

افزایش مقدار JSRmin در اخلاص گره‌های فریبنده با استفاده از

کاهش تعداد نمونه‌های سیگنال LFM ورودی

کاظم غفاری^۱، یاسر نوروزی^۲، پوریا اعتضادی فر^{۳*}

۱- دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی برق، دانشگاه جامع امام حسین (ع)، تهران، ایران

۲- استادیار، دانشکده مهندسی برق، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران

۳- استادیار، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه جامع امام حسین (ع)، تهران، ایران، petezadifar@ihu.ac.ir

چکیده:

با توجه به پیشرفت‌های روزافزون فن‌آوری راداری و پیچیدگی الگوریتم‌های آشکارسازی، طراحی سیگنال‌های فریب برای اختلال در رادارهای مدرن، اهمیت ویژه‌ای یافته است. در این مقاله، ابتدا سیگنال‌های راداری موجود تحلیل شده و ویژگی‌های کلیدی آنها استخراج می‌شود سپس تکنیک‌های شیفت فرکانسی و شیفت زمانی به عنوان روش‌های اصلی در تولید سیگنال فریب، معرفی می‌گردند. در ادامه، تاثیر کاهش تعداد نمونه‌های ورودی سیگنال LFM بر روی مقادیر JSRmin و نسبت توان حداکثر به توان متوسط (PAPR) بررسی شده است. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که کاهش تعداد نمونه‌ها تا نصف، منجر به افزایش چشم‌گیر مقدار JSRmin می‌شود. این امر می‌تواند به عنوان یک رویکرد نوآورانه در طراحی سیگنال‌های فریب مورد استفاده قرار گیرد. نتایج آزمایشگاهی و شبیه‌سازی بیان‌گر آن است که سیگنال‌های فریب طراحی شده توانایی بالایی در ایجاد اختلال در رادارهای دشمن و کاهش دقت شناسایی اهداف دارند. در پایان، ضمن بررسی چالش‌ها، ضرورت توسعه روش‌های نوین برای مقابله با رادارهای پیشرفته آینده مورد تایید قرار گرفته است.

واژه‌های کلیدی:

اختلال، سیگنال فریب، LFM، اخلاص گر، JSRmin، PAPR، شیفت فرکانسی، شیفت زمانی، فیلتر منطبق

Increasing the value of JSRmin in deceptive disruptors by reducing the number of samples of the input LFM signal

Kazem Ghaffari¹, Yaser Norouzi², *Pouria Etezadifar³

1-PhD student, Faculty of Electrical Engineering, Imam Hossein (AS) University, Tehran, Iran

2-Assistant professor, faculty of electrical engineering, Amir Kabir University of Technology, Tehran, Iran

3-Assistant professor, faculty of electrical and computer engineering, Imam Hossein (AS) University, Tehran, Iran

Abstract:

Given the rapid advances in radar technology and the growing complexity of detection algorithms, the design of deceptive signals to interfere with modern radars has become especially important. In this paper, existing radar signals are first analyzed and their key characteristics extracted; then frequency-shift and time-shift techniques are introduced as the primary methods for generating deceptive signals. Next, the effect of reducing the number of input samples of an LFM signal on the values of JSRmin and the peak-to-average power ratio (PAPR) is examined. Simulation results show that halving the number of samples leads to a significant increase in JSRmin. This effect can be employed as an innovative approach in the design of deceptive signals. Laboratory and simulation results indicate that the designed deceptive signals are highly capable of jamming adversary radars and degrading target detection accuracy. Finally, while discussing the challenges, the paper confirms the necessity of developing novel methods to counter future advanced radars.

Keywords:

Disruption, deception signal, LFM, disruptor, JSRmin, PAPR, frequency shift, time shift, matched filter.

*Responsible Author's E-mail: petezadifar@ihu.ac.ir

۱- مقدمه

با گذشت زمان و پیشرفت فن‌آوری، رادارهای مدرن قادر به شناسایی و مقابله با سیگنال‌های فریب به صورت هوشمندانه‌تری هستند. بنابراین، تکنیک‌های جدید برای تولید سیگنال فریب نیز باید توسعه یابند. تکنیک‌های طراحی سیگنال فریب مجموعه‌ای از روش‌های پیچیده و دقیق را در برمی‌گیرد که نیاز به دانش عمیق در حوزه الکترونیک، پردازش سیگنال و سیستم‌های راداری دارد. این فن‌آوری‌ها نقش مهمی در استراتژی‌های نظامی و امنیتی ایفا می‌کنند و به کاهش توانایی‌های راداری دشمن کمک می‌کنند.

در طراحی سیگنال فریب راداری با استفاده از تکنیک DRFM^۱، سیگنال رادار دشمن توسط سیستم اخلاص‌گر نیروهای خودی دریافت می‌گردد و بعد از تبدیل شدن به سیگنال دیجیتال توسط مبدل آنالوگ به دیجیتال، (ADC^۲)، در حافظه سیستم ذخیره می‌گردد و در زمان مناسب به سمت گیرنده دشمن تابانده می‌شود [۱]. به صورت کلی در ابتدا، سیگنال راداری که از طرف دشمن دریافت می‌شود، باید شناسایی و تحلیل گردد. این شامل شناسایی فرکانس‌های اصلی، نرخ تکرار پالس، الگوی مدولاسیون و سایر ویژگی‌های سیگنال است. فهمیدن زمان‌بندی و الگوی ارسال سیگنال‌های دشمن دارای اهمیت ویژه‌ای است، زیرا می‌تواند به طراحی سیگنال فریب کمک کند. بعد از تحلیل سیگنال راداری، می‌توان آن را با استفاده از تکنیک‌های مختلف دچار شیفت فرکانسی نمود. این بدین معنا است که فرکانس سیگنال به طور مصنوعی تغییر یابد تا رادار دشمن نتواند آن را به عنوان سیگنال خاصی شناسایی کند. علاوه بر شیفت فرکانسی، نگاشت زمانی سیگنال نیز می‌تواند در طراحی سیگنال فریب به کار رود [۱]. این روش می‌تواند با تأخیر یا پیشرفت در سیگنال، باعث شود که سیگنال فریب به طور غیرمترقبه‌ای رفتار کند. سیگنال فریب شکل گرفته باید به نحوی طراحی شود که به نظر برسد یک سیگنال واقعی است و می‌تواند رادار دشمن را به اشتباه بیندازد. پس از تشکیل، سیگنال فریب به سمت رادار دشمن ارسال می‌شود. این مرحله ممکن است به کاهش سطح

سیگنال و یا استفاده از تکنیک‌های پوشش‌دهی وابسته باشد تا احتمال شناسایی سیگنال فریب توسط سیستم‌های راداری دشمن را کاهش دهد. پس از ارسال سیگنال فریب، باید اثر آن بر روی رادار دشمن دقیقاً مورد بررسی قرار گیرد تا وضعیت و شرایط تغییر یافته شناسایی شود [۲].

سیگنال رادار دشمن می‌تواند دارای شکل‌های مختلفی مانند کد شده فازی، LFM و ... باشد. در این تحقیق سیگنال رادار دشمن از نوع LFM در نظر گرفته شده است [۲].

در یک DRFM سیگنال رادار دشمن نخست وارد آنتن گیرنده می‌شود و پس از کاهش فرکانس^۳ جهت ساده‌تر شدن اعمال پردازشی و نمونه‌برداری، وارد یک مبدل آنالوگ به دیجیتال می‌شود. علت این امر در ماهیت دیجیتالی بودن واحد حافظه است. سیگنال دیجیتال سپس وارد حافظه می‌شود و پس از اعمال تأخیر زمانی دلخواه، به واحد مبدل دیجیتال به آنالوگ انتقال داده می‌شود تا به ماهیت آنالوگ خود بازگردانده شود. سیگنال آنالوگ فرکانس پایین پس از این مرحله وارد یک ضرب‌کننده شده و فرکانس آن افزایش می‌یابد و مجدداً فرکانس اولیه خود را بدست می‌آورد. پس از این مرحله سیگنال وارد یک تقویت‌کننده شده و از طریق یک فرستنده به سمت رادار قربانی ارسال می‌شود. با توجه به اینکه رادار، فاصله و سرعت هدف را از اختلاف فاز موج برگشتی نسبت به موج اصلی بدست می‌آورد، لذا با ذخیره موج رادار و اعمال شیفت زمانی و فرکانسی به اندازه دلخواه به آن و ارسال مجدد آن به سمت رادار، می‌توان رادار را در شناسایی دقیق فاصله و سرعت هدف دچار فریب و اختلال نمود. همچنین می‌توان با استفاده از اعمال سیگنال فریب از طریق گلبرگ^۴‌های فرعی رادار، در زاویه واقعی هدف نیز اختلال ایجاد کرد. همان‌گونه که می‌دانیم آنتن رادار دارای گلبرگ اصلی و فرعی می‌باشد و در جهت گلبرگ اصلی دارای بیشترین توان ارسال و متقابلاً دریافت سیگنال است. در یک رادار مناسب و ایده‌آل گلبرگ‌های فرعی باید از بین بروند. اصولاً وقتی رادار سیگنالی را دریافت می‌کند فرض را بر این قرار

^۳ Down Convert

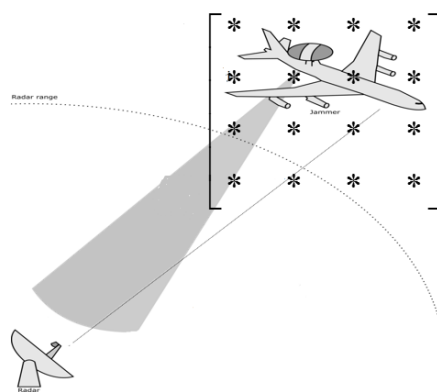
^۴ Lobe

^۱ Digital Radio Frequency Memory

^۲ Analog to Digital Convertor

جعلی از طرف اخلاص گر، مقدار نسبت توان حداکثر لحظه‌ای به توان میانگین ($PAPR^2$) در تقویت‌کننده سیگنال نیز افزایش خواهد یافت [۳].

که این موضوع باعث اتلاف هر چه بیشتر توان و اعوجاج غیرخطی در تقویت‌کننده توان اخلاص گر خواهد شد و این حالت مد نظر ما نمی‌باشد. از طرفی با کاهش تعداد اهداف جعلی، هدف واقعی خودی نخواهد توانست به راحتی خود را در بین اهداف جعلی پنهان نموده و از دید رادار دشمن محو نماید. لذا باید در تولید اهداف جعلی در بخش اخلاص گر یک حالت بهینه بدست آورده شود.



شکل ۱- پنهان شدن هدف واقعی در بین اهداف جعلی [۷]

بنابراین به طور خلاصه می‌توان گفت با گسترش روزافزون فن‌آوری‌های راداری و افزایش پیچیدگی الگوریتم‌های پردازش سیگنال، نیاز به روش‌های نوین اختلال و فریب، بیش از پیش احساس می‌شود. سیستم‌های راداری مدرن قادرند با استفاده از پردازش‌های پیچیده و الگوریتم‌های هوشمند، سیگنال‌های دریافتی را تحلیل کرده و اهداف واقعی را از سیگنال‌های جعلی تفکیک نمایند. در چنین شرایطی، طراحی سیگنال‌های فریب که توانایی تغییر ویژگی‌های اصلی سیگنال نظیر فرکانس، زمان و دامنه را داشته باشند، از اهمیت بالایی برخوردار است.

می‌دهد که در خط دید خود یعنی گلبرگ اصلی سیگنال بازتابی را دریافت کرده است نه در گلبرگ فرعی، چرا که تقویت از طرف گلبرگ فرعی بسیار جزئی و قابل صرف‌نظر کردن است [۱]. حال اگر سیستم اخلاص گر خودی بعد از رد شدن بیم اصلی رادار از روی خود با سیگنال قوی تولیدی توسط DRFM، رادار دشمن را از سمت گلبرگ فرعی نشانه رود چه اتفاقی خواهد افتاد؟ رادار فرض را بر این می‌گذارد که این سیگنال قوی از سمت بیم اصلی وارد شده است و هدف را در خط دید خود آشکار می‌کند. یک رادار معمولی اساساً قادر به تشخیص ورود سیگنال از گلبرگ فرعی نخواهد بود؛ پس با کوچک‌تر کردن و از بین بردن گلبرگ فرعی در آنتن رادار می‌توان مزایای زیر را به رادار اضافه نمود:

- ۱- از اتلاف توان جلوگیری می‌شود.
 - ۲- شانس یک موشک ضدتشنع ARM برای یافتن رادار کم می‌شود زیرا فقط باید یک بیم باریک مثلاً دو درجه‌ای را پیدا کند و موقعیت رادار را تشخیص دهد نه آنکه به علت وجود گلبرگ فرعی از هر جهت دلخواه موقعیت رادار را استخراج کند.
 - ۳- سیگنال فریب زاویه توسط رادار دریافت نخواهد شد.
 - ۴- سیگنال اخلاص از مسیری امن و خارج از خط دید بیم اصلی نمی‌تواند وارد رادار شود.
- با استفاده از روش‌های زیر می‌توان گلبرگ فرعی آنتن رادار را حذف نمود.

- ۱- استفاده از حذف‌کننده گلبرگ فرعی (SLC^1).
- ۲- بکارگیری آنتن‌های چندآرایه‌ای (به جای آنتن تک جهته) جهت تشخیص دقیق جهت ورود سیگنال به رادار.
- ۳- تلاش هرچه بیشتر برای طراحی آنتن دقیق و بدون گلبرگ فرعی [۱].

در این تحقیق، برای افزایش کارایی اخلاص گر در فریب رادار دشمن، از چندین سیگنال جعلی استفاده شده است [۲]. با افزایش ارسال چندین هدف جعلی از سمت اخلاص گر به سمت رادار، هواپیمای خودی به راحتی می‌تواند خود را در بین اهداف جعلی پنهان نموده و در نتیجه از دید رادار دشمن محو شود اما نکته‌ای که در اینجا مطرح است این است که تا چه اندازه می‌توان تعداد اهداف جعلی را افزایش داد؟ زیرا با افزایش تعداد اهداف

² Peak to Average Power Ratio

¹ Side Lobe Canceler

۲- اختلال فریبنده با شیفت فرکانسی در رادارهای

LFM

برای بررسی اختلال‌گری فریبنده با شیفت فرکانسی در رادارهای فشرده‌سازی پالس مدوله‌شده با فرکانس خطی، می‌توان از سه نوع سیگنال اختلال‌گر بهره برد [۴]:

- ۱- اختلال‌گری تک هدف جعلی.
- ۲- اختلال‌گری چند هدف جعلی.
- ۳- اختلال‌گری پوششی چندگانه.

تکنولوژی فشرده‌سازی پالس به‌طور وسیعی در رادارهای مدرن امروزی مورد استفاده قرار گرفته است. در این نوع سیگنال‌ها، عرض پالس می‌تواند به چند صد یا چند هزار میکروثانیه کاهش یابد. این تکنولوژی نسبت فشرده‌سازی بالایی را تحقق می‌بخشد که می‌تواند نسبت سیگنال به نویز را افزایش دهد و تقریباً به‌طور هم‌زمان اختلال را محدود کند. بنابراین، ایجاد اختلال در رادارهای فشرده‌سازی پالس دشوار است. روش‌های اصلی برای ایجاد اختلال در رادارهای LFM شامل اختلال‌گری با پوشش نویز، اختلال‌گری فریبنده بر اساس فاصله و اختلال‌گری فریبنده بر اساس سرعت هستند. این نوع اختلال‌گری‌ها عمدتاً مبتنی بر حافظه فرکانس رادیویی دیجیتال (DRFM) می‌باشند. با پیشرفت تکنولوژی DRFM، روش‌های اختلال‌گری مبتنی بر DRFM به‌طور فزاینده‌ای متنوع شده‌اند؛ مانند اختلال‌گری با تأخیر زمانی و اختلال‌گری با هدف‌های جعلی چندگانه بر اساس فاصله-دایر، و اختلال‌گری ترکیبی.

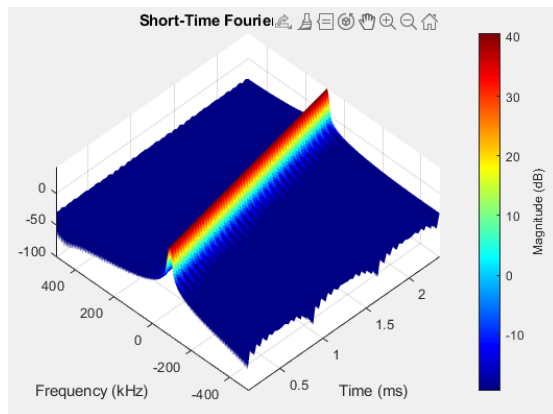
سیگنال‌های LFM رادار که توسط سیستم اختلال‌گر فریبنده دریافت می‌گردند، پس از اینکه توسط سیستم DRFM موجود در اختلال‌گر، شیفت فرکانسی و شیفت زمانی مناسب به آنها اعمال گردید، به سمت رادار دشمن باز فرستاده می‌شوند. با توجه به اینکه سیگنال فریبنده دریافت شده توسط رادار، از جنس خود سیگنال رادار می‌باشد لذا این سیگنال از داخل فیلتر منطبق^۱ رادار عبور نموده و هیچ‌گونه ممانعتی جهت عبور آن به وجود نخواهد آمد [۱].

۳- خروجی برگشتی هدف پس از فیلتر تطبیقی

سیگنال فرستنده رادار LFM را می‌توان با معادله (۱) توصیف نمود [۵].

$$u(t) = e^{j\pi\mu t^2} \quad |t| < \frac{T}{2} \quad (1)$$

که در رابطه (۱)، T عرض پالس و $\mu = \frac{B}{T}$ شیب مدولاسیون فرکانس و B پهنای باند سیگنال است.



شکل ۲- سیگنال LFM در حوزه فرکانس

هنگامی که $BT \gg 1$ باشد، طیف فرکانسی سیگنال فرستنده LFM به صورت رابطه (۲) خواهد بود.

$$U(f) = \frac{1}{\sqrt{\mu}} e^{-j\pi\frac{f^2}{\mu} + j\frac{\pi}{4}} \quad -\frac{B}{2} < f < \frac{B}{2} \quad (2)$$

پاسخ فیلتر تطبیقی رادارهای LFM را می‌توان به صورت معادله (۳) بیان کرد.

$$h(t) = c \cdot u(t - t_0)^* \quad (3)$$

که در رابطه (۳)، t_0 تأخیر زمانی است که قابلیت فیلتر تطبیقی را تضمین می‌کند. از رابطه (۳) پاسخ فرکانسی فیلتر منطبق به صورت رابطه (۴) بدست می‌آید.

$$H(f) = c \cdot U^*(f) e^{-j2\pi f t_0} = c \cdot e^{-j(2\pi f t_0 - \pi\frac{f^2}{\mu} + \frac{\pi}{4})} \quad -\frac{B}{2} < f < \frac{B}{2} \quad (4)$$

اگر سیگنال برگشتی از هدف را به صورت رابطه (۵) نمایش دهیم خواهیم داشت:

$$r(t) = k u(t - \frac{2R}{c}) \quad (5)$$

در رابطه (۵)، k ضریب کاهش دامنه سیگنال برگشتی از هدف و R فاصله بین رادار تا هدف و c سرعت نور است. اگر فرض کنیم $r(t) = u(t)$ ، بنابراین خروجی برگشتی هدف بعد از فیلتر منطبق از رابطه (۶) محاسبه می‌گردد.

^۱ Matched Filter

نخواهیم داشت و وقتی که $f_j < B$ باشد، خروجی بعد از فیلتر منطبق برابر خواهد بود با:

$$s_j(t) = \frac{c}{\sqrt{\mu}} (B - f_j) \cdot \text{sinc}[\pi(B - f_j)(t - t_0 + \frac{f_j}{\mu})] \cdot e^{j\pi f_j(t - t_0)} \quad (10)$$

در رابطه بالا هدف جعلی در $t = t_0 + \frac{f_j}{\mu}$ ظاهر می‌شود.

پارامترهای شبیه‌سازی بر اساس رادار واقعی به شکل زیر تنظیم شده‌اند:

۱- توان فرستنده رادار (P_r)، ۶۰ دسیبل معادل یک مگاوات.

۲- طول موج (λ)، ۰.۰۳ متر.

۳- بهره آنتن رادار (G_r)، ۴۰ دسی‌بل.

۴- عرض پالس (τ)، ۴ میکروثانیه.

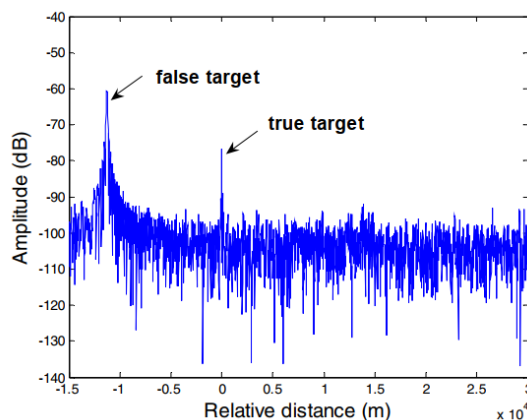
۵- نرخ تکرار پالس (PRI)، ۳ میکروثانیه.

۶- فرکانس برابر ۱ مگاهرتز.

۷- نسبت سیگنال به نویز در گیرنده رادار ۶ دسی‌بل.

۸- فرکانس اخلاص گر برابر ۴ مگاهرتز.

در سه حالت گفته شده شبیه‌سازی با شرایط بالا انجام شده است.



شکل ۳- اخلاص گر از نوع تک هدف جعلی

در شکل شماره (۳) مشاهده می‌شود که هدف جعلی حدود ۱۱/۵ کیلومتر جلوتر از هدف واقعی قرار دارد. و حداکثر توان هدف جعلی ۲۴ دسیبل قوی‌تر از هدف واقعی است.

❖ اگر اخلاص گر از نوع چند هدف جعلی^۴ باشد.

$$s_i(t) = u(t) * h(t) = \text{IFFT} \{ \text{FFT}[u(t)] \cdot \text{FFT}[h(t)] \} \quad (6)$$

بعد از حل معادله (۶) خواهیم داشت:

$$s_i(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} U(f) H(f) e^{j2\pi f t} df = \quad (7)$$

$$\frac{c}{\sqrt{\mu}} B \cdot \text{sinc}[\pi B(t - t_0)]$$

هدف در زمان مشخص t_0 ظاهر می‌شود. رابطه (۷) نشان می‌دهد که اکوی هدف پس از فیلتر منطبق به چند عامل بستگی دارد.

۱- μ : نشان دهنده این است که فرکانس با چه سرعتی تغییر می‌کند.

۲- B : پهنای باند فرکانسی که سیگنال اشغال می‌کند.

۳- t_0 : زمان تاخیر. تاخیری که به دلیل مسافت بین رادار و هدف به وجود می‌آید.

۴- دامنه فیلتر منطبق. که نشان دهنده میزان تقویت و تضعیف سیگنال توسط فیلتر منطبق است.

این جملات به این معناست که هنگام بررسی اکوی هدف پس از اعمال فیلتر تطبیقی، ویژگی‌های مربوط به مدولاسیون فرکانس، پهنای باند سیگنال، تقویت فیلتر و زمان تاخیری که سیگنال طی کرده، نقش مهمی در کیفیت و دقت اطلاعات حاصل از اکوی هدف ایفا می‌کنند [۵].

❖ اگر اخلاص گر از نوع تک هدف جعلی^۱ باشد.

در این حالت معادله سیگنال دریافت شده توسط رادار برابر خواهد بود با:

$$u_j(t) = e^{j2\pi f_j t + j\pi \mu t^2} \quad |t| < \frac{T}{2} \quad (8)$$

که f_j فرکانس اخلاص گر فریبنده است. وقتی که $f_j > 0$ باشد، سیستم اخلاص گر از نوع شیفت به جلو^۲ و اگر $f_j < 0$ باشد سیستم اخلاص گر از نوع شیفت به عقب^۳ محسوب می‌گردد. در این حالت طیف سیگنال اخلاص گر برابر خواهد بود با:

$$U_j(f) = \frac{1}{\sqrt{\mu}} e^{-j\pi \frac{(f - f_j)^2}{\mu} + j\pi \frac{t}{4}} \quad f_j - \frac{B}{2} < f < f_j + \frac{B}{2} \quad (9)$$

از رابطه (۹) مشاهده می‌شود که اگر $f_j > B$ باشد، فیلتر منطبق، خروجی نخواهد داشت و بنابراین هدف جعلی نیز

¹ Single False Target Jamming

² Forward Shifting Jamming

³ Backward Shifting Jamming

⁴ Multi False Target Jamming

می‌شود و فاصله‌های مربوطه به جلو ۱/۸۷۵ کیلومتر، ۳/۳۷۵ کیلومتر، ۴/۸۷۵ کیلومتر و ۶/۳۷۵ کیلومتر است که در شکل (۴) نشان داده شده است.

❖ اگر اخلاص گر از نوع پوششی چنگانه باشد. در این حالت پالس به چندین قسمت تقسیم می‌شود و سپس بر روی هر قسمت فرکانس مدوله شده‌ای به صورت خطی اعمال می‌شود. این فرآیند منجر به ایجاد چندین هدف جعلی می‌شود و هر هدف جعلی یک دامنه خاص را در حوزه فرکانس پوشش می‌دهد. این نوع اخلاص‌گری به دلیل پوشش دامنه‌های مختلف فرکانسی، برای مختل کردن عملکرد رادار بسیار موثرتر است [۴]. اخلاص‌گری از نوع پوششی چنگانه با استفاده از رابطه (۱۵) بیان می‌شود.

$$u_{jn}(t) = e^{j2\pi f_{j0}t + j\pi(\mu + \mu_j)t^2} \quad (15)$$

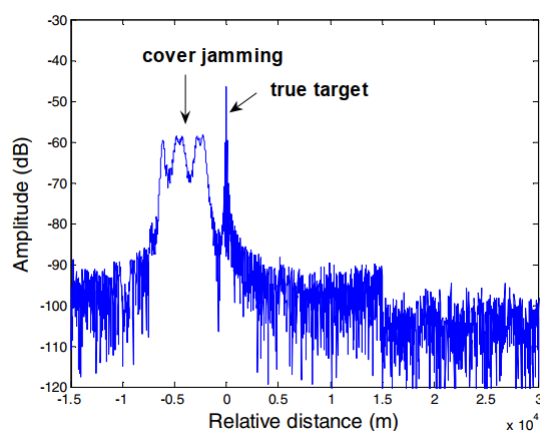
$$t \in \left(-\frac{T}{2} + \frac{n-1}{N}T, -\frac{T}{2} + \frac{n}{N}T\right)$$

در رابطه (۱۵) داریم:

$$f_{jn0} = f_{j0} + (n-1)\Delta f_j \quad n=1,2,3,\dots,N$$

در این حالت تعداد سیگنال‌های اخلاص پوششی برابر است با:

$$N_{ft} = \text{ceil}\left(\frac{B-f_{j0}}{(\mu + \mu_j) \cdot \Delta T + \Delta f_j}\right) \quad (16)$$



شکل ۵- اخلاص گر از نوع پوششی چنگانه

در شکل (۵)، پالس به ۴ قسمت تقسیم می‌شود. فرکانس اولیه مدوله شده ۰/۸ مگاهرتز و اختلاف فرکانس بین قسمت‌های مجاور ۰/۲ مگاهرتز است. شیب مدولاسیون

اخلاص گر تک هدف جعلی به راحتی توسط رادار قابل شناسایی است. اما اگر اهداف جعلی زیادی در نزدیکی هدف واقعی وجود داشته باشد، تشخیص هدف واقعی برای رادار دشوار است. برای ایجاد چندین هدف جعلی، ابتدا پالس را به چندین قسمت تقسیم می‌کنیم و سپس فرکانس‌های متفاوتی را بر روی هر قسمت مدوله می‌کنیم. فرض می‌کنیم که پالس به‌طور متوسط به N قسمت تقسیم شده است، فرکانس اولیه مدوله شده f_0 و فرکانس مدوله شده هر قسمت به شکل زیر تعریف می‌شود:

$$f_{j(n)} = f_{j0} + (n-1)\Delta f_j \quad n=1,2,3,\dots,N \quad (11)$$

که در رابطه (۱۱)، Δf_j اختلاف فرکانس مدوله شده بین دو قسمت مجاور است. سیگنال اخلاص برابر است با:

$$u_{jn}(t) = e^{j2\pi f_{jn}t + j\pi\mu t^2} \quad (12)$$

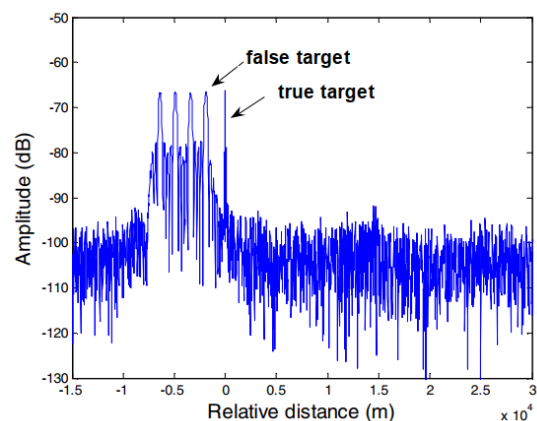
$$t \in \left(-\frac{T}{2} + \frac{n-1}{N}T, -\frac{T}{2} + \frac{n}{N}T\right)$$

در رابطه بالا سیگنال اخلاص گر تنها وقتی می‌تواند از فیلتر منطبق عبور کند فرکانس مدوله شده آن در محدوده $[f_{j0} - \frac{B}{2}, \frac{B}{2}]$ قرار داشته باشد. تعداد اهداف جعلی از رابطه (۱۳) محاسبه می‌گردد.

$$N_{ft} = \text{ceil}\left(\frac{B-f_{j0}}{\mu \cdot \Delta T + \Delta f_j}\right) \quad (13)$$

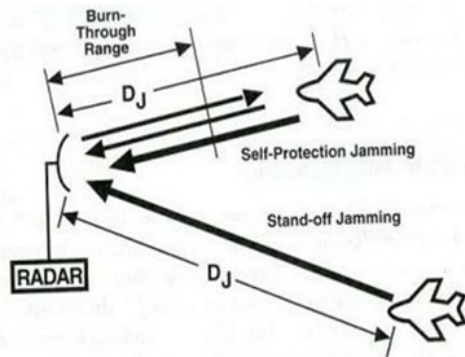
فاصله بین هدف جعلی و هدف واقعی از رابطه (۱۴) محاسبه می‌گردد.

$$\Delta R = \frac{c f_{jn}}{2\mu} \quad (14)$$



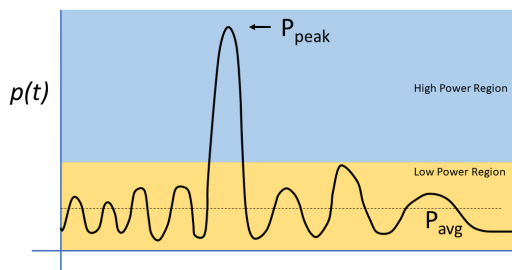
شکل ۴- اخلاص گر از نوع چند هدف جعلی

از شکل (۴) مشاهده می‌گردد که تعداد نهایی اهداف جعلی ۴ عدد بوده که بر اساس معادله (۱۳) محاسبه



شکل ۶- فاصله سوختن در اخلاص گر ها [۷]

همچنین در این تحقیق همان گونه که گفته شد، برای محاسبه حالت بهینه سیگنال اخلاص گر، مقدار PAPR نباید افزایش یابد. زیرا افزایش PAPR باعث اعوجاج و افزایش تلفات در تقویت کننده سیستم اخلاص گر خواهد شد [۲].



شکل ۷- نسبت توان حداکثر به توان متوسط (PAPR) [۷]

فاکتور PAPR از رابطه (۱۸) محاسبه می گردد.

$$PAPR = 10 * \log \frac{P_{Peak}}{P_{Avg}} \quad (18)$$

در این تحقیق از اخلاص گر چند هدف جعلی استفاده شده است و همچنین سیگنال رادار LFM در نظر گرفته شده است. بعد از گذر سیگنال اخلاص گر از فیلتر منطبق رادار شکل شماره (۸) را داریم.

خروجی فیلتر منطبق بعد از نرمالیزه شدن به شکل شماره (۹) تبدیل می شود.

فرکانس ۴ مگاهرتز بر میلی ثانیه است. شکل (۵) نشان دهنده نتیجه اخلاص گیری پوششی چندگانه است.

۴- نسبت JSR_{min}^1 به PAPR

محاسبه مقدار JSR_{min} از فاکتورهای مهم در طراحی سیگنال اخلاص گر محسوب می گردد. این عامل نشان دهنده مقدار توان سیگنال اخلاص گر به سیگنال رادار می باشد لذا کاهش مقدار JSR_{min} به این معنی است که سیستم اخلاص گر از توان کافی جهت فریب رادار دشمن برخوردار نیست. در زمان طراحی سیگنال فریب، باید به این موضوع توجه داشت که در هیچ نقطه ای نباید مقدار JSR_{min} از مقدار معینی کمتر شود.

در این تحقیق سامانه اخلاص گر از نوع خودمحافظ^۲ در نظر گرفته شده است. در سیستم های خودمحافظ مقدار JSR_{min} از رابطه (۱۷) محاسبه می گردد [۱].

$$JSR_{min}^{self\ protection} = \frac{P_j G_j}{P_r G_r} \cdot \frac{4\pi}{\sigma} \cdot R_i^2 \quad (17)$$

در رابطه (۱۷):

۱- G_j, P_j = توان فرستنده اخلاص گر و بهره آنتن اخلاص گر

۲- G_r, P_r = توان فرستنده رادار و بهره آنتن رادار

۳- σ = سطح مقطع هدف

۴- فاصله اخلاص گر تا رادار

وقتی که اخلاص گر به رادار نزدیک می شود، به نقطه ای می رسد که در آن نقطه توان اخلاص گر (J) با توان رادار (S) برابر می گردد، این نقطه، نقطه شروع فاصله سوختن^۳ نامیده می شود. در این نقطه داریم: $JSR = 0\text{ dB}$.

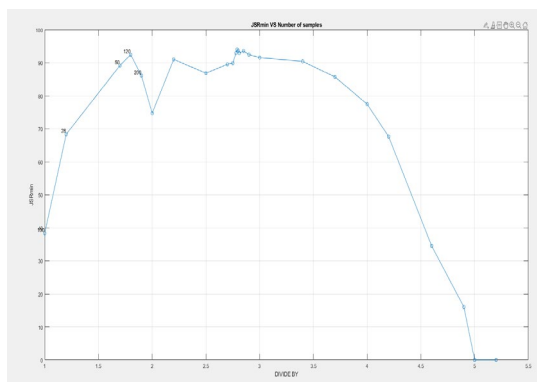
از این نقطه تا به سمت رادار هر چقدر اخلاص گر به رادار نزدیکتر شود دیگر نمی تواند رادار را تحت تاثیر قرار دهد هر چند توان خود را نیز افزایش دهد [۱].

¹ Jammer to Signal Ratio

² Self-Protection

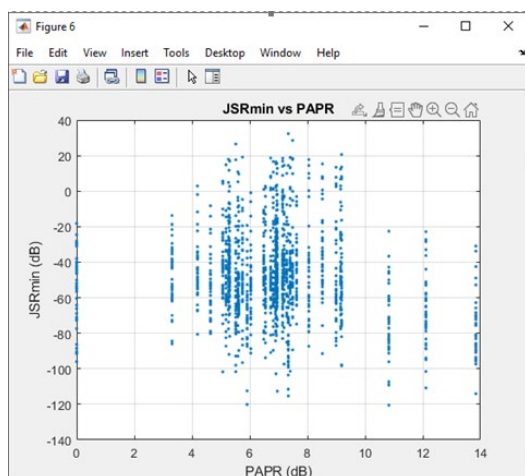
³ Burn Through

که در ابتدا یعنی در تقسیمات ۲، ۳، ۹، مقدار JSRmin افزایش می‌یابد و در تقسیمات بالاتر مقدار JSRmin شروع به کاهش می‌نماید.



شکل ۱۰- JSRmin بر حسب PAPR در نمونه‌های مختلف

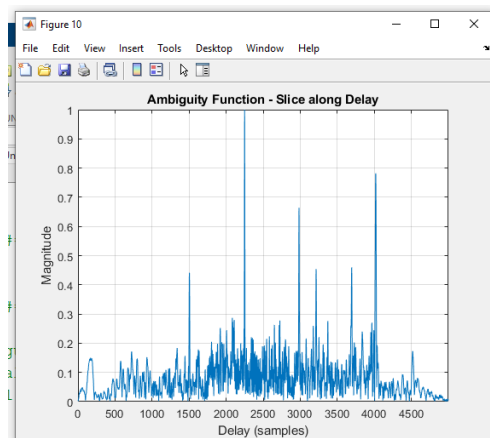
در شکل (۱۱) مقدار JSRmin نسبت به PAPR به ازای ۲۵۰۰ نمونه از سیگنال ورودی LFM رسم شده است. مقدار JSRmin در این تعداد نمونه تقریباً برابر با ۳۸/۴ دسیبل است.



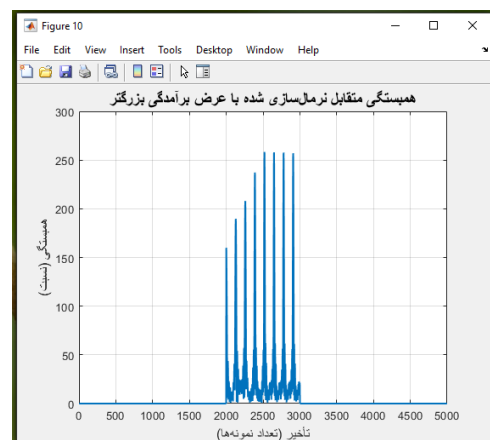
شکل ۱۱- JSRmin بر حسب PAPR در ۲۵۰۰ نمونه LFM

طبق شکل (۱۲)، با کاهش تعداد نمونه‌ها به مقدار حدود ۹۰۰ عدد، مقدار JSRmin تا حدود ۹۴ دسیبل افزایش می‌یابد.

وقتی تعداد نمونه‌ها بیشتر کاهش داده می‌شود، مقدار JSRmin نیز شروع به کاهش می‌نماید به طوری که با کاهش بیشتر تعداد نمونه‌های سیگنال ورودی، مقدار JSRmin به صفر می‌رسد. موارد ذکر شده در شکل‌های (۱۳) و (۱۴) به وضوح نشان داده شده است.



شکل ۸- خروجی فیلتر منطبق رادار



شکل ۹- خروجی فیلتر منطبق رادار نرمالیزه شده

سپس مقدار JSRmin نسبت به PAPR، در تعدادهای مختلف نمونه‌های سیگنال LFM رادار محاسبه گردید. تعداد نمونه‌ها به ترتیب برابر هستند با:

$$\begin{aligned} \frac{2500}{1} &= 2500, \frac{2500}{1.4} = 1786, \frac{2500}{1.8} = 1389, \\ \frac{2500}{2} &= 1250, \frac{2500}{2.4} = 1042, \frac{2500}{2.6} = 961, \\ \frac{2500}{2.8} &= 893, \frac{2500}{3} = 833, \frac{2500}{3.2} = 781, \\ \frac{2500}{3.5} &= 714, \frac{2500}{4} = 625, \frac{2500}{4.5} = 555. \end{aligned}$$

۵- نتایج

بعد از رسم نمودار JSRmin بر حسب PAPR با استفاده از نرم‌افزار MATLAB، در نمونه‌های ذکر شده، شکل (۱۰) حاصل شد. در این شکل مقدار JSRmin بر حسب تعداد نمونه‌های سیگنال ورودی LFM رسم شده است. با کاهش تعداد نمونه‌های سیگنال ورودی از مقدار حداکثر یعنی ۲۵۰۰ عدد تا مقادیر کمتر که از تقسیم تعداد حداکثر بر $\frac{1}{4}$ و $\frac{1}{3}$... حاصل می‌شود، مشاهده می‌گردد

و با کاهش بیشتر تعداد نمونه‌های سیگنال ورودی به حدود ۵۰۰ عدد، مقدار JSRmin باز کمتر شده و مقدار حداقل آن حدود صفر و مقدار حداکثر آن نیز تقریباً برابر صفر است.

بنابراین با کاهش تعداد نمونه‌های سیگنال LFM ورودی به نصف، مقدار JSRmin از حدود ۳۹ دسیبل به مقدار حدود ۹۷ دسیبل رسیده است یعنی حدود ۵۸ دسیبل افزایش یافته است و همچنین مقدار PAPR کاهش داشته است. با توجه به اینکه هر ۳ دسیبل افزایش به مفهوم ۲ برابر شدن است بنابراین در این روش مقدار JSRmin با توجه به محاسبات (۱۹)، حدود ۶۳۰۹۵۷ برابر افزایش داشته که این مقدار بسیار قابل توجه و مهم می‌باشد

$$97(\text{db}) = 10 * \log(\text{JSR min}_{1,9})$$

$$\text{JSR min}_{1,9} = 10^{9.7} = 5011872337$$

$$39(\text{db}) = 10 * \log(\text{JSR min}_1)$$

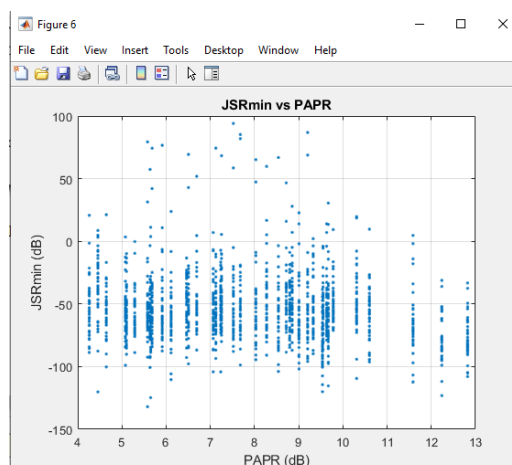
$$\text{JSR min}_1 = 10^{3.9} = 7943 \quad (19)$$

$$\frac{\text{JSR min}_{1,9}}{\text{JSR min}_1} = \frac{5011872337}{7943} = 630957$$

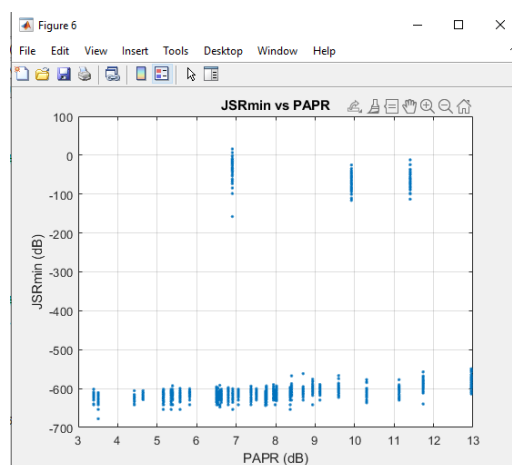
۵- نتیجه‌گیری و جمع‌بندی

در این مقاله به طراحی و پیاده‌سازی سیگنال‌های فریب راداری با هدف ایجاد اختلال در سامانه‌های راداری دشمن پرداخته شد. با توجه به پیچیدگی روزافزون الگوریتم‌های شناسایی و پردازش سیگنال در رادارهای مدرن، استفاده از تکنیک‌های مبتنی بر شیفت فرکانسی و شیفت زمانی به‌عنوان ابزارهای مؤثر در تولید سیگنال‌های فریب مورد بررسی قرار گرفت.

نتایج شبیه‌سازی‌ها نشان داد که کاهش تعداد نمونه‌های ورودی سیگنال LFM به‌طور مستقیم منجر به افزایش چشمگیر مقدار JSRmin می‌شود. به‌طور خاص، کاهش نمونه‌ها تا نصف، افزایش قابل ملاحظه‌ای معادل ۶۳۰۹۵۷ برابر در کارایی سیگنال‌های فریب ایجاد کرد. این موضوع بیانگر آن است که بهینه‌سازی تعداد نمونه‌ها می‌تواند نقش کلیدی در طراحی سیگنال‌های فریب ایفا کرده و بر توانایی سامانه‌های اخلاط‌گر در کاهش دقت شناسایی رادار دشمن تأثیر بسزایی بگذارد.

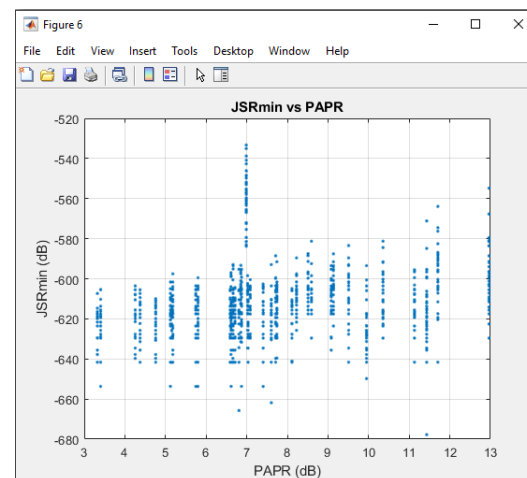


شکل ۱۲- JSRmin بر حسب PAPR در ۹۰۰ نمونه LFM



شکل ۱۳- JSRmin بر حسب PAPR در ۷۰۰ نمونه LFM

در شکل (۱۳)، مشاهده می‌گردد که با کاهش تعداد نمونه‌های سیگنال ورودی از ۲۵۰۰ عدد به حدود ۵۵۰ عدد، مقدار JSRmin به مقادیر بسیار کوچک میل می‌کند. به طوریکه کمترین مقدار JSRmin تقریباً برابر صفر و بیشترین مقدار آن برابر ۱۶ دسیبل است.



شکل ۱۴- JSRmin بر حسب PAPR در ۵۰۰ نمونه LFM

[6] Sun, J., Yuan, Y., Sabrina, M. G., Gini, F., "Coordinated Deception Jamming Power Scheduling for Multijammer Systems Against Distributed Radar Systems", *IEEE Transactions on Radar Systems*, vol. 2, pp. 1076-1088, 2024.

[۷] نوروزی یاسر، اعتضادی‌فر پوریا، غفاری کاظم، «طراحی سیگنال فریب مجموع چیرپ به منظور اخلاص فریبنده در رادار با معیار بهینه نسبت توان حداکثر به توان متوسط»، فصلنامه پژوهش‌های نوین در سامانه‌های دفاع الکترونیکی، دوره ۳، شماره ۹، ایران، تهران، دانشگاه شهید ستاری، ۱۴۰۳

[8] Zhengjie Li, Yang Yang, Ruijun Wang, Cheng Qi, Jieyu Huang; "Joint antenna scheduling and power allocation for multi-target tracking under range deception jamming in distributed MIMO radar system", *Remote Sensing*, N/A, N/A, 2024.

[9] M, Skolnik, "Introduction To Radar Systems", McGraw-Hill, ISBN: 978-0072909807, Third Party, Book, 2008.

[10] David L. Adamy, "EW 105: Space Electronic Warfare", Space Electronic Warfare, Artech House, ISBN: 978-1-63081-834-0, Book, 2021.

[11] Joseph R. Guerci, "Cognitive Radar: The Knowledge-Aided Fully Adaptive Approach", Artech House, ISBN: 978-1-63081-774-9, Book, 2020.

[12] V.N. Bringi, Kumar Vijay Mishra, Merhala Thurai, "Advances in Weather Radar", Institution of Engineering and Technology (IET), ISBN: 978-1-83953-624-3, Book, 2024.

[13] Qun Zhang, Ying Luo, Yong-an Chen, "Micro-Doppler Characteristics of Radar Targets", Elsevier, ISBN: 978-0-12-821398-8, Book, 2020.

[14] William L. Melvin, James A. Scheer, "Principles of Modern Radar: Volume 3 - Radar Applications", SciTech Publishing (IET), ISBN: 978-1-891121-54-8, Book, 2020.

[15] Fabiola Colone, Pierfrancesco Lombardo, "Passive Radar: Principles and Applications", Artech House, ISBN: 978-1-63081-650-6, Book, 2020.

[16] Thomas Willenberg, "Fighting in the Electromagnetic Spectrum: U.S. Navy and Marine Corps Electronic Warfare Aircraft, Operations, and Equipment", U.S. Naval Institute Press, ISBN: 978-1-68247-849-3, Book, 2023.

[17] Helena Calatrava, Shuo Tang, Pau Closas, "Advances in Anti-Deception Jamming Strategies for Radar Systems: A Survey", arXiv:2503.00285, 2025.

[18] Yihan Xiao, Liang Dai, Xiangzhen Yu, Yinghui Zhou, Zhongkai Zhao, "Generation of a Synthetic Aperture Radar Deception Jamming Signal Based on Deep Echo Inversion Network", IET Radar, Sonar & Navigation, DOI: 10.1049/rsn2.12345, 2023.

همچنین بررسی انواع روش‌های اخلاص - شامل تک‌هدف جعلی، چندهدف جعلی و پوششی چندگانه - نشان داد که به‌کارگیری اهداف جعلی متعدد در نزدیکی هدف واقعی می‌تواند توان رادارهای دشمن را در تشخیص صحیح اهداف به میزان چشم‌گیری کاهش دهد.

در نهایت، یافته‌های این پژوهش بر اهمیت توسعه و بهبود روش‌های تولید سیگنال‌های فریب تأکید دارد. با توجه به روند پیشرفت رادارهای هوشمند و مقاوم در برابر اخلاص، پیشنهاد می‌شود تحقیقات آینده بر روی ترکیب تکنیک‌های کلاسیک با روش‌های نوین یادگیری ماشین و هوش مصنوعی متمرکز گردد تا امکان طراحی سامانه‌های اخلاص گر تطبیقی و کارآمدتر فراهم شود.

۶- تشکر و قدردانی

از اساتید بزرگوار و گرانقدرم جناب آقای دکتر یاسر نوروزی و جناب آقای دکتر پوریا اعتضادی‌فر که وجودشان همیشه قوت قلبی برای اینجانب بوده است و بدون شک انجام این مقاله بدون کمک و راهنمایی‌های ارزنده ایشان امکان‌پذیر نبوده است، کمال تشکر و قدردانی را دارم.

مراجع

[۱] نوروزی یاسر، لطفی میثم، «جنگ الکترونیک راداری»، کتاب، تهران، انتشارات دانشگاه جامع امام حسین (ع)، ۱۳۹۶.

[۲] جمعی از نویسندگان نیروی پدافند هوایی ارتش، «مقدمه‌ای بر جنگ الکترونیک»، کتاب، معاونت جنگ الکترونیک قرارگاه پدافند هوایی خاتم الانبیا (ص) آجا، ۱۳۹۲.

[۳] کریمی بشیررضا، «کاهش نسبت توان اوج به توان متوسط (PAPR) در سامانه‌های MIMO-OFDM با استفاده از پردازش فضایی و زمانی»، وزارت علوم و تحقیقات و فن‌آوری، دانشگاه صنعتی اصفهان، دانشکده برق و کامپیوتر، ۱۳۹۳.

[4] Ye Yang, Kai Da, Yongfeng Zhu, Shengwen Xiang, Qiang Fu; "Consensus based target tracking against deception jamming in distributed radar networks", *IET Radar, Sonar & Navigation*, N/A, 683-700, 2023.

[5] Bassem R. Mahafza; *Radar Systems Analysis and Design Using MATLAB*, Fourth Edition, Chapman and Hall/CRC, 2022.

power scheduling for multi-jammer systems against distributed radar systems”, *IEEE Transactions on Radar Systems*, N/A, N/A, 2024.

[33] Zhengjie Li, Yang Yang, Ruijun Wang, Cheng Qi, Jieyu Huang; “Joint antenna scheduling and power allocation for multi-target tracking under range deception jamming in distributed MIMO radar system”, *Remote Sensing*, N/A, N/A, 2024.

[34] Yuanhang Wang, Tianxian Zhang, Lingjiang Kong, Zhijie Ma; “Strategy optimization for range gate pull-off track-deception jamming under black-box circumstance”, *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, N/A, 4262–4273, 2023.

[35] Xinhai Wang, Gong Zhang, Xiangmin Wang, Qingqing Song, Fangqing Wen; “ECCM Schemes against Deception Jamming Using OFDM Radar with Low Global PAPR”, *Sensors*, N/A, 2071, 2020.

[36] Xuegang Lan, Tao Wan, Kaili Jiang, Ying Xiong, Bin Tang; “Intelligent Recognition of Chirp Radar Deceptive Jamming Based on Multi-Pulse Information Fusion”, *Sensors*, Basel, Switzerland, 2693, 2021.

[37] Zhang Shunsheng, Chen Shuang, Chen Xiaoying, Liu Ying, Wang Wenqin; “Active Deception Jamming Recognition Method in Multimodal Radar Based on Small Samples”, *Journal of Radars*, N/A, 882–891, 2023.

[19] Feng Zhou, Xueru Qu, Tian Tian, Bo Zhao, “Deep Learning-Based Deceptive Jamming Against Spaceborne SAR with Limited Samples”, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, DOI: 10.1109/TGRS.2022.3156789, 2022.

[20] Xinhai Wang, Gong Zhang, Xiangmin Wang, Qingqing Song, Fangqing Wen; “ECCM Schemes against Deception Jamming Using OFDM Radar with Low Global PAPR”, *Sensors*, N/A, 2071, 2020.

[21] Xuegang Lan, Tao Wan, Kaili Jiang, Ying Xiong, Bin Tang; “Intelligent Recognition of Chirp Radar Deceptive Jamming Based on Multi-Pulse Information Fusion”, *Sensors*, Basel, Switzerland, 2693, 2021.

[22] Zhang Shunsheng, Chen Shuang, Chen Xiaoying, Liu Ying, Wang Wenqin; “Active Deception Jamming Recognition Method in Multimodal Radar Based on Small Samples”, *Journal of Radars*, N/A, 882–891, 2023.

[23] Mark A. Richards; *Fundamentals of Radar Signal Processing*, Third Edition, McGraw Hill, 2022.

[24] Guangfu Tang, Yifeng Cai, Rongbing Gan; *Techniques and System Design of Radar Active Jamming*, 3rd Edition, Springer, 2023.

[25] Mohammad Alae-Kerahroodi, Mojtaba Soltanalian, Prabhu Babu, M. R. Bhavani Shankar; *Signal Design for Modern Radar Systems*, First Edition, Artech House, 2022.

[26] Air Force Doctrine Publication 3-85; *ELECTROMAGNETIC SPECTRUM OPERATIONS*, 1st Edition, 14 December 2023.

[27] Helena Calatrava, Shuo Tang, Pau Closas; “Advances in Anti-Deception Jamming Strategies for Radar Systems: A Survey”, *arXiv:2503.00285*, N/A, N/A, 2025.

[28] Haowei Zhang, Weijian Liu, Qiliang Zhang, Junwei Xie; “Joint resource optimization for a distributed MIMO radar when tracking multiple targets in the presence of deception jamming”, *Signal Processing*, N/A, 108641, 2022.

[29] Shanshan Zhao, Minju Yi, Ziwei Liu; “Cooperative anti-deception jamming in a distributed multiple-radar system under registration errors”, *Sensors*, N/A, 7216, 2022.

[30] Ye Yang, Kai Da, Yongfeng Zhu, Shengwen Xiang, Qiang Fu; “Consensus based target tracking against deception jamming in distributed radar networks”, *IET Radar, Sonar & Navigation*, N/A, 683–700, 2023.

[31] Jun Sun, Ye Yuan, Maria Sabrina Greco, Fulvio Gini, Xiaobo Yang, Wei Yi; “Anti-deception jamming resource scheduling for multi-target tracking in distributed radar networks”, *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, N/A, N/A, 2024.

[32] Jun Sun, Ye Yuan, Maria Sabrina Greco, Fulvio Gini; “Coordinated deception jamming