

## استفاده از چند آنتن کمکی در کاربرد SLB برای مقابله با جمینگ فریب در رادار جستجوگر

فاطمه لطفی<sup>۱</sup>، مهرزاد بیغش<sup>۲\*</sup>، عباس شیخی<sup>۳</sup>

۱- کارشناس ارشد، ۲ و ۳- استاد، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه شیراز

(دریافت: ۹۵/۰۸/۰۹؛ پذیرش: ۹۵/۱۱/۱۱)

### چکیده

روش متداول برای جلوگیری از ورود سیگنال تداخل از طریق گلبرگ‌های فرعی آنتن رادار به خروجی واحد پردازش سیگنال، استفاده از SLB می‌باشد. در ساختار کلاسیک SLB، از یک آنتن کمکی استفاده شده است و مبنای تمامی مقالات نیز استفاده از همین یک آنتن کمکی می‌باشد. در این مقاله، ایده استفاده از چند آنتن مستقل از یکدیگر به‌عنوان آنتن‌های کمکی در کاربرد SLB مطرح گردیده و در این راستا یک دسته آشکارساز معرفی شده‌اند که مبتنی بر پوش حقیقی هستند و پردازنده با به‌کارگیری منطق‌های AND، OR و SUM کلیدزنی را با سناریوهای مختلف انجام می‌دهد. مسئله دیگری که در این مقاله مورد مطالعه قرار گرفته است، منطق عملکردی است که برای تنظیم سطوح آستانه آشکارسازی و انسداد در نظر گرفته شده است. شبیه‌سازی‌های کامپیوتری بر بهبود عملکرد سیستم با استفاده از معیار عملکرد جدید و تعدد آنتن‌های کمکی دلالت دارد.

### واژگان کلیدی

اخلال‌گر، هدف، آنتن کمکی، آشکارسازی، انسداد اختلال گلبرگ فرعی.

### ۱- مقدمه

برای مقابله با تهدیدات دشمن در این خصوص، بهترین راه‌حل توانمند کردن سیستم در مقابل اختلال است. یکی از راه‌های مقاوم‌سازی رادار در مقابل جمینگ فریب، استفاده از SLB یا روش انسداد اختلال گلبرگ فرعی است که هم برای رادار جستجو و هم برای رادار ردگیری می‌تواند مورد استفاده قرار گیرد. به این منظور، از یک آنتن همه‌جهته در کنار آنتن اصلی رادار استفاده می‌شود. نقش این آنتن کمکی این است که در هنگام وقوع جمینگ به سیستم هشدار دهد و از ورود اثر اخلال دریافتی از طریق گلبرگ جانبی به خروجی مدارات پردازش سیگنال جلوگیری کند که در نتیجه از آشکارسازی کاذب در جهت نادرست جلوگیری خواهد شد [۱-۷].

SLB کلاسیک اولین بار در سال ۱۹۶۸ ارائه شده است [۱]. در این مقاله، برای تمایز بین سیگنال کانال اصلی و فرعی راه‌کاری شهودی ارائه شده است که مبتنی بر مقایسه دامنه سیگنال دریافتی از آنتن اصلی و کمکی می‌باشد. سپس عملکرد روش پیشنهادی برای یک رادار تک پالس و هدف بدون تموج، در قالب پارامترهای  $P_D$  و  $P_{FA}$  به فرم بسته به‌دست آمده است.

سپس این‌کار برای انواع مدل‌های تموج هدف تعمیم داده شده و در حضور انواع تداخل‌ها از جمله کلاتر، نویز و جمر متداخل در گلبرگ‌های فرعی آنتن عملکرد سیستم مورد ارزیابی قرار گرفته است و حتی در بعضی موارد برای بهبود عملکرد سیستم از

در یک سیستم راداری زمانی که یک سیگنال از آنتن اصلی وارد گیرنده رادار شده و از آستانه آشکارسازی تجاوز می‌کند، فرض می‌شود سیگنال توسط گلبرگ اصلی آنتن رادار دریافت شده است. بر این اساس، یک سیگنال ناخواسته بسیار قوی می‌تواند از طریق گلبرگ‌های فرعی آنتن رادار وارد گیرنده شده و به‌عنوان سیگنال گلبرگ اصلی تلقی شود و باعث خطاهای زاویه‌ای بزرگ شود. این سیگنال تداخلی، می‌تواند انعکاس‌های قوی بازگشتی از هدف، اکوی کلاترها و یا سیگنال یک جمر باشد. جمرها به دو دسته جمرهای نویزی و جمرهای فریب تقسیم می‌شوند. جمرهای فریب می‌توانند با ارسال سیگنال‌هایی با شباهت هرچه بیشتر نسبت به اکوی اهداف واقعی از گلبرگ فرعی آنتن، باعث ایجاد تعدادی هدف جعلی در صفحه نمایش رادار در زوایای متفاوت با خود شده و کاری کنند که پردازشگر رادار در تشخیص اهداف واقعی از میان اهداف غیرواقعی به اشتباه افتاده یا اشباع شود و نتواند سیگنال مطلوبش را دنبال کند. مقابله با این نوع اختلال که از گلبرگ فرعی آنتن رادار دریافت می‌گردد موضوع بحث این مقاله است.

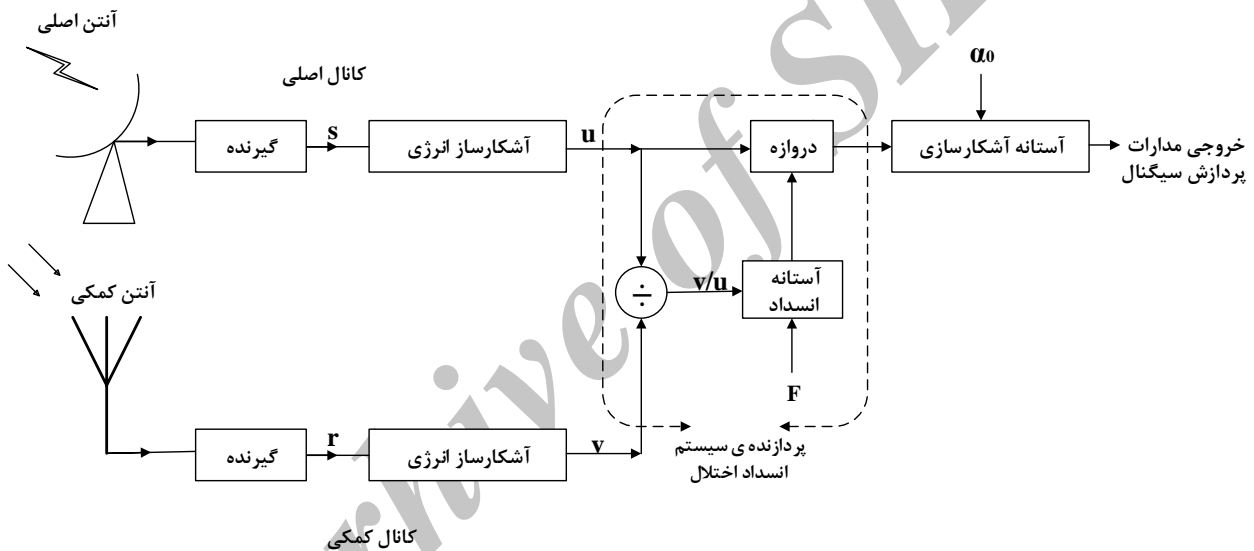
\*رایانامه نویسنده مسئول: biguesh@shirazu.ac.ir

اخلال پالسی استفاده از SLC چندان مناسب نیست، لذا برای جمینگ‌های گذرا (پالسی) SLB به کار می‌رود که در ساختار آن تا به حال استفاده از تعدد آنتن‌های کمکی گزارش نشده است.

## ۲- بیان عملکرد سیستم SLB کلاسیک

در این بخش، اصول کار سیستم SLB را مورد مطالعه قرار داده و پیکربندی و طرح کلی پردازش آن را بررسی خواهیم کرد.

شکل (۱)، بلوک دیاگرام سیستم کلاسیک SLB با دو کانال گیرنده (یکی برای آنتن رادار و دیگری برای آنتن کمکی) را نشان می‌دهد. کانال اصلی یا مسیر اصلی به آنتن رادار و کانال کمکی به آنتن کمکی اختصاص داده شده است.



شکل (۱)، نمایش بلوکی سیستم SLB کلاسیک

در این صورت به دلیل این که بهره آنتن کمکی بزرگ‌تر از بهره گلبرگ‌های فرعی آنتن اصلی است، سیگنال خروجی کانال کمکی بزرگ‌تر از سیگنال خروجی کانال اصلی شده و در نتیجه به وسیله منطق انسداد<sup>۴</sup> توقیف می‌شود<sup>۵</sup>. به این معنی که به سیگنال کانال اصلی اجازه عبور داده نشده و به این ترتیب سیگنال اختلال وارد سیستم آشکارساز رادار نخواهد شد. اما در صورتی که یک هدف در جهت گلبرگ اصلی آنتن رادار قرار داشته باشد، از آن جایی که بهره گلبرگ اصلی آنتن رادار بیشتر از بهره آنتن کمکی است، سیگنال خروجی از گیرنده کانال اصلی نسبت به سیگنال خروجی از گیرنده کانال کمکی بزرگ‌تر بوده و منطق انسداد به سیگنال کانال اصلی اجازه عبور می‌دهد تا وارد

تجمیع پالس<sup>۱</sup> نیز استفاده شده است [۸-۱۷]. در این میان، برخی مقالات نیز به تحلیل عملکرد SLB از نقطه نظر احتمال مسدود کردن<sup>۲</sup> پرداخته و ادعا کرده‌اند که این رابطه به تنهایی برای طراحی یک SLB کافی است [۹ و ۱۲]. اما سنجش عملکرد سیستم فقط بر مبنای احتمال انسداد صحیح نیست چرا که افزایش احتمال انسداد می‌تواند منجر به افت احتمال آشکارسازی هدف شود [۱۳].

در این مقاله با استفاده از چند آنتن کمکی، روش‌هایی برای آشکارسازی هدف کاذب ارائه می‌گردد که علاوه بر قیود احتمال آشکارسازی مطلوب به‌ازای احتمال هشدار کاذب داده شده، لازم است که احتمال انسداد گلبرگ فرعی مطلوبی نیز داشته باشد. لازم به ذکر است که استفاده از آنتن‌های کمکی متعدد در کاربرد SLC برای حذف اختلال پیوسته متداول است اما برای حذف

آنتن کمکی یک آنتن همه جهته<sup>۳</sup> بوده و بهره آن به گونه‌ای طراحی می‌شود که از بزرگ‌ترین گلبرگ فرعی آنتن اصلی بیش‌تر باشد. عملکرد سیستم با توجه به زوج سیگنال پردازش شده ( $u, v$ ) که در شکل (۱) نمایش داده شده‌اند، مورد تجزیه و تحلیل قرار می‌گیرد. این سیستم در هر سلول برد راداری و بر اساس یک جاروب فضا، سیگنال‌ها را در هر دو کانال دریافت و پردازش می‌کند؛ سپس واحد پردازنده سیستم، تصمیم می‌گیرد که کانال اصلی رادار را مسدود کند یا خیر. مطابق بلوک دیاگرام سیستم، دستور انسداد زمانی صادر خواهد شد که نسبت  $v/u$  بین سیگنال‌های آشکار شده در دو کانال، بزرگ‌تر از مقدار آستانه انسداد ( $F$ ) باشد. این مسئله زمانی اتفاق می‌افتد که اهداف و یا سیگنال‌های اختلالی در جهت گلبرگ‌های فرعی آنتن رادار واقع شده باشند.

<sup>۴</sup> Blanking logic

<sup>۵</sup> در یک سیستم SLB عملی به جای این که سیگنال دو کانال با هم مقایسه شوند، نسبت آن‌ها با یک سطح آستانه مناسب به نام آستانه انسداد مقایسه می‌شود.

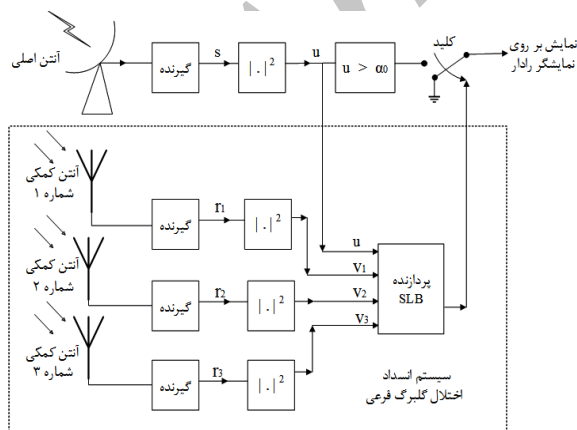
<sup>۱</sup> Pulse integration

<sup>۲</sup> Probability of Blanking

<sup>۳</sup> Omnidirectional

آنتن‌های کمکی استفاده شده است. در آشکارسازهای ارائه شده در این مقاله، آشکارسازی و تشخیص نوع سیگنال اکو<sup>۱</sup> از نقطه نظر دریافت از گلبرگ اصلی یا گلبرگ فرعی، مبتنی بر یک راه کار شهودی و با استفاده از دروازه‌های منطقی<sup>۲</sup> انجام می‌گیرد. مطابق آنچه که در بلوک دیاگرام نشان داده شده است، عملکرد سیستم با توجه به سیگنال‌های پردازش شده  $(u, v_1, v_2, v_3)$  مورد تجزیه و تحلیل قرار می‌گیرد. به این ترتیب که پردازشگر می‌تواند کلیدزنی را با سناریوهای مختلف انجام دهد. در واقع سیستم پردازنده رادار برای باز و بسته کردن کلید می‌تواند منطق‌های مختلفی را به کار گیرد. توضیح این‌که در این سیستم،  $u$  پوش سیگنال در خروجی کانال اصلی و  $v_1, v_2, v_3$  پوش سیگنال در خروجی هر یک از کانال‌های کمکی هستند.

در روش انسداد با منطق AND، از دروازه AND استفاده می‌شود که یک مدار منطقی ساده است. در این روش فقط در صورتی دستور انسداد صادر می‌شود که همه کانال‌های کمکی با هم حضور جمر را گزارش کرده باشند. در روش انسداد با منطق OR، از یک دروازه OR استفاده می‌شود و زمانی که این منطق در پردازش‌ها به کار رود، باید حداقل یکی از کانال‌های کمکی حضور جمر را گزارش کرده باشند تا دستور انسداد صادر شود. عملکرد روش دیگری که در پردازش‌ها به کار رفته و ما آن را SUM نامیده‌ایم، به این صورت است که ابتدا روی دامنه سیگنال‌های دریافتی از کانال‌های کمکی میانگین‌گیری انجام شده و سپس نسبت حاصل آن به کانال اصلی با آستانه مقایسه می‌شود و در نهایت تصمیم‌گیری انجام می‌گیرد.

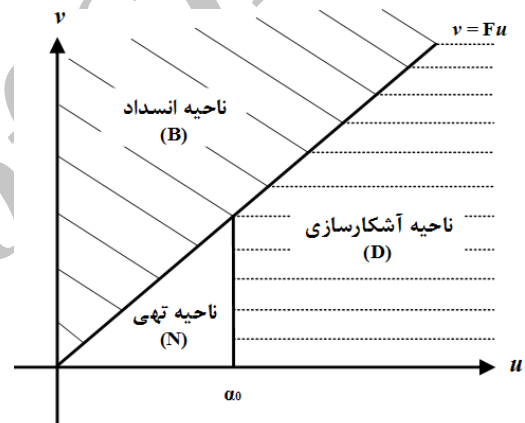


شکل (۳). بلوک دیاگرام سیستم SLB با استفاده از سه آنتن کمکی

آشکارساز رادار شود. این سیگنال در مرحله بعد با آستانه آشکارسازی ( $\alpha_0$ ) مقایسه می‌شود تا معلوم شود که آیا سیگنال هدف توسط کانال اصلی رادار دریافت شده است یا خیر.

در پردازش‌های این نوع رادار براساس سیگنال  $u$  (سیگنال پوش کانال اصلی) و  $v$  (سیگنال پوش کانال کمکی)، سه فرضیه مورد آزمون قرار می‌گیرد:

- ۱- فرضیه  $H_0$  (تهی) که مربوط به حضور نویز تنها در دو کانال است (ناحیه N نشان داده شده در شکل (۲)).
- ۲- فرضیه  $H_1$  که مربوط به حضور هدف در گلبرگ اصلی است (ناحیه D نشان داده شده در شکل (۲)).
- ۳- فرضیه  $H_2$  که مربوط به حضور سیگنال تداخلی در ناحیه گلبرگ‌های جانبی و در سلول برد مشابه با هدف اصلی است (ناحیه B نشان داده شده در شکل (۲)).



شکل (۲). مسئله آزمون چند فرضیه‌ای در صفحه  $(u, v)$

نواحی N، D و B (نشان داده شده در شکل (۲))، به ترتیب مربوط به آشکارسازی فرضیه تهی، آشکارسازی صحیح هدف و دستور انسداد هستند که به صورت زیر تعریف می‌شوند:

$$\begin{aligned}
 N: & 0 \leq u \leq \alpha_0 \quad \text{and} \quad 0 \leq v \leq Fu \\
 D: & u > \alpha_0 \quad \text{and} \quad 0 \leq v \leq Fu \\
 B: & u > 0 \quad \text{and} \quad v \geq Fu
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

منطق عملکرد این آشکارساز به این صورت است که ابتدا با بررسی نسبت  $v/u$  بین فرضیه‌های B و DUN، تصمیم‌گیری می‌شود. سپس در صورت انتخاب فرض DUN، با بررسی مقدار  $u$  بین D و N تصمیم‌گیری خواهد شد.

### ۳- معرفی سیستم SLB پیشنهادی

#### ۳-۱- بلوک دیاگرام سیستم پیشنهادی

شکل (۳)، بلوک دیاگرام مربوط به سیستم پیشنهادی را نشان می‌دهد که در ساختار آن از چند آنتن همه جبهه به‌عنوان

<sup>۱</sup> منظور از سیگنال اکو، نسخه‌ای تضعیف شده و تأخیر یافته از سیگنال ارسالی است.

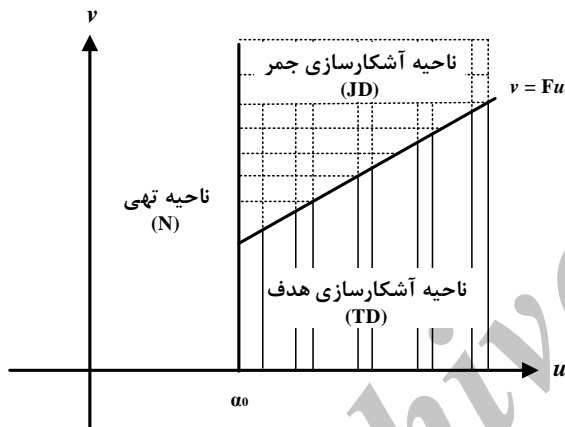
<sup>۲</sup> Logical gates

سپس مقایسه با آستانه انسداد صورت گرفته و پردازنده سیستم SLB، منطق خود را بر روی سیگنال اکو اعمال می‌نماید.

$$\begin{aligned} N: & 0 \leq u \leq \alpha_0 \\ TD: & u > \alpha_0 \quad \text{and} \quad 0 \leq v_i \leq Fu \quad i=1, 2, 3 \\ JD: & u > \alpha_0 \quad \text{and} \quad v_i \geq Fu \end{aligned} \quad (4)$$

به عبارتی، در ابتدا با بررسی سطح سیگنال  $u$ ، بین دو فرضیه  $N$  و  $JDUTD$  تصمیم‌گیری شده و در صورت انتخاب فرضیه  $JDUTD$ ، با بررسی نسبت  $v/u$ ، بین دو فرضیه  $JD$  و  $TD$  تصمیم‌گیری می‌شود.

از نظر عملی نیز این کار منطقی‌تر از روش قبل می‌باشد. در این روش تنها زمانی از کانال‌های کمکی استفاده می‌شود که در کانال اصلی، اعلام حضور اکو شده باشد و در این صورت با استفاده از کانال کمکی بررسی می‌شود که این اکو مربوط به هدف گلبرگ اصلی است یا گلبرگ فرعی.



شکل (۵). مسئله آزمون چند فرضیه‌ای در صفحه  $(u, v)$  در سیستم پیشنهادی

#### ۴- مدل ریاضی مسئله

پرداختن به جزئیات ریاضی مسئله، مستلزم این است که یک مدل ریاضی از فرضیه‌های سه‌گانه‌ای که پیش‌تر عنوان شد در اختیار داشته باشیم. همان‌طور که در بخش قبل اشاره شد، در آشکارساز ارائه شده، باید دو مسئله آشکارسازی سیگنال اکو و دسته‌بندی سیگنال اکو حل شوند. در مرحله اول، در پردازنده گیرنده، با یک مسئله آشکارسازی راداری مواجه هستیم و گیرنده رادار همواره با توجه به سیگنال دریافتی باید تصمیم بگیرد که با کدام یک از دو وضعیت وجود سیگنال اکو ( $H_1$ ) و یا عدم وجود سیگنال اکو ( $H_0$ ) روبرو است. فرآیند آشکارسازی در واقع عمل تصمیم‌گیری با استفاده از داده‌های آغشته به نویز و تداخل می‌باشد. ما این مسئله را در یک رادار پالسی که عمل آشکارسازی را بر اساس پردازش اکوی ناشی از یک پالس انجام می‌دهد، در نظر گرفته‌ایم و در این مقاله با در نظر گرفتن مدل سورلینگ-۱ برای

#### ۳-۲- چیدمان آنتن‌های اصلی و کمکی در روش پیشنهادی

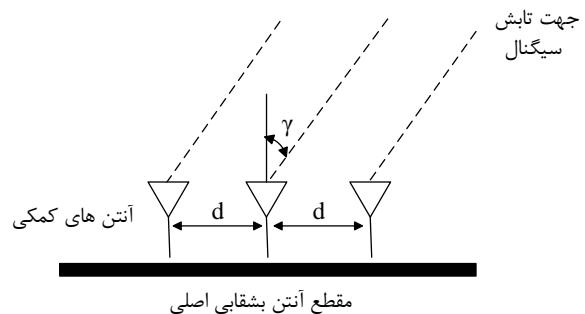
در اولین گام برای بررسی عملکرد سیستمی که از چند آنتن کمکی در ساختار آن استفاده می‌گردد، سیگنال‌های دریافتی در این سیستم را مدل می‌کنیم. بنابراین در ابتدا بایستی مدلی برای چیدمان آنتن‌های اصلی و کمکی در اختیار داشته باشیم. طرح کلی چیدمان آنتن‌های اصلی و کمکی در سیستم پیشنهادی (با استفاده از سه آنتن کمکی)، به صورتی است که در شکل (۴) نشان داده شده است و آنتن‌های کمکی در بالا یا پایین آنتن اصلی به صورت یک آرایه خطی یکنواخت قرار گرفته‌اند. بدیهی است که به دلیل فاصله مکانی آنتن‌ها نمی‌توان سیگنال‌های دریافتی همه کانال‌ها را هم‌فاز در نظر گرفت. پس اگر سیگنال دریافتی توسط آنتن اصلی را با  $p$  نشان دهیم، سیگنال دریافتی توسط آنتن‌های کمکی به صورت زیر خواهند بود:

$$\begin{aligned} r_1 &= \alpha p e^{-j\varphi} \\ r_2 &= \alpha p \\ r_3 &= \alpha p e^{+j\varphi} \end{aligned} \quad (2)$$

که با توجه به چیدمان خطی المان‌های آنتن کمکی، در این روابط  $\varphi$  چنین است:

$$\varphi = \frac{2\pi d}{\lambda} \sin(\gamma) \quad (3)$$

که در این جا،  $\gamma$  جهت تابش سیگنال،  $d$  فاصله میان آنتن‌های کمکی و  $\lambda$  طول موج سیگنال دریافتی است. همچنین در این رابطه،  $\alpha$  نیز بیانگر اختلاف بهره آنتن اصلی و آنتن‌های کمکی در راستای هدف می‌باشد.

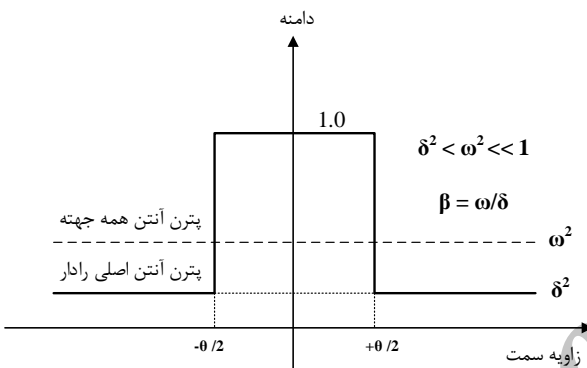


شکل (۴). چیدمان آنتن‌های اصلی و کمکی نسبت به یکدیگر

#### ۳-۳- نواحی سه‌گانه $N$ ، $D$ و $B$ در سیستم پیشنهادی

در روش پیشنهادی، نواحی تصمیم‌گیری در صفحه  $(u, v)$  مطابق طرح نشان داده شده در شکل (۵) اصلاح می‌گردد. معادل ریاضی این طرح با رابطه (۴) قابل بیان است. به این ترتیب، سیگنال اکو (اعم از اکوی هدف یا جمر) تنها در صورتی قابلیت آشکارسازی را دارد که در ابتدا از آستانه آشکارسازی کانال اصلی عبور کرده باشد.

بهره‌های توان نرمالیزه شده و بهره گلبرگ اصلی را واحد و سطح گلبرگ‌های فرعی  $\delta^2$  در نظر گرفته شده‌اند. آنتن کمکی یک آنتن همه جهت با بهره توان  $\omega^2$  فرض شده است. بدین ترتیب پارامتر  $\beta$  به صورت نسبت  $\omega/\delta$  تعریف شده است. با توجه به معلوم بودن الگوی آنتن اصلی و کمکی، پارامترهای  $\delta$ ،  $\beta$  و  $\omega$  معلوم هستند. این فرض در سایر مراجع نیز برای SLB با یک آنتن کمکی لحاظ شده است [۱-۲]. به این ترتیب، اگر سیگنال جمر مستقر در گلبرگ فرعی در کانال اصلی با دامنه C دریافت شود، سیگنال این جمر در کانال کمکی با دامنه  $\beta C$  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  $\omega A$  دریافت خواهد شد.



شکل (۶). پترن نرمالیزه ایده‌آل آنتن‌های اصلی و کمکی

در مرحله دوم، پس از این که آشکارساز مرحله اول، حضور سیگنال اکو را اعلام کرد، می‌خواهیم تشخیص دهیم که این سیگنال مربوط به هدف گلبرگ اصلی است یا مربوط به تداخل‌گری است که از گلبرگ‌های فرعی آنتن حمله کرده است. به این منظور، مجدداً با یک مسئله آشکارسازی مواجهیم که باید بین فرض‌های  $H_0$  و  $H_1$  افزایش قائل شود. در ادامه مدل ریاضی این فرضیه‌ها آورده شده است:

$$H_0': \begin{cases} s = v + p \\ r_1 = v_1 + \omega p e^{-j\phi} \\ r_2 = v_2 + \omega p \\ r_3 = v_3 + \omega p e^{+j\phi} \end{cases}, \quad H_1': \begin{cases} s = v + p \\ r_1 = v_1 + \beta p e^{-j\phi} \\ r_2 = v_2 + \beta p \\ r_3 = v_3 + \beta p e^{+j\phi} \end{cases} \quad (7)$$

که در این آزمون فرض،  $v$ ،  $v_1$ ،  $v_2$  و  $v_3$  نویزهای مختلط سفید گوسی iid با واریانس معلوم  $\sigma^2$ ،  $p$  متغیر مختلط گوسی با واریانس مجهول  $\sigma_1^2$  بوده و  $\omega$  و  $\beta$  دو پارامتر معلوم هستند.

قاعده آشکارسازی مورد استفاده برای آزمون فرض (۷) برای هر یک از منطق‌های AND، OR و SUM به ترتیب به صورت‌های زیر می‌باشند:

سیگنال هدف و جمر، مسئله آزمون فرضیه  $H_0$  در مقابل  $H_1$  را حل می‌کنیم. علت استفاده از مدل سورلینگ-۱ برای سیگنال دریافتی این است که مدل واقعی تری از تموج دامنه هدف یا جمر را نشان می‌دهد. به عنوان نمونه سیستم مورد نظر، یک آنتن اصلی و سه آنتن کمکی دارد<sup>۱</sup> که سیگنال خروجی از این کانال‌ها در هر سلول برد راداری<sup>۲</sup> یک سیگنال مختلط می‌باشد. سیگنال خروجی گیرنده کانال اصلی را با  $s$  و خروجی‌های متناظر با همین سلول برد راداری در گیرنده کانال‌های کمکی را با  $r_1$  تا  $r_3$  نشان می‌دهیم. لذا مسئله آشکارسازی به صورت زیر مدل می‌شود:

$$H_0: \begin{cases} s = v \\ r_1 = v_1 \\ r_2 = v_2 \\ r_3 = v_3 \end{cases}, \quad H_1: \begin{cases} s = v + p \\ r_1 = v_1 + \alpha p e^{-j\phi} \\ r_2 = v_2 + \alpha p \\ r_3 = v_3 + \alpha p e^{+j\phi} \end{cases} \quad (5)$$

قاعده آشکارسازی مورد استفاده جهت تصمیم‌گیری بین دو فرضیه  $H_0$  و  $H_1$  به صورت زیر است:

$$\begin{cases} |s| > \alpha_0 & H_1 \\ |s| < \alpha_0 & H_0 \end{cases} \quad (6)$$

تحت فرضیه  $H_0$ ، سیگنال کانال اصلی و کانال‌های کمکی همگی حاوی نویز حرارتی گیرنده هستند که  $v$ ،  $v_1$ ،  $v_2$  و  $v_3$  به ترتیب نویز گیرنده در کانال‌های اصلی و کمکی بوده و آن‌ها را نویزهای مختلط سفید گوسی مستقل از یکدیگر و با واریانس معلوم  $\sigma^2$  در نظر می‌گیریم.  $p$  سیگنال اکوی دریافتی در خروجی گیرنده کانال اصلی است که با توجه به مدل تموج سورلینگ-۱، یک متغیر تصادفی مختلط گوسی با میانگین صفر می‌باشد.

تحت فرضیه  $H_1$ ، کانال اصلی و کانال‌های کمکی، علاوه بر نویز، حاوی سیگنال اکو نیز هستند اما بسته به این که سیگنال از کانال اصلی دریافت شده باشد یا از کانال‌های فرعی، اختلاف دامنه آن‌ها یعنی  $\alpha$  متفاوت است. در این جا پارامتر  $\alpha$  یک اسکالر حقیقی نامعلوم است که یکی از دو مقدار  $\omega$  و  $\beta$  را بسته به این که سیگنال اکو از گلبرگ اصلی یا فرعی دریافت شده باشد به خود می‌گیرد. فرض فوق ناشی از ایده‌آل فرض کردن الگوی آنتن‌های اصلی و کمکی مطابق آنچه که در شکل (۶) نشان داده شده است، می‌باشد. شکل گلبرگ اصلی به یک مستطیل و گلبرگ‌های فرعی به یک عدد ثابت ساده شده‌اند. برای الگوی آنتن‌های واقعی، گلبرگ‌های فرعی متعدد هستند، اما سطح واقعی گلبرگ‌ها کمتر از چیزی است که در مدل ساده‌شده ما، در نظر گرفته می‌شود. همه

<sup>۱</sup> تعداد کانال‌های کمکی می‌تواند ۲، ۳ و ... باشد که در این مقاله به صورت نمونه این تعداد ۳ در نظر گرفته شده است.

<sup>۲</sup> Range cell

<sup>۳</sup> Pattern

### ۵-۱- تعریف معیار یا منطق عملکرد مطلوب

جهت هرگونه بحث و شبیه‌سازی درباره سیستم پیشنهادی، در گام نخست نیاز به داشتن یک معیار مناسب برای تصمیم‌گیری و ارزیابی عملکرد آشکارسازهای مختلف می‌باشد. این چنین معیاری که برای تحلیل و مقایسه عملکرد آشکارسازهای مختلف الزامی است، در زیر خلاصه می‌شود:

۱- درصد مجموع هشدارهای کاذب جمر و هدف در اثر نویز گیرنده باید از ۰,۰۰۱ کمتر باشد. جهت تحقق این شرط، در آشکارساز مرحله اول، مقدار آستانه آشکارسازی ( $\alpha_0$ ) با توجه به نرخ هشدار کاذب داده شده (۰,۰۰۱) تنظیم می‌گردد.

۲-  $P_{TB}$  یا درصد اعلام حضور جمر زمانی که ضعیف‌ترین هدف حضور دارد (در این مقاله SNR=10 dB متناظر با ضعیف‌ترین هدف در نظر گرفته شده است)، از ۰,۰۱ کمتر باشد. این مقدار در واقع اتلافی است که ممکن است در احتمال آشکارسازی اتفاق بیفتد. جهت آن‌که این اتلاف ناچیز باشد، احتمال این رخداد با تنظیم مناسب  $F$ ، برابر با ۰,۰۱ لحاظ شده است.

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

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

### ۵-۲- نتایج شبیه‌سازی

با اعمال فرضیات فوق و همچنین در نظر گرفتن مقادیر  $\beta^2 = 5\text{ dB}$ ,  $\omega^2 = -30\text{ dB}$ ,  $\delta^2 = -35\text{ dB}$  برای مشخصه‌های آنتن، نتایج شبیه‌سازی در آشکارسازهای ارائه شده در شکل (۷) آمده است. هر نقطه از منحنی‌ها حاصل  $10^6$  مرتبه شبیه‌سازی می‌باشد.

به‌منظور بررسی رفتار آشکارسازهای ارائه شده در مواجهه با اهداف واقعی، منحنی‌های احتمال آشکارسازی هدف و احتمال انسداد هدف بر حسب SNR در شکل‌های (۷-الف) و (۷-ب) برای سیستم SLB تک آنتنی و SLB دو و سه آنتنی با الگوریتم‌های AND، OR، SUM رسم شده‌اند.

$$\text{AND rule: } \min \left( \frac{|r_i|}{|s|} \right) \begin{matrix} > \\ < \end{matrix} \begin{matrix} H_1 \\ H_0 \end{matrix} F$$

$$\text{OR rule: } \max \left( \frac{|r_i|}{|s|} \right) \begin{matrix} > \\ < \end{matrix} \begin{matrix} H_1 \\ H_0 \end{matrix} F \quad (۸)$$

$$\text{SUM rule: } \text{sum} \left( \frac{|r_i|}{|s|} \right) \begin{matrix} > \\ < \end{matrix} \begin{matrix} H_1 \\ H_0 \end{matrix} F$$

در شبیه‌سازی برای سیستم تک آنتنی نیز روش آشکارسازی (۴) به‌منظور تفکیک هدف از جمر و نویز به کار گرفته شده است.

### ۵- شبیه‌سازی کامپیوتری

در این بخش به بررسی نتایج شبیه‌سازی‌های حاصل از اعمال آشکارسازهای پیشنهادی به سیستم در چند سناریوی مختلف خواهیم پرداخت و عملکرد آن‌ها را از چند جنبه با یکدیگر و همچنین با سیستم کلاسیک مقایسه خواهیم کرد. برای این‌که مقایسه‌ها منصفانه باشند، مقادیر آستانه آشکارسازی ( $\alpha_0$ ) و آستانه انسداد ( $F$ ) را طوری تنظیم کرده‌ایم که همه سیستم‌های SLB دارای  $P_{FA}^1$  و  $P_{TB}^2$  یکسانی باشند. در هنگامی که جمر در محیط حضور دارد، برای ما مطلوب این است که صفحه نمایش رادار از حیث حضور اهداف غیرواقعی تمیز بوده و در عین حال این تمیز بودن ما را فریب ندهد یعنی سیستم هشدار بدهد که جمیگ رخ داده است. بنابراین پارامتری را تحت عنوان  $P_{JD}^3$  (احتمال آشکارسازی جمر) تعریف می‌کنیم که احتمال هشدار صحیح وقوع جمیگ را اعلام کند. یعنی در واقع، در زمان حضور جمر، سیستم به‌درستی حضور جمر را گزارش کند. از طرفی امکان دارد به‌دلیل حضور جمر در محیط، سیستم به اشتباه حضور هدف را گزارش کند که برای این رخداد نیز پارامتر  $P_{JFA}^4$  (احتمال هشدار نادرست جمر) را تعریف کرده‌ایم که در حقیقت میزان آغشته‌بودن صفحه نمایش رادار را نشان می‌دهد. احتمال آشکارسازی صحیح هدف را نیز  $P_{TD}^5$  نامیده‌ایم.

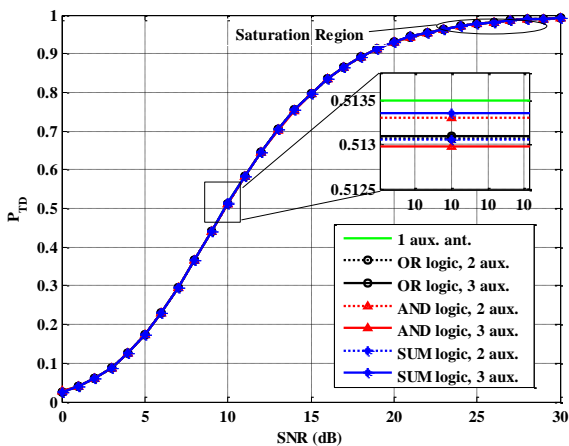
<sup>۱</sup> منظور از  $P_{FA}$  هشدار نادرست سیستم نسبت به حضور هدف است زمانی که تنها نویز در گیرنده‌ها وجود دارد.

<sup>۲</sup> منظور از  $P_{TB}$  هشدار نادرست سیستم نسبت به حضور جمر است زمانی که تنها سیگنال لوب اصلی هدف در گیرنده‌ها وجود دارد.

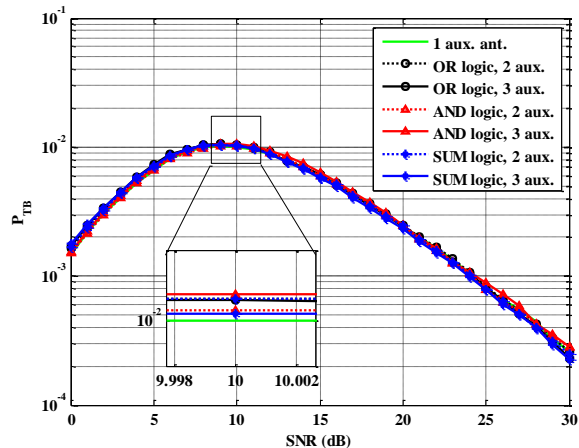
<sup>۳</sup> Jammer Detection probability

<sup>۴</sup> Jammer False Alarm probability

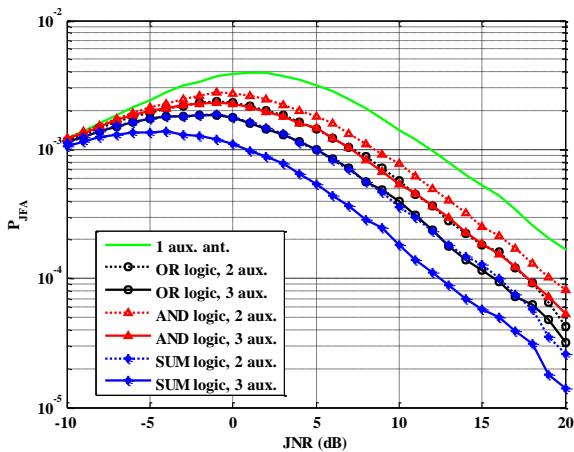
<sup>۵</sup> Target Detection probability



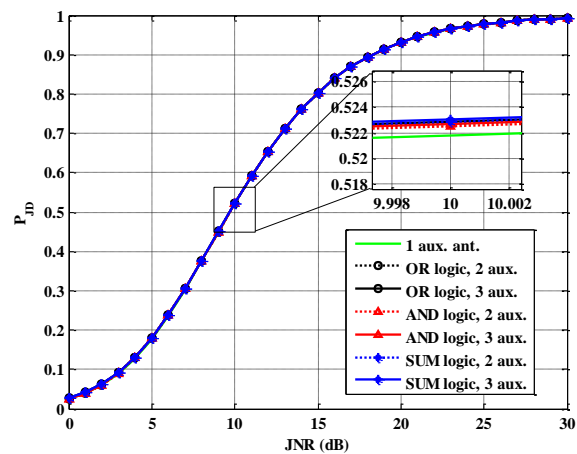
ب- احتمال آشکارسازی هدف



الف- احتمال انسداد هدف



د- احتمال هشدار کاذب هدف به دلیل وقوع جمینگ



ج- احتمال هشدار صحیح وقوع جمینگ

شکل (۷). مقایسه عملکرد آشکارسازهای پیشنهادی با یکدیگر و با سیستم متداول SLB

سیستم در تشخیص صحیح سیگنال هدف و جمر، با استفاده از این راه کارهای شهودی و با به کارگیری سیستم SLB چند آنتنی می توان در زمان حضور جمر به عملکرد بهتری از جنبه احتمال هشدار کاذب رسید. با توجه به منحنی ها، مشخصاً این بهبود با افزایش تعداد آنتن های کمکی از دو به سه، بارزتر می شود.

در مقایسه، آشکارسازهای مذکور این نکته حائز اهمیت است که بهترین نتیجه مربوط به استفاده از سه آنتن کمکی با منطق SUM می باشد که در این حالت، می توان در  $JNR > 10$  dB، از صفحه نمایشی در حدود ده برابر تمیزتر نسبت به سیستم کلاسیک بهره مند گردید (شکل ۷-د).

با توجه به این که در زمان وقوع جمینگ، ایجاد اهداف کاذب در صفحه نمایش رادار می تواند باعث اشباع پردازشگر داده رادار شود، در طراحی سیستم SLB، آن چه که در درجه اول اهمیت قرار دارد خلوت بودن صفحه نمایشگر رادار از نظر حضور اهداف غیرواقعی می باشد. بنابراین مسئله مهمی که در بررسی روش های مختلف آشکارسازی در این مقاله مد نظر قرار گرفته است،

همان گونه که در منحنی های شکل (۷-الف) مشاهده می شود، با تنظیم آستانه های  $F$  و  $\alpha_0$  که در بخش قبل بیان شد، احتمال مسدود کردن هدف با افزایش SNR کاهش می یابد. همچنین نتایج شبیه سازی در شکل (۷-ب) بیانگر این مطلب است که عملکرد آشکارسازهای پیشنهادی در حضور سیگنال هدف، بسیار نزدیک به سیستم SLB تک آنتنی بوده و افت محسوسی در احتمال آشکارسازی هدف نسبت به ساختار کلاسیک دیده نمی شود. در سناریوی حضور جمر نیز در شکل (۷-ج)،  $P_{TD}$  بر حسب  $JNR$  برای سیستم SLB تک آنتنی، دو آنتنی و سه آنتنی با الگوریتم های مختلف با استفاده از شبیه سازی بدست آمده و ترسیم شده اند. نتایج حاکی از آن است که قدرت تشخیص صحیح جمر در همه روش ها تقریباً یکسان بوده و منحنی ها برهم منطبق هستند. از طرفی، استفاده از منطق های AND، OR و SUM در هر دو حالت دو آنتنی و سه آنتنی، بهبود قابل توجهی نسبت به ساختار کلاسیک از نقطه نظر تمیز بودن صفحه نمایش رادار از اهداف کاذب ایجاد می نماید اما این بهبود در منطق SUM مشهودتر است (شکل ۷-د). بنابراین با حفظ عملکرد مطلوب

## ۷- مراجع

- [1] L. Maisel, "Performance of Sidelobe Blanking Systems," IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, pp. 174-180, 1968.
- [2] A. Farina, "Antenna-Based Signal Processing Techniques for Radar Systems", Norwood, MA: Artech House, 1992.
- [3] A. Farina, "Electronic Counter-Countermeasures," Vol. 24, Ed: chapter, 2008.
- [4] S. L. Johnston, "Radar Electronic Counter-Countermeasures," IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, pp. 109-117, 1978.
- [5] F. A. Butt and M. Jalil, "An Overview of Electronic Warfare in Radar Systems," Int. Conf. on Technological Advances in Electrical, Electronics and Computer Engineering (TAECE). 2013, 213-217.
- [6] E. C. Desk, "Electronic Warfare and Radar Systems Engineering handbook," Published in association with MTT-S & IEEE, 1997.
- [7] P. Grant and J. Collins, "Introduction to Electronic Warfare," Communications, Radar and Signal Processing, IEEE Proceedings F, Vol. 129, pp. 113-132, 1982.
- [8] 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.
- [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] D. A. Shnidman and S. S. Toumodge, "Sidelobe Blanking with Integration and Target Fluctuation," IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, Vol. 38, pp. 1023-1037, 2002.
- [12] 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.
- [13] D. A. Shnidman and N. R. Shnidman, "Sidelobe Blanking with Expanded Models," IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, Vol. 47, pp. 790-805, 2011.
- [14] G. Cui, A. De Maio, M. Piezzo, V. Carotenuto, and A. Farina, "Sidelobe Blanking with Correlated Generalized Swerling-Chi Fluctuation Models," In 13th Int. Radar Symposium. 2012, 141-144.
- [15] G. Cui, A. De Maio, A. Aubry, A. Farina, and L. Kong, "Advanced SLB Architectures with Invariant Receivers," IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, Vol. 49, pp. 798-818, 2013.
- [16] 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.
- [17] O. Coşkun and Ç. Candan, "On the Optimality of Maisel Sidelobe Blanking Structure," In IEEE Radar Conf. 2014, 1102-1107.

احتمال هشدار کاذب هدف در حضور جمر (احتمال آشکارسازی هدف دروغین) می‌باشد. مقدار این عامل مهم را در حضور جمری با  $JNR = 20$  dB برای روش‌های پیشنهاد شده و با  $10^7$  بار تکرار شبیه‌سازی در جدول (۱) مشاهده می‌کنید.

جدول (۱). نتایج شبیه‌سازی در  $JNR = 20$  dB برای احتمال هشدار کاذب هدف در حضور جمر

روش‌های مختلف آشکارسازی	$JNR = 20$ dB در $P_{JFA}$
استفاده از ۱ آنتن کمکی	$1.64 \times 10^{-4}$
استفاده از ۲ آنتن کمکی با منطق AND	$7.3 \times 10^{-5}$
استفاده از ۲ آنتن کمکی با منطق OR	$6.1 \times 10^{-5}$
استفاده از ۲ آنتن کمکی با منطق SUM	$3.2 \times 10^{-5}$
استفاده از ۳ آنتن کمکی با منطق AND	$5.7 \times 10^{-5}$
استفاده از ۳ آنتن کمکی با منطق OR	$3.5 \times 10^{-5}$
استفاده از ۳ آنتن کمکی با منطق SUM	$1.6 \times 10^{-5}$

## ۶- نتیجه‌گیری

در این مقاله، ایده استفاده از چند آنتن کمکی در سیستم SLB مطرح گردیده و سپس روش‌های مختلفی بر مبنای پوش حقیقی سیگنال‌های دریافتی برای استفاده از چند آنتن کمکی ارائه شد و عملکرد آن‌ها با شبیه‌سازی مورد بررسی قرار گرفت. روش‌های مذکور در دو گام، اقدام به آشکارسازی و اعلام حضور هدف یا جمر می‌کنند. در گام اول حضور یا عدم حضور سیگنال اکو در گیرنده بررسی می‌شود و در گام دوم سیگنال اکو از حیث دریافت از گلبرگ اصلی یا گلبرگ‌های فرعی طبقه‌بندی می‌گردد. این رویکرد متفاوت با روش کلاسیک است که در ابتدا تصمیم به انسداد یا عدم انسداد گرفته شده و در صورت عدم انسداد، در خصوص وجود یا عدم وجود اکو تصمیم‌گیری می‌شود. شبیه‌سازی‌ها حاکی از برتری منطق پیشنهادی است. 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، آشکارسازهای پیشنهادی، با استفاده از اطلاعات کانال کمکی منجر به بهبود در عملکرد کلی سیستم خواهند شد. ذکر این نکته نیز لازم است که شبیه‌سازی‌ها نشان‌دهنده تفوق استراتژی SUM بر سایر روش‌های پیشنهادی دارند. ضمناً روش‌های پیشنهادی از بار محاسباتی ناچیزی برخوردار می‌باشند.



---

## Using Multiple Auxiliary Antennas for Sidelobe Blanking to Counter Deception Jamming in Search Radars

F. Lotfi, M. Bighash\*, A. Sheikhi

Shiraz University

(Received: 30/10/2016, Accepted: 30/01/2017)

### Abstract

The most common radar EP technique to prevent effects of impulsive interferences is SLB. In classical SLB structure, an auxiliary antenna and receiver channel are employed to discriminate between the main beam signal and the unwanted signals entering through the sidelobes of the main antenna. In this paper, we have proposed a new SLB structure which utilizes multiple auxiliary antennas. Then, by using an envelope-detection based demodulation, we have presented a group of processing logics including AND, OR and SUM to control the switch. Additionally, we have suggested a new method for setting the detection and blanking thresholds. Simulation results show that the proposed methods using multiple auxiliary antennas, outperform the conventional structure in terms of reducing the number of false target blips on radar PPI.

**Keywords:** Jammer, Target, Auxiliary Antenna, Detection, Sidelobe Blanking.

---

\* Corresponding author E-mail: biguesh@shirazu.ac.ir