

Angular Resolution Enhancement of the Multi-Input Multi-Output Radar by Using the 2D Nested Array Method

Rasoul Dehghani^{1,2}, *M.Sc*, Rouhollah Aghajani^{1,2}, *Assistant Professor*

¹ Department of Electrical Engineering, Najafabad Branch, Islamic Azad University, Najafabad, Iran

² Digital Processing and Machine Vision Research Center, Najafabad Branch, Islamic Azad University, Najafabad, Iran
rsl1363dhg@gmail.com,
aghajani@iaun.ac.ir

Abstract:

In conventional phased array systems, increasing the array length and consequently increasing the number of antenna elements are needed to improve spatial resolution. It can be addressed by MIMO radars using orthogonal signals from multiple transmitters and using the virtual array. Virtual element's locations are derived from the convolution of the physical element's location of the transmitter and receiver. To understand the functionality of MIMO radars, virtual array has been introduced. As the virtual array be larger, the radar angle resolution increase. Increasing the degree of freedom of the virtual array is highly dependent on the array of transmitter and receiver elements placement. The Nested Array which is one of the well-known methods in alignment of MIMO radar array elements, is investigated. In this article, the new nested array is examined and implemented in one dimension. The very innovative idea of this article is to use the new 2D nested array. A multi-step approach for implementing two-dimensional arrays using a new nested array for a MIMO radar is presented which can be generalized to any other structure with different number of elements. Finally, the advantages of the proposed method in terms of angular beam width of the main radar are presented. The results show that the proposed method is much more efficient than the other methods. The comparative results presented at the end of this article shows that the half-power beam width of the proposed method is approximately 0.3 degrees while this value for the nested method is more than 2 degrees.

Keywords: MIMO radar, virtual array, nested array, resolution enhancement

Received: 6 December 2019

Revised: 30 May 2020

Accepted: 12 June 2020

Corresponding Author: Dr. Rouhollah Aghajani

افزایش تفکیک پذیری زاویه‌ای رادارهای چندورودی-چندخروجی با روش آرایه تودرتو دوبعدی

رسول دهقانی^{۱،۲}، دانش‌آموخته کارشناسی ارشد، روح اله آقاجانی^{۱،۲}، استادیار

۱- دانشکده مهندسی برق- واحد نجف‌آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف‌آباد، ایران

۲- مرکز تحقیقات پردازش دیجیتال و بینایی ماشین، واحد نجف‌آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف‌آباد، ایران

rs11363dhg@gmail.com, aghajani@iaun.ac.ir

چکیده: در سیستم‌های آرایه فازی مرسوم، برای بهبود تفکیک‌پذیری فضایی، نیاز به افزایش طول آرایه و در نتیجه افزایش تعداد المان‌های آنتن است. این نیاز را می‌توان در رادارهای چند ورودی- چند خروجی (MIMO) و با استفاده از سیگنال‌های متعامد ارسالی از چندین فرستنده و استفاده از المان‌های مجازی حاصل از آن رفع کرد. مکان المان‌های مجازی از کانولوشن مکان المان‌های فیزیکی فرستنده و گیرنده در هم به‌دست می‌آید. برای درک کارایی رادارهای MIMO مفهومی به نام آرایه مجازی معرفی شده است. هرچه آرایه مجازی بزرگ‌تر باشد تفکیک‌پذیری زاویه‌ای رادار افزایش می‌یابد. افزایش درجه آزادی آرایه مجازی بسیار وابسته به چینش المان‌های آرایه گیرنده و فرستنده است. آرایه تودرتو یکی از روش‌های شناخته شده در چینش المان‌های آرایه راداری MIMO است. در این مقاله آرایه تودرتوی جدید بررسی شده و سپس در یک بعد پیاده‌سازی شده است. ایده جدید این مقاله، استفاده از آرایه تودرتوی جدید در دو بعد است. یک روش چند مرحله‌ای برای پیاده‌سازی آرایه دو بعدی با استفاده از چینش تودرتوی جدید برای یک رادار MIMO ارائه شده است که قابل تعمیم به هر ساختار دیگری با تعداد المان‌های مختلف است. در انتها مزایای روش ارائه شده در قالب پهنای زاویه‌ای بیم اصلی رادار آورده شده است. نتایج به‌دست آمده نشان می‌دهد که روش ارائه شده در این مقاله بسیار مؤثرتر از روش‌های دیگر است. نتایج مقایسه‌ای ارائه شده در انتهای این مقاله نشان می‌دهد که پهنای بیم نصف توان روش ارائه شده تقریباً $0/3$ درجه است، در حالی که این مقدار برای روش تودرتو بیش از ۲ درجه است.

کلمات کلیدی: آرایه تودرتو، آرایه مجازی، افزایش رزولوشن، رادار MIMO

تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۸/۹/۱۵

تاریخ بازنگری مقاله: ۱۳۹۹/۳/۱۰

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۹/۳/۲۳

نام نویسنده‌ی مسئول: دکتر روح اله آقاجانی

نشانی نویسنده‌ی مسئول: نجف‌آباد- بلوار دانشگاه- دانشگاه آزاد اسلامی واحد نجف‌آباد- دانشکده مهندسی برق

۱- مقدمه

رادارهای چند ورودی-چند خروجی^۱ (MIMO) همدوس یکی از نمونه‌های پیشرفته آنتن‌های آرایه فازی^۲ هستند که در چند دهه اخیر به‌عنوان سیستم‌های راداری استفاده می‌شوند. ایده اصلی در این رادارها ارسال شکل موج‌های مستقل توسط فرستنده است. راداری‌های MIMO را می‌توان یک فن‌آوری آنتنی قلمداد کرد چرا که این فن‌آوری یک حالت عمومی از معماری آنتن‌های آرایه فازی است که در رادار و دیگر سیستم‌ها استفاده شده است. یک رادار فعال برای سنجش محیط، انرژی الکترومغناطیسی تشعشع می‌کند. رادار MIMO شکل موج‌های مستقل را از المان‌های تشعشع‌گر که با فاصله از یکدیگر قرار گرفته‌اند، تشعشع می‌کند. در بررسی مدل سیگنال، محیط به‌صورت سیستمی در نظر گرفته می‌شود که ورودی آن شکل موج‌های ارسالی و خروجی آن بازتاب‌های دیده شده توسط محیط هستند [۵-۱].

رادارهای MIMO با شکل‌دهی امواج^۳ متنوع، قابلیت‌های مختلفی را به این رادارها افزوده است. برخی از آن‌ها عبارت‌اند از: ۱- بهبود قابلیت شناسایی پارامترها، ۲- کاربرد مستقیم آرایه تطبیقی برای آشکارسازی هدف و تخمین پارامتر، ۳- قابلیت انعطاف بیشتر برای طراحی بیم فرستنده، ۴- افزایش M_t برابری بیشینه اهداف قابل شناسایی برای رادار MIMO نسبت به آرایه فازی، ۵- قابلیت بهینه‌سازی برای رسیدن به بیم‌های مختلف با کارایی بالا به کمک سنجش سیگنال‌های ارسالی و ۶- استقلال خطی بازتاب‌ها از اهداف مختلف در مکان‌های مختلف. ویژگی آخر اجازه استفاده مستقیم از روش‌های تطبیقی برای رسیدن به تفکیک‌پذیری بالا و قابلیت فیلتر کردن سیگنال‌های اضافی را می‌دهد [۲].

استفاده از سیگنال‌های متعامد در فرستنده رادارهای MIMO سبب شده تا با قرار دادن فیلترهای منطبق در گیرنده، یک آرایه مجازی با دهانه بسیار بزرگ‌تر از حالت معمولی ایجاد شود. افزایش تعداد المان‌های آرایه در یک رادار، سبب افزایش درجه آزادی و همچنین بهبود تفکیک‌پذیری زاویه‌ای می‌شود. همچنین یکجا قرار دادن آنتن‌های فرستنده و گیرنده نشان داده است که می‌تواند تفکیک‌پذیری بالاتر و در نتیجه تخمین و شناسایی بهتری را برای این رادار به ارمغان بیاورد [۶، ۱]. یکی از روش‌های بررسی بهبود عملکرد در رادارهای MIMO در نظر گرفتن آرایه مجازی است. با استفاده از M شکل موج متعامد در فرستنده، یک رادار MIMO می‌تواند آرایه‌ای M بار بزرگ‌تر از یک فرستنده با یک مرکز فاز داشته باشد. همان‌طور که استفاده از یک آرایه فیزیکی بزرگ‌تر می‌تواند الگوی تشعشعی مطلوب‌تری به همراه تفکیک‌پذیری بهتری را ایجاد کند، آرایه مجازی با المان‌های بیشتر نیز می‌تواند در بهبود عملکرد رادار موثر باشد [۴، ۳، ۱].

آرایه‌های گسترده در سال‌های اخیر منجر به معرفی آرایه‌هایی نظیر تودرتو^۴، آرایه همبسته^۵ و آرایه تودرتو با کم‌ترین افزونگی شده است. در مرجع [۷] یک جفت آرایه همبسته یکنواخت خطی به‌صورت یک رادار MIMO استفاده شده است که در آن از مفهوم آرایه همبسته تجمعی برای افزایش تخمین جهت ورود سیگنال استفاده شده است. در مرجع [۸] یک آرایه تودرتو MIMO با استفاده از آرایه یکنواخت خطی متراکم در فرستنده و یک آرایه یکنواخت خطی گسترده در گیرنده ارائه شده است. در هر دو آرایه ذکر شده تنها از آرایه همبسته تجمعی (آرایه حاصل از مجموع مکان المان‌های فیزیکی) استفاده شده است که درجه آزادی محدودی را مهیا می‌کند. برای افزایش درجه آزادی در مراجع [۶]، [۹] و [۱۰] از آرایه تفاضلی بعد از آرایه تجمعی استفاده شده است که در این حالت درجه آزادی افزایش چشم‌گیری پیدا کرده است. یکی دیگر از روش‌های مورد استفاده در رادارهای MIMO، استفاده از آرایه‌ها با کم‌ترین افزونگی است. این روش درجه آزادی زیادی را می‌تواند ایجاد کند اما بهینه‌سازی آن نیاز به محاسبات زیادی دارد [۹، ۱۱]. روش‌هایی زیادی برای تولید آرایه با افزونگی حداقل وجود دارد که هر کدام دارای مزایا و معایبی هستند. پیرسون^۶ در مرجع [۱۲] روش موثری برای چینی المان‌های آرایه ارائه کرده است که نزدیک به حالت بهینه است. راف^۷ در مرجع [۱۳] توضیح داده است که چگونه از روش شبیه‌سازی برای تولید آرایه با افزونگی حداقل استفاده کرده است. در این مقاله نتایج برای دو حالت تعداد المان کمتر از ۲۸۷ و تعداد المان کمتر از ۳۰ ارائه شده است. در مرجع [۱۴] لنینبرگ^۸ الگوریتم‌هایی برای ساختن آرایه‌های تنک^۹ و مشخص کردن حدود آرایه ارائه کرده است. همچنین برای محاسبه سریع آرایه همبسته، لنینبرگ روش‌های سریعی را در مرجع [۱۵] آورده است.

در مرجع [۶] یک روش تودرتو جدید ارائه شده است که در آن از آرایه تودرتو در فرستنده و گیرنده استفاده می‌شود. در این روش ابتدا یک آرایه تودرتو به‌عنوان فرستنده در یک رادار MIMO استفاده می‌شود. در گام بعدی تعداد تکرار المان‌ها در آرایه

همبسته تفاضلی فرستنده محاسبه می‌شود. در گام آخر آرایه گیرنده به کمک آرایه تودرتو دیگری با فاصله بین المانی بزرگ‌تر طراحی می‌شود. این روش اساس طراحی رادار MIMO در نظر گرفته شده در این مقاله است. در این مقاله ابتدا آرایه مجازی تجمعی تولید می‌شود و پس از آن آرایه مجازی تفاضلی از آرایه تجمعی تشکیل شده، تولید می‌شود. این روش برای یک آرایه دوبعدی بررسی شده و چینش نهایی آنتن ارائه شده است. همین روش برای اولین بار در دو بعد برای تشکیل یک آرایه استفاده شده است. مراحل طراحی این آرایه و نحوه چینش المان‌های فرستنده و گیرنده گام به گام بررسی شده و یک نمونه اولیه نیز رسم شده است. تمامی مراحل قابلیت پیاده‌سازی برای ساختارهای مختلف را دارد. در نهایت شکل الگوی تشعشعی نهایی آنتن و میزان بهبود پهنای زاویه‌ای این ساختار ارائه شده است. در بخش دوم این مقاله مدل سیگنال در رادارهای MIMO و نحوه استفاده از آرایه مجازی در استخراج اطلاعات در قالب روابط ریاضی آورده شده است. بخش سوم به بررسی رادارهای MIMO با چینش تودرتوی مرسوم می‌پردازد. پس از آن آرایه تودرتوی جدید ارائه شده و نحوه پیاده‌سازی آن برای یک حالت در بخش چهارم بررسی می‌شود. در بخش پنجم ساختار آرایه بررسی شده در دو بعد پیاده شده است. در انتها نیز نتیجه‌گیری ارائه می‌شود.

۲- مدل سیگنال

در صورت استفاده از سیگنال‌های ناهمبسته اطلاعاتی که از یک آرایه با تعداد المان زیاد به دست می‌آید را می‌توان با استفاده از ضریب همبستگی بین سیگنال‌های دریافتی به دست آورد. برای این منظور نیاز است تا یک مدل سیگنال بر اساس گشتاور مرتبه دوم^۱ سیگنال به دست آورد. به این صورت درجه آزادی آرایه افزایش می‌یابد [۱۶].

برای تحلیل عملکرد یک رادار MIMO یک آرایه گیرنده یکنواخت با N المان و فرستنده با M المان با سیگنال‌های ناهمبسته $s_m(t)$ که از زوایای $\{\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_M\}$ نسبت به مرکز گیرنده وارد می‌شوند، در نظر گرفته‌ایم. سیگنالی که سنسور i ام، که در مکان d_i قرار گرفته، دریافت می‌کند را با $x_i(t)$ نشان می‌دهیم و به صورت رابطه زیر می‌نویسیم [۱۷]:

$$x_i(t) = \sum_{m=1}^M s_m(t) e^{-j\frac{2\pi}{\lambda} d_i \sin \theta_m} + n_i(t) \quad i = 1, \dots, N \quad x_i(t) = \sum_{m=1}^M s_m(t) e^{-j\frac{2\pi}{\lambda} d_i \sin \theta_m} + n_i(t) \quad i = 1, \dots, N \quad (1)$$

در رابطه بالا $n_i(t)$ نویز سفید مختلط با انحراف معیار σ_0 و λ طول موج فرکانس کاری است. فرم برداری معادله بالا به صورت رابطه زیر خواهد بود [۱۷]:

$$\mathbf{x}(t) = \mathbf{A}\mathbf{s}(t) + \mathbf{n}(t) \quad (2)$$

در رابطه بالا ماتریس \mathbf{A} به صورت زیر خواهد بود [۱۷]:

$$\mathbf{A} = [a(\theta_1) \ a(\theta_2) \ \dots \ a(\theta_M)] \quad (3)$$

و

$$\mathbf{a}(\theta_m) = [e^{-j\frac{2\pi}{\lambda} d_1 \sin \theta_m} \ e^{-j\frac{2\pi}{\lambda} d_2 \sin \theta_m} \ \dots \ e^{-j\frac{2\pi}{\lambda} d_N \sin \theta_m}]^T \quad (4)$$

ماتریس همبستگی R_{xx} سیگنال دریافتی را می‌توان به صورت زیر تشکیل داد:

$$R_{xx} = E[\mathbf{x}(t) \mathbf{x}^H(t)] = \mathbf{A} R_{ss} \mathbf{A}^H + \sigma_0^2 \mathbf{I}_N \quad (5)$$

در رابطه بالا σ_0^2 توان سیگنال نویز است. در صورتی که سیگنال‌های ارسالی ناهمبسته باشند، خواهیم داشت [۱۷]:

$$[R_{xx}]_{ij} \triangleq r_{ij} = \sum_{m=1}^M \sigma_m^2 e^{-j\frac{2\pi}{\lambda} (d_i - d_j) \sin \theta_m} + \sigma_0^2 \quad (6)$$

که در آن σ_m^2 توان سیگنال متناظر با m امین فرستنده است. مشخص است که در صورت ناهمبسته بودن سیگنال‌های ارسالی در رابطه همبستگی سیگنال دریافتی عبارت $v = d_i - d_j$ ظاهر می‌شود که نشان‌دهنده اختلاف مکان المان i ام و j ام است. در کاربردهایی که از رابطه همبستگی برای تخمین یا آشکارسازی استفاده می‌شود می‌توان این عبارت را به عنوان یک آرایه جدید مجازی در نظر گرفت که المان i ام آن در مکان‌های $v \times i$ قرار گرفته‌اند. به این ترتیب آرایه مجازی تفاضلی را به صورت زیر

تعریف می‌کنیم. فرض کنید یک آرایه N المانی داریم که فاصله بین المانی آن d بوده و d_i نشان‌دهنده مکان سنسور i ام است. به این صورت مجموعه زیر نشان‌دهنده مکان المان‌های این آرایه مجازی است [۱۷].

$$D = \{id - jd\}, \quad \forall i, j = 1, 2, \dots, N \quad (7)$$

در رابطه بالا D نشان‌دهنده مکان المان‌ها در آرایه مجازی جدید است. به این صورت به کمک اطلاعات دریافت شده از N المان و با چینش مناسب المان‌های آرایه می‌توان $N(N-1)$ هدف را آشکار کرد. به همین صورت می‌توان به کمک آرایه تجمعی نیز آرایه مجازی تشکیل داد. آرایه مجازی تشکیل شده در هر دو حالت تجمعی و یا تفاضلی بسیار بزرگ‌تر از آرایه فیزیکی خواهد بود. بزرگ‌تر شدن آرایه به معنای افزایش تفکیک‌پذیری زاویه‌ای، افزایش تعداد اهداف قابل آشکارسازی و به معنای کلی افزایش درجه آزادی خواهد بود. چالش اصلی در طراحی آرایه‌های مختلف رادار MIMO نحوه چینش المان‌های آرایه است به نحوی که آرایه مجازی بیشترین تعداد المان متمایز را داشته و همچنین هیچ حفره‌ای نیز در آرایه وجود نداشته باشد.

۳- رادار MIMO با آرایه تودرتو

برای افزایش درجه آزادی و به دست آوردن یک آرایه همبسته تفاضلی فاقد حفره، باید مکان آرایه فرستنده و گیرنده در یک رادار MIMO بهینه شود. مسئله بهینه‌سازی زیر می‌تواند مکان بهینه المان‌های آرایه را به دست دهد [۱۱].

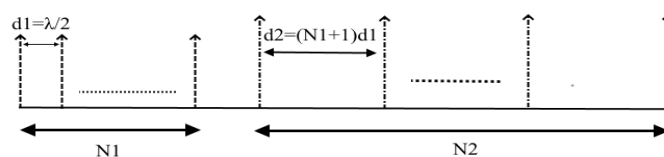
$$\max_{\{u_{T,m}, u_{R,n}\}} L \quad |u_{T,m}|=M, |u_{R,n}|=N \quad \max_{\{u_{T,m}, u_{R,n}\}} L \quad |u_{T,m}|=M, |u_{R,n}|=N \quad (8)$$

$$\{u_{T,m} - u_{R,n}\} \supset \{-L, \dots, -1, 0, 1, \dots, L\} \quad \{u_{T,m} - u_{R,n}\} \supset \{-L, \dots, -1, 0, 1, \dots, L\}$$

در رابطه بالا $u_{T,m}$ و $u_{R,n}$ به ترتیب مکان المان‌های فرستنده و المان‌های گیرنده هستند و همچنین L طول دهانه آرایه مجازی است. حل کردن مسئله بهینه‌سازی بالا معمولاً نیاز به الگوریتم جستجوی جامع^{۱۱} دارد. در ادامه فرآیند تشکیل آرایه تودرتو و پس از آن روش تودرتوی جدید ارائه می‌شود.

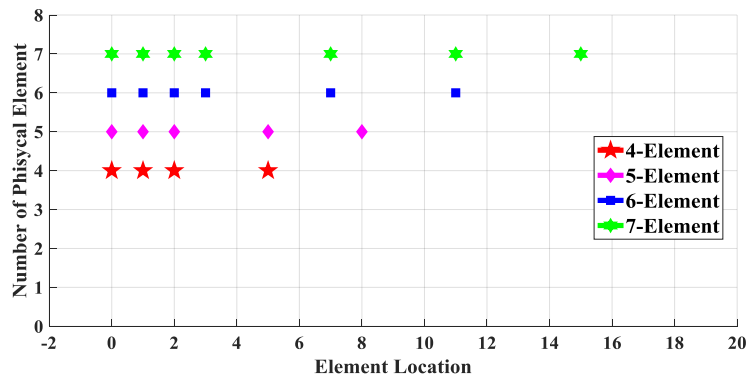
در آرایه تودرتو آنتن‌ها به نحوی قرار می‌گیرند که آرایه مجازی ناشی از آن‌ها کم‌ترین افزونگی را داشته باشد. آرایه تودرتوی دو سطحی همچنین علاوه بر افزونگی حداقل، فاقد حفره نیز می‌باشد اما برای سطوح بالاتر از دو نمی‌توان در مورد حفره با قطعیت صحبت کرد. برای ساخت یک آرایه تودرتو با N سنسور باید سنسورها را به دو آرایه N_1, N_2 تقسیم کنیم. در صورتی که N زوج باشد $N_1=N_2=N/2$ و در صورتی N فرد باشد $N_1=(N+1)/2, N_2=(N-1)/2$ خواهد بود. حال اگر دو آرایه یکنواخت به ترتیب با N_1 المان و فاصله بین المانی $d_1=\lambda/2$ و N_2 المان با فاصله بین المانی $d_2=(N_1+1)d_1$ تشکیل دهیم و آن‌ها را در کنار هم قرار دهیم یک آرایه‌ی تودرتو تشکیل خواهد شد. برای فهم بهتر آرایه تودرتو، چیدمان آنتن‌های آن در شکل (۱) آورده شده است.

در صورتی که بیش از دو آرایه یکنواخت پشت سر هم قرار دهیم یک آرایه تودرتو با درجه بالاتر به وجود می‌آید [۱۸, ۱۹]. در صورتی که با ۴ المان بخواهیم یک آرایه تودرتوی مرتبه دو ایجاد کنیم، مطابق مراحل گفته شده در بالا، با توجه به زوج بودن تعداد المان‌ها، ساختار را به دو رشته ۲ دوتایی تقسیم می‌کنیم. در رشته اول المان‌ها در مکان‌های ۰ و ۱ قرار می‌گیرند. در رشته دوم نیز اولین المان در مکان ۲ و دومین المان در مکان ۵ قرار می‌گیرد. به همین شکل برای یک آرایه ۵ المانی، رشته اول دارای ۲ المان خواهد بود که مکان آن‌ها مشابه آرایه ۴ المانی است اما رشته دوم شامل ۳ المان خواهد بود که مکان آن به ترتیب در مکان ۲ و ۵ و ۸ خواهد بود. با همین روش می‌توان برای آرایه ۶ و ۷ المانی نیز مکان المان‌های آرایه تودرتو را محاسبه کرد. در شکل (۲) آورده شده است.



شکل (۱): چیدمان المان‌ها در یک آرایه تودرتو

Figure (1): Configuration of elements of a nested array



شکل (۲): مکان المان‌های رادار MIMO برای ۴ آرایه تودرتوی مختلف
Figure (2): Location of elements of MIMO radar for 4 different nested array

درجه آزادی حاصل از چینش تودرتو در یک آرایه را می‌توان از رابطه زیر به دست آورد [۱۸].

$$f_m = \begin{cases} \frac{M^2}{2} + M + 1, & \text{Mis even} \\ \frac{(M+1)^2}{2} - 1, & \text{Mis odd} \end{cases} \quad (9)$$

در رابطه بالا f_m نشان‌دهنده درجه آزادی و M تعداد المان‌های آرایه است.

۴- آرایه تودرتو جدید در یک بعد

در آرایه تودرتوی جدید هر دو آرایه فرستنده و گیرنده به صورت تودرتو چیده می‌شوند. به این صورت درجه آزادی به مراتب بیشتری نسبت به آرایه تودرتوی معمولی به دست می‌آید. برای یک رادار MIMO فرض کنید که آرایه فرستنده دارای M المان و آرایه گیرنده دارای N المان است. مکان المان‌های فرستنده را به صورت زیر در نظر می‌گیریم [۶].

$$\{u_{T,m}\} = \{a_m, m=1,2,\dots,M\} \quad (10)$$

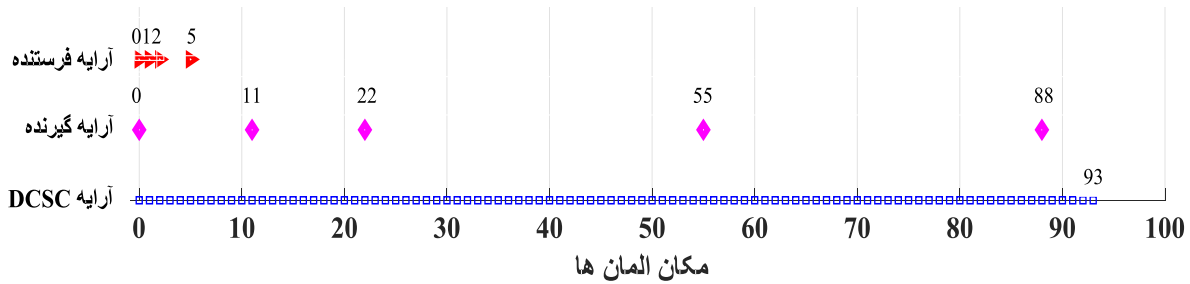
در رابطه بالا a_m مکان هر المان و $u_{T,m}$ مکان هر کدام از المان‌های فرستنده است. پارامتر m شماره المان است. در گام اول چینش المان‌های فرستنده را به صورت یک آرایه تودرتوی معمولی قرار می‌دهیم. به این صورت با توجه به تعداد المان‌های مدنظر برای فرستنده، چینش آن‌ها به صورت روش گفته شده در بخش قبل می‌شود. در گام بعدی چینش المان‌های آرایه گیرنده را بررسی می‌کنیم. برای آرایه گیرنده با توجه به تعداد المان‌های فیزیکی، مکان هر آنتن در آرایه را تعیین می‌کنیم. در گام بعدی مکان المان‌ها را در عدد D ضرب می‌کنیم. به این صورت مکان المان‌های آرایه گیرنده به صورت زیر قابل بیان خواهد بود.

$$\{u_{R,n}\} = \{b_n \cdot D, n=1,2,\dots,N\} \quad (11)$$

در رابطه بالا b_n مکان هر المان و $u_{R,n}$ مکان هر کدام از المان‌های گیرنده است. پارامتر n شماره المان است. نکته اصلی در طراحی آرایه تودرتوی جدید، پارامتر D است. در مرجع [۲۰] نشان داده شده است: در صورتی که D برابر درجه آزادی آرایه تودرتوی فرستنده f_m انتخاب شود یک رادار MIMO با آرایه یکنواخت بدون حفره به صورت DCSC^{۱۱} به دست می‌آید. به این صورت مکان المان‌های آرایه مجازی را می‌توان در دو مرحله و به صورت زیر تعیین کرد. در مرحله اول مکان المان‌های آرایه همبسته تجمعی را مطابق رابطه زیر تعیین می‌کنیم.

$$\{u_{T,m} + u_{R,n}\} = \{a_m + b_n \cdot D, m=1,2,\dots,M, n=1,2,\dots,N\} \quad (12)$$

به منظور به دست آوردن آرایه DCSC باید فاصله بین المان‌ها آرایه $(u_k - u_k')$ را بررسی کنیم. با توجه به آرایه فرستنده و گیرنده بیان شده در بالا می‌توان این فاصله را به صورت زیر بیان کرد.



شکل (۳): مثالی از یک رادار MIMO با ۴ المان فرستنده، ۵ المان گیرنده و فاصله بین المانی ۱۱

Figure (3): An example of MIMO radar with 4 elements receiver, 5 elements transmitter and inter-element space 11

$$\{u_{T,m} + u_{R,n} - u_{T,m'} - u_{R,n'}\} = \{a_m + b_n \cdot D - a_{m'} - b_{n'} \cdot D\} = \{(a_m - a_{m'}) + (b_n - b_{n'}) \cdot D\} \quad (13)$$

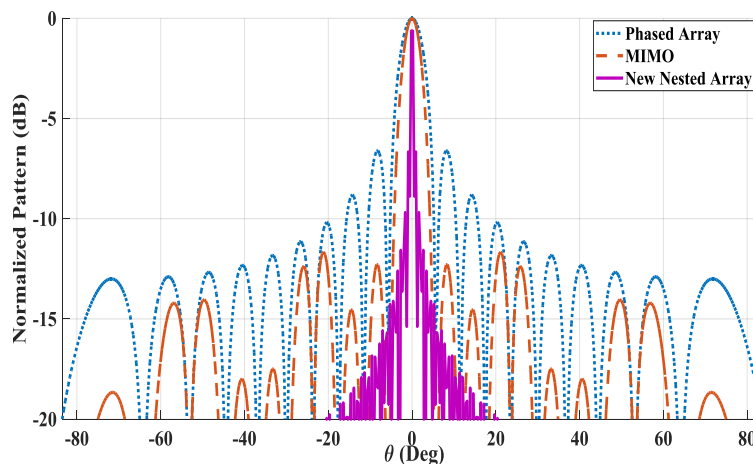
برای نمونه یک رادار MIMO با ۴ المان فرستنده، ۵ المان گیرنده و فاصله بین المانی $D=11$ در شکل (۳) آورده شده است. در این مثال درجه آزادی آرایه همبسته تفاضلی فرستنده برابر ۱۱ بود و در نتیجه فاصله بین المانی در آرایه گیرنده نیز همین مقدار انتخاب شد. آرایه نهایی به دست آمده یک آرایه یکنواخت بدون حفره به طول ۱۸۷ است که البته فقط قسمت غیر منفی آن در شکل (۳) نمایش داده شده است. برای محاسبه درجه آزادی آرایه تودرتوی جدید می‌توان از رابطه زیر استفاده کرد [۶].

$$f = f_M \cdot f_N \quad f = f_M \cdot f_N \quad (14)$$

در رابطه بالا f_M, f_N به ترتیب درجه آزادی آرایه گیرنده و فرستنده هستند. اثبات این رابطه در مرجع [۶] آورده شده است. به کمک روش ارائه شده می‌توان درجه آزادی بزرگتری فقط با $M+N$ المان به دست آورد. در مثال مطرح شده درجه آزادی آرایه تودرتوی فرستنده مطابق رابطه (۹) برابر ۱۱ و برای گیرنده این مقدار برابر ۱۷ به دست می‌آید که با قرار دادن این مقادیر در رابطه (۱۴) درجه آزادی آرایه تودرتوی جدید به دست می‌آید. تنها با ۹ المان فیزیکی یک رادار MIMO با ۱۸۷ المان مجازی طراحی شده است. برای درک بهتر میزان تاثیر آرایه جدید بر روی افزایش تفکیک پذیری، الگوی تشعشع آرایه تودرتوی جدید به همراه الگوی تشعشع آرایه فازی و الگوی تشعشع یک رادار MIMO معمولی در شکل (۴) آورده شده است. همان‌طور که از این نمودار مشخص است پهنای بیم چینش جدید بسیار کمتر از دو چینش دیگر است. در شرایطی که تعداد مشخصی المان فیزیکی داشته باشیم، می‌توان با توزیع بهینه این المان‌ها بین فرستنده و گیرنده به درجه آزادی بیشینه دست پیدا کرد. مرجع [۶] نشان داده شده است که مقادیر بهینه M و N به ازای یک مقدار $M+N=K$ مشخص از رابطه زیر به دست می‌آید.

$$\begin{aligned} M=N=K/2, & \quad K \text{ is even} \\ M=(K-1)/2, N=(K+1)/2, & \quad K \text{ is odd} \end{aligned} \quad (15)$$

در رابطه بالا K مجموع المان‌های آرایه M و N تعداد المان‌های زیر آرایه است.



شکل (۴): پترن چینش‌های مختلف آرایه

Figure (4): Pattern of different array configuration

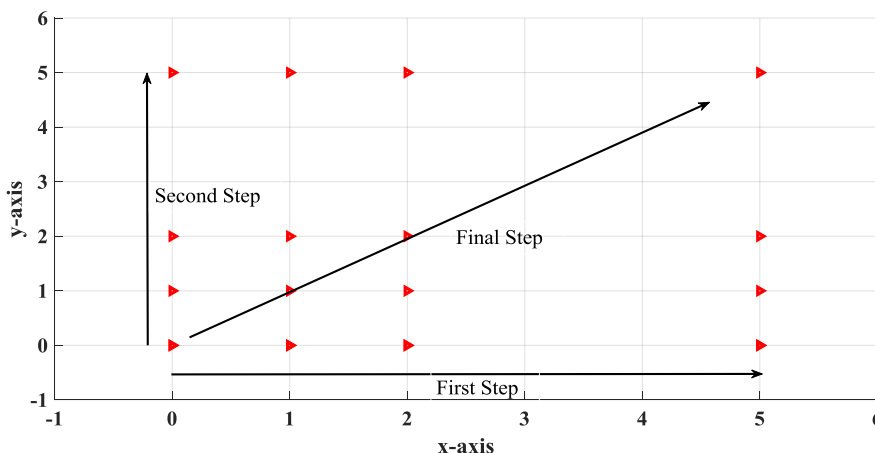
۵- رادار MIMO با آرایه تودرتو در دو بعد

محل قرارگیری المان‌های یک آرایه دوبعدی به صورت یک شبکه است. هر شبکه توسط یک ماتریس سازنده به صورت $V=[v_1 \ v_2]$ با اندازه 2×2 ساخته می‌شود. دو بردار v_1 و v_2 که هر کدام به ابعاد 2×1 هستند تعیین کننده مختصات دوبعدی مکان هر کدام از المان‌های آرایه هستند. این بردارها و ضرایب صحیح آن‌ها تشکیل دهنده یک شبکه خواهند بود که آنتن‌ها بر روی تقاطع خطوط آن قرار می‌گیرند. تعیین بردارهای سازنده شبکه چالش اصلی در طراحی آرایه دوبعدی است [۱۶].

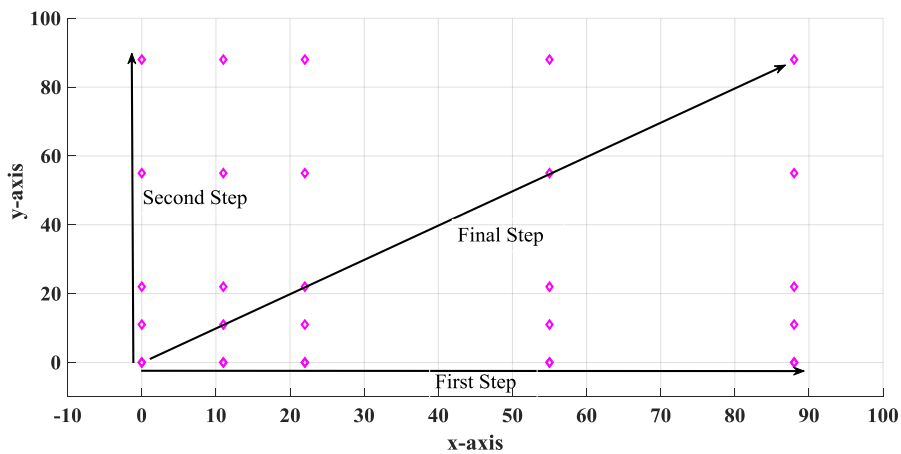
مشابه حالت آرایه تودرتوی تک بعدی که از به هم پیوستن دو آرایه‌ی یکنواخت با فاصله بین سنسوری متفاوت تشکیل می‌شود، برای تشکیل آرایه تودرتوی دوبعدی نیز باید دو شبکه با فاصله بین المانی مختلف را در نظر بگیریم. چینش المان‌ها در یکی از شبکه‌ها به صورت پراکنده و در دیگری به صورت متراکم خواهد بود. در این مقاله ما آرایه فرستنده را به صورت متراکم و آرایه گیرنده را به صورت پراکنده طراحی می‌کنیم. در روش ارائه شده، هر دو شبکه به صورت مربعی خواهند بود. به همین دلیل هر دو بردار سازنده شبکه مشابه بوده و نیاز است تا چینش در یک بعد را تعیین کنیم. ایده اصلی استفاده شده در این مقاله استفاده از روش تودرتوی جدید برای چینش این المان‌ها در یک بعد است.

در گام اول طراحی آرایه دوبعدی با چینش تودرتوی جدید، محل قرارگیری المان‌های آرایه گیرنده را مشخص می‌کنیم. به عنوان مثال در صورتی که تعداد ۱۶ عدد المان برای آرایه فرستنده در نظر گرفته باشیم، ۴ المان را مطابق شکل (۵) بر روی محور x قرار می‌دهیم. نحوه قرارگیری این المان‌ها بر روی یک محور دقیقاً از روش چینش آرایه تودرتو و مشابه آنچه در شکل (۵) نشان داده شده است، خواهد بود. در گام بعدی این المان‌ها را دقیقاً مشابه محور x بر روی محور y نیز قرار می‌دهیم. در این مرحله دو ضلع اصلی سطحی که المان‌های گیرنده قرار می‌گیرند را تشکیل داده‌ایم. در گام آخر شبکه قرارگیری المان‌های گیرنده را دقیقاً مطابق الگوی دو ضلع اصلی پر می‌کنیم. به این صورت محل قرارگیری المان‌های گیرنده در آرایه تودرتوی دوبعدی تعیین می‌شود. در شکل (۵) مراحل چینش آرایه آورده شده است.

مشابه حالت تک بعدی در گام بعدی نحوه چینش آرایه فرستنده را تعیین می‌کنیم. مشابه آرایه فرستنده، باید دو بردار که نشان دهنده اضلاع چهارضلعی آرایه گیرنده هستند را تعیین کنیم. مراحل شکل‌گیری آرایه گیرنده دقیقاً مشابه آرایه گیرنده است تنها با این تفاوت که چینش المان‌ها در هر بعد، به روش ارائه شده در چینش آرایه تودرتوی جدید خواهد بود. ابتدا متناسب با تعداد المان‌ها، چینش اولیه تعیین می‌شود و سپس فاصله بین المان‌ها در عدد D که همان درجه آزادی آرایه گیرنده است ضرب می‌شود. برای درک بهتر فرض کنید تعداد المان‌های آرایه گیرنده ۲۵ عدد باشد. به این صورت در هر ضلع باید ۵ المان قرار گیرد که هر ضلع دقیقاً مشابه چینش نمایش داده شده در شکل (۳) می‌شود. در شکل (۶) مراحل چینش آرایه آورده شده است.

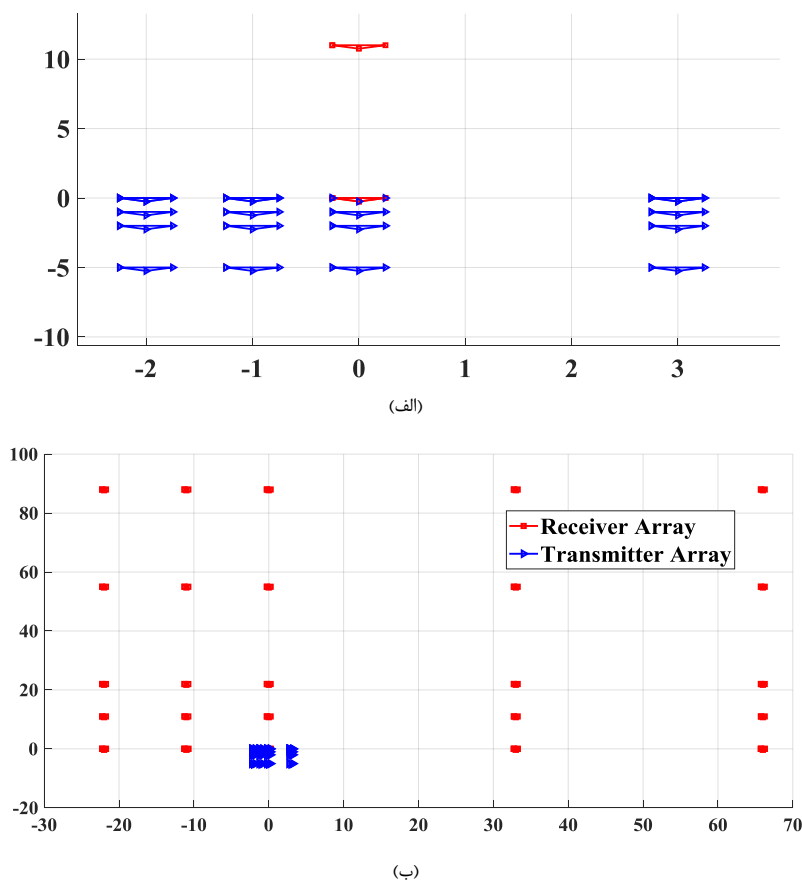


شکل (۵): مراحل چینش آرایه گیرنده
Figure (5): Steps to arrange the receiver array



شکل (۶): مراحل چینش آرایه فرستنده
Figure (6): Steps to arrange the transmitter array

یکی از مراحل که نیاز است تا در طراحی آرایه دوبعدی انجام شود شیفت هر دو آرایه متراکم و پراکنده است. به این صورت می‌توان شرایطی را ایجاد کرد تا آرایه DCSC نهایی پوشش کامل و متقارن را داشته و فاقد حفره باشد. ما در این ساختار از بردار $[-5 \ -2]$ برای شیفت ماتریس متراکم و از $[0 \ -22]$ برای شیفت ماتریس پراکنده استفاده کردیم. در شکل (۷) چینش آرایه فیزیکی فرستنده و گیرنده پس از شیفت آورده شده است.



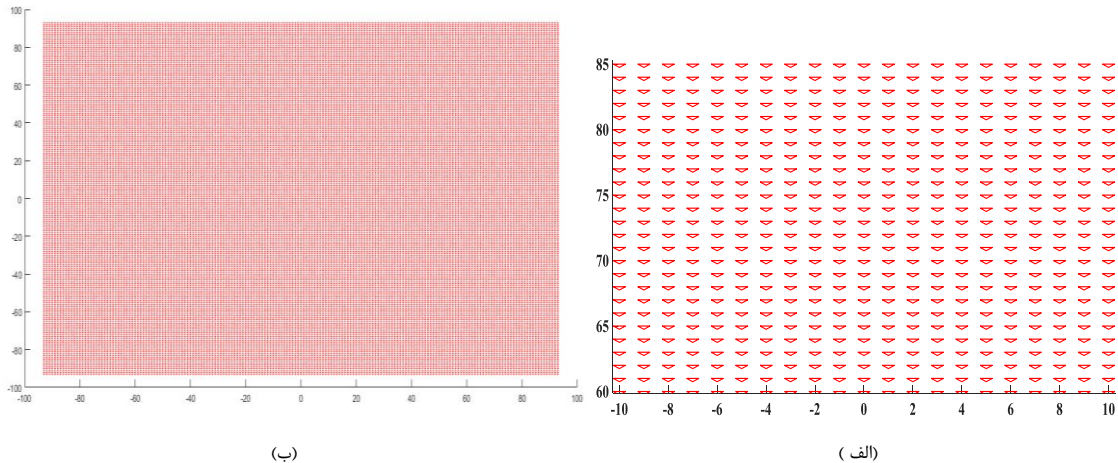
شکل (۷): چینش آرایه فیزیکی فرستنده و گیرنده پس از شیفت (الف) شکل بزرگنمایی شده جهت مشاهده بهتر آرایه فرستنده (ب)

شکل کلی فرستنده و گیرنده همزمان

Figure (7): Arrangement of physical transmitter and receiver arrays after shift (a) Enlarged transmitter and receiver shape (b) Overall transmitter and receiver shape

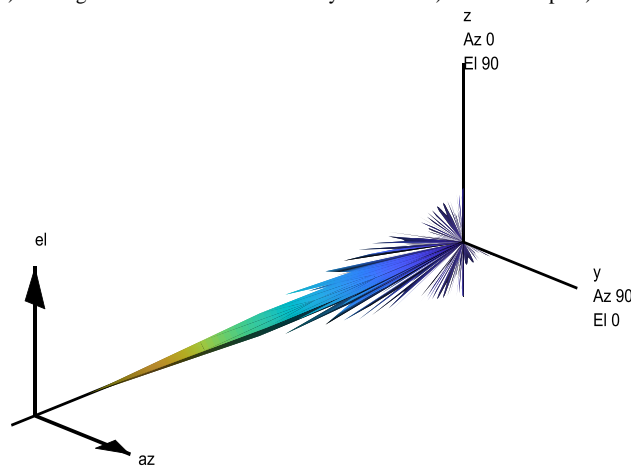
با قرار دادن المان‌های آرایه گیرنده و فرستنده به صورتی که توضیح داده شد، می‌توان آرایه مجازی با تعداد المان‌های بسیار بیشتر از آرایه فیزیکی تشکیل داد. مکان المان‌های آرایه مجازی جدید از (۱۳) در حالت دوبعدی به دست می‌آید. شکل نهایی آرایه دو بعدی تودرتوی جدید در شکل (۸) آورده شده است.

نکته بسیار مهم در این روش افزایش چشمگیر تعداد المان‌های آرایه مجازی است. در این مثال با ۱۶ المان فرستنده و ۲۵ المان گیرنده توانستیم به یک آرایه مجازی با تعداد ۳۴۹۶۹ المان مجازی متقارن و بدون حفره دست پیدا کنیم. آرایه مجازی نهایی بسیار بزرگ‌تر از آرایه‌های فرستنده و گیرنده است. الگوی تشعشی سه بعدی به دست آمده از این روش با این تعداد المان در شکل (۹) آورده شده است.



شکل (۸): چینش المان‌های آرایه مجازی DCSC (الف) شکل بزرگنمایی شده (ب) شکل کلی

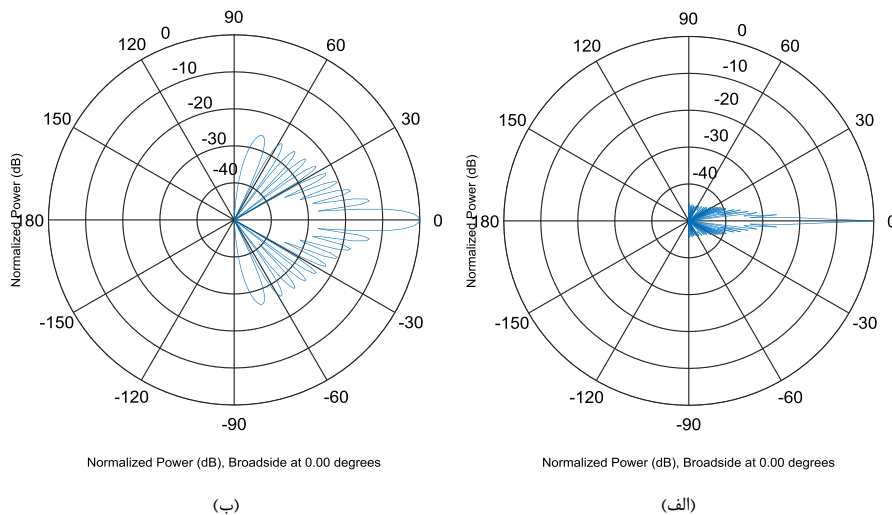
Figure (8): Arrangement of DCSC virtual Array elements a) zoomed shape b) overall shape



شکل (۹): الگوی تشعشی سه بعدی ناشی از چینش تودرتوی دوبعدی با ۱۶ المان فرستنده و ۲۵ المان گیرنده

Figure (9): 3D pattern from 2D arrangement with 16 transmitter and 25 receiver elements

عملکرد الگوریتم پیشنهادی در این مقاله زمانی که با الگوریتم MIMO با کم‌ترین افزونگی مقایسه شد، بهتر دیده می‌شود. برای این منظور در نمودار الگوی تشعشی قطبی آرایه برای هر دو حالت در شکل (۱۰) آورده شده است. همان‌طور که این نمودار نشان می‌دهد پهنای بزم آرایه با اعمال الگوریتم DCSC نسبت به حالت قبل بسیار کاهش پیدا کرده است. این موضوع سبب افزایش بهره آرایه می‌شود. از طرف دیگر به خوبی می‌توان دید که سطح گلبیگ‌های کناری در آرایه مدنظر نسبت به حالت دیگر خیلی پایین‌تر است. این موضوع نیز یکی دیگر از مزایای اعمال این الگوریتم است.



شکل (۱۰): نمودار پترن قطبی آرایه الف) با اعمال الگوریتم پیشنهادی این مقاله ب) با اعمال الگوریتم کم‌ترین افزودگی

Figure (10): Diagram of polar pattern of array a) By applying the DCSC algorithm of this article b) by applying the Minimum Redundancy algorithm

به منظور مقایسه بهتر بین روش‌های مختلف چینش المان‌های رادار MIMO و همچنین تأثیر افزایش تعداد المان‌های آرایه مجازی بر روی افزایش تفکیک‌پذیری، در جدول (۱) آورده شده است. همان‌طور که در این جدول مشخص است، روش DCSC در دو بعد افزایش چشمگیری در تعداد المان‌های آرایه مجازی ایجاد کرده است که نتیجه آن کاهش پهنای زاویه‌ای بیم در گلب‌گ اصلی و در نتیجه افزایش تفکیک‌پذیری زاویه‌ای است. همچنین سطح گلب‌گ کناری در روش پیشنهادی این مقاله به صورت چشمگیری افزایش پیدا کرده است.

Table (1): Comparison of different methods of arranging MIMO array elements in two dimensions assuming 16 transmitter and 25 receiver elements

جدول (۱): مقایسه روش‌های مختلف چینش المان‌های آرایه MIMO در دو بعد با فرض ۱۶ المان فرستنده و ۲۵ المان گیرنده

نوع آرایه	تعداد المان مجازی	پهنای بیم نصف توان ^{۱۳}	سطح گلب‌گ کناری
آرایه MIMO با کم‌ترین افزودگی ^{۱۴}	۴۰۰	۴٫۸۶ درجه	۱۴ دسی‌بل
آرایه DCSC	۳۴۹۶۹	۰٫۳ درجه	۲۶ دسی‌بل

۶- نتیجه‌گیری

در این مقاله به منظور افزایش تفکیک‌پذیری زاویه‌ای رادارهای MIMO روش تودرتوی جدید در دو بعد پیاده‌سازی شده است. مبانی اصلی استفاده از آرایه مجازی با توجه به مدل سیگنال دریافتی در رادارها مورد بررسی قرار گرفت و پس از آن روش تودرتو به عنوان یک روش چینش المان بهینه بررسی شد. روش تودرتوی جدید یک ایده بسیار کاربردی است که اخیراً بسیار مورد توجه قرار گرفته است. اصول پیاده‌سازی این روش در یک بعد به تفصیل در این مقاله بیان شده است. ما در این مقاله با تلفیق آرایه تودرتوی جدید و همچنین آرایه دوبعدی، یک آرایه تودرتوی جدید دوبعدی با تعداد المان بسیار بیشتر از المان‌های فیزیکی را معرفی کردیم. دستاوردهای به دست آمده ناشی از اعمال این الگوریتم، شامل بهبود بهره آرایه، باریک شدن بیم آرایه و کاهش سطح گلب‌گ‌های کناری آرایه به خوبی در نتایج این مقاله آورده شده است.

References

مراجع

- [1] D.J. Rabideau, P. Parker, "Ubiquitous MIMO multifunction digital array radar", Proceeding of the IEEE-ACSSC, Pacific Grove, CA, USA, vol. 1, pp. 1057-1064, Nov. 2003 (doi: 10.1109/ACSSC.2003.1292087).
- [2] J. Li, P. Stoica, "MIMO radar with colocated antennas", IEEE Signal Processing Magazine, vol. 24, no. 5, pp. 106-114, Sept. 2007 (doi: 10.1109/MSP.2007.904812).

- [3] M.A. Richards, J. Scheer, W.A. Holm, W.L. Melvin, Principles of modern radar, Citeseer, pp. 395-502, 2010.
- [4] M.S. Davis, G.A. Showman, A.D. Lanterman, "Coherent MIMO radar: The phased array and orthogonal waveforms", IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine, vol. 29, no. 8, pp. 76-91, Aug. 2014 (doi:10.1109/MAES.2014.130148).
- [5] M.M.E. Asgari, R. Hafezifard, "Improved angular tracking accuracy in phased array radar", Journal of Intelligent Procedures in Electrical Technology, vol. 9, no. 33, Spring 2018 (in Persian).
- [6] M. Yang, L. Sun, X. Yuan, B. Chen, "A new nested MIMO array with increased degrees of freedom and hole-free difference coarray", IEEE Signal Processing Letters, vol. 25, no. 1, pp. 40-44, Jan. 2018 (doi: 10.1109/LSP.2017.2766294).
- [7] S. Qin, Y.D. Zhang, M.G. Amin, "DOA estimation of mixed coherent and uncorrelated targets exploiting coprime MIMO radar", Digital Signal Processing, vol. 61, no. 2, pp. 26-34, Feb. 2017 (doi: 10.1016/j.dsp.2016.06.006).
- [8] S. Qin, Y.D. Zhang, M.G. Amin, "DOA estimation of mixed coherent and uncorrelated signals exploiting a nested MIMO system", Proceeding of the IEEE/BenMAS, Philadelphia, PA, Sept. 2014 (doi: 10.1016/j.dsp.2016.06.006)
- [9] C.-C. Weng, P. Vaidyanathan, "Nonuniform sparse array design for active sensing", Proceeding of IEEE/ASILOMAR, Pacific Grove, CA, USA, Nov. 2011 (doi: 10.1109/ACSSC.2011.6190175).
- [10] E. BouDaher, F. Ahmad, M. G. Amin, "Sparsity-based direction finding of coherent and uncorrelated targets using active nonuniform arrays", IEEE Signal Processing Letters, vol. 22, no. 10, pp. 1628-1632, Oct. 2015 (doi: 10.1109/LSP.2015.2417807).
- [11] C.-Y. Chen, P. P. Vaidyanathan, "Minimum redundancy MIMO radars", Proceeding of the IEEE/ISCAS, Seattle, WA, USA, May 2008. (doi: 10.1109/ISCAS.2008.4541350).
- [12] D. Pearson, S. U. Pillai, Y. Lee, "An algorithm for near-optimal placement of sensor elements", IEEE Transactions on Information Theory, vol. 36, no. 6, pp. 1280-1284, Sept. 1990. (doi: 10.1109/18.59928)
- [13] C. S. Ruf, "Numerical annealing of low-redundancy linear arrays", IEEE Trans. on Antennas and Propagation, vol. 41, no. 1, pp. 85-90, Jan. 1993. (doi: 10.1109/8.210119).
- [14] D. A. Linebarger, I. H. Sudborough, I. G. Tollis, "Difference bases and sparse sensor arrays", IEEE Transactions on information theory, vol. 39, no. 2, pp. 716-721, Feb. 1993. (doi: 10.1109/18.212309)
- [15] D. Linebarger, "A fast method for computing the coarray of sparse linear arrays", IEEE Trans. on Antennas and Propagation, vol. 40, no. 9, pp. 1109-1112, Sept. 1992 (doi: 10.1109/8.166540).
- [16] P. Pal, P. Vaidyanathan, "Nested arrays in two dimensions, Part I: Geometrical considerations", IEEE Transactions on Signal Processing, vol. 60, no. 9, pp. 4694-4705, Sept. 2012 (doi: 10.1109/TSP.2012.22038-14)
- [17] S. U. Pillai, Y. Bar-Ness, F. Haber, "A new approach to array geometry for improved spatial spectrum estimation", Proceedings of the IEEE, vol. 73, no. 10, pp. 1522-1524, Oct. 1985 (doi: 10.1109/PROC.198-5.13324).
- [18] P. Pal, P. P. Vaidyanathan, "Nested arrays: A novel approach to array processing with enhanced degrees of freedom", IEEE Trans. on Signal Processing, vol. 58, no. 8, pp. 4167-4181, Aug. 2010 (doi: 10.1109/TSP.2010.2049264)
- [19] P. Alinezhad, "Analysis and design of nested conformal arrays", Master of Science Faculty of Engineering Department of Electrical Engineering, Shahid Bahonar University of Kerman, Kerman, 2014 (in Persian).
- [20] M. Yang, A. M. Haimovich, B. Chen, and X. Yuan, "A new array geometry for DOA estimation with enhanced degrees of freedom", Proceeding of the IEEE/ICASSP, Shanghai, China, May 2016 (doi: 10.1109/ICASSP.2016.7472236).

زیر نویس‌ها:

1. Multi input multi output
2. Phased array antenna
3. Waveform
4. Nested
5. Co prime
6. Pearson
7. Ruf
8. Linebarger
9. Sparse
10. Second order moments
11. Exhaustive search algorithm
12. Difference co-array of the sum co-array (DCSC)

13. Half power beam width (HPBW)
14. Minimum redundancy (MR)