



Computational Intelligence in Electrical Engineering
Vol. 14, No. 2, 2023
Research Paper

Target tracking in MIMO Radar Systems using Interactive Multiple Extended Kalman Filter and its Optimization

Davood Soleymani ¹, Ramazan Havangi ²

¹ Electrical Engineering, Faculty of Electrical Engineering and Computer, University of Birjand, Birjand, Iran

² Electrical Engineering, Faculty of Electrical Engineering and Computer, University of Birjand, Birjand, Iran

Abstract:

Multi-Input and Output Radar System (MIMO) is a new type of radar system that has been the subject of much research in recent years due to its many advantages. Meanwhile, the issue of target tracking in MIMO radar systems is of great importance, and providing an efficient solution for it remains an unresolved issue. In this paper, target tracking in MIMO radar systems using optimizing Kalman interactive filter is investigated. The proposed method in this research is the MIMO radar system for the simultaneous tracking of multiple targets. In the assumed system model, the interactive multiple model (IMM) based on Extended Kalman Filter (EKF) is used to understand the effective tracking of the target. Also, the optimization of the multi-objective tracking model in MIMO radar systems has been done by the proposed method using the particle swarm optimization (PSO) algorithm. This optimization algorithm estimates the fit of each studied response based on the number of energy resources and time consumed. The efficiency of the proposed method in a simulated environment has been evaluated and its performance in tracking multiple targets has been investigated in terms of different criteria. Based on the results of these experiments, the proposed method, in addition to reducing the amount of tracking error, can be effective in reducing energy consumption and reducing the sampling period. Thus, the proposed method will reduce resource consumption in the multi-objective tracking system.

Keywords: Resource allocation, interceptor radar, Extended Kalman filter, PSO.



This is an open access article under the CC BY-NC-ND/4.0/ License (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).



<https://doi.org/10.22108/isee.2022.132351.1539>

رهگیری هدف در سیستم‌های راداری MIMO با استفاده از فیلتر کالمن

توسعه یافته چندگانه تعاملی و بهینه‌سازی آن

داوود سلیمانی^۱، رمضان هاونگی^{۲*}

۱- کارشناسی ارشد برق - الکترونیک، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه بیرجند، بیرجند، ایران

davidsoley79@Birjand.ac.ir

۲- دانشیار برق - الکترونیک، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه بیرجند، بیرجند، ایران

Havangi@Birjand.ac.ir

چکیده: سیستم راداری با چند ورودی چند خروجی (MIMO)، نسل جدیدی از سیستم‌های راداری است که با توجه به مزایای متعددش، در سال‌های اخیر موضوع تحقیقات فراوانی بوده است. در این بین، موضوع رهگیری هدف در سیستم‌های راداری MIMO از اهمیت زیادی برخوردار بوده و ارائه یک راهکار کارآمد برای آن، همچنان به صورت یک مسئله حل نشده باقی مانده است. در این مقاله رهگیری هدف در سیستم‌های راداری MIMO با استفاده از فیلتر کالمن توسعه یافته (EKF) چندگانه تعاملی (IMM) ارائه شده است. در روش پیشنهادی، سیستم راداری MIMO هم‌موقعیت برای ردیابی هم‌زمان، اهداف چندگانه را مطالعه کرده است. در این روش، از مدل چندگانه تعاملی مبتنی بر EKF برای درک ردیابی مؤثر هدف استفاده شده است. همچنین، بهینه‌سازی مدل ردیابی چندهدفه در سیستم‌های راداری MIMO با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات (PSO) صورت گرفته است. این الگوریتم، برازش هر پاسخ بررسی شده را براساس میزان منابع انرژی و زمانی مصرف شده تخمین می‌زند. کارایی روش پیشنهادی در یک محیط شبیه‌سازی شده، ارزیابی و عملکرد آن در ردیابی اهداف چندگانه از نظر معیارهای مختلف بررسی شده است. براساس نتایج حاصل از این آزمایش‌ها، روش پیشنهادی علاوه بر کاهش میزان خطای ردیابی می‌تواند در کاهش انرژی مصرفی و کاهش دوره نمونه‌گیری مؤثر باشد. بدین ترتیب، روش پیشنهادی، کاهش مصرف منابع در سیستم ردیابی اهداف چندگانه را در پی خواهد داشت.

واژه‌های کلیدی: تخصیص منابع، رادار رهگیر، فیلتر کالمن توسعه یافته، PSO.

۱- مقدمه

حوزه نظامی و غیرنظامی است. به طور کلی براساس وظیفه محول شده به رادارها، آنها به دو دسته کلی رادارهای جستجو و رادارهای رهگیر دسته‌بندی می‌شوند. اصلی‌ترین وظیفه در رادارهای جستجو آشکارسازی^۱ اهداف و در رادارهای رهگیر ردگیری مداوم هدف است [۱].

رادار MIMO^۲ که نسل جدیدی از سیستم‌های راداری است، به‌تازگی توجه روزافزونی را به خود جلب کرده و کاربردهای آن در حوزه تئوری به سمت استفاده‌های عملی در حال حرکت است. در مقایسه با سیستم‌های راداری پیشین، رادار MIMO از عملکرد بهتری در موقعیت‌یابی و شناسایی هدف است و می‌تواند در تشخیص هدف به

امروزه با توجه به افزایش سطح تهدیدات و نیز لزوم نظارت دقیق بر آسمان کشورها، موضوع آشکارسازی اهداف و رهگیری آنها یکی از ضروری‌ترین موضوعات در

^۱ تاریخ ارسال مقاله: ۱۴۰۰/۱۱/۰۳

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۱/۰۸/۲۲

نام نویسنده مسئول: رمضان هاونگی

نشانی نویسنده مسئول: ایران، بیرجند، دانشگاه بیرجند، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر

وضوح و حساسیت بالاتری دست یابد.

به‌طور کلی رادارهای MIMO به دو دسته تقسیم می‌شوند [۲]: رادارهای MIMO هم‌موقعیت^۳ و رادارهای MIMO توزیع‌شده^۴. در سیستم‌های رادار توزیع‌شده MIMO، آنتن‌های انتقال‌دهنده در مقایسه با فاصله آنها تا هدف، دورتر از یکدیگر قرار دارند؛ با این حال، بسیاری از مسائل در دنیای واقعی موجب شده است تا استفاده از رادار MIMO توزیع‌شده به‌صورت عملیاتی امکان‌پذیر نباشد. در مقایسه با رادار توزیع‌شده MIMO، سیستم رادار هم‌موقعیت MIMO که در آن آنتن گیرنده و فرستنده (با توجه به فاصله آنها با هدف) نزدیک به یکدیگر مستقر می‌شوند، یک پیشرفت در سیستم‌های رادار موجود در نظر گرفته می‌شود؛ از این رو، براساس شرایط فنی فعلی، سیستم رادار هم‌موقعیت MIMO دارای ارزش عملیاتی بیشتری نسبت به مدل توزیع‌شده است. مطالعه و بررسی راهکارهای نوین به‌منظور بهبود عملکرد این سیستم‌های راداری امری ضروری خواهد بود.

تعدادی از تحقیقات اخیر، موضوع تخصیص منابع و رهگیری هدف در سیستم‌های راداری MIMO را بررسی کرده‌اند. گادریچ و همکارانش در [۲] به موضوع تخصیص توان در یک شبکه راداری MIMO رهگیر، با هدف کمینه‌کردن کران پایین کرامر - رانو (CRLB)^۵ به‌دست‌آمده از نویسندگان می‌پردازند. یکی از مشکلات اساسی این مقاله، در نظر گرفتن اثرات سطح مقطع راداری (RCS)^۶ به‌صورت غیرتصادفی به‌منظور ساده‌تر شدن مسئله بهینه‌سازی است. در [۳] تعیین استراتژی تخصیص توأم توان و انتخاب گره بهینه در یک شبکه راداری رهگیر چندهدفه، به‌منظور کمینه‌کردن مجموع درایه‌های قطر اصلی ماتریس CRLB، بحث و بررسی شده است. با توجه به ماهیت دینامیکی فرآیند رهگیری، مدل فضای حالت برای این فرآیند رهگیری در نظر گرفته می‌شود. یکی از نکاتی که در این مقاله به آن اشاره‌ای نشده، آن است که فرآیند رهگیری فارغ از نوع رهگیری در نظر گرفته شده است. به‌طور دقیق‌تر، در این مقاله بهبود عملکرد رهگیری، تنها در سطح برنامه‌ریزی شبکه‌ای محدود شده است. این در حالی است که هر یک از انواع رهگیری‌ها، الزامات مخصوص به خود را در

فرمول‌بندی مسئله بهینه‌سازی به دنبال خواهد داشت.

در [۴] تخصیص پرتو^۷ گیرنده به هدف در یک شبکه راداری MIMO رهگیر بررسی شده است. در این شبکه راداری MIMO، فرض می‌شود در فرستنده‌ها از یک پرتو غیرمتمرکز استفاده می‌شود؛ این در حالی است که در گیرنده از یک بیم متمرکز با گلبگ کناری بسیار کوچک، برای تخصیص پرتو به هدف بهره‌برداری می‌شود. در این مقاله، در ابتدا FIM^۸ و سپس CRLB محاسبه می‌شود. سپس با کمک تعدادی ساده‌سازی^۹ مسئله تخصیص منابع در رادارهای MIMO رهگیر، مطالعه می‌شوند. نکته درخور توجه آن است که در رادارهای MIMO رهگیر برخلاف دیگر رادارهای رهگیر، رهگیری محلی وجود ندارد؛ بلکه تمام اطلاعات به‌دست‌آمده از اهداف به‌صورت یکجا پردازش (فرآیند رهگیری) می‌شوند.

در [۵] به تخصیص رادار به هدف در یک شبکه راداری چندکاربری بر پایه نظریه بازی^۹ پرداخته شده است. در این مقاله مسئله رهگیری به‌صورت مدل فضای حالت، فرمول‌بندی و ماتریس حالت اهداف مختلف، محاسبه می‌شود. سپس بر پایه دیدگاه تئوری بازی، مسئله تخصیص بهینه عملکردها در سناریوهای مختلف، به‌منظور کمینه‌کردن مجموع درایه‌های قطر اصلی ماتریس کواریانس خطای اندازه‌گیری حل می‌شود.

در [۶] یک راهکار برای زمانبندی مشترک پرتو و توان در سیستم‌های راداری MIMO برای ردیابی چندهدفه و توزیع‌شده پیشنهاد شده است. راهکار پیشنهادشده در این تحقیق شامل معماری تلفیقی توزیع‌شده‌ای است که نیازهای ارتباطی را در عین حفظ استحکام کلی سیستم کاهش می‌دهد. این معماری تلفیقی توزیع‌شده از تقاطع کواریانس (CI)^{۱۰} برای مدیریت اطلاعات همبستگی ناشناخته در بین گرهای رادار استفاده می‌کند.

در [۷] یک استراتژی تخصیص توان کارآمد برای ردیابی اهداف درحال مانور در رادار MIMO هم‌موقعیت ارائه شده است. مکانیسم به‌کاررفته در این روش، تعیین توان بهینه براساس اطلاعات قبلی مانور هدف در چرخه‌های ردیابی است. این روش، مسئله تخصیص توان را به‌صورت یک مدل بهینه‌سازی، توصیف و آن را در قالب یک مدل

سازوکار کارآمد برای برطرف کردن هم‌زمان این چالش‌ها از اهمیت زیادی برخوردار خواهد بود. در این مقاله، رهگیری هدف در سیستم‌های راداری MIMO با استفاده از فیلتر کالمن توسعه‌یافته (EKF)^{۱۳} چندگانه تعاملی ارائه شده است. همچنین، از PSO^{۱۴} برای بهینه‌سازی مدل ردیابی چندهدفه استفاده شده است. در روش پیشنهادی علاوه بر کاهش میزان خطای ردیابی می‌تواند در کاهش انرژی مصرفی و کاهش دوره نمونه‌گیری مؤثر باشد.

ادامه این مقاله به صورت زیر سازماندهی شده است: بخش دوم به مدل‌سازی سیستم راداری MIMO اختصاص یافته است. در بخش سوم، الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات به طور مختصر مرور شده است. در بخش چهارم رهگیری هدف در سیستم راداری MIMO با استفاده از فیلتر توسعه‌یافته چندگانه تعاملی ارائه شده است. بهینه‌سازی رهگیری چندهدفه مبتنی بر EKF با PSO در بخش پنجم توضیح داده شده است. در نهایت، در بخش ششم، نتایج و پیشنهاداتی برای ادامه کار ارائه شده‌اند.

۲- مدل‌سازی سیستم راداری MIMO

به طور کلی رادارهای MIMO به دو دسته رادارهای MIMO هم‌موقعیت و توزیع شده تقسیم می‌شوند. شکل (۱) رادار MIMO هم‌موقعیت را نشان می‌دهد. در این مقاله رادار MIMO هم‌موقعیت در نظر گرفته شده است. یک سیستم راداری MIMO هم‌موقعیت را در نظر بگیرید که در آن، فرستنده و گیرنده در موقعیت‌های یکسانی واقع شده‌اند. براساس شکل (۱)، سیستم رادار MIMO مفروض از N مؤلفه رادیویی تشکیل شده است. این مجموعه مؤلفه به K دسته تقسیم‌بندی شده‌اند. با توجه به همگن بودن دسته‌ها، مطابق شکل فوق هر دسته تعداد $L = \frac{N}{K}$ مؤلفه رادیویی را شامل خواهد شد. در سیستم راداری MIMO هم‌موقعیت، هر دسته L مؤلفه‌ای چندین سیگنال متعامد را به طور هم‌زمان منتقل می‌کند. بدیهی است پرتوی ایجاد شده از هر دسته مؤلفه در رادار MIMO هم‌موقعیت بسیار گسترده‌تر از پرتوی ایجاد شده در رادار معمولی و بهره انتقال نیز کمتر است. هنگامی که پرتوهای فرستنده جابه‌جا^{۱۵} می‌شوند، چندین پرتوی گیرنده باریک با تکنیک تشکیل پرتو دیجیتال

کرامر - راثو^{۱۱} مدل‌سازی می‌کند. آنها نشان داده‌اند مدل بهینه‌سازی ارائه شده محدب بوده است و سپس با بهره‌گیری از ویژگی کاهش یکنواخت تابع هدف، یک الگوریتم جستجوی خطی مبتنی بر کاهش تدریجی هدف ارائه کرده‌اند. در [۸]، یک راهکار آگاه از منابع برای تخصیص توان در رادارهای MIMO هم‌موقعیت با قابلیت ردیابی اهداف چندگانه ارائه شده است.

این تحقیق به شیوه‌ای مشابه با [۷] مسئله را در قالب یک مدل کرامر - راثو توصیف می‌کند. در این مقاله یک کران پایین برای دقت ردیابی توصیف شده و یک الگوریتم موازی برای جستجوی پاسخ بهینه ارائه شده است. با وجود این، روش ارائه شده در [۷] از عملکرد بهتری نسبت به این تحقیق برخوردار است.

در [۹]، یک استراتژی انتخاب زیرآرایه و تخصیص توان برای ردیابی اهداف چندگانه در محیط‌های شلوغ مبتنی بر شبکه‌های راداری MIMO توزیع شده در مقیاس بزرگ ارائه شده است. مکانیسم استراتژی پیشنهادی در این تحقیق، بهترین حالت تخصیص منابع را به شیوه‌ای بازگشتی انجام داده و هدف آن بهبود دقت ردیابی کلی سیستم براساس اطلاعات پیشین است. در این مقاله، مسئله تحقیق را در قالب یک مدل بهینه‌سازی غیرمحدب با سه متغیر بهینه‌سازی توصیف شده و یک الگوریتم جستجوی محلی دو مرحله‌ای برای حل آن پیشنهاد شده است.

در [۱۰-۱۱]، یک راهکار برای زمانبندی تطبیقی حسگر همراه با تخصیص توان و پهنای باند برای ردیابی اهداف در سیستم راداری MIMO هم‌موقعیت ارائه شده است. در این روش، از فیلتر ذره‌ای^{۱۲} اصلاح شده برای محاسبه کران پایین مدل کرامر - راثو از یک الگوریتم جستجوی خطی برای زمانبندی حسگرها استفاده شده است. سپس، به در نظر داشتن مسئله غیرمحدب تخصیص توان و پهنای باند، یک الگوریتم جستجوی محدب مشترک و یک الگوریتم کمینه‌سازی چرخه برای تبدیل مسئله بهینه‌سازی غیرمحدب به مجموعه‌ای از مسائل محدب توجه شده است.

در مجموع، بیشتر تحقیقات بررسی شده، با چالش‌هایی از قبیل خطای تخمین زیاد، پیچیدگی محاسباتی بالا یا محدودیت کاربرد مواجه‌اند؛ بنابراین، استفاده از یک

فرض کنید تعداد M هدف تحت ردیابی‌اند. در این حالت باید قابلیت مانور هدف در نظر گرفته شود. در روش پیشنهادی، از فیلتر کالمن توسعه‌یافته چندگانه تعاملی برای درک ردیابی مؤثر هدف استفاده خواهد شد. فرض کنید J مدل در فیلتر کالمن توسعه‌یافته چندگانه تعاملی وجود دارد و حرکت هدف در مدل J ام به صورت زیر باشد [5]:

$$x_i^j(t_k) = F_i^j(T_{k-1})x_i^j(t_{k-1}) + \Gamma_i^j(T_{k-1})w_i^j(t_{k-1}), j = 1, 2, \dots, J \quad (1)$$

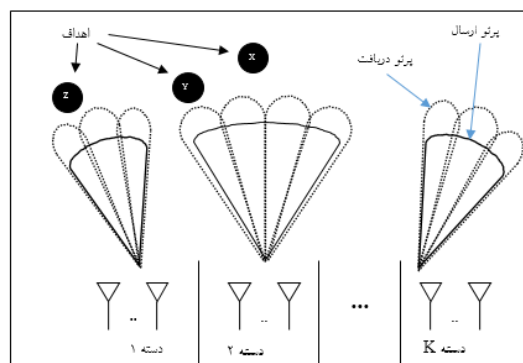
در این رابطه، بردار $x_i^j(t_k)$ به صورت زیر

$$x_i^j(t_k) = [x_i^j(t_k), \dot{x}_i^j(t_k), \ddot{x}_i^j(t_k), y_i^j(t_k), \dot{y}_i^j(t_k), \ddot{y}_i^j(t_k)]^T$$

و شامل برد، سرعت و شتاب هدف i در زمان t_k است. همچنین $F_i^j(T_{k-1})$ نشان‌دهنده ماتریس انتقال مدل J ام است که در آن T_{k-1} معرف اندیس زمانی بین t_k و t_{k-1} است. $w_i^j(t_{k-1})$ مشخص‌کننده نویز مدل J ام بوده و به صورت یک فرآیند تصادفی گوسی با میانگین صفر و کوواریانس $Q_i^j(t_{k-1})$ توصیف می‌شود. در نهایت، $\Gamma_i^j(T_{k-1})$ مشخص‌کننده ماتریس ورودی فرآیند نویز در مدل J ام بوده و J نشان‌دهنده تعداد مدل‌ها در فیلتر کالمن توسعه‌یافته چندگانه تعاملی است.

پس از به‌روزرسانی t_k ، الگوریتم پیشنهادی برای مدیریت منابع در رادار MIMO هم‌موقعیت، عملیات تخصیص زمان و انرژی سیستم را انجام می‌دهد. برای تخصیص منابع زمانی، باید زمان انتخاب نمونه بعدی در سیستم را در اختیار داشت. این زمان به صورت $t_{k+1} = t_k + T_{sys}$ نشان‌دهنده دوره نمونه‌گیری سیستم است. برای تخصیص منابع انرژی، دسته K ام مؤلفه‌ها، جهت پرتوها u_s انرژی و شکل موج ارسال e و حالت فعالیت M مشخص خواهد شد. این بدان معنی است که منبع انرژی e را باید طبق روند مشخص‌شده از K و u_s مصرف کرد. در اینجا، M نشان‌دهنده مجموعه اهداف آشکارسازی شده است؛ برای مثال، هنگامی که دو هدف در حال ردیابی هستند، سه حالت فعالیت ممکن وجود خواهد داشت. این حالات

(DBF)¹⁶ تشکیل خواهد شد تا بتواند حجم فضایی را که پرتوهای فرستنده آشکارسازی کرده‌اند، پوشش دهد. در این حالت، تخمین‌هایی از اهداف به‌واسطه پرتوهای گیرنده باریک مختلف استخراج می‌شوند؛ بنابراین، مسئله ردیابی چندهدفه می‌تواند به‌صورت ترکیبی از چندین مسئله ردیابی هدف منفرد در نظر گرفته شود که هر یک از این مسائل به‌طور مستقل حل‌شدنی است.



شکل (1): مدل سیستم رادار هم‌موقعیت MIMO [3]

از طریق کنترل تعداد مؤلفه‌ها در هر دسته، رادار MIMO هم‌موقعیت می‌تواند تعداد متفاوتی از پرتوهای چندگانه را به‌طور هم‌زمان منتقل کند تا بدین ترتیب توانایی آشکارسازی چندین هدف را داشته باشد. علاوه بر این، هر پرتو در صورتی که به اندازه کافی گسترده باشد، ممکن است بتواند چندین هدف را به‌طور هم‌زمان آشکار کند؛ بنابراین، رادار MIMO هم‌موقعیت انعطاف‌پذیری بیشتری نسبت به رادارهای رهگیر در آشکارسازی اهداف متعدد داشته و از درجه آزادی بیشتری در مدیریت منابع سیستم برخوردار است.

در مسئله مدیریت منابع مطالعه‌شده در این تحقیق، علاوه بر بهینه‌سازی پارامترهای اساسی سیستم راداری مفروض، بهینه‌سازی اندازه هر دسته از مؤلفه‌ها نیز در نظر گرفته شده است. دلیل در نظر گرفتن این معیار، این است که اندازه دسته می‌تواند پهنا و میزان بهره پرتو انتقال را تعیین کند. برای یک هدف و پرتو مفروض، پهنا پرتو تعیین‌کننده تعداد اهدافی است که پرتو آشکار می‌کند. در عین حال، بهره پرتو مشخص‌کننده نسبت سیگنال به نویز (SNR)¹⁷ است.

سیستم، جهت پرتو و منبع انرژی هستند. برای انجام ردیابی چندهدفه، ابتدا باید اهداف را شناسایی کرد؛ بنابراین، چگونگی به حداقل رساندن مصرف در منابع سیستم تحت این ضمانت که اهداف را بتوان به طور مؤثر تشخیص داد، مسئله مدیریت منابعی است که باید به آن توجه شود. برای مدیریت مؤثر منابع، پارامترهای عملیاتی سیستم از جمله اندازه دسته، دوره نمونه برداری از سیستم و جهت پرتو باید مطابق با شرایط محیط و سیستم تنظیم شوند.

۳- الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات

بهینه‌سازی ازدحام ذرات یک روش محاسباتی است که با استفاده از فرآیندهای مبتنی بر تکرار، سعی در بهبود یک راه‌حل کاندید براساس معیاری کیفی با نام برازش^{۱۸} دارد و بدین طریق یک مسئله را بهینه می‌کند. این الگوریتم، با داشتن جمعیتی از راه‌حل‌های کاندید (ذرات) و حرکت این ذرات در فضای جستجو براساس فرمول روابط ساده براساس موقعیت و سرعت ذره، مسئله را حل می‌کند [۱۲] و [۱۳]. حرکت هر ذره تحت تأثیر بهترین موقعیت شناخته‌شده محلی آن قرار دارد و در عین حال به سمت بهترین موقعیت‌های شناخته‌شده در فضای جستجو هدایت می‌شود که با یافتن موقعیت‌های بهتر توسط سایر ذرات به روز می‌شوند. عملکرد الگوریتم بر این ایده استوار است که گروه ذرات به سمت بهترین راه‌حل‌ها حرکت کند [۱۴]. الگوریتم PSO، یک روش فراابتکاری است؛ زیرا درباره بهینه‌سازی مسئله فرضیه‌های کمی ارائه می‌دهد یا اصلاً پیش‌بینی نمی‌کند و می‌تواند فضاهای بسیار بزرگی از راه‌حل‌های کاندید را جستجو کند [۱۵]. همچنین، PSO از گرادیان مسئله بهینه‌سازی شده استفاده نمی‌کند؛ به این معنی که PSO نیازی به این ندارد که مسئله بهینه‌سازی تغییرپذیر باشد. همان‌طور که روش‌های کلاسیک به بهینه‌سازی مانند نزول گرادیان و روش‌های شبه‌نیوتونی نیاز دارند. این خصوصیات موجب می‌شود تا الگوریتم PSO، راهبردی مناسب برای بهینه‌سازی مدل ردیابی چندهدفه به نظر برسد [۱۶-۱۷].

عبارت‌اند از: $M \in \{\{1\}, \{2\}, \{1,2\}\}$. در این مجموعه $M = \{1\}$ نشان می‌دهد هدف ۱ آشکار شده است، $M = \{2\}$ بدین معنی است که هدف ۲ آشکار شده است و $M = \{1,2\}$ نشان‌دهنده آشکارسازی هر دو هدف است. زمانی که هدف i در نمونه t_{k+1} ردیابی شود، مشاهدات موقعیت این هدف به صورت زیر محاسبه خواهد شد [۵]:

$$z_i(t_{k+1}) = h(x_i(t_{k+1})) + v_i(t_{k+1}) \quad (2)$$

که در رابطه فوق، $\begin{bmatrix} r_i(t_{k+1}) \\ b_i(t_{k+1}) \end{bmatrix}$ نشان‌دهنده محدوده هدف و $r_i(t_{k+1})$ مشخص‌کننده راستای آن است. همچنین، $v_i(t_{k+1})$ معرف خطای اندازه‌گیری بوده است و به صورت فرآیند تصادفی گاوسی و میانگین صفر توصیف می‌شود. کوواریانس خطای اندازه‌گیری برابر است با [۵]:

$$R_i(t_{k+1}) = J \cdot \begin{bmatrix} \sigma_{r,i}^2(t_{k+1}) & 0 \\ 0 & \sigma_{b,i}^2(t_{k+1}) \end{bmatrix} \cdot J^T \quad (3)$$

در رابطه فوق، J یک ماتریس ژاکوبی تبدیل مختصات قطبی به دکارتی است و $\sigma_{r,i}^2(t_{k+1})$ و $\sigma_{b,i}^2(t_{k+1})$ به ترتیب نشان‌دهنده واریانس خطای اندازه‌گیری برای مقادیر محدوده و راستای هدف هستند. به صورت ویژه، $\sigma_{r,i}(t_{k+1})$ و $\sigma_{b,i}(t_{k+1})$ به صورت زیر محاسبه می‌شوند [۵]:

$$\sigma_{r,i}(t_{k+1}) = \frac{\Delta r(t_{k+1})}{\sqrt{SNR_i(K, T_{sys}, M, u_s, e)}} \quad (4)$$

$$\sigma_{b,i}(t_{k+1}) = \frac{Bw}{c \cdot \sqrt{2SNR_i(K, T_{sys}, M, u_s, e)}} \quad (5)$$

در روابط فوق، $\Delta r(t_{k+1})$ دامنه تفکیک‌پذیری موج انتقال را نشان می‌دهد و Bw پهنای پرتو را مشخص می‌کند. همچنین، c یک ثابت بوده و $SNR_i(K, T_{sys}, M, u_s, e)$ نشان‌دهنده نسبت سیگنال به نویز در هدف i است و با پارامترهای عملکردی سیستم رادار در ارتباط است که در آن، K تعداد دسته‌های سیستم راداری هم‌موقعیت را نشان داده و T_{sys} مشخص‌کننده دوره نمونه‌گیری سیستم است. در نهایت، M ، u_s و e به ترتیب نشان‌دهنده حالت فعالیت

که در رابطه فوق، بردار $[x_j(0), \dot{x}_j(0), \ddot{x}_j(0)]$ نشان‌دهنده برد، سرعت و شتاب اولیه هدف در بعد افقی و $[y_i(0), \dot{y}_i(0), \ddot{y}_i(0)]$ مشخص‌کننده همین مقادیر در بعد عمودی است. همچنین، I یک ماتریس مربعی قطری است و $R(0)$ به‌عنوان مقدار اولیه ماتریس R که ماتریس تعدیل خطا نامیده می‌شود، در نظر گرفته می‌شود.

گام بعدی در فرآیند مدل‌سازی فیلتر کالمن توسعه‌یافته چندگانه تعاملی، یک فرآیند تکراری است و به اندازه تعداد نمونه‌های N_{sample} تکرار خواهد شد. در هر بار تکرار این فرآیند، ابتدا بردار موقعیت جدید هدف و ماتریس تعدیل خطا با روابط زیر پیش‌بینی می‌شود [۵]:

$$\hat{x}_i(t_k|t_{k-1}) = J \cdot \hat{x}_i(t_{k-1}|t_{k-1}) \quad (10)$$

$$R(t_k|t_{k-1}) = J \cdot R(t_{k-1}|t_{k-1}) \cdot J^T + Q \quad (11)$$

که در روابط فوق، $\hat{x}_i(t_k|t_{k-1})$ نشان‌دهنده برد، سرعت و شتاب هدف در دوره نمونه‌برداری جدید t_k براساس موقعیت قبلی آن $\hat{x}_i(t_{k-1}|t_{k-1})$ در دوره t_{k-1} است. J یک ماتریس ژاکوبی تبدیل مختصات قطبی به دکارتی است. همچنین، $R(t_k|t_{k-1})$ ماتریس تعدیل خطا در دوره t_k است که براساس ماتریس تعدیل دوره قبل، یعنی $R(t_{k-1}|t_{k-1})$ اصلاح می‌شود. همچنین، Q ماتریس کوواریانس نویز پروسه با توزیع نرمال و میانگین صفر است. در ادامه هر دوره نمونه‌گیری، ماتریس اصلاح خطای K به‌صورت زیر محاسبه می‌شود [۵]:

$$K(t_k) = R(t_k|t_{k-1})H(t_k)(C + H(t_k)R(t_k|t_{k-1})H^T(t_k))^{-1} \quad (12)$$

در رابطه بالا، ماتریس تعدیل $R(t_k|t_{k-1})$ از طریق رابطه (۱۱) محاسبه شده و C نشان‌دهنده ماتریس قطری خطای تخمین موقعیت هدف است. همچنین، $H(t_k)$ نشان‌دهنده ماتریس اندازه‌گیری محدوده موقعیتی هدف در دوره نمونه‌گیری t_k است که در ادامه بحث شده است. در انتهای هر دوره نمونه‌گیری، موقعیت هدف و ماتریس تطبیق متناظر با آن برای به‌کارگیری در دوره نمونه‌گیری بعدی محاسبه خواهد شد:

۴- رهگیری هدف در سیستم راداری MIMO با استفاده از EKF چندگانه تعاملی

EKF چندگانه تعاملی، روشی است که به‌صورت بازگشتی میانگین مربعات خطا را به حداقل می‌رساند. مهم‌ترین مزیت این فیلتر نسبت به سایر روش‌های پیش‌بینی این است که مشاهدات نویز را در مدل خود در نظر می‌گیرد. این ویژگی در حوزه ردیابی هدف از اهمیت زیادی برخوردار است؛ زیرا مشاهداتی که در مانور هدف وجود دارد، دارای نویز است. با توجه به اینکه فیلتر کالمن توسعه‌یافته چندگانه تعاملی نویز فرآیند را در نظر می‌گیرد، عملکرد بهتری نسبت به سایر روش‌ها دارد. به دلیل غیرخطی بودن معادلات مشاهده، استفاده از فیلتر کالمن توسعه‌یافته، گزینه مناسبی برای ردیابی هدف خواهد بود. معادلات مشاهده در رادار MIMO عبارت‌اند از: تخمین برد و برآورد زاویه گیرنده آام که به‌صورت زیر محاسبه می‌شوند:

$$r_i(t_k) = \sqrt{(x_i(t_k) - x_i^r)^2 + (y_i(t_k) - y_i^r)^2} \quad (6)$$

$$b_i(t_k) = \tan^{-1} \left(\frac{y_i(t_k) - y_i^r}{x_i(t_k) - x_i^r} \right) \quad (7)$$

در روابط فوق، $(x_i(t_k), y_i(t_k))$ نشان‌دهنده موقعیت هدف i در زمان t_k بوده و (x_i^r, y_i^r) مشخص‌کننده موقعیت گیرنده r است. همان‌طور که در بخش قبل تشریح شد مشاهدات موقعیت یک هدف براساس رابطه (۲) محاسبه می‌شود. همچنین، گام‌های فرآیند فیلتر کالمن توسعه‌یافته چندگانه تعاملی در ادامه آورده شده است.

در اولین گام از فرآیند فیلتر کالمن توسعه‌یافته چندگانه تعاملی، مقادیر اولیه، بردار حرکتی هدف است:

$$x_j(0) = [x_j(0), \dot{x}_j(0), \ddot{x}_j(0), y_i(0), \dot{y}_i(0), \ddot{y}_i(0)]^T \quad (8)$$

$$R(0) = 10 I \quad (9)$$

حالت فعالیت به صورت $M = 1$ باشد، هدف ۱ باید در پوشش پرتوی انتقال قرار گیرد؛ بنابراین، هر هدف که در مجموعه حالات فعالیت M باشد، باید با پرتوی فرستنده آشکار شود؛ به گونه‌ای که:

$$u_{s,k} - \frac{\phi(K)}{2} \leq u_{pre,i} \leq u_{s,k} + \frac{\phi(K)}{2}, \forall i \in M, \exists k \in \{1, \dots, K\} \quad (16)$$

که در رابطه فوق، $u_{s,k}$ نشان‌دهنده مؤلفه k ام در u_s است و توصیف‌کننده جهت پوتو ارسالی از k امین دسته در سیستم راداری است. همچنین، $u_{pre,i}$ نشان‌دهنده راستای پیش‌بینی شده برای هدف i بوده و $\phi(K)$ معرف پهنای پرتوی مرتبط با دسته جاری است و به صورت $\phi(K) = \frac{1.76K}{N}$ محاسبه می‌شود. براساس رابطه (۱۵)، هر هدف در حالت فعالیت M باید دست‌کم با یک پرتوی فرستنده آشکار شود. علاوه بر این، برای شناسایی مؤثر هدف آشکار شده، احتمال شناسایی هدف باید از آستانه احتمال مشخص شده فراتر رود، یعنی:

$$P_{d_i}(K, T_{sys}, M, u_s, e) \geq P_{d_{th}}, \forall i \in M \quad (17)$$

که در رابطه فوق، $P_{d_{th}}$ نشان‌دهنده آستانه احتمال آشکارسازی و $P_{d_i}(K, T_{sys}, M, u_s, e)$ معرف احتمال آشکارسازی هدف i براساس پیکربندی (K, T_{sys}, M, u_s, e) است و با نسبت سیگنال به نویز در ارتباط است؛ برای مثال، برای هدفی که مقطع راداری $(RCS)^{19}$ آن از توزیع Swerling I پیروی می‌کند، احتمال آشکارسازی آن به صورت زیر محاسبه می‌شود [V]:

$$P_{d_i}(K, T_{sys}, M, u_s, e) = \frac{1}{1 + SNR_i(K, T_{sys}, M, u_s, e)}, \forall i \in M \quad (18)$$

۵-۲- تابع هدف در مسئله بهینه‌سازی

رادار MIMO هم‌موقعیت به دلیل ویژگی‌هایش در هم‌زمانی پرتوهای چندگانه و گستردگی پرتوها، در ردیابی چندهدفی مزایایی خواهد داشت؛ بنابراین، هدف از مدیریت منابع در این سیستم راداری، حداکثر استفاده از منابع سیستم

$$\hat{x}_i(t_k|t_k) = \hat{x}_i(t_k|t_{k-1}) + K(t_k)(p(t_k) - h(\hat{x}_i(t_k|t_{k-1}))) \quad (13)$$

$$R(t_k|t_k) = (1 - K(t_k)H(t_k))R(t_k|t_{k-1}) \quad (14)$$

در روابط فوق، $\hat{x}_i(t_k|t_k)$ نشان‌دهنده بردار برد، سرعت و شتاب هدف در دوره نمونه‌برداری جدید t_k است که براساس مقدار آن در گام پیش‌بینی $\hat{x}_i(t_k|t_{k-1})$ محاسبه شده است. همچنین، در معادله (۱۴) به‌روزرسانی $R(t_k|t_k)$ با استفاده ماتریس تعدیل $R(t_k|t_{k-1})$ و ماتریس اصلاح خطای $K(t_k)$ انجام شده است. درخور ذکر است ماتریس تعدیل $R(t_k|t_{k-1})$ و ماتریس اصلاح خطای $K(t_k)$ به ترتیب از طریق (۱۱) و (۱۲) محاسبه شده‌اند. $p(t_k)$ در معادله (۱۳) وضعیت مشاهده شده در دوره نمونه‌گیری جاری را نشان می‌دهد. در فرآیند مدل‌سازی فیلتر کالمن توسعه یافته چندگانه تعاملی، عملیات محاسبه روابط (۱۰) تا (۱۴) به اندازه تعداد نمونه‌های N_{sample} تکرار خواهد شد. در طی انجام این محاسبات، ماتریس اندازه‌گیری H در رابطه (۲) با استفاده از رابطه (۱۵) محاسبه می‌شود:

$$H(t_k) = \frac{\partial h}{\partial x(t_k)} \Big|_{x(t_k) = \hat{x}(t_k|t_{k-1})} \quad (15)$$

که H ماتریس ژاکوبین اندازه‌گیری است.

۵- بهینه‌سازی رهگیری چندهدفه راداری

MIMO

در این بخش، مدل بهینه‌سازی پیشنهادی برای مدیریت منابع در مدل ردیابی چندهدفه سیستم‌های راداری MIMO ارائه شده است. بدین منظور، ابتدا مسئله بهینه‌سازی موجود براساس محدودیت‌ها و تابع هدف، توصیف و سپس از الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات برای حل این مسئله استفاده شده است.

۵-۱- محدودیت‌های مسئله

در ردیابی چندهدفه، اهدافی که وضعیت آنها به‌روز می‌شود، باید با سیستم راداری، آشکار و شناسایی شوند. به‌طور خاص، آشکارسازی بدان معنی است که اهداف با پرتوی گیرنده پوشش داده می‌شوند؛ برای مثال، هنگامی که

معنی است که سیستم رادار بیشتر بر مصرف انرژی تأکید می‌کند. در غیر این صورت، منابع زمانی سیستم از اهمیت بیشتری برخوردار خواهد بود. در نهایت، با ترکیب تابع هدف در رابطه (۱۹) و محدودیت‌های تشریح‌شده در روابط (۱۶) و (۱۷) تابع برازش در مدل بهینه‌سازی پیشنهادی به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\text{minimize } C(K, T_{sys}, M, u_s, e) \quad (20)$$

$$\text{subject to: } \begin{cases} u_{s,k} - \frac{\phi(K)}{2} \leq u_{pre,i} \leq u_{s,k} + \frac{\phi(K)}{2} \\ P_{d_i}(K, T_{sys}, M, u_s, e) \geq P_{d_{th}}, \forall i \in M \end{cases} \quad (21)$$

بنابراین، هدف مدل پیشنهادی، بهینه‌سازی C با در نظر گرفتن محدودیت‌های تعریف‌شده در آن است. بدین منظور، در روش پیشنهادی از الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات استفاده شده است.

۵-۳- بهینه‌سازی ردیابی چندهدفه با PSO

مدل بهینه‌سازی پیشنهادی برای مدیریت منابع در ردیابی چندهدفه سیستم‌های راداری MIMO از الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات بهره می‌برد. الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات یک الگوریتم هوش ازدحامی و تکاملی است که با شبیه‌سازی رفتار مهاجرت پرندگان، سعی در یافتن پاسخ بهینه برای یک مسئله دارد. در روش پیشنهادی، از این الگوریتم بهینه‌سازی برای تعیین نحوه تخصیص پرتوها به اهداف در سیستم ردیابی چندهدفه استفاده خواهد شد. گام‌های بهینه‌سازی در این الگوریتم به صورت زیرند:

مرحله ۱- تصادفی جمعیت اولیه ذرات: تولید تصادفی جمعیت اولیه به‌طور ساده عبارت است از تعیین تصادفی محل اولیه ذرات با توزیع یکنواخت در فضای حل (فضای جستجو). مرحله تولید تصادفی جمعیت اولیه تقریباً در تمامی الگوریتم‌های بهینه‌سازی احتمالاتی وجود دارد؛ اما در این الگوریتم علاوه بر محل تصادفی اولیه ذرات، مقداری برای سرعت اولیه ذرات نیز اختصاص می‌یابد. بازه پیشنهادی اولیه برای سرعت ذرات از رابطه زیر استخراج می‌شود [۱۷].

$$\frac{X_{\min} - X_{\max}}{2} \leq V \leq \frac{X_{\max} - X_{\min}}{2} \quad (22)$$

است. به‌طور خاص، حداقل منابعی که نیازمندی‌های عملکردی سیستم آشکارساز را برآورده می‌کند، برای انجام هرچه بیشتر اهداف ممکن مصرف می‌شود.

منابع مصرفی سیستم، هم منابع انرژی و هم منابع زمانی را شامل می‌شود. مصرف انرژی از طریق انرژی الکترونیکی ارسال (e) تعیین می‌شود و میزان زمان صرف‌شده براساس دوره نمونه‌برداری سیستم (T_{sys}) تعیین می‌شود؛ به صورتی که با داشتن دوره نمونه‌گیری کوتاه، مصرف منابع زمانی افزایش خواهد یافت. با جمع وزن‌دار انرژی و زمان صرف‌شده، منابع مصرفی کل در سیستم محاسبه می‌شوند. تعداد کل اهداف آشکارشده توسط سیستم در هر لحظه می‌تواند به‌عنوان معیاری برای توصیف توانایی ردیابی چندهدفه استفاده شود؛ بنابراین، تعداد اهدافی که منابع را به اشتراک می‌گذارند، باید در نظر گرفته شود. به‌طور کلی، هدف مدل بهینه‌سازی این است که تعداد اهداف بیشتری، منابع سیستم را به اشتراک بگذارد و بدین ترتیب، سطح سودمندی منابع افزایش یابد؛ بنابراین، در مدل پیشنهادی میانگین مصرف منابع به‌عنوان تابع هدف در الگوریتم بهینه‌سازی توصیف خواهد شد. این تابع به‌صورت زیر فرموله می‌شود:

$$C(K, T_{sys}, M, u_s, e) = \frac{\alpha \times \varphi\{e(u_s)\} + \beta \times \varphi\{\frac{1}{T_{sys}(K)}\}}{N_I(M)} \quad (19)$$

در رابطه فوق، $N_I(M)$ تعداد اهداف درحال آشکارسازی را نشان می‌دهد که با حالت فعالیت M مشخص شده‌اند. شایان ذکر است حتی اگر یک هدف توسط چندین دسته مختلف آشکار شود، آن هدف فقط یک بار در مجموعه M ظاهر می‌شود. با توجه به اینکه منابع انرژی و زمانی واحدهای مختلفی دارند، از تابع φ برای نرمال‌سازی آنها استفاده شده است. این تابع که به‌صورت $\varphi\{x_i\} = \frac{x_i}{\max(x)}$ تعریف می‌شود، منابع انرژی و زمان را به بازه [0,1] نرمالیزه می‌کند. ضرایب α و β در رابطه فوق، به ترتیب نشان‌دهنده ضرایب اهمیت منبع انرژی و منبع زمانی در سیستم هستند. این ضرایب به‌صورتی تعیین می‌شوند که $\alpha + \beta = 1$ هنگامی که $\alpha > \beta$ باشد، به این

مرحله ۲- انتخاب تعداد ذرات اولیه: به طور خلاصه، تعداد جمعیت اولیه با توجه به مسئله تعیین می شود. در حالت کلی تعداد ذرات اولیه مصالحه ای بین پارامترهای درگیر در مسئله است. به طور تجربی، انتخاب جمعیت اولیه ذرات به تعداد ۲۰ تا ۳۰ ذره مناسب است که تقریباً برای تمامی مسائل به خوبی جواب می دهد. در روش پیشنهادی اندازه جمعیت اولیه برابر با ۳۰ تعیین شده است.

مرحله ۳- ارزیابی تابع هدف ذرات: در این مرحله باید هر یک از ذرات که نشان دهنده یک حل برای مسئله مدنظرند، ارزیابی شوند. کلیدی ترین بخش در یک الگوریتم بهینه سازی، تابع برازش آن است. یک تابع برازش میزان ارزش یک پاسخ را توصیف می کند؛ در نتیجه، با استفاده از تابع برازش تعیین می شود که کدام پاسخ یافته شده با الگوریتم جستجو بهینه است. در روش پیشنهادی از رابطه (۱۹) به عنوان تابع برازش برای ارزیابی بهینگی هر پاسخ استفاده خواهد شد.

مرحله ۴- ثبت بهترین موقعیت برای هر ذره ($P_{i.best}$) و بهترین موقعیت در بین کل ذره ها ($P_{g.best}$): در این مرحله با توجه به شماره تکرار، دو حالت درخور بررسی است: اگر در تکرار اول باشیم ($t=1$)، موقعیت فعلی هر ذره، بهترین محل یافت شده برای آن ذره در نظر گرفته می شود:

مرحله ۵- تست همگرایی: تست همگرایی در این الگوریتم مانند سایر الگوریتم های بهینه سازی است. برای بررسی الگوریتم روش های گوناگونی وجود دارد؛ برای مثال، می توان تعداد مشخصی تکرار را از همان ابتدا معلوم کرد و در هر مرحله بررسی کرد آیا تعداد تکرارها به مقدار تعیین شده رسیده است. اگر تعداد تکرارها کوچک تر از مقدار تعیین شده اولیه باشد، آنگاه باید به مرحله ۲ بازگردید؛ در غیر این صورت الگوریتم پایان می پذیرد.

مرحله ۶- نتایج

به منظور ارزیابی عملکرد روش پیشنهادی در یک محیط شبیه سازی شده، از نرم افزار MATLAB استفاده شده است. در محیط شبیه سازی مفروض، یک سیستم راداری MIMO هم موقعیت برای ردیابی اهداف چندگانه در نظر گرفته شده است.

در مقاله از سه هدف برای تشخیص و مقایسه کارایی روش پیشنهادی استفاده شده است. تعداد سه هدف متحرک مطابق شکل (۲) در نظر گرفته شده است. نتایج نشان می دهند روش پیشنهادی در ردگیری اهداف دارای مانور عملکرد خوبی دارد. هر یک از اهداف از سرعت و الگوی حرکتی متفاوتی با سایر اهداف برخوردار است. هدف ۱، یک مسیر مارپیچ را دنبال می کند که الگوی حرکتی آن براساس رابطه زیر تعیین می شود:

$$P_{i.best} = X_i(t) \quad , i = 1, 2, 3, \dots, d \quad (23)$$

$$\text{cost}(P_{i.best}) = \text{cost}(X_j(t))$$

در سایر تکرارها مقدار هزینه به دست آمده برای ذرات در مرحله ۲ با مقدار بهترین هزینه به دست آمده برای تک تک ذرات مقایسه می شود. اگر این هزینه کمتر از بهترین هزینه ثبت شده برای این ذره باشد، آنگاه محل و هزینه این ذره جایگزین مقدار قبلی می شود. در غیر این صورت، تغییری در محل و هزینه ثبت شده برای این ذره ایجاد نمی شود. به روزرسانی بردار سرعت تمامی ذره ها براساس رابطه زیر صورت می پذیرد:

$$V_i(t) = w * V_i(t-1) + c_1 * rand_1 * (P_{i.best} - X_i(t-1)) + c_2 * rand_2 * (P_{g.best} - X_i(t-1)) \quad (24)$$

در رابطه فوق؛ t نشان دهنده شاخص زمانی و X نشان دهنده موقعیت افقی هدف در صفحه مختصات دکارتی است. همچنین، Y نشان دهنده موقعیت عمودی این هدف

بر اساس رابطه زیر تعیین می شود:

$$X_{t+1} = 5000 - 100t + \frac{1300 \times \cos(3\pi t)}{3\pi t} \quad (25)$$

$$Y_{t+1} = 3000 - 100t + \frac{1300 \times \sin(3\pi t)}{3\pi t} \quad (26)$$

در رابطه فوق؛ t نشان دهنده شاخص زمانی و X نشان دهنده موقعیت افقی هدف در صفحه مختصات دکارتی است. همچنین، Y نشان دهنده موقعیت عمودی این هدف

$\{\emptyset, \{1\}, \{2\}, \{3\}, \{1,2\}, \{1,3\}, \{2,3\}, \{1,2,3\}\}$

است. جزئیات هر یک از اعضای این مجموعه در جدول

(۲) آورده شده است.

جدول (۱): پارامترهای به کاررفته در مدل سیستم پیشنهادی

پارامتر	مقدار
تعداد مؤلفه (N)	1024
فرکانس سیستم (fs)	10GHz
احتمال هشدار اشتباه (P_{fa})	10^{-6}
احتمال آشکارسازی (P_d)	0.9
دوره حسگری	0.1-5.0 sec
ثابت منبع انرژی (α)	0.7
ثابت منبع زمانی (β)	0.3
زمان شبیه‌سازی	150 sec
تعداد هدف	3

جدول (۲): جزئیات هر عضو در مجموعه حالات کاری M_{set}

توضیحات	حالت کاری	شناسه حالت
هیچ هدفی در حال تعقیب نیست	\emptyset	۱
هدف ۱ در حال ردیابی است	{1}	۲
هدف ۲ در حال ردیابی است	{2}	۳
هدف ۳ در حال ردیابی است	{3}	۴
اهداف ۱ و ۲ به صورت هم‌زمان در حال ردیابی‌اند	{1,2}	۵
اهداف ۱ و ۳ به صورت هم‌زمان در حال ردیابی‌اند	{1,3}	۶
اهداف ۲ و ۳ به صورت هم‌زمان در حال ردیابی‌اند	{2,3}	۷
تمامی اهداف ۱، ۲ و ۳ به صورت هم‌زمان در حال ردیابی‌اند	{1,2,3}	۸

به منظور بهینه‌سازی پارامترهای سیستم رادار از الگوریتم

بهینه‌سازی ازدحام ذرات استفاده شده است. پارامترهای

به کاررفته در این الگوریتم بهینه‌سازی به صورت زیرند:

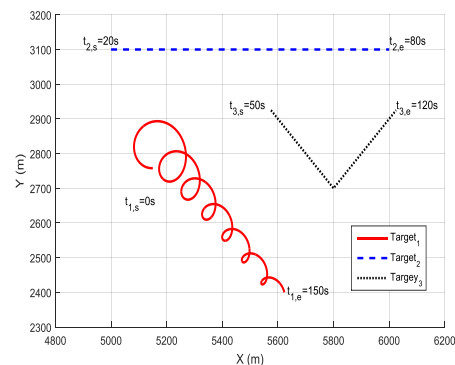
- اندازه جمعیت: ۵۰
- تعداد تکرار: ۱۰۰
- اندازه همسایگی: ۲
- کران ثابت‌های شتاب (c_1, c_2) : [0.5, 2.5]

خواهد بود. براساس روابط فوق، هدف ۱ از الگوی حرکتی پیچیده‌ای برخوردار است و شروع حرکت آن در لحظه آغاز شبیه‌سازی ($t=0s$) تا خاتمه شبیه‌سازی ($t=150s$) ادامه خواهد داشت. همچنین، هدف ۲ در راستای افقی به صورت مستقیم حرکت کرده و بازه زمانی حضور و شروع حرکت تا لحظه پایان حرکت آن به صورت [20s, 80s] است.

در نهایت، هدف سوم در لحظه $t=50s$ نمایان شده است و تا لحظه $t=120s$ به حرکت خود مطابق روابط زیر ادامه خواهد داد:

$$X_{t+1} = 100 \times (t - 3.75) + 5800 \quad (27)$$

$$Y_{t+1} = |X_{t+1} - 5800| + 2700 \quad (28)$$

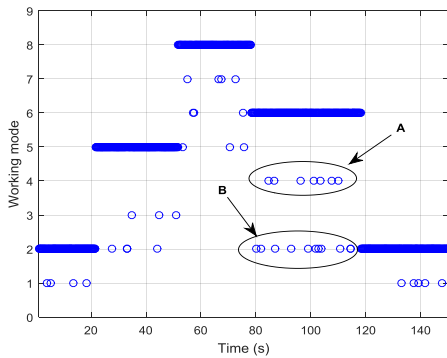


شکل (۲): مسیر در نظر گرفته شده برای اهداف

در شبیه‌سازی صورت گرفته، سرعت اهداف ۱، ۲ و ۳ به ترتیب برابر با $28/32$ ، $16/17$ و $14/91$ متر بر ثانیه است. در روش پیشنهادی، مدل حرکتی اهداف شامل مدل سرعت ثابت و مدل شتاب ثابت است که در آن احتمال اولیه هر مدل برابر با ۰.۵ در نظر گرفته شده است. در مدل رادار هم موقعیت MIMO به کاررفته در آزمایش‌ها، سیستم رادار شامل یک آرایه خطی از مؤلفه‌ها یک طول 1024 است. بدین ترتیب $N=1024$ خواهد بود. فاصله بین مؤلفه‌های متعامد برابر با نصف طول موج بوده و فرکانس کاری سیستم برابر با 10 گیگاهرتز است. پارامترهای به کاررفته در مدل سیستم، در جدول (۱) آورده شده‌اند.

با در نظر داشتن حداکثر سه هدف هم‌زمان در محیط شبیه‌سازی؛ مجموعه تمامی حالات کاری ممکن به صورت زیر

$$M_{set} =$$



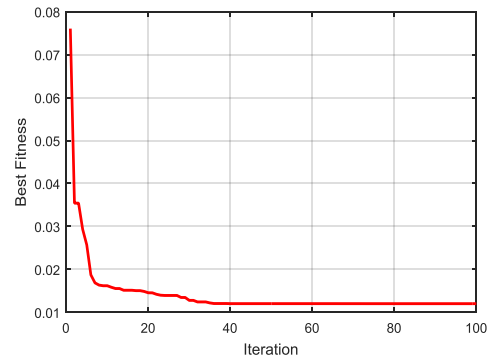
شکل (۴): نمودار تغییرات حالات کاری سیستم

مطابق شکل (۴)، روش پیشنهادی در بیشتر موارد حضور اهداف را به درستی تشخیص می‌دهد و در برخی موارد نیز قادر به تشخیص حضور اهداف نخواهد بود. این رویدادها که به صورت نقاط پراکنده در شکل (۴) نشان داده شده‌اند، موارد عدم تشخیص^{۲۰} نامیده می‌شوند. در بازه زمانی ۸۰ تا ۱۲۰ ثانیه دو هدف ۱ و ۳ به صورت هم‌زمان در حال ردیابی هستند که این شرایط به صورت حالت کاری ۶ نشان داده شده است. در این بازه و در برخی مقاطع زمانی، هدف ۱ شناسایی نشده و تنها هدف ۳ قابل ردیابی است. این مقاطع به صورت مجموعه A در شکل (۴) نشان داده شده‌اند. همچنین، در برخی مقاطع زمانی این محدوده، هدف ۱ قابل ردیابی بوده و هدف ۳ شناسایی نشده است. این مقاطع نیز به صورت مجموعه B نشان داده شده‌اند. با توجه به میزان تعیین شده برای احتمال هشدار اشتباه ($P_{fa}=10^{-6}$)، در هیچ نقطه زمانی وجود یک هدف غیرفعال به صورت اشتباه گزارش نمی‌شود. همچنین، براساس نتایج به دست آمده از آزمایش‌ها، احتمال عدم تشخیص در یک محیط با ضریب نویز ۱۰ برابر با $P_{md}=0.047$ است.

مقدار احتمال عدم تشخیص را می‌توان با انتخاب مقادیر بزرگ‌تر برای پارامتر دوره حسگری کاهش داد؛ به طوری که با ثابت نگاه داشتن دوره حسگری برابر با ۳ ثانیه احتمال عدم تشخیص به 10^{-5} خواهد رسید؛ اما در نظر گرفتن دوره حسگری طولانی موجب افزایش انرژی مصرفی و صرف منابع سیستم رادار خواهد شد؛ به همین دلیل، در روش پیشنهادی این پارامتر با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات به صورت پویا تعیین می‌شود.

در شکل (۵)، نمودار انرژی مصرفی موج ارسال در

در شکل (۳)، نمودار تغییرات برازش برای یک نمونه اجرای الگوریتم بهینه‌سازی نمایش داده شده است. براساس شکل (۳)، الگوریتم ازدحام ذرات در طی تکرارهای مختلف می‌تواند به پاسخ بهینه همگرا شود و بدین طریق، عملکرد سیستم را بهبود بخشد.



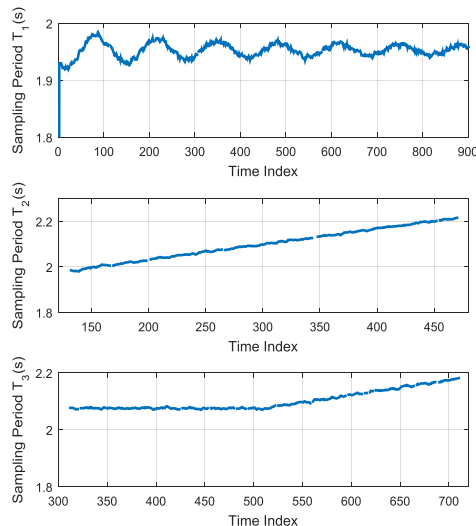
شکل (۳): نمودار تغییرات برازش برای یک نمونه اجرای

الگوریتم بهینه‌سازی PSO

ضریب نویز محیط برابر با ۱۰ تعیین شده است و به منظور افزایش دقت و اعتبار نتایج، آزمایش‌ها شبیه‌سازی را ۱۰ بار تکرار کرده و میانگین نتایج حاصل، به عنوان نتایج نهایی در نظر گرفته شده است.

در شکل (۴)، نمودار تغییرات حالات کاری سیستم در طی فرآیند شبیه‌سازی نمایش داده شده است. حالات کاری نمایش داده شده در محور عمودی این شکل، با ستون شناسه حالت موجود در جدول (۲) متناظر است. براساس سناریوی حرکتی تعریف شده برای اهداف در محیط شبیه‌سازی، فرآیند ردیابی با حضور هدف ۱ آغاز می‌شود و با حضور همین هدف خاتمه می‌یابد. این وضعیت به صورت شناسه حالت ۲ در شکل (۴) نمایش داده شده است.

سیستم رادار برای ردیابی اهداف چندگانه با مؤلفه‌های سیستم MIMO تعیین می‌شوند. در شکل (۶)، نمودار دوره حسگری برای سه هدف ارزیابی شده در محیط شبیه‌سازی نمایش داده شده است.

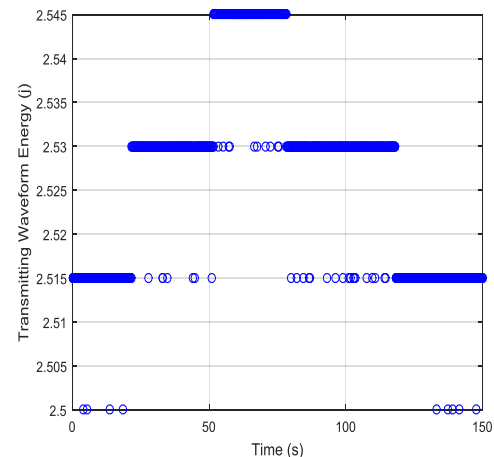


شکل (۶): دوره نمونه‌گیری به تفکیک اهداف

درخور ذکر است در شکل (۶)، به جای نمایش زمان در محور افقی، نمونه‌های مبتنی بر زمان نمایش داده شده است. براساس این شکل، دوره حسگری اهداف مطابق با الگوی حرکتی آنها به صورت تطبیقی تنظیم می‌شود. برای هدف ۱ که از الگوی حرکتی پیچیده‌ای برخوردار است، دوره نمونه‌گیری، کوتاه‌تر از سایر اهداف است. همچنین، اهدافی که از قابلیت مانور کمتری برخوردارند (مانند هدف ۲)، دارای روندی صعودی در دوره نمونه‌گیری خواهند بود؛ زیرا الگوریتم بهینه‌سازی با افزایش دوره نمونه‌گیری برای این اهداف تلاش می‌کند تا نسبت سیگنال به نویز را با کاهش خطای تشخیص هدف بهبود بخشد. کاهش تدریجی دامنه نوسانات دوره نمونه‌گیری برای هدف ۱ با گذر زمان تأییدکننده این مورد است. با توجه به شکل (۲)، هدف ۱ در ابتدای حرکت خود دارای دامنه مانور بسیار وسیعی است و با گذر زمان این حوزه محدودتر می‌شود. این تغییرات حوزه مانور با تغییرات دوره نمونه‌گیری هدف ۱ در شکل (۶) مطابق است. براساس این نتایج، قابلیت تطبیق سیستم با وضعیت حرکتی اهداف از مزایایی است که به‌واسطه

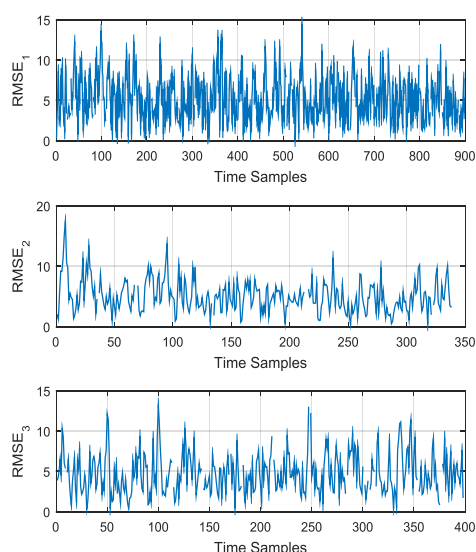
مقاطع مختلف فرآیند شبیه‌سازی نمایش داده شده است. مطابق این شکل، انرژی مصرفی موج ارسال در بازه ۲,۵ تا ۲,۵۴۵ ژول در حال تغییر است.

براساس نتایج ارائه‌شده در شکل (۵)، انرژی مصرفی موج ارسال پس از ثانیه ۲۰ شبیه‌سازی افزایش می‌یابد و پس از ثانیه ۱۲۰ مجدداً به سطح انرژی مصرفی اولیه بر می‌گردد. دلیل این امر این است که در بازه زمانی ۲۰ تا ۱۲۰ ثانیه، اهداف ۲ و ۳ در محیط شبیه‌سازی ظاهر می‌شوند و در این مقاطع زمانی حداقل دو هدف به صورت هم‌زمان با رادار MIMO ردیابی می‌شوند. در این شرایط برای دستیابی به نسبت سیگنال به نویز SNR کافی، نیاز به صرف منابع انرژی بیشتری خواهد بود تا بدین طریق، بتوان در دستیابی مؤثر به اهداف چندگانه به صورت موثرتری عمل کرد.



شکل (۵): نمودار انرژی مصرفی موج ارسال در مقاطع مختلف

نتایج حاصل نشان می‌دهند روش پیشنهادی در تطبیق انرژی موج ارسال سیستم رادار MIMO به صورت مؤثری عمل می‌کند؛ زیرا الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات در روش پیشنهادی، منابع انرژی سیستم را یکی از اهداف بهینه‌سازی در نظر می‌گیرد و این معیار با ضریب اهمیت ۰,۷ در محاسبه برازش پارامترهای سیستم در نظر گرفته می‌شود. دومین پارامتر بهینه‌سازی در نظر گرفته شده در مدل بهینه‌سازی الگوریتم ازدحام ذرات، منابع زمانی سیستم است که با ضریب اهمیت ۰,۳ در محاسبه برازش در نظر گرفته می‌شوند. با استفاده از این پارامتر، دوره‌های حسگری



شکل (۸): مقادیر RMSE در ردیابی اهداف

براساس نتایج نمایش داده شده در شکل (۱۰)، بین الگوی تغییرات معیار RMSE در هریک از اهداف تفاوت‌هایی وجود دارد که این تفاوت‌ها از الگوی حرکتی هریک از این اهداف ناشی می‌شود. این نتایج نشان می‌دهند هدف ۱، به دلیل برخورداری از الگوی حرکتی پیچیده، دارای نوسانات بالایی در تغییرات RMSE است؛ زیرا با تغییرات مداوم الگوی حرکتی این هدف، نوسانات دوره نمونه‌گیری برای ردیابی آن در سیستم نیز تغییر می‌یابد و خطای ردیابی نیز از نوسانات بالایی برخوردار خواهد بود؛ اما با گذر زمان و کاهش دامنه حرکتی هدف ۱، میزان نوسانات RMSE تا حدودی کاهش می‌یابد. این نتایج، تطبیق‌پذیری الگوریتم پیشنهادی با الگوی حرکتی اهداف تحت ردیابی را تأیید می‌کند و نشان می‌دهد روش پیشنهادی در این تحقیق، می‌تواند با تنظیم پارامترهای خود براساس الگوی حرکتی هدف، خطای ردیابی را کاهش دهد. همچنین، مقادیر RMSE نمایش داده شده برای اهداف ۲ و ۳، از دامنه نوسان کمتری برخوردار است و به دلیل الگوی حرکتی یکنواخت این اهداف، تغییرات کمتری در خطای ردیابی آنها مشاهده می‌شود. معیار خطای ردیابی هدف در فرآیند ارزیابی کارایی روش پیشنهادی به صورت رابطه زیر محاسبه خواهد شد:

$$TTE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \sqrt{(x_i - x'_i)^2 + (y_i - y'_i)^2} \quad (30)$$

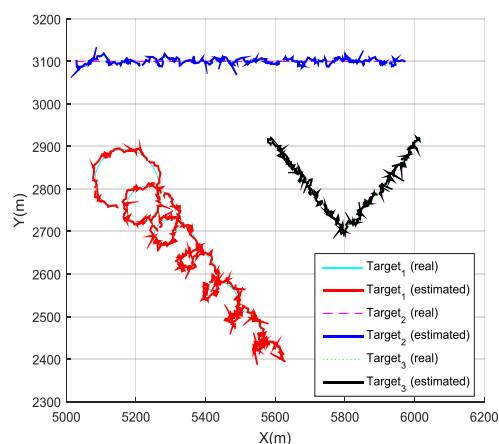
به‌کارگیری الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات در روش پیشنهادی می‌تواند بدن دست یافت.

در شکل (۷)، مسیرهای ردیابی شده برای هریک از ۳ هدف مطالعه‌شده در این آزمایش‌ها با روش پیشنهادی نمایش داده شده است.

به‌منظور بررسی دقت روش پیشنهادی در ردیابی اهداف از معیارهای ریشه میانگین مربعات خطا ($RMSE^1$) و خطای ردیابی هدف (TTE^2) استفاده شده است. اگر مختصات واقعی یک هدف مفروض به صورت (x, y) و مختصات تخمین زده شده آن به صورت (x', y') باشد، آنگاه ریشه میانگین مربعات خطا در تخمین موقعیت هدف به صورت رابطه زیر محاسبه خواهد شد:

$$RMSE = \sqrt{\frac{(x - x')^2 + (y - y')^2}{2}} \quad (29)$$

نتایج RMSE برای ردیابی اهداف با روش پیشنهادی در شکل (۸) نمایش داده شده است.



شکل (۷): مسیرهای ردیابی شده برای اهداف مطالعه‌شده در این آزمایش‌ها

روش پیشنهادی برابر با ۷,۱۲۶۳ متر است که با توجه به ابعاد بسیار بزرگ محیط و دامنه حرکتی وسیع اهداف در آن، این مقدار خطا ناچیز خواهد بود.

این نتایج، کارایی روش پیشنهادی در قابلیت تطبیق سیستم راداری با وضعیت حرکتی اهداف را تأیید می‌کند که به‌واسطه به‌کارگیری الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات حاصل می‌شود. نتایج به‌دست‌آمده برای هدف ۱ نشان می‌دهد روش پیشنهادی در ردگیری اهداف دارای مانور از کارایی بالایی برخوردار است.

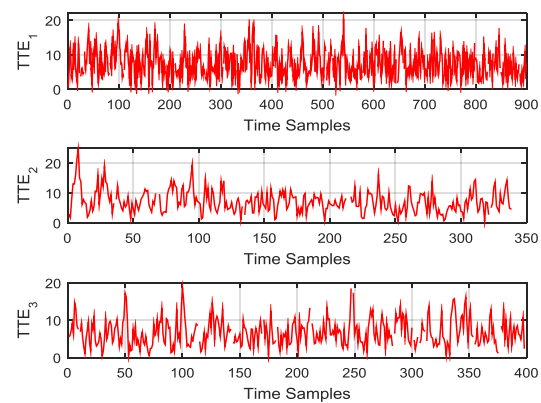
در جدول (۳)، کارایی روش پیشنهادی با روش ارائه‌شده در [۱۸] مقایسه شده است. روش ارائه‌شده در [۱۸] یکی از تحقیقات صورت‌گرفته اخیر به‌منظور تخصیص توان و پهنای باند در تعقیب اهداف چندگانه برای رادارهای MIMO هم‌موقعیت بوده و از کارایی مناسب‌تری نسبت به راهکارهای پیش از خود برخوردار است. همچنین، با توجه به اینکه این روش مشابه روش پیشنهادی از یک الگوریتم جستجوی به‌منظور بهینه‌سازی سیستم راداری بهره می‌گیرد، در این تحقیق به‌عنوان روش مقایسه‌شده با روش پیشنهادی در نظر گرفته شده است.

جدول (۳): مقایسه عملکرد روش پیشنهادی در ردیابی هدف

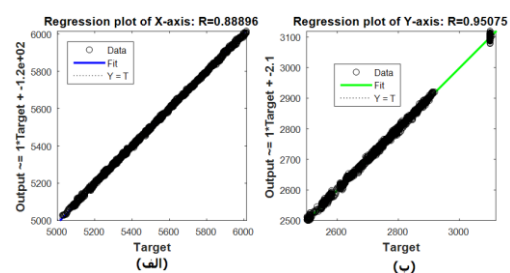
منبع [۱۸]	روش پیشنهادی	
۳,۴۸۱۹	۲,۵۲۶۶	میانگین انرژی (ژول)
۲,۱۷۳۳	۲,۰۱۵۶	میانگین دوره نمونه‌گیری (ثانیه)
۷,۵۹۵۶	۵,۰۳۹۰	میانگین RMSE
۹,۱۴۱۵	۷,۱۲۶۳	میانگین خطای تخمین (متر)
۱,۸۳۹	۱,۰۱۲	هزینه محاسبات (ثانیه)

درخور ذکر است نتایج ارائه‌شده برای [۱۸] از طریق شبیه‌سازی براساس سناریوهای مشابه با روش پیشنهادی حاصل شده است. براساس نتایج نمایش داده شده در جدول (۳)، روش پیشنهادی علاوه بر کاهش میزان خطای ردیابی می‌تواند در کاهش انرژی مصرفی و کاهش دوره نمونه‌گیری مؤثر باشد. عملکرد روش پیشنهادی از نظر هزینه

که در رابطه فوق، N نشان‌دهنده تعداد نمونه‌های زمانی برای تخمین موقعیت اهداف بوده و X_i و Y_i به‌ترتیب نشان‌دهنده مختصات افقی و عمودی واقعی هدف در نمونه زمانی i است. همچنین، X'_i و Y'_i مختصات تخمین زده شده از الگوریتم پیشنهادی در این نمونه زمانی را توصیف می‌کنند. در واقع رابطه فوق نشان می‌دهد ردیابی‌های صورت‌گرفته از روش پیشنهادی با مختصات واقعی هدف در هر بُعد، چند متر اختلاف دارد. در شکل (۹)، مقادیر به‌دست‌آمده برای معیار خطای ردیابی اهداف با روش پیشنهادی نمایش داده شده است.



شکل (۹): نمودار خطا برای هر یک از اهداف مورد ردیابی در مقاطع زمانی مختلف



شکل (۱۰): نمودار رگرسیون تخمین موقعیت روش پیشنهادی در (الف) بُعد افقی و (ب) بُعد عمودی

نتایج نمایش داده شده در شکل (۹)، مطالب استنتاج‌شده از نمودار (۸) را تأیید می‌کنند. به‌صورت کلی، در بیش از ۶۰ درصد نمونه‌های زمانی، خطای ردیابی هدف در روش پیشنهادی برای تمامی اهداف کمتر از ۶ متر است و همچنین، میانگین خطای کل در ردیابی اهداف توسط

بهینه‌سازی چندهدفه ازدحام ذرات MOPSO یا ژنتیک چندهدفه، به‌منظور بهینه‌سازی پارامترهای سیستم رادار می‌تواند در راستای توسعه تحقیق جاری مطالعه شود. همچنین، با تغییر اهداف بهینه‌سازی در تابع برازش به‌کاررفته در روش پیشنهادی می‌توان در جهت بهبود استفاده از منابع سیستم راداری MIMO تلاش کرد.

محاسبات در جدول (۳) بررسی شده است. ملاحظه می‌شود الگوریتم پیشنهادی از زمان اجرای کمتری برخوردار بوده و از این رو برای به‌کارگیری در کاربردهای بلادرنگ مناسب‌تر است. نتایج آزمایش‌های صورت‌گرفته نشان داد استفاده از روش پیشنهادی موجب کاهش مصرف منابع سیستم ردیابی اهداف چندگانه خواهد شد.

۷- نتیجه‌گیری

در این مقاله به مسئله رهگیری هدف در سیستم‌های راداری MIMO با استفاده از فیلتر کالمن توسعه‌یافته چندگانه تعاملی پرداخته شد. سیستم مطالعه‌شده در این تحقیق، سیستم راداری MIMO هم‌موقعیت برای ردیابی هم‌زمان اهداف چندگانه است که مسئله اساسی در این سیستم‌ها، مدیریت منابع سیستم راداری به‌منظور بهبود کارایی در ردیابی هدف است. در مسئله مدیریت منابع مطالعه‌شده در این تحقیق، علاوه بر بهینه‌سازی پارامترهای اساسی سیستم راداری مفروض، بهینه‌سازی اندازه هر دسته از مؤلفه‌ها نیز در نظر گرفته شد. دلیل در نظر گرفتن این معیار، این است که اندازه دسته می‌تواند پهنا و میزان بهره پرتو انتقال را تعیین کند. برای یک هدف و پرتو مفروض، پهنای پرتو تعیین‌کننده تعداد اهدافی است که با پرتو آشکار می‌شوند. در عین حال، بهره پرتو مشخص‌کننده نسبت سیگنال به نویز است. در مدل سیستم مفروض، از فیلتر چندگانه تعاملی کالمن برای درک ردیابی مؤثر هدف استفاده شده و بهینه‌سازی مدل ردیابی چندهدفه با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات صورت پذیرفته است. کارایی روش پیشنهادی در ردیابی اهداف چندگانه از نظر معیارهای مختلف، ارزیابی و نتایج حاصل با روش‌های پیشین مقایسه شدند. براساس نتایج حاصل از این آزمایش‌ها، روش پیشنهادی علاوه بر کاهش میزان خطای ردیابی می‌تواند در کاهش انرژی مصرفی و کاهش دوره نمونه‌گیری مؤثر باشد. بدین ترتیب، استفاده از روش پیشنهادی موجب کاهش مصرف منابع سیستم ردیابی اهداف چندگانه خواهد شد.

استفاده از سایر الگوریتم‌های بهینه‌سازی مانند مدل

مراجع

- [1] M. Kolawole “Radar systems, peak detection and tracking”, Elsevier, 2003.
- [2] H. Godrich, A. P. Petropulu, and H. V. Poor, “Power allocation strategies for target localization in distributed multiple-radar architectures”, IEEE Transactions on Signal Processing, Vol. 59, No. 7, pp. 3226-3240, 2011.
- [3] M. Xie, W. Yi, T. Kirubarajan, and L. Kong, “Joint node selection and power allocation strategy for multitarget tracking in decentralized radar networks”, IEEE Transactions on Signal Processing, Vol. 66, No. 3, pp. 729-743, 2017.
- [4] M. Xie, W. Yi, L. Kong, and T. Kirubarajan, “Receive-beam resource allocation for multiple target tracking with distributed MIMO radars”, IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, Vol. 54, No. 5, pp. 2421-2436, 2018.
- [5] N. Bogdanović, H. Driessen, and A. G. Yarovoy, “Target selection for tracking in multifunction radar networks: Nash and correlated equilibria”, IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, Vol. 54, No. 5, pp. 2448-2462, 2018.
- [6] W. Yi, Y. Yuan, R. Hoseinnezhad, and L. Kong, “Resource scheduling for distributed multi-target tracking in netted colocated MIMO radar systems”, IEEE Transactions on Signal Processing, Vol. 68, pp. 1602-1617, 2020.
- [7] H. Zhang, W. Liu, B. Zong, J. Shi, and J. Xie, “An Efficient Power Allocation Strategy for Maneuvering Target Tracking in Cognitive MIMO Radar”, IEEE Transactions on Signal Processing, Vol. 69, pp. 1591-1602, 2021.
- [8] Y. Yuan, W. Yi, R. Hoseinnezhad, and P. K. Varshney, “Robust power allocation for resource-aware multi-target tracking with colocated MIMO radars”, IEEE Transactions on Signal Processing, Vol. 69, pp. 443-458, 2020.
- [9] H. Zhang, W. Liu, J. Xie, Z. Zhang, and W. Lu, “Joint subarray selection and power allocation for cognitive target tracking in large-scale MIMO radar networks”, IEEE Systems Journal, Vol. 14, no. 2, pp. 2569-2580, 2020.
- [10] Li, J. Xie, H. Zhang, H. Xiang, and Z. Zhang, “Adaptive sensor scheduling and resource allocation in netted colocated MIMO radar system for multi-target tracking”. IEEE Access, Vol. 8, pp. 109976-109988, 2020.

- applications of particle swarm optimization”, *Journal of Artificial Evolution and Applications*, 2008.
- [16] M. R. Bonyadi, and Z. Michalewicz, “Particle swarm optimization for single objective continuous space problems: a review”, *Evolutionary computation*, Vol. 25, no.1, pp.1-54, 2017.
- [17] J. C. Bansal, “Particle swarm optimization. In *Evolutionary and swarm intelligence algorithms*”, Springer, pp.11-23. Cham, 2019.
- [17] H. Zhang, B. Zong, and J.Xie, “Power and bandwidth allocation for multi-target tracking in collocated MIMO radar”, *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, Vol.69, No.9, pp. 9795-9806, 2020.
- [11] M. E. Farmer, R. L. Hsu., and , A. K. Jain “Interacting multiple model (IMM) Kalman filters for robust high speed human motion tracking”. *International Conference on Pattern Recognition*, 2002.
- [12] D. Wang, D. Tan, and L. Liu, “Particle swarm optimization algorithm: an overview”, *Soft Computing*, Vol. 22, No. 2, pp. 387-408, 2018.
- [13] T.Qiuyun, S.Hongyan, G.Hengwei, W.Ping, “Improved particle swarm optimization algorithm for AGV path planning”, *IEEE Access*, Vol. 9, 2021.
- [14] J.Kennedy, R.C. Eberhart, “ *Swarm Intelligence*”, Morgan Kaufmann. ISBN 978-1-55860-595-4, 2001.
- [15] R.Poli, “Analysis of the publications on the

¹ Detection

² Multiple-Input Multiple-Output

³ Co-located

⁴ Distributed

⁵ Cramer-Rao lower bound

⁶ Radar cross-section

⁷ Beam

⁸ Fisher Information Matrix²

⁹ Game Theory

¹⁰ Covariance Intersection

¹¹ Cramer-Rao

¹² Particle filter

¹³ Extended Kalman filter

¹⁴ Particle swarm optimization

¹⁵ Defocused

¹⁶ Digital Beam-Forming

¹⁷ Signal-to-Noise Ratio

¹⁸ Fitness

¹⁹ Radar cross section

²⁰ Miss-detection

²¹ Root Mean Squared Error

²² Target Tracking Error