طراحی SLB با استفاده از چند آنتن کمکی و رویکرد تئوری آشکارسازی

فاطمه لطفی[۱] عباس شیخی[۲] مهرزاد بیغش[۳]

۱- دانش آموخته کارشناسی ارشد- دانشکده مهندسی برق- دانشگاه شیراز- شیراز- ایران
f.lotfi@shirazu.ac.ir

۲- استاد- دانشکده مهندسی برق- دانشگاه شیراز - شیراز - ایران
sheikhi@shirazu.ac.ir

۳- استاد- دانشکده مهندسی برق- دانشگاه شیراز - شیراز - ایران
biguesh@shirazu.ac.ir

چکیده: یک راه مؤثر برای مقابله با اختلال‌های فریب که از طریق گلبرگ‌های فرعی آنتن رادار به خروجی واحد پردازش سیگنال وارد می‌شوند، استفاده از تکنیک SLB می‌باشد. به این منظور در ساختار کلاسیک SLB، از یک آنتن همه‌جهته به عنوان آنتن کمکی در کنار آنتن اصلی رادار استفاده شده است. در این مقاله دو دسته آشکارساز ارائه شده است که از چند آنتن مستقل از یکدیگر به عنوان آنتن‌های کمکی در کاربرد SLB استفاده کرده و با رویکرد تئوری آشکارسازی روشی برای استفاده از خروجی مختلط (I/Q) بکار گرفته شده است. شبیه‌سازی‌های کامپیوتری بهبود عملکرد روش‌های پیشنهادی نسبت به ساختار کلاسیک را تأیید می‌کنند.

کلمات کلیدی: مسدود کننده گلبرگ فرعی (انسداد اختلال گلبرگ فرعی)، آنتن کمکی، گلبرگ اصلی، گلبرگ فرعی، آشکارسازی.

تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۵/۹/۱۵

تاریخ پذیرش مشروط مقاله: ۱۳۹۶/۰۲/۳۱

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۶/۰۴/۲۵

نام نویسنده‌ی مسئول: دکتر مهرزاد بیغش

نشانی نویسنده‌ی مسئول: ایران – شیراز – میدان نمازی – دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر – بخش مخابرات و الکترونیک

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-11-20]

[DOR: 20.1001.1.26765810.1397.15.2.10.0]

Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers - Vol.15- No.2-Summer 2018

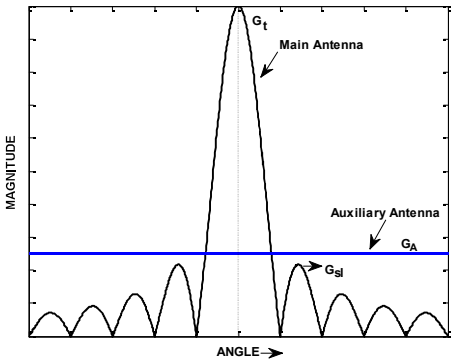
۱- مقدمه

در محیط‌های پرتراکم جنگ الکترونیک رادارهای بسیاری فعالیت می‌کنند. بنابراین شناسایی و طبقه‌بندی اهداف و استخراج اطلاعات موجود در سیگنال بازگشتی از رادار مهم‌ترین بخش از عملکرد یک رادار می‌باشد و در این راستا تکنیک‌های متفاوتی به منظور پردازش سیگنال‌های راداری به کار گرفته می‌شود [۱-۳].

از آنجایی که آنتن رادار یک آنتن جهتدار می‌باشد، فرض بر آن است که هر سیگنالی که توسط رادار آشکار می‌شود از گلبرگ اصلی آنتن دریافت شده است. در راداری که تمهیدات جنگ الکترونیک ندارد، اگر یک سیگنال بسیار قوی از طریق گلبرگ‌های جانبی آنتن رادار دریافت شود، این سیگنال توسط رادار کشف شده و با فرض اینکه در بیم اصلی آنتن قرار دارد، باعث خطا در زاویه‌سنجی خواهد شد. جمرهای فریب این مسئله را اساس کار خود قرار داده و با ارسال پالس در زمانی که گلبرگ‌های جانبی آنتن رادار به سمت آن‌هاست (در زاویه‌ی خاصی که مدنظر است)، باعث ایجاد یک سری اهداف دروغین در صفحه‌ی نمایش رادار شده و بدین ترتیب مانع از آن می‌شوند که رادار جستجو هدف واقعی را تشخیص دهد. همچنین اهداف کاذب با تعداد بالا می‌تواند سبب اشباع شدن پردازشگر داده‌ی رادار شود.

اولین و شاید اساسی‌ترین خط دفاعی رادار در مقابل تداخلگرها آنتن می‌باشد. بنابراین برای کاهش آسیب‌پذیری در مقابل سیگنال‌های تداخلی تکنیک‌های مختلفی در این مرحله اتخاذ می‌شود. یکی از تکنیک‌های مؤثر در این زمینه، استفاده از SLB می‌باشد. در این تکنیک برای آنکه اخلال ارسالی از طریق گلبرگ‌های جانبی در جهت‌یابی ایجاد مزاحمت نکند و سیستم را گمراه نسازد، از یک آنتن کمکی همه جهته[1] در کنار آنتن اصلی رادار استفاده می‌گردد.

این آنتن همه جهته بهره‌ای کمتر از گلبرگ اصلی ولی بیشتر از گلبرگ‌های فرعی آنتن اصلی دارد (مطابق آنچه که در شکل (۱) نشان داده شده است). پردازشگر رادار به این صورت عمل می‌کند که در هر سلول برد راداری، سیگنال‌ها را از هر دو کانال اصلی و کمکی دریافت و پردازش کرده و اگر سیگنال دریافتی در خروجی آنتن کمکی قوی‌تر از سیگنال دریافتی از کانال اصلی باشد، تشخیص می‌دهد که سیگنال از گلبرگ اصلی آنتن نیامده و به این ترتیب خروجی کانال اصلی مسدود می‌شود و سیگنال اختلال وارد سیستم آشکارساز رادار نمی‌گردد. در اینصورت جمر قادر به تولید اهداف کاذب در سمت متفاوت با سمت خود نخواهد بود.



شکل (۱): پترن آنتن‌های اصلی و کمکی در سیستم SLB کلاسیک

تاکنون مراجع متعددی بحث استفاده از SLB را در زمینه‌های مختلف مطرح کرده و عملکرد آن را مورد بررسی قرار داده‌اند [۴-۱۲]. اما ایده‌ی اولیه‌ی بکارگیری این تکنیک در سال ۱۹۶۸ توسط میزل[2] مطرح شد [۱۳]. میزل در مقاله‌ی خود راهکاری شهودی ارائه کرده است که مبتنی بر مقایسه‌ی دامنه‌ی سیگنال‌های دریافتی از آنتن‌های اصلی و کمکی می‌باشد. شکل (۲) بلوک دیاگرام سیستم کلاسیک SLB با دو کانال گیرنده را نشان می‌دهد. طبق این بلوک دیاگرام، زمانی که یک هدف در جهت گلبرگ اصلی آنتن رادار قرار داشته باشد، از آنجایی که بهره گلبرگ اصلی بیشتر از بهره آنتن کمکی است، سیگنال خروجی از گیرنده کانال اصلی بزرگ‌تر از سیگنال خروجی از گیرنده کانال کمکی خواهد بود. در اینصورت یک منطق انسداد[3] با مقایسه نسبت سیگنال‌های دریافتی از دو کانال با آستانه انسداد به سیگنال کانال اصلی اجازه عبور می‌دهد تا وارد آشکارساز رادار شود. اما در مورد سیگنال‌های تداخلی که در جهت گلبرگ‌های فرعی آنتن رادار واقع شده‌اند، به این دلیل که بهره آنتن کمکی بیشتر از بهره گلبرگ‌های فرعی آنتن اصلی است، سیگنال خروجی از گیرنده کانال کمکی بزرگ‌تر از سیگنال خروجی از گیرنده کانال اصلی می‌گردد. بدین ترتیب دستور انسداد صادر شده و در نتیجه سیگنال تداخلی وارد سیستم آشکارساز رادار نخواهد شد.

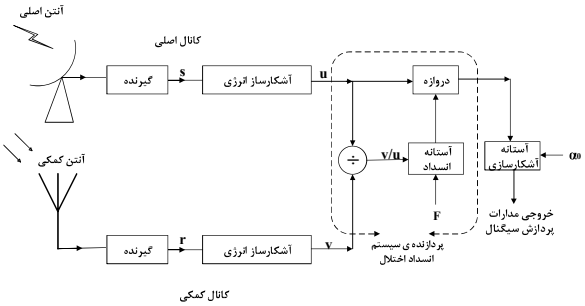
به بیان دیگر، سیگنال دریافتی تنها در صورتی اجازه ورود به سیستم آشکارساز رادار را دارد که ابتدا از آستانه انسداد عبور کرده باشد. در مرحله‌ی بعد مقایسه با آستانه آشکارسازی انجام می‌گیرد تا مشخص شود که آیا سیگنالی توسط رادار کشف شده است یا خیر.

لازم به ذکر است که همواره مصالحه‌ای بین احتمال انسداد اخلالگر و احتمال آشکارسازی هدف وجود دارد که اجتناب ناپذیر است. بنابراین سنجش عملکرد سیستم فقط بر مبنای یکی از این پارامترها صحیح نیست، چرا که افزایش یکی می‌تواند باعث افت دیگری شود.

در این مقاله سعی بر آن است که با رویکرد تئوری آشکارسازی و استفاده از چند آنتن کمکی، روش‌هایی برای آشکارسازی هدف ارائه گردد که علاوه بر حفظ احتمال آشکارسازی مطلوب به ازای احتمال

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-11-20]
[DOR: 20.1001.1.26765810.1397.15.2.10.0]

هشدار کاذب داده شده، احتمال انسداد گلبرگ فرعی مطلوبی نیز داشته باشد.



شکل (۲): بلوک دیاگرام سیستم SLB کلاسیک.

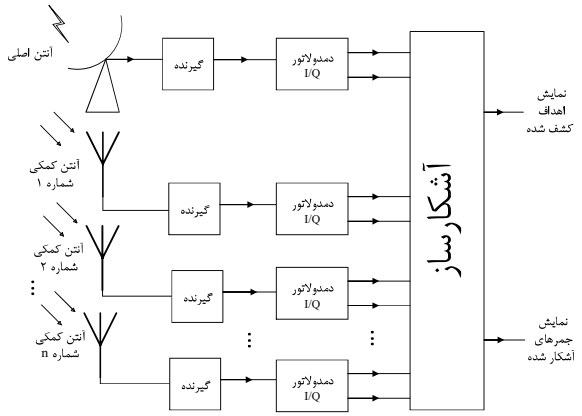
۲- معرفی سیستم SLB پیشنهادی

در آشکارسازهای پیشنهادی در این مقاله، عمل آشکارسازی سیگنال اکو و تشخیص نوع دریافت آن (دریافت از گلبرگ اصلی یا فرعی) با رویکرد تئوری آشکارسازی و در دو مرحله انجام می‌شود. در مرحله اول، حضور و یا عدم حضور سیگنال اکو در محیط بررسی می‌شود و در مرحله دوم، در صورت تشخیص حضور سیگنال اکو، به طبقه‌بندی آن از حیث اینکه از گلبرگ اصلی دریافت شده یا از گلبرگ فرعی پرداخته می‌شود. یعنی در واقع سیگنال‌هایی که از آشکارساز مرحله اول عبور کرده‌اند، وارد آشکارساز مرحله دوم می‌شوند. با این رویکرد دو روش آشکارسازی ارائه شده است:

روش اول: در این روش در مرحله اول شبیه به رویکرد کلاسیک میزل فقط از یک آشکارساز معمولی انرژی در کانال اصلی استفاده شده و در مرحله دوم با رویکرد تئوری آشکارسازی به طبقه‌بندی سیگنال‌ها پرداخته می‌شود. ما در این مقاله برای سهولت در بررسی‌هایمان این روش را Classic- LS نامگذاری کرده‌ایم.

روش دوم: این روش یک آشکارساز زیربهینه معرفی می‌کند که در هر دو مرحله از آنتن‌های کمکی استفاده کرده و با رویکرد تئوری آشکارسازی به حل مسئله پرداخته می‌شود. این آشکارساز را به این دلیل که در هر دو مرحله برای تخمین پارامترهای مجهول از حل یک مسئله‌ی LS استفاده کرده است، Dual-LS نامیده‌ایم. در واقع در آشکارسازهای این دسته، تا زمانی که حضور سیگنال اکو توسط آشکارساز مرحله اول اعلام نشود، نیازی به مسدود کردن کانال اصلی نیست و فقط زمانی دستور انسداد صادر می‌شود که در ابتدا حضور سیگنال کشف شده و سپس در مرحله دوم تشخیص داده شود که سیگنال کشف شده، یک سیگنال تداخلی محسوب می‌شود.

شکل (۳)، بلوک دیاگرام سیستمی را نشان می‌دهد که در ساختار آن از چند آنتن همه‌سویه به عنوان آنتن‌های کمکی استفاده شده است. در این ساختار، خروجی‌های کانال اصلی و کانال‌های کمکی پس از استخراج مؤلفه‌های همفاز (I) و متعامد (Q)، تحویل واحد آشکارساز می‌گردند. این واحد بر اساس پردازش این سیگنال‌ها اقدام به اعلام حضور هدف یا جمر نموده و اهداف و جمرها را در دو خروجی مجزا جهت نمایش فراهم می‌نماید تا در صورت نیاز بتوان جمرها را نیز به صورت مناسب به کاربر نمایش داد و رفتار آنها را تجزیه و تحلیل نمود.



شکل (۳): بلوک دیاگرام سیستم SLB پیشنهادی مبتنی بر پوش مختلط با استفاده از چند آنتن کمکی.

۳- مدل ریاضی مسئله

۳-۱- چیدمان آنتن‌های اصلی و کمکی در روش پیشنهادی

در گام نخست برای حل مسئله، می‌بایست سیگنال‌های دریافتی در این سیستم را مدل کنیم. بنابراین مدلی برای چیدمان آنتن‌های اصلی و کمکی در نظر می‌گیریم. طرح کلی چیدمان آنتن‌های اصلی و کمکی در سیستم پیشنهادی به صورت شکل (۴) می‌باشد که آنتن‌های کمکی در زیر آنتن اصلی، به صورت یک آرایه‌ی خطی یکنواخت قرار گرفته‌اند. واضح است که به دلیل فاصله‌ی مکانی آنتن‌ها نمی‌توان سیگنال‌های دریافتی از همه‌ی کانال‌ها را هم‌فاز در نظر گرفت. بنابراین اگر سیگنال دریافتی در کانال اصلی را با p نشان دهیم، سیگنال دریافتی در کانال‌های کمکی به صورت بردار زیر قابل نمایش هستند:

$$\boldsymbol{r} = \alpha\, p\boldsymbol{\theta}(\gamma) \quad , \quad \boldsymbol{\theta}(\gamma) = \left[e^{j\theta_1} \quad e^{j\theta_2} \quad e^{j\theta_3} \quad \dots \quad e^{j\theta_n} \right]^T \qquad (۱)$$

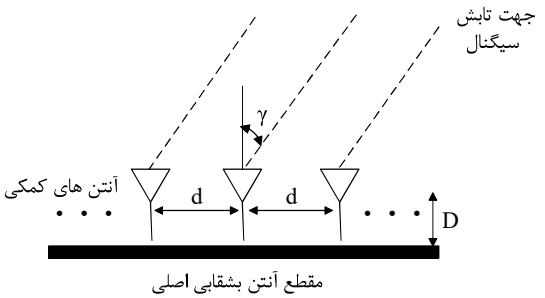
در این رابطه، θ_iها وابسته به چیدمان آنتن‌ها و همچنین زاویه‌ی ورود سیگنال بوده و برای چیدمان خطی نشان داده شده در شکل (۴) چنین داریم:

$$\boldsymbol{\theta}(\gamma) = e^{-j\psi} \times \left[e^{-jm\varphi} \quad \dots \quad 1 \quad \dots \quad e^{+jm\varphi} \right]^T$$
$$\varphi = \frac{2\pi d}{\lambda} \sin(\gamma) \quad , \quad \psi = \frac{2\pi D}{\lambda} \cos(\gamma) \qquad (۲)$$

که در اینجا γ جهت تابش سیگنال، d فاصله میان آنتن‌های کمکی و λ طول موج سیگنال دریافتی است. همچنین در رابطه (۱)، α بیانگر

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-11-20]
[DOR: 20.1001.1.26765810.1397.15.2.10.0]
Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers - Vol.15- No.2-Summer 2018

اختلاف بهره‌ی آنتن اصلی و آنتن‌های کمکی در راستای هدف می‌باشد.



شکل (۴): چیدمان آنتن‌های اصلی و کمکی نسبت به یکدیگر.

۲-۳- بیان مسئله به صورت آزمون فرضیه

در مرحله‌ی اول، در پردازنده‌ی گیرنده، با یک مسئله‌ی آشکارسازی راداری مواجه هستیم و گیرنده‌ی رادار همواره با توجه به سیگنال‌های دریافتی باید تصمیم بگیرد که با کدامیک از دو وضعیت "وجود سیگنال اکو (H_1)" و یا "عدم وجود سیگنال اکو (H_0)" روبروست. در تئوری تصمیم‌گیری، رخدادهای ممکن در قالب فرضیه‌های مختلف بیان می‌شوند و بنابراین فرآیند آشکارسازی بصورت یک آزمون فرضیه مدل می‌شود. لذا ما نیز مسئله‌ی مذکور را بصورت یک آزمون فرضیه مدل کرده و سپس آشکارساز مربوطه را استخراج خواهیم نمود.

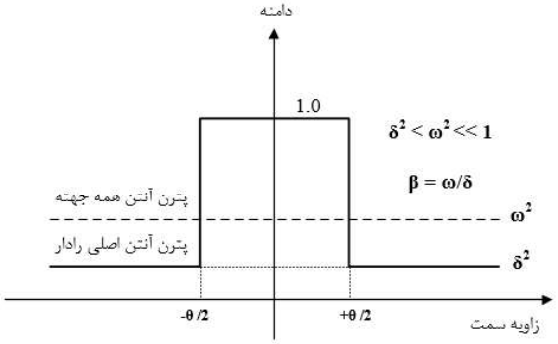
ما در این مقاله، مسئله‌ی آزمون فرضیه‌ی H_0 در مقابل H_1 را برای یک رادار تک پالس حل می‌کنیم. سیستم مورد نظر، یک آنتن اصلی و n آنتن کمکی دارد که سیگنال خروجی از این کانال‌ها در هر سلول برد راداری یک سیگنال مختلط می‌باشد. سیگنال خروجی کانال اصلی را با s و خروجی‌های متناظر با همین سلول برد راداری در کانال‌های کمکی را با بردار $\mathbf{r}$ که عناصر آن r_1 تا r_n هستند، نشان می‌دهیم. لذا مسئله‌ی آشکارسازی در رویکرد اول به صورت زیر مدل می‌شود:

$$H_0: \begin{cases} s = \upsilon \\ \boldsymbol{r} = \boldsymbol{\upsilon}_r \end{cases} \quad , \quad H_1: \begin{cases} s = \upsilon + p \\ \boldsymbol{r} = \boldsymbol{\upsilon}_r + \alpha\, p\, \boldsymbol{\theta}\,(\gamma) \end{cases} \qquad (۳)$$

تحت فرضیه‌ی H_0، سیگنال کانال اصلی و کانال‌های کمکی همگی حاوی نویز حرارتی گیرنده هستند که υ و $\boldsymbol{\upsilon}_r$ به ترتیب نویز گیرنده در کانال‌های اصلی و کمکی بوده و آنها را نویزهای مختلط سفید گوسی مستقل از یکدیگر و با واریانس معلوم σ^2 در نظر می‌گیریم. p سیگنال اکوی دریافتی در کانال اصلی است که با توجه به نامعلوم بودن RCS هدف و پدیده تموج، پارامتری مجهول می‌باشد.

تحت فرضیه‌ی H_1، کانال اصلی و کانال‌های کمکی، علاوه بر نویز حاوی سیگنال اکو نیز هستند اما بسته به اینکه سیگنال از کانال اصلی دریافت شده باشد یا از کانال‌های فرعی، اختلاف دامنه آنها (که پارامتر α مشخص کننده آن است) متفاوت است. پارامتر α یک اسکالر حقیقی نامعلوم است که یکی از دو مقدار ω و β (که در ادامه تعریف می‌شوند) را بسته به اینکه سیگنال اکو از گلبرگ اصلی یا فرعی دریافت شده باشد به خود می‌گیرد.

الگوی آنتن‌های اصلی و کمکی مطابق شکل (۵)، به صورت ایده‌آل در نظر گرفته شده است. همه‌ی بهره‌های توان نسبت به بهره‌ی گلبرگ اصلی آنتن رادار نرمالیزه شده‌اند. به این ترتیب، بهره‌ی گلبرگ اصلی را واحد و سطح سایر گلبرگ‌های فرعی را δ^2 در نظر گرفته‌ایم. آنتن کمکی نیز یک آنتن همه‌جهته با بهره توان ω^2 فرض شده است. پارامتر β را نسبت بهره آنتن کمکی به بهره گلبرگ‌های فرعی آنتن اصلی رادار (یعنی ω/δ) تعریف می‌کنیم که حاشیه بهره ولتاژ آنتن کمکی نسبت به گلبرگ‌های فرعی آنتن رادار نامیده می‌شود. با توجه به معلوم بودن الگوی آنتن اصلی و کمکی، پارامترهای δ ، β و ω معلوم هستند. بنابراین اگر سیگنال تداخل با توان نرمالیزه شده J وارد بیم اصلی آنتن رادار شود، در کانال کمکی با دامنه βJ دریافت خواهد شد و به طور مشابه، سیگنال هدف مستقر در گلبرگ اصلی که در کانال اصلی با دامنه A دریافت می‌شود، در کانال کمکی با دامنه ωA دریافت خواهد شد.



شکل (۵): پترن نرمالیزه ایده‌آل آنتن‌های اصلی و کمکی

در مرحله‌ی دوم، پس از اینکه آشکارساز مرحله‌ی اول حضور سیگنال اکو را اعلام کرد، می‌خواهیم تشخیص دهیم که این سیگنال مربوط به هدف گلبرگ اصلی است یا مربوط به تداخلگری که از گلبرگ‌های فرعی آنتن حمله کرده است. به این منظور، مجدداً با یک مسئله‌ی آشکارسازی مواجهیم که باید بین فرض‌های H_2 و H_3 که به صورت زیر تعریف می‌شوند تفاوت قایل شود:

$$H_2: \begin{cases} s = \upsilon + p \\ \boldsymbol{r} = \boldsymbol{\upsilon}_r + \omega\, p\, \boldsymbol{\theta}(\gamma) \end{cases} \quad , \quad H_3: \begin{cases} s = \upsilon + p \\ \boldsymbol{r} = \boldsymbol{\upsilon}_r + \beta\, p\, \boldsymbol{\theta}(\gamma) \end{cases} \qquad (۴)$$

در آزمون فرض فوق، $\boldsymbol{\upsilon}_r$ ، υ نویزهای مختلط سفید گوسی iid با واریانس معلوم σ^2 بوده، p پارامتری مجهول مبین قدرت سیگنال اکوی هدف، ω و β دو پارامتر معلوم و بردار $\boldsymbol{\theta}(\alpha,\gamma)$ مطابق رابطه‌ی (۲) با پارامتر مجهول γ است.

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-11-20]
[DOR: 20.1001.1.26765810.1397.15.2.10.0]

۴- استخراج آشکارسازها

یک دیدگاه آماری برای حل مسئله آزمون فرضیه مرکب این است که با پارامترهای نامعلوم به عنوان یک پارامتر مجهول غیرتصادفی برخورد شود. بنابراین در هر دو آزمون فرضیه روابط (۳) و (۴)، با فرض قطعی و نامعلوم بودن پارامترهای p، α و γ، با یک مسئله آشکارسازی سیگنال با پارامترهای نامعلوم مواجه هستیم. در واقع پارامترهای سیگنال دریافتی، مجهول ولی غیرتصادفی در نظر گرفته شده‌اند. در حل این قبیل مسائل، روش مؤثری که عموماً بکار می‌رود، استفاده از تخمین ML پارامترهای مجهول و سپس ارائه آشکارساز GLR است.

در هر دو آزمون فرضیه‌ی فوق اگر متغیرهای تصادفی s و **r**، خروجی کانال‌های اصلی و کمکی را با یک بردار تصادفی n+1 بعدی به نام $\boldsymbol{x}=\begin{bmatrix} s & \boldsymbol{r} \end{bmatrix}^T$ نمایش دهیم، با توجه به اینکه نویزهای هر دو کانال اصلی و کمکی نویزهای مختلط سفید گوسی iid با واریانس معلوم σ^2 در نظر گرفته شده‌اند، می‌توان نشان داد که بردار مشاهدات **x** در کلیه فرضیات H_0، H_1، H_2 و H_3 دارای توزیع مختلط گوسی با ماتریس کوواریانس همانی می‌باشد ($C_x=\sigma^2 I$).

از آنجایی که تحت فرض H_0 داریم:

$$\begin{aligned} s &\sim CN\left(0,\sigma^2\right) \\ \boldsymbol{r} &\sim CN\left(0,\sigma^2 I\right) \end{aligned} \qquad (۵)$$

و σ^2 معلوم می‌باشد، بردار مشاهدات حاوی پارامتر مجهول نبوده و در نتیجه تابع توزیع نیز حاوی پارامتر مجهول نیست. بنابراین داریم:

$$\begin{aligned} f\left(\boldsymbol{x}\,|\,H_0\right) &= \frac{1}{\sqrt{\det\left(\pi C_x\right)}}\exp\left(-\boldsymbol{x}^H C_x^{-1}\boldsymbol{x}\right) \\ &= \frac{1}{\left(\pi\sigma\right)^{n+1}}\exp\left(-\frac{\|\boldsymbol{x}\|^2}{\sigma^2}\right) \end{aligned} \qquad (۶)$$

تابع چگالی احتمال بردار سیگنال مشاهدات تحت فرض H_1 نیز به صورت زیر به دست می‌آید:

$$f(\boldsymbol{x}\,|\,H_1,\alpha,\gamma,p)=\frac{1}{\left(\pi\sigma\right)^{n+1}}\exp(-\frac{\left\|\boldsymbol{x}-p\boldsymbol{\theta}(\alpha,\gamma)\right\|^2}{\sigma^2}) \qquad (۷)$$

که علاوه بر p و γ، مقدار α نیز پارامتر مجهولی است که یکی از دو مقدار β یا ω را به خود می‌گیرد.

به همین ترتیب، تابع چگالی احتمال بردار سیگنال مشاهدات تحت فرض‌های H_2 و H_3 نیز اینچنین است:

$$f\left(\boldsymbol{x}\,|\,H_2\,,\gamma,p\right)=\frac{1}{\left(\pi\sigma\right)^{n+1}}\exp\left(-\frac{\left\|\boldsymbol{x}-p\boldsymbol{\theta}(\omega,\gamma)\right\|^2}{\sigma^2}\right) \qquad (۸)$$

$$f\left(\boldsymbol{x}\,|\,H_3\,,\gamma,p\right)=\frac{1}{\left(\pi\sigma\right)^{n+1}}\exp\left(-\frac{\left\|\boldsymbol{x}-p\boldsymbol{\theta}(\beta,\gamma)\right\|^2}{\sigma^2}\right) \qquad (۹)$$

تحت این دو فرضیه p و γ تنها پارامترهای مجهول هستند.

حال که تابع چگالی احتمال مشاهدات تحت فرضیات آزمون فرض‌های روابط (۳) و (۴) به دست آمده، می‌توان به استخراج آشکارساز مناسب برای این آزمون فرض‌ها پرداخت.

۴-۱- استخراج آشکارساز تشخیص حضور سیگنال اکو

برای حل این مسئله، آزمون فرضیه‌ی رابطه‌ی (۳) را در نظر گرفته و با استفاده از تابع چگالی مشاهدات تحت فرضیه‌های H_0 و H_1، به قاعده‌ی تصمیم‌گیری زیر می‌رسیم:

$$\Lambda(\boldsymbol{x})=\frac{f(\boldsymbol{x}\,|\,H_1)}{f(\boldsymbol{x}\,|\,H_0)}\underset{H_0}{\overset{H_1}{\gtrless}}\eta \qquad (۱۰)$$

با توجه به اینکه در تابع چگالی احتمال تحت فرضیه‌ی H_1، پارامترهای p، α و γ مجهول هستند، با یک مسئله‌ی آزمون فرضیه‌ی مرکب مواجه هستیم. راهکار متداول در تئوری آشکارسازی برای حل آزمون فرضیه-ی مرکب، استفاده از آزمون GLRT است. در این آزمون، نسبت درستنمایی با تخمین ML پارامترهای نامعلوم محاسبه می‌شود. بنابراین ابتدا باید پارامترهای مجهول را تحت هر یک از فرضیه‌ها تخمین زده و سپس در نسبت درستنمایی جایگزین مقدار واقعی آن کنیم.

پس ابتدا با فرض معلوم بودن دو پارامتر دیگر، تخمین p را محاسبه می‌کنیم. با توجه به رابطه‌ی (۷)، برای تخمین ML دامنه مختلط سیگنال از معیار مجموع مربعات خطا یا حداقل مربعات (LS)[۴] باید استفاده شود که در آن به این سؤال پاسخ می‌دهیم که کدام بردار با ساختار $p\boldsymbol{\theta}(\alpha,\gamma)$ ، به بردار مشاهدات (بردار **x**) نزدیک‌تر است. از آنجایی که p یک عدد مختلط است، با فرض $p=x+jy$ ، باید x و y را طوری انتخاب کنیم که حاصل عبارت $\left\|\boldsymbol{x}-p\boldsymbol{\theta}(\alpha,\gamma)\right\|^2$ کمینه گردد یا به عبارت دیگر:

$$\hat{p}(\alpha,\gamma)=\arg\min_p\left\{\left\|\boldsymbol{x}-p\boldsymbol{\theta}(\alpha,\gamma)\right\|^2\right\} \qquad (۱۱)$$

بنابراین کافی است از این عبارت مشتق گرفته و مساوی صفر قرار دهیم، که در آن صورت خواهیم داشت:

$$\hat{p}(\alpha,\gamma)=\left(\boldsymbol{\theta}^H(\alpha,\gamma)\boldsymbol{\theta}(\alpha,\gamma)\right)^{-1}\boldsymbol{\theta}^H(\alpha,\gamma)\boldsymbol{x} \qquad (۱۲)$$

حال با فرض معلوم بودن α، تخمین ML برای γ به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$\hat{\gamma}(\alpha)=\arg\min_\gamma\left\{\left\|\boldsymbol{x}-\hat{p}(\alpha,\gamma)\boldsymbol{\theta}(\alpha,\gamma)\right\|^2\right\} \qquad (۱۳)$$

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-11-20]

[DOR: 20.1001.1.26765810.1397.15.2.10.0]
Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers - Vol.15- No.2-Summer 2018

با توجه به اینکه α ضریبی است که تنها دو مقدار ω و β را می‌تواند بگیرد، $\hat{\gamma}(\omega)$ و $\hat{\gamma}(\beta)$، از رابطه‌ی (۱۳) با روش عددی با جستجو در فضای γ محاسبه می‌شود. این فضا محدود به فاصله‌ی ۰ تا 2π است. حال با داشتن $\hat{\gamma}(\omega)$ و $\hat{\gamma}(\beta)$، تخمین α بصورت زیر محاسبه می‌شود:

$$\hat{\alpha} = \arg \min_{\alpha \in \{\beta, \omega\}} \left\{ \left\| \boldsymbol{x} - \hat{p}(\alpha, \hat{\gamma}(\alpha)) \boldsymbol{\theta}(\alpha, \hat{\gamma}(\alpha)) \right\|^2 \right\} \quad (۱۴)$$

اکنون با جایگذاری پارامترهای تخمینی یعنی $\hat{\alpha}$, $\hat{\gamma}(\hat{\alpha})$, $\hat{p}(\hat{\alpha}, \hat{\gamma})$ در نسبت درستنمایی، قاعده آشکارسازی بصورت زیر خواهد بود:

$$T(\boldsymbol{x}) = \| \boldsymbol{x} \|^2 - \min \left\{ \left\| \boldsymbol{x} - \hat{p}(\omega, \hat{\gamma}(\omega)) \boldsymbol{\theta}(\omega, \hat{\gamma}(\omega)) \right\|^2 , \left\| \boldsymbol{x} - \hat{p}(\beta, \hat{\gamma}(\beta)) \boldsymbol{\theta}(\beta, \hat{\gamma}(\beta)) \right\|^2 \right\} \underset{H_0}{\overset{H_1}{\gtrless}} \eta \quad (۱۵)$$

سطح آستانه η برای رسیدن به یک نرخ هشدار کاذب مطلوب تنظیم می‌گردد.

قابل ذکر است که در روش Classic-LS قاعده آشکارسازی مورد استفاده جهت تصمیم‌گیری بین دو فرضیه‌ی H_0 و H_1 به صورت زیر است:

$$|s| \underset{H_0}{\overset{H_1}{\gtrless}} \alpha_0 \quad (۱۶)$$

شبیه‌سازی‌هایی که در ادامه ارائه می‌شوند، با روش مونت کارلو صورت گرفته و سطح آستانه در هر دو روش جهت حصول $P_{FA} = 0.001$ تنظیم شده است. نتایج این شبیه‌سازی‌ها در حضور سیگنال هدف و تداخلگر بصورت جداگانه در بخش بعد آورده شده است.

۲-۴- استخراج تشخیص دهنده نوع سیگنال اکو (گلبرگ اصلی یا فرعی بودن)

در هر دو دسته از آشکارسازهای ارائه شده در این مقاله، قاعده‌ی آشکارسازی در مرحله طبقه‌بندی سیگنال نیز مطابق روش ارائه شده در بخش قبل به صورت زیر می‌باشد:

در شبیه‌سازی‌ها سطح آستانه ζ جهت حصول به $P_{TB} = 0.01$[۵] تنظیم شده است.

$$T'(x) = \left\| \boldsymbol{x} - \hat{p}(\omega, \hat{\gamma}(\omega)) \boldsymbol{\theta}(\omega, \hat{\gamma}(\omega)) \right\|^2 - \left\| \boldsymbol{x} - \hat{p}(\beta, \hat{\gamma}(\beta)) \boldsymbol{\theta}(\beta, \hat{\gamma}(\beta)) \right\|^2 \underset{H_2}{\overset{H_3}{\gtrless}} \zeta \quad (۱۷)$$

۵- شبیه‌سازی کامپیوتری

در این بخش به بررسی نتایج شبیه‌سازی حاصل از اعمال آشکارسازهای پیشنهادی به سیستم خواهیم پرداخت. در این شبیه‌سازی‌ها مدل سورلینگ-۱ برای سیگنال در نظر گرفته شده است. در ابتدای امر، برای اینکه مقایسه‌ها منصفانه باشند، مقادیر آستانه‌ی آشکارسازی و آستانه‌ی انسداد را طوری تنظیم کرده‌ایم که همه‌ی سیستم‌های SLB دارای P_{FA} و P_{TB} یکسانی باشند.

در سناریوی حضور جمر، عملکرد مطلوب این است که صفحه نمایش رادار از حیث حضور اهداف غیرواقعی تمیز بوده و در عین حال، سیستم وقوع جمینگ را اعلام کند. به این منظور پارامتری را تحت عنوان احتمال آشکارسازی جمر[۶] (P_{JD}) تعریف کرده‌ایم که هشدار صحیح وقوع جمینگ را گزارش کند. از طرفی امکان دارد به دلیل حضور جمر در محیط، سیستم حضور اهداف دروغین را گزارش کند که برای این رخداد نیز پارامتر P_{JFA}[۷] را تعریف کرده‌ایم و در حقیقت میزان آغشته بودن صفحه نمایش رادار در اثر وجود سیگنال جمینگ را نشان می‌دهد. احتمال آشکارسازی صحیح هدف را نیز P_{TD}[۸] نامیده‌ایم.

۱-۵- تعریف معیار یا منطق عملکرد مطلوب

جهت شبیه‌سازی سیستم‌های پیشنهادی، لازم است یک معیار مناسب برای تصمیم‌گیری و ارزیابی عملکرد در نظر گرفته شود. معیاری که در این بخش از شبیه‌سازی‌ها اعمال شده است به صورت زیر می‌باشد:

۱. درصد مجموع هشدارهای کاذب جمر و هدف در اثر نویز گیرنده باید از ۰،۰۰۱ کمتر باشد (در مرحله‌ی اول، مقدار آستانه‌ی آشکارسازی با توجه به نرخ هشدار کاذب داده شده تنظیم می‌گردد).

۲. درصد اعلام حضور جمر زمانی‌که هدف حضور دارد (به ازای SNR = 10 dB)، از ۰،۰۱ کمتر باشد (در مرحله‌ی دوم، مقدار آستانه‌ی انسداد با توجه به نرخ اتلاف آشکارسازی تنظیم می‌شود).

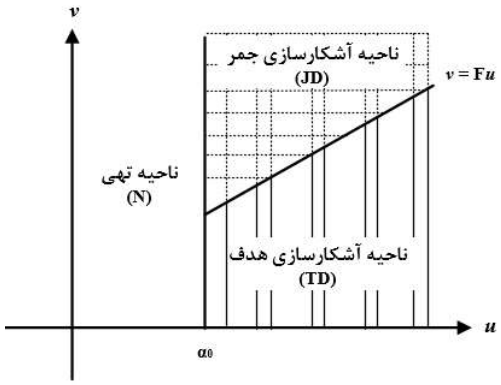
۳. تحت دو شرط فوق، آشکارسازی که احتمال P_{JFA} کمتری داشته باشد برتر است. یعنی صفحه نمایش رادار در مواقع جمینگ تمیزتر است.

لازم به ذکر است که منطق تنظیم آستانه در سیستم کلاسیک به گونه‌ای دیگر است.

نواحی تصمیم‌گیری معادل با معیار فوق در صفحه‌ی (u , v) به صورت شکل (۶) بوده و معادل ریاضی آن نیز با رابطه‌ی (۱۸) بیان می‌شود. به این ترتیب، سیگنال اکو پس از عبور از آستانه‌ی آشکارسازی، وارد بخش پردازش سیستم انسداد اختلال می‌شود تا طبقه‌بندی سیگنال از حیث دریافت از گلبرگ اصلی یا گلبرگ فرعی انجام گیرد.

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-11-20]
[DOR: 20.1001.1.26765810.1397.15.2.10.0]

$$
\begin{aligned}
&N: \quad 0 \le u \le \alpha_0 \\
&TD: \quad u > \alpha_0 \quad and \quad 0 \le v_i \le Fu \quad i = 1,2,3 \\
&JD: \quad u > \alpha_0 \quad and \quad v_i \ge Fu
\end{aligned}
\tag{۱۸}
$$

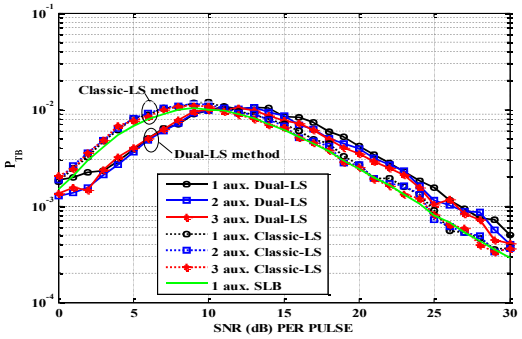


شکل (۶): نواحی تصمیم‌گیری آزمون چند فرضیه‌ای در صفحه (u,v) در سیستم پیشنهادی

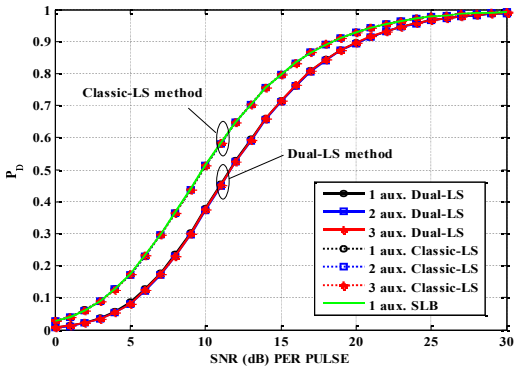
۲-۵- نتایج شبیه‌سازی

با اعمال فرضیات فوق و همچنین $\omega^2 = -30dB$ ، $\delta^2 = -35dB$ و $\beta^2 = 5dB$ ، نتایج شبیه‌سازی عملکرد آشکارسازهای ارائه شده برای تعداد آنتن‌های کمکی ۱، ۲ و ۳ در شکل (۷) نمایش داده شده است. هر نقطه از منحنی‌ها حاصل 10^6 بار شبیه‌سازی می‌باشد.

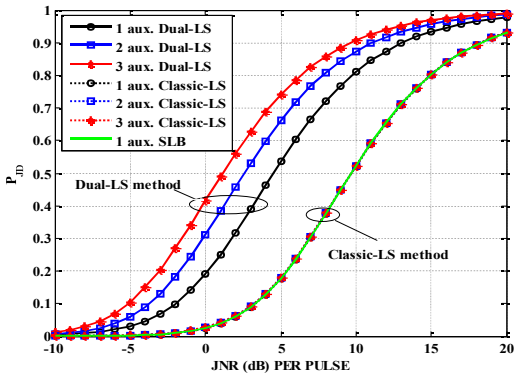
شکل (۷-الف) مؤید این مطلب است که شرایط معیار ارضا شده است. با توجه به نتایج شبیه‌سازی در شکل (۷-ب)، مشاهده می‌شود که در دسته‌ی آشکارسازهای Classic-LS در حضور سیگنال هدف، عملکرد آشکارسازهای پیشنهادی بسیار نزدیک به سیستم SLB متداول است. همچنین در مقایسه‌ی آشکارسازهای ارائه شده، این نکته حائز اهمیت است که در آشکارسازی هدف در گلبرگ اصلی آنتن، روش Classic-LS نسبت به روش Dual-LS به میزان حدود 1.5 dB عملکرد بهتری از خود نشان می‌دهد. همچنین نتایج شبیه‌سازی در حضور سیگنال هدف، نشان می‌دهند که افزایش تعداد آنتن‌های کمکی در هر یک از روش‌های ارائه شده، تقریباً بر روی احتمال آشکارسازی هدف بی تأثیر است.



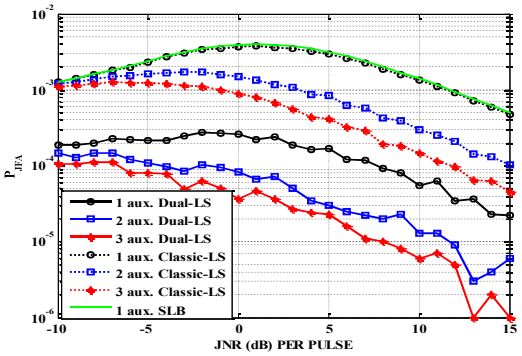
الف: احتمال انسداد هدف



ب: احتمال آشکارسازی هدف



ج: احتمال تشخیص صحیح وقوع جمینگ



د: احتمال هشدار کاذب هدف در حضور جمر

شکل (۷): مقایسه عملکرد آشکارسازهای پیشنهادی با یکدیگر

با توجه به شکل (۷-ج)، قدرت تشخیص حضور جمر در روش Dual-LS اختلاف قابل ملاحظه‌ای با روش Classic-LS دارد و این اختلاف با افزایش تعداد آنتن‌های کمکی بیشتر هم می‌شود. همچنین نتایج شبیه‌سازی در مورد هر یک از روش‌های Dual-LS و Classic-LS نشان می‌دهد که با افزایش تعداد آنتن‌های کمکی در سناریوی حضور جمر، عملکرد سیستم از نقطه نظر احتمال هشدار کاذب هدف در حضور جمر بهتر شده است و می‌توان از صفحه نمایش تمیزتری در شرایط جمینگ برخوردار بود (شکل۷-د). این بهبود عملکرد روش LS

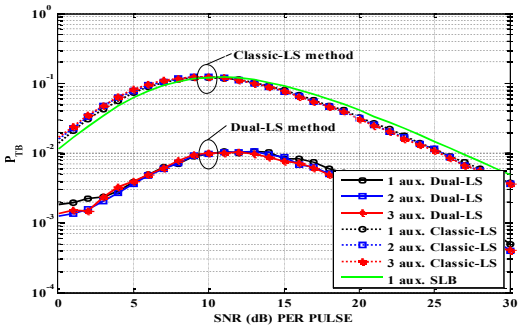
[Downloaded from jiaeee.com on 2026-11-20]
[DOR: 20.1001.1.26765810.1397.15.2.10.0]
Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers - Vol.15- No.2-Summer 2018

در شرایط جمینگ می‌تواند باعث پذیرش 1.5 dB افت عملکرد در احتمال آشکارسازی هدف در عمل بشود.

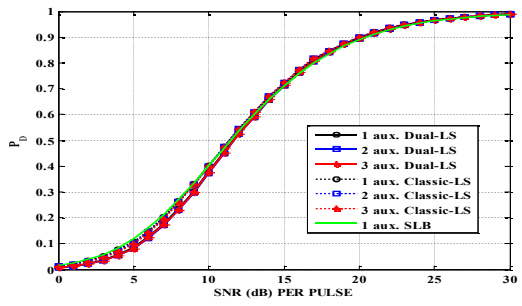
نگاهی اجمالی بر نتایج شبیه‌سازی بر برتری روش Dual-LS نسبت به روش Classic-LS دلالت دارد اما بررسی‌های انجام شده حاکی از آن است که هر چند آشکارساز پیشنهاد شده در روش Dual-LS، در سناریوی حضور جمر عملکرد بهتری از خود نشان می‌دهد اما این بهبود عملکرد با افت در احتمال آشکارسازی هدف همراه است. بنابراین برای اینکه مقایسه نتایج در هر دو دسته از آشکارسازها منصفانه باشد و درک بهتری از نتایج شبیه‌سازی در این مورد داشته باشیم، سطوح آستانه انسداد در سیستم‌ها را طوری تنظیم می‌کنیم که احتمال آشکارسازی هدف در همه سیستم‌ها یکی باشد. سپس در شرایط یکسان از نظر احتمال آشکارسازی هدف، به بررسی عملکرد آن‌ها در سناریوی حضور جمر خواهیم پرداخت.

به این منظور، در شبیه‌سازی انجام گرفته در روش Classic-LS مقدار $P_{TB} = 0.12$ در نظر گرفته شده است و بقیه پارامترها مشابه قبل فرض شده‌اند.

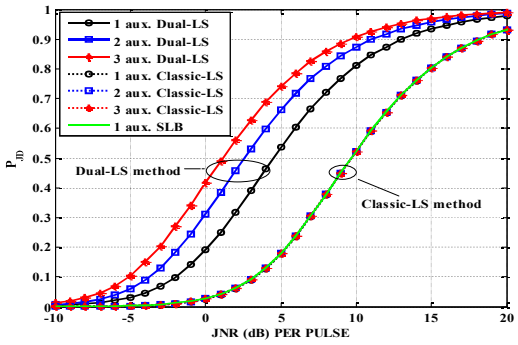
با توجه به شکل (۸)، نتیجه نشان می‌دهد که در این حالت نیز با تغییر مقدار P_{TB}، احتمال هشدار کاذب هدف در حضور جمر در روش Dual-LS نسبت به روش Classic-LS بهبود قابل توجهی دارد و منحنی‌های به دست آمده به وضوح نشان‌دهنده‌ی عملکرد مناسب روش پیشنهادی Dual-LS هستند. جهت بررسی دقیق‌تر، نتایج مربوط به شرایط جمینگ در حضور جمری با JNR = 10, 20 dB را برای آشکارسازهای پیشنهادی و با $۱۰^{۷}$ بار تکرار شبیه‌سازی در جدول‌های (۱) و (۲) مشاهده می‌کنید.



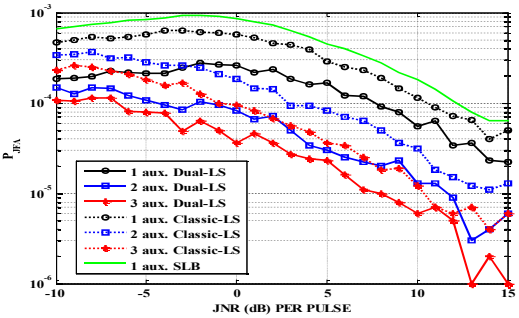
الف: احتمال انسداد هدف



ب: احتمال آشکارسازی هدف



ج: احتمال تشخیص صحیح وقوع جمینگ



د: احتمال هشدار کاذب هدف در حضور جمر

شکل (۸): مقایسه عملکرد آشکارسازهای پیشنهادی در شرایط یکسان از لحاظ احتمال آشکارسازی هدف

جدول (۱): احتمال هشدار کاذب هدف در اثر جمینگ

روش‌های مختلف آشکارسازی	JNR = 10 dB	JNR = 20 dB
استفاده از ۱ آنتن کمکی	1.86×10^{-4}	2.4×10^{-5}
۱ آنتن کمکی و روش Classic-LS	1.15×10^{-4}	1.34×10^{-5}
۲ آنتن کمکی و روش Classic-LS	3.1×10^{-5}	3.3×10^{-6}
۳ آنتن کمکی و روش Classic-LS	1.2×10^{-5}	1.1×10^{-6}
۱ آنتن کمکی و روش Dual-LS	5.5×10^{-5}	7.8×10^{-6}
۲ آنتن کمکی و روش Dual-LS	1.3×10^{-5}	1.8×10^{-6}
۳ آنتن کمکی و روش Dual-LS	6×10^{-6}	8×10^{-7}

جدول (۲): احتمال آشکارسازی صحیح جمر

روش‌های مختلف آشکارسازی	JNR = 10 dB	JNR = 20 dB
استفاده از ۱ آنتن کمکی	0.5225	0.9318
۱ آنتن کمکی و روش Classic-LS	0.5227	0.9320
۲ آنتن کمکی و روش Classic-LS	0.5228	0.9321
۳ آنتن کمکی و روش Classic-LS	0.5228	0.9321
۱ آنتن کمکی و روش Dual-LS	0.8107	0.9786
۲ آنتن کمکی و روش Dual-LS	0.8734	0.9864
۳ آنتن کمکی و روش Dual-LS	0.9068	0.9902

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-11-20]
[DOR: 20.1001.1.26765810.1397.15.2.10.0]

۶- نتیجه‌گیری

در این مقاله دو روش مختلف بر مبنای پوش مختلط سیگنال‌های دریافتی و با استفاده از چند آنتن کمکی برای آشکارسازی در کاربرد SLB ارائه شد و عملکرد آنها با شبیه‌سازی مورد مقایسه قرار گرفت. نتایج شبیه‌سازی با استفاده از دو و سه آنتن کمکی، حاکی از آن است که در شرایط یکسان از نظر آشکارسازی صحیح هدف و بدون تحمیل افت عملکرد به سیستم، می‌توان در سناریویی که جمر در محیط حضور دارد، با استفاده از روش‌های پیشنهادی، تعداد هشدارهای کاذب ناشی از حضور جمر را به میزان قابل توجهی کاهش داده و از صفحه نمایش تمیزتری نسبت به سیستم متداول SLB برخوردار شد. این موضوع بیانگر این است که مطابق با پیش‌بینی‌های انجام شده، آشکارساز بهینه‌ای که برای این سناریو طراحی شده است، با استفاده از اطلاعات کانال کمکی منجر به بهبود در عملکرد سیستم در شرایط جمینگ خواهد شد.

مراجع

[۱] احمدی، محامدپور، **"تشخیص مدولاسیون فاصله تکرار پالس-های راداری"**، مجله انجمن مهندسین برق و الکترونیک ایران، شماره دوم، سال ششم، صص ۹-۱۸، ۱۳۸۸.

[۲] علائی، امین‌داور، **"روشی جدید در بازشناسی خودکار اهداف متحرک زمینی با استفاده از رادارهای مراقبت زمینی پالس داپلر"**، مجله انجمن مهندسین برق و الکترونیک ایران، شماره دوم، سال ششم، صص ۱-۷، ۱۳۸۸.

[۳] قهرمانی، براری، **"حذف کلاتر قوی دریا با استفاده از الگوریتم DUET BSS"**، مجله انجمن مهندسین برق و الکترونیک ایران، شماره دوم، سال دوازدهم، صص ۴۶-۶۲، ۱۳۹۴.

[4] O. Coşkun and Ç. Candan, "On the Optimality of Maisel Sidelobe Blanking Structure," in 2014 IEEE Radar Conference, 2014, pp. 1102-1107.

[5] G. Cui, A. De Maio, M. Piezzo, V. Carotenuto, and A. Farina, "Sidelobe Blanking with Correlated Generalized Swerling-Chi Fluctuation Models," in 2012 13th International Radar Symposium, 2012, pp. 141-144.

[6] G. Cui, A. De Maio, M. Piezzo, and A. Farina, "Sidelobe Blanking with Generalized Swerling-Chi Fluctuation Models," IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, vol. 49, pp. 982-1005, 2013.

[7] A. De Maio, A. Farina, and F. Gini, "Performance Analysis of the Sidelobe Blanking System for Two Fluctuating Jammer Models," IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, vol. 41, pp. 1082-1091, 2005.

[8] E. C. Desk, "Electronic warfare and radar systems engineering handbook," 1997.

[9] A. Farina and F. Gini, "Calculation of Blanking Probability for the Sidelobe Blanking for Two Interference Statistical Models," IEEE Signal Processing Letters, vol. 5, pp. 98-100, 1998.

[10] A. Farina and F. Gini, "Design of SLB Systems in the Presence of Correlated Ground Clutter," IEE Proceedings-Radar, Sonar and Navigation, vol. 147, pp. 199-207, 2000.

[11] H. Finn, R. Johnson, and P. Z. Peebles, "Fluctuating Target Detection in Clutter Using Sidelobe Blanking Logic," IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, pp. 147-159, 1971.

[12] A. Farina, Antenna-based signal processing techniques for radar systems, Norwood, MA: Artech House, 1992.

[13] L. Maisel, "Performance of Sidelobe Blanking Systems," IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, pp. 174-180, 1968.

زیرنویس‌ها

[1] Omnidirectional
[2] Maisel
[3] Blanking logic
[4] Least-Square
[5] Target Blanking probability
[6] Jammer Detection probability
[7] Jammer False-Alarm probability
[8] Target Detection probability

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-11-20]

[DOR: 20.1001.1.26765810.1397.15.2.10.0]
Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers - Vol.15- No.2-Summer 2018