

## بررسی و مقایسه عملکرد آشکارسازهای مختلف در رادارهای پسیو بر پایه

### سیگنال‌های رادیو FM تجاری

امیر زعیم باشی<sup>۱\*</sup>، عباس شیخی<sup>۲</sup>، مصطفی درختیان<sup>۳</sup>

۱- استادیار، دانشگاه شهید باهنر کرمان ۲- دانشیار، دانشگاه شیراز ۳- استادیار، دانشگاه شیراز

(دریافت: ۹۲/۴/۱۲، پذیرش: ۹۲/۱۰/۲۴)

#### چکیده

در این مقاله سعی شده است اصول پردازش در سیستم‌های راداری پسیو دو پایه به صورت ساده و مفهومی بیان گردد. پس از آن به مسئله آشکارسازی در سیستم‌های راداری پسیو مبتنی بر سیگنال‌های رادیو FM در حضور سیگنال‌های تداخلی، شامل نویز سیستم، کلاتر (اکوهای برگشتی ناشی از پدیده چند مسیری)، سیگنال مسیر مستقیم و اکوهای دریافتی از اهداف تداخلی پرداخته شده است. در این راستا، دو دسته آشکارساز در رادارهای پسیو مورد مطالعه قرار گرفته است؛ در دسته اول که روش‌های شهودی و حسی می‌باشند و ادعای بهینگی برای آنها وجود ندارد، دو آشکارساز ارائه شده است. در دسته دوم، مسئله آشکارسازی در رادارهای پسیو به دید نظریه آشکارسازی حل گردیده که دارای خاصیت بهینگی در کلاس آشکارسازهای پایا می‌باشد. برای اولین بار، در این مقاله سعی شده است، این دو دسته آشکارساز بر اساس دو «معیار احتمال آشکارسازی و احتمال هشدار کاذب» مورد بررسی و مقایسه قرار گیرند تا نقاط ضعف و قوت هر دو دسته بیان شود.

#### واژگان کلیدی

سیستم‌های راداری PBR، رادیو FM، آشکارسازی، کلاتر، اهداف تداخلی

#### ۱. مقدمه

یک سیگنال مناسب، به پارامترهایی مثل ناحیه تحت پوشش فرستنده، توان، باند فرکانسی، پهنای باند سیگنال و شکل تابع ابهام<sup>۷</sup> آن برمی‌گردد. به طوری که از این میان، قدرت تفکیک در برد توسط پهنای باند سیگنال تعیین شده، و قدرت آشکارسازی اهداف، به شکل تابع ابهام آن سیگنال‌ها بستگی دارد. گرچه اغلب سیگنال‌های دیجیتال دارای تابع ابهام مناسب‌تری نسبت به سیگنال‌های آنالوگ هستند، ولی توان کمتر فرستنده‌های این سیگنال‌ها، تنها بردهای کوتاه را قابل دسترس می‌سازند. در این راستا، سیگنال رادیوی FM تجاری، یکی از سیگنال‌های مناسب است که علاوه بر دستیابی به عملکرد مناسب در آنها هزینه‌های ساخت آن نیز معقول است [۸]. سیستم‌های راداری پسیو بر این اساس را تحت نام‌های مختلف می‌شناسند که از آن جمله می‌توان به PBR و PCL<sup>۸</sup> اشاره نمود [۹].

سیستم‌های PBR<sup>۱</sup>، رادارهای دوپایه‌ای هستند که به دلیل نداشتن فرستنده اختصاصی، رادارهایی کم‌هزینه و غیر قابل شناسایی هستند. در واقع در این سیستم‌های راداری، از سیگنال‌های مغتنم در محیط، نظیر سیگنال‌های تلویزیون آنالوگ (TV)<sup>۲</sup>، رادیوهای FM<sup>۳</sup>، DVB-T<sup>۴</sup>، DVB<sup>۵</sup>، GSM<sup>۶</sup> و ماهواره [۷] استفاده می‌شود. در حالت کلی، انتخاب

\*رایانامه نویسنده پاسخگو: a.zaibashi@uk.ac.ir

<sup>1</sup> Passive Bistatic Radar

<sup>2</sup> Television

<sup>3</sup> Frequency Modulation

<sup>4</sup> Digital Video Broadcast-Terrestrial

<sup>5</sup> Digital Audio Broadcast

<sup>6</sup> Global System for Mobile communication

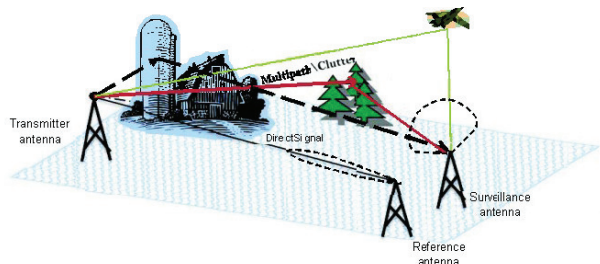
<sup>7</sup> Ambiguity Function

<sup>8</sup> Passive Coherent Location

معیار فوق، به مقایسه دو ساختار آشکارسازی فوق بپردازیم تا طراحان سیستم‌های PBR بتوانند با دید باز، بین دو ساختار فوق، یکی را انتخاب نمایند.

## ۲. مدل سازی سیگنال دریافتی در کانال‌های مرجع و مراقبت

در یک ساختار ساده، می‌توان یک سیستم PBR را شامل دو آنتن؛ یکی برای فراهم آوردن سیگنال مرجع در کانال مرجع، و دیگری برای دریافت سیگنال‌های اهداف در ناحیه مورد مراقبت در نظر گرفت که در شکل ۱ این مطلب نمایش داده شده است. معمولاً آنتن کانال مرجع، یک آنتن با الگوی باریک می‌باشد که به سمت فرستنده جهت‌دهی می‌شود. ولی آنتن کانال مراقبت دارای یک الگوی نسبتاً پهن است که با توجه به ناحیه مراقبت رادار طراحی می‌شود. در عمل معمولاً از یک آنتن آرایه‌ای خطی یا دایروی به صورت مشترک برای دو کانال مراقبت و مرجع استفاده می‌شود، ولی توسط پرتوسازی در هر کانال، پرتوهای جداگانه و مورد نظر ساخته می‌شود [۱۳].



شکل ۱. شمای کلی یک سیستم PBR از دیدگاه سیگنال‌های دریافتی در کانال‌های مرجع و مراقبت

در حالت کلی، می‌توان نمونه  $n$ ام سیگنال دریافتی معادل باند پایه در کانال مراقبت،  $x_s[n]$ ، در طول زمان انتگرال‌گیری  $T$  را به صورت رابطه (۱) در نظر گرفت [۸ و ۱۰]:

$$x_s[n] = \beta_0 s[n] + \sum_{i=1}^{N_c} \beta_i [n] s[n - n_i^{(c_0)}] + \sum_{m=0}^{K-1} a_m s[n - n_m^{(t)}] e^{jn\Omega_m^{(t)}} + n_s[n] \quad (1)$$

که  $n = 0, \dots, N-1$  است که  $N$ ، تعداد کل نمونه‌های انتگرال‌گیری در زمان مشاهده  $T$  است ( $T = NT_s$ ). در رابطه (۱)،  $\Omega_m^{(t)} = 2\pi f_{dm} T_s$ ، فرکانس داپلر نرمالیزه هدف  $m$ ام،  $n_m^{(t)}$  و  $n_i^{(c_0)}$  به ترتیب نمونه‌های متناظر با تأخیرهای مسیر  $m$ ام کلاتر و هدف  $m$ ام می‌باشند.  $\beta_i[n]$  و  $\beta_0$  به ترتیب دامنه مختلط سیگنال مسیر مستقیم و دامنه مختلط متغیر با زمان مربوط به کلاتر مسیر  $m$ ام در کانال مراقبت هستند. همچنین

امروزه این سیستم‌ها به دلیل پیشرفت‌های قابل توجه در پردازنده‌های دیجیتال و مبدل‌های آنالوگ به دیجیتال، دوباره مورد توجه قرار گرفته‌اند [۸، ۱۰ و ۱۱]. علیرغم مزایای سیستم‌های PBR مبتنی بر سیگنال رادیو FM تجاری، این رادارها نیز دارای معایبی هستند که عدم توجه به آنها می‌تواند به شدت عملکرد این رادارها را تحت تأثیر خود قرار دهد [۱۰]. از جمله معایب قابل توجه این رادارها می‌توان به موارد زیر اشاره نمود که در برخی موارد لازم است پیچیدگی‌هایی به سیستم اضافه کرد تا در این رادارها بتوان به عملکرد مناسبی دست یافت: (۱) در سیستم‌های PBR موقعیت فرستنده، شکل موج و توان ارسالی، تحت کنترل طراح رادار نیست. بنابراین بر خلاف رادارهای تک پایه مرسوم، در چنین رادارهایی سیگنال ارسالی از قبل مشخص نبوده و حتی مشخصات آن متغیر با زمان است. این موضوع بدین معناست که برای پردازش در سیستم‌های PBR علاوه بر کانال مراقبت، به یک کانال اختصاصی تحت عنوان کانال مرجع برای داشتن نسخه‌ای از سیگنال ارسالی نیاز است. (۲) در کانال مراقبت در حالت ایده‌آل انتظار داریم تنها سیگنال اهداف مورد جستجو دریافت شوند. ولی در عمل علاوه بر دریافت سیگنال اهداف، سیگنال‌های ناشی از کلاتر یا سیگنال‌های چند مسیره و سیگنال مسیر مستقیم نیز دریافت می‌شوند که از لحاظ توانی به مراتب قوی‌تر از سیگنال‌های بازگشتی از اهداف بوده و می‌توانند آشکارسازی اهداف را به شدت تحت تأثیر خود قرار دهند. بنابراین، مسئله آشکارسازی در این رادارها که با سیگنال‌های تداخلی قوی مواجه هستند، از اهمیت خاصی برخوردار است.

در این مقاله سعی شده است با در نظر گرفتن مطالب فوق، به مسئله آشکارسازی در سیستم‌های پسو مبتنی بر سیگنال‌های رادیو FM در حضور سیگنال‌های تداخلی شامل نویز سیستم، کلاتر<sup>۱</sup> (اکوهای برگشتی ناشی از پدیده چند مسیری)، سیگنال مسیر مستقیم<sup>۲</sup> و اکوهای دریافتی از اهداف تداخلی<sup>۳</sup> پرداخته شود. در این راستا، دو دسته الگوریتم پردازشی در رادارهای پسو مورد مطالعه قرار گرفته است. در دسته اول، دو ساختار آشکارساز مهندسی که در مراجع [۳ و ۸] ارائه شده‌اند، مورد بحث و بررسی قرار می‌گیرند. در دسته دوم، مسئله آشکارسازی در رادارهای پسو به دید نظریه آشکارسازی حل گردیده است که آشکارساز به دست آمده، در کلاس آشکارسازهای پایا بهینه می‌باشد [۱۰ و ۱۲]. در کارهای ارائه شده در مراجع [۳ و ۸] براساس معیارهای احتمال آشکارسازی و احتمال هشدار کاذب، به بررسی عملکرد آشکارسازهای ارائه شده در مقاله پرداخته نشده است. در این مقاله سعی خواهیم نمود با توجه به دو

<sup>1</sup> Clutter

<sup>2</sup> Direct Signal

<sup>3</sup> Interfering Target

۲- تضعیف و حذف سیگنال‌های مزاحم شامل مسیر مستقیم و سیگنال‌های چند مسیره در کانال مراقبت.

۳- آشکارسازی اهداف در حضور اهداف تداخلی دیگر.

در این مقاله به دو پردازش آخر در قالب آشکارسازی رادارهای پسیو پرداخته خواهد شد. در مورد پاک‌سازی سیگنال دریافتی در کانال مرجع، خواننده علاقمند می‌تواند جهت کسب اطلاعات بیشتر به مرجع [۱۵] مراجعه نماید.

### ۳. پردازش‌های مرسوم در سیستم‌های PBR

پردازش‌های مرسوم در سیستم‌های PBR برای حذف سیگنال‌های تداخلی و آشکارسازی در کانال مراقبت، براساس دید حسی نویسندگان این کارها بنا شده است و معیار بهینگی و یا حتی شبه بهینگی ندارند. در حالت کلی می‌توان روش‌های ارائه‌شده برای حذف سیگنال مسیر مستقیم و سیگنال‌های چند مسیره را به چهار گروه کلی زیر تقسیم‌بندی نمود [۱۴]:

۱- روش‌های مبتنی بر استفاده از شرایط انتشار موج و فیزیک محیط.

۲- روش‌های مبتنی بر نول‌گذاری یا پرتوسازی غیر افقی در گیرنده کانال مراقبت.

۳- روش‌های مبتنی بر زیرفضا<sup>۱</sup> برای حذف سیگنال‌های مزاحم در کانال مراقبت.

۴- روش‌های افقی حذف سیگنال‌های مزاحم در کانال مراقبت.

دو روش اول، بیشتر به منظور تضعیف سیگنال مسیر مستقیم در کانال مراقبت سیستم‌های PBR مورد استفاده قرار می‌گیرند [۳ و ۱۴]. در این مقاله تمرکز ما روی روش‌های گروه‌های ۳ و ۴ می‌باشد. خواننده علاقمند به منظور کسب اطلاعات بیشتر می‌تواند به مرجع [۱۴] مراجعه نماید.

### ۳-۱. روش‌های مبتنی بر زیرفضا برای حذف

#### سیگنال‌های مزاحم در کانال مراقبت

ایده اصلی الگوریتم‌های مبتنی بر زیرفضا در سیستم‌های پسیو، بر این اساس استوار است که هرگاه تأخیر و داپلر سیگنال‌های تداخلی مشخص باشد و یا به طریقی بتوان آنها را تخمین زد، می‌توان با تشکیل زیرفضای سیگنال‌های تداخلی و عمود نمودن

$N_c$  و  $K$  به ترتیب تعداد اهداف مورد مراقبت و حداکثر تعداد پراشگرهای قابل تفکیک از کلاتر تا برد حداکثر کلاتر  $R^{(c)}$  است [۸ و ۱۰]. در واقع در این مدل فرض شده است که حداکثر برد برگشتی‌های کلاتر قابل توجه برابر با  $R^{(c)}$  بوده که فرض منطقی و عملی است [۱۰]. در رابطه (۱)، نویز گرمایی در کانال مراقبت می‌باشد. به طور مشابه، در کانال مرجع نیز نمونه  $n$ ام سیگنال دریافتی به صورت زیر قابل بیان است [۸ و ۱۰]:

$$x_r[n] = c_0 s[n] + \sum_{i=1}^{N_{cf}} c_k[n] s[n - n_k] + n_r[n], \quad (2)$$

$$n = 0, \dots, N-1$$

که در آن:  $c_0$  دامنه مختلط سیگنال مسیر مستقیم،  $c_k[n]$  و  $n_k$  نیز به ترتیب دامنه مختلط متغیر با زمان و تعداد نمونه معادل با تأخیر کلاتر مسیر  $k$ ام،  $N_{cf}$  نیز حداکثر تعداد مؤلفه‌های برگشتی از کلاتر و  $n_r[n]$  نیز نویز گرمایی در کانال مرجع است.

همان‌طور که مشاهده شد، در کانال مرجع علاوه بر دریافت سیگنال مسیر مستقیم، سیگنال‌های مزاحم ناشی از کلاتر یا سیگنال‌های چند مسیره نیز دریافت می‌شوند. بنابراین، یکی از پردازش‌های مورد نیاز در سیستم‌های PBR فراهم آوردن سیگنال مسیر مستقیم تمیز در کانال مرجع است. به همین ترتیب، در کانال مراقبت که هدف اصلی در آن آشکارسازی اهداف است، علاوه بر دریافت برگشتی‌های اهداف مورد آشکارسازی، سیگنال‌های مزاحم ناشی از کلاتر یا سیگنال‌های چند مسیره و سیگنال مسیر مستقیم نیز دریافت خواهند شد که از لحاظ توانی به مراتب از سیگنال‌های اهداف مورد آشکارسازی قوی‌تر بوده و در نتیجه می‌توانند مانع از آشکارسازی اهداف گردند. علاوه بر این، معمولاً سیگنال‌های رادیو FM مشخصه PSLR مناسبی ندارند و این عامل باعث می‌شود، وجود یک هدف قوی مانع از آشکارسازی اهداف ضعیف‌تر شود. در این مقاله، اهدافی که می‌توانند مانع از آشکارسازی اهداف دیگر شوند یا باعث ایجاد هشدار کاذب در سیستم شوند را «اهداف تداخلی» می‌نامیم. بنابراین در سیستم‌های PBR علاوه بر مشکلات ناشی از سیگنال‌های مسیر مستقیم و کلاتر، بایستی به نوعی به بحث آشکارسازی در حضور اهداف تداخلی نیز توجه خاصی نمود. یکی از ویژگی‌های این مقاله، بررسی مسئله مهم اهداف تداخلی است که در مقالات رادارهای پسیو کمتر به آن توجه شده است. به طور خلاصه، می‌توان سه پردازش حیاتی به منظور آشکارسازی اهداف در رادارهای پسیو را متصور شد که عبارت‌اند از [۱۴]:

۱- پاک‌سازی سیگنال دریافتی در کانال مرجع به منظور استخراج سیگنال مرجع مناسب.

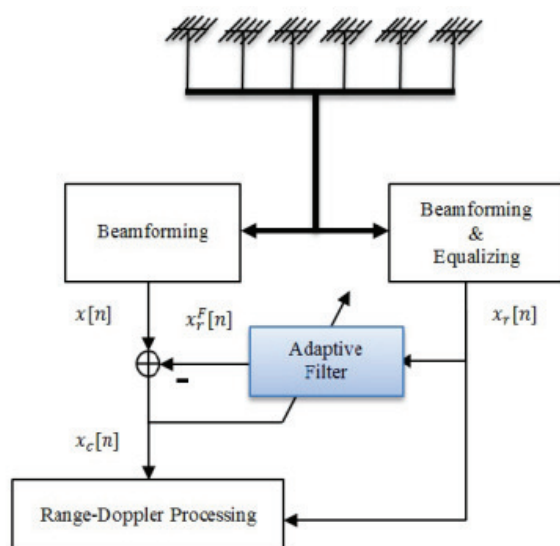
<sup>1</sup> Subspace

که در ادامه در قسمت شبیه‌سازی خواهیم دید، روش ECA با عملکرد بسیار مناسب به حذف کلاتر می‌پردازد و تنها مشکل آن، حجم محاسباتی بالا و نیز حافظه مورد نیاز بالا در آن است که شاید به دلیل عملکرد بسیار مناسب آن مجبور به پذیرش آن باشیم.

## ۲-۳. روش‌های وفقی حذف سیگنال‌های مزاحم در

### کانال مراقبت

همان‌طور که می‌دانیم کانال مراقبت شامل سیگنال‌های ناشی از اهداف مورد آشکارسازی، سیگنال مسیر مستقیم، سیگنال‌های مسیرهای چندگانه، کلاتر و نویز است. ولی در کانال مرجع بعد از پاک‌سازی سیگنال دریافتی این کانال، با سیگنال مرجع و نویز مواجه هستیم. در یک نگاه ساده، سیگنال‌های مزاحم در کانال مراقبت یک نسخه تأخیریافته از سیگنال کانال مرجع با داپلر صفر هستند؛ بنابراین با توجه به ساختار عرضی در فیلترهای وفقی می‌توان از آن برای حذف سیگنال‌های مزاحم در کانال مراقبت یک سیستم PBR استفاده نمود. با توجه به مفاهیم فیلتر وفقی [۱۸]، نحوه به‌کارگیری آن در یک سیستم PBR به صورت شکل ۲ است. در این شکل، ۲ سیگنال ورودی فیلتر، سیگنال خروجی فیلتر، سیگنال مطلوب و خطا به ترتیب برابر  $x_r[n]$ ،  $x_c^F[n]$ ،  $x[n]$  و  $x_e[n]$  هستند که در نهایت، سیگنال مطلوب آشکارسازی در مباحث سیستم‌های PBR همان سیگنال  $X_c[n]$  است. بنابراین، هدف فیلتر وفقی در این ساختار



شکل ۲. نحوه به‌کارگیری فیلتر وفقی در سیستم‌های PBR

سیگنال دریافتی بر زیرفضای تداخل، سیگنال تداخل را حذف نمود. در این قسمت به بررسی روشی بر پایه ایده تصویرسازی زیرفضای متعامد بر در سیگنال‌های تداخلی یعنی ECA<sup>۱</sup> پرداخته خواهد شد [۸، ۱۶ و ۱۷]. در این روش فرض شده است که اکوهای برگشتی کلاتر دارای تأخیر حداکثر معادل با  $N_c$  نمونه معادل پیرو نمونه برداری (تأخیر صفر برای سیگنال مسیر مستقیم و تأخیر  $N_c$  برای حداکثر برد کلاتر یا سیگنال چند مسیری) بوده و در داپلر نیز در فرکانس‌های حول صفر دارای  $(2P+1)$  مؤلفه می‌باشند. بر این اساس می‌توان یک ماتریس  $V$  با ابعاد  $N \times M$  که  $M = (N_c + 1)$  است، تشکیل داد که ستون‌های آن زیرفضای مربوط به سیگنال‌های تداخلی را تشکیل می‌دهند. به طور مثال، ستون  $m$  این ماتریس،  $[V]_m$ ، را می‌توان بر اساس بردار دریافتی در کانال مرجع  $x_r$  به صورت  $[V]_m = P^{nm} X_r \odot e_m$  در نظر گرفت که بردار  $x_r$  به صورت  $x_r = [x_r[0], \dots, x_r[N-1]]^T$  و  $e_m$  نیز بردار داپلر مربوط به کلاتر با داپلر  $f_c^m$  است که عنصر  $n$ ام این بردار به صورت  $[e_m]_n = e^{j2\pi f_c^m n T_s}$  قابل بیان است که در آن،  $n = 0, \dots, N-1$  می‌باشد. توجه شود، در  $[A]$  کلاتر با داپلر غیر صفر به صورت ساده‌تری مدل شده است که در اینجا ما آن را به صورت کلی‌تر بیان نمودیم. در این مدل، ماتریس  $P$  نیز دارای عناصر  $[P]_{ij} = 1$  به ازای  $i=j+1$  است که به ازای سایر مقادیر  $i$  و  $j$ ، ماتریس  $P$  مقادیر صفر را اتخاذ می‌کند. در این روش برای حذف سیگنال‌های مزاحم در کانال مراقبت به صورت زیر عمل می‌شود:

$$x_E = x_s - V\hat{\alpha} \quad (3)$$

که بردار سیگنال دریافتی در کانال مراقبت بوده و تخمین دامنه مختلط و نامعلوم سیگنال‌های تداخل  $x_E$  و نیز سیگنال کانال مراقبت بعد از حذف سیگنال‌های مزاحم از آن می‌باشند. در  $[A]$  برای تخمین  $\hat{\alpha}$  به روش حداقل مربعات متوسل شده است که حاصل آن به صورت زیر می‌باشد:

$$\hat{\alpha} = (V^H V)^{-1} V^H x_s \quad (4)$$

در این صورت، می‌توان رابطه (۳) را به صورت زیر نیز بیان نمود:

$$x_E = \Pi^\perp x_s = (I - V(V^H V)^{-1} V^H) x_s \quad (5)$$

که  $\Pi^\perp$  ماتریس تصویر متعامد بر ستون‌های ماتریس  $V$  است. بنابراین می‌توان گفت تصویر متعامد بردار  $x_s$  در کانال مراقبت بر ستون‌های ماتریس  $V$ ، همان سیگنال  $x_E$  است که اثر سیگنال‌های مزاحم از آن حذف شده است. به طوری که اصل تعامد در آن نشان می‌دهد که سیگنال فوق حاوی هیچ اطلاعاتی از سیگنال‌هایی که توسط ستون‌های ماتریس  $V$  گسترانیده می‌شوند<sup>۲</sup>، نیست. همان‌طور

<sup>2</sup> Span

<sup>1</sup> Extensive Cancellation Algorithm

احتمال آشکارسازی نشده و همچنین خاصیت CFAR<sup>۳</sup> آشکارساز بر پایه CA بررسی نشده است. از آنجایی که در یک سناریوی آشکارسازی در یک سیستم PBR بر پایه سیگنال رادیو FM، سیگنال‌های مورد استفاده دارای مشخصه مناسب از لحاظ PSLR نیست، مسئله اهداف تداخلی نیز دارای اهمیت می‌شود، چرا که یک هدف قوی همانند کلاتر می‌تواند مانع از آشکارسازی سایر اهداف شود. برای حل این مشکل، در مرجع [۸] روشی همانند روش حذف سیگنال‌های مزاحم بر پایه الگوریتم ECA، ولی برای حذف اهداف تداخلی ارائه شده است. در این روش بعد از حذف اهداف قوی، با استفاده از آشکارساز CA به آشکارسازی اهداف ضعیف پرداخته می‌شود. در این روش نیز صحبتی از احتمال آشکارسازی اهداف قوی و ضعیف به میان نیامده و تنها با رسم خروجی آستانه‌گذاری شده تابع ابهام در مورد آشکارسازی و عدم آشکارسازی اهداف، نتیجه‌گیری شده است. علاوه بر این، از دید این مقاله، یک هدف با نسبت سیگنال به نویز ورودی برابر با ۲۶dB-، یک هدف ضعیف تلقی می‌شود و نیازی به حذف آن برای آشکارسازی اهداف دیگر نیست؛ در حالی که در قسمت شبیه‌سازی ما نشان خواهیم داد که یک هدف با نسبت سیگنال به نویز ورودی برابر با ۳۸dB- با احتمال آشکارسازی یک قابل، آشکارسازی است.

با توجه به دو روش حذف کلاتر یعنی ECA و RLS و استفاده از آشکارساز CA می‌توان دو ساختار کلی برای آشکارسازهای مرسوم در سیستم‌های PBR در نظر گرفت که به ترتیب ECA-CA و RLS-CA نامیده می‌شود. به عبارتی، در این آشکارسازها ابتدا سیگنال مسیر مستقیم و کلاتر توسط روش‌های ECA و یا RLS حذف نامیده و سپس برای آشکارسازی از آشکارساز متداول CA استفاده می‌شود.

### ۳-۴. طراحی پردازش‌های مورد نیاز در سیستم‌های

#### PBR مبتنی بر نظریه آشکارسازی

همان‌طور که در قسمت قبل مشاهده شد، آشکارسازهای مرسوم در سیستم‌های PBR به دید شهودی و حسی پایه‌گذاری شده بودند. به عبارتی، هیچ معیاری برای بهینه و یا حداقل شبه بهینه بودن پردازش آنها وجود نداشت. در [۱۰ و ۱۲] به مسئله آشکارسازی در سیستم‌های PBR در حضور سیگنال‌های تداخلی شامل نویز سیستم، کلاتر (اکوهای برگشتی ناشی از پدیده چند مسیری)، سیگنال مسیر مستقیم و اکوهای دریافتی از اهداف تداخلی، به دید یک مسئله نظریه آشکارسازی نگاه شده است. بر این اساس، بعد از مدل‌سازی، مسئله آشکارسازی فوق به صورت یک آزمون فرضیه

تقریب تابع بین سیگنال‌های مزاحم در کانال مراقبت و سیگنال تمیز شده کانال مرجع است. بر این اساس، هرچه همبستگی بین سیگنال‌های مزاحم در کانال مراقبت و کانال مرجع بیشتر باشد، فیلتر وفقی می‌تواند به طور مناسب‌تری در خروجی خود، سیگنال‌های تداخلی کانال مراقبت را دنبال کند. به عبارتی ساده تر، اگر تفاوت بین سیگنال‌های مزاحم در کانال مراقبت و کانال مرجع تنها در تأخیر باشد و مقدار تأخیر نیز از طول فیلتر وفقی کمتر باشد، فیلتر وفقی به خوبی می‌تواند در خروجی خود، سیگنال‌های مزاحم را تقریب زند. اما اگر تفاوت بین آنها علاوه بر تأخیر، در داپلر نیز باشد، این همبستگی بسته به میزان داپلر کاهش یافته و حتی با تغییر پارامترهای در فیلتر وفقی، نمی‌توان سیگنال‌های مزاحم فوق را حذف نمود. در واقع بر اساس همین ایده است که فیلتر وفقی، اهداف مورد آشکارسازی را در خروجی  $x_c[n]$  حذف نمی‌کند؛ چرا که با تأخیر آن از طول فیلتر بیشتر است و یا دارای داپلرهای نسبتاً بزرگی هستند و یا هر دو عامل تأخیر متفاوت و داپلر بزرگ را دارند. با توجه به اینکه در سیستم‌های PBR، سیگنال‌های مطلوب و سیگنال‌های مزاحم همه از جنس سیگنال مرجع هستند، بنابراین، ذات سیگنال کانال مرجع خود نیز می‌تواند عملکرد یک فیلتر وفقی را تحت تأثیر قرار دهد که در ادامه، بیشتر راجع به آن صحبت می‌شود. با توجه به تعریف سیگنال ورودی فیلتر، سیگنال خروجی فیلتر، سیگنال مطلوب و خطا در سیستم‌های PBR می‌توان از فیلترهای وفقی متعددی برای حذف سیگنال‌های تداخلی در کانال مراقبت بهره گرفت. در این مقاله تنها به بررسی فیلتر وفقی بر پایه RLS<sup>۱</sup> می‌پردازیم که عملکرد بسیار مؤثرتری نسبت به الگوریتم‌های بر پایه خانواده LMS<sup>۲</sup> دارد.

توجه شود گرچه روش‌های بر پایه LMS پیچیدگی محاسباتی کمتری نسبت به روش‌های RLS دارند ولی در سیستم‌های PBR عملکرد قابل قبولی از خود نشان نداده‌اند که دلیل اصلی آن، طیف رنگی سیگنال FM می‌باشد [۱۴].

### ۳-۳. روش‌های آشکارسازی مرسوم در سیستم‌های

#### PBR

یکی از مباحثی که تاکنون روی آن تحقیقات جامعی در سیستم‌های PBR انجام نشده است، بحث آشکارسازی در این رادارها می‌باشد. در مرجع [۳] برای آشکارسازی اهداف، ابتدا سیگنال‌های مسیر مستقیم و کلاتر توسط روش‌های وفقی حذف می‌شود و سپس بر اساس خروجی تابع ابهام و استفاده از روش آستانه‌گذاری متداول CA<sup>۴</sup>، به آشکارسازی پرداخته می‌شود. اما در این مقاله صحبتی از

<sup>3</sup> Cell averaging

<sup>4</sup> Constant False Alarm Rate

<sup>1</sup> Recursive Least Square

<sup>2</sup> Least Mean Square



#### ۴- مثال‌های شبیه‌سازی شده

در این قسمت به بررسی عملکرد دو دسته آشکارساز ارائه شده در این مقاله پرداخته خواهد شد. بدین منظور، یک سناریو متشکل از شش هدف با مشخصات ارائه شده در جدول ۱ در نظر گرفته شده است (سناریوی شماره ۱). در جدول ۱، سیگنال به نویز در ورودی پردازش را با  $SNR_i$  نمایش داده‌ایم که به صورت زیر تعریف شده است:

$$SNR_i = \frac{|\alpha_0|^2}{N_0 B} \quad (7)$$

که  $|\alpha_0|^2$  توان مربوط به هدف تحت آزمون،  $N_0$  توان نویز در واحد هرتز و  $B$  همان پهنای باند گیرنده رادار می‌باشد که در محاسبات مربوط به جدول ۱ برابر با ۱۹۲kHz فرض شده است. در شبیه‌سازی‌ها، یک سیگنال مسیر مستقیم با توان سیگنال مسیر مستقیم به نویز در ورودی برابر  $DNRs = 45dB$  در داپلر صفر قرار داده شده است. همچنین توان سیگنال مسیر مستقیم به نویز در کانال مرجع نیز  $DNRs = 65dB$  لحاظ شده است. برای مدل‌سازی کلاتر، فرض شده اکوی‌های برگشتی از کلاتر در بردهای کمتر از ۵۵km با  $15dB \leq CNR_i \leq 35dB$  می‌باشند و همچنین تغییرات دامنه مختلط کلاتر در طول زمان انتگرال‌گیری با طیف زیر مدل‌سازی شده است:

$$S(v) = CNR_i \left[ \frac{\tau}{\tau + r} \delta(v) + \frac{1}{\tau + 1} \frac{\rho \lambda}{4} e^{-\rho |v|} \right] \quad (8)$$

که در آن،  $v$  سرعت طیف کلاتر،  $\tau$  نسبت توانی قسمت ثابت طیف کلاتر به قسمت نمایی طیف دامنه کلاتر،  $\lambda$  طول موج رادار و  $\rho$  پارامتر مربوط به شکل طیف دامنه کلاتر بوده که تابعی از سرعت باد است، می‌باشند.  $\delta(v)$  نیز تابع ضربه بوده که بیانگر قسمت ثابت کلاتر است [۲۰]. در شبیه‌سازی‌های این قسمت پارامترهای طیف کلاتر برابر  $r = 90$  و  $\rho = 7$  فرض شده‌اند که با توجه به سرعت باد برابر با  $V_w = 10m/s$  و فرکانس سیگنال ارسالی  $f_c = 88MHz$  محاسبه شده‌اند. ضمناً در طی این مقاله، زمان انتگرال‌گیری یا پردازش سیگنال نیز برابر با یک ثانیه،  $T = 1$ ، در نظر گرفته شده است.

جدول ۱. مشخصات اهداف در سناریوی شماره ۱ ( $S_1$ )

اهداف	$T_1$	$T_2$	$T_3$	$T_4$	$T_5$	$T_6$
$R_B, km$	۵	۲۰	۴۵	۷۰	۱۰۰	۱۳۵
$f_d, Hz$	۲/۹۳	-۸/۸	۱۷/۶	-۲۹/۳	۵۸/۶۷	۸۸
$SNR_i, dB$	-۳۶	-۳۵	-۳۳	-۳۱	-۳۰	-۳۶

مرکب، توسط روش GLR<sup>۱</sup> و UMPI<sup>۲</sup> حل شده است [۱۰ و ۱۲]. با توجه به نتایج ارائه شده در [۱۲ و ۱۹] می‌توان به معادل بودن دو آشکارساز GLR و UMPI پی برد. بنابراین در مسئله آشکارسازی در سیستم‌های PBR، نوعی آشکارسازی پیشنهاد شده است که حداقل در کلاس آشکارسازهای تغییرناپذیر یا پایا بهینه است. آشکارساز پیشنهادی در [۱۰ و ۱۲] آشکارسازی دو مرحله‌ای است که پایه و اساس آن، آزمون به صورت زیر است:

$$L_{UMPI_k}(\mathbf{x}_s) = L_{GLR_k}(\mathbf{x}_s) = \frac{|S_0^H \Pi_U \hat{\mathbf{x}}_s|}{(S_0^H \Pi_U \hat{\mathbf{x}}_s)(\mathbf{x}_s^H \Pi_U \hat{\mathbf{x}}_s)} \underset{H_0}{\overset{H_1}{>}} \eta_k \quad (6)$$

که در آشکارساز (۶)، ماتریس  $U$  دارای ابعاد  $N \times P$  و به صورت  $U = [V, T]$  تعریف می‌گردد که در آن داریم:  $P = (2Q + 1)N_c + K$ .  $P$  به عبارت دقیق‌تر، ماتریس  $U$  را می‌توان به صورت دو زیرماتریس شامل ماتریس کلاتر به صورت  $V = [v_1, \dots, v_q, \dots, v_P]$  و ماتریس مربوط به اهداف تداخلی را به صورت  $T = [t_1, \dots, t_m, \dots, t_{k-1}]$  در نظر گرفت. در روابط فوق، ماتریس  $V$  یک ماتریس  $N \times P$  است که ستون  $q$ ام آن به صورت

$$\mathbf{v}_q = (\mathbf{a}_{\Omega_q}^{(c)} \mathbf{e}_{y_{n_q}^{(c)}})$$

$$[\mathbf{a}_{\Omega_q}^{(c)}]_k = e^{jk\Omega_q^{(c)}} \quad \text{که}$$

$$\Omega_q^{(c)} = 2\pi f_c^q T_s \quad \text{و}$$

قابل بیان است. به همین ترتیب، عنصر  $m$ ام در ماتریس  $T$  به صورت  $t_m = (\mathbf{a}_{\Omega_m}^{(t)} \odot \mathbf{y}_{n_m}^{(t)})$  تعریف می‌گردد که

$$\mathbf{y}_{n_m}^{(t)} = \mathbf{P}^{n_m^{(t)}} \mathbf{y}$$

$$[\mathbf{a}_{\Omega_m}^{(t)}]_k = e^{jk\Omega_m^{(t)}}$$

$$\Omega_m^{(t)} = 2\pi f_{dm} T_s \quad \text{و}$$

فرکانس داپلر نرمالیزه اهداف با داپلر  $f_{dm}$  و  $k = 0, \dots, N-1$  می‌باشند. در این خصوص، ماتریس  $\Pi_U = U(U^H U)^{-1} U^H$  یک ماتریس تصویر است که تصویر یک بردار را در زیرفضایی که توسط ستون‌های ماتریس  $U$  گسترانده می‌شوند نتیجه می‌دهد و به همین ترتیب ماتریس  $\Pi_U^\perp$ ، ماتریس تصویر متعامد نامیده می‌شود که تصویر یک بردار را در زیرفضایی عمود بر زیرفضایی که توسط ستون‌های ماتریس  $U$  گسترانده می‌شوند نتیجه می‌دهد. برای  $s_0$  نیز داریم

$$\mathbf{s}_q = (\mathbf{a}_{\Omega_0} \odot \mathbf{y}_{n_0})$$

که  $\mathbf{y}_i = \mathbf{P}^i \mathbf{y}$  و  $[\mathbf{a}_{\Omega_0}]_k = e^{jk\Omega_0}$ ،  $k = 0, \dots, N$  است. در رابطه (۶) آستانه آشکارسازی به صورت

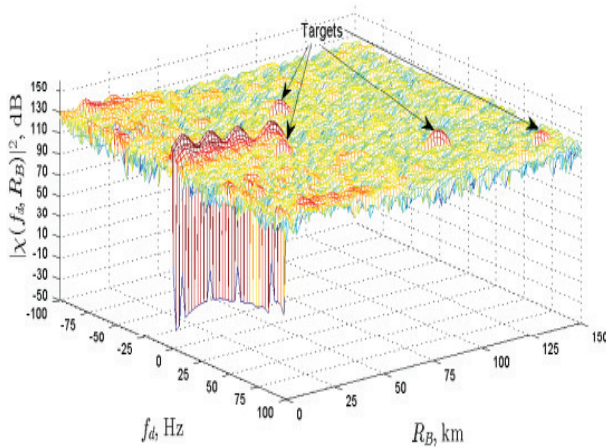
$$\eta_k = \frac{-\ln(P_{fa})}{N - (P + 1) - \ln(P_{fa})}$$

بر حسب احتمال هشدار کاذب،  $P_{fa}$ ، قابل تنظیم است [۱۰].

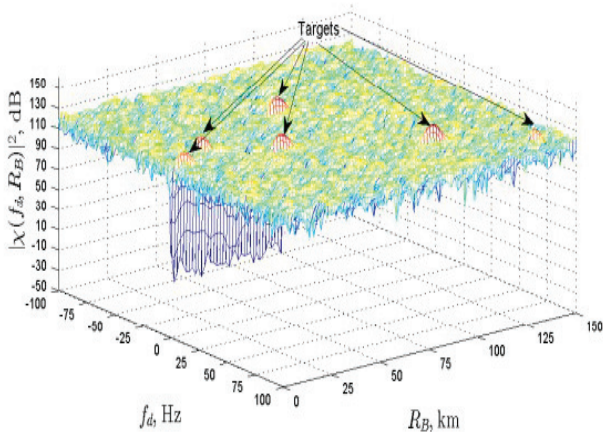
<sup>۱</sup> Generalized Likelihood Ratio

<sup>۲</sup> Uniformly Most Powerful Invariant

شکل‌های ۳ و ۴، تابع ابهام بعد از اعمال الگوریتم حذف در آشکارساز UMPI (یا ECA) به ترتیب به ازای حذف داپلر صفر و داپلرهای در محدوده  $\pm 0.5\text{Hz}$  با فواصل  $0.5\text{Hz}$  را نشان می‌دهند که به ترتیب، مقدار IC در این شکل‌ها برابر با  $46.5\text{dB}$  و  $46.8\text{dB}$  به دست آمده است.



شکل ۳. اعمال روش حذف کلاتر در آشکارساز UMPI (یا ECA) با فرض داپلر صفر به منظور حذف سیگنال مسیر مستقیم، کلاتر با داپلر غیر صفر و رؤیت اهداف در سناریوی آزمون



شکل ۴. اعمال روش ECA با داپلرهای در محدوده  $\pm 0.5\text{Hz}$  با فواصل  $0.25\text{Hz}$  به منظور حذف سیگنال مسیر مستقیم، کلاتر با داپلر غیر صفر و رؤیت اهداف در سناریوی آزمون

با مشاهده نتایج این شکل‌ها مشخص می‌شود که با در نظر گرفتن داپلر صفر برای ساخت زیرفضای کلاتر، تنها اهداف با داپلر زیاد یا اهداف با برد خارج از برد کلاتر قابل رویت می‌باشند و در داپلرهای کم و بردهای زیر  $55\text{km}$  باقی‌مانده کلاتر باعث بالا رفتن هشدار کاذب در سیستم می‌شوند. با گسترده نمودن زیرفضای کلاتر در شکل ۴، کلیه اهداف رؤیت و هشدار کاذب در

#### ۴-۱- بررسی عملکرد آشکارسازی مورد بررسی از حذف

##### سیگنال‌های مزاحم در کانال مراقبت

معمولاً در مقالات با فرض کلاتر با داپلر صفر به بررسی میزان حذف سیگنال‌های مزاحم در کانال مراقبت پرداخته می‌شود [۳ و ۸]. در این قسمت سعی شده با در نظر گرفتن شرایط عملی، به مقایسه عملکرد روش‌های پردازشی فوق پرداخته شود. لازم به ذکر است که فرض داپلر صفر برای کلاتر، زمانی صادق است که برگشتی‌های کلاتر ناشی از موانع ناخواسته ثابت مثل کوه بدون پوشش گیاهی، ساختمان، تیر برق و ... باشد. ولی در عمل پوشش، گیاهی زمین و حرکت برگ درختان می‌توانند با توجه به سرعت باد، داپلرهای غیر صفر نسبتاً بزرگی ایجاد کنند [۲۰]. از طرفی، در سیستم‌های PBR مکان هندسی نقاط با برد دو پایه یکسان، بیضی‌هایی به کانون‌های گیرنده و فرستنده می‌باشند. با در نظر گرفتن این مطلب و اینکه عرض پرتو آنتن مراقبت در این سیستم‌ها نسبتاً پهن است، می‌توان انتظار داشت که با پراشگرهای کلاتر متحرک بیشتری به نسبت یک سیستم راداری تک پایه مواجه باشیم. از طرفی با توجه به بزرگ بودن زمان انتگرال‌گیری در سیستم‌های PBR مبتنی بر سیگنال‌های رادیو FM، می‌توان این انتظار را نیز داشت که دامنه دریافتی از کلاتر در زمان پردازش، با زمان تغییر کند که این نیز به نوعی گسترده شدن طیف کلاتر را دربر خواهد داشت.

در ادامه، به بررسی عملکرد روش‌های حذف کلاتر ECA، RLS و روش UMPI پرداخته خواهد شد. با توجه به رابطه (۶) و با در نظر نگرفتن اهداف تداخلی در سناریوی آشکارسازی ( $U=V$ )، می‌توان به سادگی نشان داد که دو روش ECA و UMPI از دید حذف کلاتر یکسان هستند. بنابراین در ادامه به بررسی روش‌های RLS و UMPI از دید حذف کلاتر می‌پردازیم. به منظور بررسی عملکرد روش‌های مختلف حذف تداخل، در این قسمت، از پارامتر تضعیف سیگنال‌های مزاحم، IC، که به صورت زیر تعریف می‌شود، استفاده شده است:

$$IC = \frac{P_{c, \text{input}}}{P_{c, \text{output}}} \quad (9)$$

که  $P_{c, \text{input}}$  توان سیگنال‌های مزاحم (سیگنال مسیر مستقیم، کلاتر و نویز) قبل از اعمال الگوریتم‌های حذف، و  $P_{c, \text{output}}$  نیز توان سیگنال‌های مزاحم باقیمانده بعد از اعمال الگوریتم‌های حذف برای حالتی که اهداف آشکارسازی در محاسبه توان در نظر گرفته نمی‌شوند، می‌باشند. در این شبیه‌سازی‌ها به منظور درک بهتر از میزان حذف سیگنال‌های مزاحم، یک سناریوی متشکل از اهداف ضعیف در نظر گرفته شده است تا بتوان با رؤیت اهداف به نوعی در مورد نحوه عملکرد روش‌های فوق اظهار نظر نمود.

در این شکل‌ها به ترتیب به مقادیر IC برابر با  $45/5dB$  و  $45/75dB$  خواهیم رسید. همان‌طور که نتایج این شکل‌ها نشان می‌دهد، برای دستیابی به حذف کلاترهای با داپلر غیر صفر در الگوریتم RLS لازم است مقدار  $\lambda_R$  حدود 0.9995 را انتخاب نمود. همچنین شبیه‌سازی‌ها نشان می‌دهد، مقادیر کوچک‌تر  $\lambda_R$  تضعیف بیشتری به سلول‌های با داپلر کم و در برد کلاتر اعمال می‌کند که از دید آشکارسازی اهداف چندان مناسب نیست. به‌طور مثال، هرگاه  $\lambda_R = 0.999$  انتخاب شود، دو هدف با داپلر کم در تابع ابهام دیده نمی‌شوند. در حالت کلی، هر چه  $\lambda_R$  کوچک‌تر انتخاب گردد، قابلیت الگوریتم RLS در حذف یا تضعیف فرکانس‌های کم، بیشتر می‌گردد.

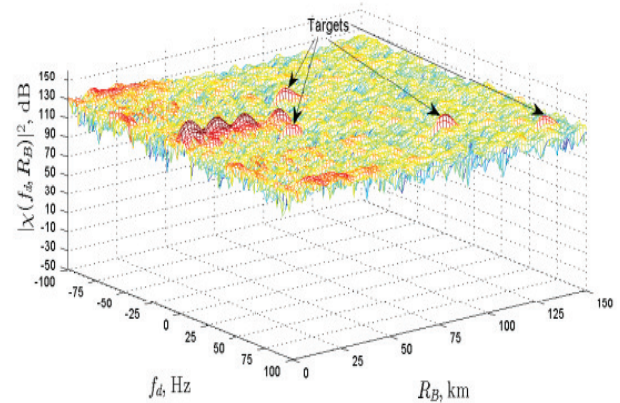
#### ۴-۲. بررسی عملکرد آشکارسازی مورد بررسی از دید تثبیت هشدار کاذب

یکی از مشکلات اساسی سیستم‌های PBR، آشکارسازی خودکار اهداف در حضور نویز، کلاتر، سیگنال مسیر مستقیم و اهداف تداخلی با شرط ثابت نگه‌داشتن احتمال هشدار کاذب است. برای آشکارسازی مناسب و ثابت نگه‌داشتن احتمال هشدار کاذب در این سیستم‌ها می‌بایست ابتدا سیگنال‌های تداخلی را به خوبی حذف نمود. در ادامه به‌نحوه تثبیت هشدار کاذب در آشکارسازهای ECA-CA، RLS-CA و UMPI پرداخته می‌شود. بر این اساس، یک شبیه‌سازی طراحی شده است که در آن، یک هدف تداخلی با  $SNR_i = -30dB$  در داپلر یکسان ولی با اختلاف برد به اندازه  $\Delta R_B$  نسبت به یک سلول تحت آزمون قرار داده شده است. توجه شود هدف فوق، هدفی است که الگوریتم ارائه‌شده در مرجع [۳ و ۸] آن را به‌عنوان هدف تداخلی آشکارسازی نمی‌کنند.

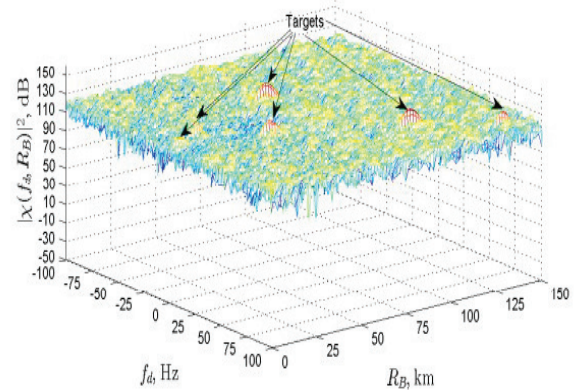
در شکل ۷، به بررسی،  $P_{fa}$  بر حسب  $\Delta R_B$  نسبت به یک سلول تحت آزمون در آشکارسازهای ECA-CA و RLS-CA به ازای  $p_{fa} = 10^{-2}$  پرداخته شده است. در این خصوص، آشکارسازهای ECA-CA و RLS-CA به دلیل بهره گرفتن از ساختار CA نتیجه یکسانی دارند. همان‌طور که مشاهده می‌شود، وجود هدف تداخلی تا فاصله حدود ۲۲km می‌تواند احتمال هشدار و از طرفی احتمال آشکارسازی اهداف دیگر را تحت تأثیر خود قرار دهد. توجه شود کم شدن احتمال هشدار کاذب به معنی بالا رفتن آستانه آشکارسازی در آشکارساز CA بوده و این به معنی کاهش احتمال آشکارسازی برای اهدافی می‌باشد که در سلول‌هایی با  $P_{fa} < 10^{-2}$  قرار دارند. همان‌طور که دیده می‌شود، آشکارسازهای بر پایه تابع ابهام و آشکارساز CA به‌تنهایی نمی‌تواند چه از جنبه احتمال آشکارسازی و چه از لحاظ داشتن احتمال هشدار کاذب ثابت، مفید واقع گردند. علاوه‌براین، از

سیستم کاهش می‌یابد. همان‌طور که از نتایج این شبیه‌سازی‌ها مشخص است، معیار قرار دادن مقدار پارامتر IC به‌عنوان توانایی یک الگوریتم جهت حذف کلاتر با داپلر غیر صفر به تنهایی کار درستی نیست. به همین علت در این مقاله یک سناریو حاوی اهداف ضعیف در داپلرهای مختلف در نظر گرفته شد تا عیب معیار فوق با رؤیت اهداف کم‌رنگ‌تر گردد. بنابراین در الگوریتم‌های بر پایه زیرفضا لازم است، محدوده داپلری با فواصل  $\Delta f_d$  مناسب به درستی انتخاب گردند. نتایج شبیه‌سازی متعدد نشان می‌دهند فواصل  $\Delta f_d = 0.25Hz$  برای رادارهای بر پایه سیگنال FM با زمان انتگرال‌گیری یک ثانیه مناسب می‌باشد، ولی محدوده داپلر زیرفضا به محل نصب رادار وابسته است که طراح رادار می‌تواند با یک بار تنظیم آن به آشکارسازی اهداف امیدوار باشد.

در شکل‌های ۵ و ۶، تابع ابهام مربوط به الگوریتم RLS با پارامترهای  $\lambda_R = 0.999999$  و  $\lambda_R = 0.9995$  نشان داده شده است.



شکل ۵. اعمال روش RLS به ازای  $\lambda_R = 0.999999$  به منظور حذف سیگنال مسیر مستقیم، کلاتر با داپلر غیر صفر و رؤیت اهداف در سناریوی آزمون



شکل ۶. اعمال روش RLS به ازای  $\lambda_R = 0.9995$  به منظور حذف سیگنال مسیر مستقیم، کلاتر با داپلر غیر صفر و رؤیت اهداف در سناریوی آزمون

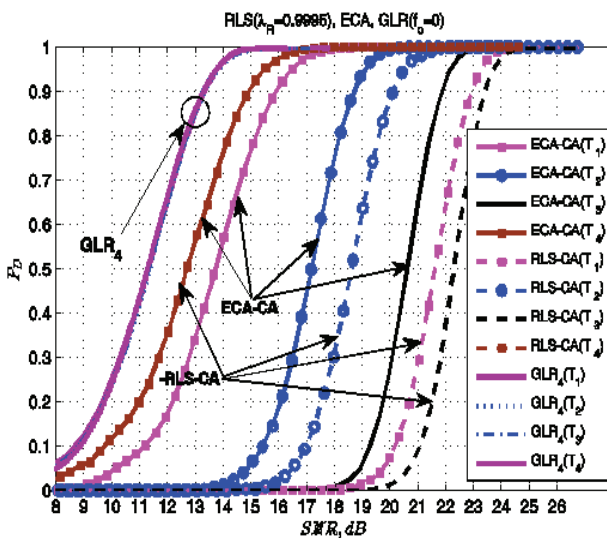


می‌شود. در واقع دلیل این امر، مناسب نبودن مقدار PSLR مربوط به سیگنال‌های رادیو FM می‌باشد.

طبق شبیه‌سازی‌های فوق، عملکرد مناسب آشکارساز پیشنهادی در [۱۰] نسبت به کارهای انجام‌شده در [۳] و [۸] از دید تثبیت هشدار کاذب به‌خوبی نشان داده می‌شود که این نتایج تاکنون در هیچ مرجعی گزارش نشده است.

### ۳-۴. مقایسه عملکرد آشکارسازهای UMPI، ECA-CA و RLS-CA

در شکل ۹ منحنی احتمال آشکارسازی،  $P_d$ ، بر حسب  $SNR_0$  به‌منظور مقایسه الگوریتم‌های ECA-CA، RLS-CA و UMPI به‌ازای سناریویی که کلاتر آن مشابه قبل ولی اهداف آن مطابق جدول ۲ در صفحه برد-داپلر قرار داده شده‌اند، آورده شده است. در مقاله حاضر به این سناریو، سناریوی شماره ۲ گفته می‌شود. توجه شود،  $SNR_0$  همان سیگنال-به-نویز در خروجی فیلتر منطبق است که به‌راحتی می‌توان نشان داد که  $SNR_0 = SNR_i G_p$  که در این رابطه،  $G_p = BT$  بهره فیلتر منطبق نامیده می‌شود که به ازای  $T=1s$  و  $B=192kHz$  برابر با  $G_p = 52.83 dB$  می‌گردد.

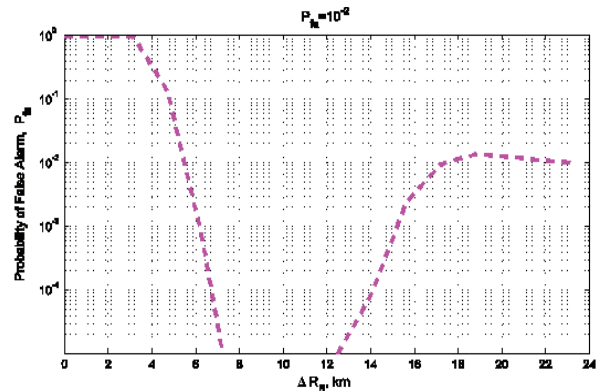


شکل ۹. مقایسه عملکرد سه آشکارساز (GLR)UMPI، ECA-CA و RLS-CA در سناریوی آشکارسازی شماره ۲

جدول ۲. مشخصات اهداف در سناریوی شماره ۲ ( $s_2$ )

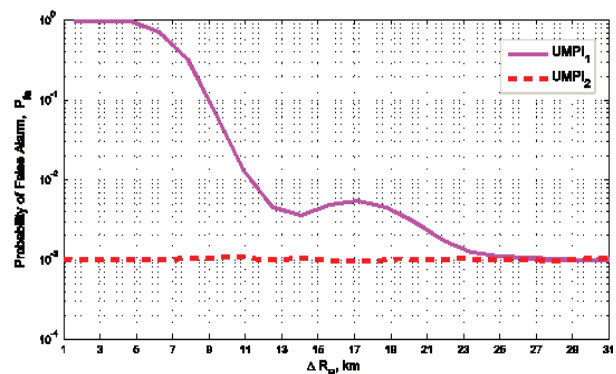
اهداف	$T_1$	$T_2$	$T_3$	$T_4$
$R_B, km$	۱۲.۵	۴۰.۶۲	۵۳.۱۲	۱۲۹.۶۸
$f_b, Hz$	۷.۰۴	-۳۵.۲	-۳۵.۲	۸۲.۱۳
$SNR_{i_s}, dB$	-۳۱	-۲۸	-۳۳	-۳۰

دید مقاله مرجع [۸] یک هدف با  $SNR_i = -26dB$  تحت هر سیگنال‌یابی، یک هدف ضعیف تلقی می‌شود و نیازی به حذف آن برای آشکارسازی اهداف دیگر نیست. همان‌گونه که در شکل ۷ نشان داده شده، که یک هدف با توان کمتر از مقدار فوق نیز می‌تواند احتمال هشدار کاذب را حتی تا فاصله ۲۲ کیلومتری خود بالا ببرد. بنابراین لازم است این هدف نیز به‌عنوان هدف تداخلی در ساختار آشکارسازی در نظر گرفته شود.



شکل ۷. احتمال هشدار کاذب،  $P_{fa}$ ، بر حسب  $\Delta R_B$  در آشکارسازهای ECA-CA و RLS-CA به ازای تنظیم آستانه براساس  $p_{fa} = 10^{-3}$

در شکل ۸، به مقایسه  $P_{fa}$  در آشکارساز UMPI<sub>k</sub> (یا GLP<sub>k</sub>) پرداخته شده است. توجه شود اندیس K در آشکارساز UMPI<sub>k</sub> معرف تعداد اهداف کل مورد بررسی در آشکارسازی می‌باشد که (K-1) آنها اهداف تداخلی هستند. همان‌طور که مشاهده می‌شود، آشکارساز UMPI<sub>1</sub>،  $P_{fa}$  سیستم را تا حدود  $\Delta R_B = 27km$  تحت تأثیر خود قرار می‌دهد؛ در حالی که آشکارساز UMPI<sub>2</sub>،  $P_{fa}$  سیستم را به مقدار تنظیم‌شده در سیستم می‌رساند. طبق نتایج این شکل، به‌خوبی لزوم در نظر گرفتن اهداف تداخلی در مسئله آشکارسازی نشان داده



شکل ۸. احتمال هشدار کاذب،  $(P_{fa})$ ، بر حسب  $\Delta R_B$  در آشکارسازهای UMPI<sub>1</sub>(GLR<sub>1</sub>) و UMPI<sub>2</sub>(GLR<sub>2</sub>) در حضور یک هدف تداخلی در داپلر

دریافتی در کانال‌های مراقبت و مرجع بیان گردد. در این راستا، دو دسته الگوریتم پردازشی موجود در مقالات معرفی شد و برای اولین بار به مقایسه آنها در قالب دو معیار احتمال آشکارسازی و احتمال هشدار کاذب پرداخته شد. در این بررسی‌ها سعی شد با شبیه‌سازی‌های متعدد و در نظر گرفتن نکات عملی، به مقایسه دو دسته آشکارساز فوق پرداخته شود. نتایج شبیه‌سازی بیانگر این مطلب بود که آشکارساز UMPI دارای عملکرد به‌مراتب بهتر از آشکارسازهای ECA-CA و RLS-CA- هم از لحاظ تثبیت هشدار کاذب و هم از لحاظ احتمال آشکارسازی- می‌باشد. در این خصوص با طراحی دو سناریوی شبیه‌سازی، سعی شد لزوم نیاز به پردازش‌های پیچیده‌تر در سیستم‌های PBR به نسبت سیستم‌های راداری اکتیو متداول مشخص شود که دلیل عمده آن به مشخصات غیر راداری سیگنال‌های رادیو FM مربوط می‌شود که این مطالب نیز برای اولین بار در این مقاله گزارش شده است.

## ۶. مراجع

- [1] Griffiths, H. D., and Long, N. R., "Television Based Bistatic Radar", IEE Proceedings-Part F: Communications, Radar, and Signal Processing, vol. 133, No. 7, pp. 649-657, 1986.
- [2] Howland, P. E., "Target Tracking Using Television-Based Bistatic Radar", IEE Proceedings on Radar, Sonar and Navigation, vol. 146, No. 3, pp. 166-174, 1999.
- [3] Howland, P. E., Maksimiuk, D., and Reitsma, G., "FM Radio Based Bistatic Radar", IEE Proceedings on Radar, Sonar and Navigation, vol. 152, No. 3, pp. 107-115, 2005.
- [4] Saini, R., and Cherniakov, M., "DTV Signal Ambiguity Function Analysis for Radar Application", IEE Proceedings on Radar, Sonar and Navigation, vol. 152, No. 3, pp. 133-142, 2005.
- [5] Poullin, D., "Passive Detection Using Broadcasters (DAB, DVB) with COFDM Modulation", IEE Proceedings on Radar, Sonar and Navigation, vol. 152, No. 3, pp. 143-152, 2005.
- [6] Tan, D., Sun, H., Lui, Y., Lesturgie, M., and Chan, H., "Passive Radar Using Global System for Mobile Communication Signal: Theory, Implementation and Measurements", IEE Proceedings on Radar, Sonar and Navigation, vol. 152, No. 3, pp. 116-123, 2005.
- [7] Cherniakov, M., "Space-Surface Bistatic Synthetic Aperture Radar Prospective and Problems", IEEE 2002 Radar Conference, Edinburgh, pp. 22-25, 2002.
- [8] Colone, F., O'Hagan, D.W., Lombardo, P., and Baker, C. J., "A Multistage Processing Algorithm for Disturbance Removal and Target Detection in Passive Bistatic Radar", IEEE Trans. on Aerospace and Electronic Systems, vol. 45, No. 3, pp. 698-722, 2009.

در شبیه‌سازی‌های این قسمت،  $SNR_i$  (یا  $SNR_0$ ) هدف مورد آزمون طبق محور افقی شکل ۹ تغییر داده می‌شده و در حضور سایر اهداف با مشخصات جدول ۲ به آشکارسازی هدف تحت آزمون پرداخته می‌شود. همان‌طور که از بحث حذف کلاتر در الگوریتم RLS مشاهده شد، برای حذف کلاتر با داپلر غیر صفر لازم است  $\lambda_R$  در این الگوریتم، کوچک انتخاب شود. در شبیه‌سازی انجام‌شده در این قسمت، مقدار  $\lambda_R = 0.9995$  قرار داده شده است. در واقع در شکل ۹، به دو بحث اثرات اهداف تداخلی در آشکارسازی سلول‌های اطراف خود و اثر پارامترهای الگوریتم RLS در آشکارسازی اهداف فرکانس‌های غیر صفر مربوط به برد کلاتر، پرداخته شده است (در این شبیه‌سازی اهداف ۲ و ۳ نسبت به هم اهداف تداخلی می‌باشند). همان‌طور که مشاهده می‌شود، در آشکارساز UMPI تمامی اهداف با عملکرد یکسانی آشکارسازی می‌شوند و همواره نتایج آشکارسازی آنها بهتر از دو آشکارساز ECA-CA و RLS-CA می‌باشد. از طرفی، آشکارساز ECA-CA تضعیف کمی در آشکارسازی اهداف با داپلر کمتر از ۳۶Hz- را تجربه می‌کند، ولی روش RLS-CA هر چه فرکانس داپلر اهداف در بردهای کمتر از ۵۵km کمتر باشد، تلفات بیشتری را به آنها اعمال می‌کند. علاوه بر این مشاهده می‌شود، اثر اهداف تداخلی در کاهش احتمال آشکارسازی، در آشکارسازهای ECA-CA و RLS-CA به دلیل بهره بردن از آشکارسازهای محلی وجود دارد. به‌طور مثال، هدف شماره ۲ که توان آن از هدف شماره ۳ بیشتر است، بیشتر باعث افت عملکرد در آشکارسازی هدف شماره ۳ شده است. همچنین این شکل نشان می‌دهد، که برای اهداف خارج برد کلاتر، دو آشکارساز ECA-CA و RLS-CA عملکرد کاملاً یکسانی دارند. با توجه به نتایج شبیه‌سازی‌ها در این قسمت، می‌توان عملکرد ضعیف آشکارسازهای محلی نظیر ECA-CA و RLS-CA را در مقابل آشکارساز UMPI که بر اساس نظریه آشکارسازی به‌دست آمده است، به وضوح مشاهده نمود. از طرفی می‌بایست به این نکته توجه نمود که آشکارساز RLS-CA قابلیت حذف اهداف تداخلی را در ساختار خود ندارد. بنابراین از دید کاربردهای عملی با توجه به مشخصات غیر راداری سیگنال‌های رادیو FM، این آشکارساز توصیه نمی‌گردد. با توجه به اینکه در مرجع [۱۰] نشان داده شده است که مرتبه محاسباتی دو آشکارساز UMPI و ECA-CA یکسان است، بنابراین می‌توان آشکارساز UMPI را یک گزینه برای استفاده در سیستم‌های PBR دانست.

## ۵. نتیجه‌گیری

در مقاله حاضر سعی شد چارچوب پردازش‌های مورد نیاز در سیستم‌های PBR با نگاه عملی در قالب مدل‌سازی سیگنال‌های

- Constant Modulus Algorithm for Multipath Removal on the Reference Signal Exploited by Passive Bistatic Radar", IEE Proceedings on Radar, Sonar and Navigation, vol. 3, No. 3, pp. 253-264, 2009.
- [16] Colone, F., Cardinali, R., and Lombardo, P., "Cancellation of Clutter and Multipath in Passive Radar Using a Sequential Approach", IEEE Radar Conference, pp. 469-474, 2007.
- [17] Cardinali, R., Colone, F., Ferretti, C., and Lombardo, P., "Comparison of Clutter and Multipath Cancellation Techniques for Passive Radar", IEEE Radar Conference, Boston, MA, (March 2007)
- [18] Farhang-Boroujeny, B., Adaptive Filters Theory and Application, John Wiley & Sons, Inc., 1998.
- [19] Zaimbashi, A., Derakhtian, M., and Sheikhi, A., "Multiband Coherent Passive Bistatic Radar Detection to Improve Target Range Resolution", Submitted to IEEE Trans. on Signal Processing (Under Review).
- [20] Billingsley, J. B., Low-Angle Land Clutter Measurements and Empirical Models, Inst. of Engineering & Technology, 2002.
- [9] Griffiths, H. D., "Passive Bistatic Radar", NATO-OTAN, vol. 133, 1-22
- [10] Zaimbashi, A., Derakhtian, M., and Sheikhi, A., "GLRT-Based CFAR Detection in Passive Bistatic Radar", IEEE Trans. on Aerospace and Electronic Systems, vol. 49, No. 1, pp. 134-159, 2013.
- [11] Kulpa, K. S., and Czekala, Z., "Masking Effect and its Removal in PCL Radar", IEE Proceedings on Radar, Sonar and Navigation, vol. 152, No. 3, pp. 174-178, 2005.
- [12] Zaimbashi, A., Derakhtian, M., and Sheikhi, A., "Invariant Target Detection in Multiband FM-Based Passive Bistatic Radar", IEEE Trans. on Aerospace and Electronic Systems, 2014.
- [13] Tsai, P. E., Ebrahim, K., Gunther Lange, G., Paichard, Y., and Inggs, M., "Null Placement in a Circular Antenna Array for Passive Coherent Location Systems", IEEE Radar Conference, pp. 1140-1143, 2010.
- [14] Zaimbashi, A.: 'Target Detection in Passive Radars Based on Commercial FM Radio Signals', P.h.D. thesis, Shiraz University, Iran, 2013.
- [15] Colone, F., Cardinali, R., and Lombardo, P., Crognale, O., Cosmi, A., Lauri, A., and Bucciarelli, T., "Space-Time

---

## **Evaluation of Detection Performance of Passive Bistatic Radar Detectors based on Commercial FM Radio Signals**

**A. Zaimbashi<sup>\*</sup>, A. Sheikhi, M. Derakhtian**

<sup>\*</sup>Shahid Bahonar University of Kerman

(received: 07/03/2013, Accepted: 01/14/2013)

### **Abstract**

This paper addresses the signal processing principles in passive bistatic radar (PBR) systems. In this case, the detection problem in passive radar systems based on FM radio signals is investigated in the presence of system noise, clutter/multipath, direct signal and interfering target signals. To this light, two types of detectors are studied. In the first one, which is based on intuitive sense and does not have any optimum claim, we examine two detectors. In the second type detector, which is based on detection theory, the detection problem is solved with optimum property out of invariant tests. For the first time, in this paper, the performance of above detectors based on detection probability and false alarm rate probability have been simultaneously compared. This makes it possible to find the advantages and disadvantages of two investigated detectors.

**Keywords:** Passive Bistatic Radar, FM Radio, Detection, Clutter, Interfering Target.