

بهبود آشکارسازی اهداف متموج با استفاده از افزایش حد تفکیک در رادارهای فرکانس پله‌ای

محدثه حسن‌شاهی^{*}، محسن فلاح^۲، رضا محسنی^۳

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، ۲- استادیار، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، ۳- استادیار، دانشگاه صنعتی شیراز
(دریافت: ۱۳۹۲/۰۳/۰۷، پذیرش: ۱۳۹۲/۰۵/۰۷)

چکیده

یکی از مشکلات آشکارسازی اهداف توسط رادارها، تغییر سطح مقطع راداری هدف، به‌خاطر تغییر زاویه دید آن است که به آن تموج هدف گفته می‌شود. در این مسئله که کاملاً وابسته به شکل ظاهری هدف و طول موج ارسالی رادار بوده، ممکن است باعث افت شدید در آشکارسازی هدف گردد. یکی از راهکارهای مقابله با این پدیده، افزایش حد تفکیک رادار یا بهبود قدرت فاصله‌سنجی آن می‌باشد. از جمله سیگنال‌هایی که جهت دستیابی به حد تفکیک بالا در رادار استفاده می‌شود، سیگنال‌های پالسی با فرکانس پله‌ای (SFR) می‌باشند. در این مقاله، پس از معرفی این رادارها و بیان نحوه دستیابی به حد تفکیک بالا، به بررسی چگونگی بهبود قدرت آشکارسازی اهداف متموج، در رادارهای با فرکانس پله‌ای می‌پردازیم. در این راستا، ابتدا سه روش مختلف جهت مدل‌سازی اهداف توزیع شده در برد، معرفی کرده و سپس دو ساختار آشکارساز را جهت آشکارسازی این اهداف پیشنهاد می‌دهیم. در نهایت با بررسی منحنی عملکرد آشکارسازی، نشان خواهیم داد که توزیع شدن هدف که با افزایش حد تفکیک رادار محقق می‌شود، می‌تواند افت آشکارسازی ناشی از تموج هدف را به‌طور کامل جبران نماید.

واژگان کلیدی: رادارهای فرکانس پله‌ای، تموج هدف، حد تفکیک در برد، اهداف گسترده در برد.

۱. مقدمه

اطلاعات اکوهای نقاط هدف را با هم ترکیب نموده و لذا به کیفیت آشکارسازی بهتری دست یافت. در مراجع مختلف از این پردازش تحت عنوان آشکارسازی اهداف توزیع شده در برد یاد می‌شود. در خصوص آشکارسازی اهداف توزیع شده در برد از سال ۱۹۷۱ تا کنون تحقیقات زیادی انجام شده است که از آن جمله می‌توان مراجع [۴] تا [۱۵] را نام برد.

برخی از این مراجع آشکارسازی تک پالس را در حضور تداخل گوسی یا غیر گوسی مدنظر قرار داده اند و برخی دیگر به‌منظور آشکارسازی بهتر هدف، ساختار آشکارساز را بر اساس چندین پالس دریافتی از هدف پایه‌گذاری نموده‌اند. مباحث مطرح شده در این مراجع عمدتاً مستقل از نوع سیگنال ارسالی بوده و معمولاً بر روی خروجی سلول‌های فاصله با حد تفکیک بالا اعمال می‌گردند.

از جمله پرکاربردترین سیگنال‌هایی که جهت دستیابی به حد تفکیک بالا در رادار استفاده می‌شود، سیگنال‌های پالسی با فرکانس پله‌ای (SFR) می‌باشند [۴-۷].

از مسائل مهم در آشکارسازی اهداف متحرک توسط رادارها، بحث تموج هدف یا تغییر سطح مقطع راداری هدف به‌خاطر تغییر زاویه دید آن است. این مسئله که کاملاً وابسته به شکل ظاهری هدف و طول موج ارسالی رادار بوده، می‌تواند باعث افت شدید در آشکارسازی هدف گردد. زیرا اکوی مربوط به نقاط مختلف بازتاب‌کننده هدف در لحظات مختلف با تأخیرها و اختلاف فازهای مختلف (تصادفی) وابسته به زاویه دید هدف، جمع شده و باعث تغییر در دامنه سیگنال هدف می‌شوند [۱-۳].

یکی از راهکارهای مقابله با این پدیده، افزایش حد تفکیک رادار یا بهبود قدرت فاصله‌سنجی آن می‌باشد. افزایش حد تفکیک باعث می‌شود، اکوی نقاط مختلف هدف در سلول‌های فاصله مختلف قرار گرفته و لذا از جمع شدن تصادفی آنها جلوگیری شود [۱]. این مسئله باعث می‌شود که بتوان در بخش پردازش سیگنال به نحو مناسب‌تری

فرض کنید سیگنال ارسالی مطابق رابطه زیر باشد:

$$X_t = A_1 \cos 2\pi(f_0 + n\Delta f)t \quad n=0,1,2,\dots,N-1 \quad (2)$$

در این صورت سیگنال دریافتی از هدفی در فاصله R ، برابر است با:

$$X_r = A_2 \cos 2\pi(f_0 + n\Delta f) \left(t - \frac{2R}{c}\right) \quad n=0,1,2,\dots,N-1 \quad (3)$$

که در این رابطه c سرعت نور است. در گیرنده همانند رادارهای پالسی ساده، از سیگنال دریافتی با فرکانسی متناسب، با عکس عرض پالس یا $1/\tau$ نمونه برداری شده و سلول بندی فاصله انجام می گیرد. همان طور که می دانیم، در این صورت با توجه به عرض پالس و فرکانس نمونه برداری انتخاب شده، به دقت و حد تفکیک $c\tau/2$ دست پیدا می کنیم. در ادامه، هدف به کارگیری یک الگوریتم پردازش سیگنال مناسب، جهت دستیابی به حد تفکیک کوچکتر از مقدار $c\tau/2$ می باشد. این الگوریتم از تغییرات فاز سیگنال دریافتی در هر سلول فاصله در پالس های متوالی استفاده می نماید که ناشی از تغییرات فرکانس پالس های ارسالی رادار می باشد. فاز سیگنال دریافتی (پس از نمونه برداری) در سلول فاصله، مربوط به یک هدف ساکن در پالس های متوالی، برابر است با:

$$\phi_n = \frac{4\pi f_0 R}{c} + 2\pi \underbrace{\frac{\Delta f}{T} \frac{2R}{c}}_{f_s} (nT) \quad (4)$$

در روابط فوق T پریود تکرار پالس یا عکس PRF می باشد. همان طور که از رابطه (۴) برمی آید، فاز سیگنال خروجی در N پالس متوالی، دارای یک ترم ثابت و یک ترم متغیر می باشد. اگر ترم متغیر فاز را در نظر بگیریم، به ازای N پالس، N فاز مختلف وجود دارد که نمونه های فاز یک سیگنال سینوسی با فرکانس f_s در زمان های nT هستند.

$$f_s = \frac{2\Delta f}{cT} R \quad (5)$$

مطابق رابطه فوق فرکانس f_s به فاصله هدف مربوط است و با محاسبه این فرکانس فاصله هدف با دقت خوبی محاسبه می گردد. بدین منظور با قرار دادن نمونه های سیگنال مربوط به پالس های متوالی در یک بردار و گرفتن DFT از آنها فرکانس f_s تخمین زده می شود و از روی آن اطلاعات فاصله با دقت بالا استخراج می گردد. این روال عملکرد در شکل ۲ نمایش داده شده است. با توجه به اینکه برای هر تصمیم گیری در پردازش، از N پالس استفاده می شود، از این رو زمان مشاهده سیگنال، برابر با NT بوده و لذا حد تفکیک فرکانسی FFT برابر با $1/NT$ می باشد. در این صورت حد تفکیک مکانی، برابر مقدار زیر خواهد بود:

$$R = \frac{cT}{2\Delta f} f_s \Rightarrow \Delta R = \frac{cT}{2\Delta f} \Delta f_s = \frac{c}{2N\Delta f} \quad (6)$$

بنابراین پهنای باند مؤثر یا $N\Delta f$ تعیین کننده حد تفکیک رادار می باشد.

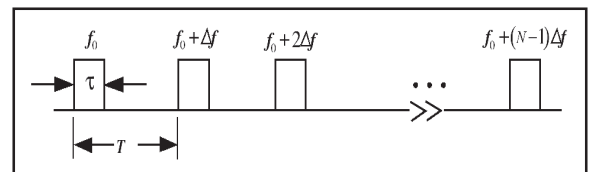
در این مقاله، پس از معرفی این رادارها و بیان نحوه دستیابی به حد تفکیک بالا با آنها، به بررسی چگونگی بهبود قدرت آشکارسازی اهداف متموج در این رادارهای می پردازیم. برای این منظور ابتدا نحوه مدل سازی اهداف گسترده در برد، در رادارهای با فرکانس پله ای ارائه می شود و سپس دو الگوریتم آشکارسازی بر پایه این مدل ها جهت آشکارسازی هدف، مورد استفاده قرار می گیرند. لازم به ذکر است که در اکثر تحقیقاتی که در خصوص آشکارسازی اهداف توزیع شده در برد ارائه شده است مدل آماری که برای توزیع مکانی هدف در نظر گرفته شده است مدل رایلی است [۴-۱۵] اما در این مقاله ما دو مدل آماری دیگر یعنی مدل رایس و یک نواخت را نیز معرفی نموده و عملکرد آشکارسازها را در حضور این مدل ها برای اهداف بررسی می کنیم.

نتایج شبیه سازی ها نشان می دهند که در صورت زیاد بودن حد تفکیک رادار و گسترده شدن هدف در سلول های با فاصله مختلف، می توان افت آشکارسازی ناشی از تموج را که در رادارهای مرسوم اتفاق می افتد، تا حد زیادی جبران نمود و همچنین اهداف با سطح مقطع راداری پایین را کشف کرد. البته این بهبود آشکارسازی وابسته به توزیع مکانی هدف متفاوت می باشد.

۲. معرفی سیگنال فرکانس پله ای و الگوریتم پردازش سیگنال مربوطه

استفاده از شکل موج فرکانس پله ای در رادارهای با حد تفکیک در برد بالا، توسط راتنبرگ^۱ در سال ۱۹۶۸ پیشنهاد گردید [۲۰]. اما شروع تحقیقات در خصوص استفاده عملی از این رادارها به دهه ۸۰ برمی گردد [۲۱].

شکل موج ارسالی رادار فرکانس پله ای مطابق شکل ۱ شامل گروهی از N پالس می باشد که فرکانس حامل این پالسها پی در پی تغییر داده می شود. به عبارتی این شکل سیگنال، همانند شکل سیگنال رادار پالسی ساده می باشد، با این تفاوت که فرکانس حامل هر پالس در یک گروه N پالسی به اندازه Δf تغییر می کند.

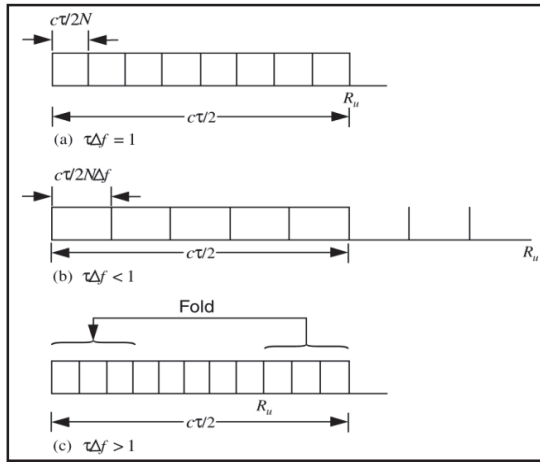


شکل ۱. سیگنال فرکانس پله ای

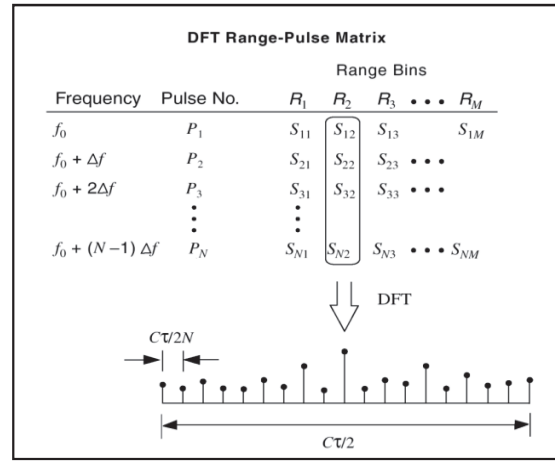
$$f_n = f_0 + n\Delta f \quad , \quad n=0,1,2,\dots,N-1 \quad (1)$$

همان طور که نشان داده می شود، اگر از سیگنال دریافتی در خروجی گیرنده همدوس با فرکانس $1/\tau$ که در آن τ عرض پالس است نمونه برداری شود و سپس نمونه های مربوط به هر سلول فاصله در N پالس متوالی، کنار هم قرار داده شده و پردازش شوند، می توان به حد تفکیک کمتر از عرض پالس دست یافت [۱-۲].

¹ Ruttenburg



شکل ۳. حالت‌های مختلف فاصله‌یابی در رادار فرکانس پله‌ای بر حسب مقدار $\tau\Delta f$



شکل ۴. الگوریتم افزایش حد تفکیک در رادار فرکانس پله‌ای

مباحث قبل مربوط به حالتی است که هدف ساکن بوده یا دارای داپلر صفر باشد. در صورتی که هدف متحرک با سرعت v باشد، فاصله هدف در پالس‌های متوالی مطابق رابطه زیر تغییر می‌کند:

$$R_n = R_0 + vnT \quad (10)$$

به همین دلیل فاز سیگنال خروجی به فرم زیر در می‌آید:

$$\phi_n = \frac{4\pi f_0 R_0}{c} + 2\pi \underbrace{\frac{\Delta f}{T} \frac{2R_0}{c}}_{f_s} nT + 2\pi \underbrace{\frac{2vf_0}{f_d} nT}_{f_d} + 2\pi \underbrace{\frac{\Delta f}{T} \frac{2vnT}{c}}_{spread} nT \quad (11)$$

همان‌طور که دیده می‌شود، در این حالت دو ترم دیگر ظاهر شده‌اند که یکی ناشی از سرعت هدف و دیگری اثر متقابل سرعت هدف و تغییر فرکانس می‌باشد. ترم سوم که فرکانس داپلر ناشی از حرکت هدف است، همانند یک شیفت فرکانسی ثابت با فرکانس مطلوب f_s جمع می‌شود. این امر باعث یک شیفت از فاصله واقعی هدف می‌شود. این شیفت فاصله، برابر است با:

$$R_s = \frac{cT}{2\Delta f} f_d = \frac{vTf_0}{\Delta f} \quad (12)$$

نسبت این شیفت فاصله به حد تفکیک در برد یا در واقع تعداد سلول فاصله‌ای که به واسطه داپلر هدف شیفت می‌یابد عبارت است از:

$$L = \frac{R_s}{\Delta R} = \frac{2vf_0NT}{c} = \frac{2vNT}{\lambda} = f_d NT \quad (13)$$

ترم چهارم این رابطه ($2vn\Delta f / c$)، اثر توأم سرعت هدف و تغییرات فرکانس را بر فاز سیگنال در برمی‌گیرد. به عبارتی سیگنال دریافتی از هدف متحرک، به دلیل پرش فرکانس، به جای یک مؤلفه، شامل N مؤلفه فرکانسی می‌باشد (البته فقط یک نمونه از هر کدام از این مؤلفه‌های فرکانسی در یک مجموعه N پالسی وجود دارد).

از طرفی با توجه به اینکه، ماکزیمم فرکانس f_s قابل اندازه‌گیری با DFT، برابر $1/T$ است، برد بدون ابهام روش فاصله‌یابی مذکور برابر است با:

$$R_u = \frac{c}{2\Delta f} \quad (7)$$

با مقایسه دو رابطه اخیر داریم:

$$\Delta R = \frac{c}{2N\Delta f} = \frac{c\tau/2}{N\tau\Delta f} = \frac{R_u}{N} \quad (8)$$

این رابطه بدین معنی است که با اعمال DFT، عرض سلول فاصله ($c/2N\Delta f$)، به $N\tau\Delta f$ قسمت مختلف با حد تفکیک $c/2N\Delta f$ تقسیم می‌گردد. این دقیقاً معادل با فشرده‌سازی پالس با نسبت $N\tau\Delta f$ می‌باشد. نحوه عملکرد الگوریتم بیان شده برای حالتی که $\Delta f = \frac{1}{\tau}$ باشد، در شکل ۳ نشان داده شده است.

در این حالت، عرض هر سلول فاصله با اعمال پردازش بیان شده، به N قسمت مساوی تقسیم می‌گردد. البته علاوه بر این حالت، وابسته به مقدار $\tau\Delta f$ ، دو حالت کلی دیگر نیز قابل تصور است. این حالت‌ها در شکل ۳ با هم مقایسه شده‌اند.

همان‌طور که از این شکل نمایان است، در حالتی که $\tau\Delta f < 1$ باشد، حد تفکیک به نسبت کمتری بهبود می‌یابد، ولی با ابهام در فاصله‌یابی مواجه نمی‌شویم و در وضعیتی که $\tau\Delta f > 1$ است، علی‌رغم اینکه حد تفکیک به نسبت زیادی بهبود می‌یابد، به دلیل کمتر بودن R_u ، نسبت به ماکزیمم فاصله ($c\tau/2$) در فاصله‌یابی ابهام بوجود می‌آید و لذا امکان فاصله‌یابی با دقت بالا در این حالت وجود ندارد.

بنابراین برای فاصله‌یابی بدون ابهام بایستی R_u بزرگتر یا مساوی $c\tau/2$ باشد یا به عبارتی داشته باشیم:

$$\tau\Delta f \leq 1 \quad (9)$$

که می‌توانیم سیگنال هدف را مطابق زیر در نظر بگیریم که در آن S یک متغیر تصادفی مختلط با شرط $E\{|S|^2\} = P_r$ می‌باشد. یعنی تک هدف نقطه‌ای فوق می‌تواند دارای تموج باشد اما باید متوسط توان آن معادل با همان مقدار توان به‌دست آمده از معادله رادار باشد.

$$x_{\text{Target}} = S \times \exp\left(j 2\pi(f_0 + n\Delta f)(t - \frac{2R}{c})\right) \quad (16)$$

$$n = 0, 1, 2, \dots, N - 1$$

در واقع تغییر تصادفی سطح مقطع راداری هدف که تحت عنوان تموج هدف^۵ از آن یاد می‌شود یکی از مسائلی است که باید در مدل‌سازی سیگنال هدف لحاظ گردد. به عبارتی به دلیل چند نقطه‌ای بودن اهداف، اکوی بازگشتی از آنها با اختلاف فازها و دامنه‌های مختلفی جمع خواهند شد که این فازها به فرکانس و فاصله آنها از رادار وابسته است.

این اختلاف فازها به دلیل حرکت هدف و تغییر زاویه دید هدف نسبت به رادار، به‌طور مداوم عوض شده و مدل‌های آماری مختلفی را به‌صورت تصادفی ایجاد می‌کنند.

نتایج اندازه‌گیری‌های عملی که در مراجع مختلف ارائه شده است، بیان می‌کند که در حالت کلی، مقدار سطح مقطع راداری هدف با تقریب خوبی با تابع چگالی احتمال نمایی، به‌صورت زیر قابل مدل‌سازی خواهد بود:

$$P(\sigma) = \frac{1}{\sigma_{av}} e^{-\frac{\sigma}{\sigma_{av}}} \quad (17)$$

که در آن σ مقدار RCS و σ_{av} مقدار میانگین RCS هدف را مشخص می‌کند. این مدل تحت عنوان مدل سوئرلینگ نوع اول و دوم شناخته شده است و معادل است با توزیع رایلی برای دامنه سیگنال:

$$P(s, \sigma) = \frac{s}{\sigma^2} e^{-\frac{s^2}{2\sigma^2}} \quad (18)$$

تفاوت مدل‌های سوئرلینگ نوع اول و دوم، در همبستگی زمانی نمونه‌هاست؛ که برای سوئرلینگ نوع دوم نمونه‌ها ناهمبسته هستند اما برای سوئرلینگ نوع اول یک همبستگی بین نمونه‌های سیگنال هدف وجود دارد [۱۶].

۳-۲. مدل‌سازی اهداف توزیع شده در برد:

اگر حد تفکیک رادار زیاد باشد، باعث می‌شود که اکوی هدف در چند سلول فاصله مختلف دریافت شود. در این صورت می‌توان سیگنال هدف را منجر اثرات تکه‌های نقطه‌ای آن به شکل زیر نمایش داد:

این گسترش فرکانسی ($2vN\Delta f/c$) زمانی که توسط DFT پردازش شود، منجر به گسترش مکانی vNT می‌گردد. گسترش مکانی مذکور موجب تضعیف حد تفکیک و دقت فاصله‌سنجی و هم‌چنین تلفات در توان سیگنال می‌شود [۱-۲].

دلیل ایجاد گسترش مکانی این است که در چنین شرایطی دیگر DFT پردازش بهینه نمی‌باشد؛ بدین دلیل در برخی از مراجع به‌جای DFT، از تبدیلات مناسب با پایه‌های غیر سینوسی نظیر تبدیل موجک^۱ جهت پردازش استفاده می‌گردد [۲۲-۲۶].

۳. مدل‌سازی اهداف در رادارهای فرکانس پله‌ای

در این بخش نحوه مدل‌سازی سیگنال دریافتی از اهداف، در رادار فرکانس پله‌ای معرفی می‌شود. با توجه به اینکه هدف اصلی ما بررسی تأثیر زیاد شدن حد تفکیک، بر عملکرد آشکارسازی است، مدل هدف را دو حالت مختلف نشان می‌دهیم؛ حالتی که حد تفکیک رادار پایین است و لذا هدف در یک سلول فاصله قرار می‌گیرد یا به عبارتی هدف نقطه‌ای^۲ و حالتی که حد تفکیک رادار بالا است و لذا یک هدف در چندین سلول فاصله رادار قرار می‌گیرد یا به عبارتی هدف توزیع شده در برد^۳.

همان‌طور در بخش قبل گفته شد رادار فرکانس پله‌ای توسعه یافته رادار پالسی معمولی است که می‌توان با تنظیم پله‌های فرکانسی و پهنای باند کل حد تفکیک آن را تنظیم کرد. بنابراین تفاوت آشکارسازی هدف نقطه‌ای و هدف توزیع شده در رادار فرکانس پله‌ای، همان تفاوت رادار فرکانس پله‌ای با حد تفکیک بالا و رادار معمولی است که این مسئله را در بخش بعد بررسی می‌کنیم.

۳-۱. مدل‌سازی اهداف نقطه‌ای

فرض کنیم هدفی در فاصله R نسبت به رادار قرار گرفته باشد، در این صورت براساس معادله رادار یا مطابق رابطه زیر توان متوسط دریافتی از این هدف به‌دست می‌آید که متناسب با سطح مقطع راداری^۴ متوسط آن (σ) می‌باشد.

$$P_r = \frac{P_{Tx} G^2 \lambda^2 \times \sigma}{(4\pi)^3 R^4 L} \quad (14)$$

حال یک رادار فرکانس پله‌ای را در نظر می‌گیریم که در آن سیگنال هدف مطابق رابطه زیر ساخته می‌شود.

$$x_{\text{Target}} = \left(\sqrt{P_r} \times \exp(j\varphi_{\text{random}})\right) \exp\left(j 2\pi(f_0 + n\Delta f)(t - \frac{2R}{c})\right) \quad (15)$$

$$n = 0, 1, 2, \dots, N - 1$$

در عبارت فوق به‌جز یک فاز تصادفی برای جذر توان (φ)، مقدار توان، ثابت و بدون تموج در نظر گرفته شده است. این در حالی است

⁵ Fluctuation

¹ Wavelet Transform

² Point Target

³ Range Spread Target

⁴ Radar Cross Section (RCS)

حال مسئله مهم، انتخاب توزیع‌های مناسبی برای Z_ℓ -هاست که به بیشتر با واقعیت تطبیق داشته باشد و نیز پس از ترکیب $S = \sum_{\ell=1}^L Z_\ell$ برای هدف نهایی یک تموج واقعی را ایجاد کند. در ادامه به معرفی چند توزیع و روش ساختن Z_ℓ -ها خواهیم پرداخت که هر کدام از این روش‌ها بیانگر یک نوع گسترش نقاط منعکس کننده هدف در طول آن می‌باشد.

روش اول: هدف توزیع شده رایلی

در این حالت فرض می‌کنیم دامنه Z_ℓ -ها دارای توزیع رایلی است؛ یعنی:

$$Z_\ell = X_\ell + jY_\ell, \quad \{X_\ell, Y_\ell\} \sim Normal(0, \sigma^2) \Rightarrow \sigma = \sqrt{\frac{P}{2L}} \quad (25)$$

روش دوم: هدف توزیع شده یک‌نواخت

در این حالت فرض می‌کنیم دامنه Z_ℓ -ها دارای توزیع یک‌نواخت است؛ یعنی:

$$Z_\ell = X_\ell + jY_\ell = U_\ell \exp(j\phi_\ell), \quad U_\ell \sim Uniform(a, b) \quad \phi_\ell \sim Uniform(0, 2\pi) \quad (26)$$

در این جا لازم است که یک فاکتور دیگر جهت محاسبه دو متغیر a و b در نظر گرفته شود. در این حالت فرض می‌کنیم که نسبت ماکزیمم توان Z_ℓ به مینیمم توان آن، داده شده باشد. این کمیت معرف میزان تغییرات توان نقاط منعکس کننده هدف اصلی است. به اختصار، این پارامتر را $Max2Min$ می‌نامیم و خواهیم داشت:

$$Max2Min := \frac{\max E\{|Z_\ell|^2\}}{\min E\{|Z_\ell|^2\}} = \frac{b^2}{a^2} \quad (27)$$

از طرف دیگر با توجه به اینکه متوسط Z_ℓ صفر می‌باشد خواهیم داشت:

$$P = L \times E\{|Z_\ell|^2\} = L \times E\{U_\ell^2\} = L \times \frac{a^2 + b^2 + ab}{3} \quad (28)$$

از ترکیب دو رابطه فوق نیز خواهیم داشت:

$$\begin{cases} a = \sqrt{\frac{3P/L}{1 + Max2Min + \sqrt{Max2Min}}} \\ b = a \times \sqrt{Max2Min} \end{cases} \quad (29)$$

$$X_{Target} = \sum_{\ell=1}^L X_{Target, \ell} = \sum_{\ell=1}^L \left(\sqrt{P_\ell} \exp(j\phi_{random, \ell}) \exp \left(j 2\pi (f_0 + n \Delta f) \left(t - \frac{2R_\ell}{c} \right) \right) \right) \quad n = 0, 1, 2, \dots, N-1 \quad (19)$$

اگر توان سیگنال دریافتی را از هدف توزیع شده را با هدف نقطه‌ای، یکسان در نظر بگیریم، با مساوی قرار دادن رابطه فوق با رابطه (۱۵) خواهیم داشت:

$$\sqrt{P} \times \exp(j\phi_{random}) = \sum_{\ell=1}^L \left(\sqrt{P_\ell} \times \exp(j\phi_{random, \ell}) \exp \left(j 2\pi (f_0 + n \Delta f) \left(\frac{2(R - R_\ell)}{c} \right) \right) \right) \quad (20)$$

با توجه به اینکه فاز هدف نقطه‌ای ℓ -ام به فرم $\phi + 2\pi(f_0 + n\Delta f)\frac{2(R-R_\ell)}{c} - 2k\pi$ قابل بیان است با کمی اغماض می‌توان فرض کرد که اثرات متغیر با زمان ترم دوم تأثیری بر ماهیت تصادفی فاز نهایی نداشته و لذا رابطه زیر حاصل می‌شود.

$$S := \sqrt{P} \times \exp(j\phi) = \sum_{\ell=1}^L \sqrt{P_\ell} \times \exp(j\phi_\ell) =: \sum_{\ell=1}^L Z_\ell \quad (21)$$

بنابراین دامنه مختلط سیگنال هدف، مجموع L متغیر تصادفی $Z_\ell, \ell = 1, \dots, L$ است که با تغییرات خودشان تموج هدف را ایجاد می‌کنند و در کل، دارای توان متوسط P یا همان توان دریافتی از هدف طبق معادله رادار هستند.

در صورتی که آمارهای متغیرهای تصادفی Z_ℓ را مشابه فرض کنیم یعنی:

$$\begin{aligned} Z_\ell &= X_\ell + jY_\ell, \\ E\{X_\ell\} &= E\{Y_\ell\} = \mu, \\ Var\{X_\ell\} &= Var\{Y_\ell\} = \sigma^2 \end{aligned} \quad (22)$$

آنگاه روابط زیر برقرار است.

$$\begin{aligned} S &= A + jB, \\ E\{A\} &= E\{B\} = L\mu, \end{aligned} \quad (23)$$

$$Var\{A\} = Var\{B\} = L\sigma^2$$

$$\begin{aligned} P &= E\{|S|^2\} = Var\{S\} + |E\{S\}|^2 \\ &= 2L\sigma^2 + 2L^2\mu^2 \end{aligned} \quad (24)$$

توجه شود که در عبارت فوق ترم وابسته به σ در حکم توان AC و ترم وابسته به μ معرف توان DC می‌باشد، یعنی: $P_{AC} = 2L\sigma^2$ و $P_{DC} = 2L^2\mu^2$.

روش سوم: هدف توزیع شده رابیس

این روش مشابه روش اول است، با این تفاوت که متوسط متغیرهای مختلط گوسی، σ^2 نمی‌باشد و لذا نیاز به محاسبه دو پارامتر (μ, σ^2) خواهیم داشت. بنابراین نیاز به معرفی یک فاکتور دیگر نیز خواهیم داشت. در این حالت فرض می‌کنیم نسبت توان AC به توان DC رابیس داده شده باشد که به اختصار آن را $AC2DC$ می‌نامیم و خواهیم داشت:

$$AC2DC = \frac{P_{AC}}{P_{DC}} = \frac{2L\sigma^2}{2L^2\mu^2} = \frac{\sigma^2}{L\mu^2} \quad (30)$$

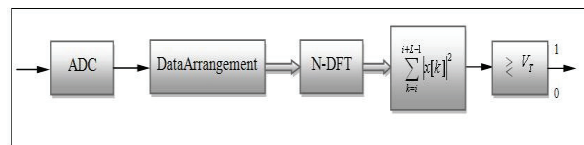
و لذا پارامترهای لازم مطابق زیر محاسبه می‌شوند:

$$\begin{cases} \mu = \frac{1}{L} \times \sqrt{\frac{P}{2(1+AC2DC)}} \\ \sigma = \mu \times \sqrt{AC2DC \times L} \end{cases} \quad (31)$$

۴. آشکارساز پیشنهادی جهت کشف اهداف توزیع شده

در برد

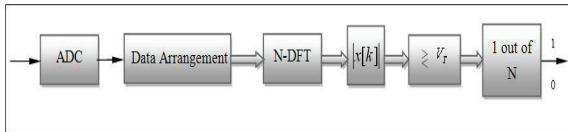
در مراجع مختلف، روش‌های مختلفی جهت آشکارسازی اهداف توزیع شده در برد ارائه شده است. این الگوریتم‌ها عمدتاً مستقل از نوع سیگنال ارسالی بوده و معمولاً بر روی خروجی سلول‌های فاصله با حد تفکیک بالا اعمال می‌گردند [۴-۱۵]. یکی از این روش‌ها که ما در این مقاله مورد بررسی قرار داده‌ایم روش آشکارساز انرژی است که حاصل جمع توان خروجی سلول‌های فاصله معادل با طول هدف محاسبه نموده و با سطح آستانه مقایسه می‌کند. به عبارتی این روش معادل با جمع‌بندی غیرهمدوس^۱ اکوهای نقاط مختلف هدف توزیع شده در برد می‌باشد. به دلیل ناشناخته بودن فاز نقاط مختلف هدف، استفاده از الگوریتم جمع‌بندی همدوس در این جا امکان‌پذیر نمی‌باشد. ساختار کلی این آشکارساز در شکل ۴ نشان داده شده است.



شکل ۴. بلوک دیاگرام ساختار آشکارساز انرژی برای کشف اهداف توزیع شده در برد در رادار فرکانس پله‌ای

یکی دیگر از روش‌های آشکارسازی اهداف توزیع شده در برد که در این مقاله مورد بررسی قرار گرفته روش آشکارساز باینری است که در

آن اندازه خروجی سلول‌های فاصله، به‌طور مستقل، با سطح آستانه مقایسه می‌شوند (مشابه با آشکارسازی اهداف نقطه‌ای) سپس در یک محدوده، فاصله معادل با طول هدف نتایج این آشکارسازی‌ها به‌صورت باینری با هم ترکیب می‌شوند. به عبارتی، این روش معادل با جمع‌بندی باینری اکوهای نقاط مختلف هدف توزیع شده در برد می‌باشد. ساختار کلی این آشکارساز مطابق شکل ۵ است.



شکل ۵. بلوک دیاگرام ساختار آشکارساز باینری برای اهداف توزیع شده در برد در رادار فرکانس پله‌ای

در این روش دامنه هر کدام از نقاط به‌طور جداگانه با سطح آستانه مقایسه شده و نتایج با هم جمع منطقی می‌شوند. بنابراین حتی اگر تنها دامنه یکی از نقاط نیز از سطح آستانه عبور کند، آشکارساز وجود هدف را اعلام می‌کند.

۵. نتایج شبیه‌سازی

در این بخش نتایج شبیه‌سازی الگوریتم‌های آشکارسازی فوق، جهت کشف اهداف نقطه‌ای و توزیع شده ارائه می‌گردد. همان‌طور که قبلاً اشاره شد، رادار فرکانس پله‌ای، توسعه یافته رادار پالسی معمولی است که می‌توان با تنظیم پله‌های فرکانسی و پهنای باند، کل حد تفکیک آن را تنظیم کرد.

بنابراین تفاوت آشکارسازی هدف نقطه‌ای و هدف توزیع شده در رادار فرکانس پله‌ای، همان تفاوت رادار فرکانس پله‌ای با حد تفکیک بالا و رادار پالسی معمولی است که در این بخش این مسئله را بررسی می‌کنیم.

برای اینکه بهبود آشکارسازی ناشی از افزایش حد تفکیک رادار را نشان دهیم؛ پس از مدل‌سازی اهداف توزیع شده در برد، آنها را یک بار تحت تابش رادار فرکانس پله‌ای با حد تفکیک پایین (LRR) قرار داده و بار دیگر از رادار فرکانس پله‌ای با حد تفکیک بالا (HRR) جهت آشکارسازی استفاده می‌کنیم. تفاوت SNR مورد نیاز جهت آشکارسازی هدف در این دو رادار، نمایانگر تأثیر افزایش حد تفکیک می‌باشد. انتظاری که داریم این است که؛ در حالتی که اهداف توزیع شده، با رادار دارای حد تفکیک پایین آشکارسازی می‌شوند باید منحنی عملکرد آشکارسازی مشابه با کشف هدف نقطه‌ای با تموج رایلی باشد، که شبیه‌سازی‌ها این مسئله را تأیید می‌کنند.

بر این اساس مشخصاتی که برای رادار SFR در دو حالت مختلف در شبیه‌سازی‌ها، در نظر گرفته شده مطابق جدول ۱ است.

^۱ Non Coherent Integration

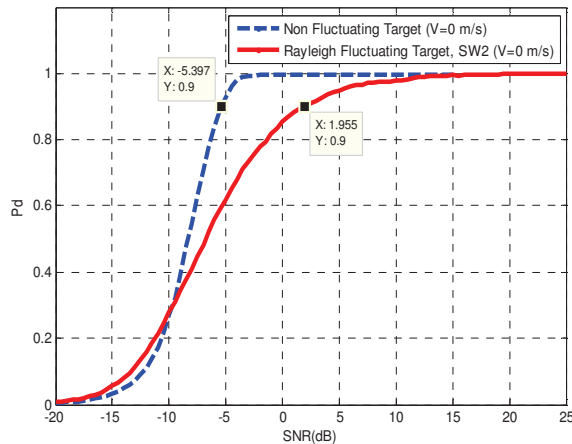
جدول ۱. مشخصات رادارهای SFR مورد استفاده در شبیه‌سازی‌ها

ردیف	پارامتر	رادار با حد تفکیک پایین (کشف هدف نقطه‌ای)	رادار با حد تفکیک بالا (کشف هدف توزیع شده)
۱	تعداد پالس یا پله‌های فرکانسی (N)	64	64
۲	عرض پالس (τ)	10 μ s	0.5 μ s
۳	گام تغییر فرکانس (Δf)	0.1MHz	2MHz
۴	نرخ تغییر فرکانس (PRF)	3KHz	3KHz
۵	حد تفکیک فاصله	$c\tau/(2N) = c/(2N\Delta f) = 23.5m$	$c\tau/(2N) = c/(2N\Delta f) = 1.17m$
۶	فرکانس مرکزی	10GHz	10GHz
۷	فاصله مرکز هدف (R_0)	10Km	10Km
۸	تعداد نقاط هدف	1	10

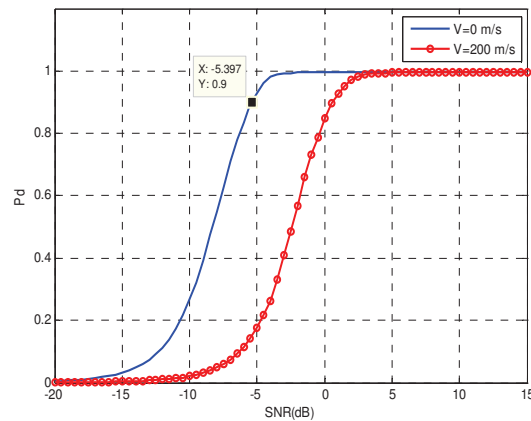
در این شکل قدرت آشکارسازی هدف نقطه‌ای ساکن، یکی بدون متموج و دیگری دارای متموج با هم مقایسه شده‌اند. همان‌طور که این شکل نشان می‌دهد برای $Pd=90\%$ متموج هدف باعث تلفاتی در حدود 7.3dB در آشکارسازی می‌شود. در ادامه نشان می‌دهیم که چگونه بهبود حد تفکیک رادار می‌تواند این تلفات آشکارسازی ناشی از متموج هدف را کاهش دهد.

۵-۱. آشکارسازی اهداف نقطه‌ای

در شکل ۶، منحنی عملکرد آشکارسازی برای رادار SFR با فرض $Pfa=10^{-3}$ برای هدف ساکن و هدف با سرعت ۲۰۰ متر بر ثانیه رسم شده است. در این شبیه‌سازی، هدف بدون متموج در نظر گرفته شده است. همان‌طور که دیده می‌شود سرعت هدف بر آشکارسازی تأثیر داشته و برای رسیدن به یک احتمال آشکارسازی خاص، نیاز به SNR بالاتری می‌باشد.



شکل ۷. مقایسه منحنی آشکارسازی هدف بدون متموج و هدف با متموج نوع سوئرلینگ ۲

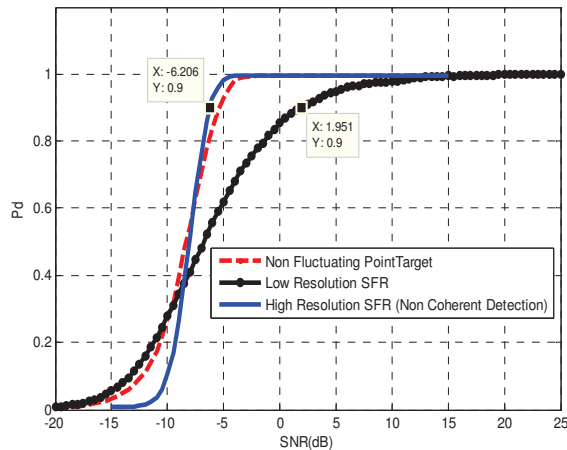


شکل ۸. مقایسه منحنی آشکارسازی اهداف ثابت و متحرک ($Pfa=10^{-3}$)

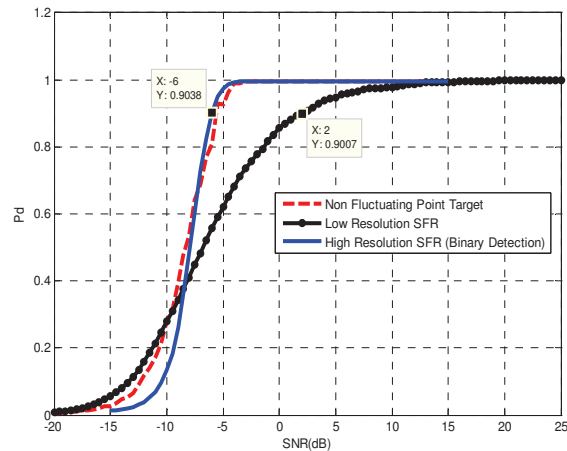
۵-۲. آشکارسازی اهداف توزیع شده

در ادامه، قدرت آشکارسازی انواع مختلف اهداف توزیع شده در برد را در رادارهای فرکانس پله‌ای مورد بررسی قرار می‌دهیم. تمامی منحنی‌های آشکارسازی در نرخ هشدار کاذب برابر $Pfa=10^{-3}$ ترسیم شده‌اند.

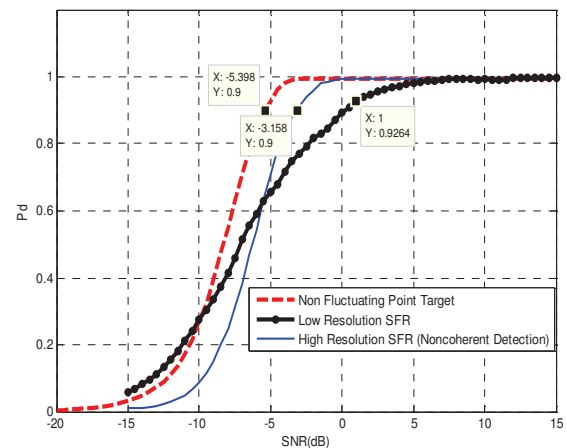
دلیل افت عملکرد آشکارساز در حالت متحرک بودن هدف این است که اکوی هدف در این شرایط در بین چند DFT پخش شده و لذا دامنه آن کاهش می‌یابد. لازم به ذکر است؛ که آشکارساز مورد استفاده جهت کشف هدف نقطه‌ای مطابق با دیاگرام بلوکی شکل ۴ با فرض طول هدف برابر ۱ است ($L=1$) در این حالت اگر هدف نقطه‌ای دارای متموج از نوع سوئرلینگ ۲ ($SW2$)، یعنی توزیع دامنه آن به صورت رابلی باشد، منحنی عملکرد آشکارسازی مطابق شکل ۷ می‌باشد.



شکل ۸. منحنی آشکارسازی هدف توزیع شده رایلی توسط آشکارساز انرژی و مقایسه آن با هدف نقطه‌ای غیرمتوج ($V=0\text{ m/s}$)



شکل ۹. منحنی آشکارسازی هدف توزیع شده رایلی توسط آشکارساز باینری و مقایسه آن با هدف نقطه‌ای غیرمتوج ($V=0\text{ m/s}$)



شکل ۱۰. منحنی آشکارسازی هدف توزیع شده یک‌نواخت توسط آشکارساز انرژی در مقایسه با اهداف نقطه‌ای غیرمتوج

۵-۲-۱. هدف توزیع شده رایلی

در شکل ۸ برای هدف توزیع شده رایلی منحنی عملکرد آشکارسازی برای رادار SFR با حد تفکیک بالا و رادار SFR با حد تفکیک پایین با هم مقایسه شده است. آشکارساز مورد استفاده در رادار با حد تفکیک بالا آشکارساز انرژی یا غیرهمدوس ساختار شکل ۴ بوده و جهت مقایسه، منحنی آشکارسازی هدف نقطه‌ای غیرمتوج نیز در شکل ترسیم شده است.

همان‌طور که دیده می‌شود، منحنی آشکارسازی هدف توسط رادار با حد تفکیک پایین دارای افت زیادی نسبت به هدف نقطه‌ای است. این مسئله به دلیل این است که اکوی نقاط مختلف هدف در یک سلول فاصله قرار می‌گیرند و باعث تموج در اکوی هدف می‌شوند (همان تموج سوئرلینگ نوع دوم).

مقایسه منحنی عملکرد آشکارسازی برای هدف توزیع شده یا آشکارساز رادار با حد تفکیک بالا (HRR)، نمایانگر بهبود در قدرت آشکارسازی بواسطه افزایش حد تفکیک است. این بهبود در آشکارسازی به گونه‌ای است که به‌طور کامل تلفات ناشی از تموج را جبران می‌کند ($\sim 8\text{ dB}$).

در شکل ۹ نیز برای آشکارساز باینری یعنی ساختار شکل ۵، منحنی آشکارسازی هدف توزیع شده در برد، به روش رایلی، در مقایسه با منحنی آشکارسازی هدف نقطه‌ای غیرمتوج و منحنی آشکارسازی همین هدف توسط رادار با حد تفکیک پایین نشان داده شده است. همان‌طور که می‌بینیم، در این روش آشکارسازی نیز، منحنی آشکارسازی هدف توزیع شده، بهبود یافته و برای رسیدن به یک احتمال آشکارسازی خاص، نیاز به SNR کمتری می‌باشد. هم‌چنین مشاهده می‌شود که عملکرد آشکارساز باینری بسیار نزدیک به آشکارساز انرژی می‌باشد.

۵-۲-۲. هدف توزیع شده یک‌نواخت

در شکل ۱۰ منحنی آشکارسازی هدف توزیع شده یک‌نواخت (توسط آشکارساز انرژی) در رادار SFR با حد تفکیک بالا و رادار SFR با حد تفکیک پایین با هم مقایسه شده است. در این مدل برای هدف مقدار پارامتر $Max2Min=20\text{ dB}$ در نظر گرفته شده است. همان‌طور که دیده می‌شود، آشکارسازی هدف توزیع شده یک‌نواخت، توسط رادار با حد تفکیک بالا نسبت به هدف نقطه‌ای نامتوج، بدتر شده ولی نسبت به رادار با حد تفکیک پایین عملکرد بهتری دارد.

به‌عنوان مثال برای رسیدن به احتمال آشکارسازی ۰/۹ میزان SNR مورد نیاز برای هدف توزیع شده یک‌نواخت (در رادار HRR)، -3.1 dB و برای آشکارساز رادار با حد تفکیک پایین $+1\text{ dB}$ می‌باشد. یعنی توزیع شدن هدف که بواسطه افزایش حد تفکیک ایجاد شده است، حدود 4.1 dB از تلفات تموج را کاهش می‌دهد.

با توجه به شکل ۱۱ دیده می‌شود که در آشکارساز باینری نیز آشکارساز رادار با حد تفکیک بالا (HRR) نسبت به رادار با حد تفکیک پایین (LRR) عملکرد بهتری دارد و برای رسیدن به احتمال آشکارسازی ۰/۹ میزان SNR مورد نیاز برای هدف توزیع شده یک‌نواخت، -2.5dB و برای هدف با تموج رایلی +1dB می‌باشد.

۵-۲-۳. هدف توزیع شده رایس

در شکل ۱۲ منحنی آشکارسازی هدف توزیع شده رایس، توسط دو رادار SFR با حد تفکیک بالا و حد تفکیک پایین با هم مقایسه شده‌اند. در این شکل از آشکارساز انرژی برای کشف هدف توزیع شده (در رادار با حد تفکیک بالا) استفاده شده است.

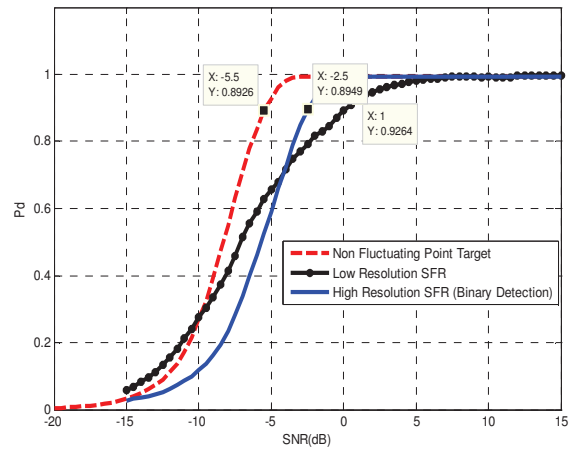
در این مدل از توزیع مکانی هدف مقدار پارامتر $AC2DC=3.2$ در نظر گرفته شده است. همان‌طور که دیده می‌شود، در احتمال آشکارسازی بالای ۰/۸ آشکارسازی هدف توزیع شده رایس (آشکارساز HRR) نسبت به هدف معمولی نامتموج بدتر شده ولی نسبت به آشکارساز با حد تفکیک پایین عملکرد بهتری دارد.

به‌عنوان مثال برای رسیدن به احتمال آشکارسازی ۰/۹ میزان SNR مورد نیاز برای آشکارساز HRR، -1.5dB و برای آشکارساز LRR، +1.5dB می‌باشد.

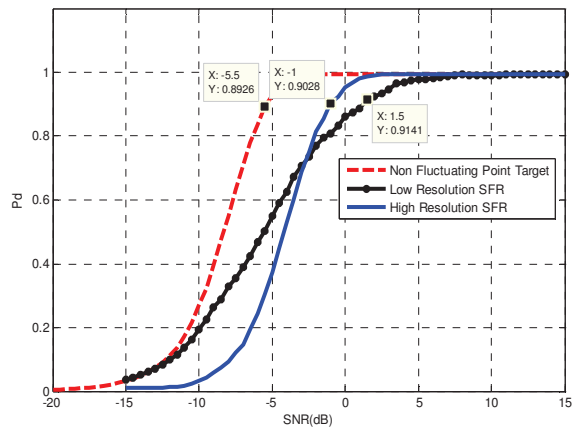
با توجه به شکل ۱۳ دیده می‌شود که در آشکارساز باینری نیز برای احتمال آشکارسازی بالای ۰/۸، آشکارسازی توسط رادار با حد تفکیک بالا عملکرد بهتری دارد و برای رسیدن به احتمال آشکارسازی ۰/۹ بهبود قدرت آشکارسازی در رادار با حد تفکیک بالا نسبت به رادار با حد تفکیک پایین حدود 2.5dB است.

۶. نتیجه‌گیری

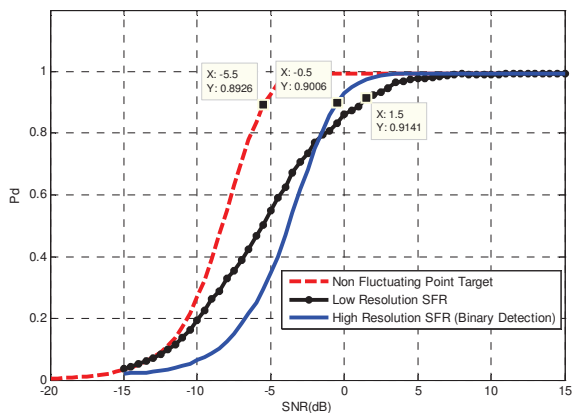
در این مقاله پس از معرفی سیگنال‌های فرکانس پله‌ای جهت استفاده در رادار و بیان روش پردازشی این سیگنال‌ها، به بررسی قدرت کشف اهداف متموج در این رادارها پرداخته شد. برای این منظور، سه روش مختلف جهت مدل‌سازی اهداف توزیع شده در برد ارائه گردید؛ مدل رایلی، یک‌نواخت و مدل رایس. سپس برای آشکارسازی این اهداف گسترده در برد دو آشکارساز مختلف نیز ارائه شد و عملکرد این آشکارسازها جهت کشف هر سه نوع هدف مورد بررسی قرار گرفت. نتایج شبیه‌سازی‌ها نشان داد که هر دو آشکارساز عملکرد تقریباً مشابهی دارند و نسبت به آشکارساز مربوط به هدف نقطه‌ای در کشف اهداف متموج عملکرد به مراتب بهتری دارند. این بهبود عملکرد آشکارسازی وابسته به مدل هدف توزیع شده در برد می‌باشد و در بهترین حالت برای هدف توزیع شده رایلی، قدرت آشکارسازی می‌تواند حدود 8dB بهبود یابد.



شکل ۱۱. منحنی آشکارسازی هدف توزیع شده یک‌نواخت توسط آشکارساز باینری در مقایسه با اهداف نقطه‌ای نامتموج و با تموج رایلی



شکل ۱۲. منحنی آشکارسازی هدف توزیع شده رایس توسط آشکارساز انرژی در مقایسه با اهداف نقطه‌ای غیر متموج



شکل ۱۳. منحنی آشکارسازی هدف توزیع شده رایس توسط آشکارساز باینری در مقایسه با اهداف نقطه‌ای غیر متموج

۷. مراجع

- [14] Bandiera, F., Orlando, D., Ricci, G., "CFAR detection of Extended and Multiple Point-Like targets Without Assignment of Secondary Data", IEEE, Signal Processing Letters, Vol. 13, No.4, April 2006, pages 240-243.
- [15] Greco, A.S., Bandiera, F., De Maio, A., Ricci, G., "Adaptive Radar Detection of Distributed Targets in Partially-Homogeneous Noise plus Subspace Interference" IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing, ICASSP 2006, Vol.3 pp.261-264, May2006.
- [16] Skolnik, M., "Introduction to Radar Systems", 3rd ed., McGraw-Hill, New York, 2001.
- [17] Xiushe, Z., "Engineering problems of low-angle Tracking radars" Proc. of CIE International Radar Conference, pp. 52-54, October 2001.
- [18] She, S., and Shouhong, Z., Xiushe, Z., "Investigation on low-angle Tracking technique for HHR radar" Proc. of CIE International Radar Conference, pp. 839-842, October 2001.
- [19] Yarovoy, A.G., "Ultra-Wideband Systems" Proceeding of 33rd European Microwave Conference - Munich, Vol.2, pp. 597-600, October 2003.
- [20] Ruttenberge, K., Chanzit, L., "High Range Resolution by Means of Pulse to Pulse Frequency Shifting". IEEE Eascon Record, pp. 47-51, 1968.
- [21] Iizuka, K., Freundorfer, A. P., and et al, "Step-frequency radar". J. Appl. Phys., Vol. 56, pp2572-2583, November 1984.
- [22] Levenon, N., "Stepped-frequency pulse-train radar signal" IEE Proceeding of Radar, Sonar Navigation, Vol. 149, No.6, pp. 297-309, Dec. 2002.
- [23] Yuehua, L., Xinggeuo, L., "The Method of Range Profile for Step Frequency MMW Radar based on wavelet Transform Power Spectrum Estimator" Proc. Of International Conf. on Microwave and Millimeter Wave Technology, pp. 556-559, 2002.
- [24] Chen, H.Y., Liu, Y.X., Jiang, W., Guo, G., "A New Approach for Synthesizing the Range Profile of Moving Targets via Stepped-Frequency Waveforms" IEEE Geosciences and Remote sensing Letters, Vol. 3, NO. 3, pp. 406-409, July 2006.
- [25] Zhu, F., and et al., "Reconstruction of Moving Target's HRRP Using Sparse Frequency-Stepped Chirp Signal," IEEE Sensors Journal, Vol. 11, No. 10, pp. 2327-2334, October 2011.
- [26] Gladkova, I., "A General Class of Stepped Frequency Trains" IEEE Radar conference, pp. 100-105, Apr. 2006.
- [1] Taylor, J. D., "Ultra-Wideband Radar Technology", CRC Press LLC, 2001.
- [2] Gill, G.S., "Step Frequency Waveform Design and Processing for Detection of Moving Targets in Clutter" IEEE International Radar conference, Washington D.C., pp. 573-578, May 1995.
- [3] Wehner, D. R., "High-Resolution Radar", 2nd ed., Artech House, Boston, 1995.
- [4] Van der Spek, G.A., "Detection of distributed target", IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, Vol.7, No.5, pp. 922-931, Sept. 1971.
- [5] Hughes, P.K., "High resolution radar detection strategy", IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, Vol.19, No.5, pp. 663-667, Sept. 1983.
- [6] Farina, A., Studer, F.A., Vitiello, R., "High resolution radar for enhanced target detection", Int. Conf. RADAR 92, pp. 163-165, 1992.
- [7] Conte, E., Bisceglie, M.D., Lops, M., "Clutter-map CFAR detection for range-spread targets in non-Gaussian clutter. Part II: Performance assessment", IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, Vol.33, No.2, pp. 442-455, Apr. 1997.
- [8] Gerlach, K., Steiner, M.J., "Detection of a Spatially Distributed Target in White Noise" IEEE Signal Processing Letters, Vol. 4, No.7, pp.198-200, July 1997.
- [9] Gerlach, K., Steiner, M. J., "Adaptive Detection of Range Distributed Targets" IEEE Transactions On Signal Processing, Vol. 47, No. 7, pp.1844-1851, July 1999.
- [10] Gerlach, K., Steiner, M. J., "Fast Converging Adaptive Detection of Doppler-Shifted, Range-Distributed Targets" IEEE Transactions On Signal Processing, Vol. 48, No.9, pp. 2686-2690 Sept. 2000.
- [11] Alfano, G., De Maio, A., Farina, A., "Model-based adaptive detection of range-spread Targets" IEE Proceeding of Radar, Sonar Navigation, Vol. 151, No. 1, pp. 2-10, February 2004.
- [12] De Maio, A., "Polarimetric Adaptive Detection of Range-Distributed Targets", IEEE Transactions On Signal Processing, Vol. 50, No. 9, pp. 2152-2159, Sep. 2002.
- [13] Alfano, G., De Maio, A., Conte, E., "Polarization Diversity Detection of Distributed Targets In Compound-Gaussian Clutter", IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, Vol. 40, No. 2, pp.755-765, April 2004.