

طراحی کد فاز دودویی شبه بهینه مبتنی بر تابع لگاریتم مجموع برای تمایز کشتی از اختلال دکوی

تاریخ دریافت:
۲۶ بهمن ماه ۱۴۰۴

تاریخ پذیرش:
۶ تیرماه ۱۴۰۵

محمود آذری^۱، محمد مهدی مرادی^{۲*}، نادعلی زارعی^۳، محمد ضیغمی^۴

۱. دانشجوی دکتری، دانشکده برق، جنگ الکترونیک و سایبری، دانشگاه جامع امام حسین(ع)، تهران، ایران.

۲. کارشناسی ارشد، مخابرات سیستم، دانشکده برق، دانشگاه صنعتی شریف، تهران، ایران.

۳. استادیار، دانشکده برق، جنگ الکترونیک و سایبری، دانشگاه جامع امام حسین(ع)، تهران، ایران.

۴. دکتری، جنگ الکترونیک، دانشکده برق، جنگ الکترونیک و سایبری، دانشگاه جامع امام حسین(ع)، تهران، ایران.

چکیده

در این مقاله، یک روش طراحی شبه بهینه کارآمد برای دنباله های دودویی با سطح لوب جانبی پایین، با تمرکز بر آشکارسازی کشتی و تمایز آن از اهداف فریب دکوی بیان شده است. یکی از چالش های عمده در سامانه های راداری، حضور همزمان کشتی و دکوی در کنار یکدیگر است که ممکن است سیگنال کشتی، سیگنال دکوی را پنهان کند و فرآیند شناسایی را پیچیده تر نماید. در چنین شرایطی، تشخیص دقیق کشتی از دکوی اهمیت ویژه ای پیدا می کند. رویکرد پیشنهادی، مبتنی بر لگاریتم مجموع و الگوریتم بازگشتی برای محاسبه تابع همبستگی است که موجب کاهش چشمگیر پیچیدگی محاسباتی نسبت به روش های متداول می گردد. علاوه بر این، برای تقویت قابلیت همگرایی محلی و جلوگیری از گرفتار شدن در کمینه های محلی، از روش جست و جوی دو مرحله ای استفاده شده است. نتایج شبیه سازی نشان می دهد که کد شبه بهینه پیشنهادی با طول ۱۶۹ تقریباً ۶ دسی بل کاهش در سطح لوب های جانبی نسبت به کد تو در تو و همچنین در تفکیک کشتی و دکوی در نسبت سیگنال به نویز پایین عملکردی بهینه تری دارد. این نتایج نشان دهنده بهبود عملکرد کدهای شبه بهینه در کاهش تداخل و افزایش توان تشخیص اهداف است.

واژه های کلیدی: کد فاز دودویی، آشکارسازی، دکوی، تداخل.

Design of a pseudo-optimal binary phase code based on the logarithm sum function for ship discrimination from decoy jamming

Mahmoud Azari¹, Mohammad Mahdi Moradi^{2*}, Nadali Zarei³, Mohammad Zeighami⁴

1. Ph.D. Student in Electronic warfare, Faculty of Electrical, Imam Hossein (AS) University, Tehran, Iran.

2. MSc., Faculty of Electrical Engineering, Sharif University of Technology, Tehran, Iran.

3. Associate Prof., Faculty of Electrical, Electronic and Cyber Warfare, Imam Hossein (AS) University, Tehran, Iran.

4. Ph.D, Faculty of Electrical, Imam Hossein (AS) University, Tehran, Iran.

Abstract

In this paper, an efficient pseudo-optimal design method for binary sequences with low sidelobe level is proposed, focusing on ship detection and its discrimination from decoy targets. One of the major challenges in radar systems is the simultaneous presence of ship and decoy together, which may hide the ship's signal and complicate the detection process. In such a situation, accurate ship-to-decoy discrimination becomes particularly important. The proposed approach is based on the logarithm of the sum and a recursive algorithm to calculate the correlation function, which significantly reduces the computational complexity compared to conventional methods. In addition, a two-stage search method is used to enhance local convergence and avoid getting trapped in local minima. Simulation results show that the proposed pseudo-optimal code with length 169 has approximately 6 dB reduction in sidelobe level compared to the Nested code and also performs better in ship and decoy separation at low signal-to-noise ratio. These results indicate improved performance of pseudo-optimal codes in reducing interference and increasing target detection power.

Key words: Binary phase code, Detection, Decoy, Interference.

سامانه‌های راداری امروزی طیف گسترده‌ای از حوزه‌ها، از طراحی و سنتز شکل موج گرفته تا طراحی آرایه‌های آنتنی، را در بر می‌گیرند و در این میان، طراحی شکل موج [۱] یکی از عوامل کلیدی در تعیین عملکرد نهایی سامانه به شمار می‌رود. در بین انواع شکل موج‌ها، دنباله‌های فاز با دامنه‌ی ثابت که از سطح لوب‌های جانبی خود همبستگی کوچک و ویژگی‌های مطلوب همبستگی متقاطع برخوردارند، توجه زیادی را به خود جلب کرده‌اند. اگرچه دنباله‌های فاز پیوسته از دیدگاه نظری می‌توانند کارایی بهتری ارائه دهند، اما در پیاده‌سازی‌های واقعی مبتنی بر پردازش دیجیتال، سیگنال‌ها ناچار به نمونه‌برداری و کوانتیزه‌سازی گسسته هستند. از این رو طراحی دنباله‌های فاز گسسته با کیفیت مناسب، یک ضرورت عملی محسوب می‌شود. در میان دنباله‌های فاز گسسته نیز، دنباله‌های فاز دودویی به دلیل ساختار ساده، نیاز سخت‌افزاری کم، سهولت پیاده‌سازی و اطمینان‌پذیری بالا، جایگاه ویژه‌ای دارند. مسائلی مربوط به طراحی کدهای فازی، چه در حالت پیوسته و چه گسسته (باینری و چه غیر باینری)، به‌طور ذاتی غیرمحدب بوده و در رده‌ی مسائل زمان چندجمله‌ای غیرقطعی سخت قرار می‌گیرند [۲]. ضمن آن که در نسخه‌ی گسسته، قید محدود بودن فاز به مجموعه‌ای از مقادیر مجاز نیز دشواری مسئله را افزایش می‌دهد. رویکردهای کلاسیک نظیر کد بارکر (Barker code) [۳] و یا کد تو در تو اصلاح شده (Modified Nested code) [۴] با بهره‌گیری از ساختارهای ریاضی، دنباله‌هایی با خودهمبستگی مناسب تولید می‌کنند، اما از نظر طول‌های قابل دستیابی و تعداد دنباله‌های موجود با محدودیت‌های جدی مواجه‌اند. در سال‌های اخیر، روش‌های نوین طراحی شکل موج فاز پیوسته مانند الگوریتم چرخه‌ای جدید (CAN) [۵]، بزرگ‌سازی-کوچک‌سازی نرم p (P-MM) [۶]، کمینه‌سازی متوالی کران بالای بلوک وزن دار (WeBEST) [۷]، الگوریتم چرخه‌ای جدید وزن دهی شده (WeCAN) [۸] و الگوریتم تقریب طیفی (ISAA) [۹] که برای دستیابی به دنباله‌های گسسته، راهبرد کوانتیزه‌سازی مستقیم را پیشنهاد می‌کنند. با این حال، در مورد کدهای دودویی این رویکرد غالباً با افت عملکرد قابل ملاحظه همراه است. همچنین روش‌های دیگری مانند الگوریتم روش دنباله دودویی (SHC) [۱۰]، الگوریتم روش فاز گسسته (DPM) [۱۱]، الگوریتم مجموعه‌های دودویی (BiST) [۱۲] هستند که به‌طور مستقیم دنباله‌های فاز دودویی با حداقل سطح لوب جانبی را طراحی می‌کنند. الگوریتم‌های طراحی دنباله‌های فاز گسسته را می‌توان به‌طور کلی در دو گروه اصلی «مبتنی بر جریمه» و «مبتنی بر جست‌وجوی ابتکاری» طبقه‌بندی کرد. در دسته‌ی نخست، روشی مانند الگوریتم چرخه‌ای برای طراحی مجموعه‌های مکمل دنباله [۱۳] با وارد کردن جمله‌های جریمه در تابع هدف، فازها را به‌صورت تدریجی به سمت مقادیر نزدیک به حالت گسسته سوق می‌دهند. با

این حال، خروجی نهایی این روش‌ها معمولاً همچنان به مرحله‌ی کوانتیزه‌سازی نیاز دارد. در سوی دیگر، خانواده‌ای از روش‌های جست‌جوی هوشمند وجود دارند که معمولاً قادر به تولید دنباله‌هایی با کیفیت بالاتر هستند، هرچند این بهبود اغلب با افزایش بار محاسباتی همراه می‌شود. به عنوان نمونه، در [۱۴] یک روش مبتنی بر تقریب نرم معیار قله‌ی بیشینه، با استفاده از یک پارامتر کنترلی ارائه شده است که نتایج مطلوبی را برای طول‌های مختلف دنباله گزارش می‌کند. با این وجود، تنظیم تجربی این پارامتر می‌تواند دقت خروجی را دستخوش تغییر سازد. برای رفع این مسئله، در [۱۱] یک راهکار با تنظیم تدریجی پارامتر تقریب معرفی شده است که همان ایده را با هزینه‌ی محاسباتی کمتر پیاده‌سازی می‌کند.

در این مقاله، یک الگوریتم ابتکاری جدید برای طراحی دنباله‌های دودویی ارائه می‌شود که در آن از تابع لگاریتم مجموع به‌عنوان معیار اصلی بهینه‌سازی استفاده شده است. این تابع در مقایسه با روش‌های سنتی که از تقریب مبتنی بر نرم p بهره می‌برند، محاسبات سبک‌تری دارد و در هر گام از تکرار الگوریتم، پیچیدگی محاسباتی کمتری ایجاد می‌کند. به علاوه، برای بهبود عملکرد الگوریتم در محاسبه تابع همبستگی، این تابع به‌صورت برداری مدل‌سازی شده و بروزرسانی آن به‌صورت بازگشتی انجام می‌شود. این روش باعث کاهش محاسبات اضافی و افزایش کارایی الگوریتم می‌شود. در نهایت، الگوریتم در جایی متوقف می‌شود که در آن دنباله دودویی طراحی شده کمترین سطح لوب جانبی^۱ را دارد.

در ادامه، ابتدا در بخش «صورت‌بندی مسئله»، فرمول‌بندی دقیق مسئله را ارائه داده و تابع هدف مربوطه را معرفی خواهیم کرد. سپس استراتژی‌های بهینه‌سازی به‌کارگرفته‌شده برای حل این مسئله به‌تفصیل تشریح می‌شوند. در بخش بعدی، روش پیشنهادی این مقاله به‌طور کامل توضیح داده خواهد شد پس از آن، الگوریتم پیشنهادی به‌صورت گام‌به‌گام شرح داده می‌شود. در نهایت، نتایج شبیه‌سازی ارائه شده و در بخش پایانی، جمع‌بندی و نتیجه‌گیری نهایی بیان می‌شود.

۲-صورت بندی مسئله

در این بخش، هدف طراحی یک دنباله فازی دودویی با طول L است به‌طوری‌که بتوان هدف نقطه‌ای مانند دکوی را از هدف گسترده‌ای مانند کشتی در کنار یکدیگر تشخیص داد. هدف نقطه‌ای به‌واسطه‌ی سطح مقطع راداری کوچک و بازتاب محدود خود معمولاً به‌عنوان یک نقطه متمرکز بر روی نمایشگر رادار ظاهر می‌شود. در مقابل، کشتی به عنوان یک هدف گسترده با سطح مقطع راداری بزرگ‌تر، سیگنال راداری وسیع‌تری تولید می‌کند که در نتیجه آن می‌تواند هدف کوچک دکوی در کنار خود را پنهان کند. بازتاب راداری کشتی به‌دلیل سطح مقطع راداری بزرگ‌تر، باعث می‌شود بازتاب راداری دکوی در لوب‌های جانبی پنهان شود. در نتیجه، طراحی دنباله‌های دودویی مناسب برای

¹Peak Sidelobe Level

۳- استراتژی های بهینه سازی

طراحی دنباله های فاز دودویی با چالش هایی در زمینه بهینه سازی مواجه است. این مسائل به دلیل غیرمحدب بودن و پیچیدگی های محاسباتی نیاز به تکنیک های بهینه سازی خاص دارند. در این مقاله از روش های مبتنی بر جریمه و جستجوهای ابتکاری برای دستیابی به دنباله هایی با سطح لوب جانبی پایین استفاده شده است. نوآوری های مورد استفاده در این مقاله به شرح زیر است: ۱- در این مقاله تابع هدف نرم p با تابع هدف لگاریتم مجموع مقایسه میشود و در نهایت تابع هدف لگاریتم مجموع به عنوان تابع هدف بهینه تر از نظر کارایی محاسبات و همچنین جایگزین عملی تر در برابر نرم p انتخاب شده است. ۲- فرار از مینیمم های محلی یکی از چالش های رایج در بهینه سازی غیرمحدب است. الگوریتم پیشنهادی در این مقاله یک استراتژی جستجوی دو مرحله ای را معرفی می کند که هم بر مینیمم های محلی (پیدا کردن مینیمم ها در یک ناحیه محدود) و هم بر جستجو در کل ناحیه (جستجو به طور وسیع برای یافتن مینیمم های بهتر) تأکید دارد و به این طریق از گیر افتادن در مینیمم های محلی جلوگیری میکند. ۳- برای انجام محاسبات به طور مؤثر در داده های بزرگ، در این مقاله یک روش محاسباتی بازگشتی برای محاسبه تابع همبستگی استفاده میشود. این رویکرد محاسبات غیرضروری را کاهش می دهد و کارایی محاسبات را بهبود می بخشد.

۴- روش پیشنهادی

مسئله (۳) که در بخش ۲ معرفی شد یک بهینه سازی غیرمحدب و از نوع مسائل زمان چندجمله ای غیرقطعی سخت^۲ به شمار می رود. از آنجا که تابع هدف در نقاطی غیرقابل مشتق است و قیود نیز ماهیت گسسته دارند، استفاده از روش های مبتنی بر گرادین کارایی لازم را ندارد. بر همین اساس، یک الگوریتم ابتکاری جست و جوی محور به کار گرفته می شود که بر دو ایده ی کلیدی استوار است: ۱- استفاده از تابع لگاریتم مجموع (در بخش ۴-۱ به تفصیل توضیح داده شده است) به عنوان تقریب نرم p در تعریف تابع هدف مسئله (۳) به طوریکه خواص نرم p حفظ شوند. ۲- برای کاهش محاسبات تابع خودهمبستگی در هر بار تکرار (که ممکن است فقط تعداد محدودی از فاز های ما تغییر کرده باشند به همین منظور نیازی به محاسبه کامل تابع خودهمبستگی نیست) محاسبه و به روزرسانی بازگشتی تابع خودهمبستگی به منظور کاهش هزینه ی محاسباتی در نظر گرفته ایم (در بخش ۴-۲ به تفصیل توضیح داده شده است). در ادامه به بررسی آنها می پردازیم.

۴-۱- تقریب نرم p با تابع لگاریتم مجموع

در پژوهش های گذشته، برای تقریب مقدار بیشینه ی سطح لوب جانبی معمولاً از معیار نرم p استفاده می شد. اگر r برداری متشکل از

تمایز این دو هدف از یکدیگر در شرایط نزدیک به هم، نقش مهمی در کارایی سیستم راداری ایفا می کند.

بدین منظور در ابتدا بردار شکل موج s را که شامل دنباله دودویی است بصورت زیر تعریف میکنیم:

$$s \in \{-1, +1\}^{1 \times L}$$

این دنباله از مقادیر $\{-1, +1\}$ تشکیل شده اند. که در آن:

- L طول دنباله.

دنباله دودویی به صورت یک بردار ستونی متشکل از $\exp(j\varphi(k))$ ها نمایش داده می شود. به طور مثال معادله دنباله به صورت زیر است:

$$s = \begin{bmatrix} \exp(j\varphi(0)) \\ \vdots \\ \exp(j\varphi(L-1)) \end{bmatrix}$$

که در آن $\varphi(k)$ فاز مربوط به نمونه k -ام از دنباله که فقط شامل ۰ و ۱۸۰ درجه است.

برای به دست آوردن کد شبه بهینه، لازم است که این کد تنها در تأخیر صفر مشابهت داشته باشد. به عبارت دیگر، خودهمبستگی^۱ معیاری برای سنجش میزان مشابهت یا وابستگی درونی یک دنباله است، زمانی که تأخیر زمانی (τ) به آن اعمال می شود. برای کد شبه بهینه، انتظار می رود که خودهمبستگی تنها در تأخیر صفر بیشترین مقدار را داشته باشد.

فرمول خودهمبستگی $r(\tau)$ به صورت زیر است:

$$r(\tau) = \sum_{k=0}^{L-1-\tau} s(k) \cdot s(k+\tau) \quad (۱)$$

که در آن $\tau \in \{-L+1, L-1\}$ تأخیر زمانی و خودهمبستگی برای تأخیرهای مختلف (τ) محاسبه می شود. اگر $r(\tau)$ بزرگ باشد، به این معناست که دنباله در تأخیر زمانی (τ) مشابه خودش است.

مربع سطح لوب جانبی به صورت زیر تعریف می شود:

$$PSL = \max_{\tau \neq 0} r(\tau)^2 \quad (۲)$$

که در آن:

- $r(\tau)$ خودهمبستگی دنباله است.
 - $\tau \neq 0$ یعنی تأخیر زمانی غیر صفر در نظر گرفته می شود.
- سطح لوب جانبی در واقع بزرگترین مقدار خودهمبستگی غیر صفر بین دنباله ها را به ما می دهد. هرچه این مقدار بزرگتر باشد، نشان دهنده سطح بالاتر لوب جانبی است که ممکن است باعث تداخل در سیستم شود. هدف اصلی در این بخش، بهینه سازی دنباله فاز دودویی به گونه ای است که سطح لوب جانبی به حداقل برسد. این مسئله به صورت یک مسئله کمینه سازی به شکل زیر مطرح می شود:

$$\min_{s.t. \ s \in \{-1, +1\}^{1 \times L}} \|PSL\|_p \quad (۳)$$

که در آن:

- s بردار شکل موج است.
- $\|PSL\|_p$ نشانگر نرم p بردار PSL است.

به روزرسانی مقادیر همبستگی، رویکرد پیشنهادی از طریق حذف محاسبات زائد به محاسبات کارآمد دست می‌یابد.

۴-۲- بروز رسانی بازگشتی همبستگی

برای مدل سازی تغییر تابع همبستگی، بردار $a_u \in \{-1, +1, 0\}$ که یک بردار ستونی هست را بصورت زیر تعریف میکنیم:

$$a_u = \begin{cases} s(k) & \text{اگر } L - u - 1 \leq k \leq 2L - u - 2 \\ 0 & \text{در غیر اینصورت} \end{cases} \quad (7)$$

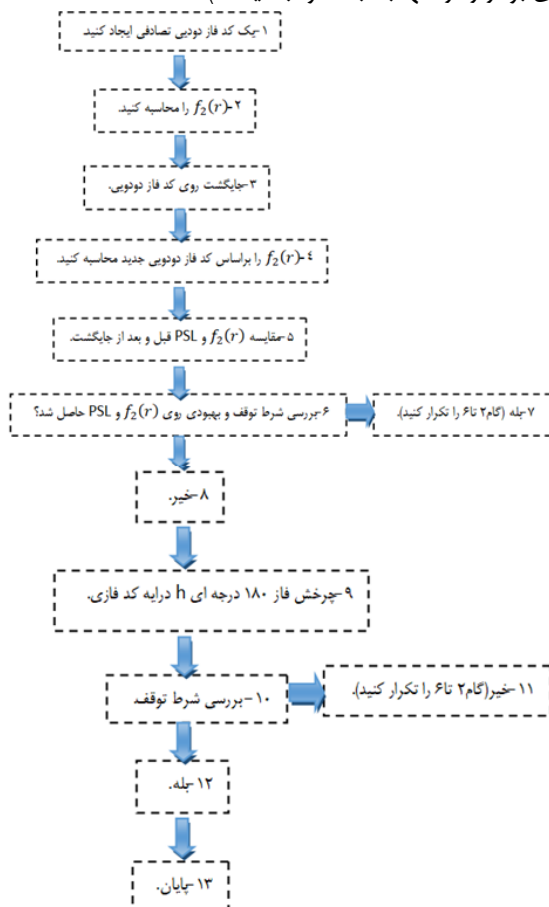
که در آن:

- a_u : بردار جایگشت است که مقدار آن در مؤلفه های $L - u - 1$ تا $2L - u - 2$ برابر خود درایه s و در سایر مؤلفه‌ها برابر صفر است (u شماره درایه ای است که باید وارونه شود).

با تغییر بیت u -ام، همبستگی $r(\tau)$ به صورت زیر به روزرسانی می‌شود:

$$r^{(k+1)} = r^{(k)} - 2s(u)a_u - 2s(u)j(a_u) \quad (8)$$

که در آن $j(\cdot)$ عملگر انعکاس برداری است (این عملگر تمام درایه های بردار را از انتها به ابتدا مرتب میکند).



شکل ۱- مدل پیشنهادی برای طراحی کد فاز دودویی بهینه.

تمامی مؤلفه‌های غیرلوب اصلی (یعنی لوب‌های جانبی خودهمبستگی) در نظر گرفته شود، آنگاه تابع هدف مبتنی بر نرم p به صورت زیر بیان می‌شود:

$$f_1(r) = \|r\|_p = (\sum |r(\tau)|^p)^{1/p} \quad (4)$$

با افزایش p دقت تقریب بهتر می‌شود ولی پیچیدگی و بی‌ثباتی عددی بالاتر می‌رود. برای رفع این مشکل از تابع لگاریتم مجموع به عنوان تقریب نرم p استفاده می‌کنیم یعنی:

$$LSE(x) = \log(\sum_{i=1}^n \exp(x(i))) \quad (5)$$

که $x \in R^{n \times 1}$ است.

بنابراین تابع هدف پیشنهادی ما:

$$f_2(r) = LSE(r) \quad (6)$$

است که در قیاس با نرم p هزینه‌ی هر تکرار پایین‌تری دارد. تابع هدف پیشنهادی $f_2(r)$ مبتنی بر لگاریتم مجموع، مزایای محاسباتی قابل توجهی را نشان می‌دهد. در مقایسه با نرم p ، این رویکرد به طور قابل توجهی پیچیدگی محاسباتی را کاهش می‌دهد، در حالی که بیشتر خواص نرم p را حفظ می‌کند و آن را به ویژه برای مسائل بهینه‌سازی در مقیاس بزرگ کارآمد می‌سازد. برای فرار از بهینه محلی، ما یک استراتژی جستجوی دو مرحله‌ای را پیشنهاد می‌کنیم که بین جستجوی سراسری و جستجوی محلی تعادل برقرار می‌کند. در مرحله جستجوی محلی، الگوریتم به طور تصادفی عناصر دنباله را پیمایش می‌کند، عملیات بیت-وارونه‌سازی^۱ را انجام می‌دهد و مقادیر تابع هدف را ارزیابی می‌کند. هرگونه بهبودی باعث به روزرسانی فوری دنباله فعلی شده و تکرار بعدی را آغاز می‌کند. هنگامی که جستجوی محلی پس از پیمایش همه بیت‌ها هیچ بهبودی حاصل نکند، الگوریتم به مرحله جستجوی سراسری تغییر می‌کند، جایی که به طور همزمان بیت‌ها را در موقعیت‌های $[1, h]$ که به طور تصادفی انتخاب شده‌اند، عملیات بیت-وارونه‌سازی را انجام می‌دهد. سپس الگوریتم به مرحله جستجوی محلی باز می‌گردد. مقدار بزرگتر h به فرار از بهینه محلی کمک می‌کند در حالی که مقدار کوچکتر امکان جستجوی محلی دقیق را فراهم می‌کند. محاسبه تابع همبستگی برای ارزیابی تابع هدف پس از هر تغییر در دنباله مورد نیاز است. محاسبه مجدد کامل تابع همبستگی شامل بار محاسباتی قابل توجهی است، بخصوص در مرحله جستجوی محلی که فقط یک بیت تغییر می‌کند. کارهای قبلی روش‌های تبدیل فوری سریع^۲ و چرخه‌ای^۳ را برای محاسبه همبستگی در سناریوهای بیت-وارونه‌سازی بررسی کرده‌اند. بر اساس این مطالعات، ما یک روش محاسبه بازگشتی برداری پیشنهاد می‌کنیم که از عملیات بیت-وارونه‌سازی بهره‌برداری می‌کند. با

³Cyclic

¹ Bit-Flipping

²Fast Fourier Transform

برای بررسی دقیق تر الگوریتم پیشنهادی و مقایسه آن با الگوریتم های پیشرفته موجود، همان طور که در جدول ۱ مشاهده می شود، الگوریتم های موردنظر از نظر توابع هزینه و روش های بهینه سازی مورد استفاده با یکدیگر مقایسه شده اند.

جدول ۱-مقایسه پیچیدگی محاسباتی الگوریتم پیشنهادی با الگوریتم های پیشرفته.

روش بهینه سازی	تابع هزینه	الگوریتم ها
نرم p	PSL- ISL	WeBEST
BCD- FFT	PSL-ISL	BiST
نرم p-BCD-FFT	PSL-ISL	DPM
جستجوی تصادفی	PSL	SHC
جستجوی تصادفی	PSL	الگوریتم پیشنهادی

همانطور که در جدول ۱ مشاهده میکنید توابع هزینه استفاده شده در پژوهش های گذشته علاوه بر PSL^۱ شامل ISL^۲ است و همچنین برای بهینه سازی و بدست آوردن راه حل مناسب علاوه بر نرم p از روش های دیگری مانند BCD و FFT^۳ استفاده شده است. نتایج این مقایسه نشان می دهد که از میان روش های بررسی شده، الگوریتم SHC و الگوریتم پیشنهادی از نظر پیچیدگی محاسباتی در جایگاه بهینه تری قرار دارند و نسبت به سایر روش ها، ساختار ساده تر و هزینه محاسباتی کمتری دارند. به طور کلی، کاهش پیچیدگی محاسباتی در این دو الگوریتم موجب می شود که فرآیند بهینه سازی با سرعت بیشتری انجام شده و در عین حال، کارایی مناسب آن نیز حفظ شود. از این رو، می توان نتیجه گرفت که الگوریتم پیشنهادی علاوه بر برخورداری از دقت و عملکرد مطلوب، از منظر محاسباتی نیز گزینه ای مناسب و قابل توجه در میان روش های مقایسه شده محسوب می شود. در جریان محاسبه ی تابع لگاریتم مجموع، مقدار سطح لوب جانبی مجموعه کدهای باینری نیز با محاسباتی بسیار اندک قابل استخراج است. از این رو پایش سطح لوب جانبی در حلقه ی تکرار گنجانده شده است تا امکان تشخیص زودهنگام جواب های مناسب فراهم شود. در هر عملیات، الگوریتم به طور هم زمان قید سطح لوب جانبی و مقدار تابع لگاریتم مجموع را ارزیابی می کند. به این ترتیب، اگر شرط مقدار لوب جانبی مورد مطلوب برقرار باشد، فرآیند جست و جو بلافاصله خاتمه می یابد. در غیر این صورت، ادامه فرایند بر مبنای تغییرات تابع لگاریتم مجموع انجام می شود.

۵-نتایج شبیه سازی

در این بخش الگوریتم پیشنهادی مبتنی بر تابع لگاریتم مجموع را برای طراحی کد فاز دودویی با PSL پایین از طریق آزمایش های عددی ارزیابی می کند. ما الگوریتم مبتنی بر لگاریتم مجموع را با الگوریتم های پیشرفته در این حوزه مقایسه می کنیم و الگوریتم

پیشنهادی را در مقایسه با الگوریتم های SHC، BiST، DPM و WeBEST محک می زنیم. تمام شبیه سازی ها در MATLAB R2025b بر روی پلتفرمی مجهز به پردازنده RYZEN9 5900Hs و رم ۳۲ گیگابایتی انجام شده است.

ورودی ها : PSL مطلوب، حداکثر تعداد تکرار $L_{\max}$.

خروجی ها : شکل موج بهینه S.

۱. شکل موج $S \in \{-1, 1\}^{1 \times L}$ مقدار دهی اولیه کنید :

۲. همبستگی اولیه r و مقدار $f_2(r)$ را طبق رابطه (۶) محاسبه کنید.

۳. مقدار تکرار را برابر 0 قرار دهید.

۴. تا وقتی که حداکثر تعداد تکرار $<$ تکرار انجام بده :

۵. یک ماتریس جایگشت P تصادفی ایجاد کنید.

۶. برای هر $u \in p_u$ انجام بده :

۷. موارد $r^{(iter+1)}$ و a_u و $f_2(r^{(iter+1)})$ را محاسبه کنید .

۸. اگر $PSL(r^{(iter+1)}) \leq PSL(u)$:

۹. مقدار $s(u)$ را $-s(u)$ قرار دهید.

۱۰. برگردان S.

۱۱. پایان اگر.

۱۲. اگر $f_2(r^{(iter+1)}) < f_2(r)$ آنگاه :

۱۳. مقدار $s(u)$ را $-s(u)$ قرار دهید.

۱۴. مقدار $r^{(iter)}$ را $r^{(iter+1)}$ قرار دهید.

۱۵. مقدار $f_2(r^{(iter)})$ و $f_2(r^{(iter+1)})$ خارج از حلقه.

۱۷. پایان اگر.

۱۸. پایان برای.

۱۹. اگر بهیودی حاصل نشد :

۲۰. تعداد I فاز بصورت تصادفی از کد فاز دودویی وارون (صفر ها به یک و یک ها به صفر تبدیل شوند) شوند.

۲۱. مقدار $f_2(r)$ طبق رابطه (۶) محاسبه شود.

۲۲. پایان اگر.

۲۳. مقدار $iter + 1$ را $iter$ قرار دهید.

۲۴. پایان تا وقتی که.

۲۵. برگردان S.

شکل ۲- روند اجرای الگوریتم پیشنهادی.

جدول ۲-مقایسه PSL (مطابق تعریف PSL در مقاله) الگوریتم پیشنهادی با الگوریتم های پیشرفته در طول های مختلف کد.

الگوریتم پیشنهادی	SHC	DPM	BiST	WeBEST	طول کد
۸	۸	۱۵	۲۳	۱۷	۳۰۰
۲۰	۲۰	۲۲	۳۶	۲۵	۷۰۰
۲۵	۲۴	۲۹	۴۶	۳۳	۱۱۰۰
۳۰	۳۰	۳۵	۶۳	۳۸	۱۵۰۰
۳۵	۳۵	۳۸	۷۰	۴۳	۱۹۰۰

جدول ۳- مقایسه PSL زمان محاسباتی الگوریتم پیشنهادی با

الگوریتم SHC به ثانیه.

الگوریتم پیشنهادی	SHC	طول کد
۱۱ ثانیه	۱۷ ثانیه	۴۰۰
۲۳ ثانیه	۵۵ ثانیه	۶۰۰
۵۳ ثانیه	۱۵۴ ثانیه	۱۲۰۰
۱۰۰ ثانیه	۲۶۴ ثانیه	۱۶۰۰
۱۰۸ ثانیه	۳۴۴ ثانیه	۱۸۰۰

برای اطمینان از مقایسه منصفانه، برای هر پیکربندی از طریق ۱۰ اجرای مستقل با توالی های اولیه تصادفی آزمایش و بهترین نتیجه

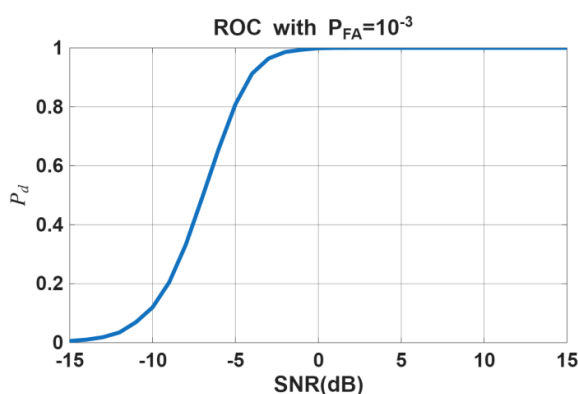
³ Fast Fourier Transform

⁴ Block Coordinate Descent

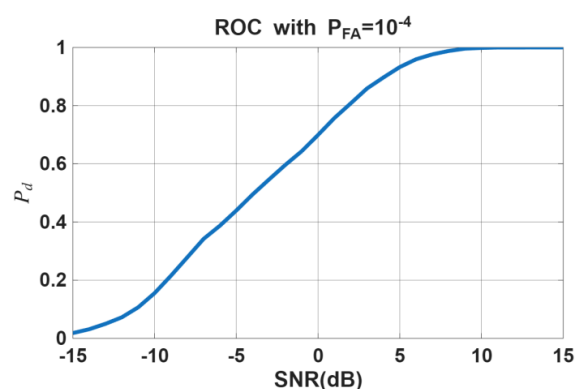
¹ Peak Sidelobe Level

² Integrated Sidelobe Level

طول ۱۶۹، در حدود ۶ دسی بل سطح لوب جانبی کمتری نسبت به کد تو در تو از خود نشان می‌دهد. به منظور ارزیابی دقیق‌تر کارایی الگوریتم پیشنهادی در مواجهه با سناریوهای چندهدفه، یک سناریوی دوهدفه شامل دو هدف با ابعاد متفاوت در نظر گرفته شده است که شامل یک کشتی (هدف بزرگ) و یک دکوی دریایی (هدف کوچک) می‌باشد. برای ایجاد چالش عملیاتی برای سامانه‌ی راداری و شبیه‌سازی شرایط واقعی که در آن اهداف به شدت به یکدیگر نزدیک هستند، فاصله‌ی بین این دو هدف کمتر از ده متر در نظر گرفته شده است. در این شبیه‌سازی، سیگنال‌های بازگشتی از اهداف در محدوده نسبت سیگنال به نویز (SNR)^۱ بین ۱۵- تا ۱۵ دسی بل بررسی شده‌اند تا پاسخ الگوریتم در شرایط مختلف نویز و تداخل سیگنالی سنجیده شود. فرآیند تشخیص و تفکیک کشتی از اختلال دکوی در قالب ۱۰۰۰۰ تکرار برای دو سطح احتمال هشدار کاذب^۲، 10^{-3} و 10^{-4} شبیه‌سازی گردید. نتایج حاصل از این ارزیابی‌های آماری، که نشان‌دهنده‌ی توانایی الگوریتم در تفکیک اهداف در نزدیکی یکدیگر است، در شکل‌های ۴ و ۵ ارائه شده است.

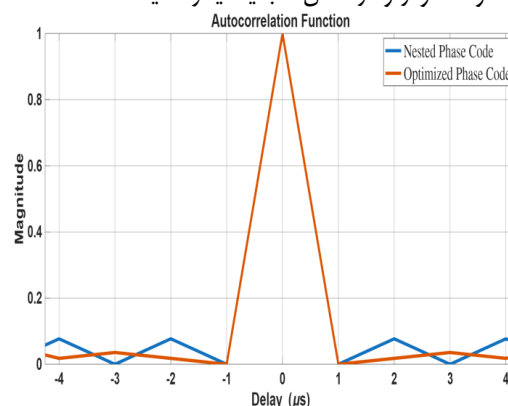


شکل ۴- نمودار احتمال تشخیص بر حسب SNR با احتمال هشدار کاذب 10^{-3} .



شکل ۵- نمودار احتمال تشخیص بر حسب SNR با احتمال هشدار کاذب 10^{-4} .

انتخاب شد. پارامتر حداکثر تعداد تکرار و پارامتر h به ترتیب روی 10^6 و ۲ تنظیم شده‌اند. جدول ۲ مقایسه عملکرد PSL الگوریتم‌های مختلف را نشان می‌دهد. نتایج تجربی نشان می‌دهد که الگوریتم پیشنهادی مبتنی بر لگاریتم مجموع به عملکرد رقابتی PSL قابل مقایسه با الگوریتم SHC دست می‌یابد، در حالی که از الگوریتم‌های BiST، WeBEST و DPM بهتر عمل می‌کند. BiST از یک رویکرد بهینه‌سازی مستقیم استفاده می‌کند، اما مقادیر PSL به طور قابل توجهی بالاتری را ارائه می‌دهد، در حالی که WeBEST و DPM سطوح عملکرد متوسطی را بین BiST و الگوریتم پیشنهادی نشان می‌دهند. نکته مهم این است که اختلاف عملکرد بین الگوریتم‌های مختلف با افزایش طول دنباله فاز دودویی بیشتر می‌شود. همانطور که در جدول ۲ نشان داده شده است، الگوریتم پیشنهادی و SHC عملکرد مشابهی را از نظر بهینه‌سازی PSL نشان می‌دهند. به دلیل ماهیت غیر محدب مسائل طراحی شکل موج، هم الگوریتم پیشنهادی و هم SHC می‌توانند به راه‌حل‌های بهینه محلی با کیفیت بالا دست یابند. الگوریتم پیشنهادی تقریب نرمی از تابع ماکزیمم را ارائه می‌دهد که با نرم p قابل مقایسه است و در عین حال پیچیدگی محاسباتی را کاهش می‌دهد. همانطور که در جدول ۳ نشان داده شده است، الگوریتم مبتنی بر لگاریتم مجموع، در مقایسه با الگوریتم SHC، کارایی محاسباتی بهبود یافته‌ای را نشان می‌دهد. به عنوان مثال، وقتی طول دنباله ۱۸۰۰ باشد، زمان محاسباتی SHC تقریباً سه برابر الگوریتم مبتنی بر لگاریتم مجموع پیشنهادی است. به منظور تحلیل عملکرد کد نسبت به کد کلاسیک تودرتو، تابع خود همبستگی کد شبه‌بهینه و کد تودرتو در شکل ۳ با یکدیگر مقایسه شده‌اند.



شکل ۳- مقایسه تابع همبستگی کد تو در تو به طول ۱۶۹ با تابع همبستگی دنباله حاصل از الگوریتم پیشنهادی (بدلیل اینکه فاصله دکوی از کشتی در حد کمتر از ۱۰ متر است در این شکل تابع خود همبستگی را در تاخیرهای بین ۴- و ۴+ نمایش داده شده است).

نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که لوب‌های جانبی آن در مقایسه با کد کلاسیک تو در تو از سطح پایین‌تری برخوردار است. این ویژگی بیانگر قابلیت مناسب کد شبه‌بهینه از نظر فشرده‌سازی پالس و کاهش ابهام برد است. همانطور که در شکل ۳ مشخص است کد شبه‌بهینه با

² False Alarm Probability

¹ Signal To Noise Ratio

بین کشتی و دکوی از اهمیت بالایی برخوردار است، بسیار مفید و کاربردی می‌باشد.

۶- نتیجه گیری

در این مقاله یک الگوریتم کارآمد برای طراحی دنباله‌های فاز دودویی ارائه کرده ایم که در آن از یک تابع هدف مبتنی بر تابع لگاریتم مجموع بهره گرفته شده است. در روش پیشنهادی، ارزیابی تابع لگاریتم مجموع با یک سازوکار بازگشتی برای محاسبه تابع هم‌بستگی ترکیب شده و در نتیجه، پیچیدگی محاسباتی به‌طور چشمگیری کاهش می‌یابد، بی‌آنکه از اثربخشی فرآیند بهینه‌سازی کاسته شود. نتایج شبیه‌سازی‌ها که در شکل‌های ۳ و ۴ نشان داده شده، حاکی از آن است که الگوریتم پیشنهادی با استفاده از هزینه محاسباتی کمتر، به سطح عملکرد قابل توجهی در معیار بهینه ترین مقدار سطح لوب جانبی دست یافته است. همانطور که در شکل ۳ مشاهده می‌شود، کد شبه‌بهینه پیشنهادی ۶ دسی‌بل مقدار سطح لوب جانبی کمتری نسبت به کد تو در تو ارائه می‌دهد. سطح لوب جانبی به‌مراتب پایین‌تری نسبت به کدهای کلاسیک، باعث افزایش در تشخیص دقیق‌تر دو هدف به طور همزمان، حتی در محیط‌های چالش‌برانگیز می‌شود. از این رو، الگوریتم پیشنهادی در کاربردهایی نظیر آشکارسازی کشتی از اختلال دکوی، که نیاز به شناسایی و تفکیک کشتی و دکوی در کنار هم دارد، بسیار مفید و کارآمد است.

۷- مراجع

- [1] M. Alae-Kerahroodi, P. Babu, M. Soltanalian, and M. B. Shankar, Signal design for modern radar systems. Artech House, 2022.
- [2] N. Levanon and E. Mozeson, "Radar Signals."
- [3] M. M. Pishrow and J. Abouei, "A sequential constraint relaxation framework to design phase-coded sequences for radar systems," Digital Signal Processing, vol. 136, p. 103985, 2023.
- [4] V. A. Nenashev, A. R. Bestugin, A. V. Rabin, S. V. Solenyi, and S. A. Nenashev, "Modified Nested Barker Codes for Ultra-Wideband Signal-Code Constructions," Sensors (Basel, Switzerland), vol. 23, no. 23, p. 9528, 2023.
- [5] H. He, P. Stoica, and J. Li, "Designing unimodular sequence sets with good correlations—Including an application to MIMO radar," IEEE Transactions on Signal Processing, vol. 57, no. 11, pp. 4391–4405, 2009.
- [6] T. Liu, J. Sun, G. Wang, X. Du, and W. Hu, "Designing low side-lobe level-phase coded waveforms for MIMO radar using P-norm optimization," IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, vol. 59, no. 4, pp. 3797–3810, 2023.
- [7] E. Raei, M. Alae-Kerahroodi, P. Babu, and M. B. Shankar, "Generalized waveform design for sidelobe reduction in MIMO radar systems," Signal Processing, vol. 206, p. 108914, 2023.
- [8] H. He, J. Li, and P. Stoica, Waveform design for active sensing systems: a computational approach. Cambridge University Press, 2012.
- [9] F.-c. Li, Y.-n. Zhao, and X.-l. Qiao, "A waveform design method for suppressing range sidelobes in desired intervals," Signal Processing, vol. 96, pp. 203–211, 2014.

شکل ۴ منحنی مشخصه عملکرد آشکارساز را برای یک آشکارساز با احتمال هشدار کاذب ثابت 10^{-3} نشان می‌دهد. در این نمودار، محور افقی نسبت سیگنال به نویز بر حسب دسی‌بل و محور عمودی احتمال آشکارسازی را نمایش می‌دهد. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، با افزایش مقدار نسبت سیگنال به نویز، احتمال آشکارسازی نیز به‌صورت یکنواخت افزایش می‌یابد که بیانگر بهبود عملکرد آشکارساز در شرایطی است که کیفیت سیگنال نسبت به نویز بیشتر می‌شود. در ناحیه SNR های بسیار پایین، یعنی حدود -15 تا -10 دسی‌بل، مقدار احتمال آشکارسازی تقریباً صفر است. این موضوع نشان می‌دهد که در این شرایط، توان سیگنال به اندازه‌ای پایین است که آشکارساز قادر به تفکیک اهداف از نویز نبوده و در نتیجه احتمال تشخیص صحیح بسیار ناچیز است. با افزایش تدریجی نسبت سیگنال به نویز و ورود به محدوده بین -9 تا -4 دسی‌بل، منحنی دارای شیب تند می‌شود که نشان‌دهنده حساسیت زیاد عملکرد آشکارساز در این بازه است. در این ناحیه، حتی افزایش اندکی در SNR موجب رشد قابل توجه احتمال آشکارسازی می‌شود؛ به‌گونه‌ای که احتمال آشکارسازی از حدود 0.2 در نزدیکی -9 دسی‌بل به حدود 0.8 در -5 دسی‌بل و سپس به حدود 0.9 در -4 دسی‌بل افزایش می‌یابد. با افزایش بیشتر نسبت سیگنال به نویز، منحنی به ناحیه اشباع وارد می‌شود. از حدود -2 دسی‌بل به بالا، احتمال آشکارسازی تقریباً برابر یک است و آشکارساز تقریباً دکوی و کشتی را با موفقیت تشخیص می‌دهد. در این شرایط، افزایش بیشترین نسبت سیگنال به نویز تأثیر محسوسی بر عملکرد سیستم ندارد، زیرا آشکارساز به حداکثر کارایی خود رسیده است. با مقایسه دو منحنی مشخصه (شکل ۴ و شکل ۵) مشاهده می‌شود که کاهش احتمال هشدار کاذب از 10^{-3} به 10^{-4} تأثیر قابل توجهی بر عملکرد آشکارساز گذاشته است. (شکل ۵)، زمانی که احتمال هشدار کاذب به 10^{-4} کاهش یافته است، منحنی مشخصه به سمت راست منتقل شده و شیب آن ملایم‌تر شده است. این بدان معناست که برای دستیابی به همان احتمال آشکارسازی، به مقادیر بزرگ‌تری از SNR نیاز است. به عنوان مثال، احتمال آشکارسازی برای 10^{-4} در 0 دسی‌بل تنها به حدود 0.7 می‌رسد، در حالی که در منحنی اول در همین ناحیه احتمال آشکارسازی تقریباً برابر یک بود. همچنین برای دستیابی به احتمال آشکارسازی نزدیک به 100 درصد، در منحنی دوم به SNR حدود 8 تا 9 دسی‌بل نیاز است، در حالی که در شکل ۴ این عملکرد در حدود 0 دسی‌بل حاصل شده بود. در مجموع، احتمال هشدار کاذب 10^{-3} از نظر قابلیت آشکارسازی عملکرد بهتری دارد و در SNR های پایین‌تر به احتمال آشکارسازی بالا دست می‌یابد، اما نرخ هشدار کاذب آن بیشتر است. در مقابل، منحنی مربوط به 10^{-4} اگرچه هشدارهای کاذب را به میزان ده برابر کاهش داده است، اما برای رسیدن به همان سطح از عملکرد به نسبت سیگنال به نویز بالاتری نیاز دارد. این رفتار با مبانی نظری آشکارسازی آماری کاملاً سازگار است و نشان می‌دهد که انتخاب مقدار احتمال آشکارساز باید متناسب با نیاز کاربر انجام شود. این ویژگی در مسائلی که تمایز دقیق

- [10] M. Dimitrov, T. Baitcheva, and N. Nikolov, "On the generation of long binary sequences with record-breaking PSL values," *IEEE Signal Processing Letters*, vol. 27, pp. 1904–1908, 2020.
- [11] M. A. Kerafroudi, A. Aubry, A. De Maio, M. M. Naghsh, and M. Modarres-Hashemi, "A coordinate-descent framework to design low PSL/ISL sequences," *IEEE Transactions on Signal Processing*, vol. 65, no. 22, pp. 5942–5956, 2017.
- [12] M. Alae-Kerafroudi, M. Modarres-Hashemi, and M. M. Naghsh, "Designing sets of binary sequences for MIMO radar systems," *IEEE Transactions on Signal Processing*, vol. 67, no. 13, pp. 3347–3360, 2019.
- [13] M. Soltanalian, M. M. Naghsh, and P. Stoica, "A fast algorithm for designing complementary sets of sequences," *Signal Processing*, vol. 93, no. 7, pp. 2096–2102, 2013.
- [14] M. Dimitrov, T. Baitcheva, and N. Nikolov, "Efficient generation of low autocorrelation binary sequences," *IEEE Signal Processing Letters*, vol. 27, pp. 341–345, 2020.