

بهبود عملکرد رادار در محیط کلاتری با ادغام روش فشرده‌سازی پالس و الگوریتم جبران سازی سطح سیگنال

اکبر اصغرزاده بناب*^۱، محمدتقی پرتوی^۲

۱- استادیار، گروه مطالعات علم و فناوری، دانشگاه فرماندهی و ستاد آجا، تهران، ایران

۲- استادیار، گروه مطالعات علم و فناوری، دانشگاه فرماندهی و ستاد آجا، تهران، ایران

(دریافت مقاله: ۱۴۰۱/۱۲/۲۱ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۶/۰۷)

چکیده

میزان حساسیت سامانه رادار و قدرت تفکیک اهداف که به‌عنوان دو معیار مهم برای هر سامانه راداری تعریف می‌شود، با به‌کارگیری روش فشرده‌سازی پالس، می‌تواند محقق شود، اما این در صورتی است که در محدوده دیدبانی رادار، کلاتر حضور نداشته باشد. وجود انواع کلاتر در محدوده دیدبانی رادار، به‌عنوان یک اغتشاش، عملکرد رادار را مختل می‌کند و منجر به تشخیص اشتباه هدف و در نتیجه بروز هشدار غلط می‌شود. جبران سازی سطح سیگنال و سطح آستانه تشخیص به‌صورت تطبیقی، به‌عنوان یک راهکار، می‌تواند عملکرد رادار را در این محیط‌ها بهبود بخشد. بر همین اساس در این پژوهش، با اعمال جبران سازی روی سطح سیگنال ارسالی و سطح آستانه تشخیص به‌صورت تطبیقی، تلاش می‌شود تا از تشخیص اشتباه هدف و بروز هشدار غلط در محیط کلاتری جلوگیری به عمل آید. سناریوهای متعددی با استفاده از کد بارکر ۱۳ و ۲۲ مورد بررسی قرار گرفته است و در طول شبیه‌سازی‌ها ابعاد هدف، فاصله هدف از رادار و نرخ بارش باران تغییر داده شده است. بر مبنای منحنی ROC ثابت شده است که روش پیشنهادی برای طراحی سطح آستانه آشکارسازی نسبت به روش OFDM و CFAR دارای نرخ آشکارسازی بالاتری است. لازم به ذکر است، تمامی شبیه‌سازی‌ها در محیط نرم‌افزار MATLAB انجام شده است.

واژه‌های کلیدی: سامانه رادار، کلاتر هوایی، فشرده‌سازی پالس، مدولاسیون کد فاز شده، جبران سازی سیگنال، فیلتر منطبق

Improve radar performance in cluttered environments by integrating pulse compression method and signal surface compensation algorithm.

Abstract

The sensitivity of the radar system and the ability to separate targets, which are defined as two important criteria for any radar system, can be achieved by using the pulse compression method, but this is only if there is no clutter in the radar observation range. The presence of various types of clutter in the radar observation range, as a disturbance, disrupts the radar's performance and leads to wrong detection of the target and, as a result, false alarms. Adaptive signal level and detection threshold level compensation, as a solution, can improve radar performance in these environments. Accordingly, in this research, by applying compensation on the level of the transmitted signal and the level of the detection threshold in an adaptive manner, an attempt is made to prevent the misdiagnosis of the target and the occurrence of false alarms in the clutter environment. Several scenarios have been investigated using Barker 13 and 22 codes, and during the simulations, target dimensions, target distance from the radar, and rain rate have been changed. Based on the ROC curve, it has been proven that the proposed method for designing the detection threshold level has a higher detection rate than the OFDM and CFAR methods. It should be noted that all the simulations were done in the MATLAB software environment.

Key words: Radar System, Air clutter, Pulse compression, Phased Code Modulation, Signal compensation, Matched Filter

* اکبر اصغرزاده بناب، تلفن: ۰۹۳۹۸۳۲۷۹۹۶، پست الکترونیک: akbar.asgharzadeh@casu.ac.ir

این مقاله تحت لایسنس آفرینندگی مردمی (Creative Commons License) در دسترس شما قرار گرفته است. برای جزئیات این لایسنس از آدرس <https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode> دیدن فرمایید.



مقدمه

امروزه در سامانه‌های راداری مدرن، به‌طور وسیعی از روش فشرده‌سازی پالس استفاده می‌شود. فشرده‌سازی پالس به ما این امکان را می‌دهد تا علاوه بر دستیابی به تفکیک‌پذیری بهتر اهداف، توان متوسط منتقل‌شده را نیز افزایش دهیم. اما چالش بعدی، حضور انواع کلاتر آدر محدوده دیدبانی رادار هست که به‌عنوان یکی از مهم‌ترین عوامل مختل‌کننده عملکرد رادار در آشکارسازی اهداف به شمار می‌آید. جبران سازی سطح سیگنال و سطح آستانه تشخیص، به‌عنوان یک راهکار، می‌تواند عملکرد رادار را در این محیط‌ها بهبود بخشد. اما یکی از چالش‌هایی که کمتر به آن پرداخته شده است، نحوه طراحی مناسب سطح آستانه تشخیص برای به حداقل رساندن نرخ هشدارهای کاذب هنگام آشکارسازی اهداف متحرک در محیط کلاتری است. برای این منظور تا به حال از روش‌های آماری و یادگیری ماشین استفاده شده است. روش‌های آماری نیازمند داده‌های به‌روز هستند و نمی‌توانند با تغییرات پویای محیط کلاتری سازگاری داشته باشند. همچنین روش‌های یادگیری ماشین نیاز به داده‌های آموزشی با کیفیت در ابعاد بزرگ دارند که هم حجم محاسبات و هم هزینه پیاده‌سازی را بالا می‌برد. روش آستانه‌گذاری تطبیقی به دلیل سازگاری با انواع محیط‌ها یک راهکار عالی به حساب می‌آید.

پیشینه پژوهش

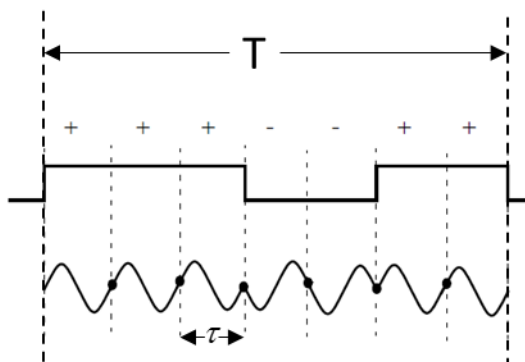
رادار مونو استاتیک پالسی از سال ۱۹۶۰ مورد توجه محققان قرار گرفته است و در سال ۱۹۸۰، اسکالینیک، با استخراج معادلات حالت بر سیستم، مطالعات خود را مبنای کار محققان قرار داده است [1]. در ادامه، مطالعات در حوزه آشکارسازی اهداف هوایی متحرک، محققان را با ابتدایی‌ترین چالش‌ها نظیر پدیده داپلر، نحوه مقابله با انواع نویزها و نحوه سرکوب گلبرگ‌های جانبی در سیستم رادار مواجه کرد. زمان زیادی نیاز نبود تا محققان رویکرد فشرده‌سازی پالس را به‌عنوان یک راهکار برای مقابله با این چالش‌ها ارائه دهند. اولین روش‌های استفاده‌شده برای فشرده‌سازی پالس بر اساس

کدهای بارکر^۳ بوده [2] و [3]. گرچه در مطالعه‌ای موردی [4] ثابت شده است که کد بارکر ۱۳ و ۱۵ به ترتیب منجر به کمترین افت نرخ سیگنال به نویز در خروجی فیلتر منطبق می‌شوند، اما با پیشرفت تکنولوژی و ظهور اهداف رادارگریز، تعیین مناسب‌ترین کد بارکر به منظور آشکارسازی این اهداف، بحث داغ محققان بوده است [5]. روش‌های فشرده‌سازی پالس در رادارهای نظامی نیز بطور گسترده استفاده می‌شوند [6] و [7] و [8]. در ادامه تعدادی از پژوهش‌ها، به مسئله بهینه‌سازی روش‌های فشرده‌سازی پالس در سامانه‌های رادار هوایی پرداخته‌اند. برای نمونه در [9] با انتخاب تابع هزینه بر مبنای دینامیک اهداف، تلاش شده است تا انرژی پرتوهای بازتابی، نزدیک به انرژی گلبرگ اصلی قرار بگیرد و در نتیجه منجر به سرکوب گلبرگ‌های جانبی شده است. در [10] با استفاده از روش تقسیم فرکانس متعامد (OFDM)،^۴ به شناسایی یک هدف در حال حرکت پرداخته شده است. با استفاده از سیگنال OFDM، تنوع فرکانس در پهنای باند، بیشتر شده است که همین امر منجر به بهبود عملکرد رادار شده است. انگیزه استفاده از فرکانس‌های متعدد این بوده است که مراکز منعکس‌کننده‌های مختلف یک هدف در هر فرکانس، بازتاب‌های متفاوتی دارند. در نتیجه تنوع فرکانس، اطلاعات اضافی را فراهم می‌کند که آشکارسازی اهداف را بهبود می‌بخشد. چالش بعدی که نظر محققان رو به خود جلب کرد طریقه آشکارسازی اهداف در حضور کلاترها بود که به دلیل تنوع بالای محیط‌ها و شرایط جوی حالت بر آنها، همچنان مطالعه روی آنها صورت می‌گیرد. در [11] روشی برای تشخیص کلاتر در سامانه رادار با طول موج میلی‌متری ارائه شده است. آنچه به‌عنوان یک چالش در این مطالعه مطرح شده است، آن است که اهداف شناسایی‌شده در سطوح پایینی جو، در مقایسه با اهداف سطوح بالاتر، غالباً توسط کلاتر آلوده می‌شوند که باید تمهیداتی در نظر گرفته شود تا آن‌ها حذف شوند. در این مطالعه، الگوریتمی برای جداسازی دقیق اهداف سطح پایین از کلاترها برای رادار زمینی با استفاده از توابع توزیع

^۳ Barker Codes^۴ Orthogonal frequency-division multiplexing^۵ Scatters^۱ Pulse Compression Method^۲ Clutter

پیاده‌سازی و دقت بالا توسط پژوهشگران مورد استفاده قرار گرفته است. اما بدلیل اینکه روش کدگذاری روی فاز سیگنال ارسالی در مقابل تداخل‌های فرکانسی مقاوم‌تر است، در این پژوهش از این روش استفاده شده است.

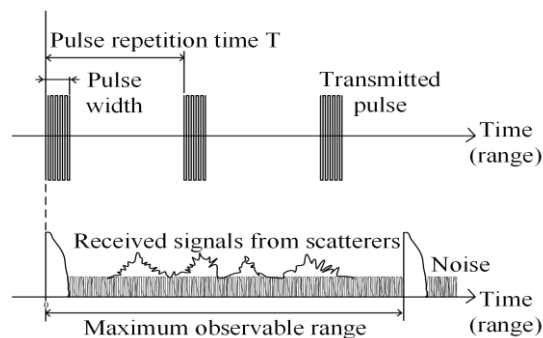
در روش مدولاسیون کدگذاری فاز، با عنایت به شکل ۱، ابتدا کل طول پالس (T) به N ریز پالس به‌اندازه $\tau \ll T$ تقسیم‌شده و فاز هر ریز پالس، بسته به اینکه چه روش کدگذاری مدنظر هست 0 یا π انتخاب می‌شود. در نتیجه مثل این است که پالس مدوله‌شده، قبل از ارسال در یک دنباله تصادفی 1 و -1 ضرب شود. در گیرنده همان کد بکار رفته در فرستنده در شکل موج ضرب شده و مقادیر ریز پالس‌ها باهم جمع می‌شوند. در نتیجه عرض پالس از دید گیرنده $\tau \ll T$ می‌شود.



شکل ۱ - فشرده‌سازی پالس به روش مدولاسیون کد فاز شده [16].

نحوه عملکرد رادار [15]

رادار مونو استاتیک پالسی، سیگنال‌ها را به‌صورت پالس‌های رادیو-فرکانسی در یک فرکانس حامل مشخص ارسال می‌کند. شکل ۳ نحوه ارسال و دریافت سیگنال، توسط رادار پالسی را نشان می‌دهد.



شکل ۳ - توالی پالس‌های ارسالی و سیگنال‌های دریافتی [15].

احتمال چندبعدی توسعه داده‌شده است. در [12] به بررسی هم‌زمان موضوع کاهش حجم محاسبات، مقاومت در برابر دوپلر و گرفتگی پالس پرداخته‌شده است. در این مطالعه الگوریتمی بهینه و یکپارچه مبتنی بر پس‌پردازش وفقی، برای آشکارسازی اهداف پنهان‌شده در گلبرگ‌های جانبی ارائه‌شده است. عدم بررسی توانایی رویکرد پیشنهادی در آشکارسازی اهداف در محیط کلاتری از نقاط ضعف این پژوهش بوده است.

اما یکی از چالش‌هایی که کمتر به آن پرداخته شده است، نحوه طراحی مناسب سطح آستانه تشخیص به‌صورت تطبیقی برای به حداقل رساندن نرخ هشدارهای کاذب هنگام آشکارسازی اهداف متحرک در محیط کلاتری است. در نتیجه بر آن شدیم تا میزان تاثیر این روش در جلوگیری از آشکارسازی اشتباه هدف در محیط کلاتری را مشخص کنیم. تلاش شده است تا شبیه‌سازی‌های متعددی مورد بررسی قرار گیرد و سناریوهای شبیه‌سازی برای کد بارکر ۱۳ و ۲۲ باهم مقایسه شده است. در طول شبیه‌سازی‌ها ابعاد هدف، فاصله هدف از رادار و نرخ بارش باران تغییر داده شده است تا بررسی شود کدام پیکربندی برای فیلتر منطبق برای یک سناریو خاص مناسب‌تر است.

مفهوم فشرده‌سازی پالس [13]

وضوح دید رادار با عرض پالس ارسالی نسبت عکس دارد. از طرفی میانگین توان ارسالی رادار با عرض پالس ارسالی نسبت مستقیم دارد. در نتیجه، به‌منظور بهبود عملکرد رادار نیازمند یک مصالحه بین وضوح دید و توان ارسالی رادار هست که این راهکار را روش فشرده‌سازی پالس در اختیار ما قرار می‌دهد. افزایش احتمال آشکارسازی هدف توسط افزایش قدرت سیگنال به نویز (SNR)، کاهش تداخل متقابل بین راداری در یک محیط شلوغ الکترومغناطیسی، افزایش انعطاف‌پذیری عملیاتی سیستم با به‌کارگیری کدها و ضرایب فشرده‌سازی متفاوت و کاهش تأثیر کلاترها در ردیابی هدف، از جمله مزیت‌های روش فشرده‌سازی پالس هست. در سمت دیگر، پیچیدگی تولید، ارسال و پردازش سیگنال که منجر به افزایش هزینه پیاده‌سازی سیستم و افزایش حجم داده‌های پردازشی می‌شود.

فشرده‌سازی پالس به روش کدگذاری روی فاز سیگنال ارسالی و فشرده‌سازی پالس به روش کدگذاری روی فرکانس سیگنال ارسالی دو روش محبوبی است که به دلیل سادگی

در گیرنده رادار علاوه بر سیگنال برگشتی از هدف، نویز نیز وجود دارد. توان کل این نویزها در ورودی گیرنده به صورت رابطه (۶) محاسبه می‌شود:

$$N = KT_S B_n \quad (6)$$

K ثابت بولتزمن، T_S دمای نویز سیستم و B_n پهنای باند نویز گیرنده است.

بدین ترتیب می‌توان نسبت سیگنال به نویز (SNR) که یک معیار استاندارد و بسیار کاربردی برای بیان توانایی آنتن در تشخیص هدف است را به وسیله رابطه (۷) محاسبه کرد:

$$\frac{S}{N} = \frac{P_t G_t G_r \sigma \lambda^2}{(4\pi)^3 R^4 k T_S B_n} \quad (7)$$

بر این اساس، معادله بیشینه برد رادار نیز به صورت رابطه (۸) به دست می‌آید:

$$R_{\max}^4 = \frac{P_t G^2 \sigma \lambda^2}{(4\pi)^3 k T_0 B_n F_n (S/N)_{\min} L_T L_R} \quad (8)$$

R_{\max} ، T_0 ، L_T و L_R به ترتیب بیانگر بیشینه برد رادار، دمای مرجع، تلفات فرستنده و تلفات گیرنده می‌باشند. از روابط (۱) الی (۸) برای محاسبه پارامترهای رادار پالسی مونو استاتیک در شرایط عدم حضور کلاتر باران استفاده شده است. با در نظر گرفتن ضریب انعکاس باران، به صورت رابطه (۱۱):

$$\eta = 7 \times 10^{-12} f^4 r^{1.6} \quad (9)$$

جایی که f فرکانس رادار بر حسب GHz و r سرعت ریزش باران بر حسب mm/hr هست، می‌توان معادله رادار را در حضور کلاتر باران به صورت رابطه (۱۲) بازنویسی کرد:

$$P_r = \frac{P_t G^2 \lambda^2 \sigma_t}{(4\pi)^3 R^4} \quad (10)$$

که σ_t سطح مقطع قطرات باران یا همان پارامتر افت انتشار رادار را مشخص می‌کند. از روابط (۹) و (۱۰) برای لحاظ کردن تاثیر کلاتر باران بر توان دریافتی رادار استفاده شده است.

برد رادار (فاصله بین رادار و هدف)، وضوح دید رادار (حداقل فاصله‌ای که دو منعکس کننده مجاور به هم در یک جهت قابل تفکیک باشند) و حداکثر محدوده قابل مشاهده هدف (محدوده‌ای که بتوان هدف را به طور واضح تشخیص داد) به ترتیب از روابط (۱) و (۲) و (۳) محاسبه می‌شوند:

$$r = \frac{ct}{2} \quad (1)$$

جایی که t مدت زمان بین ارسال یک پالس و دریافت سیگنال برگشتی از منعکس کننده و c سرعت نور است.

$$\Delta r = \frac{c\tau}{2} \quad (2)$$

همچنین τ عرض پالس ارسالی هست.

$$r_a = \frac{cT}{2} \quad (3)$$

T نیز دوره تناوب تکرار پالس است.

معادلات حاکم بر سیستم [1]

با در نظر گرفتن چگالی توان ارسالی و چگالی توان دریافتی به صورت رابطه (۴)، معادله توان دریافتی بر حسب توان ارسالی به صورت رابطه (۵) به دست می‌آید:

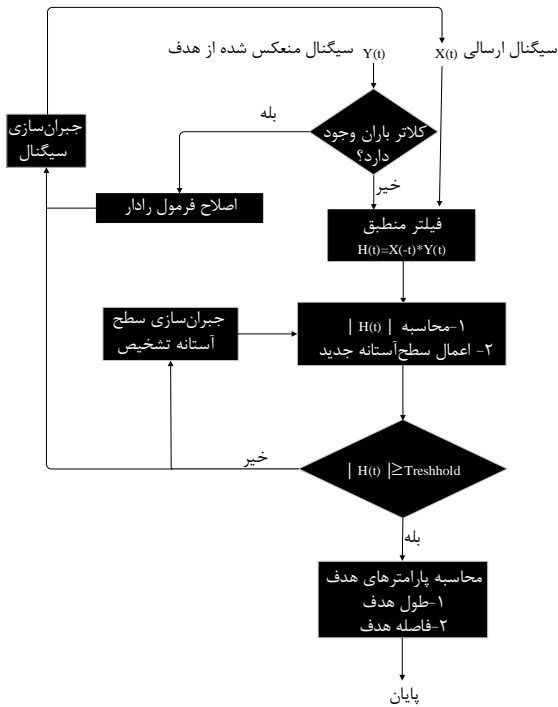
$$\rho_t = \frac{P_t}{4\pi R^2} \quad (4)$$

$$\rho_r = \frac{P_t G_t}{4\pi R^2} \frac{\sigma}{4\pi R^2}$$

که در آن، P_t توان ارسالی، R فاصله شعاعی هدف تا رادار، G_t بهره آنتن فرستنده و σ بیان کننده سطح مقطع رادار است.

$$P_r = \frac{P_t G_t G_r \sigma \lambda^2}{(4\pi)^3 R^4} \quad (5)$$

G_r ، λ و P_r نیز به ترتیب توان گیرنده، بهره آنتن گیرنده و طول موج پالس ارسالی هست.



شکل ۴ - سازوکار تشخیص هدف

عملکرد بدین صورت است که در هر دوره جمع پالس، ابتدا پالس مدوله شده $x(t)$ به سمت هدف ارسال می شود و به طور هم زمان معکوس این پالس $x(-t)$ در پاسخ ضربه فیلتر منطبق لحاظ می شود. در ادامه پالس منعکس شده از هدف $y(t)$ توسط رادار دریافت می شود. در این مرحله، ابتدا تشخیص داده می شود که پالس دریافتی $y(t)$ منعکس شده از قطرات باران بوده است یا از هدف. در صورت تشخیص کلاتر باران، نیاز هست تا پارامتر افت انتشار در معادله رادار لحاظ شود. در صورت تشخیص عدم بارش باران، سیگنال $y(t)$ با پاسخ ضربه فیلتر منطبق که همان $x(-t)$ هست، کانوالو می شود تا میزان همبستگی این دو پالس $|H(t)|$ محاسبه شود. سپس مقدار به دست آمده، با سطح آستانه تشخیص $Threshold$ مقایسه می شود. اگر شرط $|H(t)| \geq Threshold$ برقرار باشد، بدان معناست که میزان توان دریافتی از هدف مطلوب بوده و نیازی به جبران سازی نیست. در صورتی که شرط $|H(t)| < Threshold$ برقرار باشد، نیاز هست تا جبران سازی پالس و سطح آستانه تشخیص صورت گیرد.

سطح مقطع رادار که معیاری برای اندازه گیری ابعاد یک هدف راداری است، به صورت یک عدد اسکالر برای یک هدف خاص، در یک زاویه دید مشخص و در فرکانس معین بیان می گردد و تعیین کننده میزان بازتابش هدف است. حال وقتی به یک صفحه تخت به مساحت A به صورت عمود بر سطح، موج تابیده شود، سطح مقطع آن به صورت رابطه (۹) محاسبه می شود:

$$\sigma = \frac{4\pi A^2}{\lambda^2} \quad (11)$$

حال اگر فرض شود یک هدف در زاویه روئیت مشخص θ دارای N عدد منعکس کننده همسان در فاصله فیزیکی L از هم باشد (مدل سورلینگ نوع ۱) در صورتی که هر N منعکس کننده دارای سطح مقطع برابر σ_0 باشند، آنگاه، سطح مقطع کل این هدف به صورت رابطه (۱۰) محاسبه می شود:

$$\frac{\sigma_r}{\sigma_0} = N \left[1 + \cos \left(\frac{4\pi L}{\lambda} \sin \theta \right) \right] \quad (12)$$

از روابط (۱۱) و (۱۲) برای محاسبه پارامترهای هدف استفاده شده است.

رویکرد پیشنهادی

ابتدا با استفاده از روش مدولاسیون کد فاز شده که در بخش پیشینه پژوهش ذکر شده است سیگنال ارسالی و همچنین فیلتر منطبق بر مبنای کد بارکر ۱۳ و ۲۲ طراحی شده است، در ادامه با استفاده از معادلات (۱) الی (۱۰) خروجی فیلتر منطبق محاسبه شده است.

حال با استفاده از اطلاعات بدست آمده و بر مبنای فلوچارت شکل ۴، به طور هم زمان جبران سازی پالس ارسالی بعدی و جبران سازی سطح آستانه تشخیص بصورت تطبیقی اعمال می شود:

شبیه‌سازی و نتایج

در طول شبیه‌سازی‌ها فرض بر این است که هدف یک جسم هموار مسطح (مدل سورلینگ نوع ۱) و متحرک با سرعت ثابت می‌باشد. رادار نیز از نوع مونو استاتیک پالسی ایستا (بدون حرکت روی محور زمین) و از نوع چرخشی با سرعت ثابت حول محور عمودی (زاویه پوشش دهی ۳۶۰ درجه) می‌باشد.

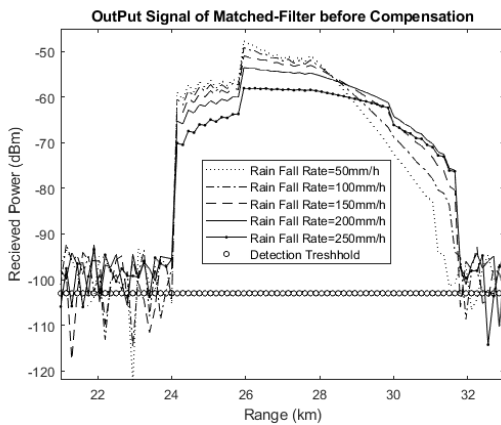
پارامترهای سیستم جهت شبیه‌سازی در جدول ۱ مشخص شده است:

جدول ۱ - پارامترهای سیستم جهت شبیه‌سازی

Parameter	Symbol	Value
ثابت بلتزن	K	$1/38e^{-25}$
دما (Celsius)	T	۲۵
سرعت نور (m/s)	C	$3e^8$
توان خروجی (w)	Pt	$10e^3$
بهره آنتن (dB)	Ga_db	۳۰
پهنای بیم آنتن (Degree)	Tetha	۶
فرکانس کاری (Hz)	Fc	$9/4e^9$
سرعت موتور سروو (rpm)	ROS	۱۰
فاصله زمانی تکرار پالس (Sec)	PRI	$4e^{-2}$
پهنای پالس (Sec)	PW	$1e^{-6}$
پهنای باند فیلتر منطبق (Hz)	B_MF	$10e^6$
عدد نویز	Fn_db	۵
پهنای پالس فیلتر منطبق (Sec)	PW_MF	$13e^6$
احتمال تشخیص	Pd	۰/۹
احتمال هشدار غلط	Pfa	$10e^{-6}$
حداقل SNR برای تشخیص (dB)	SNR_mi	۶
تلفات فرستنده (dB)	Lt_db	۱/۵
تلفات گیرنده (dB)	Lr_db	۲/۵
تلفات پردازش (dB)	Lp_db	۲
تلفات فیلتر منطبق (dB)	Lmf_db	۲
تلفات جوی برحسب کیلومتر (dB)	Lat_db	-۱/۰۲
زمان نشست گیرنده (Sec)	Td	$1e^{-6}$

نتایج شبیه‌سازی با کد بارکر ۱۳

در این مورد مطالعاتی، یک هدف به طول ۷ کیلومتر، در فاصله ۲۴ تا ۳۱ کیلومتری از رادار و در شرایطی که فرکانس دوپلر ۱۰۰۰ هرتز در نظر گرفته شده است قرار دارد. پیکربندی فیلتر منطبق بر اساس کد بارکر ۱۳ هست. سطح آستانه تشخیص نیز ۱۰۳- دسی‌بل در نظر گرفته شده است. شکل ۷ خروجی فیلتر منطبق برحسب فاصله، قبل از جبران سازی سطح آستانه تشخیص را نشان می‌دهد:



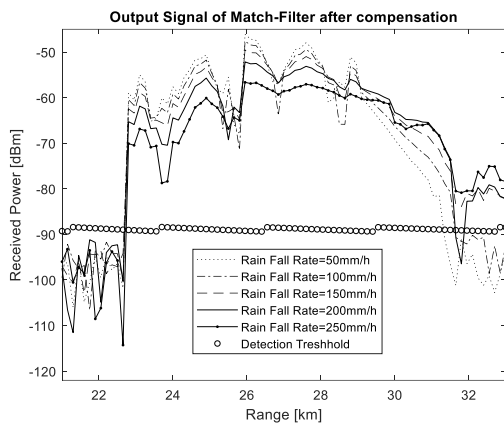
شکل ۷ - نمودار خروجی فیلتر منطبق، قبل از جبران سازی سطح آستانه تشخیص

همان‌طور که مشاهده می‌شود، با افزایش نرخ ریزش باران از ۵۰ میلی‌متر بر ساعت تا ۲۵۰ میلی‌متر بر ساعت، کاهش توان دریافتی از هدف ناچیز بوده است به طوری که هدف کاملاً قابل شناسایی است که این امر در نتیجه اصلاح فرمول رادار محقق شده است. اما چالش بعدی سطح توان گلبرگ‌های جانبی بوده است که همان‌طور که در شکل قابل مشاهده هست بالای سطح آستانه تشخیص قرار گرفته و در نتیجه منجر به تشخیص اشتباه هدف و بروز هشدار غلط می‌شود. برای حل این مشکل، جبران سازی روی سطح آستانه، صورت گرفته است. در شکل ۸، خروجی فیلتر منطبق برحسب فاصله، پس از جبران سازی سطح آستانه تشخیص نشان داده شده است:

از پارامترهای جدول ۱، برای محاسبه معادلات (۱) تا (۱۰) استفاده شده است.

همان‌طور که مشاهده می‌شود، با افزایش نرخ ریزش باران از ۵۰ میلی‌متر بر ساعت تا ۲۵۰ میلی‌متر بر ساعت، کاهش توان دریافتی از هدف ناچیز بوده است به طوری که هدف کاملاً قابل شناسایی است که این امر در نتیجه اصلاح فرمول رادار محقق شده است. اما چالش بعدی سطح توان گلبرگ‌های جانبی بوده است که همان‌طور که قابل مشاهده هست بالای سطح آستانه تشخیص قرار گرفته و در نتیجه منجر به تشخیص اشتباه هدف و بروز هشدار غلط می‌شود. برای حل این مشکل، جبران سازی روی سطح آستانه، صورت گرفته است. نکته دیگری که می‌توان به آن اشاره کرد این است که رادار قادر به تشخیص دقیق فاصله و طول هدف نبوده به طوری که هدف در فاصله ۲۳ کیلومتری با طول ۸ کیلومتر تشخیص داده شده است که نشان می‌دهد، پیکربندی فیلتر با کد بارکر ۲۲ برای این هدف مناسب نبوده است.

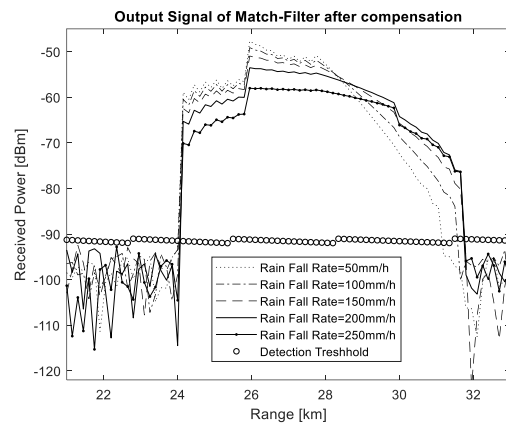
در شکل ۱۰، خروجی فیلتر منطبق بر حسب فاصله، پس از جبران سازی سطح آستانه نشان داده شده است:



شکل ۱۰ - نمودار خروجی فیلتر منطبق، پس از جبران سازی سطح آستانه

همان‌طور که مشاهده می‌شود، با آنکه پس از جبران سازی سطح آستانه، وجود گلبرگ‌های کناری، در فرایند تشخیص هدف تأثیرگذار نبوده است، اما همچنان مشخصات هدف به درستی تشخیص داده نشده است.

تأثیر پیکربندی فیلتر منطبق در عملکرد رادار در این مورد مطالعاتی ۵ هدف به طول ۲۰۰ متر به ترتیب در فواصل ۵ کیلومتر، ۱۰ کیلومتر، ۱۵ کیلومتر، ۲۰



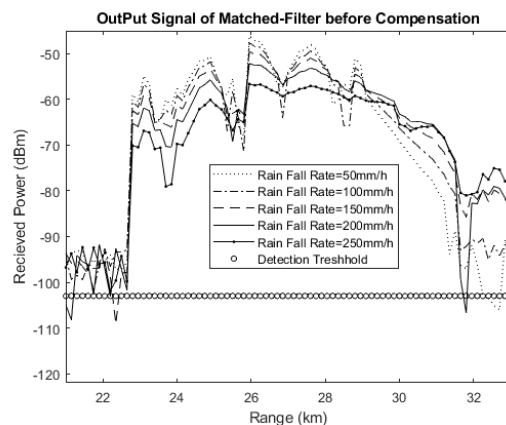
شکل ۸ - نمودار خروجی فیلتر منطبق، پس از جبران سازی سطح آستانه

همان‌طور که مشاهده می‌شود، پس از جبران سازی سطح آستانه، وجود گلبرگ‌های جانبی، در فرایند تشخیص هدف تأثیرگذار نبوده. در نتیجه هدف به درستی تشخیص داده شده است.

نتایج شبیه‌سازی با کد بارکر ۲۲

در این مورد مطالعاتی، مشخصات هدف مشابه بخش ۷-۲ هست با این تفاوت که پیکربندی فیلتر منطبق بر اساس کد بارکر ۲۲ هست.

شکل ۹ خروجی فیلتر منطبق، قبل از جبران سازی سطح آستانه را نشان می‌دهد:



شکل ۹ - نمودار خروجی فیلتر منطبق، قبل از جبران سازی سطح آستانه

بدون فشرده‌سازی	۲۰	-۹۳	-۹۶
بدون فشرده‌سازی	۲۵	-۹۵	-۹۶/۵
کد بارکر ۱۳	۵	-۶۸	-۹۰/۸
کد بارکر ۱۳	۱۰	-۷۴/۶	-۹۰/۸
کد بارکر ۱۳	۱۵	-۷۸/۷	-۹۰/۳
کد بارکر ۱۳	۲۰	-۸۲/۱	-۹۰/۷
کد بارکر ۱۳	۲۵	-۸۵/۸	-۹۰/۹
کد بارکر ۲۲	۵	-۶۶/۱	-۸۹/۷
کد بارکر ۲۲	۱۰	-۷۲/۶	-۸۹/۲
کد بارکر ۲۲	۱۵	-۷۶/۸	-۸۹/۲
کد بارکر ۲۲	۲۰	-۸۰/۱	-۸۹/۸
کد بارکر ۲۲	۲۵	-۸۳/۵	-۸۹/۳

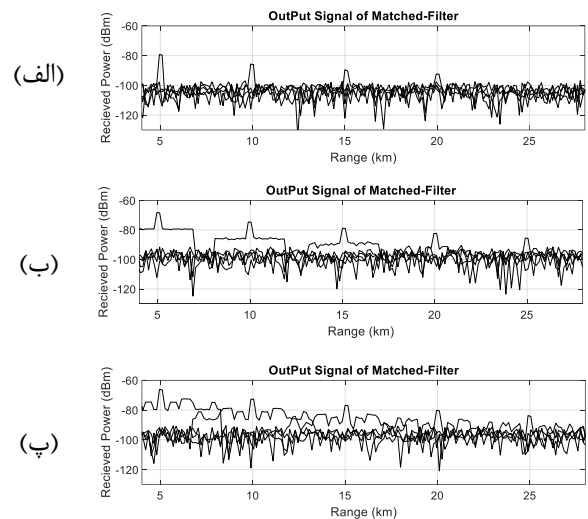
تفسیر نتایج جدول ۲ بدین صورت است که با تقسیم پالس تولیدی اولیه به ریز پالس‌های کد فاز شده (۱۳ ریز پالس و ۲۲ ریز پالس)، بیشینه توان دریافتی از هدف افزایش یافته است که این امر هنگام دور شدن فاصله هدف از رادار (از ۵ کیلومتر تا ۲۵ کیلومتر) بسیار حائز اهمیت است به طوری که برای مثال در پیکربندی بدون فشرده‌سازی پالس، هدف شماره ۵ که در فاصله ۲۵ کیلومتری رادار قرار دارد، قابل شناسایی نبوده است. همچنین با افزایش تعداد ریز پالس‌های کد فاز شده، بیشینه توان گلبرگ‌های جانبی کاهش یافته است که این امر نیز از مزیت‌های مهم این روش است. همچنین محاسبه مشخصات هدف شامل فاصله دقیق از رادار و طول دقیق هدف نیز با افزایش ریز پالس‌های کد فاز شده بهبود یافته است.

آنالیز عملکرد آشکارسازی

برای تعیین میزان موفقیت روش پیشنهادی نسبت به سایر روش‌های تعیین سطح آستانه تعیین، معمولاً از نموداری با نام ROC استفاده می‌شود که احتمال آشکارسازی هدف را بر حسب نرخ سیگنال به نویز و یا نرخ سیگنال به کلاتر بر حسب دسی‌بل بیان می‌کند. شکل ۱۲ نمودار ROC را برای رویکرد پیشنهادی در مقایسه با دو روش آستانه گذاری متداول دیگر به نام OFDM و CFAR نشان می‌دهد.

کیلومتر و ۲۵ کیلومتری از رادار قرار گرفته‌اند. فرکانس دوپلر ۱۰۰۰ هرتز و نرخ بارش باران ثابت در نظر گرفته شده است. شبیه‌سازی برای سه حالت (۱) پیکربندی فیلتر منطبق، بدون فشرده‌سازی پالس (۲) پیکربندی فیلتر منطبق، با کد بارکر ۱۳ (۳) پیکربندی فیلتر منطبق، با کد بارکر ۲۲ انجام شده است. هدف از این مورد مطالعاتی، بررسی تأثیر پیکربندی فیلتر منطبق بر میزان توان دریافتی توسط رادار و سطح گلبرگ‌های جانبی ایجاد شده است.

شکل ۱۱ خروجی فیلتر منطبق برای این مورد مطالعاتی را نشان می‌دهد:



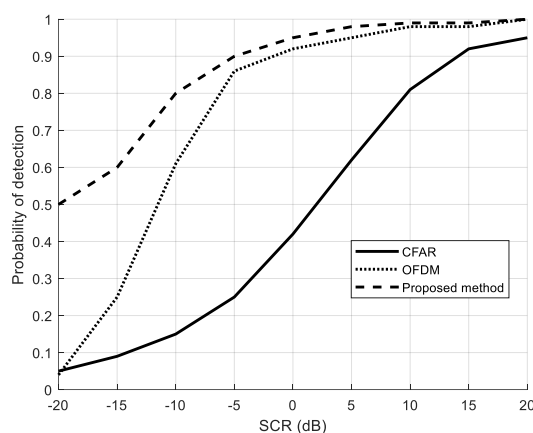
شکل ۱۱ - نمودار خروجی فیلتر منطبق تحت پیکربندی (الف) بدون فشرده‌سازی پالس (ب) فشرده‌سازی با کد بارکر ۱۳ (پ) فشرده‌سازی با کد بارکر ۲۲

نتایج شکل ۱۱ به صورت جدول ۲ قابل بیان است:

جدول ۲ - بررسی تأثیر پیکربندی فیلتر منطبق بر عملکرد رادار

پیکربندی فیلتر منطبق	فاصله هدف (km)	توان دریافتی از هدف (dBm)	توان لوب‌های جانبی (dBm)
بدون فشرده‌سازی	۵	-۷۹/۳	-۹۶/۶
بدون فشرده‌سازی	۱۰	-۸۵/۷	-۹۶/۶
بدون فشرده‌سازی	۱۵	-۹۰	-۹۵/۸

- [2] M. H. Ackroyd and F. Ghani, "Optimum mismatched filters for sidelobe suppression," *IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst.*, no. 2, pp. 214–218, 1973.
- [3] G. L. Austin and A. Bellon, "The use of digital weather radar records for short-term precipitation forecasting," *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, vol. 100, no. 426, pp. 658–664, 1974.
- [4] R. C. Daniels and V. Gregers-Hansen, "Code inverse filtering for complete sidelobe removal in binary phase coded pulse compression systems," in *IEEE International Radar Conference, 2005.*, IEEE, 2005, pp. 256–261.
- [5] S. P. Singh and T. D. Bhatt, "Sidelobes reduction technique for biphase barker codes," *Int. J. Eng. Trends Technol.*, vol. 69, no. 6, pp. 239–242, 2021.
- [6] C. Hu, Y. Wang, R. Wang, T. Zhang, J. Cai, and M. Liu, "An improved radar detection and tracking method for small UAV under clutter environment," *Sci. China Inf. Sci.*, vol. 62, no. 2, pp. 1–3, 2019.
- [7] E. Temlioglu and I. Erer, "A novel convolutional autoencoder-based clutter removal method for buried threat detection in ground-penetrating radar," *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, vol. 60, pp. 1–13, 2021.
- [8] E. Yar, M. B. Kocamis, A. Orduyilmaz, M. Serin, and M. Efe, "A complete framework of radar pulse detection and modulation classification for cognitive EW," in *2019 27th European Signal Processing Conference (EUSIPCO)*, IEEE, 2019, pp. 1–5.
- [9] J. Hu, X. Dong, W. Tian, C. Hu, K. Feng, and J. Lu, "A Novel Optimization Strategy of Sidelobe Suppression for Pulse Compression Weather Radar," *Remote Sens.*, vol. 15, no. 12, p. 3188, 2023.
- [10] Z. Esmaeilbeig, A. Eamaz, K. V. Mishra, and M. Soltanian, "Moving target detection via multi-IRS-aided OFDM radar," in *2023 IEEE Radar Conference (RadarConf23)*, IEEE, 2023, pp. 1–6.
- [11] X. Hu, J. Ge, J. Du, Q. Li, J. Huang, and Q. Fu, "A robust low-level cloud and clutter discrimination method for ground-based millimeter-wavelength cloud radar," *Atmos. Meas. Tech. Discuss.*, vol. 2020, pp. 1–36,



شکل ۱۲ - نمودار احتمال آشکارسازی بر حسب نرخ سیگنال به کلاتر برای آستانه گذاری بر مبنای رویکرد پیشنهادی، بر مبنای روش OFDM و بر مبنای روش CFAR

با فرض اینکه نرخ سیگنال به کلاتر (SCR) بتواند مقادیر ۲۰- الی ۲۰+ را به خود بگیرد نمودار ROC برای سه روش ترسیم شده است. همانطور در شکل ۱۲ قابل مشاهده است، در شرایط مساوی، روش پیشنهادی نرخ آشکارسازی بالاتری نسبت به روش های OFDM و CFAR دارد.

نتیجه گیری

حضور انواع کلاتر در محدوده دیدبانی رادار، به عنوان یکی از مهم ترین عوامل مختل کننده عملکرد رادار در تشخیص هدف به حساب می آید. با تلفیق روش فشرده سازی پالس، توأم با اعمال جبران سازی روی سطح سیگنال و سطح آستانه تشخیص به صورت تطبیقی، میتوان از تشخیص اشتباه هدف و در نتیجه از بروز هشدار غلط، جلوگیری به عمل آید. روش آستانه گذاری تطبیقی به دلیل سازگاری با انواع محیط ها یک راهکار عالی به حساب می آید. با مشاهده خروجی ها نتیجه شده است که روش پیشنهادی در مقایسه با روش OFDM به میزان ۱۰ درصد و در مقایسه با روش CFAR به میزان ۲۰ درصد در آشکارسازی هدف بهبود داشته است. همچنین با مقایسه خروجی های فیلتر منطبق در پیکربندی های مختلف، مشاهده شد که اختلاف انرژی قله به قله هدف از لوب های جانبی به مقدار ۲ برابر افزایش یافته و همین امر از تأثیر وجود گلبرگ های جانبی در فرایند تشخیص هدف جلوگیری کرده است.

منابع و مراجع

- [1] M. I. Skolnik, "Introduction to radar systems," *New York*, 1980.

- 2020.
- [12] ر. کیوان شکوه and م. اخوت, “یک الگوریتم یکپارچه برای آشکارسازی بهینه اهداف ضعیف راداری پنهان‌شده در گلبرگ‌های جانبی یک هدف بزرگ”, *پدافند الکترونیکی و سایبری*, vol. 6, no. 4, pp. 91–104, 2019, [Online]. Available: https://ecdj.ihu.ac.ir/article_204410.html
- [13] E. C. Farnett, G. H. Stevens, and M. Skolnik, “Pulse compression radar,” *Radar Handb.*, vol. 2, pp. 10–11, 1990.
- [14] J. C. Toomay and P. J. Hannen, *Radar Principles for the Non-specialist*, vol. 2. SciTech Publishing, 2004.
- [15] S. Fukao, K. Hamazu, and R. J. Doviak, “Radar for meteorological and atmospheric observations,” 2014.
- [16] B. R. Mahafza, *Radar signal analysis and processing using MATLAB*. Chapman and Hall/CRC, 2016.