

## جهت‌یابی سیگنال‌های راداری پهن باند با زوج آنتن چرخان

علی احمدی<sup>۱</sup>، مجید اخوت<sup>۲\*</sup>، کریم محمدپوراقدم<sup>۳</sup>

۱- دانشجوی دکتری، ۲- دانشیار، دانشگاه جامع امام حسین (ع)، ۳- استادیار، دانشگاه تهران

(دریافت: ۹۸/۰۳/۲۲؛ پذیرش: ۹۹/۰۲/۲۵)

## چکیده

کشف و جهت‌یابی سیگنال رادارهای پهن باند (LPI)، یک چالش جدی در حوزه پردازش سیگنال است. رادارهای جدید، می‌توانند پارامترهای سیگنال ارسالی خود را از یک پالس به پالس دیگر تغییر دهند و سیگنال خود را در حوزه زمان یا فرکانس گسترش دهند. در گذشته جهت‌یابی راداری، با پهنای باند کم طراحی می‌شدند تا به حساسیت بیشتر و برد بلندتر دست پیدا کنند. افزایش پهنای باند در این جهت‌یابی‌ها باعث کاهش SNR و احتمال کشف رادارها می‌گردد. در این مقاله، برای جهت‌یابی سیگنال پهن باند یک طرح برای افزایش احتمال کشف و استخراج جهت ورود سیگنال را ارائه می‌کنیم. در این طرح از دو آنتن جهت‌یابی سیگنال استفاده می‌شود که سیگنال دریافتی توسط یک آنتن به‌عنوان مرجع و فیلتر منطبق برای کانال دیگر عمل می‌کند تا بهره پردازش مناسبی به دست آید. در این روش برخلاف روال‌های مرسوم، نیازی به دانستن مشخصات سیگنال ارسالی توسط رادار نیست و حتی می‌توان رادارهای شبه نویز و طیف گسترده را نیز کشف و جهت‌یابی کرد. در این طرح از نظر تئوری، محدودیتی برای پهنای باند سیگنال دریافتی وجود ندارد. در این مقاله از دو آنتن چرخان و محاسبه حداکثر همبستگی متقابل دو سیگنال دریافتی برای جهت‌یابی استفاده می‌شود و نتایج حاصل از آن، با چند روش مشابه دیگر مقایسه می‌گردد. تخمین زاویه ورود سیگنال رادار از اندازه‌گیری زاویه وقوع حداکثر همبستگی، در چرخش یک دور کامل دو آنتن جهت‌یابی چرخان حاصل می‌شود. با این روش پردازشی بهبود بهره بالغ بر ۲۵ dB در کشف و آشکارسازی سیگنال رادارهای LPI نیز قابل‌دسترس خواهد بود.

## واژگان کلیدی

جهت‌یابی، سیگنال راداری پهن باند، رادار با احتمال شنود پایین، جهت‌یابی تک‌پالس، همبستگی متقابل

## ۱. مقدمه

راداری که برای سیگنال‌های راداری ناشناس به کار گرفته می‌شود، امکان استفاده از فیلتر منطبق واقعی وجود ندارد. روش‌های زیادی برای تشخیص زاویه ورود سیگنال وجود دارند- [۷-۳]. در برخی از این روش‌ها، از پردازش تک‌پالس<sup>۴</sup> برای جهت‌یابی استفاده می‌شود [۱۰-۸]. در مرجع [۱۱] آشکارسازی سیگنال LPI<sup>۵</sup> با روش همبستگی سنجی و SNR<sup>۶</sup> منفی برای چند نوع سیگنال آورده شده است. در این مرجع ایده پردازش همبستگی متقابل<sup>۷</sup> در گیرنده‌های دو کاناله برای آشکارسازی استفاده شده است و ما آن را در این مقاله برای جهت‌یابی سیگنال پهن باند رادارهای LPI<sup>۸</sup> تعمیم می‌دهیم. در مرجع [۱۲] جهت‌یابی سیگنال LFM<sup>۹</sup> پهن باند در یک رادار با روش همبستگی متقابل بررسی شده است.

جهت‌یابی یک سیگنال (DoA)<sup>۱</sup> روشی برای تخمین زاویه ورود یا پیدا کردن سمت یک تشعشع کننده نسبت به گیرنده است. معمولاً برای استخراج زاویه از مشخصه‌های مختلف سیگنال دریافتی، از جمله دامنه، فاز، ترکیب دامنه و فاز، میزان تغییر فرکانس یا دوپلر، اختلاف‌زمان ورود سیگنال (TDOA)<sup>۲</sup> یا از اندازه‌گیری زمان ورود سیگنال (TOA)<sup>۳</sup> استفاده می‌شود.

رادارهای پیشرفته دارای پهنای باند زیاد، شکل موج پیچیده و مدولاسیون‌های متنوع برای ارسال سیگنال هستند [۱، ۲]. رادارها چون سیگنال ارسالی را خودشان تولید می‌کنند لذا از فیلتر منطبق متناسب با آن استفاده می‌کنند اما در یک جهت‌یابی

4- Monopulse  
5- Low Probability of Intercept  
6- Signal to Noise Ratio  
7- Cross Correlation  
8- Linear Frequency Modulation

\* نویسنده مسئول: mokhovvat@ihu.ac.ir

1- Direction Of Arrival  
2- Time Difference Of Arrival  
3- Time Of Arrival

پایینی دارند نیز جوابگو است. روش ارائه شده در این مقاله نسبت به روش‌های مرسوم می‌تواند تا ۲۵ dB بهره‌پدازشی داشته و سیگنال‌هایی با SNR حدود ۵ dB- را نیز کشف و جهت‌یابی کند.

مطالب ارائه شده در این مقاله بدین ترتیب است. بخش اول مقدمه مقاله است در بخش ۲ ابتدا جهت‌یابی تک‌پالس<sup>۷</sup> غیر تشعشعی توضیح داده می‌شود و در بخش ۳ دقت جهت‌یابی تک‌پالس و پارامترهای آن بحث می‌شود. در بخش ۴ جهت‌یابی با روش همبستگی‌سنجی و TDOA بحث می‌شود. در بخش ۵ ترکیب روش تک‌پالس دامنه و همبستگی سنجی متقابل به‌عنوان یک روش جدید در این مقاله ارائه می‌گردد. در بخش ۶ شبیه‌سازی روش جهت‌یابی ارائه شده با سیگنال LPI و نتایج آن ارائه خواهد شد. در بخش ۷ جمع‌بندی و نتیجه‌گیری آورده می‌شود و در بخش ۸ مشخصات مراجع ذکر شده است.

## ۲. جهت‌یابی به روش تک‌پالس دامنه

جهت‌یابی‌های تک‌پالس از حداقل دو آنتن با الگوی متقاطع استفاده می‌کنند. این آنتن‌ها یا مانند شکل (۱-الف) از یک آرایه دایروی با آنتن‌های همسان طراحی شده‌اند که الگوی آن‌ها به‌صورت متقارن، کل محدوده ۳۶۰ درجه را می‌پوشاند و یا مانند شکل (۱-ب) از دو آنتن با الگوی متقاطع بر روی یک سکوی چرخان ۳۶۰ درجه‌ای استفاده می‌شود که از نسبت توان دریافتی در دو آنتن، به‌صورت مستقیم و یا با تولید الگوهای جمع و تفاضل دو آنتن، زاویه ورود سیگنال استخراج می‌گردد.



(ب)



(الف)

شکل (۱): (الف) آرایه دایروی ثابت، (ب) دو آنتن چرخان

در روش جهت‌یابی راداری تک‌پالس، هرچه الگوی آنتن‌ها در محدوده فرکانسی موردنظر ثابت باشند دقت جهت‌یابی بهتر خواهد بود [۳]. شکل (۲) الگوی آرایه آنتن دایروی با چهار آنتن ثابت در یک صفحه را نشان می‌دهد.

روش تداخل‌سنجی یا روش BLI<sup>۱</sup> با چهار آنتن در مرجع [۱۳] بحث شده است. ضعف این روش عدم پاسخگویی در مورد سیگنال‌های شبه نویز است. در مرجع [۱۴] نشان داده شده که یک اختلال‌گر نویزی را می‌توان با روش تک‌پالس ردگیری کرد. با اختلال یک رادار ردگیر، اطلاعات فاصله از بین می‌رود ولی امکان ردگیری وجود دارد. مزیت این مقاله تأیید امکان ردگیری رادارهای LPI شبه نویز است لذا در گیرنده‌های جهت‌یاب هم می‌توان از روش مشابه استفاده کرد که به‌جای جمع و تفریق الگوی دو آنتن، از خروجی دو آنتن به‌صورت هم‌زمان استفاده شود. در مرجع [۱۵]، یک رادار با سیگنال FMCW<sup>۲</sup> به‌عنوان رادار ردگیر ساکت<sup>۳</sup> معرفی شده است. از مزایای این روش، استفاده از روش پردازش تک‌پالس دیجیتال در ردگیری است. در مرجع [۱۶] میزان خطای جهت‌یابی ناشی از اختلال نویزی<sup>۴</sup> بررسی گردیده است. مرجع [۱۷] روش جهت‌یابی یک منبع نویز ضربه‌ای<sup>۵</sup> را توضیح می‌دهد که در زمان کوتاه ۱ تا ۲۴ میکروثانیه، یک باند وسیع فرکانسی را می‌پوشاند. این مرجع از اختلاف‌زمان دریافت سیگنال در دو آنتن ثابت برای تخمین جهت سیگنال ورودی استفاده می‌کند اما در این مقاله ما بر اساس روش حداکثر دامنه با دو آنتن چرخان زاویه ورود را استخراج می‌کنیم.

کشف و جهت‌یابی سیگنال رادار پهن باند را به‌صورت غیرتشعشعی<sup>۶</sup> در این مقاله بحث خواهیم کرد. مراجع استفاده شده این مقاله در مورد ضعف و قوت روش‌های جهت‌یابی بحث می‌کنند. عمده این مراجع از روش‌های تک‌پالس، همبستگی متقابل و یا جهت‌یابی سیگنال اختلال یا نویزی بحث می‌کنند که با مقاله ارائه شده اشتراکات و اختلاف‌هایی دارند. در این مقاله ما روش جهت‌یابی مشابه تک‌پالس دامنه را با استفاده از روش همبستگی سنجی متقابل برای آشکارسازی رادارهای LPI و شبه نویز تعمیم داده و روش جهت‌یابی آن‌ها را با دو آنتن چرخان ارائه می‌کنیم. مباحث اصلی این مقاله از مراجع [۳، ۱۱، ۱۲، ۲۰] الهام گرفته شده است. روش جهت‌یابی تک‌پالس دامنه، برای سیگنال‌های راداری مرسوم است، روشی که ما در این مقاله ارائه می‌کنیم، به‌جای استفاده از نسبت توان دو آنتن یا استفاده از جمع و تفریق الگوی آنتن‌ها، از محل اتفاق افتادن حداکثر دامنه در همبستگی سنجی متقابل دو آنتن چرخان استفاده می‌کند. این روش برای سیگنال‌های پهن باند که قابلیت آشکارسازی

1- Base line Interferometer

2- Frequency Modulation Continus Wave

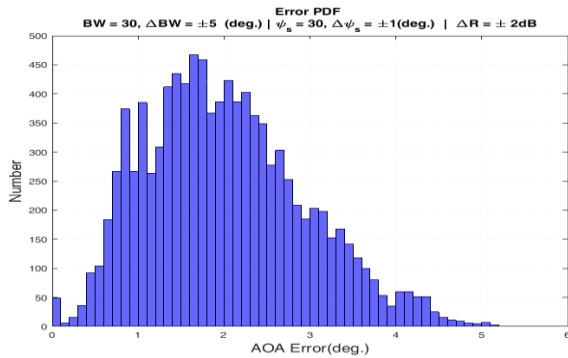
3-Silence Tracking Radar

4-Noise Jammer

5 -Impulsive Noise Source

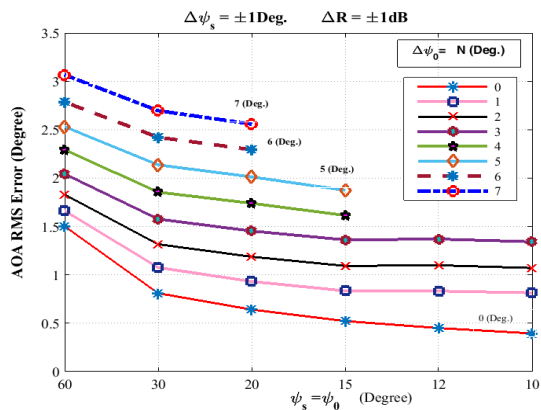
6- Passive

جهت‌یابی تک‌پالس، یک شبیه‌سازی کامل با متغیرهای ذکرشده را در محیط Matlab با روش مونت‌کارلو انجام دادیم. شکل (۴) تابع چگالی احتمال خطا را نشان می‌دهد. این تابع با ۱۰۰۰۰ بار تکرار تصادفی متغیرها به دست آمده است. از مقادیر به دست آمده می‌توان مقدار مؤثر خطای زاویه ورود را در این حالت محاسبه نمود.

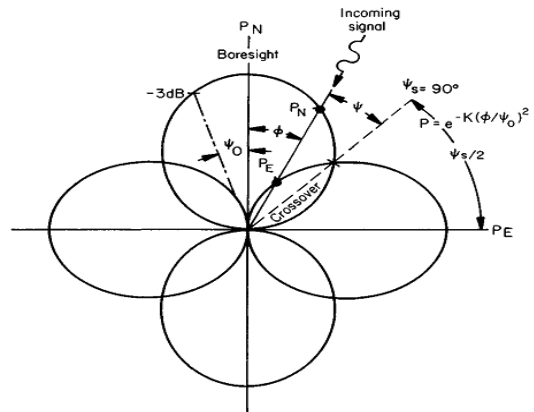


شکل (۴): نمایش تابع چگالی احتمال خطا با ۱۰۰۰۰ بار تکرار

برای نشان دادن نقش منابع خطا در روش تک‌پالس یک شبیه‌سازی برای پهنای الگوی نیم توان بین ۱۰ تا ۶۰ درجه انجام دادیم. این شبیه‌سازی به ازای  $\Delta R = \pm 1 \text{ dB}$  و  $\Delta \psi_s = \pm 1^\circ$  و برای  $\Delta \psi_0$  انتخابی بین صفر تا ۷ درجه انجام و خروجی آن‌ها را در شکل (۵) نمایش داده‌ایم. همان‌طور که دیده می‌شود برای آرایه‌های با  $\psi_s$  کمتر از ۲۰ درجه به ازای  $\Delta \psi_0$  برابر ۶ و ۷ درجه به علت جدا شدن زیاد الگوهای آنتن‌های مجاور از یکدیگر و عدم همپوشانی مناسب، خطای جهت‌یابی زیاد و همچنین سطح توان دریافتی در محل تلاقی به قدری کم می‌شود که از روش تک‌پالس نمی‌توان برای تعیین جهت ورود استفاده کرد. مثلاً برای پهنای الگوی ۱۵ درجه حداکثر تغییرات الگو ۵ درجه لحاظ شده است.

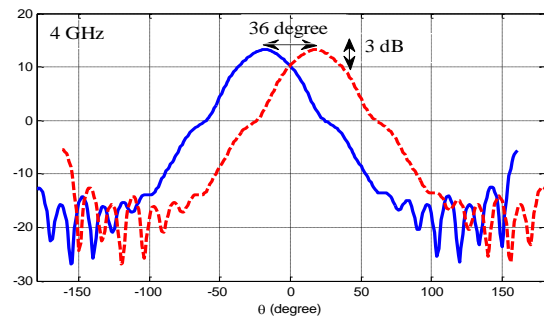


شکل (۵): خطای جهت‌یابی روش تک‌پالس دامنه



شکل (۲): الگوی آنتن‌ها، آرایه دایروی چهار آنتنی [۳]

شکل (۳) نیز الگوی شبیه‌سازی شده دو آنتن در کنار هم مطابق شکل (۱-ب) را نشان می‌دهد که محل تلاقی دو الگوی آنتن در نقطه حدود نصف توان آن‌ها است.



شکل (۳): الگوی دو آنتن مجاور هم مطابق شکل (۱-ب)

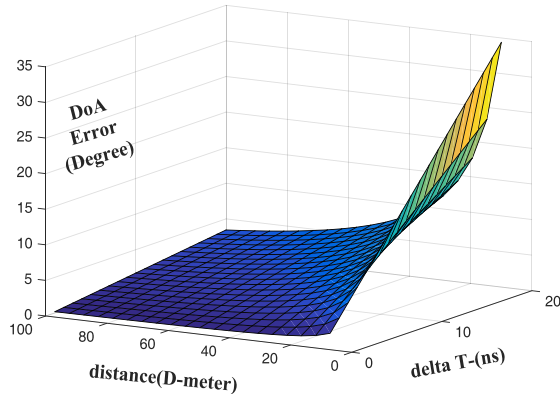
### ۳. دقت جهت‌یابی با روش تک‌پالس

در روش جهت‌یابی تک‌پالس، مطابق رابطه (۱)، زاویه ورود  $\psi$  به سه پارامتر: اختلاف دامنه ( $\Delta R$ ) دو آنتن، پهنای الگوی نیم توان آنتن ( $\psi_0$ ) و زاویه نصب بین آنتن‌ها ( $\psi_s$ ) و محدوده تغییرات این پارامترها بستگی دارد [۳].

$$\psi = \frac{\psi_0^2}{6\psi_s} \Delta R \quad (1)$$

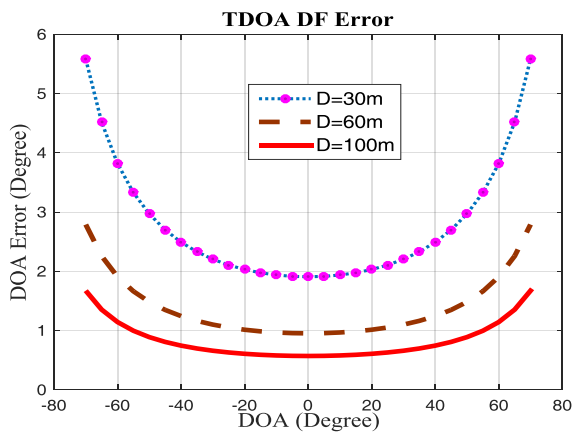
برای بررسی منابع خطا، هر یک از سه پارامتر دخیل در محاسبه  $\psi$  ممکن است دارای خطا باشند. برای بررسی میزان خطای تخمین زاویه یا جهت ورود سیگنال، می‌توان با مشتق‌گیری از  $\psi$  نسبت به پارامترهای مذکور آن را به دست آورد. اگر خطای دامنه را  $\Delta R$ ، خطای زاویه نصب یا چرخش الگوی دو آنتن را  $\Delta \psi_s$  و تغییرات پهنای الگوی نیم توان آنتن‌ها را  $\Delta \psi_0$  با توزیع یکنواخت در نظر بگیریم، برای تعیین خطای

برحسب فاصله آنتن‌ها و خطای اندازه‌گیری اختلاف‌زمانی در زاویه ورود ( $\theta=0$ ) رسم شده است.



شکل (۷): منحنی خطای جهت‌یابی برحسب  $D, \Delta t$

به‌عنوان مثال برای دقت زاویه‌ای ۲ درجه با خطای اندازه‌گیری اختلاف‌زمانی ۳/۵ نانوثانیه، حداقل فاصله موردنیاز آنتن‌ها ۳۰ متر باید باشد. در شکل (۸) منحنی خطای جهت‌یابی برحسب فاصله آنتن‌ها ارائه شده است چنانکه دیده می‌شود با شرایط فوق برای خطای حدود یک درجه باید فاصله آنتن‌ها حدود ۱۰۰ متر باشد. برای این منظور، دقت زمانی موردنیاز باید بهتر از ۳/۵ نانوثانیه باشد.

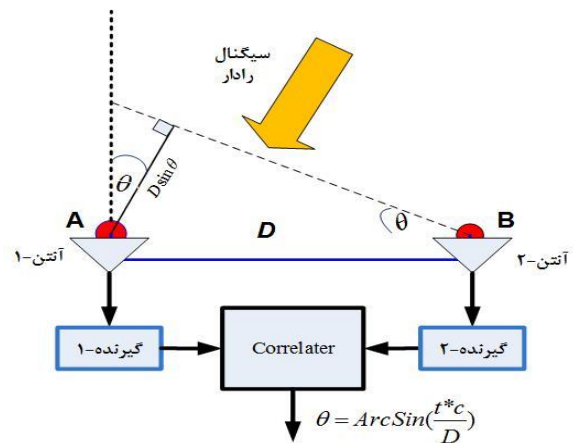


شکل (۸): خطای جهت‌یابی برحسب  $D$  و زاویه ورود با  $\Delta t = 3.5\text{ns}$

این خطای تئوری است و در شرایط عملی تداخل و چندمسیرگی و اغتشاشات ناخواسته می‌تواند این خطا را زیاد کند. توزیع این خطاها معمولاً به‌صورت نرمال است. در شکل (۹) نمونه آزمایشگاهی سیگنال ویدئوی یک پالس دریافتی توسط دو گیرنده با فاصله مکانی ۳۰ متر نمایش داده شده است.

#### ۴. جهت‌یابی با روش همبستگی‌سنجی

یک روش جهت‌یابی مرسوم، روش TDOA هست که مبنای آن، استفاده از اختلاف‌زمان ورود سیگنال به دو آنتن یکسان و هم‌راستا است که در شکل (۶) بلوک دیاگرام کلی آن نشان داده شده است.



شکل (۶): جهت‌یابی با TDOA و روش همبستگی‌سنجی

با روش همبستگی‌سنجی دو سیگنال، اختلاف‌زمان ورود سیگنال‌ها در دو آنتن به دست می‌آید. طبق رابطه (۲) می‌توان جهت ورود سیگنال ( $\theta$ ) را از روی اختلاف‌زمان ورود دو سیگنال یا پالس راداری استخراج کرد. البته در عمل این روش یک محدوده دقت مناسب یا پوشش دارد که برای رفع اشکال آن از سه یا چند آنتن استفاده و پوشش را کامل می‌کنند. با فرض اینکه فاصله هدف، نسبت به فاصله بین دو آنتن بسیار دور ( $R \gg D$ ) باشد، داریم:

$$\theta = \text{Sin}^{-1} \left( \frac{c \Delta t}{D} \right) \quad (2)$$

$\theta$ : زاویه ورود سیگنال برحسب رادیان

$\Delta t$ : اختلاف‌زمان بین سیگنال در دو آنتن برحسب ثانیه

$c$ : سرعت نور برحسب متر

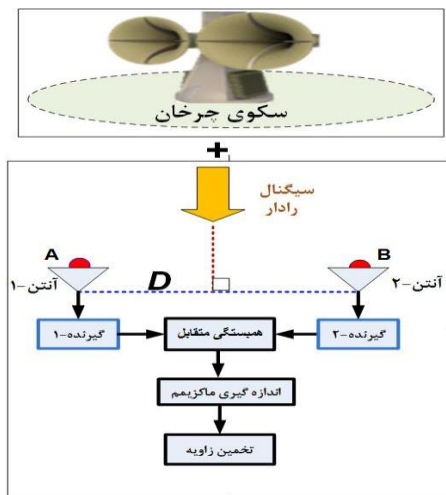
$D$ : فاصله آنتن‌ها برحسب متر

با فرض متغیر زمان و اخذ گرادیان نسبت به آن، رابطه (۳) به دست می‌آید.

$$\delta \theta = \frac{c \delta t}{D \cos \theta} \quad (\text{برحسب رادیان}) \quad (3)$$

طبق رابطه (۳) در این روش دقت زاویه بالا یا  $\delta \theta$  کمتر نیاز است که اختلاف‌زمانی  $\delta t$  کوچک‌تر و یا فاصله آنتن‌ها ( $D$ ) زیاد باشد. در شکل (۷) منحنی خطای زاویه اندازه‌گیری

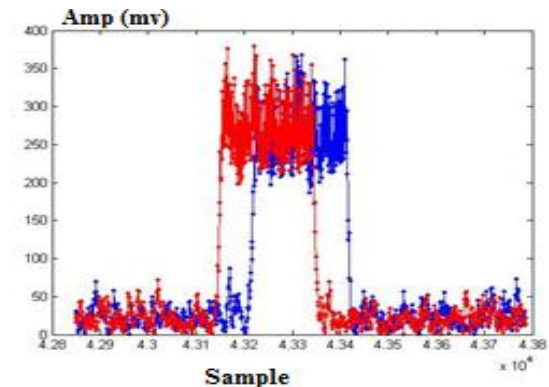
جهت‌یابی سیگنال‌های پیشرفته راداری پیشنهاد می‌شود. این حالت حتی از فیلتر منطبق خود رادار می‌تواند بهتر عمل کند چراکه فیلتر منطبق رادار دارای افتی حدود چند دهم دسی‌بل با توجه به نوع شکل موج ارسالی و فیلتر طرح‌شده خواهد داشت [۱۸]، اما با توجه به شباهت دو کانال گیرنده در این پردازش، این افت هم می‌تواند وجود نداشته باشد. در این روش، آشکارسازی و جهت‌یابی بر اساس دریافت سیگنال از دو آنتن جهتی چرخان که بافاصله اندک، ولی با اختلاف زاویه نسبت به هم قرار دارند، طبق بلوک شکل (۱۱) انجام می‌شود. در این طرح، دو گیرنده‌ی سنکرون به‌صورت هم‌زمان به دو آنتن با زاویه جهت‌دهی آفست دار، ولی دارای هم‌پوشانی متصل هستند.



شکل (۱۱): شمای کلی روش ترکیبی جهت‌یابی پیشنهادی

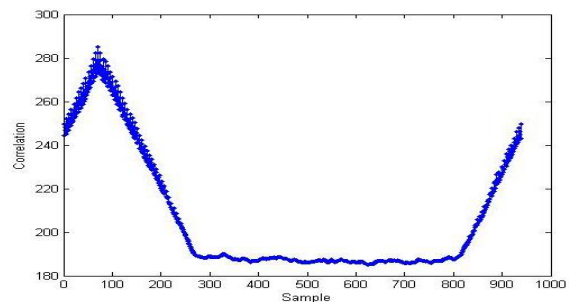
برای انتخاب فاصله آنتن‌ها، ملاک قرار گرفتن الگوی دو آنتن به‌صورت متقاطع در نقطه حدود نصف توان یا کمتر است. با توجه به پهنای باند زیاد، طراحی آنتن‌ها طوری باید باشد که با تغییر فرکانس شکل تقریبی الگوها و نقطه تلاقی آن‌ها ثابت باشند.

همبستگی متقابل بین دو سیگنال دریافتی باعث بهبود نسبت سیگنال به نویز شده و تابع خود بستگی سیگنال را می‌سازد. در این روش، با چرخش آنتن‌ها اگر سطح سیگنال همبستگی متقابل از مرز ثابتی عبور کند، سیگنال راداری LPI آشکارسازی می‌شود. مقدار آستانه بر اساس روش‌های احتمالاتی با مشاهده‌ی تابع چگالی تجمعی نویز در لحظات قبل و بر اساس تنظیم احتمال آشکارسازی با یک مقدار نرخ هشدار کاذب قابل‌قبول تنظیم می‌شود [۱۹]. رابطه (۴) نحوه محاسبه



شکل (۹): اختلاف‌زمانی بین دو پالس

همان‌طور که در شکل (۱۰) نشان داده‌شده، مقدار همبستگی متقابل به ازای اختلاف ۷۰ نمونه بیشینه می‌شود.



شکل (۱۰): همبستگی متقابل دو پالس

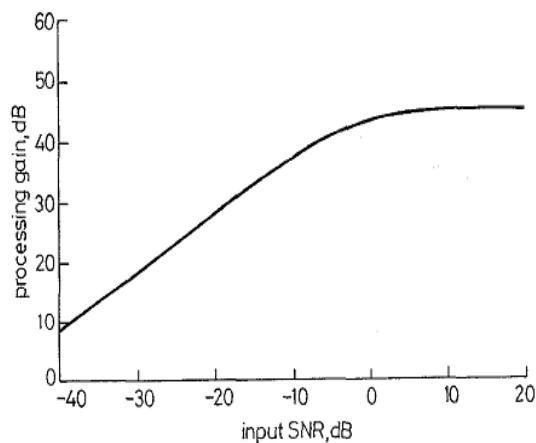
اگر هر نمونه معادل یک نانو ثانیه باشد اختلاف‌زمانی بین دو پالس ۷۰ نانو ثانیه است. برای تبدیل این زمان به زاویه ورود، طبق رابطه (۲) برای اختلاف فاصله ۳۰ متر برابر  $\theta = 44/4$  درجه به دست می‌آید. در این روش معمولاً آنتن‌ها از نوع همه‌جهتی، ثابت و فاصله آنتن‌ها را بیشتر می‌گیرند تا خطای اندازه‌گیری اختلاف‌زمانی کمتر در دقت زاویه‌ای اثرگذار باشد؛ اما روشی که در این مقاله در بخش ۵ توضیح مبسوط ارائه می‌گردد، مستقل از خطای اندازه‌گیری زمان است. همچنین فاصله آنتن‌ها کم و در حد نصف طول موج خواهد بود و آنتن‌ها از نوع جهتی با بهره بالا و چرخان هستند.

## ۵. جهت‌یابی پهن باند با زوج آنتن چرخان

رادارها برای آشکارسازی سیگنال خود از فیلتر منطبق استفاده می‌کنند اما در یک جهت‌یابی، اطلاعات شکل موج ارسالی رادار معلوم نیست. آشکارسازی و جهت‌یابی سیگنال‌های LPI به خاطر نیاز به بهره پردازش بالا با روش‌های سنتی مشکل است. در این مقاله روش همبستگی متقابل که معادل فیلتر منطبق است، برای

مطابق شکل (۱۱) در روش ارائه شده دو آنتن با الگوهای متقاطع حول یک محور ثابت می چرخند. دقت چرخش این آنتن‌ها در حد یک‌دهم درجه است. خروجی دو آنتن به دو گیرنده و نمونه بردار سنکرون وصل شده است. به عنوان مثال برای سرعت چرخش ۱۰ دور در دقیقه، برای نمونه برداری در هر ۰/۱ درجه، زمان لازم برابر ۱/۶۷ میلی ثانیه است که در این مدت زمانی، تابع همبستگی متقابل یا CCF<sup>۳</sup> با دقت خوبی قابل محاسبه است. اگر در امتداد آنتن‌ها هدفی وجود نداشته باشد، در گیرنده فقط نویز فرضی سفید در جهت الگوی آنتن‌ها دریافت می‌گردد با توجه به مستقل بودن نویزهای دریافتی از دو کانال مقدار دامنه CCF آن‌ها صفر می‌شود. در غیر این صورت اگر سیگنالی از جهت الگوی آنتن‌ها دریافت گردد. CCF محاسبه شده دارای مقدار غیر صفر خواهد بود. در این فرایند، اگر مقدار بیشینه دامنه CCF را در جهات مختلف، در طول چرخش آنتن‌ها، محاسبه نماییم، مقدار بیشینه آن، جهت ورود سیگنال را که متناظر با راستای عمود بر خط واصل دو آنتن است، نمایش می‌دهد. در این حالت، دو سیگنال کاملاً هم‌فاز و هم‌دامنه خواهند بود و بیشترین همبستگی را خواهند داشت.

در شکل (۱۲) میزان بهبود SNR بر اساس همبستگی متقابل از مرجع [۲۰] آورده شده است. چنانچه دیده می‌شود، بهره پردازش حدود ۲۵ dB نیز قابل دستیابی است و با SNR منفی ورودی می‌توان SNR مثبت در خروجی همبستگی سنج داشت. این بهره پردازش با سنجش همبستگی متقابل سیگنال و جمعیت زمانی آن‌ها حاصل می‌شود. در این مقاله ما ضمن تعمیم آن به سیگنال‌های LFM، بارکر و شبه نویز و استفاده از آنتن‌های جهتی با بهره بالا، روش جهت‌یابی با زوج آنتن چرخان را ارائه می‌کنیم.



شکل (۱۲): میزان بهبود SNR برای CCF در حوزه زمان [۲۰]

$B_N=500\text{MHz}$ ,  $PW=100\text{usec}$ ,  $T_s=T_{\text{corr}}=500\text{usec}$

همبستگی متقابل سیگنال دریافتی از دو آنتن را نشان می‌دهد که با توجه به مستقل بودن نویز کانال‌ها در راستای خط عمود بر محور دو آنتن به تابع خود بستگی سیگنال تبدیل خواهد شد.

$$\begin{aligned} CCF_{y_1 y_2}(t) &= y_1(t) \otimes y_2(t) \\ &= A_1[s(t) + n_1(t)] \otimes A_2[s(t - t_d) + n_2(t)] \\ &= [A_1 s(t) \otimes A_2 s(t - t_d)] + [A_1 s(t) \otimes A_2 n_2(t)] \\ &\quad + [A_1 n_1(t) \otimes A_2 s(t - t_d)] + [n_1(t) \otimes n_2(t)] \end{aligned} \quad (۴)$$

$\otimes$ : همبستگی متقابل

$t_d$ : میزان تأخیر سیگنال دو کانال

این روش آشکارسازی، با بهره پردازشی بالایی که ایجاد می‌کند، می‌تواند سیگنال LPI با نسبت سیگنال به نویز منفی را نیز کشف کند. دقت زاویه‌ای این روش به دلیل ارتباط مستقیم زاویه ورود با دامنه سیگنال آشکارسازی علاوه بر پهنای پرتو، به دقت آشکارسازی دامنه و به عبارتی به نسبت سیگنال به نویز نیز بستگی دارد. رابطه (۵) دقت زاویه ورود برای روش جهت‌یابی با آنتن چرخان را نشان می‌دهد که برای روش پیشنهادی این مقاله نیز صادق است [۸].

$$\delta\theta = \frac{k\theta_{BW}}{\sqrt{SNR}} \quad (۵)$$

که در آن،  $k$  ضریب کوچک‌تر از یک و  $\theta_{BW}$  پهنای الگوی نصف توان آنتن است. در این روش، بهترین نقطه برای جهت‌یابی، زاویه‌ای است که در آن، سیگنال ورودی عمود بر خط واسط دو آنتن قرار دارد. در این زاویه نسبت SNR بیشینه بوده و بهترین نقطه هم‌فازی یا حداکثر همبستگی سیگنال دو آنتن را به دنبال دارد. در یک سیگنال<sup>۱</sup> LFM، زمان با ضریب  $1/\beta$  متناسب با فرکانس آن است که در آن  $\beta$  نرخ چیرپ<sup>۲</sup> است. با اعمال این تناسب در رابطه (۳)، رابطه (۶) حاصل می‌شود. طبق رابطه (۶) دقت زاویه با نرخ چیرپ  $\beta$  که متناسب با پهنای باند سیگنال است، نسبت عکس دارد و اگر  $\beta$  زیاد باشد دقت جهت‌یابی نیز بهتر خواهد بود.

$$\delta\theta = \frac{c \delta f}{\beta D \cos \theta} \quad (۶)$$

$\theta$ : زاویه ورود سیگنال

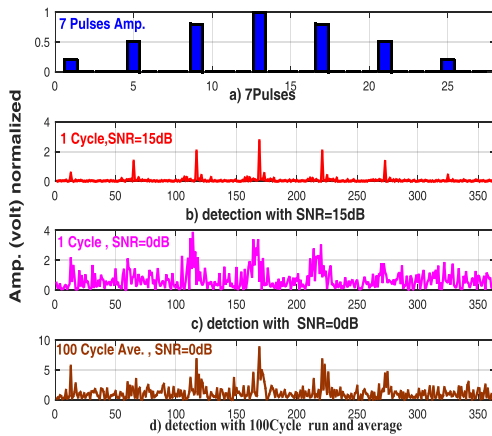
$c$ : سرعت نور بر حسب متر

$D$ : فاصله آنتن‌ها بر حسب متر

$f$ : فرکانس فرستنده راداری

$\beta$ : نرخ چیرپ

خوبی را ارائه کرده است که به روش آشکارسازی فیلتر شبه منطبق هم معروف است. در ادامه در شکل (d-۱۳) با  $SNR=0dB$  و صدبار تکرار و متوسط‌گیری، قابلیت آشکارسازی بهتر شده است.



شکل (۱۳): هفت پالس و خروجی همبستگی سنج برای کد بارکر ۱۳

در خروجی همبستگی سنج اگر ورودی فقط نویز باشد دامنه خروجی کوچک است اما اگر سیگنال باشد اندازه دامنه بزرگ خواهد بود، درواقع یک کانال مانند فیلتر منطبق برای کانال دیگر عمل می‌کند. ما بیشترین دامنه و بهترین دقت جهت‌یابی را در زاویه صفر درجه خواهیم داشت. پس از یک دور چرخش آنتن، زاویه متناظر با حداکثر مقدار دامنه را می‌توان به‌عنوان جهت یا زاویه ورود رادار گزارش کرد. البته مقدار زاویه از یک رمزکننده<sup>۱</sup> نوری یا نشانگر زاویه که به چرخاننده آنتن متصل است دائم به دامنه‌های خوانده‌شده الصاق می‌گردد و در بخش پردازش زاویه مربوط به حداکثر مقدار دامنه به‌عنوان جهت ورود سیگنال رادار گزارش می‌گردد. مراحل الگوریتم جهت‌یابی مطابق جدول (۱) است.

جدول (۱): روش استخراج زاویه

|                                                                                       |
|---------------------------------------------------------------------------------------|
| نمونه‌برداری از سیگنال کانال ۱ و ۲ به مدت $t$ ثانیه (مثال $t=10msec$ )                |
| محاسبه CCF دو سیگنال                                                                  |
| بررسی وجود سیگنال با مقایسه با سطح توان نویز                                          |
| پیدا کردن بیشینه دامنه CCF                                                            |
| خواندن زاویه آنتن‌ها از نشانگر زاویه در چرخاننده آنتن                                 |
| ذخیره بیشینه دامنه و زاویه آن $(\theta_i, A_i)_{max}$                                 |
| پیدا کردن حداکثر مقدار دامنه و زاویه متناظر آن در یک جاروب $360^\circ$ درجه           |
| گزارش هدف شماره $n$ و زاویه آن در نقطه وقوع حداکثر دامنه $(Target\_n, \theta_n, A_n)$ |

طبق رابطه (۷) و (۸) می‌توان با افزایش زمان همبستگی‌سنجی ( $T_{CORR}$ ) به ترتیب در مدولاسیون‌های پالسی و پیوسته بهره‌های پردازشی دلخواه را به‌دست آورد [۲۰، ۱۱].

$$SNR_{OUT} \text{ Pulse Signal} = \frac{B_N \cdot PW^2 \cdot SNR_{IN}^2}{\frac{3}{4} T_{CORR} + \frac{3 T_{CORR} \cdot PW \cdot SNR_{IN}}{3 T_{CORR} - PW}} \quad (7)$$

$$SNR_{OUT} \text{ CW Signal} = \frac{\frac{4}{3} B_N \cdot T_{CORR} \cdot SNR_{IN}^2}{1 + 2 \cdot SNR_{IN}} \quad (8)$$

$T_{CORR}$ : زمان همبستگی سنجی  
 $PW$ : عرض پالس  
 $B_N$ : پهنای باند سیگنال

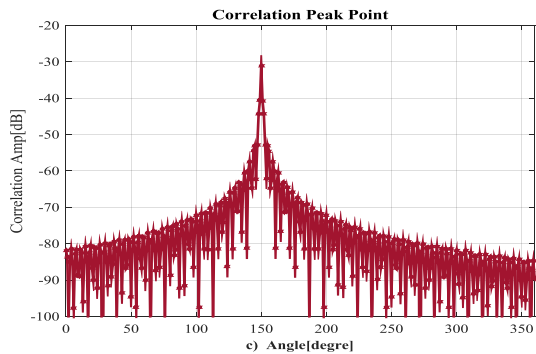
برای اندازه‌گیری همبستگی متقابل همچنین می‌توان ابتدا در حوزه فرکانس از سیگنال هر کانال تبدیل فوریه گرفت و در حوزه فرکانس ضرب دو تابع انجام داد و در نهایت با تبدیل معکوس فوریه حاصل ضرب، آن را به حوزه زمان که معادل همبستگی متقابل است، منتقل کرد [۲۱].

فرایند پردازش سیگنال پهن باند فوق که می‌توان آن را روش غیر تشعشعی شبه تک‌پالس نام‌گذاری کرد، نیازمند دو آنتن و کانال پهن باند کاملاً مشابه است. این روش برای جهت‌یابی سیگنال پهن باند بسیار مناسب است، از مزایای آن امکان جهت‌یابی رادارهای با قابلیت‌های زیر است:

- امکان به‌کارگیری از باند آکوستیک تا بالای صد گیگاهرتز
- حساسیت خوب و قابلیت آشکارسازی رادارهای LPI
- کارآمد برای پردازش سیگنال‌های پهن باند
- قابلیت جهت‌یابی فرستنده‌های شبه نویز

## ۶. شبیه‌سازی جهت‌یابی رادار LPI

برای مشاهده توانمندی روش ارائه‌شده در آشکارسازی و جهت‌یابی سیگنال رادارهای LPI، از بلوک دیاگرام شکل (۱۱) استفاده شده است. شبیه‌سازی صورت گرفته برای هفت پالس با دامنه‌های مختلف سیگنال یک رادار با کد بارکر ۱۳ مطابق شکل (a-۱۳)، انجام شده است. هر پالس با کد بارکر ۱۳ گسترش داده شده و توسط رادار ارسال شده‌اند، در جهت‌یابی با دو آنتن چرخان که به دو گیرنده به‌طور هم‌زمان، مطابق شکل (۱۱)، وصل شده‌اند، با روش همبستگی متقابل این هفت پالس آشکارسازی می‌شوند. نتایج این شبیه‌سازی در محیط Matlab برای سیگنال باند پایه در شکل‌های (b-۱۳)، (c، d) برای  $SNR=0$ ،  $SNR=15dB$  و همچنین با صدبار تکرار و متوسط‌گیری، نشان داده شده است. با  $SNR=15dB$  در شکل (b-۱۳) آشکارسازی به خوبی انجام شده است. در شکل (c-۱۳) چنانکه مشاهده می‌شود این روش در  $SNR=0dB$  هم قابلیت آشکارسازی



شکل (۱۵): حداکثر همبستگی متقابل دو آنتن برای سیگنال LFM

## ۷. نتیجه گیری

در یک جهت یاب راداری برای آشکارسازی و جهت یابی سیگنال رادارهای LPI و رادارهای شبه نویز و سایر شکل موج های راداری پیشرفته لازم است از روش های پردازشی با بهره بالا استفاده کرد. در این مقاله یک روش برای جهت یابی سیگنال های راداری پهن باند بر اساس روش همبستگی متقابل دو آنتن چرخان مشابه روش تک پالس راداری، با قابلیت بهره پردازش بالا پیشنهاد شده است که برای سیگنال های با SNR پایین تا -۵dB نیز جوابگو بوده و بهره پردازشی حدود ۲۵dB در کشف و آشکارسازی سیگنال های LPI را مهیا می کند. این روش بهره پردازشی خوبی را نسبت به آشکارسازهای معمولی ارائه می کند. در این روش برای تخمین زاویه ورود سیگنال از دو آنتن جهتی چرخان با بهره بالا استفاده می کنیم. استفاده از دو آنتن جهتی با بهره بالا علاوه بر بهبود دریافت سیگنال، با دریافت هم زمان نسبت به یک آنتن نیز می تواند تا ۳dB بهره را افزایش دهد. در این مقاله نشان داده شد که با به کارگیری روش پردازش همبستگی متقابل با دو آنتن جهتی چرخان می توان به بهره پردازشی بالا در کشف و جهت یابی سیگنال رادارهای LPI مثل رادارهای با مدولاسیون LFM، بارکر و حتی شبه نویز دست پیدا کرد. همچنین با این روش دقت جهت یابی حدود ۲ درجه نیز قابل دسترس است.

## ۸. مراجع

- [1] P. E. Pace, "Detecting and Classifying Low Probability Of Intercept Radar," Norwood, MA: Artech House, 2009.
- [2] M. A. Richards, J. A. Scheer, and W. A. Holm, "Modern Radar," Sci. Tech., 2010.
- [3] S. E. Lipsky, "Microwave Passive Direction Finding," Sci. Tech., Publishing Inc, 2004.
- [4] E. Tuncer and B. Friedlander, "Classical and modern Direction of arrival Estimation," Elsevier, 2009.
- [5] R. A. Poisel, "Electronic Warfare Target Location Methods," Artech House, 2012.
- [6] M. Ferdisizadeh Naini, Y. Egbali, and F. Moradi, "DoA Estimation in the Presence of the Unknown Mutual

در شکل (۱۴-الف) یک نمونه از سیگنال LFM که به وفور در رادارهای LPI استفاده می شوند را نشان می دهد. شکل (۱۴-ب) الگوی دو آنتن چرخان کنار هم هستند. شکل (۱۵) حداکثر دامنه همبستگی سنجی دو سیگنال در زوایای مختلف را در یک چرخش کامل دو آنتن نشان می دهد. جهت سیگنال را می توان با پیدا کردن زاویه متناظر با حداکثر دامنه همبستگی متقابل سیگنال دو آنتن، تعیین کرد. در رابطه (۹) نحوه محاسبه CCF برای یک نمونه سیگنال FMCW آورده شده است [۱۹].

$$y_1(t) = A_1 e^{j2\pi(\alpha t + \beta t^2/2)} + n_1(t)$$

$$y_2(t) = A_2 y_1(t - \tau) =$$

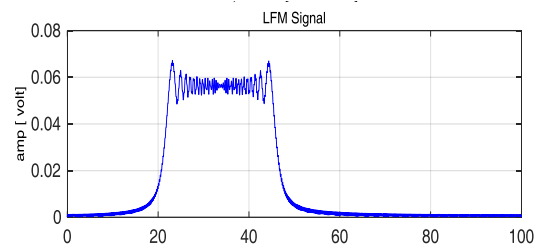
$$A_2 e^{j2\pi(\alpha(t-\tau) + \beta(t-\tau)^2/2)} + n_2(t - \tau) \quad (9)$$

$$CCF_{y_1 y_2}(t) = \sum_{t=0}^{N-1} y_1(t) y_2^*(t) =$$

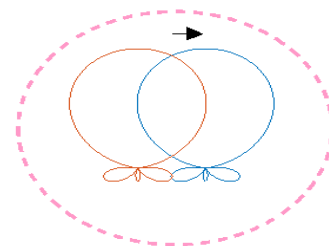
$$\sum_{t=0}^{N-1} e^{j2\pi(\alpha\tau - \beta\tau^2/2 + \beta t\tau)}$$

سیگنال FMCW:  $y_1(t), y_2(t)$

در شکل (۱۵) این حداکثر دامنه در نقطه ۱۵۰ درجه برای یک سیگنال ورودی فرضی شبیه سازی شده اتفاق افتاده است. در این نوع سیگنال ها می توان به بهره پردازش سیگنال های پهن باند LFM که همان حاصل ضرب پهنای باند سیگنال (B) در عرض پالس (PW) است نیز دست یافت. لذا در این رادارها حصول به بهره حدود ۲۵ دسی بل در آشکارسازی و جهت یابی، با توجه به مقادیر نمونه سیگنال های عملی، امکان پذیر است.



شکل (۱۴-الف): طیف فرکانسی سیگنال LFM



شکل (۱۴-ب): الگوی زوج آنتن



- [14] S. Gogineni and A. Nehorai, "Monopulse MIMO Radar for Target Tracking," *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, vol. 47, no. 1, January 2011.
- [15] Zhang Guanjie, Guo Min, and Bao Yongjie, "Silence Tracking Radar," *Conference, Radar*, 2001.
- [16] Y. Zhang, et al., "Study on the technology of tracking noise jamming with Monopulse radar and Analysis on its tracking Errors," *WSEAS Transactions on Communications*, Hangzhou, China, pp. 648-657, 2009.
- [17] Chye Huat Peck and P. J. Moore, "A Direction Finding Technique for wideband Impulsive Noise Source," *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, vol. 43, no. 2, May 2001.
- [18] Andrea de Martino, "Introduction to modern EW System," Artech House, 2012.
- [19] K. M. Wong, et al., "Detection of low probability of intercept radar signals," Ottawa: Contract Report DRDC, 2009.
- [20] A. W. Houghton and C. D. Reeve, "Detection of spread-spectrum signals using the time-domain filtered cross spectral density," *IEEE Proc. Radar, Sonar Navig.*, vol. 142, no. 6, December 1995.
- [21] S. A. (REZA) Zekavat and R. Michael Buehrer, "Handbook Of Position Location," Wiley, 2019
- Coupling Using a UCA with directive Antennas," *Journal of Radar*, 2018. (In Persian)
- [7] K. Cui, W. Wu, X. Chen, J. Huang, N. Yuan, "2-D DO Estimation of LFM Signals Based on Dechirping Algorithm and Uniform Circle Array," *Signals*, 2017.
- [8] S. M. Sherman and D. K. Barton, "Monopulse Principles and Techniques Radar," Artech House, 2011.
- [9] R. G. Wiley, "ELINT the interception and analysis of radar signals," Artech House, 2006.
- [10] Qing Sun<sup>1</sup>, Qi Liang Zhang<sup>1</sup>, Xueyu Huang<sup>1</sup>, and Qian Gao<sup>2</sup>, "Target detection and localization method for distributed monopulse arrays in the presence of mainlobe jamming," *EURASIP Journal on Advances in Signal Processing*, 2020.
- [11] R. Ardoino and A. Megna, "LPI Radar Detection SNR Performances for a Dual Channel Cross Correlation based ESM Receiver," *European Radar Conference (EuRAD)*, 2009.
- [12] Yi-Xiong Zhang, et al., "A Novel Monopulse Angle Estimation Method for Wideband LFM Radars," *Sensors*, 2016.
- [13] A. K. Singh and K. Subba Rao, "Digital Receiver-based Electronic Intelligence System Configuration for the Detection and Identification of Intra pulse Modulated Radar Signals," *Defence Science Journal*, vol. 64, no. 2, 2014.

---

## Direction Finding of Wideband Radar Signals with Two Rotating Antennas

A. Ahmadi, M. Okhovvat<sup>\*</sup>, K. Mohammadpour Aghdam

<sup>\*</sup> Imam Hossein University, Tehran, Iran

(Received: 13/06/2019, Accepted: 14/05/2020)

### Abstract

Detection and direction of arrival (DOA) estimation is a signal processing challenge for wideband signals like LPI radar signals. Modern radars change their signal waveforms from pulse to pulse and distribute the signal in the time or frequency domain. Traditional direction finders usually use a narrowband channel to maximize sensitivity and detection range. Increasing the signal bandwidth decreases the SNR and the probability of intercept (POI). In this paper we proposed a new method for the direction finding of LPI radars, which increases the POI. In the proposed method we used two rotating antennas, one antenna used as a matched filter to the other one, in order to increase the processing gain. The proposed method despite traditional direction-finding methods, is able to detect and analyze pseudo noise and spread spectrum radar signals, without any theoretical limitation on signal frequency bandwidth. In this paper we used two antennas and proposed a new method with cross correlation technic for direction finding such as the method used in Monopulse tracking radars and compared it with other methods. Simulations shows good detection specifications for low SNR and we could reach about 25dB processing gain in wideband radar signals like LPI Radars or LFM Modulated radar signals.

**Keywords:** Direction Finding, Wideband Radar Signals, LPI Radars, Monopulse Direction Finding, Cross Correlation

---

<sup>\*</sup> Corresponding author E-mail: mokhovvat@ihu.ac.ir