



Increasing the anti-electronic warfare capability of multiple-input-multiple-output frequency multiplex radars by assigning random frequencies to array elements

M. Bayanvandi, M. Nejati Jahromi * 

²Assistant Professor, Shahid Sattari University of Aviation Sciences and Technology, Tehran, Iran

(Received:2022 /09/05, Revised: 2022/12/11, Accepted: 2023/01/05, Published: 2023/01/21)

DOR:<https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.23454024.1401.10.2.9.0>

Abstract

The radar design, using the FDA technique, basically resists the well-known ECM methods and increases the power of the ECCM. In this research, ECCM techniques are first discussed. The following is a history of the subject, and it is examined that what are the advantages of phased array radars and frequency arrays and the reason for going to the FDA radars is that the radar is dependent on the distance, in addition to its dependence on the angle. In order to improve the idea of using FDA radars, the FDA-MIMO radars were discussed and according to the modeling and simulation results, it was found that the level of the side lobes in FDA-MIMO method decreased (close to 20 dB) compared with the FDA method, and this advantage means that the arrival of disturbing signals from the angles of side lobes is significantly weakened. On the other hand, as a second advantage, the main beam is sharper than the FDA radar (in the FDA radar, the main beam width is about 11 degrees while in the MIMO-FDA is about 4 degrees). The main idea of this thesis is to use the frequency variation of each element in comparison to the previous element in a randomized manner in the FDA-MIMO method. The results show that the proposed method is sharper than the FDA and linear MIMO-FDA method (about 2.5 degrees), in fact, the accuracy of the resolution of the targets has increased and as a second advantage, it has a lower side lobes level (about 20dB below the linear state).

Keywords: : Radar Design, PAR, FDA, FDA-MIMO Radar, Random frequency allocation.

This article is an open-access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license.

Publisher: Imam Hussein University

 Authors



*Corresponding Author Email: m_nejati@azad.ac.ir

افزایش قابلیت ضد جنگ الکترونیک رادارهای چندگانگی فرکانس چند ورودی - چند خروجی با تخصیص فرکانس تصادفی به عناصر آرایه

میثم بیانوندی^۱ و منصور نجاتی جهرمی^{۲*}

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، ۲- استادیار، دانشگاه علوم و فنون هوایی شهید ستاری، تهران، ایران

(دریافت: ۱۴۰۱/۰۶/۱۴، بازنگری: ۱۴۰۱/۰۹/۲۰، پذیرش: ۱۴۰۱/۱۰/۱۵، انتشار: ۱۴۰۱/۱۱/۰۱)

DOR: <https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.23454024.1401.10.2.9.0>



* این مقاله یک مقاله با دسترسی آزاد است که تحت شرایط و ضوابط مجوز (CC BY) Creative Commons Attribution توزیع شده است.

نویسندگان ©

ناشر: دانشگاه جامع امام حسین (ع)

چکیده

طراحی رادار با استفاده از تکنیک FDA به صورت پایه‌ای رادار را در مقابل روش‌های شناخته شده ECM مقاوم می‌کند و توان ECCM را افزایش می‌دهد. در این پژوهش ابتدا به بیان تکنیک‌های ECCM پرداخته می‌شود. در ادامه تاریخچه‌ای از موضوع، مورد مطالعه قرار گرفته است و بررسی می‌شود که رادارهای آرایه فازی و آرایه فرکانسی دارای چه مزایایی هستند و علت رفتن به سمت رادارهای FDA این است که رادار مذکور علاوه بر وابستگی به زاویه، به فاصله نیز وابسته است. به منظور بهبود ایده استفاده از رادارهای FDA، به بیان رادارهای FDA-MIMO پرداخته شد و باتوجه به مدل‌سازی و نتایج شبیه‌سازی به دست آمده مشخص شد که سطح گلبرگ‌های جانبی در روش FDA-MIMO نسبت به روش FDA کاهش یافته (نزدیک به ۲۰ dB) و این مزیت به این معنی است که ورود سیگنال‌های مزاحم از زوایای مربوط به گلبرگ‌های جانبی تا حد قابل ملاحظه‌ای با تضعیف روبرو می‌شود، از طرفی به عنوان مزیت دوم، بیم اصلی نسبت به رادار FDA تیزتر می‌گردد (در رادار FDA پهنای بیم اصلی حدود ۱۱ درجه است در حالی که در MIMO-FDA حدود ۴ درجه). ایده اصلی این مقاله، استفاده از تغییرات فرکانس هر المان نسبت به المان قبلی به صورت تصادفی در روش FDA-MIMO است، نتایج نشان می‌دهد که روش پیشنهادی نسبت به روش FDA و MIMO-FDA خطی، دارای بیم اصلی تیزتری است (حدود ۲.۵ درجه)، در واقع دقت تفکیک اهداف افزایش یافته است و به عنوان برتری دوم، دارای سطح گلبرگ جانبی پایین‌تری است (حدود ۲۰ dB پایین‌تر از حالت خطی).

کلیدواژه‌ها: طراحی رادار، PAR، FDA، رادارهای MIMO-FDA، تخصیص تصادفی فرکانس

۱- مقدمه

غیره است. از مهم‌ترین مشخصه رادار، دقت زاویه‌ای آن است که کارایی و سطح عملکرد رادار آرایه فازی را تعیین می‌کند. در طراحی رادارهای آرایه فازی هدف اصلی رسیدن به بالاترین دقت اندازه‌گیری قابل دسترسی در کشف و ردگیری اهداف است. دقت ردگیری اهداف به دو بخش دقت ردگیری در برد و زاویه (سمت و ارتفاع) تقسیم‌بندی می‌شود که متغیرهای رسیدن به هر کدام از آنها با یکدیگر متفاوت است [۲]. رادار آرایه فازی از پیشرفته‌ترین رادارهای شناخته شده است که امکان تغییر جهت گلبرگ اصلی آنتن رادار و امکان جاروب محیط وسیعی را فراهم می‌سازد و قابلیت هدایت چندین موشک به سمت هدف را فراهم می‌کند. در کاربردهای نظامی این آنتن‌ها قادر به چرخش گلبرگ اصلی الگوی آنتن در زمان‌های بسیار کوتاه در حد چند نانو ثانیه است که امکان قفل بر روی تعداد بسیار زیادی از اهداف را فراهم می‌آورد [۳]. با پیشرفت و توسعه

هرگاه پشتیبانی الکترونیکی توسعه پیدا می‌کند، اقدامات حفاظت الکترونیکی نیز کامل‌تر می‌شود به خصوص افزایش فرکانس، مزیت‌های حفاظت الکترونیکی قابل ملاحظه‌ای برای رادار تأمین می‌نماید [۱]. طراحی و خوداتکایی در سیستم‌های راداری آرایه فازی چند عملیاتی، برای هر کشوری بسیار پراهمیت و از اهداف استراتژیک نظامی به شمار می‌رود. در عملیات، وظیفه رادار آرایه فازی مقابله و ردگیری هم‌زمان با چندین هدف پروازی است که مستلزم استخراج مشخصاتی از قبیل سرعت، مکان، نوع هدف‌ها و

محدوده) است، و بنابراین، در یک زاویه برای مجموعه‌ای از سلول‌ها دامنه ثابت است (درواقع توانایی تفکیک اهداف با زاویه یکسان و فواصل مختلف را ندارد). در نتیجه، رادار آرایه فازی نمی‌تواند به طور مؤثر اغتشاشات را سرکوب نماید. علاوه بر این، رادارهای آرایه فازی به تغییردهنده‌های فاز برای هدایت باریکه تغییر جهت گلبرگ اصلی، نیاز دارند. برای غلبه بر این معایب، یک آرایه انعطاف‌پذیر به نام رادار آرایه‌ای چندگانگی فرکانس در سال‌های اخیر پیشنهاد شده است. در رادار آرایه متغیر فرکانسی، افزایش فرکانس (آفست فرکانسی مثبت است) در هر عنصر آنتن برای ارائه قابلیت هدایت باریکه تغییر جهت گلبرگ اصلی برحسب زاویه و همچنین اندازه دامنه معرفی می‌شود. این باعث می‌شود که پرتوی آرایه‌ای، بدون نیاز به تغییردهنده‌های فاز یا هدایت مکانیکی اسکن شود. اخیراً در ایده رادار آرایه متغیر فرکانسی نشان داده شده است که این قابلیت وجود دارد تا شکل‌دهی پرتوها به دامنه وابسته شود. همچنین مشاهده می‌شود که تغییر پرتو به صورت تابعی از دامنه، زاویه و زمان است [۶].

۲- پیشینه رادار آرایه متغیر فرکانسی

در پژوهشی در سال ۲۰۱۸، با استفاده از روش نمونه‌گیری غیرمنتظره چند ورودی - چند خروجی^۳ با شکل موج غیرمتعارف پیشنهاد شده، یک روش جدید مهار فشردگی پرتوهای اصلی ارائه شده است. در این روش در مرحله اول، با توجه به تأخیر زمانی یا تفاوت دامنه، اهداف واقعی و نادرست در دامنه فرکانس فضایی تشخیص داده می‌شود. به دلیل عدم انطباق دامنه، اهداف نادرست توسط یک فیلتر دوبعدی حذف می‌گردد. در این پژوهش به طور خاص، برای به دست آوردن ماتریس کوواریانس مخرب به علاوه نویز با دقت بالا، یک روش تشخیص نمونه توضیح داده شده است [۷].

در ادامه تحقیقات، به بررسی اقدامات ضد ضدالکترونیک رادار مبتنی بر فاز برای اندازه‌گیری فشرده‌سازی توزیع شده پرداخته شده است و یک تکنیک ضد ضدالکترونیک برای جلوگیری از تخصیص چندین هدف نادرست که به طور تصادفی توسط تجهیزات جنگ الکترونیک مبتنی بر حافظه رادیویی تولید شده، ارائه می‌گردد [۸].

در نگاهی دیگر از پژوهش‌ها، به بررسی رادار آرایه متغیر فرکانسی مبتنی بر زیرآرایه برای مقابله با سیگنال‌های اقدامات ضدالکترونیک فریبنده پرداخته شده است. در سال‌های اخیر، مفهوم رادار مجهز به آرایه متغیر فرکانسی توجه زیادی را جلب کرده است؛ زیرا ممکن است از افزایش فرکانس کوچک در مقایسه با فرکانس حامل در عناصر آرایه بهره‌مند شود و بدین ترتیب فاکتور آرایه‌ای که عملکرد زاویه، زمان و دامنه‌ای که نسبت به رادار آرایه فاز معمولی برتر است مورد بررسی قرار گیرد. با این حال، تلاش‌های محدودی در

سیستم‌های راداری، سیستم‌های جنگ الکترونیک ECM^۱ نیز برای مختل کردن عملکرد رادارها به صورت همگام با آن‌ها در حال توسعه و پیشرفت هستند. هدف اصلی این سیستم‌ها کاهش کارآرایی رادار برای ممانعت از کشف، آشکارسازی موقعیت و رهگیری اهداف در صحنه نبرد است [۴]. در سال‌های اخیر رهیافت‌های جدیدی به منظور هدایت بیم آرایه^۲ آنتن، ارائه شده است. جاروب الکترونیکی بیم آنتن با فن آوری چندگانگی فرکانس یا FDA^۲ یکی از روش‌های فوق است. یک روش جاروب الکترونیکی بدون استفاده از تغییردهنده فاز، بنیان نهاده شده است که باتوجه به پیشرفت‌های جدید در پردازش سیگنال‌های دیجیتال، استفاده از گوناگونی فرکانس در تئوری آرایه‌ها جلب توجه بیشتری نموده است [۵]. طراحی رادار با استفاده از تکنیک FDA به صورت پایه‌ای و از ابتدا رادار را در مقابل روش‌های شناخته شده ECM مقاوم می‌کند و توان ECCM را افزایش می‌دهد. در این مقاله بر این اساس و مبتنی بر این نکته، طراحی‌ها و بهینه‌سازی انجام خواهد شد.

در این مقاله ابتدا به بیان رادار آرایه متغیر فرکانسی پرداخته شده و سپس پیشینه‌ای از کارهایی که تاکنون انجام شده، ارائه می‌گردد. در ادامه، ضمن معرفی روش پیشنهادی، مبانی ریاضی و شبیه‌سازی آن تشریح و همچنین مقایسه آن با رادارهای FDA، PAR، MIMO-FDA خطی مورد بررسی قرار خواهد گرفت.

۱-۱- آرایه متغیر فرکانسی

رادار آرایه متغیر فرکانسی نشان‌دهنده افزایش فرکانس در هر عنصر آنتن برای ارائه توانایی فرمان پرتوی الکترونیکی در زاویه و همچنین اندازه دامنه است. این امر باعث می‌شود که پرتوی آرایه بدون نیاز به تغییر فاز یا فرمان مکانیکی اسکن را انجام دهد. اخیراً پیشنهاد ایده رادار آرایه متغیر فرکانسی برای نشان‌دادن توانایی آن در شکل‌گیری پرتوهای وابسته به دامنه ارائه شده است. فناوری اقدامات ضد ضدالکترونیک به یکی از کارکردهای اساسی ارزیابی در سامانه‌های رادار تبدیل شده است. بدین منظور برخی از مسائل مربوط به طراحی رادار آرایه متغیر فرکانسی، مفاهیم و ویژگی‌های کلیدی را مطرح می‌کند که با آن رادار آرایه متغیر فرکانسی در برابر تمامی انواع پارازیت‌ها مصون می‌ماند. نقطه قوت رادار آرایه فازی هدایت پرتو و اثربخشی بالای الکترونیکی است. مقدار بهره و گین جهتی ارائه شده توسط رادار آرایه فازی برای شناسایی و ردیابی اهداف ضعیف و حذف اغتشاشات از سایر جهات، مفید است. با این حال، محدودیت رادار آرایه فازی این است که هدایت باریکه تغییر جهت گلبرگ اصلی (این نوع هدایت در یک الگوی پرتو که معمولاً با قطع و وصل اجزای آنتن صورت می‌گیرد) مستقل از دامنه (موقعیت یا

¹ Electronic Counter Measures

² Frequency Diverse Array

³ Multiple Input Multiple Output

ضدالکترونیکی در برابر فوری بودن مسدودکردن فعال انجام شود. تکنیک‌های ضد ضدالکترونیکی در مورد هر روش رادار مورد توجه قرار می‌گیرند. در این پژوهش، اقدامات ضد ضدالکترونیکی، تکنیک‌های طراحی سیستم، طراحی شکل موج، طراحی آنتن، پردازش سیگنال و پردازش داده‌ها انجام شده است. پیشرفت‌های اخیر الگوریتم‌های نسبی مورد بحث قرار گرفته و چندین مشکل عمده و همچنین موانع موجود در اقدامات ضد ضدالکترونیکی رادار معرفی شده است. روش‌های ارزیابی عملکرد و کمبود آن‌ها همچنین به طور خلاصه معرفی شده است. راه‌حل‌های قابل قبول برای غلبه بر این موانع مطابق با آن‌ها مطرح شده است. در نهایت، دیدگاه و کاربرد اقدامات ضد ضدالکترونیکی رادار در برابر مداخله فعال پیشنهاد شده است. نتیجه این‌که تکنیک ذکر شده دارای نتایج مؤثرتری بر سیستم رادار بوده است [۱۲].

در ادامه پژوهش‌ها، به بررسی روش اقدامات ضدالکترونیکی رادار مبتنی بر بلوک پالس متعامد و فیلد تطبیق موازی پرداخته شده است. یک طرح ضد ضدالکترونیکی برای رادار الکترونیکی در نظر گرفته شده است تا تنوع پالس را افزایش دهد. این مسئله باعث استفاده از کد بلوک پالس متعامد می‌شود. این کار با استفاده از تمام سیگنال‌های دریافت شده در عملگر فیلتر مطابق با فواصل زمانی آهسته بر اساس فیلترهای تطبیق موازی به دست می‌آید و نسبت سیگنال به نویز اهداف واقعی را بهبود می‌بخشد. این الگوریتم توسط شبیه‌سازی‌ها تأیید شده است [۱۳].

در نوع دیگری از تحقیقات، به بررسی فرکانس مختلف رادار آرایه متغیر فرکانسی پرداخته شده است. اهداف شبیه‌سازی شده را نمی‌توان به راحتی با سیستم‌های رادار سنتی به ویژه برای مهارکننده فریبنده اصلی دنبال کرد. در این کار، رادار با چندین ورودی و خروجی با آرایه متغیر فرکانسی به عنوان آرایه منتقل می‌شود و توانایی آن برای سرکوب کردن اشکال فریبنده در دامنه انتقال و دریافت مشترک بررسی شود. در رادار آرایه متغیر فرکانسی چند ورودی - چند خروجی، فرمان به هر دو محدوده و زاویه وابسته است. این بدان معنی است که با توجه به عدم هماهنگی در هر محدوده یا زاویه، می‌توان اهداف غیرمهم را نادیده گرفت. به طور خاص، حتی فرکانس اصلی فریبنده را می‌توان با رادار آرایه متغیر فرکانسی اداره کرد. اثربخشی طرح پیشنهادی در جلوگیری از مسدود شدن در سناریوهای مختلف از طریق شبیه‌سازی کامپیوتری نشان داده شده است [۱۴].

در نگاهی مبتکرانه در پژوهش [۱۵]، به بررسی عوامل مؤثر در اقدامات ضد ضدالکترونیکی پرداخته شده است. تکنیک‌های ضد ضدالکترونیکی که در برابر فریب رادار فعال استفاده می‌شود، مورد بررسی قرار گرفت. در ابتدا، روش‌ها بر اساس تهدید اقدامات

مورد موضوع فرکانسی در سناریوهای مقابله با اقدامات ضدالکترونیکی، به ویژه در حضور مهیج فریبنده اصلی منتشر شده است. فرکانس پایه‌ای برای برنامه‌های ضد مداخله مطلوب نیست. این مسئله به دلیل واکنش زاویه‌ای اهداف است. در این پژوهش، یک روش جدید مبتنی بر فرآیند پردازش سیگنال فرکانسی زیرزمینی پیشنهاد شده است تا از سیگنال‌های ضدالکترونیکی به صورت فریبکارانه و غلط‌انداز جلوگیری کند. رادار آرایه متغیر فرکانسی به چندین زیرآرایه تقسیم می‌شود که هر کدام از آن‌ها یک فرکانس متمایز را افزایش می‌دهد. ارزیابی عملکرد نشان می‌دهد که راه‌حل پیشنهادی برای سرکوب اقدامات ضدالکترونیکی مؤثر است. اثربخشی با نتایج شبیه‌سازی تأیید شده است [۹].

بنا بر تحقیقات انجام شده در همین حوزه در سال‌های اخیر، به بررسی فرکانس موج‌های مختلف رادار پرداخته شده است. شکل موج رادار فرکانس مختلف در پژوهش و عملیات رادار بسیار جذاب است. با ترکیب دو شکل معمول، آرایه متغیر فرکانسی و قطار پالس مرحله‌ای، یک مدل شکل موج کلی پیشنهاد می‌شود که فرکانس تصادفی چند ورودی - چند خروجی در صفحه رادار را پشتیبانی می‌کند. مدل جدید را می‌توان با شکل‌های خاص «فرکانس مختلف» با اقتباس از پارامترها اعمال کرد. علاوه بر این، با بررسی ویژگی‌های ماتریس کوواریانس، یک رویکرد برای ارزیابی موقعیت مطلوب رادار فرکانس رادیویی ارائه می‌شود که می‌تواند به عنوان یک معیار کم برای پتانسیل مهار فشرده‌گی شکل موج به کار گرفته شود. شبیه‌سازی عددی اثربخشی روش پیش‌بینی را نشان می‌دهد و نتایج مفید برای مقایسه عملکرد سرکوب اختلافی شکل‌های مختلفی را عرضه می‌کند [۱۰].

در پژوهشی دیگر، به بررسی آزمایش داده‌های زنده از مقادیر (اقدامات ضد ضدالکترونیکی) در یک رادار نمونه چندمنظوره پرداخته شده است. مراحل ریسک کاهش عموماً بخشی از توسعه رادارهای جدید یا به‌روزرسانی رادارهای موجود می‌باشد. این مراحل اغلب شامل مبارزات اعتبارسنجی برای آزمایش داده‌های زنده الگوریتم‌ها و معماری‌هایی است که برای طراحی جدید به وجود آمده‌اند. این پژوهش مربوط به کمپین اعتبارسنجی انجام شده در دهه ۱۹۹۰ میلادی برای تجهیز رادارهای آرایه فازی با عملکرد جدید است که قادر به تضمین عملکرد کامل سنسور در حضور اختلال غیرعمدی می‌باشد [۱۱].

در راستای تکمیل تحقیقات به عمل آمده، در مقاله‌ای به بررسی پیشرفت‌ها و دیدگاه‌ها در خصوص تکنیک‌های ضد ضدالکترونیکی رادار از راه متوقف کردن فعال پرداخته شده است. ردیابی فعال رادار، یک چالش بزرگ برای تشخیص، ردیابی و شناسایی هدف رادار است. این مسئله باعث می‌شود تا اندازه‌گیری‌های اقدامات ضد

ضدالکترونیکی به دودسته تقسیم می‌شوند:

اول، تکنیک‌هایی که برای مقابله با اهداف و تکنیک‌های دروغین محدوده مورد استفاده قرار می‌گیرند.

دوم، جوانب مثبت و منفی این برنامه‌ها باتوجه به دیدگاه‌های مختلف مورد توجه و مقایسه قرار گرفتند. عملکرد این طرح‌ها تجزیه و تحلیل شده و مسیرهای جدیدی را بر اساس تجزیه و تحلیل از کار موجود می‌گشاید. نتیجه بدین صورت بوده است که این پژوهش توانست به طور گسترده‌ای در درک مفاهیم پایه رفاه ضدالکترونیکی برای مقابله با اشکال فریب فعال، موفق باشد.

۳- مدل سازی ریاضی رادار FDA و MIMO-FDA

در بخش اول به بیان روابط ریاضی مربوط به مقالات [۱۶] و [۱۷] (که در واقع به بررسی رادار آرایه فازی و در نهایت ایده مدنظر یعنی رادار FDA) پرداخته است و در بخش دوم روابط مقالات [۱۸] و [۱۹] را مطرح کرده، که روشی در جهت بهینه‌سازی ایده‌ی مقاله‌ی [۱۶] می‌باشد و در نهایت با تغییراتی در روابط و طراحی مرجع [۱۹]، ایده این پژوهش ارائه می‌گردد.

۳-۱- ساختار رادار آرایه متغیر فرکانسی

در این بخش به تشریح روابط ذکر شده در مقالات [۱۶] و [۱۷] می‌پردازیم که در واقع مبنای اصلی این پژوهش روابط ریاضی گفته شده در این مراجع می‌باشند. آنتن آرایه‌ای با گوناگونی فرکانسی، یک مفهوم تازه و جدید از جاروب الکترونیکی است. عناصر یک آرایه مطابق شکل (۱) می‌توانند با شکل موج‌های مشابه یا مختلف تحریک شوند. در این طراحی، برای سادگی شکل موج‌ها یکسان فرض خواهد شد. مهم‌ترین تفاوت آرایه متغیر فرکانسی با سایر آرایه‌ها این است که مقدار اندک افزایش فرکانس نسبت به فرکانس حامل در طول عناصر آرایه به جای اختلاف فاز به کار می‌رود. استفاده از افزایش و نمو فرکانس در طول آرایه، الگوی تشعشعی میدان دوری تولید می‌نماید که تابعی از فاصله، زمان و زاویه است. وابستگی به فاصله الگوی تشعشعی بسیار مهم است زیرا می‌توان در فواصل مختلف، حداکثر یا حداقل دامنه الگوی تشعشعی داشت و این مسئله منجر به کشف چند هدف به طور هم‌زمان در فواصل مختلف می‌شود، گرچه وابستگی به فاصله ممکن است باعث مشکلات افزایش حجم محاسبات گردد. اما ضریب آرایه در آنتن آرایه‌ای معمولی با N عنصر تشعشعی مطابق رابطه ذیل قابل حصول است.

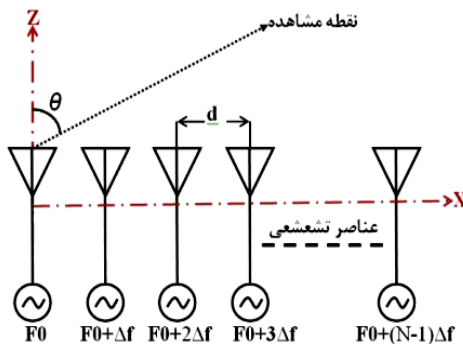
$$AF = \frac{\sin(N\Psi)}{\sin(\frac{\Psi}{N})} \Psi = \frac{\gamma\pi}{\lambda} ds \quad (1)$$

در رابطه بالا Ψ اختلاف فاز هر عنصر نسبت به عنصر قبلی ناشی از اختلاف مسیر عناصر تا نقطه مشاهده، θ زاویه بین بردار فاصله با

محور تراز آنتن و d فاصله بین عناصر است. اگر شکل موج تشعشع شده از هر عنصر آرایه مشابه باشد، افزایش فرکانس به میزان Δf (همان آفست فرکانسی است) هرگز در طول عناصر به کار می‌رود. اختلاف فاز ناشی از طول مسیر بین دو عنصر متوالی از رابطه (۱) به دست می‌آید. در این حالت می‌توان ثابت نمود در چنین آرایه‌ای $\Delta\Psi = kd\sin\theta_\alpha$ ، جهت حداکثر گلبرگ اصلی در راستای زاویه ظاهری θ_α است [۲۰].

$$\theta_\alpha = \arcsin\left\{\frac{f_c \sin(\theta)}{f} - \frac{\Delta f \sin\theta}{f} + \frac{\Delta f R_c}{fd}\right\} \quad (2)$$

مطابق رابطه (۲) در آرایه متغیر فرکانسی جهت پرتوی اصلی تابعی متناوب از فاصله، زمان و زاویه است.



شکل (۱). چیدمان عناصر در آرایه با چندگانگی فرکانس [۱۶]

شکل (۱)، چیدمان عناصر در آرایه با چندگانگی فرکانس که فرکانس هر عنصر به اندازه نسبت به عنصر مقابل افزایش یافته است. رادار آرایه متغیر فرکانسی به تازگی به دلیل ویژگی منحصر به فرد الگوی پرتوی وابسته به زاویه- دامنه آن، در مقایسه با الگوی پرتوی وابسته به زاویه رادارهای آرایه فازی، توجه بیشتری را در میان مهندسان رادار به خود جلب نموده‌اند. کار پیشگام آنتونیک و همکاران در مراجعی چون [۲۴] در این زمینه، یک تحقیق چالش‌انگیز را باز کرد. از آن به بعد، چندین پژوهش بر مبنای معیارها و پیشنهاد‌های مختلف طراحی شده و مورد ارزیابی قرار گرفته است. شکل (۱) یک آرایه خطی یک‌نواخت^۱ را نشان می‌دهد. هر عنصر از آرایه متغیر فرکانسی یک فرکانس حامل افزایشی را منتشر می‌کند. بنابراین، سیگنال تک‌رنگ (تکفام) که توسط m امین عنصر منتقل می‌شود که به صورت مرجع [۲۱] بیان می‌شود و به شرح رابطه زیر است:

$$S_m(t) = \exp(-j2\pi f_m t) \quad (3)$$

که در آن فرکانس تشعشعی f_m به صورت رابطه زیر است:

^۱ ULA

در این مورد، رابطه (۸) را می توان به فرم بسته به صورت رابطه زیر بازنویسی کرد:

(۱۰)

$$AF(t; R, \theta) \approx \exp\{j\Phi_1\} \sum_{m=0}^{M-1} \exp\left\{-j2\pi\left(m\Delta ft - m\frac{\Delta fR}{c_0} + m\frac{df_0 \sin \theta}{c_0} + m\frac{\Delta fd \sin \theta}{c_0}\right)\right\}$$

$$= \exp\{j\Phi_0\} \frac{\sin\left[M\pi\left(\Delta ft \frac{\Delta fR}{c_0} + \frac{df_0 \sin \theta}{c_0} + \frac{\Delta fd \sin \theta}{c_0}\right)\right]}{\sin\left[\pi\left(\Delta ft - \frac{\Delta fR}{c_0} + \frac{df_0 \sin \theta}{c_0} + \frac{\Delta fd \sin \theta}{c_0}\right)\right]}$$

که در آن Φ_1 به صورت رابطه زیر است:

(۱۱)

$$\Phi_1 = \Phi_0 + \pi(M-1)\frac{\Delta fR}{c_0} - \pi(M-1)\frac{f_0 d \sin \theta}{c_0} - \pi(M-1)\frac{\Delta fd \sin \theta}{c_0}$$

بر طبق الگوی پرتوی انتقال مشتق شده از مرجع [۲۲] مشخصه های زیر مهم هستند:

- اگر میزان نمو فرکانسی Δf ثابت باشد (میزان تغییرات نمو فرکانسی صفر نباشد یعنی $\Delta f = 350$)، الگوی پرتو در رادار آرایه متغیر فرکانسی، بهره پیک وابسته به دامنه- زاویه آن را نشان می دهد.

- اگر در آرایه متغیر فرکانسی، افزایش نمو فرکانسی صورت نگیرد (یعنی، $\Delta f = 0$)، آرایه خطی از رادار آرایه متغیر فرکانسی نسبت به رادار آرایه فازی، به صورت یکنواخت کاهش می یابد.

در بخش شبیه سازی، نتایج حاصل از این قسمت ارائه می گردد و در نهایت مقایسه ای از رادارهای آرایه فازی با رادارهای آرایه ای فرکانس متغیر بیان می گردد.

۳-۲- مدل سازی رادار MIMO-FDA

در این بخش به تشریح روابط برگرفته شده از مقالات [۱۸] و [۱۹] پرداخته که از آن ها به عنوان یک روش به منظور بهینه سازی نتایج حاصل از مقالات [۱۶] و [۱۷] استفاده می نماییم و در نهایت به بررسی ایده پیشنهادی که به نحوی برگرفته از مقاله [۱۹] و تکمیل کننده آن می باشد، خواهیم پرداخت. لازم به ذکر است نتایج حاصل از این شبیه سازی ها در بخش نتایج ارائه می گردد.

تکنیک جدید ارائه شده در [۱۸] که به رادارهای MIMO-

$$f_m = f_c + m\Delta f, \quad m=0, 1, \dots, M-1 \quad (۴)$$

که در آن f_c فرکانس حامل (همچنین فرکانس تشعشی از اولین عنصر)، Δf افزایش فرکانس و M تعداد عناصر آرایه است. سیگنال در هدف میدان دور (برد طولانی) مورد نظر (R, θ) حاصل می شود (R) و θ به ترتیب نشان دهنده شیب دامنه و زاویه آزیموت از عنصر اول هستند) و می تواند به صورت رابطه زیر بیان شود:

$$s_m(t - \frac{R_m}{c}) = \exp\{-j2\pi f_m(t - \frac{R_m}{c})\} \quad (۵)$$

که در آن c_0 نشان دهنده سرعت نور است. فاصله بین عنصر m و هدف به صورت رابطه زیر است:

$$R_m = R - m d \sin \theta, \quad m=0, 1, \dots, M-1 \quad (۶)$$

d فاصله بین عناصر است.

یکنواختی فاصله آرایه به صورت تابعی از حداکثر فرکانس ارسال است، و به همین ترتیب d به صورت رابطه زیر است:

$$d = \frac{1}{\sqrt{f_c + (M-1)\Delta f}} \quad (۷)$$

از آنجاکه رابطه $f_0 \gg \Delta f$ نمو فرکانسی و f_c فرکانس حامل است)، این رابطه به این معنی است که میزان فرکانس حامل حداقل به اندازه ۱۰۰ برابر بیشتر از نمو فرکانسی است. در نتیجه در روابط می توان از مقدار Δf در مقابل فرکانس حامل صرف نظر نمود و فقط f_c را در روابط جایگزین نمود، مثلاً $\Delta f = 0$ و $f_0 = 1\text{GHz}$ برقرار است، اگر همه اوزان دامنه برابر با یک باشند، ضریب آرایه در موقعیت هدف $AF(t; R, \theta)$ دیده می شود که می تواند به صورت مرجع [۱۷] بیان شود:

(۸)

$$AF(t; R, \theta) = \sum_{m=0}^{M-1} \exp\left\{-j2\pi f_m\left(t - \frac{R_m}{c_0}\right)\right\}$$

$$= \exp\{j\Phi_0\} \sum_{m=0}^{M-1} \exp\left\{-j2\pi\left(m\Delta ft - m\frac{\Delta fR}{c_0} + m\frac{df_0 \sin \theta}{c_0} + m^2\frac{\Delta fd \sin \theta}{c_0}\right)\right\}$$

که در آن عبارت فاز Φ_0 به شکل زیر است:

$$\Phi_0 = -2\pi f_c \left(t - \frac{R}{c}\right) \quad (۹)$$

هنگامی که رابطه $(M-1)\Delta f \gg f_c$ برقرار باشد، عبارت فاز

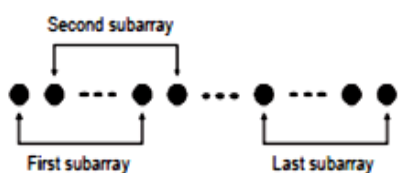
$$\frac{m^2 \Delta fd \sin \theta}{c_0}$$

را می توان به مقدار $m \frac{\Delta fd \sin \theta}{c_0}$ تخمین زد.

تداخل^۸ در راستای غیر از بیم اصلی.

- افزایش نسبت سیگنال به نویز در مقایسه با دو مدل قبلی.
- امکان استفاده از سیگنال‌هایی با توان کمتر در هر آرایه باتوجه به استفاده از روش سیگنال‌های جمع‌شونده.

شکل (۲) نحوه تخصیص هر زیر آرایه را در هر آرایه نشان می‌دهد. هر آرایه از M آنتن تشکیل شده است که به K زیر آرایه تقسیم می‌شود. تعداد آنتن‌های هر زیر آرایه $M-K+1$ در نظر گرفته شده است. این تعداد و این نحوه تخصیص می‌تواند به خودی خود به عنوان یک پارامتر در بهینه‌سازی تشکیل بیم^۹ در کارهای آینده استفاده شود.



شکل (۲). نحوه تخصیص آنتن‌ها برای هر زیر آرایه در هر آرایه [۱۸].

در [۱۹] دقیقاً مشابه [۱۸] به تشکیل شکل بیم از ترکیب دو روش آرایه فازی و مایمو پرداخته و به‌عنوان ایده جدیدتر از دایورسیتی فرکانسی برای ایجاد تعامد بین سیگنال‌های هر زیر آرایه استفاده کرده است. در نتیجه با استفاده از این تکنیک موفق به طراحی پترن وابسته به فرکانس و برد شده‌اند.

در [۱۹] سه تکنیک برای تشکیل بیم معرفی شده است:

(۱) تکنیک آرایه فازی - مایمو (Phased-MIMO).

(۲) تکنیک مایمو - آرایه‌ای فرکانس متغیر (FDA-MIMO).

(۳) تکنیک آرایه‌ای فرکانس متغیر (FDA).

با فرض این که آرایه موردنظر دارای M آنتن باشد که به K زیر آرایه تقسیم شده است و هر زیر آرایه دارای $M-K+1$ آنتن است. برای زیر آرایه k ام سیگنال پایه ϕ_k در نظر گرفته شده است. همچنین برای هر زیر آرایه یک بردار وزنی W_k در نظر می‌گیریم تا اثر جمع شونده موردنظر به این ساختار اضافه شود. در نتیجه سیگنال ارسالی برای هر زیر آرایه از رابطه (۱۲) بدست می‌آید.

$$s_k(t) = \sqrt{\frac{M}{K}} \phi_k(t) W_k^* \quad (12)$$

$$k = 1, \dots, K$$

Phased array معروف است، ترکیبی از رادار^۱ MIMO با آنتن‌های نزدیک به هم و رادار آرایه فازی^۲ است که تمام مزایای رادارهای MIMO را دارا می‌باشد بدون این که خواص رادارهای آرایه فازی نادیده گرفته شود.

در رادارهای آرایه فازی از سیگنال‌هایی با اثرگذاری مثبت بر هم^۳ به‌منظور کنترل و ایجاد پترن و بیم موردنظر در راستای دلخواه استفاده می‌شود. در روابط مربوط به این نوع رادار از بردار وزنی^۴ در سیگنال پایه استفاده می‌شود.

در رادارهای MIMO از آنتن‌های چندگانه با سیگنال‌های متعامد^۵ در فرستنده و همچنین از آنتن‌های چندگانه در گیرنده استفاده می‌شود.

استفاده از روش MIMO، رزولوشن زاویه‌ای را افزایش می‌دهد و همچنین حداکثر تعداد هدف‌های قابل رویت در این روش از روش آرایه فازی بیشتر است. علاوه بر این روش درجه آزادی در طراحی بیم دلخواه بیشتر از رادار آرایه فازی است.

در مقابل مزیت رادارهای آرایه فازی نسبت به رادارهای MIMO، استفاده از سیگنال‌های با اثرگذاری جمع‌شونده است که در نتیجه به کار این امکان را می‌دهد تا بتوانیم از فرستنده‌های با توان کمتر استفاده کنیم.

باتوجه به مزایا و معایب اشاره شده در بالا تکنیک MIMO-Phased array پیشنهاد می‌شود که نقاط ضعف هر دو روش را پوشش دهد. در این روش هر آرایه به مجموعه از زیر آرایه‌ها^۶ تقسیم می‌شود (می‌توانند هم‌پوشانی داشته باشند) که هر کدام دارای سیگنال‌های متعامد (به ارث برده از رادارهای MIMO) هستند و همچنین از بردار وزنی در طراحی سیگنال پایه ارسالی به‌منظور استفاده از سیگنال‌های جمع‌شونده (به ارث برده از آنتن آرایه فازی) استفاده شده است. مزایای اشاره شده برای این روش نسبت به دو روش قبلی عبارت‌اند از:

- تمامی امتیازات رادارهای مایمو، از جمله افزایش رزولوشن زاویه‌ای، افزایش حداکثر تعداد اهداف قابل رویت و ...
- افزایش درجه آزادی در طراحی بیم دلخواه با افزایش تعداد متغیرهای درگیر در روند طراحی.
- کاهش سطح سایدلوب‌ها^۷ و در نتیجه کاهش احتمال

¹ Multiple input multiple output

² Phased array radar

³ Coherent signals

⁴ Weight vector

⁵ Orthogonal

⁶ Sub-arrays

⁷ Sidelobes level

⁸ Interference

⁹ Beamforming

$$G(\theta) \triangleq \frac{|w_d^H u(\theta)|^2}{|w_d^H u(\theta_s)|^2} = \frac{|u^H(\theta_s)u(\theta)|^2}{\|u(\theta_s)\|^4} \quad (21)$$

- در واقع پترن ارسالی^۲ بیانگر پترن مجموعه آنتن‌های هر زیر آرایه است؛ بنابراین از قبل می‌توان حدس زد که این گین پترن برای رادار مایمو برابر با ۱ است چرا که هر زیر آرایه فقط شامل یک آنتن می‌شود. (برای محاسبه پترن دریافتی دقیقاً از همین روش استفاده می‌شود).
- شکل موج دایورسیتی^۳ بیانگر پترن مربوط به مجموعه زیر آرایه‌ها با هم است. در اینجا هم می‌توان حدس زد که گین این پترن برای رادار آرایه برابر با یک است چرا که این نوع رادار فقط از یک زیر آرایه تشکیل شده است.
- در انتها پترن کلی حاصل از مجموع پترن‌های ارسالی، دریافتی و دایورسیتی است که در رابطه (۲۲) قابل ملاحظه است.

$$G_K(\theta) = C_K(\theta) \cdot D_K(\theta) \cdot R(\theta) \quad (22)$$

در رابطه فوق C بیانگر پترن ارسالی، D بیانگر پترن دایورسیتی و R بیانگر پترن دریافتی است. حال با فرض متغیر بودن فرکانس برای هر المان روابط به صورت زیر تغییر می‌کند:

(23)

$$G(\theta) \triangleq \frac{|w_R^H u(\theta, r)|^2}{|w_R^H u(\theta_0, r_0)|^2} = \frac{|u^H(\theta_0, r_0)u(\theta, r)|^2}{\|u(\theta_0, r_0)\|^2} \\ = \frac{|a_K^H(\theta_0)a_K(\theta)|^2 |d^H(\theta_0, r_0)d(\theta, r)|^2 |b^H(\theta_0)b(\theta)|^2}{\|a_K(\theta_0)\|^4 \|d(\theta_0, r_0)\|^4 \|b(\theta_0)\|^4}$$

همان‌طور که ملاحظه می‌شود در رابطه فوق پترن دایورسیتی به فاصله وابسته می‌شود. با ساده‌سازی روابط معادله مربوط به پترن به شکل زیر محاسبه می‌شود:

(24)

$$y(\theta, r) = \sum_{m=1}^M e^{j(-2\pi f_0(m-1)L \sin\theta/c_0 - 2\pi(m-1)^2 \Delta f L \sin\theta/c_0 + 2\pi r(m-1)\Delta f/c_0)} \\ \approx \sum_{m=0}^{M-1} e^{j2m(-\pi f_0 L \sin\theta/c_0 + \pi r \Delta f/c_0)} \\ = \frac{e^{jM(-\pi f_0 L \sin\theta/c_0 + \pi r \Delta f/c_0)} \sin[M(-\pi f_0 L \sin\theta/c_0) + (\pi r \Delta f/c_0)]}{e^{j(-\pi f_0 L \sin\theta/c_0 + \pi r \Delta f/c_0)} \sin[(-\pi f_0 L \sin\theta/c_0) + (\pi r \Delta f/c_0)]}$$

برای شبیه‌سازی این بخش ما یک آرایه با ۱۰۰ المان در نظر گرفتیم، سیگنالی با فرکانس برابر 1GHz و تغییر فرکانس 350Hz و فاصله بین المان‌ها نصف طول موج در نظر گرفته شده است. نتایج حاصل از این شبیه‌سازی در بخش (نتایج و بحث) ارائه می‌گردد و ماهیت این روش (FDA-MIMO خطی) با روش FDA خطی که در

سیگنال بازتاب شده از یک هدف در زاویه θ در فاصله دور می‌تواند با رابطه (۱۳) مدل شود.

$$r(t, \theta) \triangleq \sqrt{\frac{M}{K}} \beta(\theta) \sum_{k=1}^K w_k^H a_k(\theta) e^{-jT_k(\theta)} \phi_k(t) \quad (13)$$

در رابطه فوق $\beta(\theta)$ ضریب بازتاب هدف، $a_k(\theta)$ بردار هدایتگر^۱ زیر آرایه k ام و $T_k(\theta)$ تأخیر زمانی مربوط به اولین المان اولین زیر آرایه تا اولین المان k امین زیر آرایه است. با تعریف دو بردار زیر در روابط (۱۴) و (۱۵) سیگنال بازتابیده شده از رابطه (۱۶) محاسبه می‌شود.

$$c(\theta) \triangleq [w_1^H a_1(\theta), \dots, w_K^H a_K(\theta)]^T \quad (14)$$

$$d(\theta) \triangleq [e^{-jT_1(\theta)}, \dots, e^{-jT_K(\theta)}]^T \quad (15)$$

$$r(t, \theta) = \sqrt{\frac{M}{K}} \beta(\theta) (c(\theta) \odot d(\theta))^T \phi_K(t) \quad (16)$$

حال فرض کنید که هدف موردعلاقه ما توسط D شی ناخواسته با ضریب بازتاب $\{\beta_i\}$ و $\{i = 1:D\}$ احاطه شده است. در این حالت سیگنال دریافتی توسط رابطه (۱۷) مدل می‌شود.

$$X(t) = r(t, \theta_s) b(\theta_s) + \sum_{i=1}^D r(t, \theta_i) b(\theta_i) + n(t) \quad (17)$$

در رابطه فوق $b(\theta)$ بیانگر بردار هدایتگر برای آرایه گیرنده و $n(t)$ بیانگر نویز است. با گذراندن هر سیگنال دریافتی از فیلترهای تطبیق کننده $x(t)$ ، سیگنال خروجی (۱۸) حاصل می‌شود.

$$Y \triangleq [X_1^T \dots X_K^T]^T = \sqrt{\frac{M}{K}} \beta_s u(\theta_s) + \quad (18)$$

$$\sum_{i=1}^D \sqrt{\frac{M}{K}} \beta_i u(\theta_i) + \tilde{n}$$

که در این رابطه $u(\theta_i)$ از رابطه (۱۹) محاسبه می‌شود.

$$u(\theta) \triangleq (c(\theta) \odot d(\theta)) \otimes b(\theta) \quad (19)$$

در این مقاله برای تشکیل بیم بهینه از رابطه $W = a(\theta_s)$ استفاده شده است. و برای مدل سازی نویز از نویز سفید گوسی استفاده شده است. در نتیجه بردار وزنی از رابطه (۲۰) استفاده می‌شود.

$$W_k = \frac{a_k(\theta_s)}{\|a_k(\theta_s)\|}, \quad (20)$$

$$k = 1, \dots, K$$

بنابراین، شکل بیم نرمالیزه شده برای رادار Phased-MIMO از

رابطه (۲۱) محاسبه می‌شود.

² Transmit

³ Waveform Diversity

¹ Steering vector

مقاله مرجع به عنوان ایده معرفی شده است، مقایسه می‌گردد.

۴- روش پیشنهادی

در این بخش به بیان یک روش به منظور بهینه‌کردن ایده مقاله [۱۸] می‌پردازیم. بدین ترتیب با توجه به بهینه بودن نتایج حاصل از روش اول (FDA- MIMO) نسبت به روش مقاله مرجع (FDA)، ایده پیشنهادی را با تغییر در نحوه تخصیص فرکانس المان‌ها در روش FDA- MIMO ارائه می‌نماییم. لازم به ذکر است که پیش‌تر از این ما تعداد المان‌ها را از ۱۰ تا ۱۰۰ المان تغییر دادیم و متوجه شدیم که در روش FDA- MIMO این تغییر تعداد، باعث بهینه‌شدن نتایج می‌گردد؛ ولی با تغییر المان‌ها از ۱۰۰ الی ۱۰۰۰ تغییر خاصی در نتایج ایجاد نگردید، به همین دلیل علاوه بر این نکته که با تغییر المان‌ها می‌توان به نتیجه بهتری دست یافت، اما هنوز به دنبال بهبود نتایج در روش اول هستیم، لذا همان‌طور که گفته شد این مهم را با پژوهش در نحوه تخصیص فرکانس‌ها به المان‌های موجود به نتیجه رساندیم. به همین منظور به ارائه ایده‌ای جایگزین به جای روش خطی بودن افزایش فرکانس در المان‌ها می‌پردازیم و آن اختصاص فرکانس به هر المان به صورت تصادفی می‌باشد که می‌توان نام FDA- MIMO با توزیع تصادفی را برای این نوآوری انتخاب نمود. نتایج حاصل از این نوآوری در بخش (نتایج و بحث)، تحلیل می‌گردد.

۵- نتایج و بحث

در این بخش طبق روابط ریاضی پیش‌گفته به شبیه‌سازی رادار PAR، FDA، و FDA- MIMO خطی و تصادفی پرداخته و نتایج بررسی و مقایسه شده است و نهایتاً در ادامه شبیه‌سازی الگوریتم‌های جهت‌دهی در رادارهای پیش‌گفته مورد بررسی قرار گرفته است.

۵-۱- نتایج شبیه‌سازی رادار FDA و PAR

باتوجه به توضیحات ذکر شده، شبیه‌سازی از طریق نرم‌افزار متلب انجام می‌شود. در این شبیه‌سازی ابتدا رادار FDA طراحی شده و پس از آن تأثیر و تقابل FDA بر ECM بررسی گردیده و سپس در پایان فصل با ارائه روشی بهینه‌سازی صورت می‌گیرد؛ لذا به منظور شبیه‌سازی و افزایش دقت کار و همچنین تأییدی بر نتایج به دست آمده، از فرمول‌های بکار رفته در مراجع [۱۶] و [۱۷] استفاده گردیده که هر دو مقاله الگوهای یکسانی را ترسیم و شبیه‌سازی کرده‌اند.

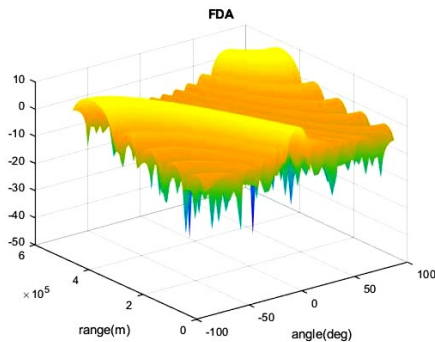
بر طبق تقسیمات پراکنده الگوی پرتویی، اشاره به نکات زیر الزامی است:

- اگر افزایش فرکانس Δf ثابت باشد، الگوی پرتو در رادار آرایه متغیر فرکانسی، بهره پیک وابسته به دامنه - زاویه آن را نشان می‌دهد.

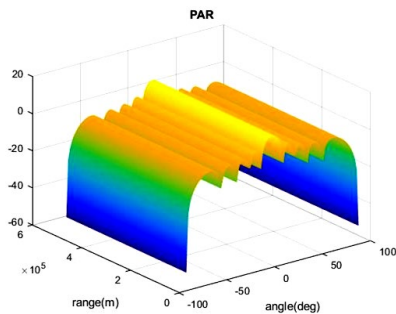
- اگر در آرایه متغیر فرکانسی، افزایش فرکانس صورت نگیرد (یعنی $\Delta f = 0$)، آرایه خطی از رادار آرایه متغیر فرکانسی نسبت به رادار آرایه فازی، به صورت یکنواخت کاهش می‌یابد.

الف- رسم الگوهای تشعشی رادار FDA و PAR

باتوجه به توضیحات داده شده شکل (۳) الگوی پرتو در رادار آرایه متغیر فرکانسی با افزایش فرکانس $\Delta f = 350$ هرتز را نشان می‌دهد، که با استفاده از نرم‌افزار متلب شبیه‌سازی شده است و مشابه الگوی مندرج در مراجع [۱۶] و [۱۷] می‌باشد.



شکل (۳). الگوی پرتو در رادار آرایه متغیر فرکانسی با افزایش فرکانس $\Delta f = 350$



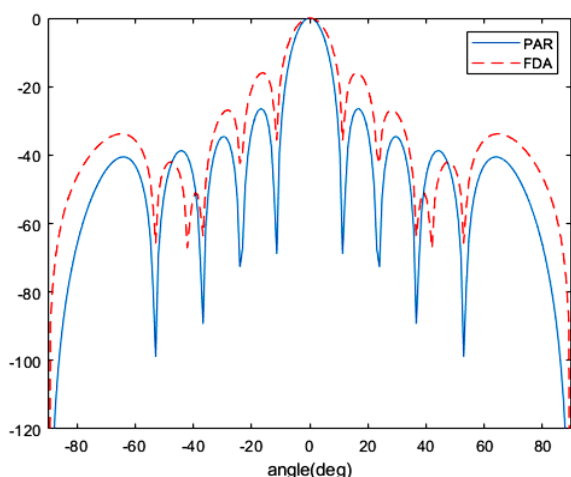
شکل (۴). الگوی پرتو در رادار آرایه متغیر فرکانسی بدون افزایش فرکانس $\Delta f = 0$ ، PAR

شکل (۴) الگوی پرتو در رادار آرایه متغیر فرکانسی بدون افزایش فرکانس $\Delta f = 0$ هرتز را نشان می‌دهد، که با استفاده از نرم‌افزار متلب شبیه‌سازی شده است. در واقع تبدیل به آرایه خطی PAR می‌شود، که مشابه الگوی مندرج در مراجع [۱۶] و [۱۷] می‌باشد.

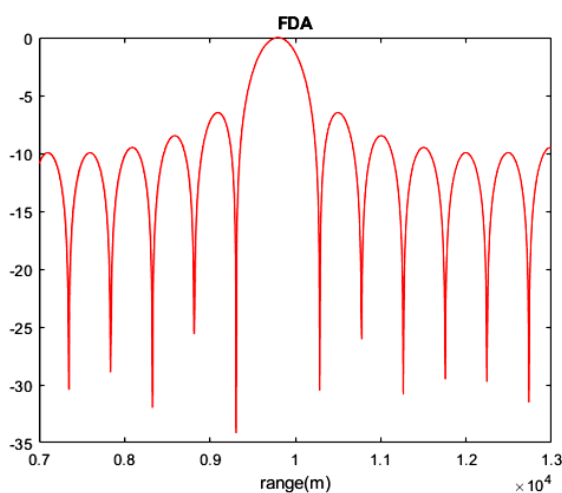
ب- مقایسه رادار FDA و PAR

همان‌طور که مشاهده می‌شود، شکل‌های (۳) و (۴) تفاوت الگوی پرتو در FDA و PAR را نشان می‌دهد. در واقع، ۱۰ عنصر خطی یکنواخت از آرایه متغیر فرکانسی با فاصله بین عنصری $d = \lambda / 2$ را

برخی از نقاط در فضا می‌توانند با بیش از یک مؤلفه فرکانسی اسکن شوند و این گوناگونی باعث افزایش مقاومت در برابر اغتشاشات و پارازیت چند مسیره می‌شود.



شکل (۵). مشخصات کلی الگوی پرتوی انتقالی بر حسب زاویه



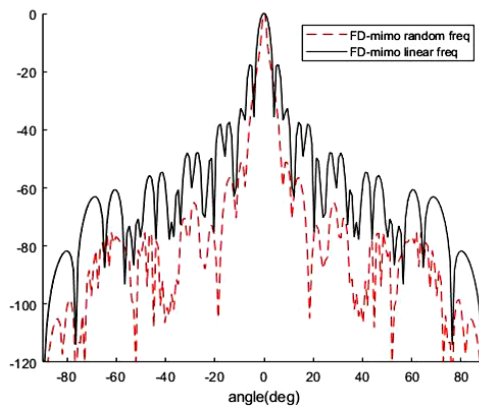
شکل (۶). مشخصه الگوی پرتوی انتقالی بر حسب فاصله

۵-۲- شبیه‌سازی روش MIMO-FDA

در این مرحله به شبیه‌سازی روشی پرداخته شده که بر طبق الگوی استفاده شده در مقاله [۱۹] نهادینه شده است، این روش به منظور بهینه‌کردن روش FDA استفاده گردید. برای شبیه‌سازی این روش باتوجه به روابط ذکر شده در بخش مدل‌سازی، یک آرایه با ۱۰۰ المان در نظر گرفته شده. سیگنالی با فرکانس برابر 1GHz و تغییر فرکانس 350Hz و فاصله بین المان‌ها نصف طول موج است. در حالت اول پترن‌های مربوط به FDA محاسبه شده با فرض این که کل المان‌ها یک آرایه را تشکیل می‌دهند و در حالت دوم روش MIMO-

نشان می‌دهد که در آن λ طول موج سیگنال و $f_0 = 1\text{GHz}$ فرکانس حامل است. لازم به ذکر است که برای رادار آرایه فازی $\Delta f = 0$ و برای آرایه متغیر فرکانسی $\Delta f = 350$ است. همان‌طور که نشان داده شده است، الگوی پرتوی انتقالی از رادار آرایه فازی سنتی، وابسته به زاویه-دامنه است درحالی که رادار آرایه متغیر فرکانسی وابسته به دامنه-زاویه است، و از این رو رادار آرایه متغیر فرکانسی کنترل بهتری از مدولاسیون و سنتز پرتو نسبت به آرایه فازی متعارف ارائه می‌دهد. به‌طور دقیق‌تر، پرتوی رادار آرایه فازی در یک زاویه برای تمام دامنه‌ها ثابت است و از این رو هیچ اطلاعاتی از دامنه وجود ندارد، درحالی که دامنه‌های آرایه متغیر فرکانسی، غیر ثابت و قابل تغییر است. در شکل (۳) که میزان نمو فرکانسی آن 350 هرتز است؛ به این معنی که شکل موج تشعشع شده از هر عنصر آرایه در رادار آرایه متغیر فرکانسی، مشابه نیست ولی در شکل (۴) میزان نمو فرکانسی آن صفر هرتز است؛ یعنی شکل موج تشعشع شده از هر عنصر آرایه در رادار آرایه متغیر فرکانسی، مشابه است. در ادامه همان‌طور که در شکل (۵) نشان داده شده است، رادار آرایه متغیر فرکانسی و رادار آرایه فازی معمولی، مشخصات کلی انتقال و دریافت الگوی پرتو را بر حسب ابعاد زاویه را در خود دارند. مطابق شکل (۶) رادار آرایه فازی قابلیت رزولوشن در ابعاد دامنه را ندارد. برعکس، رادار آرایه متغیر فرکانسی قابلیت رزولوشن در ابعاد دامنه را دارد. از آنجایی که رادار آرایه متغیر فرکانسی برای اولین بار به‌منظور فراهم کردن الگوی پرتوی وابسته به دامنه-زاویه در مرجع [۲۳] توسعه یافته است، نسخه‌های بسط یافته بسیاری به‌منظور غلبه بر کاستی‌های نسخه اصلی با توجه به پاسخ کوبلینگ دامنه-زاویه از سیگنال‌های هدف موردنظر طراحی شده است. در مرجع [۲۴] رادار آرایه متغیر فرکانسی غیریکنواخت به‌عنوان فرستنده و رادار آرایه فازی یکنواخت به‌عنوان گیرنده در راستای دستیابی به تصویربرداری با وضوح بالای دامنه-زاویه از اهداف استفاده می‌شود، که برای غلبه بر کمبودهای نسخه اصلی به علت پاسخ زاویه سیگنال‌های هدف موردنظر طراحی شده است. مبنای اصلی رادار اقدامات ضد ضدالکترونیکی، مقابله با سیگنال‌های پارازیتی و حفاظت از سیگنال‌های موردنظر و مطلوب است. ویژگی مهم رادار آرایه متغیر فرکانسی این است که در واقع هر نقطه‌ای از فضا می‌تواند به‌صورت گسسته با تغییر فرکانس حامل و افزایش فرکانس اسکن شود. ویژگی‌های اسکن می‌تواند به‌طور مؤثر برای یک سناریوی جدید با استفاده از یک الگوی فرکانسی متفاوت مورد استفاده قرار گیرد. تمرکز در فضا نیز با انتخاب فواصل فرکانس منحصر به فرد امکان‌پذیر است. با افزایش تعداد فرکانس‌های کلی،

و این اعداد را در یک ماتریس قرار داده و این ماتریس را نهایتاً در فرکانس حامل مدنظر ضرب کرده و هر درایه از ماتریس نهایی را به یک المان اختصاص می‌دهد. به‌ازای دفعات مختلف RUN کردن در برنامه متلب نتایج حاصل می‌شود که نسبت به روش FDA-MIMO نتایج بسیار بهتر را رقم می‌زند. (تقریباً به‌ازای هر ۱۰ مرتبه RUN کردن، در ۸ مرتبه از آن نتایج بهتری حاصل می‌شود)، مطابق شکل (۸) در واقع سطح گلبرگ‌های جانبی کاهش بیشتری داشته و این یعنی همان مقاوم‌بودن در برابر اقدامات ضدالکترونیکی که در سمت گلبرگ جانبی شروع به اختلال می‌نمایند و بیم اصلی تیزتر می‌گردد که این نیز به معنای افزایش دقت و تفکیک‌پذیری می‌باشد.)



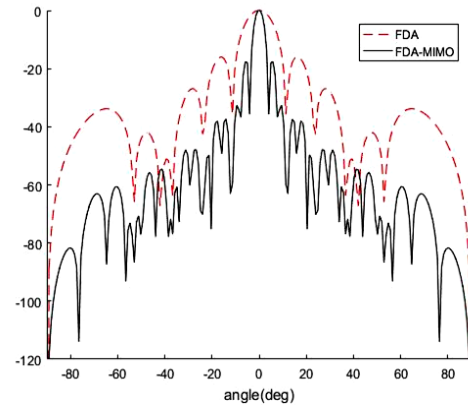
شکل (۸). مقایسه پترن FDA-MIMO خطی و تصادفی

۵-۳-۱- مقایسه روش پیشنهادی با سایر روش‌ها

در شکل (۹) نتیجه‌ی مقایسه‌ی روش‌های بررسی شده در این پژوهش به شرح زیر است:

- روش پیشنهادی نسبت به سایر روش‌هایی که بررسی شد دارای محاسبات پیچیده‌تری است.
- روش پیشنهادی نسبت به سایر روش‌ها داری سطح گلبرگ جانبی پایین‌تری است که این به معنی مقاوم‌بودن در برابر ECM در سمت گلبرگ‌های جانبی می‌باشد.
- روش پیشنهادی نسبت سایر روش‌ها دارای بیم اصلی تیزتری می‌باشد که در واقع به معنی افزایش قدرت تفکیک اهداف نزدیک به هم است.
- روش پیشنهادی همچون رادار FDA و FDA-MIMO خطی، وابسته به زاویه و محدوده است در صورتی که رادار PAR و Phase-MIMO radar فقط وابسته به زاویه و مستقل از محدوده بودند.
- روش پیشنهادی برتری دیگری که نسبت به رادار FDA خطی و رادار MIMO-FDA خطی دارد این است که در این دو روش به دلیل اینکه تغییرات فرکانس ثابت می‌باشد (ΔF ثابت)، در

FDA لحاظ گردیده است. در واقع رادار FDA و روش FDA-MIMO (برگرفته از مقاله [۱۹]) در این بخش مقایسه می‌گردند.



شکل (۷). مقایسه پترن FDA و FDA-MIMO خطی

۵-۲-۱- مقایسه پترن FDA-MIMO و FDA

- از شکل (۷) مشخص است، استفاده از روش FDA-MIMO سطح گلبرگ‌های جانبی را کاهش می‌دهد و از این مزیت می‌توان برای مباحث مقابله با ECM استفاده کرد. به این صورت که ورود سیگنال‌های مزاحم از زوایای مربوط به گلبرگ‌های جانبی تا حدی با تضعیف روبرو می‌شود.
- بیم اصلی تیزتر می‌شود و این به معنی افزایش دقت می‌باشد.
- طبق مقاله [۱۹] افزایش نسبت سیگنال به نویز (نسبت به روش‌های قبلی)، با توجه به آزادی عملی که در طراحی وجود دارد این نسبت افزایش می‌یابد.

۵-۳-۲- شبیه‌سازی، مقایسه و نتایج روش پیشنهادی

در کل این پژوهش تا این لحظه افزایش فرکانس به صورت خطی صورت گرفته است، در واقع هر المان نسبت به المان قبلی به اندازه‌ای ثابت تغییر فرکانس داشته است (هر المان شامل فرکانس حامل به اضافه ضربی صحیح از یک نسبت ثابت می‌باشد با این شرط که هر المان با المان قبل و بعد از خود به اندازه همان عدد ثابت اختلاف داشته باشد)، در این پژوهش این عدد ۳۵۰ هرتز بود. تا اینجا بررسی شد که روش FDA-MIMO نسبت به روش FDA نتایج بهتری را رقم می‌زند، به همین منظور تغییرات لازم را در روش FDA-MIMO انجام داده و این تغییرات و نتایج حاصل شده را به‌عنوان نوآوری در این اثر ارائه می‌شود. برای این بخش از کار، بایستی تغییرات فرکانسی هر المان نسبت به المان قبلی و بعدی خود ثابت نباشد و در واقع خطی تغییر نکند، البته روش‌های غیرخطی مختلفی هم هستند که تاکنون در مقالات مختلفی بررسی گردیده‌اند. اما در اینجا روشی را ارائه کرده که به صورت تصادفی باشد، در متلب دستوری بنام rand() داریم، این دستور اعدادی بین (۰ تا ۱) را انتخاب می‌کند

سطح گلبرگ‌های جانبی را کاهش (مقاوم‌تر در برابر ECM) و بیم اصلی را تیزتر (افزایش دقت ردیابی و قدرت تفکیک اهداف) می‌نماید.

جدول (۱). مقایسه از نظر مقاوم بودن در برابر ECM

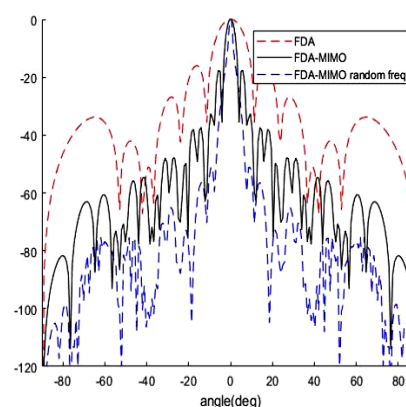
روش	نوع فرکانس	پیچیدگی محاسبات	مقاوم‌بودن در برابر ECM
PRA	$\Delta F = 0$	کم	پارازیت
خطی FDA	$F_m = f_0 + m\Delta f$	استاندارد	پارازیت، تداخل ضعیف
MIMO-FDA خطی	$F_m = f_0 + m\Delta f$	پیچیده	پارازیت، ایستادگی قوی در برابر تداخل
MIMO-FDA تصادفی	تصادفی	پیچیده	پارازیت، ایستادگی قوی در برابر تداخل، کشف اهداف نزدیک به هم

۶- مراجع

- [1] S.B. Jafari, M. Bayat, and K. Rashidi, "Electronic defense and attack", Aja Air Defense Academy Press, vol. 1, 2012, (In Persian)
- [2] Q. Wu, Y. Cheng, X. Li, H. Wang, and Y. Qin, Y, "Beam synthesis and target detection based on aperture coding metasurface" In Progress in Electromagnetics Research Symposium-Fall (PIERS-FALL), pp. 2290-2298, 2017.
- [3] C. Fulton, M. Yeary, D. Thompson, J. Lake, and A. Mitchell, "Digital phased arrays: Challenges and opportunities" Proceedings of the IEEE, vol. 104, no. 3, 487-503, 2016.
- [4] F. Neri, "Introduction to electronic defense systems". SciTech Publishing, 2006.
- [5] Z. Wang, Y. Wang, K. Duan, W. Xie, "Subspace-augmented clutter suppression technique for STAP radar" IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, vol. 13, no. 3, pp. 462-466, 2016.
- [6] W.Q. Wang, H. Shao, J. Cai, "Range-angle-dependent beamforming by frequency diverse array antenna" International journal of antennas and propagation, 10 pages, 2012.
- [7] L. Lan, G. Liao, J. Xu, Y. Zhang, and F. Fioranelli, "Suppression Approach to Main-Beam Deceptive Jamming in MIMO Radar Using Nonhomogeneous Sample Detection" IEEE Access, vol. 6, pp. 34582-34597, 2018.

نتیجه یک DRFM با تکنولوژی بالا می‌تواند این تغییرات فرکانس را تشخیص دهد و رادار را کور کند، درحالی‌که در روش پیشنهادی فرکانس به‌صورت تصادفی انتخاب می‌گردد و این خود یک مزیت قابل توجه می‌باشد

روش پیشنهادی از نظر محاسباتی کاملاً مشابه روش MIMO-FDA خطی است و تنها تفاوت آن در نحوه تخصیص فرکانس است که در روش پیشنهادی به‌صورت تصادفی انتخاب می‌شود، و همین امر باعث شده است که نتایجی بسیار بهتر از روش MIMO-FDA خطی ارائه دهد.



شکل (۹). مقایسه پترن FDA با FDA-MIMO خطی و تصادفی

در جدول (۱) مقایسه‌ای بین روش‌های بررسی شده در مقاله، از نظر مقاوم بودن در برابر ECM بیان شده است.

۵-۳-۲- نتایج

- الگوی پرتوی انتقالی از رادار آرایه فازی سنتی، وابسته به زاویه - دامنه است درحالی‌که رادار آرایه متغیر فرکانسی وابسته به دامنه - زاویه است
- رادار آرایه متغیر فرکانسی کنترل بهتری از مدولاسیون و سنتز پرتو نسبت به آرایه فازی متعارف ارائه می‌دهد.
- پرتوی رادار آرایه فازی در یک زاویه برای تمام دامنه‌ها ثابت است و از این رو هیچ اطلاعاتی از دامنه وجود ندارد، درحالی‌که دامنه‌های آرایه متغیر فرکانسی، غیر ثابت و قابل تغییر است.
- باتوجه به بهینه‌سازی با روش FDA-MIMO به‌صورت خطی می‌توان اثر جمرهایی که در سمت گلبرگ‌های جانبی اقدام به اختلال می‌کنند را تا حدی با تضعیف روبرو کرد.
- ایده اصلی این پژوهش استفاده از (MIMO-FDA تصادفی) به جای (خطی بودن تخصیص فرکانس برای هر المان) می‌باشد که از هر ۱۰ مرتبه RUN کردن در نرم‌افزار متلب ۸ مرتبه آن نتایج بهتری را نسبت به حالت خطی ایجاد می‌کند، در واقع

- [19] W.Q. Wang "Phased-MIMO radar with frequency diversity for range-dependent beamforming," *IEEE Sensors journal*, vol. 13, no. 4, pp. 1320-1328, 2013.
- [20] P. Antonik, M.C. Wicks, H.D. Griffiths, C. J. Baker, "Frequency diverse array radars," *IEEE Conference on Radar*, 2006.
- [21] P. Antonik, M.C. Wicks, H.D. Griffiths, and C.J. Baker, "Range-dependent beamforming using element level waveform diversity. In *International Waveform Diversity & Design Conference*, pp. 1-6, 2006.
- [22] P.F. Sammartino, C.J. Baker, and H.D. Griffiths, "Frequency diverse MIMO techniques for radar" *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, vol. 49, no. 1, pp. 201-222, 2013.
- [23] W.Q. Wang, "Mitigating range ambiguities in high-PRF SAR with OFDM waveform diversity" *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, vol. 10, no. 1, pp. 101-105, 2013.
- [24] Y. Wang, W.Q. Wang, and H. Chen, "Linear frequency diverse array manifold geometry and ambiguity analysis" *IEEE Sensors Journal*, vol. 15, no. 2, pp. 984-993, 2015.
- [25] A. Hassanien, S.A. Vorobyov, "Phased-MIMO radar: A tradeoff between phased-array and MIMO radars," *IEEE Transactions on Signal Processing*, vol. 58, no. 9, pp. 3137-3151, 2010.
- [26] Y. Zhu, W. Yu, H. Sun, K. Li, and J. Luo, "Analysis of Key Technologies and Performances of Fire-Control Radar of Low Probability of Intercept" In *International Conference on Man-Machine-Environment System Engineering*, pp. 201-208, 2018.
- [27] D. Cristallini, and I. Walterscheid, "Joint Monostatic and Bistatic STAP for improved SAR-GMTI capabilities" *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 54, no. 3, pp. 1834-1848, 2015.
- [8] Y. Zhao, F. Gini, M. Greco, and B. Tang, "Radar based on phase-aid distributed compressive sensing" *Signal, Image and Video Processing*, vol. 12, no. 8, pp.1497-1504, 2018.
- [9] Y. Liu, L. Xiao, X. Wang, and A. Nehorai, "On Clutter Ranks of Frequency Diverse Radar Waveforms" *arXiv preprint arXiv:1603.08189*, 2016.
- [10] A. Abdalla, W.Q. Wang, Z. Yuan, S. Mohamed, T. Bin, "Subarray-based radar to counteract deceptive signals" *EURASIP Journal on Advances in Signal Processing*, vol. 2016, no. 1, 2016.
- [11] A. Farina, and L. Timmoneri, "Live data test of Electronic Counter Counter Measures on a multifunctional prototype radar" In *Metrology for Aerospace (MetroAeroSpace)*, pp. 1-5, 2016.
- [12] T. Bin, Z. Yuan, C. Tianyi, R. Zhi, T. Juan, and X. Ying, "Advances and Perspectives in Radar Techniques of Active Jamming" *Journal of Data Acquisition and Processing*, vol. 4, 001, 2016.
- [13] A. Abdalla, Z. Yuan, M. Ramadan, and T. Bin, "An improved radar method based on orthogonal pulse block and Parallel matching filter. *Journal of Communications*, vol. 10, no. 8, pp. 610-614., 2015.
- [14] J. Xu, G. Liao, S. Zhu, and H.C. So, "Deceptive jamming suppression with frequency diverse MIMO radar. *Signal Processing*, vol. 113, pp. 9-17, 2015.
- [15] Z. Yuan, S.N. Longdon, J.C. Bore, and T. Bin, "A study of techniques and their performance" In *IEEE International Conference on Signal Processing, Communications and Computing (ICSPCC)*, pp. 1-6, 2015.
- [16] A. Abdalla, H. Abdalla, M. Ramadan, S. Mohamed, T. Bin, T, "Overview of frequency diverse array in radar ECCM applications" In *International Conference on Communication, Control, Computing and Electronics Engineering (ICCCCEE)*, pp. 1-9, 2017.
- [17] W.Q. Wang, "Frequency diverse array antenna: new opportunities" *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, vol. 57, no. 2, 145-152, 2015.
- [18] A. Hassanien, S.A. Vorobyov, "Phased-MIMO radar: A tradeoff between phased-array and MIMO radars," *IEEE Transactions on Signal Processing*, vol. 58, no. 9, pp. 3137-3151, 2010.

