنوان ورودی آشکارسازها در نظر گرفته می‌شود. همچنین لازم به ذکر است که $Z = \{1, 2, \dots, \bar{n}\}$ می‌باشد.

۴- آشکارساز پیشنهادی

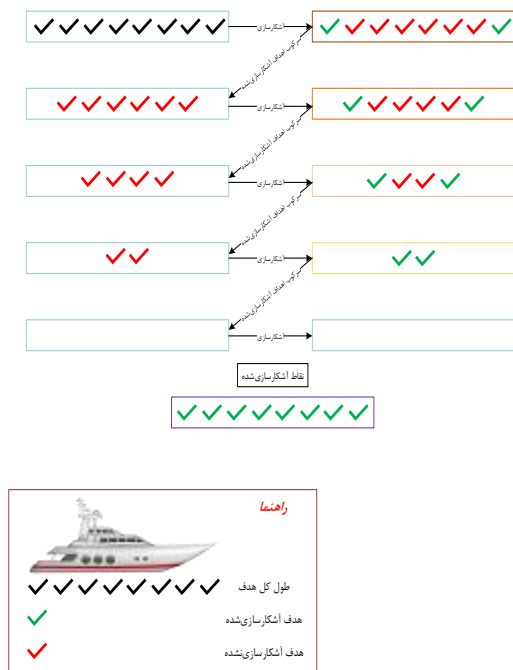
در این بخش روشی تکرارشونده مبتنی بر آشکارساز کوچک‌ترین میانگین نرخ هشدار نادرست ثابت برای آشکارسازی اهداف طویل دریایی پیشنهاد می‌گردد و جهت ارزیابی مدل پیشنهادی، دروازه‌بردهای سطری $1 \times \bar{n}$ که در بخش ۳ تولید گردید، به عنوان ورودی آشکارساز پیشنهادی در نظر گرفته می‌شود.

هنگام مواجهه‌ی آشکارسازهای نرخ هشدار نادرست ثابت با اهداف طویل راداری، به علت بالا بودن دامنه‌ی سیگنال در چندین دروازه‌برد متوالی، سطح آستانه‌ی وقتی بالا می‌رود و آشکارسازهای نام‌برده قادر به آشکارسازی هدف نیستند. البته از آنجایی که آشکارساز کوچک‌ترین میانگین استاندارد، کم‌ترین میانگین بین میانگین نیم‌پنجره‌های راست و چپ را به عنوان سطح آستانه در نظر می‌گیرد، از این ضعف تا حدودی مستثنی است و قادر است چند دروازه‌برد ابتدایی و انتهای هدف را آشکارسازی کند. به همین جهت پتانسیل آشکارساز کوچک‌ترین میانگین در آشکارسازی اهداف طویل نسبت به سایر آشکارسازهای نرخ هشدار نادرست ثابت بیشتر است. در این مقاله، روشی تکرارشونده مبتنی بر آشکارساز کوچک‌ترین میانگین پیشنهاد می‌دهیم که کارنمای عملکرد آن در شکل (۵) به نمایش گذاشته شده است که بر اساس آن، نخست آشکارساز پیشنهادی، با سنجش نسبت دامنه‌ی سلول تحت آزمون محتوی هدف با کوچک‌ترین میانگین از سلول‌های تاخیر یافته‌ی مرجع طرفین سلول تحت آزمون، تعدادی دروازه‌برد ابتدایی و انتهای که هدف طویل در آن حضور دارد را آشکارسازی می‌کند و پس از آن، دامنه‌ی دروازه‌بردهای مذکور هم‌تراز با کف نویز/کلاتر^{۵۱}، که برابر با کوچک‌ترین میانگین از سلول‌های تاخیر یافته مرجع طرفین دروازه‌بردهای آشکار شده است، می‌گردد. در مرحله بعد، آشکارساز پیشنهادی با سرکوب دروازه‌بردهای آشکار شده‌ی

⁵¹ Suppress to Noise level

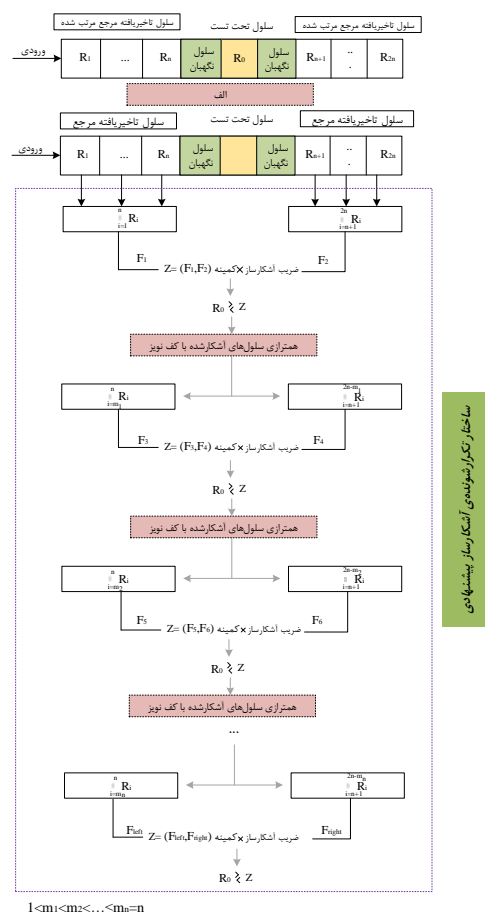


شکل ۵- کارنمای عملکرد آشکار ساز پیشنهادی



شکل ۷- عملکرد مفهومی آشکار ساز پیشنهادی

در طول تولید مجموعه داده‌های ارزیابی آشکار ساز، سناریوهای گوناگونی نظیر تک‌هدفه کلاتر سنگین، چندهدفه کلاتر سنگین و نزدیک به هم در نظر گرفته شده است. علاوه بر موارد فوق، سطح مقطع راداری هدف (اهداف)، تعداد اهداف، طول اهداف، سرعت و فاصله‌ی آن‌ها

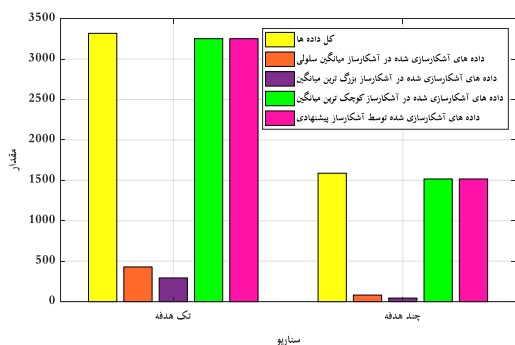


شکل ۶- ساختار نحوه‌ی عملکرد آشکار ساز پیشنهادی

می‌گردد.

جدول ۱- مشخصات رادار مراقبت-دریایی زمین پایه شبیه‌سازی شده

مقدار	توضیح	علامت
۱۰ گیگاهرتز	فرکانس مرکزی	f_c
۰.۰۳ متر	طول موج	λ
۱۲.۵ دور بر دقیقه	سرعت چرخش آنتن	w_r
۰.۲ میلی ثانیه	عرض پالس	τ
۱۰ مگاهرتز	فرکانس نمونه برداری	f_s
۰.۴ میلی ثانیه	بازه‌ی تکرار پالس	T
۴۰ درجه	عرض بیم در راستای ارتفاع	θ_{el}
۳ درجه	عرض بیم در راستای سمت	θ_{az}
۳۰ دسی بل	بهره‌ی فرستنده و گیرنده	$G_t \& G_r$
۰.۰۴۱۷ ثانیه	زمان رویارویی هدف و رادار	T_D
۶ دسی بل	شاخص نویز	$N.F$
۱ کیلووات	بیشینه توان ارسالی	P_t
۶ دسی بل	تلفات کل	l
۲۵ دسی بل	سطح لوب کناری آنتن	SLL
۱۰۴	پالس‌های جمع‌بندی شده	J_{max}
۱۵ متر	حد تفکیک برد رادار	ΔR
۳۷.۵ متر بر ثانیه	سرعت کور	V_{blind}
۱۰ مگاهرتز	پهنای باند LFM	\mathbb{W}
۰.۵	نرخ وظیفه	$D.C$



شکل ۸- تعداد داده‌های آشکارسازی شده توسط آشکارسازها به گونه‌ای که دست کم یک دروازه‌برد از هدف طویل آشکارسازی شده باشد.

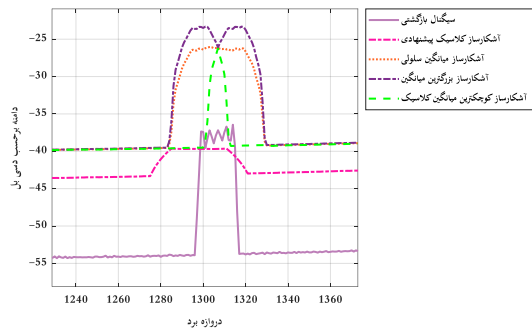
بر این اساس و همانطوری که از شکل (۹) پیداست، اگرچه آشکارساز کوچک‌ترین میانگین عملکرد خوبی را در تعداد

نسبت به رادار در طی هر سناریو دستخوش تغییر می‌گردد. همچنین در طول شبیه‌سازی حداکثر ۲ هدف در نظر گرفته شده و فراوانی نسبت سیگنال به نویز و کلاتر اهداف از ۵ تا ۳۰ دسی‌بل متغیر بوده است.

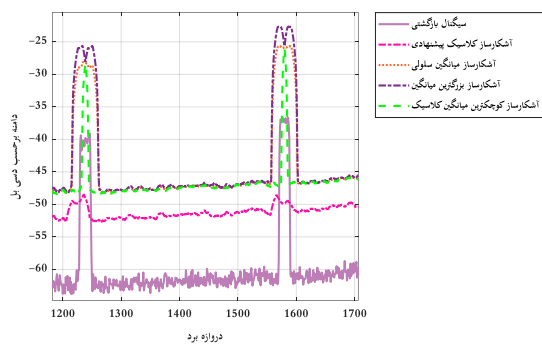
همانطور که پیشتر نیز بیان شد، اندازه‌ی ماتریس سیگنال خروجی قبل از بیشینه‌گیری در هر پالس، $J_{max} \times \vec{n}$ خواهد بود که براساس جدول ۱ اندازه‌ی ماتریس فوق $10^4 \times 2000$ می‌باشد که پس از بیشینه‌گیری به یک بردار سطری 1×2000 تبدیل خواهد شد. در مجموع 4906 مجموعه داده‌هایی از دروازه‌بردهای سطری 1×2000 تولید گردید که از این مقدار 3318 مجموعه داده تک‌هدفه طویل و 1588 مجموعه داده باقیمانده، چندهدفه طویل بودند. از تعداد کل مجموعه داده‌های چندهدفه طویل، 217 داده نزدیک به هم که فاصله‌ی آن‌ها از یکدیگر دست کم 300 متر بود، وجود داشت و همچنین طول اهداف نیز حداکثر به اندازه‌ی 25 دروازه‌ی برد در نظر گرفته شد. در نهایت این مجموعه داده‌های 1×2000 به عنوان ورودی آشکارسازهای کلاسیک و پیشنهادی لحاظ گشتند و عملکرد آشکارساز پیشنهادی با آشکارسازهای میانگین سلولی، بزرگ‌ترین و کوچک‌ترین میانگین مقایسه گردید. لازم به ذکر است که این ارزیابی‌ها بر روی آشکارسازها در شرایطی که $P_{fa} = 10^{-6}$ تنظیم شده بود، انجام گردید.

همانطوری که از شکل (۸) مشخص است، از میان 3318 و 1588 مجموعه داده تک‌هدفه و چندهدفه طویل 1×2000 ، آشکارساز میانگین سلولی به ترتیب قادر به آشکارسازی 429 و 81 مجموعه داده، به گونه‌ای که دست کم یک دروازه‌برد از هدف (اهداف) طویل آشکار شده باشد، گردید. در شرایط مشابه، آشکارساز بزرگ‌ترین میانگین نیز به ترتیب قادر به آشکارسازی 293 و 44 مجموعه داده گردید. در این بین عملکرد آشکارساز کوچک‌ترین میانگین کلاسیک نسبت به دو آشکارساز کلاسیک دیگر بهتر بوده است و آشکارساز مذکور توانست به ترتیب 3252 و 1517 مجموعه داده تک هدفه و چند هدفه را به گونه‌ای که دست کم یک دروازه‌برد از هدف (اهداف) طویل آشکار شده باشد، آشکارسازی کند. در تحلیل نتایج این مقاله، اگر هر یک از دروازه‌بردهای هدف (اهداف) طویل توسط آشکارسازها آشکارسازی نگردد و طول هدف (اهداف) آشکار شده از طول واقعی هدف (اهداف) کوچک‌تر باشد، به اندازه‌ی تعداد دروازه‌بردهای آشکار نشده‌ی هدف (اهداف) یک از دست رفت هدف لحاظ

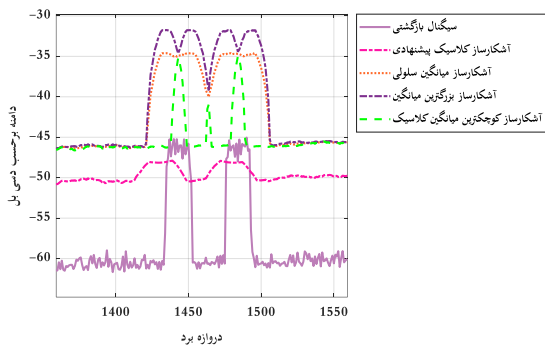
مجموعه داده‌های آشکارسازی شده به گونه‌ای که دست کم یک دروازه‌برد از هدف طولی آشکارسازی شده باشد، داراست اما احتمال آشکارسازی آشکارساز مذکور حتی در نسبت سیگنال به نویز و کلاترهای بالا مطلوب نیست و این بدان معناست که آشکارساز کوچک‌ترین میانگین تنها قادر به آشکارسازی لبه‌های هدف (اهداف) است. به عبارت دیگر هیچ‌یک از آشکارسازهای کلاسیک فوق‌الذکر قادر نیستند هیچ هدف (اهداف) طولی را به گونه‌ای که تمامی دروازه‌بردهای آن تشخیص داده شده باشد، آشکارسازی کنند. در طرف مقابل، اگرچه آشکارساز پیشنهادی عملکرد کاملاً مشابه‌ای را در تعداد مجموعه داده‌های آشکارسازی شده، به گونه‌ای که دست کم یک دروازه‌برد از هدف طولی آشکارسازی شده باشد، نسبت به آشکارساز کوچک‌ترین میانگین تجربه می‌کند اما از آن جایی که قادر به آشکارسازی تمامی دروازه‌بردهای هدف است، احتمال آشکارسازی بسیار بالاتری را در مقایسه با آشکارسازهای کلاسیک به ارمغان می‌آورد. این حقیقت در شکل (۱۰) به نمایش درآمده است.



(الف)



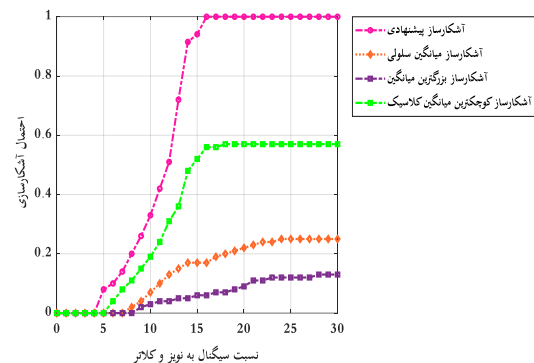
(ب)



(ج)

شکل ۱۰- عملکرد آشکارسازهای کلاسیک و پیشنهادی در سناریوهای مختلف. الف) سناریوی تک‌هدفه کلاتری با طول هدف ۳۰۰ متر. ب) سناریوی دو هدفه کلاتری با طول هدف ۱۵۰ متر. ج) سناریوی دو هدفه کلاتری نزدیک به هم با طول هدف ۲۵۰ متر.

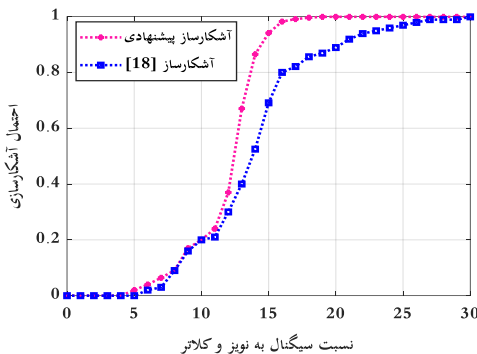
شکل ۹- احتمال آشکارسازی آشکارساز پیشنهادی در مقایسه با آشکارسازهای کلاسیک در نسبت سیگنال به نویز و کلاترهای متفاوت در شرایطی که p_{fa} روی 10^{-6} تنظیم شده و به اندازه‌ی تعداد دروازه‌بردهای آشکارنشده‌ی هدف (اهداف) یک از دست رفت هدف لحاظ گردیده است.



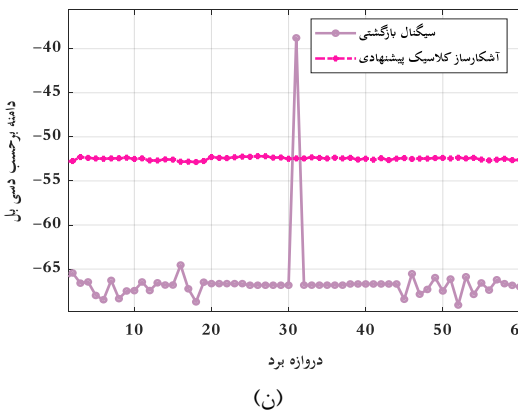
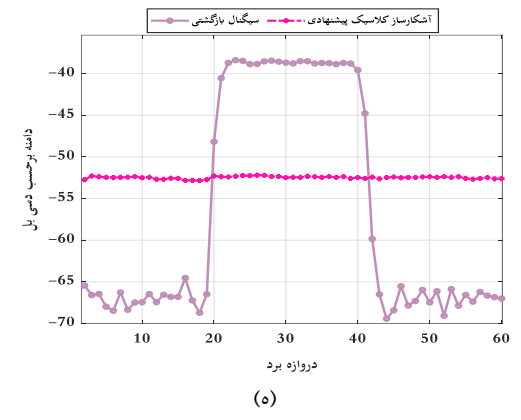
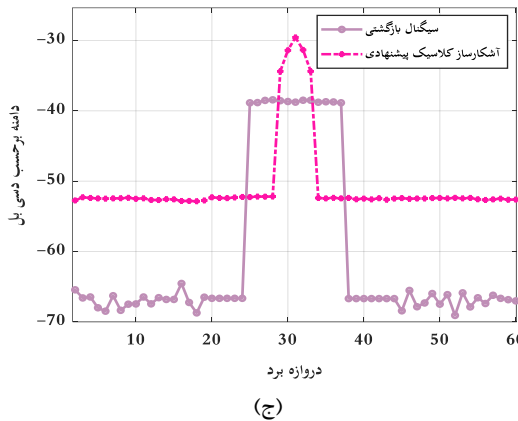
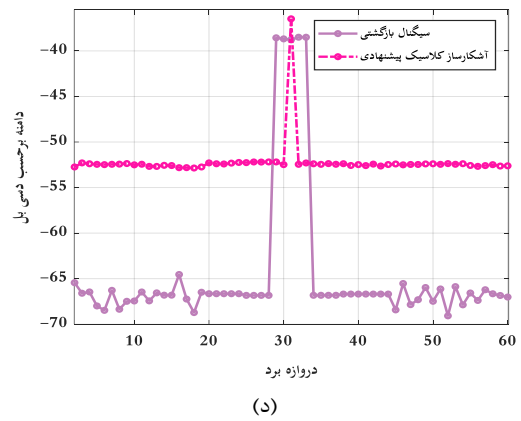
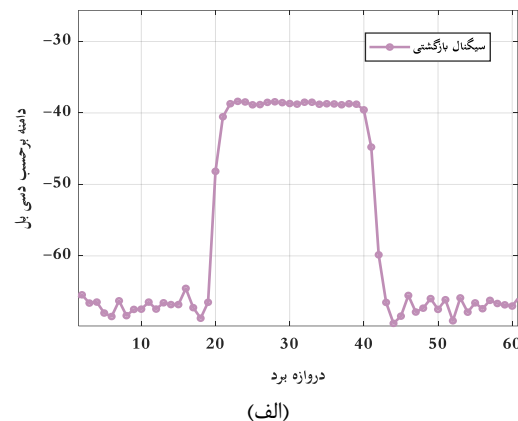
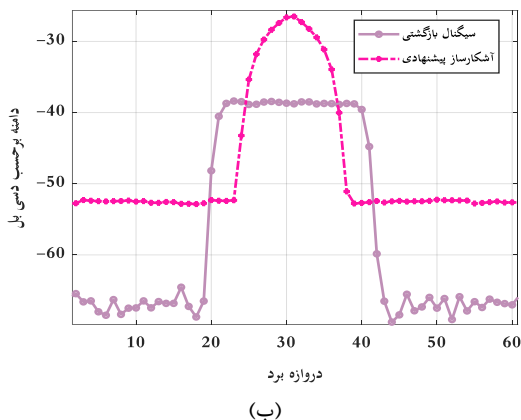
در بین ۳۳۱۸ مجموعه داده تک‌هدفه طولی آشکارساز پیشنهادی توانست ۳۰۹۴ مجموعه داده را به گونه‌ای که تمامی دروازه‌بردهای هدف آشکارسازی شده باشد، تشخیص دهد. همچنین در شرایط مشابه از میان ۲۱۷ و

جدول ۲- عملکرد آشکارساز پیشنهادی در مقایسه با آشکارساز [۱۹]

روش / سناریو	کل مجموعه داده	تعداد هشدارهای کاذب	تعداد از دست رفت هدف	احتمال آشکارسازی
پیشنهادی / تک‌هدفه	۳۳۱۸	۰	۲۲۴	۰.۹۳۲۵
پیشنهادی / چندهدفه	۱۵۸۸	۰	۸۱	۰.۹۴۸۹
[۱۹]	۱۲۰	۱۱	۱۷	۰.۸۵۸



شکل ۱۱- احتمال آشکارسازی آشکارساز پیشنهادی در مقایسه با آشکارساز [۱۸] در نسبت سیگنال به نویز و کلاترهای متفاوت در شرایطی که p_{fa} روی 10^{-6} تنظیم شده و از دست رفت هدف براساس مجموعه داده‌ها است.



شکل ۱۲- عملکرد مرحله به مرحله آشکارساز پیشنهادی در مواجهه با اهداف طویل و سوزنی در یک سناریوی تک هدفه

پیشنهادی در نظر گرفته شد. فراوانی داده‌های تولیدی از ۵ تا ۳۰ دسی‌بل بود و ارزیابی بر روی آشکارسازها را در شرایطی که $P_{fa} = 10^{-6}$ بود، انجام دادیم. در این بین آشکارسازهای میانگین، بزرگ‌ترین و کوچک‌ترین میانگین قادر به آشکارسازی هیچ مجموعه داده‌ای، به گونه‌ای که تمام دروازه‌بردهای آن آشکارسازی شده باشد، نگشتند. در این بین آشکارساز کوچک‌ترین میانگین اگرچه همانند سایر آشکارسازهای کلاسیک فوق‌الذکر قادر به آشکارسازی طول واقعی هدف نگردید اما توانست عملکرد مشابه‌ای را نسبت به آشکارساز پیشنهادی ارائه دهد و از میان ۳۳۱۸ و ۱۵۸۸ مجموعه داده تک‌هدفه و چندهدفه به ترتیب ۳۲۵۲ و ۱۵۱۷ مجموعه داده را به گونه‌ای که حداقل یک دروازه‌برد از هدف (اهداف) تشخیص داده شده باشد، آشکارسازی کند. در نقطه مقابل آشکارساز پیشنهادی توانست به ترتیب ۲۰۹ و ۱۲۹۸، ۳۰۹۴ مجموعه داده تک‌هدفه طویل، چندهدفه طویل فاصله دار و چندهدفه طویل نزدیک به هم را به گونه‌ای که همه‌ی دروازه‌بردهای هدف (اهداف) تشخیص داده شده باشد، آشکارسازی کند. وجود نسبت سیگنال به نویز و کلاتر گلوگاهی در مجموعه داده‌های ارزیابی سبب گردید که در این بین ۲۲۴ و ۸۱ از دست رفت هدف به ترتیب در سناریوهای تک‌هدفه و چندهدفه مشاهده گردد. در نهایت احتمال آشکارسازی توسط آشکارساز پیشنهادی در سناریوهای مذکور به ترتیب ۰.۹۳۲۵ و ۰.۹۴۸۹ ثبت شد که عملکرد قابل دفاعی را از خود در مقایسه با آشکارسازهای کلاسیک نشان می‌دهد.

تعارض منافع

نویسندگان این مقاله تأیید می‌کنند که هیچ گونه تعارض منافع (مالی، حرفه‌ای یا شخصی) که بر نتایج یا تفسیر پژوهش تأثیر بگذارد، وجود ندارد.

تأییدیه اخلاقی

نویسندگان متعهد می‌شوند که مطالب این مقاله را در هیچ مجله دیگری به چاپ نرسانده‌اند.

مشارکت‌های نویسندگان:

علیرضا عمادی امیری: ایده اصلی، روش شناسی، انجام آزمایش و شبیه سازی و جمع اوری داده ها، نگارش مقاله
سید مهدی حسینی اندارگلی: تفسیر و اعتبارسنجی نتایج، ویرایش محتوای تخصصی و بازنویسی بخش‌های کلیدی

تعداد هشدارهای کاذب و از دست رفت هدف آشکارساز پیشنهادی در مقایسه با [۱۹] در جدول ۲ به نمایش درآمده است که براساس آن احتمال آشکارسازی در آشکارساز پیشنهادی در سناریوهای تک‌هدفه و چندهدفه به ترتیب ۰.۹۳۲۵ و ۰.۹۴۸۹ است. این در حالیست که احتمال آشکارسازی آشکارساز ارائه‌شده در [۱۹]، با وجود احتمال هشدار کاذب ۰.۰۰۱، تنها ۰.۸۵۸ می‌باشد. همچنین لازم به ذکر است که تعداد از دست رفت‌های هدف در این جدول براساس مجموعه داده‌هاست و به این صورت محاسبه شده است که اگر طول واقعی هدف (اهداف) با طول آشکارسازی‌شده برابر نباشد و حتی یک دروازه‌برد از هدف (اهداف) توسط آشکارساز پیشنهادی آشکارسازی نگردد، آن مجموعه داده کلاً یک از دست رفت هدف در نظر گرفته می‌شود. همچنین همانطور که از شکل (۱۱) مشخص است، در نسبت سیگنال به نویز و کلاترهای گلوگاهی (کم‌تر از ۱۳ دسی‌بل)، شاهد پایین بودن احتمال آشکارسازی هستیم و می‌توان بیان داشت که وجود مجموعه داده‌هایی با نسبت سیگنال به نویز و کلاتر کم‌تر از ۱۳ دسی‌بل جهت ارزیابی آشکارساز پیشنهادی دلیلی بر بالا بودن تعداد کل از دست رفت هدف است. همچنین شکل (۱۲) آشکارسازی مرحله به مرحله‌ی آشکارساز پیشنهادی در مواجهه با اهداف طویل و سوزنی را در یک سناریوی تک هدفه نشان می‌دهد. همانطور که از این شکل مشخص است آشکارساز پیشنهادی تا قبل از گام آخر آشکارسازی، همه‌ی دروازه‌بردهای هدف طویل بجز یک دروازه‌برد را آشکارسازی کرده و در گام آخر، تنها دروازه‌برد باقیمانده از هدف طویل را آشکارسازی می‌کند. بر این اساس می‌توان باور داشت که آشکارساز پیشنهادی حتی در مواجهه با اهداف باریک سوزنی نیز عملکرد خوب خود را حفظ می‌کند.

۶- جمع بندی و نتیجه‌گیری

در این مقاله، آشکارساز تکرارشونده مبتنی بر کوچک‌ترین میانگین نرخ هشدار نادرست ثابت جهت آشکارسازی اهداف طویل راداری برای یک رادار مراقبت دریایی مفروض در محیط‌های کلاتری سنگین پیشنهاد گردید. به این منظور ۲۱۷، ۱۳۱۷، ۳۳۱۸ مجموعه داده تک‌هدفه طویل، چندهدفه طویل فاصله دار و چند هدفه طویل نزدیک به هم در نرم افزار MATLAB تولید گردید و به عنوان ورودی‌های آشکارسازهای میانگین سلولی، بزرگ‌ترین میانگین، کوچک‌ترین میانگین کلاسیک و آشکارساز

منابع مالی

ایمان اسماعیلی: تحلیل داده‌های اماری و بازبینی انتقادی

هیچ حمایت مالی صورت نگرفته است.

مقاله

مراجع

- [1] W. Jiang, Y. Ren, Y. Liu, and J. Leng. "Artificial neural networks and deep learning techniques applied to radar target detection: A review." *Electronics* 11, no. 1 (2022): 156-168.
- [2] V.S. Shrivathsa. "Cell Averaging-Constant False Alarm Rate Detection in Radar." *International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET)* 7, no. 2018 (2018): 2433-2438.
- [3] G.M. Hatem, T.R. Saeed, and J.W. Abdul Sadah. "Comparative study of combined CFAR algorithms for non-homogenous environment." *Procedia Computer Science* 131 (2018): 58-64.
- [4] A. Coluccia, A. Fascista, and G. Ricci. "CFAR feature plane: A novel framework for the analysis and design of radar detectors." *IEEE Transactions on Signal Processing* 68 (2020): 3903-3916.
- [5] Z. Cao, J. Li, C. Song, Z. Xu, and X. Wang. "A novel CFAR algorithm for multi-target detection with FMCW radar." *IEEE Global Communications Conference* (2020): 1-6.
- [6] K. Liu, Y. Li, P. Wang, X. Peng, H. Liao, and W. Li. "A CFAR Detection Algorithm Based on Clutter Knowledge for Cognitive Radar." *IEICE Transactions on Fundamentals of Electronics, Communications and Computer Sciences* 106, no. 3 (2023): 590-599.
- [7] V. Amanipour, and A. Olfat. "CFAR detection for multistatic radar." *Signal Processing* 91, no. 1 (2011): 28-37.
- [8] C. Kuang, C. Wang, B. Wen, Y. Hou, and Y. Lai. "An improved CA-CFAR method for ship target detection in strong clutter using UHF radar." *IEEE Signal Processing Letters* 27 (2020): 1445-1449.
- [9] L.P.J. Jiménez, F.D.A. García, M.C.L. Alvarado, G. Fraidenaich, and E.R. De Lima. "A general CA-CFAR performance analysis for weibull-distributed clutter environments." *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters* 19 (2022): 4025-4034.
- [10] Y.Z. Abdel, and A. Tiako. "Moving Target Detection Using CA, so and GO-CFAR Detectors in Nonhomogeneous Environment." *SSRN Electronic Journal*, January 1, (2023):12-17.
- [11] P.E. Pace, and L. Lamoyne Taylor. "False alarm analysis of the envelope detection GO-CFAR processor." *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems* 30, no. 3 (1994): 848-864.
- [12] G.M. Hatem, J.W. Abdul Sadah, and T.R. Saeed. "Comparative study of various cfar algorithms for non-homogenous environments." In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, no. 1 (2018): 1757-1769.
- [13] H.A. Meziani, and F. Soltani. "Performance analysis of some CFAR detectors in homogeneous and non-homogeneous Pearson-distributed clutter." *Signal Processing* 86, no. 8 (2006): 2115-2122.
- [14] K.D. Ward, C.J. Baker, and S. Watts. "Maritime surveillance radar. Part 1: Radar scattering from the ocean surface." In *IEE Proceedings F (Radar and Signal Processing)*, no. 2 (1990): 51-62.
- [15] M. Sahed, E. Kenane, A. Khalfa, and F. Djahli. "Exact Closed-Form P fa Expressions for CA-and GO-CFAR Detectors in Gamma-Distributed Radar Clutter." *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems* (2022): 4674-4679.
- [16] I. Nasso, and F. Santi. "Maritime moving target detection and localisation technique for Global Navigation Satellite Signals-based passive multistatic radar." *IET Radar, Sonar & Navigation* 18, no. 1 (2024): 93-106.
- [17] H. Wankun. "Experimental results of maritime target detection based on SVM classifier." *IEEE 3rd International Conference on Information Communication and Signal Processing* (2020): 179-182.
- [18] R. Raghu, N. Unnikrishnan, R. Rajesh, and R. Sharma. "CFAR Detection of Extended Targets for Medium Resolution Radars." *IEEE International Conference on Electronics, Computing and Communication Technologies* (2021): 1-6.
- [19] S. Jie, and X. Wei. "CFAR Detection of HRRP of Sea Targets based on K Distribution." *4th International Conference on Information Communication and Signal Processing* (2021): 352-356.

- [20] M.M. Horst, F.B. Dyer, and M.T. Tuley. "Radar sea clutter model." *Antennas and Propagation* (1978): 6-10.
- [21] L. Cohen. "The generalization of the Wiener-Khinchin theorem." In *Proceedings of the 1998 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing* (1998): 1577-1580.
- [22] K.D. Ward, S. Watts, and R.J. Tough. "Sea clutter: scattering, the K distribution and radar performance." *IET Digital Library* (2006).