

طراحی کد فضا زمان در رادارهای آرایه فازی MIMO برای رسیدن به قدرت تفکیک بالا در برد و سرعت

روح‌اله وحدانی، حسین خالقی بیزکی و محسن فلاح جوشقانی

استخراج‌شده محتوی اطلاعاتی در مورد یک مسیر ارسال خاص می‌باشند. در این راستا، دو رویکرد برای استفاده از این اطلاعات وجود دارد. در رویکرد اول، سناریوی رادار با آنتن‌های ارسال جدا از هم است که فاصله زیادی با هم دارند و این سناریو می‌تواند چندگانگی^۴ فضایی را افزایش دهد. المان‌های آنتن ارسال با فاصله دور از هم قرار دارند که هر کدام از آنها جنبه‌های مختلفی از هدف را می‌بینند. در نتیجه، سطح مقطع راداری هدف برای مسیرهای مختلف به صورت متغیرهای تصادفی مستقل از هم هستند و بنابراین هر کدام از مؤلفه‌های استخراج‌شده توسط فیلتر منطبق در گیرنده محتوی اطلاعات مستقلی از هدف می‌باشند. در این سناریو، شناسایی هدف با عملکرد بهتری به دست می‌آید و علت امر نیز این است که اندازه‌گیری‌های مختلف و مستقلی از هدف در دسترس است. در رویکرد دوم، رادار MIMO با آنتن‌هایی با فواصل نزدیک مورد نظر است که منجر به تفکیک فضایی بهتر خواهد شد، به طوری که سطح مقطع راداری مشاهده‌شده توسط همه مسیرهای ارسال یکسان است. مؤلفه‌های استخراج‌شده توسط فیلترهای منطبق در هر آنتن دریافت، محتوی اطلاعاتی در مورد یک مسیر ارسال از یک آنتن ارسال به سمت یک آنتن دریافت هستند و بنابراین با جمع‌آوری تمامی اطلاعات در مورد مسیرهای ارسال، تفکیک فضایی بهتری قابل دستیابی است. لازم به ذکر است که این نوع سیستم راداری مزیت‌های فراوانی از جمله قابلیت بسیار بالا در حذف تداخل، بهبود پارامتر شناسایی و افزایش انعطاف‌پذیری در طراحی الگوی پرتو ارسال را داراست. تمرکز ما در این مقاله، روی رادارهایی با آنتن‌های ارسال با فواصل نزدیک می‌باشد.

قابلیت تفکیک سیستم رادار می‌تواند با پاسخ یک هدف نقطه‌ای در خروجی فیلتر منطبق تعیین شود. چنین پاسخی می‌تواند با یک تابع به اسم تابع ابهام بیان شود. ایده تابع ابهام توسط [۱۲] در رادار MIMO گسترش پیدا کرد. همان طور که در [۱۲] نشان داده شده است، شکل موج‌های ارسالی بر قدرت تفکیک رادارهای MIMO در برد، سرعت و زاویه تأثیرگذار هستند. منظور از قدرت تفکیک رادار در برد و سرعت، قدرت سامانه راداری در تخمین پارامتر برد و سرعت است به طوری که این پارامترهای تخمینی بیشترین انطباق را با پارامترهای واقعی هدف داشته باشند. ابزار سنجش میزان این تطابق تابع ابهام می‌باشد. در این مقاله، تابع ابهام به صورت تابعی از عدم انطباق در برد و عدم انطباق در سرعت تخمینی بیان می‌شود. بنابراین هرچه تمرکز این تابع حول مبدأ بیشتر باشد، نشان از تطابق بیشتر پارامترهای تخمینی واقعی هدف دارند. هدف ما در مقاله، باریک‌سازی تابع ابهام با استفاده از کدهای فضا زمان می‌باشد، زیرا با باریک‌شده تابع ابهام حول مبدأ، بیشترین انرژی سیگنال

چکیده: در این مقاله، از کدهای فضا زمان برای رادار MIMO برای رسیدن به وضوح بالا در برد و سرعت هدف استفاده شده است. تابع ابهام دوبعدی به عنوان یک ابزار برای مقایسه عملکرد رادار در زمینه قدرت تفکیک شناخته می‌شود. یک کد فضا زمان می‌تواند بر اساس کمیته‌سازی فاصله بین پارامترهای واقعی هدف در برد، سرعت و زاویه طراحی شود. بدین منظور می‌توان با تحلیل تابع ابهام و باریک‌سازی آن در حد امکان به قدرت تفکیک بالا دست یافت. در این مقاله، تابع ابهام با دو متغیر عدم انطباق دامنه و سرعت در نظر گرفته شده و یک معیار جدید برای دستیابی به عملکرد با وضوح بالا در این زمینه پیشنهاد گردیده است. در این مورد با استفاده از بهینه‌سازی توابع هزینه پیشنهادی، کد فضا زمان مطلوب استخراج می‌شود. طرح پیشنهادی را می‌توان به رادار آرایه فازی MIMO نیز تعمیم داد. همچنین نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که طرح پیشنهادی ما دارای تابع ابهام بسیار باریک در اطراف مبدأ است در حالی که عملکرد بسیار نزدیک به حالت بهینه در زمینه احتمال شناسایی هدف را نیز دارا می‌باشد.

کلیدواژه: کد فضا زمان، رادار آرایه فازی MIMO، قدرت تفکیک، تابع ابهام، برنامه‌ریزی غیر خطی.

۱- مقدمه

رادارهای چندرودی چندخروجی^۱ (MIMO) امروزه گستره وسیعی از تحقیقات در زمینه رادار را تشکیل می‌دهند [۱] تا [۹] که این رادارها به دو نوع کلی تقسیم می‌شوند: ۱) رادارهای با فواصل آنتن کم^۲ (در مقایسه با طول موج) [۱۰] و ۲) رادارهای با فواصل آنتن زیاد [۱۱].

در گذشته، در رادارهای یک‌رودی چندخروجی^۳ (SIMO)، سیستم تنها قادر به ارسال ضرایبی از یک شکل موج خاص بود. سیستم‌های راداری چندرودی چندخروجی ارسال چندین شکل موج متعامد (و یا ناهم‌دوس) را ممکن می‌سازند که این شکل موج‌ها توسط مجموعه‌ای از فیلترهای منطبق در گیرنده استخراج می‌شوند [۲]. هر کدام از مؤلفه‌های

این مقاله در تاریخ ۱۱ مهر ماه ۱۳۹۸ دریافت و در تاریخ ۱۲ آبان ماه ۱۴۰۰ بازنگری شد.

روح‌اله وحدانی، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، مجتمع دانشگاهی برق و کامپیوتر، تهران، ایران، (email: rov_68@gmail.com).

حسین خالقی بیزکی (نویسنده مسئول)، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، مجتمع دانشگاهی برق و کامپیوتر، تهران، ایران، (email: bizaki@gmail.com).

محسن فلاح جوشقانی، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، مجتمع دانشگاهی برق و کامپیوتر، تهران، ایران، (email: mohsen_fallah@mut.ac.ir).

1. Multi Input Multi Output
2. Colocated
3. Single Input Multi Output

$\{s_m(t)\}$ بر تفکیک فضایی (زاویه)، داپلر و برد سیستم راداری تأثیر می‌گذارند. با تغییر متغیر $\tau - \tau' \rightarrow \tau$ و همچنین $\nu - \nu' \rightarrow \nu$ ، این بار τ بیانگر میزان عدم انطباق در تأخیر بوده و $\tau = 0$ نشان‌دهنده انطباق کامل و تفکیک کامل در تأخیر یا برد می‌باشد و همچنین ν بیانگر میزان عدم انطباق در داپلر بوده و $\nu = 0$ نشان‌دهنده انطباق کامل و تفکیک کامل در داپلر یا سرعت هدف است. بنابراین تابع ابهام سیستم راداری MIMO به صورت زیر تعریف می‌شود [۱۴]

$$\chi(\tau, \nu, f, f') = \sum_{m=-M_t}^{M_t-1} \sum_{m'=-M_t}^{M_t-1} \chi_{m,n}^s(\tau, \nu) e^{j\pi(mf - m'f')\gamma} \quad (۴)$$

که $\chi_{m,n}^s(\tau, \nu)$ تابع ابهام مقابل یا کناری نامیده می‌شود و برابر است با

$$\chi_{m,n}^s(\tau, \nu) = \int_{-\infty}^{+\infty} s_m(t) s_n^*(t + \tau) e^{j\pi\nu t} dt \quad (۵)$$

تابع ابهام به دست آمده در (۴) به شکل موج ارسال وابسته است و بنابراین می‌توان با طراحی شکل موج ارسال به تابع ابهام با مشخصات مطلوب دست یافت. برای رسیدن به تابع ابهام ایده‌آل با پیک توان در مبدأ مختصات و کمترین توان خارج از مبدأ، باید از شکل موج تابع دلتای دیراک استفاده کرد که در عمل، تولید آن نیازمند داشتن پهنای باند بی‌نهایت است و از نظر عملی غیر ممکن می‌باشد. یکی از پارامترهایی که می‌توان در شکل موج سیستم راداری استفاده نمود، کدهای فضا زمان است که در بخش بعد به بررسی آن خواهیم پرداخت.

۳- تابع ابهام و رابطه آن با ماتریس کد فضا زمان

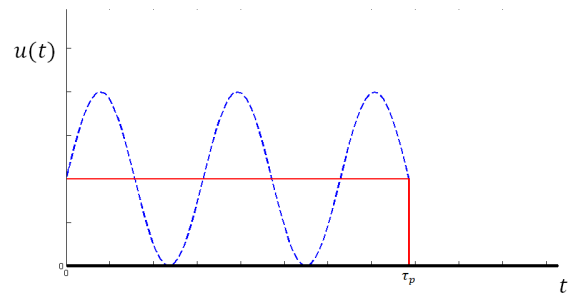
رادار چندآنتنی با M_t آنتن ارسال را در نظر بگیرید که آنتن‌ها از ۰ تا $M_t - 1$ شماره‌گذاری شده‌اند. فرض کنید سیگنال ارسال از آنتن m ام به صورت $s_m(t) = \sum_{n=-M_t}^{M_t-1} x_m(n)u(t - n\Delta T)$ باشد. همان شکل موج ارسال است که می‌تواند هر شکل موج دلخواهی باشد و ΔT همان زمان تکرار پالس (PRI) است. در اینجا شکل موج ارسال به صورت پالس مستطیلی با انرژی واحد با طول زمانی τ_p انتخاب شده که در شکل ۱ نشان داده شده است. همچنین شکل موج ارسال از آنتن m ام به صورت شکل ۲ خواهد بود (که $\tau_p < \Delta T$ است). همان $x_m(n)$ محتویات کد فضا زمان است که m مشخص‌کننده شماره آنتن و n بیانگر شماره گسترش زمانی پالس می‌باشد. هدف ما در این مقاله، طراحی محتویات کد فضا زمان به نحوی است که تابع ابهام به دست آمده در (۴) هرچه بیشتر حول مبدأ باریک باشد.

فرض کنید زاویه مربوط به هدف ثابت و انطباق کامل در زاویه $(f = f' = f_s \equiv cte)$ وجود داشته باشد. همان طور که پیشتر نیز بیان شد، تابع ابهام در این حالت تابعی از متغیرهای τ و ν است و به صورت زیر تعریف می‌شود [۱۴]

$$\chi(\tau, \nu) = \sum_{m=-M_t}^{M_t-1} \sum_{n=-M_t}^{M_t-1} \chi_{m,n}^s(\tau, \nu) e^{j\pi\nu f_s(m-n)\gamma} \quad (۶)$$

که $\chi_{m,n}^s(\tau, \nu)$ مطابق (۵) همان تابع ابهام کناری خواهد بود.

تمام شکل موج‌های ارسال $x_m(n)$ را با عنوان کلمات کد در نظر بگیرید. با قراردادن تمامی کلمات کد به ازای $m = 0, 1, \dots, M_t - 1$ و $n = 0, 1, \dots, N - 1$ در ماتریس A با ابعاد $M_t \times N$ ، ماتریس کد فضا



شکل ۱: شکل موج ارسال به صورت پالس مستطیلی یا مدولاسیون روی پالس مستطیلی.

ارسالی حول مبدأ مختصات با بیشترین انطباق و یا کمترین اختلاف در برد، سرعت و زاویه جمع خواهد شد. در [۱۳]، De Maio و همکارانش طرحی را با استفاده از کدهای فضا زمان پیشنهاد دادند که منجر به احتمال شناسایی هدف بسیار خوبی خواهد شد. اما این طرح، الزاماً منجر به قدرت تفکیک بالایی در تعیین پارامترهای واقعی هدف نمی‌شود. در این مقاله، تمرکز ما بر روی این موضوع خواهد بود که کد فضا زمانی (STC) پیشنهاد دهیم که منجر به قدرت تفکیک بالا در برد و سرعت هدف شود.

۲- مدل سیستم و تابع ابهام

یک هدف را در (τ, ν, f) در نظر بگیرید که τ تأخیر مربوط به برد یا فاصله هدف از سیستم راداری است. همچنین ν فرکانس داپلر هدف متناظر با سرعت هدف و f فرکانس فضایی نرمالیزه شده هدف می‌باشد که به صورت زیر تعریف می‌شود [۱۴]

$$f = \nu \pi \frac{d_R}{\lambda} \sin \theta \quad (۱)$$

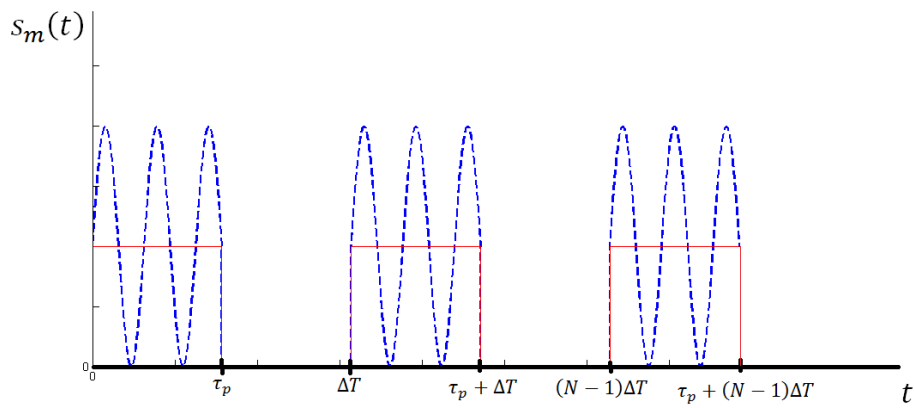
که θ زاویه هدف و λ طول موج است. پاسخ دمدوله شده هدف در n امین آنتن دریافت متناسب است با [۱۴]

$$y_n^{\tau, \nu, f}(t) \approx \sum_{m=-M_t}^{M_t-1} s_m(t - \tau) e^{j\pi\nu t} e^{j\pi f(m\gamma + n)} \quad (۲)$$

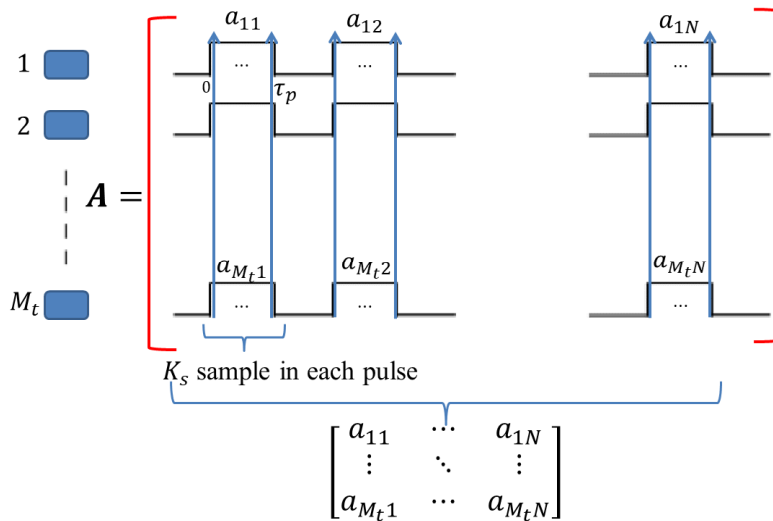
برای $n = 0, 1, \dots, M_r - 1$ که M_r تعداد آنتن‌های دریافت، $s_m(t)$ شکل موج ارسال از m امین آنتن ارسال، $\gamma \triangleq d_T/d_R$ و M_t تعداد آنتن‌های ارسال می‌باشد. همچنین d_T فاصله آنتن‌های ارسال از هم و d_R فاصله آنتن‌های دریافت از هم می‌باشد. حال اگر گیرنده بخواهد اطلاعات مربوط به هدف را از سیگنال دریافتی استخراج نماید، از فیلتر منطبق با پارامترهای مفروض (τ', ν', f') استفاده می‌کند که این پارامترهای مفروض تخمینی از پارامترهای واقعی هستند. با این رویکرد، خروجی فیلتر منطبق به صورت معادله زیر خواهد بود [۱۴]

$$\sum_{n=-M_t}^{M_t-1} \int_{-\infty}^{+\infty} y_n^{\tau, \nu, f}(t) \cdot (y_n^{\tau', \nu', f'}(t))^* dt = \left(\sum_{n=-M_t}^{M_t-1} e^{j\pi\nu(f-f')n} \right) \sum_{m=-M_t}^{M_t-1} \sum_{m'=-M_t}^{M_t-1} \int_{-\infty}^{+\infty} s_m(t - \tau) s_{m'}^*(t - \tau') e^{j\pi\nu(\nu - \nu')t} dt \cdot e^{j\pi\nu(mf - m'f')} \quad (۳)$$

قسمت اول در سمت راست رابطه فوق بیانگر پردازش فضایی در گیرنده است که از شکل موج ارسال تأثیر نمی‌پذیرد. قسمت دوم در سمت راست رابطه بالا بیانگر این موضوع است که چگونه شکل موج‌های ارسال



شکل ۲: شکل موج ارسالی از آنتن m ام به صورت قطار پالس کدگذاری شده.



شکل ۳: کدینگ فضا زمان در رادارهای چندآنتنی.

می‌شوند. بعد از معرفی این دو معیار، روشی ساده برای ترکیب این دو نیز پیشنهاد خواهیم کرد. در واقع هدف ما پیدا کردن کد فضا زمان مناسب با هدف بهینه‌سازی توابع هزینه پیشنهادی می‌باشد.

۴-۱ معیار اول: باریک‌بودن تابع ابهام حول مبدأ

در قدم اول برای سادگی، تابع ابهام (۶) را در نظر بگیرید که گیرنده هیچ خطایی در تخمین زاویه ورود سیگنال ندارد. در واقع برای سادگی، فرض بر این است که زاویه واقعی هدف با زاویه تخمینی در نظر گرفته شده در فیلتر منطبق در گیرنده تطابق کامل دارد. در این صورت، تابع ابهام، تابعی دوبعدی خواهد بود که تصویر آن بر روی محور برد و سرعت به صورت شکل ۴ می‌باشد. همان طور که در این شکل آمده است، تصویر گلبرگ اصلی روی صفحه τ و ν یک ناحیه دوبعدی است. در یک تابع ابهام مناسب، این مساحت باید تا حد امکان کوچک باشد. از سوی دیگر، تصویر بزرگ‌ترین گلبرگ فرعی روی صفحه τ و ν نیز باید تا حد امکان بزرگ باشد که نشان‌دهنده پخش شدن گلبرگ فرعی روی صفحه است. بنابراین اولین معیار را به صورت نسبت مساحت جاروب‌شده توسط گلبرگ اصلی به مساحت جاروب‌شده توسط گلبرگ فرعی به صورت زیر تعریف می‌کنیم

$$g_1 \triangleq \frac{A_{ML}}{A_{SL}} \quad (8)$$

که A_{ML} همان مساحت جاروب‌شده توسط گلبرگ اصلی و A_{SL} مساحت جاروب‌شده توسط بزرگ‌ترین گلبرگ فرعی روی صفحه (τ, ν) می‌باشد.

زمان مطابق شکل ۳ ایجاد خواهد شد. به عبارت دیگر

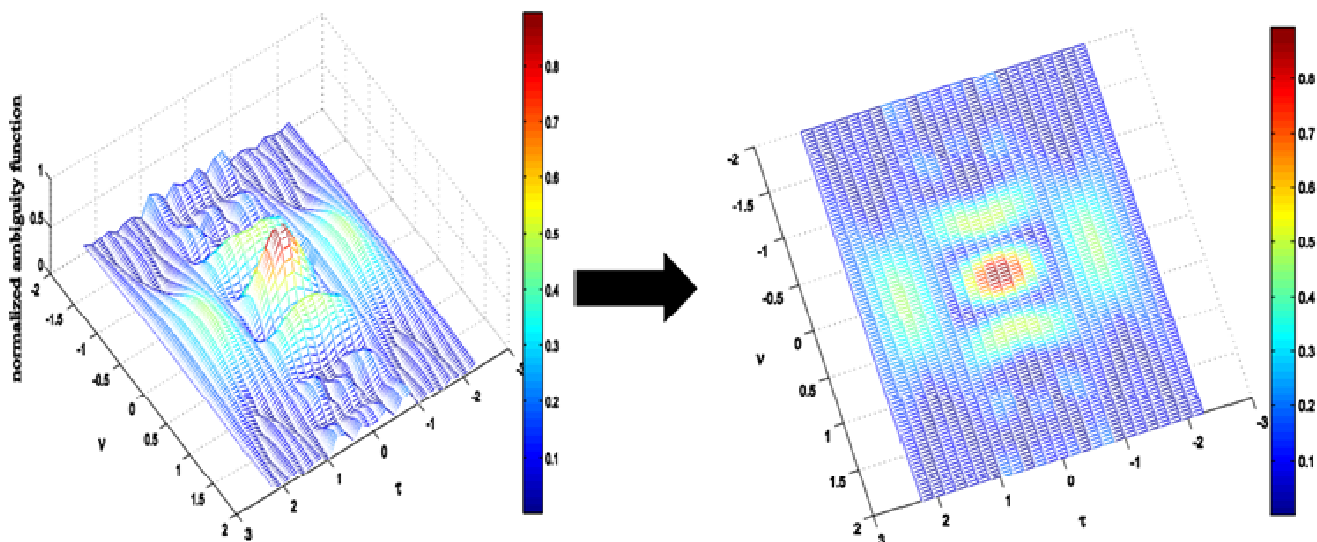
$$A = \begin{pmatrix} x_1(\cdot) & \dots & x_{(N-1)} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{M_t-1}(\cdot) & \dots & x_{M_t-1}(N-1) \end{pmatrix} \quad (7)$$

همچنین برای محدود کردن توان ارسالی، شرط توان $trace(AA^H) = M_t$ برقرار می‌باشد. طبق روابط فوق، تابع ابهام تابعی از ماتریس A است، به طوری که با تغییر ماتریس کد ارسالی، شکل تابع ابهام تغییر می‌کند. در قسمت بعدی، شبیه‌سازی تابع ابهام مطابق (۶) انجام شده است. در گام بعدی، دو تابع هزینه جدید را معرفی خواهیم کرد که هر کدام بیانگر یک ویژگی کلیدی در تابع ابهام می‌باشند. سپس تمرکز ما بر روی بهینه‌سازی این توابع هزینه با توجه به محدودیت توان خواهد بود.

۴-۲ معیار باریک‌بودن تابع ابهام با فرض تطابق کامل زاویه

تابع ابهام ارتباط بسیار نزدیکی با قدرت تفکیک رادار دارد و دارای یک گلبرگ اصلی و چند گلبرگ فرعی می‌باشد. رادارهایی با قدرت تفکیک بالا، تابع ابهامی باریک حول مبدأ دارند و در واقع بیشتر انرژی تابع ابهام حول مرکز متمرکز شده است.

در ادامه دو معیار را برای سنجش میزان باریک‌بودن تابع ابهام معرفی خواهیم کرد. این معیارها ابزارهایی برای سنجش کیفیت تابع ابهام و عملکرد آن می‌باشد که با عنوان تابع هزینه در طراحی رادار شناخته



شکل ۴: تصویر تابع ابهام روی صفحه دوبعدی تأخیر و سرعت.

۵- طراحی کد فضا زمان با هدف تابع ابهام باریک

در بخش قبل، دو معیار برای ارزیابی تابع ابهام پیشنهاد شد که با کمینه‌سازی آنها می‌توان به ماتریس کد فضا زمان مناسب دست یافت. هر دو تابع هزینه، تابعی از ماتریس کد فضا زمان استفاده شده در فرستنده می‌باشند و بنابراین از این پس g_1 و g_2 را با $g_1(A)$ و $g_2(A)$ نشان می‌دهیم. مسأله بهینه‌سازی زیر را برای کمینه‌سازی این دو تابع هزینه در نظر بگیرید

$$\min_A (g_1(A), g_2(A))$$

$$\text{subject to: } \text{trace}(AA^H) = M_t \quad (10)$$

این مسأله بهینه‌سازی با چند تابع هدف می‌باشد [۱۵] و [۱۶] و برای حل آن، حالت کلی زیر را در نظر بگیرید

$$\min_x [f_1(x), f_2(x), \dots, f_n(x)]$$

$$\text{subject to: } x \in S \quad (11)$$

که n برابر تعداد توابع هدف و S مجموعه شدنی از محدودیت‌های مسأله است. در اینجا باید مفهوم بهینه پرتو^۳ را معرفی کنیم. بردار $x^* \in S$ بهینه پرتو نامیده می‌شود اگر به ازای هر بردار $x \in S$ دیگر، حداقل منجر به یک تابع هزینه بزرگ‌تر یا حداقل برابری تمام توابع هزینه‌ها شود. در حالت کلی، تعاریف زیر را خواهیم داشت [۱۵] و [۱۶]:

– یک نقطه $x^* \in S$ بهینه پرتوی ضعیف نامیده می‌شود، اگر و فقط اگر هیچ $x \in S$ وجود نداشته باشد که $f_i(x) < f_i(x^*)$ باشد (برای هر $i \in \{1, \dots, n\}$).

– یک نقطه $x^* \in S$ بهینه پرتوی ضعیف نامیده می‌شود، اگر و فقط اگر هیچ $x \in S$ وجود نداشته باشد که $f_i(x) \leq f_i(x^*)$ باشد (برای هر $i \in \{1, \dots, n\}$).

با استفاده از تعاریف فوق، چندین جواب بهینه پرتو وجود دارد که منحنی پرتو را شکل می‌دهند [۱۵] و [۱۶]. اساساً تعداد نقاط پرتو به توابع هزینه بستگی دارد. در این حالت دو سناریو را در نظر می‌گیریم. اگر بهینه‌سازی چندین تابع هدف به طور هم‌زمان امکان‌پذیر باشد، تنها یک جواب بهینه پرتو وجود خواهد داشت. از سوی دیگر، اگر بهینه‌سازی

بنابراین هرچه مقدار تابع هزینه g_1 کمتر باشد، به معنای باریک‌بودن تابع ابهام حول مبدأ و عملکرد بهتر از نظر قدرت تفکیک رادار خواهد بود.

حال تابع ابهام کلی (۴) را در نظر بگیرید که زاویه واقعی ورود سیگنال و زاویه تخمینی از سوی گیرنده متفاوت هستند ($f \neq f'$). تابع هزینه g_1 تعریف شده در (۸) می‌تواند به این حالت نیز تعمیم داده شود، به طوری که این بار تصویر گلبرگ اصلی و گلبرگ فرعی، تصویری چهاربعدی است که باید روی مختصات (τ, ν, f, f') محاسبه شود. در این حالت نیز، سطح اشغال شده باید تا حد امکان کوچک باشد تا منجر به قدرت تفکیک بالایی در برد، سرعت و زاویه گردد.

۴-۲ معیار دوم: گلبرگ اصلی بلندتر و گلبرگ فرعی کوتاه‌تر

برای داشتن تابع ابهام باریک، بیشتر انرژی باید حول مبدأ و روی گلبرگ اصلی جمع گردد. بنابراین علاوه بر تعریف تابع هزینه g_1 ، معیار دیگری را نیز تعریف می‌کنیم که بیانگر نسبت اندازه گلبرگ فرعی به اندازه گلبرگ اصلی می‌باشد. این نسبت به صورت زیر تعریف می‌شود

$$g_2 \triangleq \frac{SLL}{MLL} \quad (9)$$

که SLL^1 ارتفاع بزرگ‌ترین گلبرگ فرعی و MLL^2 ارتفاع گلبرگ اصلی است. این تابع هزینه می‌تواند برای هر دو حالت تابع ابهام ($f = f' = cte$ و $f \neq f'$) مورد استفاده قرار گیرد. هرچه مقدار g_2 کمتر باشد، قدرت تفکیک رادار بهتر است به طوری که در بهترین حالت، g_2 برابر صفر خواهد بود.

در یک سیستم راداری MIMO، g_1 و g_2 تابعی از ماتریس کد فضا زمان ارسالی است. کدهای فضا زمان مختلف منجر به توابع ابهام مختلف و در نتیجه مقادیر مختلف g_1 و g_2 می‌شوند. بنابراین در اینجا انتخاب ماتریس کد فضا زمان مناسب یک نکته کلیدی است. در ادامه، مسأله بهینه‌سازی را برای یافتن ماتریس کد فضا زمان مناسب تعریف خواهیم کرد.

1. Side Lobe Level
2. Main Lobe Level

$$\min_A \lambda g_1(A) + (1-\lambda)g_2(A) \quad (13)$$

subject to: $trace(AA^H) = M_i$

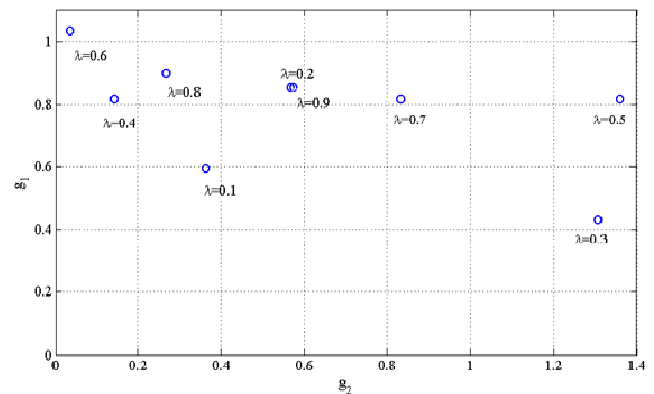
به ازای هر $0 < \lambda < 1$ جواب مسأله (۱۳) یک جواب ماتریس کد فضا زمان کارا خواهد بود. معیار تصمیم‌گیری مقدار λ را تعیین می‌کند. به عبارت دیگر، انتخاب مقدار λ به ارزش هر تابع هزینه در سناریوی رادار MIMO وابسته است. به عنوان مثال حالت $\gamma = 1$ ، $f = f' = 0.8$ ، $\Delta T = 1.5 \text{ms}$ ، $\tau_p = 1 \text{ms}$ ، $N = 2$ و $M_i = 2$ را در نظر بگیرید. در شکل ۵، جواب‌های مختلف توابع هدف به ازای مقادیر مختلف λ به دست آمده و ترسیم شده است. طبق این شکل، توزیع یکنواخت ضرایب الزاماً منجر به توزیع یکنواختی در جواب‌های کارا روی منحنی پریتو نمی‌شود. این یک ویژگی ذاتی روش مجموع ضرایب وزن‌دهی شده در مسایل بهینه‌سازی با چندین تابع هدف می‌باشد [۱۷]. برای مثال، حالتی را در نظر بگیرید که ارزش تابع هزینه $g_1(A)$ ، 70% و ارزش تابع هزینه $g_2(A)$ ، 30% می‌باشد. بنابراین در روش ضرایب وزن‌دهی شده، طبق (۱۳)، باید مقدار λ را برابر 0.7 انتخاب کرد.

کد فضا زمان استخراج‌شده از (۱۳) می‌تواند به عنوان یک جواب کارا در سمت فرستنده تعبیر شود. این جواب با تعاریف صورت‌گرفته منجر به قدرت تفکیک بالای رادار خواهد شد. بهینه‌سازی مسأله (۱۲) و (۱۳) به دلیل ماهیت غیر خطی تابع هدف و محدودیت‌های آن، یک مسأله برنامه‌ریزی غیر خطی (NLP) است. برای مسایل NLP، راه‌های ابتکاری از جمله روش PSO^۵ و الگوریتم ژنتیک (GA)^۶ می‌تواند روش حل مناسبی باشد. در این مقاله، ما از الگوریتم ژنتیک استفاده کرده‌ایم. این روش یک تکنیک بهینه‌سازی بر پایه جستجو می‌باشد که معمولاً برای یافتن جواب بهینه یا زیربهینه در مسایل بسیار سخت استفاده می‌شود. از آنجایی که جواب مسأله (۱۳) فرم بسته ندارد، ما از الگوریتم ژنتیک برای یافتن جواب بهینه بهره خواهیم گرفت. در الگوریتم ژنتیک، ما یک مجموعه از جواب‌های ممکن را داریم که شرط مسأله را اغناء می‌کنند. این جواب‌های ممکن بعد از طی فرایند ترکیب و جهش^۷ (مثل فرایندی که در ژنتیک صورت می‌گیرد)، مجموعه جدیدی را می‌سازند و این عمل تکرار می‌شود تا به بهترین جواب دست یابیم. از سوی دیگر، این روش به اطلاعاتی نظیر مشتق توابع نیاز ندارد و برای حل مسایل بهینه‌سازی با چند تابع هدف نیز مناسب می‌باشد. به علاوه، این الگوریتم برای مسایلی که فضای جستجوی جواب، فضای بزرگی باشد بسیار پرکاربرد است [۱۸] و [۱۹].

در شکل ۶ مراحل روش پیشنهادی به منظور یافتن کد فضا زمان مناسب برای به دست آوردن تابع ابهام باریک ارائه شده است. پیچیدگی الگوریتم ژنتیک استفاده‌شده به صورت $O(nM_i N)$ می‌باشد که n تعداد نسل‌های تولیدی برای رسیدن به جواب در الگوریتم ژنتیک است که در این مقاله برابر ۱۰ در نظر گرفته شده است.

۲-۵ وجود جواب بهینه

در این بخش، در مورد وجود جواب برای مسأله بهینه‌سازی تعریف‌شده در (۱۳) بحث خواهیم کرد. در ابتدا به بعضی خواص تابع هدف و محدودیت‌های مسأله بهینه‌سازی می‌پردازیم. تابع هدف تعریف‌شده در



شکل ۵: مجموعه جواب‌های کارا به ازای مقادیر مختلف λ و به ازای $\gamma = 1$ ، $M_i = 2$ و $N = 2$ ، $\tau_p = 1 \text{ms}$ ، $\Delta T = 1.5 \text{ms}$ ، $f = f' = 0.8$.

چندین تابع هدف به طور هم‌زمان امکان‌پذیر نباشد، چند جواب بهینه پریتو وجود خواهد داشت. در اینجا این سؤال مطرح می‌شود که معیار تصمیم‌گیری در مورد جواب کارا چیست. در این حالت انتخاب جواب کارا به ارزش هر یک از توابع هدف وابسته است. در واقع جواب کارا نقطه‌ای است که از میان سید چندین جواب بهینه پریتو انتخاب می‌شود. معیار تصمیم‌گیری برای انتخاب جواب کارا می‌تواند در هر سناریو متفاوت باشد. بنابراین در این سیستم، یک تصمیم‌گیرنده^۲ بعد از پیدا کردن مجموعه جواب‌ها به کار گرفته می‌شود که وظیفه تعیین بهترین جواب از میان تمام جواب‌های ممکن را به عهده خواهد داشت. یکی از روش‌های مناسب برای پیدا کردن جواب‌های کارا، استفاده از روش مجموع ضرایب وزن‌دهی شده (WS)^۳ است [۱۷]. این روش، نوعی تصمیم‌گیرنده محسوب می‌شود که مسأله بهینه‌سازی با چندین تابع هدف را به یک مسأله با یک تابع هدف تبدیل می‌کند.

۱-۵ روش مجموع ضرایب وزن‌دهی شده

مسأله بهینه‌سازی چندین تابع هدف معمولاً برای سادگی با ترکیب آنها و به دست آوردن یک تابع هدف حل می‌شود. این روش با وزن‌دهی خطی توابع هدف انجام می‌گیرد [۱۷].

به طور خاص، روش مجموع ضرایب وزن‌دهی شده یک ترکیب وزن‌دهی شده محدب از تمام توابع هدف‌ها را کمینه می‌سازد. به طوری که برای هر $0 < \lambda_i < 1$ که $\sum_{i=1}^n \lambda_i = 1$ است، خواهیم داشت [۱۷]

$$\min_x \sum_{i=1}^n \lambda_i f_i(x) \quad (12)$$

subject to: $x \in S$

که نشان‌دهنده یک مسأله بهینه‌سازی با یک تابع هدف می‌باشد. ثابت می‌شود که جواب مسأله فوق، یک جواب کارا از مسأله بهینه‌سازی با چند تابع هدف می‌باشد [۱۸] که در نتیجه یک زیرمجموعه از مجموعه جواب بهینه پریتو است.

حال مسأله بهینه‌سازی در سناریوی رادار MIMO را که در (۱۰) آمده است در نظر بگیرید که برای حل این مسأله از روش مجموع ضرایب وزن‌دهی شده استفاده می‌کنیم. بنابراین با بازنویسی آن، به ازای هر $0 < \lambda < 1$ خواهیم داشت [۱۷]

4. Nonlinear Programming
5. Partial Swarm Optimization
6. Genetic Algorithm
7. Mutation

1. Efficient Solution
2. Decision Maker
3. Weighted Sum Approach

که $\chi_{m,n}(\tau, \nu)$ تابع ابهام کناری مطابق (۲) تا (۲۴) می‌باشد. حال با این تعریف، توابع هدف (یا همتا توابع هزینه) تعریف شده در (۸) و (۹)، برای این تابع ابهام نیز تعریفی مشابه خواهد داشت. با بهینه‌سازی این توابع هدف، ماتریس کد فضا زمان نیز مشابه قسمت قبل، قابل استخراج خواهد بود.

۷- بررسی طرح پیشنهادی از نظر احتمال آشکارسازی هدف

در این بخش، عملکرد کد فضا زمان به دست آمده را در گیرنده رادار از نظر احتمال آشکارسازی هدف مورد ارزیابی قرار می‌دهیم. De Maio و همکارانش در [۱۰]، کدهای فضا زمان را در رادار MIMO مورد بررسی قرار دادند. هدف آنها استخراج ماتریس کد فضا زمان به نحوی بود که احتمال آشکارسازی هدف بیشینه گردد. در مقابل طراحی De Maio، طرح پیشنهادی ما با معیار قدرت تفکیک رادار قرار دارد. در این بخش، عملکرد کد فضا زمان پیشنهادی را از نظر احتمال آشکارسازی هدف مورد بررسی قرار خواهیم داد.

فرض کنید که در گیرنده، معیار GLRT^۳ با فرض احتمال هشدار غلط ثابت^۴ (CFAR) استفاده می‌شود. همچنین فرض کنید که نمونه‌های نویز نویز دریافتی در گیرنده مستقل با توزیع یکسان^۵ (i.i.d) نرمال با ماتریس کواریانس C باشد. همان طور که در [۱۳] نشان داده شده است، احتمال هشدار غلط به صورت زیر قابل بیان است

$$P_{fa} = e^{-T} \sum_{k=0}^{\delta M_r - 1} \frac{T^k}{k!} \quad (۱۷)$$

که $\delta = \min(M_r, N)$ و T همان آستانه در نظر گرفته شده در گیرنده رادار می‌باشد که مرز تصمیم در مورد وجود یا عدم وجود هدف را تعیین می‌کند. نسبت سیگنال به کلاثر می‌تواند به صورت زیر بیان شود

$$SCR = \frac{1}{N \delta M_r} E \left[\sum_{i=1}^{M_r} a_i^H A^H C^{-1} A a_i \right] \quad (۱۸)$$

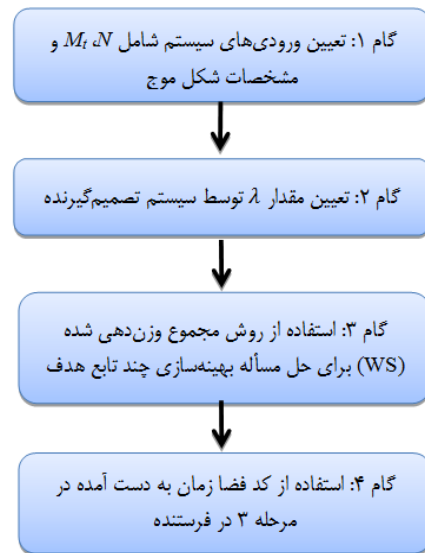
که α_i بردار ستونی با ابعاد M_r است که بیانگر تأثیر کانال در سیگنال ارسالی از فرستنده تا گیرنده است. با این شرایط، احتمال آشکارسازی هدف به ازای نسبت سیگنال به کلاثرهای مختلف به صورت زیر قابل بیان است [۱۳]

$$P_d = E \left[Q_{\delta M_r} \left(\sqrt{2} \sum_{i=1}^{M_r} a_i^H A C^{-1} A^H a_i, \sqrt{2T} \right) \right] \quad (۱۹)$$

که میانگین آماری روی $\alpha_i, i=1, \dots, M_r$ گرفته می‌شود و $Q_{\delta M_r}(\cdot, \cdot)$ بیانگر تابع مارکوم Q تعمیم‌یافته از مرتبه δM_r می‌باشد. همان ماتریس کواریانس $N \times N$ نویز دریافتی در گیرنده است. در شبیه‌سازی‌ها فرض کرده‌ایم که نویز دریافتی نویز سفید می‌باشد و بنابراین ماتریس C ضریبی از ماتریس واحد خواهد بود. همچنین امید ریاضی روی متغیر α_i ها گرفته می‌شود.

۸- نتایج شبیه‌سازی

در این قسمت دو مثال برای شبیه‌سازی طرح پیشنهادی ذکر می‌کنیم



شکل ۶: مراحل روش پیشنهادی برای پیدا کردن ماتریس کد فضا زمان مناسب از طریق بهینه‌سازی چند تابع هدف.

این مسأله، تابعی پیوسته از متغیر ماتریس کد فضا زمان A است، یعنی

$$\lim_{x \rightarrow A} \lambda g_x(x) + (1-\lambda)g_r(x) = \lambda g_x(A) + (1-\lambda)g_r(A) \quad (۱۴)$$

به علاوه مجموعه محدودیت مسأله بهینه‌سازی به صورت $trace(AA^H) = M_r$ یک مجموعه فشرده^۱ است. مجموعه فشرده مجموعه‌ای است که از بالا و پایین محدود بوده و حد بالا و پایین آن عضو مجموعه باشد [۲۰]. طبق نظریه مقدار اکسترم^۲، هر تابع پیوسته روی یک مجموعه بسته (یا همان مجموعه فشرده)، حداقل یک بیشینه و حداقل یک کمینه خواهد داشت [۲۱]. در نتیجه، مسأله بهینه‌سازی (۱۳) با توجه به داشتن این شرایط، حتماً دارای جواب است [۲۱].

۶- تعمیم روش پیشنهادی به رادار آرایه فازی MIMO

در این بخش به بررسی تابع ابهام رادار آرایه فازی MIMO با M_r آنتن ارسال و M_r آنتن دریافت می‌پردازیم. فرض کنید که آرایه ارسال به K زیرآرایه با هم‌پوشانی کامل تقسیم شده است. بنابراین دو آرایه مجاور تنها در یک آنتن تفاوت دارند. بنابراین طول هر زیرآرایه برابر $M_r - K + 1$ می‌باشد. سیگنال ارسالی از m امین زیرآرایه برابر به صورت زیر بیان می‌شود [۱۸]، [۱۹]، [۲۱] و [۲۲]

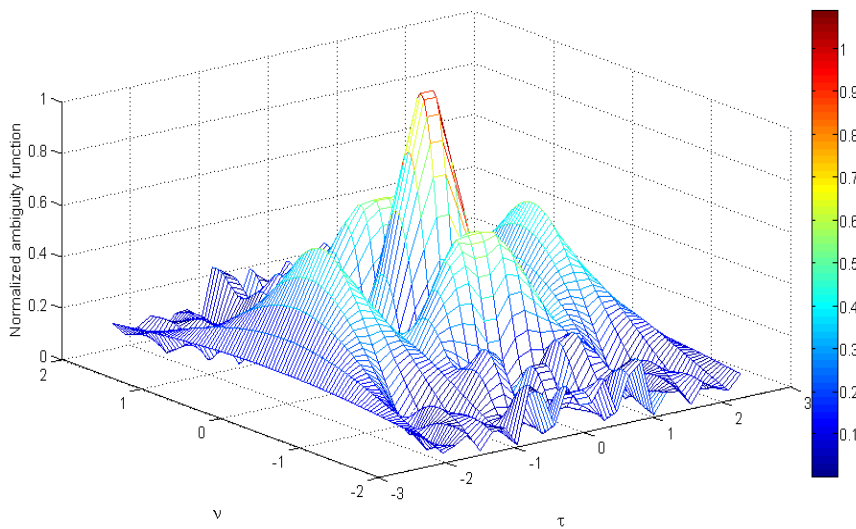
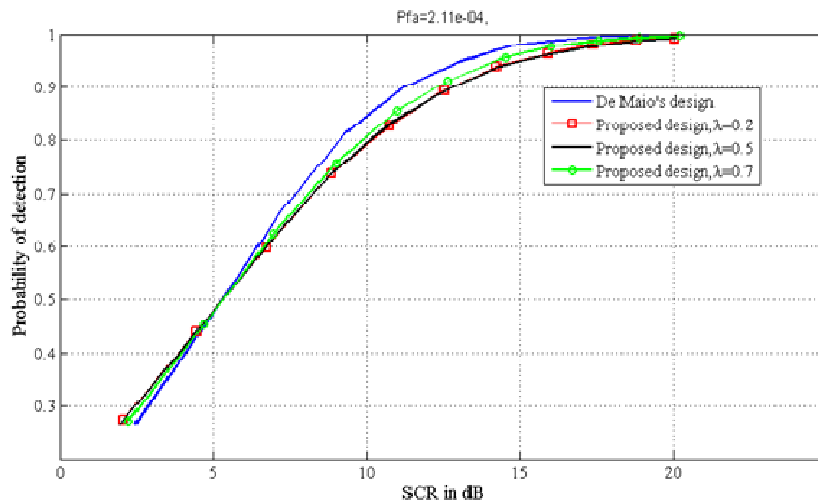
$$u_m(t) = \sqrt{\frac{M_r}{K}} s_m(t) w_m^* \quad (۱۵)$$

که $s_m(t)$ سیگنال ارسالی با انرژی واحد مربوط به زیرآرایه m ام است که با ماتریس کد فضا زمان شکل‌دهی می‌شود. همچنین w_m^* وزن زیرآرایه m ام است. با این فرضیات، ماتریس کد فضا زمان یک ماتریس با مرتبه K خواهد بود. مطابق [۲۰]، [۲۳] و [۲۴]، تابع ابهام رادار آرایه فازی MIMO به صورت زیر قابل بیان است

$$\chi(\tau, \nu, f, f') \triangleq \frac{M_r}{K} (M_r - K + 1) \sum_{m=0}^{K-1} \sum_{n=0}^{K-1} [e^{j\nu\pi(mf-nf')\tau} \chi_{m,n}(\tau, \nu) \sum_{q=0}^{M_r-K} e^{j\nu\pi q(f-f')\tau}] \quad (۱۶)$$

3. Generalized Likelihood Ratio Test
4. Constant False Alarm Rate
5. Independent Identically Distributed

1. Compact Set
2. Extreme Value theorem

شکل ۷: تابع ابهام مثال ۱ به ازای $\lambda = 0.7$.

شکل ۸: احتمال آشکارسازی هدف در مثال ۱.

می‌کند. فرضاً پارامترهای مدل سیستم به صورت $\gamma = 1$ ، $f = f' = 0.2$ ، $\Delta T = 0.9 \text{ ms}$ و $\tau_p = 0.7 \text{ ms}$ باشد. کد فضا زمان کارا مطابق (۱۳) می‌تواند به ازای مقادیر مختلف λ به دست آید. تابع ابهام دوعبدهی به ازای $\lambda = 0.5$ در شکل ۹ رسم شده است. همان طور که در شکل ۷ و شکل ۹ پیداست، تابع ابهام به دست آمده، گلبرگ فرعی به مراتب کوتاه‌تری نسبت به روش De Maio دارد. از سوی دیگر، احتمال آشکارسازی هدف در طرح پیشنهادی اختلاف چندانی با طرح De Maio ندارد که در شکل ۱۰ ترسیم شده است.

مثال ۳: یک رادار MIMO با ۳ آنتن ارسال و ۲ آنتن دریافت را در نظر بگیرید که از کدینگ فضا زمان با استفاده از ۳ اسلات زمانی استفاده می‌کند. فرضاً پارامترهای مدل سیستم به صورت $\gamma = 1.6$ ، $\lambda = 0.4$ ، $\Delta T = 0.7 \text{ ms}$ و $\tau_p = 0.3 \text{ ms}$ باشد. همان طور که در این مثال به طور واضح در شکل ۱۱ و ۱۲ پیداست، طرح پیشنهادی ما منجر به تابع ابهامی با گلبرگ اصلی باریک و گلبرگ فرعی کوتاه‌تر و همچنین عملکرد احتمال آشکارسازی هدف بسیار نزدیک به طرح De Maio می‌شود. در جدول ۱، کدهای فضا زمان به دست آمده در دو مثال ۱ و ۳ آورده شده‌اند.

۹- نتیجه‌گیری

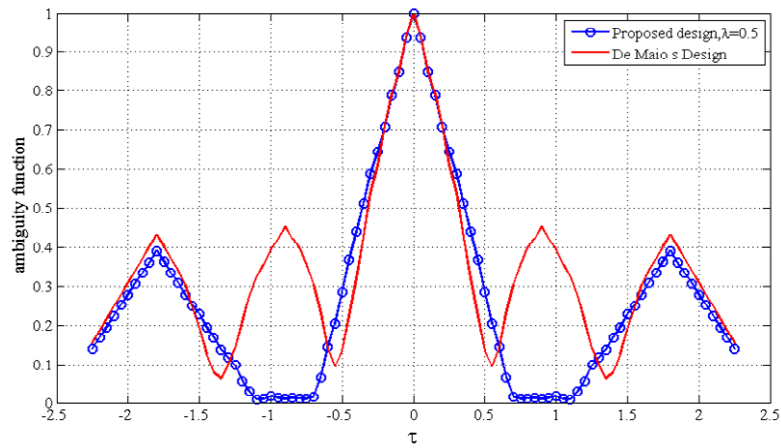
در این مقاله به بررسی رادارهای چندآنتنی با به کارگیری کدهای فضا

و عملکرد طرح پیشنهادی را از نظر قدرت تفکیک رادار در بعد برد و سرعت مورد ارزیابی قرار می‌دهیم. سپس به مقایسه طرح پیشنهادی با طرح De Maio که از نظر احتمال آشکارسازی هدف بهینه است، می‌پردازیم.

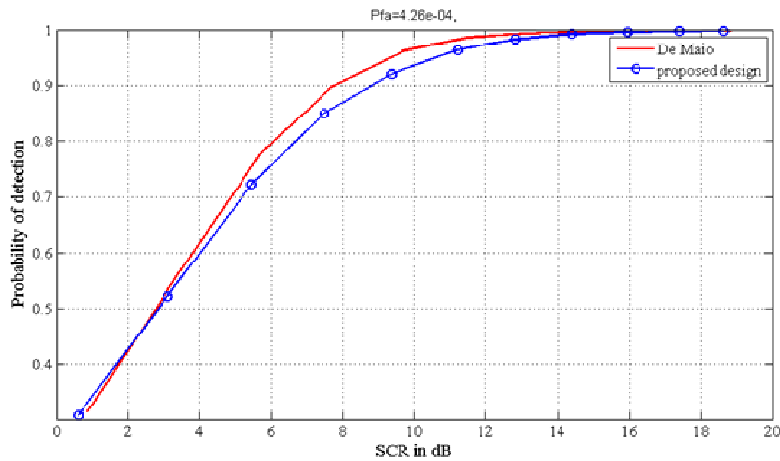
مثال ۱: یک رادار MIMO با ۲ آنتن ارسال و ۲ آنتن دریافت را در نظر بگیرید که از کدینگ فضا زمان با استفاده از ۲ اسلات زمانی استفاده می‌کند. فرض کنید پارامترهای مدل سیستم اشاره‌شده به صورت $\gamma = 1$ ، $f = f' = 0.8$ ، $\Delta T = 1.5 \text{ ms}$ و $\tau_p = 1 \text{ ms}$ باشد. کد فضا زمان کارا مطابق (۱۳) می‌تواند به ازای مقادیر مختلف λ به دست آید. تابع ابهام به ازای $\lambda = 0.7$ در شکل ۷ رسم شده است.

تابع ابهام رسم‌شده در شکل ۷ با شرایط فرض‌شده در مثال ۱، باریک‌ترین تابع ابهام ممکن در این مثال است. البته اگر تعداد تکرار را در حل مسأله بهینه‌سازی افزایش دهیم، جواب‌های دقیق‌تری به دست آمده و تابع ابهام باریک‌تری حول مبدأ خواهیم داشت. از سوی دیگر، همان طور که در شکل ۸ رسم شده است، احتمال آشکارسازی هدف با کد فضا زمان به دست آمده عملکرد بسیار نزدیکی به کد De Maio خواهد داشت. برای مقایسه ساده‌تر، در مثال‌های بعدی، تابع ابهام را در دو بعد ترسیم می‌کنیم.

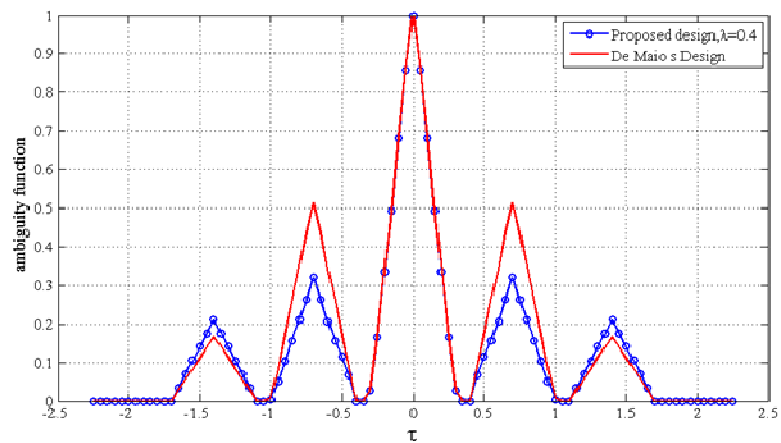
مثال ۲: یک رادار MIMO با ۳ آنتن ارسال و ۴ آنتن دریافت را در نظر بگیرید که از کدینگ فضا زمان با استفاده از ۳ اسلات زمانی استفاده



شکل ۹: تابع ابهام مثال ۲ به ازای $\lambda = 0.5$.



شکل ۱۰: احتمال آشکارسازی هدف در مثال ۲.



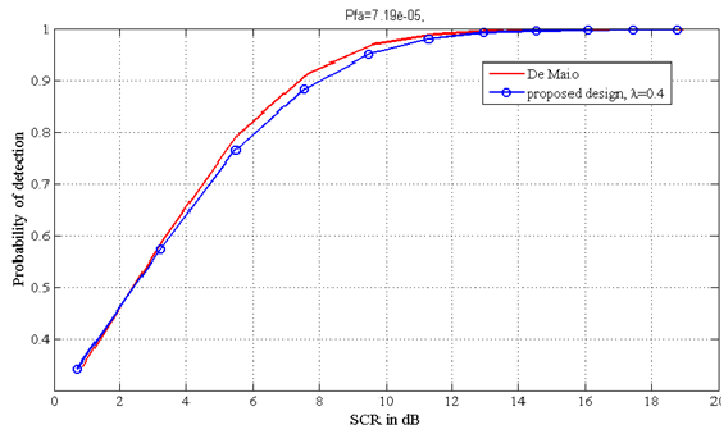
شکل ۱۱: تابع ابهام مثال ۳ به ازای $\lambda = 0.4$.

جدول ۱: کدهای فضا زمان به دست آمده در مثال ۱ و ۳.

مثال ۳	مثال ۱	پارامترهای سیستم راداری
$A_{opt} = \begin{pmatrix} 0.22 - 0.16i & 0.22 - 0.30i & -0.77 + 0.11i \\ -0.26 - 0.59i & 0.50 + 0.43i & 0.50 + 0.48i \\ -0.46 - 0.17i & -0.45 + 0.51i & -0.02 - 0.62i \end{pmatrix}$	$A_{opt} = \begin{pmatrix} 0.52 + 0.23i & -0.88 + 0.25i \\ -0.70 + 0.25i & 0.44 - 0.22i \end{pmatrix}$	کد فضا زمان پیشنهادی
$A_{de-Maio} = \begin{pmatrix} -0.76 + 0.51i & 0.21 - 0.33i & 0.11 - 0.21i \\ 0.30 + 0.74i & 0.78 - 0.16i & 0.03 + 0.51i \\ -0.01 + 0.27i & 0.10 + 0.46i & 0.81 - 0.25i \end{pmatrix}$	$A_{de-Maio} = \begin{pmatrix} -0.02 - 0.14i & 0.33 - 0.91i \\ 0.73 - 0.62i & -0.21 - 0.13i \end{pmatrix}$	کد فضا زمان روش de-Maio [۱۳]

از جمله برد، سرعت و زاویه دست یافت. بدین منظور، تابع ابهام سیستم راداری را با به کارگیری کد فضا زمان به دست آوردیم.

زمان پرداختیم. هدف ما در این مقاله، دستیابی به کد فضا زمانی است که بتوان با استفاده از آن، به قدرت تفکیک بالایی در تعیین پارامترهای هدف



شکل ۱۲: احتمال آشکارسازی هدف در مثال ۳.

- [14] C. Y. Chen and P. P. Vaidyanathan, "MIMO radar ambiguity properties using and optimization using frequency-hopping waveforms," *IEEE Trans. Signal Processing*, vol. 56, no. 12, pp. 5926-5936, Dec. 2008.
- [15] K. Deb, *Multi-Objective Optimization Using Evolutionary Algorithms*, Springer, 2001.
- [16] K. Miettinen, *Nonlinear Multiobjective Optimization*, Springer, 1998.
- [17] R. Timothyand and J. S. Arora, "The weighted sum method for multi objective optimization: new insights," *Structural and Multidisciplinary Optimization*, vol. 41, no. 6, pp. 853-862, Dec. 2009.
- [18] M. Mitchell, *An Introduction to Genetic Algorithms*, MIT Press, 1996.
- [19] R. Larson and B. H. Edwards, *Multivariable Calculus*, Cengage Learning, 2014.
- [20] W. Khan, I. M. Qureshi, and K. Soltan, "Ambiguity function of phased mimo radar with colocated antennas and its properties," *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, vol. 11, no. 7, pp. 1220-1224, Jul. 2014.
- [21] L. de Haan and A. Ferreira, *Extreme Value Theory: An Introduction*, Springer, 2006.
- [22] A. Hassanien and S. A. Vorobyov, "Phased-MIMO radar: a tradeoff between phased-array and mimo radars," *IEEE Trans. Signal Processing*, vol. 58, no. 6, pp. 3137-3151, Jun. 2010.
- [23] M. Radmard, M. Nazari Majd, M. M. Chitgarha, S. M. Karbasi, and M. M. Nayebi, "MIMO ambiguity function optimization through waveform design," in *Proc. 16th Int. Radar Symp., IRS'15*, pp. 333-338, Dresden, Germany, 24-26 Jun. 2015.
- [24] Y. Li, S. A. Vorobyov, and V. Koivunen, "Generalized ambiguity function for the mimo radar with correlated waveforms," in *Proc. IEEE International Conf. on Acoustics, Speech and Signal Processing, ICASSP'14*, pp. 5302-5306, Florence, Italy, 4-9 May 2014.

روح‌اله وحدانی تحصیلات خود را در مقطع کارشناسی رشته مهندسی برق گرایش الکترونیک در سال ۱۳۸۶ از دانشگاه گیلان و در سال ۱۳۹۳ در مقطع کارشناسی ارشد گرایش مخابرات سیستم از دانشگاه علم و صنعت ایران و دکتری خود را در زمینه مخابرات سیستم از دانشگاه صنعتی مالک اشتر در سال ۱۳۹۹ به پایان رسانده است. زمینه‌های تحقیقاتی مورد علاقه ایشان عبارتند از: سیستم‌های مخابراتی چندآنتنی، الگوریتم‌های بهینه‌سازی در مهندسی مخابرات، شبکه مخابرات سلولی همراه.

حسین خالقی بیزکی مدرک دکترای خود را در رشته مهندسی برق گرایش مخابرات سیستم از دانشگاه علم و صنعت ایران در سال ۱۳۸۷ دریافت کرد. علایق تحقیقاتی وی شامل تئوری اطلاعات، نظریه کدگذاری کانال، مخابرات بی سیم، سیستم های MIMO، پردازش فضا-زمان و سایر موضوعات مرتبط با پردازش سیگنال است.

محسن فلاح مدرک کارشناسی خود را در زمینه مهندسی برق الکترونیک از دانشگاه صنعتی اصفهان در سال ۱۳۶۹ اخذ و در سال ۱۳۷۶ در مقطع کارشناسی ارشد در رشته مهندسی برق مخابرات دانش آموخته شد. وی مدرک دکترای خود را در رشته مهندسی برق گرایش مخابرات میدان از دانشگاه علم و صنعت ایران در سال ۱۳۹۰ دریافت کرد. اجرای ده‌ها طرح پژوهشی، بنیادی و کاربردی، در زمینه‌های مایکروویو، آنتن و انتشار امواج و انتشار بیش از ۶۰ مقاله در مجلات معتبر بین‌المللی و کنفرانس‌ها از جمله فعالیت‌های تحقیقاتی نامبرده محسوب می‌شود.

باریک‌بودن تابع ابهام حول مبدأ به معنای توانایی رادار در تخمین برد و سرعت هدف می‌باشد. بنابراین دو معیار برای ارزیابی باریک‌بودن تابع ابهام حول مبدأ در این مقاله پیشنهاد شد. با بهینه‌سازی این دو معیار به کمک روش مجموع وزن‌دهی خطی، کد فضا زمان مناسب با قدرت تفکیک بالا به دست آمد. سپس عملکرد این کد از نظر احتمال شناسایی هدف نیز مورد ارزیابی قرار گرفت و نشان داده شد که کد فضا زمان به دست آمده علاوه بر رسیدن به بهترین قدرت تفکیک، از نظر احتمال شناسایی هدف نیز دارای عملکرد نزدیک به روش De Maio می‌باشد. هدف روش De Maio، به دست آوردن کد فضا زمان با احتمال آشکارسازی بالا بوده است، در حالی که کد فضا زمان به دست آمده الزاماً نمی‌تواند عملکرد خوبی از نظر قدرت تفکیک پارامترهای مختلف هدف داشته باشد. در این مقاله، ما کد فضا زمانی را طراحی نمودیم که با استفاده از آن می‌توان به قدرت تفکیک بالایی در تعیین پارامترهای هدف نیز دست یافت.

مراجع

- [1] M. I. Skolnik, *Introduction to Radar Systems*, 3rd Ed. New York: Mc-Graw-Hill, 2001.
- [2] J. Li and P. Stoica, *MIMO Radar Signal Processing*, Wiley-IEEE Press, 2008.
- [3] N. Levanon and E. Mozeson, *Radar Signals*, Wiley-IEEE Press, 2004.
- [4] E. Fishler, et al., "MIMO radar: an idea whose time has come," in *Proc. IEEE Radar Conf.*, vol. 2, pp. 71-78, Philadelphia, PA, USA, 29-29 Apr. 2004.
- [5] K. Luo, *MIMO Radar: Target Localisation*, Ph.D Thesis of Imperial College London, Mar. 2013.
- [6] Z. Cheng, Z. He, B. Liao, and M. Fang, "MIMO radar waveform design with PAPR and similarity constraints," *IEEE Trans. on Signal Processing*, vol. 66, no. 4, pp. 968-981, Feb. 2018.
- [7] W. Fan, J. Liang, and J. Li, "Constant modulus MIMO radar waveform design with minimum peak sidelobe transmit beam pattern," *IEEE Trans. on Signal Processing*, vol. 66, no. 16, pp. 4207-4222, Aug. 2018.
- [8] S. Imani, M. M. Nayebi, and S. A. Ghorashi, "Colocated MIMO radar SINR maximization under ISL and PSL constraints," *IEEE Signal Processing Letters*, vol. 25, no. 3, pp. 422-426, Mar. 2018.
- [9] Y. Du, X. Zhao, S. Wang, H. Liu, and Z. Zhang, "MIMO radar waveform optimization in clutter under general power constraints," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 106121-106135, Jun. 2020.
- [10] J. Li and P. Stoica, "MIMO radar with colocated antennas," *IEEE Signal Process. Mag.*, vol. 24, no. 5, pp. 106-114, Sept. 2007.
- [11] A. Haimovich, R. Blum, and L. Cimini, "MIMO radar with widely separated antennas," *IEEE Signal Process. Mag.*, vol. 25, no. 1, pp. 116-129, 2008.
- [12] G. San Antonio, D. R. Fuhrmann, and F. C. Robey, "MIMO radar ambiguity functions," *IEEE J. of Selected Topics in Signal Processing*, vol. 1, no. 1, pp. 167-177, Jul. 2007.
- [13] A. De Maio and M. Lops, "Design principles of mimo radar detectors," *IEEE Trans. Aerospace and Electronic Systems*, vol. 43, no. 3, pp. 886-898, Jul. 2007.