

# آشکارساز CFAR در حضور لبه کلاتر با استفاده از تبدیل موجک ایستان

حمید سعیدی سورک<sup>۱</sup>، استادیار، عباس بریزی<sup>۱</sup>، دانشجوی کارشناسی ارشد، امیر زعیم باشی نصرت آبادی<sup>۲</sup>، استادیار

۱- دانشکده مهندسی برق - دانشگاه یزد - یزد - ایران - saeedi@yazd.ac.ir و a.berizi69@gmail.com

۲- دانشکده فنی و مهندسی - بخش مهندسی برق - دانشگاه شهید باهنر کرمان - کرمان - ایران - a.zaimbashi@uk.ac.ir

**چکیده:** در این مقاله یک آشکارساز با نرخ هشدار کاذب ثابت (CFAR) بر مبنای تبدیل موجک ایستان شامل بخش آشکارساز مکان لبه و پردازنده CA-CFAR در حضور لبه کلاتر ارائه شده است. آشکارساز پیشنهادی نیازی به اطلاع پیشین از محیط ندارد. این آشکارساز از تبدیل موجک برای تشخیص لبه استفاده نموده و سپس سلول‌های مرجع مناسب را برای تعیین سطح آستانه انتخاب می‌کند. اگرچه در محیط‌های همگن آشکارساز CA-CFAR یک آشکارساز بهینه است اما در محیط‌های غیر همگن دارای افت عملکرد زیادی است. عملکرد آشکارساز پیشنهادی با آشکارسازهای CA-CFAR، SO-CFAR و GO-CFAR مقایسه می‌شود. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که آشکارسازی پیشنهادی در محیط همگن عملکردی نزدیک به CA-CFAR دارد. لبه کلاتر می‌تواند قبل یا بعد سلول تحت تست باشد. اگر مکان لبه قبل از سلول تحت تست باشد عملکردی نزدیک به SO-CFAR خواهد داشت و در صورتی که مکان لبه بعد از سلول تحت تست باشد عملکرد آن نزدیک GO-CFAR است.

**واژه‌های کلیدی:** رادار، آشکارسازی، CFAR، لبه کلاتر، تبدیل موجک.

## CFAR Detector in Clutter Edge Situation Using Stationary Wavelet Transform

Hamid Saeedi-Sourck, Assistant professor<sup>1</sup>, Abbas Berizi, Student<sup>1</sup>, Amir Zaimbashi, Assistant professor<sup>2</sup>

1- Department of Electrical Engineering, Yazd University, Yazd, Iran, saeedi@yazd.ac.ir, a.berizi69@gmail.com

2- Department of Engineering, Shahid Bahonar University of Kerman, Kerman, Iran, zaimbashi@uk.ac.ir

**Abstract:** In this paper, a new wavelet-based constant false alarm rate (CFAR) detector called wavelet-CFAR (W-CFAR), composed of the clutter edge detector and the cell-averaging (CA)-CFAR processor, is proposed in the clutter edge situation. The proposed detector does not require any prior knowledge about the background environment. It uses wavelet transform for edge detection and then selects appropriate part of reference cells for thresholding. Although CA-CFAR is an optimal detector for the homogeneous environment, but its performance is degraded in the non-homogeneous environment. The performance of the proposed detector is evaluated and compared with those of the Greatest Of (GO), Smallest Of (SO), and CA-CFAR detectors. The simulation results show that the proposed detector provides low loss CFAR performance for the homogenous environment in comparison with CA-CFAR. The clutter edge may be stayed on before or after cell under test (CUT). The performance of W-CFAR approaches to SO-CFAR as long as the position of clutter edge is before CUT; otherwise its performance approaches to GO-CFAR.

**Keywords:** Radar, detection, CFAR, clutter edge, Wavelet transform.

تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۵/۰۶/۰۲

تاریخ اصلاح مقاله: ۱۳۹۵/۰۹/۰۴

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۵/۱۰/۰۶

نام نویسنده مسئول: حمید سعیدی سورک

نشانی نویسنده مسئول: ایران - یزد - بلوار دانشگاه - دانشگاه یزد - دانشکده مهندسی برق

## ۱- مقدمه

موجک، سلول‌های شامل اهداف تداخلی را حذف کرده و عملکرد CA-CFAR را بهبود دهد. در [۱۱] با استفاده از تبدیل موجک سطح توان نویز در حضور کلاتر دریا به نحو مناسب‌تری تخمین زده شده است. در [۱۲] با استفاده از تبدیل موجک، سیگنال دریافتی در چندین مرتبه تجزیه شده و به دنبال آن آشکارسازی در ضرایب تجزیه موجک انجام شده است. به‌هرحال آشکارساز CA-CFAR یکی بهترین آشکارسازها در محیط همگن است. اما یکی از مشکلاتی که این آشکارساز را رنج می‌دهد لبه کلاتر می‌باشد. از آنجا که در حضور لبه کلاتر با دو سطح توان متفاوت برای کلاتر روبرو هستیم با تشخیص محل تغییر توان می‌توان به بهبود آشکارساز CA-CFAR کمک کرد. بر پایه اطلاعات ما تاکنون روشی که سعی در آشکارسازی لبه کلاتر نموده و بر اساس آن عملکرد آشکارسازی CA-CFAR را بهبود دهد ارائه نشده است.

در این مقاله به بررسی عملکرد آشکارساز CFAR در حالتی که حضور لبه کلاتر و مکان آن نامعلوم باشد می‌پردازیم. به منظور انتخاب سلول‌های مناسب جهت انتخاب آستانه، با استفاده از تبدیل موجک ایستادن<sup>۱۲</sup> محل لبه کلاتر را تخمین می‌زنیم. برای سادگی به این آشکارساز مبتنی بر تبدیل موجک W-CFAR<sup>۱۳</sup> می‌گوییم. آشکارسازی بر روی یک تک پالس در محیط‌های همگن و غیر همگن مورد بررسی قرار می‌گیرد. نتایج نشان می‌دهد که آشکارساز ارائه شده در محیط‌های همگن همانند آشکارساز CA-CFAR که یک آشکارساز بهینه در حالت نویز گوسی است [۴]، عمل می‌کند و در محیط‌های غیر همگن نیز عملکرد خوبی دارد. به عبارت بهتر در حالتی که لبه کلاتر قبل از سلول تحت تست (CUT) باشد عملکرد آن نزدیک به SO-CFAR بوده و در صورتی که لبه کلاتر بعد از سلول تحت تست باشد عملکرد آن به GO-CFAR نزدیک است.

## ۲- آشکارسازهای CFAR

دامنه کلاتر با توزیع ویبول را با تابع چگالی احتمال [۶]

$$f(x) = \frac{C}{B} \left\{ \frac{x}{B} \right\}^{C-1} \exp \left\{ - \left( \frac{x}{B} \right)^C \right\} \quad (۱)$$

را در نظر می‌گیریم که  $B$  پارامتر مقیاس و  $C$  پارامتر شکل این توزیع می‌باشد. به منظور رسیدن به احتمال هشدار غلط ثابت  $(p_{fa})$ ، آستانه آشکارسازی بر حسب پارامترهای معلوم شکل و مقیاس به صورت [۶]

$$T = \left\{ -\ln(P_{fa}) \right\}^{\frac{1}{C}} B \quad (۲)$$

بدست می‌آید. از آنجایی که در شرایط عملی پارامترهای  $B$  و  $C$  نامعلوم بوده و باید تخمین زده شوند، رابطه (۲) به صورت [۶]

$$\hat{T} = \alpha \hat{C} \hat{B} \quad (۳)$$

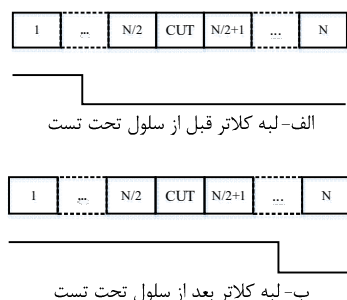
در می‌آید که  $\alpha$  تابعی از  $p_{fa}$  و تعداد سلول‌های درگیر در تخمین پارامترهای  $B$  و  $C$  و همچنین روش این تخمین می‌باشد. در بسیاری

از مباحث قدیمی در سیستم‌های رادار آشکارسازی اهداف در حضور تداخل است. کنترل نرخ هشدار غلط<sup>۱</sup> یک مسئله مهم در آشکارسازی سیگنال‌های راداری است. نرخ بالای هشدار غلط منجر به سرریز شدن پردازشگر داده‌ها می‌شود و کار آن‌ها را مختل می‌کند. همچنین در صورت متحرک بودن هدف، افزایش نرخ هشدار غلط، رادار را از دنبال کردن مسیر هدف باز می‌دارد و کاهش زیاد نرخ هشدار غلط هم منجر به کاهش احتمال آشکارسازی می‌شود. بنابراین در طراحی آشکارسازها اغلب متمایل به تثبیت نرخ هشدار غلط هستند که به این آشکارسازها، آشکارسازهای با نرخ هشدار غلط ثابت (CFAR<sup>۲</sup>) می‌گویند. تاکنون در زمینه آشکارسازهای CFAR تحقیقات وسیعی صورت گرفته است که از جمله آن‌ها می‌توان به آشکارسازهای میانگین گیر CA-CFAR<sup>۳</sup> و آشکارسازهای مبتنی بر آمارگان مرتب‌شده OS-CFAR<sup>۴</sup> اشاره کرد [۱]، [۲]. این آشکارسازها دارای مزایا و معایبی هستند. اگرچه این روش‌ها سعی در بهبود عملکرد آشکارسازها در شرایط همگن<sup>۵</sup> و ناهمگن<sup>۶</sup> دارند ولی روش‌های مذکور قادر به عملکرد قابل قبولی هم در حضور اهداف تداخلی و هم در حضور لبه کلاتر<sup>۷</sup> نیستند. برای حل این دو مشکل، آشکارسازهای جدیدی با نام‌های SO-CFAR<sup>۸</sup> و GO-CFAR<sup>۹</sup> ارائه شدند که GO-CFAR برای حل مشکل وجود لبه کلاتر و آشکارساز SO-CFAR به منظور حل اهداف تداخلی استفاده می‌شوند [۳]، [۴]. آشکارسازهای مذکور مشکلات بیان‌شده در مورد اهداف تداخلی و لبه کلاتر را تا حدودی برطرف می‌کنند ولی در محیط‌های همگن دارای عملکرد ضعیف‌تری نسبت به CA-CFAR هستند. در [۵] با تلفیق کردن آشکارسازهای GO-CFAR و SO-CFAR با آشکارساز OS-CFAR به آشکارسازی با عملکرد بهتر در محیط‌های غیرهمگن دست یافته شد که به آن‌ها OSSO-CFAR و OSGO-CFAR گفته می‌شود. همچنین یک ساختار جدید مبتنی بر آمارگان مرتب وزن دهی شده و با استفاده از قوانین منطق فازی در [۶] پیشنهاد شد که روش پیچیده آشکارساز قبل را با استفاده از منطق فازی بهبود بخشید و WOSF-CFAR نامیده شد. بعلاوه یک کلاس جدید از آشکارسازهای CAFR مبتنی بر سانسور<sup>۱۰</sup> ارائه شده است که در آن‌ها، همگن و یا غیر همگن بودن محیط را در سلول مرجع تشخیص می‌دهند [۷]، [۸]. هرچند استفاده از تبدیل موجک در رادار مورد توجه بوده است اما استفاده از این تبدیل در آشکارسازهای CAFR بسیار محدود است. در [۹-۱۲] استفاده از تبدیل موجک در آشکارسازهای CAFR مورد بررسی قرار گرفته است. در [۹] به بررسی آشکارساز CFAR با استفاده از تبدیل موجک<sup>۱۱</sup> پرداخته شده است بدین صورت که به جای پرداختن به آشکارسازی روی دامنه سیگنال بازتابی از هدف، به آشکارسازی روی دامنه ضرایب تبدیل موجک سیگنال بازتابی می‌پردازد. در این حالت هیچ اشاره‌ای به حضور اهداف تداخلی و لبه کلاتر نمی‌کند. در [۱۰] پیشنهاد شده است که می‌توان با استفاده از نویز زدایی بر پایه تبدیل

$$\hat{B}_i = \left( \frac{2}{N} \sum_{j=1}^N x_{i,j}^C \right)^{\frac{1}{C}} \quad i = L, R \quad (7)$$

است.

به طور کلی دو حالت قبل و بعد از سلول تحت تست برای مکان لبه کلاتر در نظر گرفته می‌شود (شکل ۲). بهتر است با توجه به اینکه آمارگان سلول تحت تست در این دو سناریو تابع اکثریت سلول‌های مرجع است، پردازنده CFAR نیز سعی کند با استفاده از مکان لبه و سلول‌های مرجع اکثریت تخمین دقیقی از پارامتر (های) کلاتر بزند. در آشکارساز پیشنهادی W-CFAR بر خلاف GO و SO که مستقل از مکان لبه کلاتر عمل می‌کنند، با تشخیص موقعیت لبه کلاتر از سلول‌های مناسب‌تری برای تخمین پارامترهای نامعلوم کلاتر استفاده می‌شود که در ادامه به جزئیات بیشتر آن پرداخته می‌شود.



شکل ۲: موقعیت لبه در سلول‌های مرجع

### ۳- آشکارساز W-CFAR

در این بخش عملکرد کلی CFAR با استفاده از تکنیک مکان‌یابی لبه کلاتر توسط تبدیل موجک ایستادن بررسی می‌شود. در شکل ۳ ساختار کلی پردازنده W-CFAR نشان داده شده است. اساس کار این پردازنده نیز مانند CA-CFAR است. همان‌گونه که در این شکل نشان داده شده است سلول‌های مرجع ابتدا به واحدی به نام آشکارساز لبه داده می‌شوند تا مکان تغییر توان کلاتر (لبه کلاتر) مشخص گردد. سپس این مکان به همراه سلول‌های مرجع به پردازنده W-CFAR داده می‌شود. این پردازنده با استفاده از مکان لبه، سلول‌های مناسب را برای تخمین پارامترهای کلاتر تعیین می‌کند و از روی آن‌ها پارامتر کلاتر تخمین زده می‌شود. در ادامه پس از بیان کلی تبدیل موجک ایستادن و آشکارسازی لبه، به بررسی عملکرد W-CFAR می‌پردازیم.

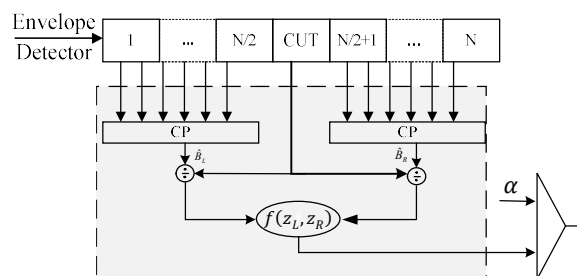
#### ۳-۱- تبدیل موجک

تبدیل موجک یک تبدیل زمان-مقیاس (یا زمان-فرکانس) است. هدف از تبدیل موجک انتقال سیگنال از فضای زمان به فضای مشترک

از موارد پارامتر شکل به کندی با زمان تغییر می‌کند. در این موارد پارامتر شکل از مشخصات محیطی و یا از روی تعداد زیادی از نمونه‌ها تخمین زده می‌شود [۶]. از آنجا که تخمین پارامتر شکل در روش‌های مذکور با خطای زیادی همراه است پارامتر شکل  $C$  به عنوان یک پارامتر معلوم فرض می‌شود. بنابراین می‌توان آزمون آشکارسازی با خاصیت CFAR را برای سلول تحت تست به صورت [۶]

$$CUT > \alpha^{\frac{1}{C}} \hat{B} \quad (4)$$

بیان کرد که  $H_0$  و  $H_1$  به ترتیب معرف فرضیه‌های حضور و عدم حضور سیگنال هستند. شکل ۱ ساختار کلی آشکارسازهای CFAR مورد بررسی در این مقاله را نشان می‌دهد. همان‌گونه که ملاحظه می‌شود به منظور آشکارسازی در سلول تحت تست از  $N$  نمونه سیگنال دامنه دریافتی از آشکارساز دامنه در اطراف سلول تحت تست (سلول‌های مرجع) استفاده می‌گردد.



شکل ۱: ساختار کلی آشکارسازهای CFAR [۱]

وظیفه بلوک  $CP^{[4]}$  تخمین پارامترهای نامعلوم در توزیع کلاتر با استفاده از سلول‌های سمت چپ و راست سلول تحت تست می‌باشد. مسئله مورد بررسی و در واقع آنچه که باعث ایجاد آشکارسازهای CFAR متفاوتی می‌شود، انتخاب بلوک CP و ترکیب اطلاعات خروجی این بلوک‌ها ( $f$ ) می‌باشد. برای مثال با انتخاب پردازنده میانگین گیر در بلوک CP و استفاده از توابع ماکزیمم، مینیمم و جمع در بلوک  $f(z_L, z_R)$  به آشکارسازهای GO, SO و CA می‌رسیم. آزمون آشکارسازی در این آشکارسازها به صورت:

$$f(z_L, z_R) \geq \alpha \quad \text{where} \quad f(z_L, z_R) = \begin{cases} \max(z_L, z_R) & SO \\ \min(z_L, z_R) & GO \\ \text{ave}(z_L, z_R) & CA \end{cases} \quad (5)$$

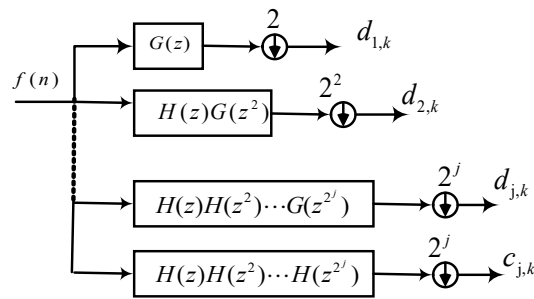
بیان می‌شود. همچنین برای  $z_L, z_R$  داریم:

$$z_L = \frac{CUT}{\hat{B}_L} \quad (6)$$

$$z_R = \frac{CUT}{\hat{B}_R}$$

شایان ذکر است که در آشکارسازهای GO و SO، تخمین پارامتر مقیاس به صورت [۹]:

موجک گسسته<sup>۱۹</sup> سیگنال گسسته زمان با استفاده از دو فیلتر متعامد تریبیعی بالا گذر  $G(z)$  و پایین گذر  $H(z)$  امکان پذیر است [۱۴]. در این تئوری نمونه های گسسته زمان سیگنال  $f(n)$  در یک فضای برداری قرار دارند و با هر بار تجزیه توسط فیلترهای  $G$  و  $H$ ، سیگنال گسسته زمان به دو بخش ضرایب جزئیات<sup>۲۰</sup> (ضرایب موجک) و ضرایب تقریب<sup>۲۱</sup> که البته در زیرفضاهای متعامد قرار دارند تجزیه می شود. ذکر این نکته نیز مهم است که تعداد نمونه های ضرایب تقریب و موجک نصف ضرایب سیگنال  $f(n)$  می باشد. در ادامه تجزیه نیز ضرایب تقریب مجدداً به دو بخش تقسیم می شوند. بدیهی است که افزایش تعداد سطوح تجزیه باعث کاهش مجدد تعداد ضرایب در سطوح پایین می شود. به سادگی و با استفاده از قواعد پردازش چند نرخی (MRSP<sup>۲۲</sup>) می توان نشان داد که اگر تمامی عملیات کاهش نرخ نمونه در یک مکان انجام شود ساختاری مشابه شکل ۴ بدست خواهد آمد که در آن ضرایب تجزیه موجک و تقریب به ترتیب  $d_{j,k}$  و  $c_{j,k}$  هستند. با توجه به این شکل واضح است که تعداد نمونه های ضرایب سیگنال در هر مرتبه تجزیه نصف می شوند. همچنین تعداد سطوح تجزیه مطابق با الگوریتم پردازش سیگنال انتخاب می شود.



شکل ۴: پیاده سازی تبدیل موجک گسسته با استفاده از ساختار بانک فیلتر [۱۴]

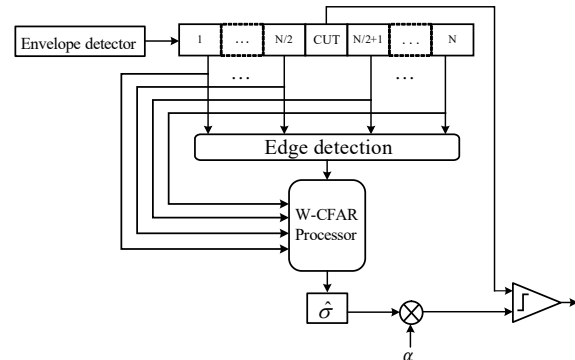
### ۲-۳- تبدیل موجک با تعامد طرفینی

در بخش ۱-۳ اشاره شد که فیلترهای  $G(z)$  و  $H(z)$  متعامد هستند. همان گونه که می دانیم یکی از خواص مهمی که می توان برای فیلتر در نظر گرفت فاز خطی است. از آنجا که نمی توان همزمان فیلترهای متعامد متقارن (با فاز خطی) داشت از تعامد صرف نظر کرده و صرفاً تقارن را در نظر می گیریم که این فرض منجر به ظهور تبدیل موجک با تعامد طرفینی<sup>۲۳</sup> خواهد شد [۱۴]. هرچند از جنبه پیاده سازی این نوع تبدیل موجک بازم با دو فیلتر روبرو هستیم ولی در این حالت فیلترهای مذکور دیگر متعامد نیستند. ذکر این نکته نیز مهم است که فضاهایی که ضرایب تقریب و جزئیات در آن قرار دارند نیز متعامد نمی باشند.

### ۳-۳- تبدیل موجک ایستادن

همان گونه که در ساختار بانک فیلتری تبدیل موجک گسسته ملاحظه شد تعداد ضرایب تجزیه در هر مرتبه نسبت به مرتبه قبلی نصف

زمان-فرکانس می باشد. ویژگی های زمان-فرکانس تبدیل موجک آن را ابزار قدرتمندی برای بررسی مسائل پردازش سیگنال ساخته است که روش های سنتی ممکن است در آن ها ضعیف عمل کنند. از جمله آن ها می توان به فشرده سازی داده، حذف نویز و تشخیص لبه سیگنال اشاره کرد [۱۴]. شایان ذکر است اخذ تبدیل موجک از لبه باعث ایجاد ماکزیمم های محلی در تبدیل می شود و لذا تعیین مکان لبه را امکان پذیر می کند. البته برای تعیین محل دقیق لبه الگوریتم مناسبی ارائه شده است [۱۵] و [۱۶] که در بخش ۳-۴ به آن اشاره می شود.



شکل ۳: ساختار پردازنده CFAR با استفاده از تبدیل موجک

تبدیل موجک پیوسته (CWT<sup>۱۵</sup>) برای تابع  $f(t)$  توسط رابطه [۱۴]

$$W_f(a, b) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) \Psi_{a,b}^*(t) dt \quad (۸)$$

تعریف می شود که علامت \* مزدوج مختلط را نشان می دهد و  $\Psi_{a,b}^*(t)$  یک تابع پنجره است که از بسط پایه موجک مادر  $\Psi(t)$  به صورت

$$\Psi_{a,b}(t) = \frac{1}{a} \Psi\left(\frac{t-b}{a}\right) \quad (۹)$$

تولید می شود و در آن  $a$  پارامتر مقیاس<sup>۱۶</sup> و  $b$  پارامتر انتقال<sup>۱۷</sup> است. بنابراین با جایگذاری (۹) در (۸) تبدیل موجک پیوسته سیگنال  $f(t)$  به صورت

$$W_f(a, b) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) \frac{1}{a} \Psi^*\left(\frac{t-b}{a}\right) dt \quad (۱۰)$$

بدست می آید. با توجه به پیوستگی پارامترهای مقیاس  $a$  و انتقال  $b$  افزونگی زیادی در تبدیل ایجاد می شود. از روش های معروف در گسسته کردن پارامترهای مقیاس و انتقال، که به تجزیه دودویی معروف است، به صورت:

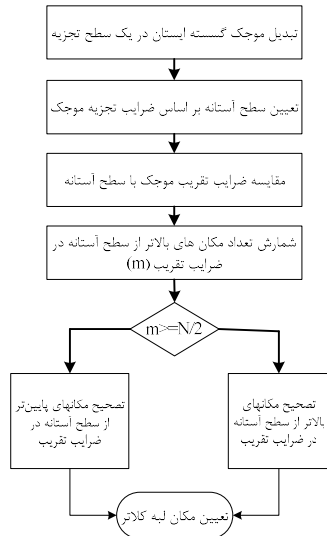
$$a = 2^{-j}, b = k \cdot 2^{-j} \quad k, j \in \mathbb{Z} \quad (۱۱)$$

است. با جایگذاری (۱۱) در (۱۰) داریم:

$$d_{j,k} = \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) 2^{\frac{j}{2}} \Psi^*(2^j t - k) dt \quad (۱۲)$$

که  $d_{j,k}$  ضرایب تبدیل موجک گسسته سیگنال پیوسته  $f(t)$  می باشند. دقت شود که در رابطه مذکور پارامترهای  $a$  و  $b$  گسسته شده اند، اما پارامتر زمان یعنی  $t$  همچنان پیوسته است. طبق تئوری تجزیه و تحلیل با دقت چندگانه (MRA<sup>۱۸</sup>) ثابت می شود که تبدیل

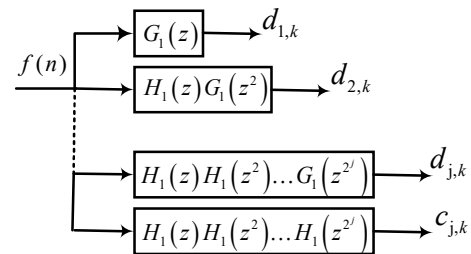
که  $W_2 f(n)$  تبدیل موجک گسسته سیگنال  $f(n)$  بوده و پارامتر  $J$  نیز حداکثر  $\log_2 N$  خواهد بود. شایان ذکر است که در این حالت بعد از انجام عمل فیلتر روی سیگنال  $f(n)$  کاهش نرخ نمونه‌ای نخواهیم داشت. با توجه به شبیه‌سازی که در ادامه آن‌ها را خواهید دید عملکرد مناسبی از الگوریتم فوق در این کاربرد مشاهده نشد. طبق مطالعات صورت گرفته در موارد دیگری نیز مانند [۱۸] عملکرد آشکارساز لبه MH در [۱۵] و [۱۶] مناسب نیست. بنابراین تصمیم گرفتیم تا روش دیگری را برای تعیین لبه با استفاده از تبدیل موجک ایستادگی ارائه کنیم.



شکل ۶: الگوریتم تشخیص لبه کلانتر

الگوریتم تشخیص لبه در شکل ۶ به تصویر کشیده شده است. همان‌طور که در شکل ۶ نمایش داده شده است سیگنال مطلوب در یک سطح تجزیه شده و بعد از تعیین سطح آستانه توسط ضرایب تجزیه موجک، ضرایب تقریب با سطح آستانه مقایسه می‌شوند. ابتدا تعداد ضرایب بالاتر از سطح آستانه تعیین می‌شود. حال با توجه به تعداد ضرایب تقریب غیر صفر، دو نوع تصمیم‌گیری صورت می‌گیرد. اگر تعداد نمونه‌های بالای سطح آستانه بیشتر یا برابر با نصف نمونه‌های تعداد سلول‌های مرجع (یعنی ۱۶) بود حالت مطابق شکل ۲-ب اتفاق افتاده است و در غیر این صورت حالت مطابق شکل ۲-الف رخ داده است. در صورت رخداد شکل ۲-ب نمونه‌های بالای سطح آستانه به یک و نمونه‌های زیر سطح آستانه به صفر تبدیل می‌شود. در صورت رخداد شکل ۲-الف نمونه‌های زیر سطح آستانه به یک و نمونه‌های بالای سطح آستانه به صفر تبدیل می‌شود. برای تصحیح مکان‌های غیر صفر در الگوریتم بر این نکته تأکید می‌کنیم که اگر بین دو نمونه غیر صفر یک نمونه صفر وجود داشت نمونه صفر را بر اساس درون‌یابی به نمونه غیر صفر تبدیل می‌کنیم. حال می‌توان مکان لبه کلانتر را به سادگی تعیین کرد. عملکرد این الگوریتم در بخش شبیه‌سازی بررسی شده است.

می‌شوند. این خاصیت علاوه بر کاهش نرخ نمونه‌ها و افزایش سرعت پردازش پردازنده‌ها، در مواردی مانند تشخیص لبه خیلی مناسب نیست. دلیل این مسئله آن است که با اخذ تبدیل موجک گسسته طبق تئوری MRA تعداد نمونه‌ها در ضرایب کاهش می‌یابد و مکان ماکزیمم محلی به دلیل حضور لبه‌ها جابجا می‌شود [۱۵]. بنابراین تبدیلی به نام تبدیل موجک ایستادگی معرفی می‌شود که تعداد ضرایب در مراتب مختلف ثابت و برابر تعداد نمونه‌های سیگنال اصلی است [۱۷]. اگر از نقطه نظر ساختار بانک فیلتر به این تبدیل نگاه شود ساختاری مشابه تبدیل موجک گسسته به دست می‌آید (شکل ۵) با این تفاوت که عملیات کاهش نرخ نمونه در این شکل وجود ندارد. همچنین فیلترهای  $H_1$  و  $G_1$  در این ساختار از اضافه کردن صفر بین ضرایب فیلترهای  $H$  و  $G$  حاصل شده است.



شکل ۵: پیاده‌سازی تبدیل موجک گسسته ایستادگی با استفاده از ساختار بانک فیلتر [۱۴]

### ۴-۳- آشکارسازی لبه کلانتر با تبدیل موجک

لبه کلانتر در این مقاله به صورت تغییر توان در پنجره مرجع در نظر گرفته شده است. مطابق شکل ۲ فرض می‌شود نمونه‌های کلانتری که قبل از لبه هستند دارای توان  $P_1$  بوده و نمونه‌هایی که بعد از لبه کلانتر قرار دارند توانی برابر  $P_2$  دارند به نحوی که  $P_1 > P_2$  است.

همان‌گونه که می‌دانیم یکی از کاربردهای تبدیل موجک تشخیص نقاط ویژه (مثلاً لبه) در شکل موج می‌باشد. یکی از خصوصیات جالب تبدیل موجک این است که ضرایب آن مقادیر بزرگی را در محل لبه‌ها ایجاد می‌کنند [۱۴]. بنابراین می‌توان موقعیت لبه‌ها را بر اساس ماکزیمم محلی تشخیص داد. در [۱۵] و [۱۶] یکی از مهم‌ترین و اولین روش‌ها برای تشخیص لبه ارائه شده است که در این مقاله به اختصار به آن الگوریتم  $MH^{**}$  گوئیم که از حروف ابتدای نام مؤلفین مرجع [۱۵] برداشته شده است. اساس این روش بر این مبنا استوار است که با ضرب ضرایب تجزیه موجک در چندین سطح و سپس آستانه‌گذاری روی دامنه حاصل ضرب می‌توان لبه را تشخیص داد. به عبارت بهتر برای سیگنال زمان گسسته  $f(n)$  می‌توان نوشت [۱۶]:

$$F(n) = \prod_{j=1}^J W_2 f(n) \quad (۱۳)$$

## ۴- عملیات CFAR با مکان‌یابی لبه کلاتر توسط تبدیل

## موجک ایستان

شیوه کلی ساختار CFAR به این صورت است که برای هر سلول، سطح آستانه از روی نمونه‌های کناری به طور مجزا تعیین خواهد شد. مطابق شکل ۱، پس از تحلیل نمونه‌ها در یک پردازنده CFAR (که تخمین یک پارامتر است) نتیجه حاصل در پارامتری مانند  $\alpha$  ضرب می‌شود. ذکر این نکته ضروری است که برای استفاده از ساختار CFAR ابتدا از یک آشکارساز ساده مانند دامنه استفاده نموده و سپس نرخ آثر غلط را با یک روش CFAR مناسب ثابت نگه می‌دارند. از آنجا که با پارامتر شکل  $C = 2$  توزیع ویبول به توزیع رابلی منجر می‌شود هر یک از نمونه سلول‌های مرجع یک متغیر تصادفی یکسان با توزیع رابلی و مستقل از هم با تابع چگالی به صورت [۲]:

$$f_X(x) = \frac{2x}{\sigma} \exp\left(-\frac{x^2}{\sigma}\right) \quad (14)$$

است که در رابطه فوق  $\sigma$  توان نویز است. می‌توان با پردازش سلول‌های مرجع اطراف سلول تحت تست توان نویز را به صورت [۱۳]

$$\hat{\sigma} = \left[ \sum_{i=1}^N x_i^2 \right]^{0.5} \quad (15)$$

تخمین زد. بنابراین می‌توان آزمون آشکارسازی با خاصیت CFAR را برای سلول تحت تست CUT به صورت

$$CUT_{H_0}^{H_1} \left[ \alpha \sum_{i=1}^N x_i^2 \right]^{0.5} \quad (16)$$

بیان نمود که در رابطه فوق  $\alpha$  به ازای هر احتمال هشدار غلط از رابطه

$$\alpha = \sqrt{\left( p_{fa}^{\frac{1}{N}} - 1 \right)} \quad (17)$$

بدست می‌آید. مطابق شکل ۳ در آشکارساز W-CFAR از  $N$  سلول مرجع اطراف سلول تحت تست ابتدا مکان لبه کلاتر استخراج می‌شود. با توجه به موقعیت لبه کلاتر ( $r$ ) دو حالت اتفاق می‌افتد:

الف) زمانی که لبه کلاتر مشابه شکل ۲-الف باشد یعنی  $r \leq \frac{N}{2}$  است. طبیعی است که آمارگان سلول تحت تست تابع قسمت اکثریت است که دارای توان پایین هستند در این صورت پردازشگر W-CFAR از روی مکان لبه تقریبی، سلول‌های با توان کم را تعیین کرده و با میانگین‌گیری از توان آن‌ها پارامتر کلاتر را به صورت رابطه زیر تقریب می‌زند:

$$\hat{\sigma} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N w_i x_i^2 \quad (18)$$

که در آن:

$$w_i = \begin{cases} 1 & i > r \\ 0 & else \end{cases} \quad (19)$$

است.

ب) زمانی که لبه کلاتر مشابه شکل ۲-ب اتفاق بیفتد یعنی  $r > \frac{N}{2}$  است، در این صورت سلول تحت تست تابع نمونه‌های با توان بالاست.

در این صورت پردازشگر W-CFAR از روی سلول‌های با توان بالاتر و با میانگین‌گیری از توان آن‌ها پارامتر کلاتر را تقریب می‌زند که در این حالت:

$$w_i = \begin{cases} 0 & i > r \\ 1 & else \end{cases} \quad (20)$$

بنابراین در آشکارساز ارائه شده می‌توان آزمون آشکارسازی با خاصیت CFAR را برای سلول تحت تست CUT به صورت زیر بیان نمود:

$$CUT_{H_0}^{H_1} \left[ \alpha_{N,r} \sum_{i=1}^N (w_i x_i)^2 \right]^{0.5} \quad (21)$$

که در آن  $\alpha_{N,r}$  برای حالت ۲-الف به صورت:

$$\alpha_{N,r} = \sqrt{\left( p_{fa}^{\frac{1}{N-r}} - 1 \right)} \quad (22)$$

و برای حالت ۲-ب به صورت:

$$\alpha_{N,r} = \sqrt{\left( p_{fa}^{\frac{1}{r-1}} - 1 \right)} \quad (23)$$

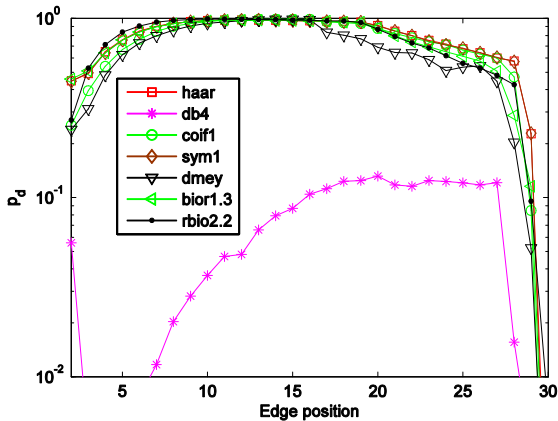
بدست می‌آید.

## ۵- نتایج شبیه‌سازی

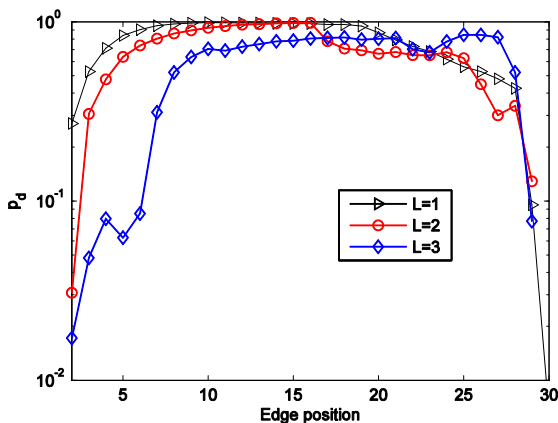
در این بخش عملکرد CFAR با استفاده از تکنیک مکان‌یابی لبه کلاتر توسط تبدیل موجک ایستان بررسی می‌شود و نتایج آن با الگوریتم‌های دیگر مانند SO-CFAR، GO-CFAR، CA-CFAR مقایسه می‌گردد. برای مقایسه این الگوریتم‌ها با استفاده از روش شبیه‌سازی مونت‌کارلو و رسم منحنی‌های احتمال آشکارسازی ( $p_d$ ) بر حسب توان سیگنال به کلاتر (SCR) به ازای احتمال آثر غلط ثابت  $P_{fa} = 10^{-4}$  و منحنی احتمال آثر غلط بر حسب مکان لبه کلاتر در  $P_{fa} = 10^{-3}$  به ازای ۱۰۰۰۰ تکرار بررسی خواهد شد. برای شبیه‌سازی از توزیع کلاتر رابلی استفاده می‌شود. دلیل این فرض، در نظر گرفتن آشکارساز خطی (آشکارساز دامنه) برای نمونه‌های ورودی می‌باشد. همچنین تعداد سلول‌های مرجع برابر ۳۲ فرض می‌شود. همچنین توان سیگنال به نویز (SNR) برابر ۲۰ دسی‌بل و توان کلاتر به کلاتر (CCR) در دو طرف مرز نیز برابر ۲۰ دسی‌بل است.

قبل از اینکه به بررسی عملکرد W-CFAR پرداخته شود لازم است عملکرد آشکارساز لبه کلاتر از جنبه‌های مختلف مورد ارزیابی قرار گیرد. ابتدا برای انجام تبدیل موجک لازم است موجک مناسب انتخاب شود. برای ارزیابی، از منحنی احتمال آشکارسازی لبه بر حسب مکان لبه کلاتر استفاده می‌شود. محاسبه احتمال آشکارسازی بدین‌صورت انجام می‌شود که اگر به عنوان مثال لبه کلاتر در مکان  $r_0$  باشد آنگاه در صورتی که آشکارساز مکان لبه کلاتر را  $r_0 - 1$  یا  $r_0 + 1$  نیز تخمین بزند به عنوان مکان صحیح قلمداد می‌شود. دلیل این امر آن است که اختلاف یک نمونه در مکان لبه تاثیر چندانی در عملکرد الگوریتم W-CFAR ندارد. ثانیاً به گونه‌ای الگوریتم کار می‌کند که برای  $r_0 < \frac{N}{2}$  مطابق شکل ۲-الف از نمونه‌های  $r_0 + 1$  تا  $N$  برای

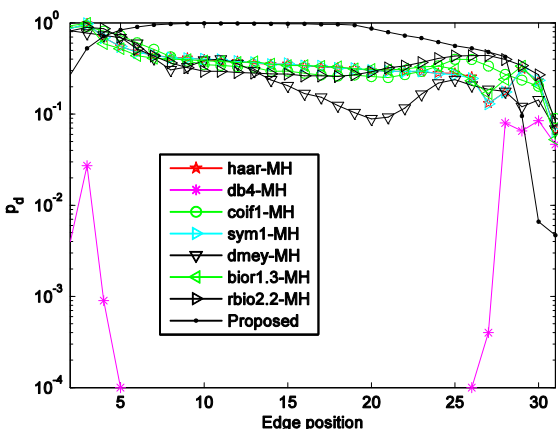
آشکارساز ارائه شده نیز در برخی موارد بهتر از SO-CFAR بوده و از سایر آشکارسازها نیز بهتر است.



شکل ۷: احتمال آشکارسازی بر حسب مکان‌های لبه کلاتر برای موجک‌های مختلف



شکل ۸: احتمال آشکارسازی بر حسب مکان‌های لبه کلاتر برای سطوح تجزیه مختلف برای موجک با تعامد طرفینی



شکل ۹: احتمال آشکارسازی بر حسب مکان‌های لبه کلاتر برای دو روش مختلف تخمین مکان لبه

تخمین توان نویز استفاده کند و اگر  $r_0 > \frac{N}{2}$  باشد شکل ۲-ب از نمونه ۱ تا  $r_0 - 1$  برای تخمین توان نویز استفاده شود. شکل ۷ احتمال آشکارسازی لبه را بر حسب مکان لبه به ازای موجک‌های مختلف نشان می‌دهد. همان‌گونه که از شکل ملاحظه می‌شود عملکرد تعدادی از موجک‌ها از جمله موجک‌های با تعامد طرفینی مناسب است. لذا در ادامه موجک با تعامد طرفینی bior2.2 برای تشخیص لبه استفاده می‌شود.

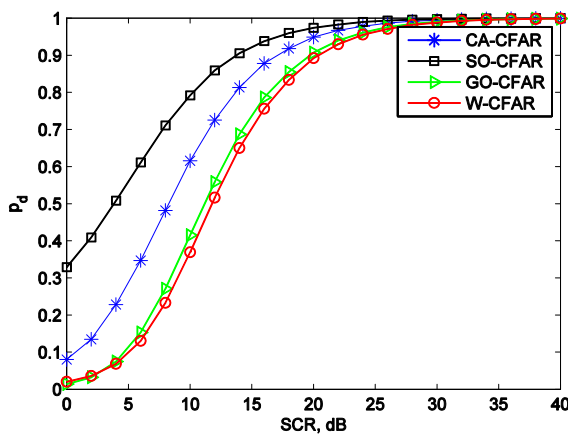
از دیگر مسائلی که در متن به آن اشاره شد تعداد سطوح تجزیه موجک بود. شکل ۸ عملکرد آشکارساز را به ازای تعداد سطوح مختلف تجزیه موجک برای احتمال آشکارسازی لبه را بر حسب مکان لبه نشان می‌دهد. در این شکل نیز کاملاً واضح است که بهترین عملکرد برای حالتی است که یک سطح تجزیه (که اتفاقاً حجم محاسباتی کمتری دارد) انتخاب شود.

در ادامه عملکرد الگوریتم پیشنهادی را با الگوریتم موجود در MH [۱۵] و [۱۶] مقایسه می‌کنیم. همان‌طور که در شکل ۹ ملاحظه می‌شود الگوریتم پیشنهادی به جز در مکان‌های ابتدا و انتها سلول‌های مرجع عملکرد مطلوب‌تری نسبت به عملکرد الگوریتم موجود در MH دارد. البته الگوریتم MH در مواردی که یک پالس با نویز جمع شود به طرز بسیار مناسبی مکان لبه را تشخیص می‌دهد. ولی همان‌طور که قبلاً نیز اشاره شد از آنجا که نمونه‌ها تصادفی است و لبه کلاتر تنها اختلاف سطح توان را نشان می‌دهد و همچنین تعداد نمونه‌ها بسیار کم است این الگوریتم عملکرد مطلوبی ندارد. در ادامه عملکرد آشکارساز پیشنهادی را بررسی می‌کنیم.

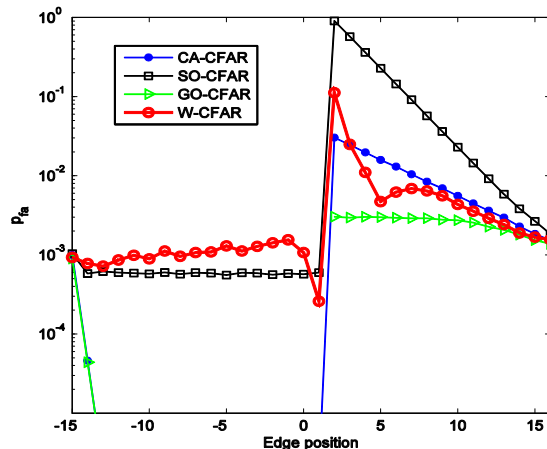
از آنجایی که وقتی بنا به شرایطی الگوریتمی تعمیم داده می‌شود نباید خاصیت اصلی خود را در غیاب آن شرایط از دست بدهد و CA-CFAR بهترین کارایی را در شرایط همگن داراست عملکرد W-CFAR نیز باید در این شرایط بررسی شود تا میزان افت آن مشخص گردد. برای این بررسی عملکرد W-CFAR با سلول‌های مرجع همگن بررسی می‌شود. شکل ۱۰ احتمال آشکارسازی را بر حسب توان سیگنال به کلاتر نشان می‌دهد. همان‌گونه که از شکل ۱۰ نیز مشاهده می‌شود در محیط همگن بهترین کارایی متعلق به CA-CFAR بوده و عملکرد آشکارساز پیشنهادی W-CFAR فاصله کمی با آن دارد. بنابراین این شبیه‌سازی نشان می‌دهد که کارایی W-CFAR در عدم حضور لبه کلاتر افت چندانی ندارد. در ادامه عملکرد W-CFAR در محیط غیر همگن و در حضور لبه کلاتر بررسی می‌گردد.

شکل ۱۱ احتمال آشکارسازی بر حسب توان کلاتر به نویز برای آشکارسازهای برای حالت ۲-الف وقتی که لبه کلاتر در  $r_0 = 5$  است رسم شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود از آنجا که سلول تحت تست در بخش کلاتر با توان کم قرار دارد و سطح آستانه ایجادشده توسط SO-CFAR از بقیه آشکارسازها پایین‌تر است لذا بهترین احتمال آشکارسازی نیز برای این آشکارساز است. از طرفی عملکرد

می‌شود مادامی‌که لبه کلاتر مفروض قبل از سلول تحت تست باشد مقدار آثر غلط به ازای W-CFAR و SO-CFAR تقریباً ثابت است در حالی که برای آشکارسازهای GO-CFAR و CA-CFAR این پارامتر به شدت افت می‌کند. با عبور لبه کلاتر از سلول تحت تست مشاهده می‌شود که آشکارساز GO-CFAR و CA-CFAR پایداری بهتری نسبت به آشکارساز SO-CFAR دارند. در این حالت آثر غلط برای W-CFAR نیز مطلوب بوده (نزدیک به GO-CFAR) و پرش چندانی ندارد. بنابراین مثلاً در شکل ۱۱ که آشکارساز پیشنهادی W-CFAR و همچنین SO-CFAR عملکرد مناسبی دارند دارای آثر غلط ثابتی هستند اما در شکل ۱۲ که آشکارسازهای موجود شامل CA-CFAR و SO-CFAR دارای احتمال آشکارسازی خوبی هستند تقریب ضعیف‌تری از آمارگان کلاتر زده می‌شود و لذا در این حالت مقدار احتمال هشدار غلط بیشتر از حالتی که برای آشکارساز طراحی شده است افزایش یابد که این به معنی از بین رفتن خاصیت CFAR برای آشکارسازهای مذکور می‌شود. لذا عملکرد آشکارساز ارائه‌شده تنها با آشکارساز GO-CFAR مقایسه می‌شود که با توجه به نتایج شبیه‌سازی عملکردی تقریباً مشابه با این آشکارساز دارد.

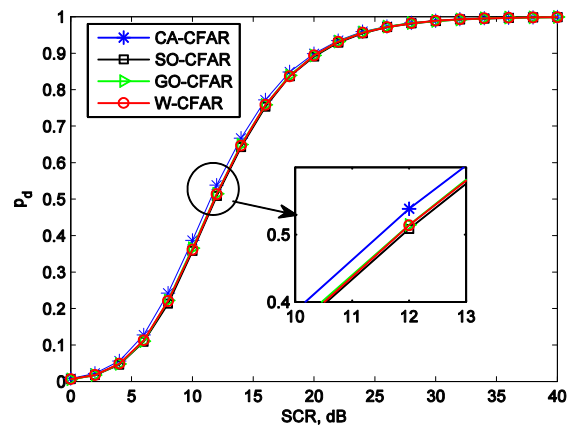


شکل ۱۲: احتمال آشکارسازی بر حسب SCR در حضور لبه کلاتر ( $r = 20$ )

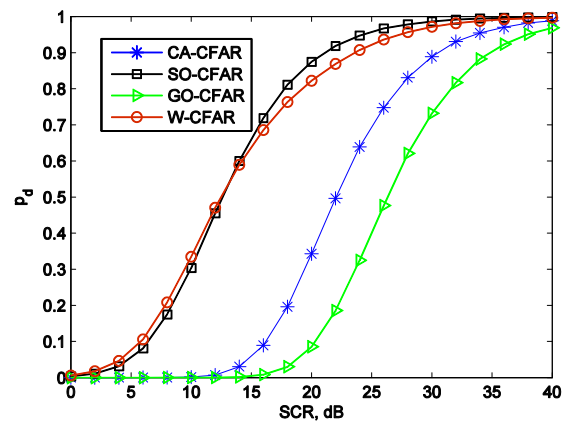


شکل ۱۳: احتمال آثر غلط بر حسب مکان لبه کلاتر برای آشکارسازهای مختلف

در شکل ۱۲ عملکرد آشکارسازهای ذکرشده را وقتی که لبه کلاتر بعد از سلول تحت تست در  $r_0 = 20$  قرار دارد، حالت ۲-ب، بررسی می‌شود. در این وضعیت نیز آشکارساز SO-CFAR به دلیل اینکه دارای سطح آستانه پایین‌تری نسبت بقیه است احتمال آشکارسازی بهتری دارد. آشکارساز پیشنهادی نیز دارای احتمال آشکارسازی نزدیک به GO-CFAR است. شایان ذکر است که برای بررسی عملکرد W-CFAR علاوه بر احتمال آشکارسازی، احتمال آثر غلط نیز باید مورد بررسی قرار گیرد که در ادامه بیان می‌شود.



شکل ۱۴: احتمال آشکارسازی بر حسب توان سیگنال به کلاتر در محیط همگن برای آشکارسازهای مختلف



شکل ۱۵: احتمال آشکارسازی بر حسب SCR در حضور لبه کلاتر ( $r = 5$ )

تاکنون عملکرد پردازشگرهای CFAR را به صورت احتمال آشکارسازی بررسی نمودیم. از آنجا که هدف ساختار CFAR تثبیت نرخ آثر غلط می‌باشد، الگوریتم‌های مذکور باید از این جهت نیز با یکدیگر مقایسه شوند. شکل ۱۳ منحنی احتمال آثر غلط را به ازای مکان‌های مختلف لبه کلاتر  $r$  نشان می‌دهد.  $r$  های منفی مبین لبه کلاتر قبل از سلول تست و مثبت‌ها بیان‌کننده قرار گرفتن سلول تحت تست در سلول‌های مرجع با توان بالا می‌باشند. آثر غلط به ازای  $P_{fa} = 10^{-3}$  تنظیم شده است. همان‌گونه که از این شکل ملاحظه

## ۶- نتیجه گیری

در این مقاله یک آشکارساز جدید به نام W-CFAR برای بهبود عملکرد CFAR در حضور لبه کلاتر معرفی شد. این آشکارساز با استفاده از تبدیل موجک ایستادن موقعیت مکان لبه کلاتر را تشخیص می دهد. با توجه به منحنی های احتمال آشکارسازی در محیط همگن و غیر همگن و همچنین منحنی احتمال آژیر غلط به ازای موقعیت های مختلف کلاتر می توان نتیجه گرفت که آشکارساز پیشنهادی بر پایه تبدیل موجک W-CFAR مادامی که لبه کلاتر قبل از سلول تحت تست باشد، خواصی مشابه SO-CFAR و مادامی که لبه کلاتر بعد از سلول تحت تست باشد خواصی مشابه GO-CFAR دارد که مفید بودن این روش را تأیید می کند. لازم به ذکر است که SO-CFAR و GO-CFAR هر کدام در یکی از این دو ناحیه مذکور عملکرد خوبی دارند.

## مراجع

- [1] H. Rohling, "Radar CFAR thresholding in clutter and multiple target situations," *IEEE transactions on aerospace and electronic systems*, pp. 608-621, 1983.
- [2] H. Finn and R. Johnson, "Adaptive detection mode with threshold control as a function of spatially sampled clutter- level estimates (Adaptive detection mode for surveillance radar, using detection threshold proportional to spatially sampled clutter level estimates for regulation of false alarm probability)," *RCA review*, vol. 29, pp. 414-464, 1968.
- [3] M. Weiss, "Analysis of some modified cell-averaging CFAR processors in multiple-target situations," *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, pp. 102-114, 1982.
- [4] P. P. Gandhi and S. A. Kassam, "Analysis of CFAR processors in homogeneous background," *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, vol. 24, pp. 427-445, 1988.
- [5] A. R. Elias-Fuste, M. G. G. de Mercado, and E. de Los Reyes Davo, "Analysis of some modified ordered statistic CFAR: OSGO and OSSO CFAR," *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, vol. 26, pp. 197-202, 1990.
- [6] A. Zaimbashi, M. R. Taban, M. M. Nayeibi, and Y. Norouzi, "Weighted order statistic and fuzzy rules CFAR detector for Weibull clutter," *Signal processing*, vol. 88, pp. 558-570, 2008.
- [7] S. D. Himonas and M. Barkat, "Automatic censored CFAR detection for nonhomogeneous environments," *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic systems*, vol. 28, pp. 286-304, 1992.
- [8] A. Farrouki and M. Barkat, "Automatic censoring CFAR detector based on ordered data variability for nonhomogeneous environments," *IEE Proceedings-Radar, Sonar and Navigation*, vol. 152, pp. 43-51, 2005.
- [9] T. Jian, G. Liao, Y. He and J. Shen, "A CFAR detector based on orthogonal wavelet transform," *2014 12th International Conference on Signal Processing (ICSP)*, Hangzhou, 2014, pp. 1963-1967.
- [10] S. M. Alamdari, M. Modarres-Hashemi, "An improved CFAR detector using wavelet shrinkage in multiple target environments," in *IEEE 9th International Symposium on Signal Processing and Its Applications*, 2007.
- [11] Y. Dong, "A wavelet smoothing CFAR processor," in *IEEE International Conference on Radar*, 2008.
- [12] L. Xiaoming, S. Jidong, L. Renjie, W. Xin, "The Radar Clutter Processor with wavelet floating threshold", in *IEEE international conf. on Radar proceedings*, 2001.

## زیر نویس ها

- <sup>1</sup> False alarm
- <sup>2</sup> Constant false alarm rate
- <sup>3</sup> Cell averaging CFAR
- <sup>4</sup> Ordered statistic CFAR
- <sup>5</sup> Homogeneous environment
- <sup>6</sup> Non- Homogeneous environment
- <sup>7</sup> Clutter edge
- <sup>8</sup> Smallest of CFAR
- <sup>9</sup> Greatest of CFAR
- <sup>10</sup> Censoring CFAR
- <sup>11</sup> Wavelet transform
- <sup>12</sup> Stationary wavelet transform (SWT)
- <sup>13</sup> Wavelet CFAR
- <sup>14</sup> CFAR processing
- <sup>15</sup> Continuous wavelet transform
- <sup>16</sup> Scale
- <sup>17</sup> Translation
- <sup>18</sup> Multi resolution analysis
- <sup>19</sup> Discrete wavelet transform (DWT)
- <sup>20</sup> Detail coefficients
- <sup>21</sup> Approximation coefficients
- <sup>22</sup> Multi-rate signal processing
- <sup>23</sup> Bi-orthogonal wavelet
- <sup>24</sup> Mallat & Huang