

روشی کارآمد برای تصویربرداری از اهداف چندگانه در ارتفاع پست در حضور کلاتر دریا با

استفاده از رادار روزنه مصنوعی معکوس (ISAR)

علی جبار رشیدی^{۱*}، رضا محمدی^۲

۱- دانشیار و ۲- کارشناس ارشد، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران، ایران

(دریافت: ۱۳۹۹/۰۹/۱۷، پذیرش: ۱۳۹۹/۱۱/۳۰)

چکیده

تصویربرداری با استفاده از رادار روزنه مصنوعی معکوس (ISAR) از اهداف چندگانه یکی از مسائل مهم و چالش برانگیز در تصویربرداری راداری محسوب می‌شود. همچنین آشکارسازی و تصویربرداری از اهداف در ارتفاع پست و نزدیک سطح به دلیل وجود کلاتر سطوح نیز از موضوعات تحقیقاتی در این حوزه است. اگر اهداف هوایی در محیط دریا در ارتفاع کم در حال پرواز باشند، کلاتر دریا نیز بر سیگنال‌های دریافتی رادار از این اهداف تاثیر زیادی گذاشته و بر دشواری موجود در تصویربرداری ISAR خواهد افزود. در این مقاله که از نتایج یک پروژه تحقیقاتی استخراج شده، الگوریتمی کارآمد ارائه شده است که بتوان با وجود چالش‌های پیش گفته، تصویربرداری ISAR از اهداف چندگانه در ارتفاع پست را در حضور کلاتر دریا انجام داد. در این الگوریتم با عنوان گروه‌بندی اهداف، مبتنی بر پردازش وقتی فضا- داپلر (SDAP) از اثر کلاتر دریا کاسته و سپس با جبران‌سازی حرکت انتقالی اهداف به صورت گروهی، تصویر آن‌ها تشکیل می‌شود. خوشه‌بندی (گروه‌بندی) اهداف مبتنی بر شباهت مولفه‌های حرکت انتقالی و تشکیل تصویر هر گروه در یک قاب از مهم‌ترین بخش‌های این الگوریتم می‌باشند. نتایج پیاده‌سازی نرم‌افزاری و شبیه‌سازی نشان می‌دهد که می‌توان به طور موثری با استفاده از روش SDAP اثر کلاتر دریا را کاهش و با الگوریتم ارائه شده تصویر گروهی اهداف در خوشه‌ها با موفقیت تشکیل داد. این نتیجه در مسائل کاربردی از جمله آشکارسازی و شناسایی اهداف هوایی در محیط دریا بسیار حائز اهمیت می‌باشد.

کلید واژه‌ها: رادار روزنه مصنوعی معکوس (ISAR)، اهداف چندگانه، SDAP، کلاتر دریا.

۱- مقدمه

هدف با سیگنال مربوط به سایر اهداف است. برای این که بتوان سیگنال هر هدف را به دست آورد و الگوریتم‌های مربوط به جبران‌سازی را به کار برد باید بتوان سیگنال‌های ادغام شده را از هم جدا کرد.

روشی در [۱] پیشنهاد شد که با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی تجمعی ذرات (PSO)^۲ و همچنین تبدیل هاف^۳ نمایه برد هر هدف استخراج می‌شود به طوری که به وسیله تبدیل هاف خطوط نمایه برد هدف آشکار شده و شیب آن تخمین زده می‌شود. روشی برای جداسازی سیگنال اهداف مبتنی بر نمایش تُنک در [۲] پیشنهاد شده است. روشی هم که در این مقاله به منظور تخمین سرعت اهداف به کار گرفته شده مبتنی بر محاسبه شیب نمایه برد اهداف با استفاده از تبدیل رادون^۴ می‌باشد که بر اساس روش ارائه شده در [۳] است. روش‌های ذکر شده زمانی کارآمد خواهد بود که خطوط لبه‌ای نمایه برد هر هدف قابل تشخیص باشد؛ اما ممکن است حالتی رخ دهد که درصد زیادی از نمایه‌های برد اهداف مختلف روی هم بیفتند و نتوان آن‌ها را از هم تفکیک کرد؛ برخی دیگر از الگوریتم‌های تصویربرداری از اهداف

رادار روزنه مصنوعی معکوس (ISAR) راداری با دقت تفکیک^۱ بالا است که در تصویربرداری از اهداف مورد استفاده قرار می‌گیرد. وضوح تصویر ISAR به دقت تفکیک در دو راستای برد و برد- متقاطع بستگی دارد. دقت تفکیک در برد با استفاده از پهنای باند شکل موج‌های مدوله شده فرکانسی به دست می‌آید. از آن جا که در تصویربرداری با استفاده از ISAR سکوی رادار ساکن بوده و هدف در حال حرکت است، دقت تفکیک در برد- متقاطع نیز به میزان چرخش هدف وابسته است.

از آن جا که حرکت هدف برای رادار ناشناخته است، جبران‌سازی حرکتی هدف از چالش برانگیزترین مسائل موجود در ISAR می‌باشد. دشواری جبران‌سازی حرکتی هدف در تصویربرداری از اهداف چندگانه با استفاده از ISAR تشدید خواهد شد، به طوری که با وجود چند هدف در صحنه تصویربرداری نمی‌توان از روش‌های مرسوم تصویربرداری از یک هدف تنها استفاده کرد؛ علت این موضوع هم ادغام سیگنال هر

^۲ Particle Swarm Optimization^۳ Hough transform^۴ Radon transform

* رایانامه نویسنده مسئول: aiorashid@yahoo.com

^۱ Resolution

یکدیگر جدا می‌کند. در برخی موارد که ممکن است اهداف مختلف در صفحه زمان-فرکانس روی هم‌رفتگی زیادی داشته باشند نمی‌توان نتیجه مناسبی را از این طریق به منظور جداسازی سیگنال مربوط به اهداف مختلف به دست آورد. روش‌های دیگری نیز برای تصویربرداری ISAR در برخی مقالات دیگر ارائه شده‌است که به منظور جداسازی سیگنال اهداف مختلف نیاز به تخمین نرخ چیرپ داپلر سیگنال بازگشتی دارند. همانطور که در [۱۰-۱۳] بیان شده، نرخ چیرپ داپلر سیگنال بازگشتی از هدف به شتاب انتقالی آن وابسته است. در [۱۰-۱۲] نرخ چیرپ داپلر اهداف مختلف با استفاده از تبدیل فوریه کسری تخمین زده شده و سپس شتاب هر هدف به دست آمده است. در [۱۳] تخمین نرخ چیرپ داپلر مبتنی بر یک رویکرد زمان-فرکانس به صورت وفقی انجام شده است. [۱۴] تبدیل فوریه منطبق گسسته (DMFT) را به منظور تصویربرداری از اهداف چندگانه به کار گرفته است.

از آن جا که در این مقاله سناریوی حرکت اهداف چندگانه در محیط دریا مورد بحث است، تاثیر کلاتر دریا بر روی سیگنال دریافتی می‌تواند کیفیت تصویر تشکیل شده را دستخوش تغییرات نامطلوبی نماید که این خود به نسبت سیگنال به کلاتر (SCR)^۶ وابسته است. بنابراین برای دستیابی به تصویری با کیفیت قابل قبول باید بتوان اثر کلاتر دریا را در حد مطلوب کاهش داد. برای لحاظ کردن اثر کلاتر دریا، باید بتوان آن را با توجه به سناریوی مسئله به درستی الگو کرد. یکی از الگوهای کلاتر دریا الگو گوسی است که طبق [۱۵] الگوهای گوسی منجر به معماری‌های پردازشی ساده می‌شود. با توجه به همین مرجع، الگو گوسی زمانی به کار گرفته می‌شود که قضیه حد مرکزی^۷ صدق کند؛ علاوه بر آن برای این که این الگو بیشترین تطابق را با کلاتر دریا داشته باشد باید دقت تفکیک رادار ضعیف و زاویه خیزش^۸ به اندازه کافی بزرگ باشد؛ اما اگر هر کدام از این دو مورد در کاربرد مورد نظر راداری برقرار نباشد الگو گوسی برای کلاتر دریا مناسب نخواهد بود. بنابراین در برخی از مسائل که دو شرط «دقت تفکیک بالا» و «زاویه‌ی خیزش پایین» به مسئله تحمیل می‌شود چالش قابل ملاحظه‌ای در الگوریتم‌های پردازش راداری به وجود می‌آید؛ با وجود دو شرط بیان شده در بالا تابع چگالی احتمال دامنه کلاتر دریا گوسی نخواهد بود [۱۵]. در سامانه‌های راداری نوین با دقت تفکیک بالا، کلاتر دریا معمولاً

چندگانه مبتنی بر قطعه‌بندی^۱ اهداف از یکدیگر در حوزه تصویر دو بُعدی برد-داپلر می‌باشد.

روش کلی در این الگوریتم‌ها بدین صورت است که در یک مرحله با استفاده از جبران‌سازی عمده^۲، تصویری با کیفیت پایین از همه‌ی اهداف در یک قاب تشکیل شده و سپس اهداف در حوزه‌ی تصویر از هم جدا می‌گردد. در نهایت جبران‌سازی حرکتی به صورت جزئی^۳ برای هر هدف اعمال می‌شود تا تصویری با کیفیت قابل قبول از هر هدف به دست آید. در [۴ و ۵] یک الگوریتم سه مرحله‌ای برای تصویربرداری از اهداف چندگانه ارائه شده است. در مرحله اول تصویربرداری برد-داپلر اولیه از کل اهداف انجام می‌شود. در مرحله دوم جداسازی تک‌تک اهداف با استفاده از پنجره‌ای به اندازه هدف از تصویر به دست آمده در مرحله اول صورت می‌گیرد و نهایتاً در مرحله سوم یک تصویربرداری برد-داپلر انجام می‌شود که کیفیت تصویر ISAR برای هر هدف با استفاده از مرتب‌سازی برد و تنظیم فاز ارتقا می‌یابد. الگوریتم دیگری برای تصویربرداری از اهداف چندگانه در [۶] توسعه پیدا کرده که مبتنی بر PSO و روش Clean بهبود یافته می‌باشد. در این مقاله اهداف چندگانه به صورت گروه‌های مجزا از هم الگو می‌شوند به طوری که حرکت انتقالی اهداف هر گروه شبیه هم است. در روش ارائه شده در [۶] فرض بر این است که فاصله بین اهداف هر گروه در حوزه تصویر قابل تشخیص باشد تا از این طریق بتوان تعداد مراکز هر هدف را به منظور تخمین تعداد اهداف هر گروه تعیین کرد. روش دیگری در [۷] مبتنی بر قطعه‌بندی تصویر برای تصویربرداری از اهداف چندگانه پیشنهاد شده است. در تمامی روش‌های بیان شده که بر اساس قطعه‌بندی تصویر اهداف هستند اگر اهداف در حوزه تصویر هم‌پوشانی داشته باشند نمی‌توان آن‌ها را به درستی از هم جدا کرد در این صورت دستیابی به سیگنال هر هدف به منظور پردازش‌های بعدی غیرممکن خواهد بود. در [۸] روش دیگری بر اساس تبدیل فوریه زمان کوتاه (STFT)^۴ ارائه می‌شود. الگوریتم بیان شده در این مقاله با استفاده از تحلیل زمان-فرکانس^۵، خطوط اهداف را در صفحه زمان-فرکانس از هم جدا می‌کند. در این مقاله از تبدیل رادون برای جداسازی خطوط زمان-فرکانس مربوط به اهداف مختلف از هم استفاده شده است. مشابه این روش، الگوریتمی در [۹] ارائه شده است که پس از اعمال STFT، خطوط زمان-فرکانس مربوط به هر هدف را با استفاده از تبدیل هاف از

^۶ Discrete Match Fourier Transform

^۷ Signal-to-Clutter Ratio

^۸ Central limit theorem

^۹ Grazing angle

^۱ Segmentation

^۲ Coarse compensation

^۳ Fine motion compensation

^۴ Short-time Fourier transform

^۵ Time-Frequency Analysis

گامای معکوس برای توان کلاتر می‌باشد [۲۱]. توزیع مرکب پارتو از مدوله شدن توزیع‌نمایی به وسیله توزیع گامای معکوس^۴ به دست می‌آید. تابع چگالی احتمال متغیر تصادفی z با توزیع پارتو می‌تواند به صورت زیر الگو شود که در آن z اندازه کلاتر دریا می‌باشد [۲۰ و ۲۲]:

$$f_Z(z) = \int_0^{+\infty} f_{Z|X}(z|x) f_X(x) dx \quad (1)$$

به طوری که:

$$f_{Z|X}(z|x) = \frac{1}{x} \exp\left(-\frac{z}{x}\right) \quad (2)$$

$$f_X(x) = \frac{b^a}{\Gamma(a)} x^{-a-1} \exp\left(-\frac{b}{x}\right) \quad (3)$$

با استفاده از دو رابطه اخیر تابع چگالی احتمال توزیع پارتو به صورت زیر به دست می‌آید [۲۰]:

$$f_Z(z) = \frac{ab^a}{(b+z)^{a+1}} \quad (4)$$

در رابطه تابع چگالی احتمال توزیع پارتو، a و b به ترتیب مولفه‌های شکل و مقیاس هستند. با توجه به توزیع پارتو برای کلاتر دریا، هر چه مولفه مقیاس b بزرگ‌تر باشد سطح توان دنباله تصادفی توزیع پارتو بالاتر خواهد بود و هر چه مولفه شکل a کوچک‌تر باشد دنباله^۵ PDF توزیع پارتو طولانی‌تر می‌شود که نشان‌دهنده تیزتر بودن است [۲۰]. تابع توزیع تجمعی متغیر تصادفی z با توزیع پارتو به صورت زیر می‌باشد [۲۲]:

$$F_Z(z) = 1 - \left(\frac{b}{b+z}\right)^a \quad (5)$$

از طرفی مقدار میانگین و واریانس توزیع پارتو می‌تواند به وسیله روابط زیر به دست آید:

$$\langle z \rangle = \int_0^{+\infty} z f_Z(z) dz = \frac{b}{a-1} \quad (6)$$

$$\langle z^2 \rangle - \langle z \rangle^2 = \int_0^{+\infty} z^2 f_Z(z) dz - \left(\int_0^{+\infty} z f_Z(z) dz\right)^2 = \frac{ab^2}{(a-1)^2(a-2)} \quad (7)$$

از رابطه (۷) مشاهده می‌شود که مولفه شکل a باید بزرگتر از دو باشد تا همگرایی واریانس تضمین شود [۲۲].

دارای چهار ویژگی «به شدت غیرگوسی»، «ناهمگن»، «غیرایستان» و «متغیر با زمان» می‌باشد [۱۶]؛ با این اوصاف چون توزیع کلاتر دریا دارای طبیعت غیرگوسی است، توزیع‌های رایلی، ویبول، لوگ-نرمال و مرکب K برای تحلیل کلاتر دریا مورد توجه قرار گرفته‌اند [۱۹-۱۷]. همچنین توزیع‌های آماری KA ، KK و توزیع پارتو از مواردی هستند که برای الگوسازی کلاتر دریا مورد استفاده قرار می‌گیرند [۲۰].

ساختار مقاله در ادامه بدین صورت است که در بخش دوم الگوسازی کلاتر دریا با استفاده از توزیع آماری پارتو مطرح می‌شود. در بخش سوم و چهارم به ترتیب معادله سیگنال اهداف چندگانه و روش پیشنهادی برای تصویربرداری از این اهداف تحت عنوان گروه‌بندی اهداف بحث شده است. بعد از آن در بخش پنجم به پردازش وقتی فضا-داپلر (SDAP) به منظور کاهش اثر کلاتر دریا و همچنین ارائه یک الگوریتم برای تصویربرداری از اهداف چندگانه در حضور کلاتر دریا پرداخته شده است. در بخش ششم نتایج شبیه‌سازی و در نهایت در بخش هفتم نتیجه‌گیری بیان شده است.

۲- الگوسازی کلاتر دریا

از میان الگوهای توزیع آماری مختلف برای کلاتر دریا، توزیع K که یک الگو مرکب است یکی از پرستفاده‌ترین الگوهای توزیع آماری می‌باشد و توزیع احتمال مناسبی برای شدت‌های کلاتر دریا در بسیاری از موارد است. اما این توزیع در برخی رخدادهای که پراکندگی از سطح دریا باعث به وجود آمدن بازگشتی‌های با شدت زیاد و تیز^۱ می‌شود مناسب نیست و همیشه به خوبی با توزیع کلاتر دریا در زوایای خیزش پایین تطابق ندارد [۲۰]. با توجه به مرجع شماره [۲۰]، با اضافه کردن برخی اتفاقاتی که منجر به کلاتر دریای تیز می‌شود به توزیع K ، توزیع KA و توزیع KK تشکیل شده‌اند. این دو الگو می‌تواند برخی پدیده‌های تیز کلاتر دریا را منعکس کرده و توصیف بهتری را برای توزیع احتمال کلاتر دریا در زوایای خیزش پایین به همراه داشته باشد. اما فرمول‌بندی این دو توزیع بسیار پیچیده است. علاوه بر دو توزیع فوق محققان توزیع پارتو^۲ را یافتند که با توزیع داده کلاتر اندازه‌گیری شده در هر دو زاویه خیزش بالا و پایین تطابق دارد.

توزیع پارتو یک الگو مرکب است که یک مؤلفه آن با توزیع‌نمایی منفی برای شدت لکه^۳ و مؤلفه دیگر آن با توزیع

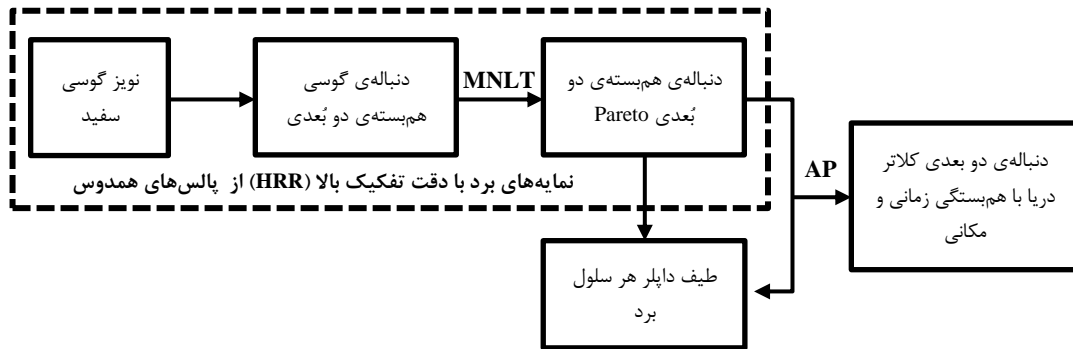
¹ Spike-like

² Pareto distribution

³ Speckle

⁴ Inverse gamma

⁵ Tail



شکل (۱): روش تولید کلاتر دریا با هم‌بستگی‌های زمانی و مکانی در یک دوره‌ی کوتاه [۲۰ و ۲۲].

۲-۱-۱- طیف کلاتر دریا

خصوصیات همبستگی زمانی کلاتر دریا می‌تواند با استفاده از تابع خودهمبستگی (ACF) ^۴ زمانی شدت کلاتر و طیف داپلر توصیف شود. طیف داپلر، تغییرات فاز سری زمانی کلاتر دریا را درگیر کرده و اطلاعات بیشتری را از خصوصیات همبستگی زمانی در برمی‌گیرد [۲۰]. برای توصیف طیف داپلر مطلوب S_0 یک الگو گوسی شکل در نظر گرفته شده که رابطه آن در زیر آمده است [۲۰]:

$$S_0(f, x, B) = \frac{x}{\sqrt{2\pi B}} \exp\left[-\frac{(f - f_d)^2}{2B^2}\right] \quad (9)$$

به‌طوری که f_d فرکانس مرکزی داپلر و B پهنای باند طیف داپلر (انحراف معیار ^۵ طیف) است. در الگوسازی داپلر کلاتر دریا در کوتاه مدت ^۶، x مقدار میانگین شدت کلاتر دریا است [۲۰]. پهنای ۳ dB طیف داپلر و جابه‌جایی فرکانسی با استفاده از روابط زیر به‌دست می‌آید [۲۴]:

$$B_{Doppler} = \frac{2v_B}{\lambda_{radar}} \quad (10)$$

$$f_{Doppler} = \frac{2v_{Doppler}}{\lambda_{radar}}$$

به‌طوری که v_B پهنای ۳ dB طیف سرعت ^۷ است و با استفاده از رابطه تجربی (۱۲) محاسبه می‌شود:

$$v_B \square 0.24U \quad (11)$$

که در آن U سرعت باد بر حسب m/s است. از طرفی $v_{Doppler}$ سرعت جابه‌جایی طیف داپلر ^۸ می‌باشد که رابطه تجربی

۲-۱- تولید کلاتر دریا با استفاده از الگو آماری پارتو

با روش MNLT

از آن‌جا که داده خام ISAR به‌صورت یک ماتریس دو بُعدی برد-زمان است، در الگوسازی و شبیه‌سازی کلاتر دریا هم مطلوب این است که یک دنباله دو بُعدی برد-زمان تولید شود؛ برای الگوسازی و شبیه‌سازی دنباله دو بُعدی کلاتر دریا از روش ارائه شده در [۲۰ و ۲۲] استفاده شده است که مبتنی بر بازیابی فاز ^۱ می‌باشد. این روش در شکل (۱) نشان داده شده است.

روش تبدیل غیرخطی بدون حافظه (MNLT) ^۲ یک نگاشت غیرخطی یک به یک از فرآیند تصادفی معلوم به فرآیند تصادفی دیگر با تابع چگالی احتمال مطلوب است. نگاشت غیرخطی در روش MNLT با معادل قرار دادن تابع توزیع احتمال (CDF) فرآیند تصادفی معلوم (ورودی) و فرآیند تصادفی نامعلوم (خروجی) انجام می‌شود. در اصل روش MNLT برای تولید هر فرآیند غیرگوسی استفاده می‌شود [۲۳]. اگر فرض شود که u دنباله تصادفی هم‌بسته با توزیع گوسی باشد، آنگاه تبدیل MNLT برای توزیع پارتو به صورت زیر خواهد بود:

$$z(u) = b \left[\frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left(\frac{u}{\sqrt{2}} \right) \right]^{-\frac{1}{a}} - b \quad (8)$$

به‌طوری که erfc تابع خطای مکمل ^۳ است. رابطه (۸) دنباله تصادفی هم‌بسته با توزیع پارتو را بر حسب دنباله تصادفی همبسته با توزیع گوسی بیان می‌کند؛ به‌عبارت دیگر، رابطه (۸) یک تبدیل غیرخطی از متغیر u با توزیع نرمال استاندارد به متغیر تصادفی z با توزیع پارتو است [۲۰ و ۲۲].

^۴ Auto Correlation Function

^۵ Standard deviation

^۶ Short-term

^۷ 3 dB-width of velocity spectrum

^۸ Doppler shift velocity of the spectrum

^۱ Phase retrieval

^۲ Memoryless Non-Linear Transform

^۳ Complementary error function

$$S_i(t_{m,n}) = \sum_{k=1}^K \exp\left[-j4\pi f_n \frac{R_k(t_{m,n})}{c}\right] \times \iint \rho_k(x,y) \cdot \exp\left\{-j\frac{4\pi f_n}{c} [x \cos \theta_k(t_{m,n}) - y \sin \theta_k(t_{m,n})]\right\} dx dy \quad (14)$$

که در آن $\rho_k(x,y)$ تابع چگالی بازتاب پذیری پراکنده گر واقع در نقطه (x,y) مربوط به هدف k ام است. همچنین $R_k(t_{m,n})$ و $\theta_k(t_{m,n})$ به ترتیب بیانگر حرکت انتقالی هدف k ام و حرکت چرخشی این هدف در زمان $t_{m,n}$ می باشد که به صورت زیر قابل بیان هستند:

$$R_k(t_{m,n}) = R_{0k} + v_k t_{m,n} + \frac{1}{2} a_k t_{m,n}^2 + \dots \quad (14)$$

$$\theta_k(t_{m,n}) = \theta_{0k} + \omega_k t_{m,n} + \frac{1}{2} \gamma_k t_{m,n}^2 + \dots \quad (15)$$

به طوری که R_{0k} و θ_{0k} به ترتیب برد اولیه و زاویه جهت اولیه، v_k و ω_k به ترتیب سرعت شعاعی و سرعت زاویه‌ای و همچنین a_k و γ_k به ترتیب شتاب خطی و شتاب زاویه‌ای هدف k ام می باشد.

۴- روش پیشنهادی تصویربرداری ISAR از اهداف چندگانه: گروه بندی اهداف

روشی که در این بخش به منظور جبران سازی و تصویربرداری از اهداف چندگانه ارائه می شود مبتنی بر الگوریتم بهینه سازی تجمعی ذرات (PSO) [۲۸] و روش نمایش تُنک [۲] می باشد که در این مقاله تحت عنوان «گروه بندی اهداف» از آن یاد شده است. همانطور که در [۶] بیان شد در حالت کلی اهداف می توانند به صورت گروه هایی در نظر گرفته شوند که اهداف هر گروه مولفه های حرکتی مشابهی دارند و مولفه های حرکتی هر گروه از اهداف، با سایر گروه ها متفاوت است. طبق این توصیف کلی از حضور اهداف چندگانه در یک صحنه تصویربرداری، می توان ایده گروه بندی اهداف مبتنی بر مولفه های حرکت انتقالی را مطرح کرد. مقصود از ایده مورد بحث این است که جبران سازی حرکت انتقالی اهدافی با مولفه های حرکت انتقالی نزدیک به هم به طور هم زمان و به صورت گروهی انجام گیرد و در نهایت تصویر اهداف موجود در آن گروه در یک قاب نمایش داده شود؛ به عبارت دیگر برای هر هدف در یک گروه، مولفه های حرکت انتقالی به صورت جداگانه تخمین زده نشود بلکه فقط یک مقدار برای همه آن ها تخمین زده شود؛ مثلاً فقط یک مقدار برای سرعت همه اهداف آن گروه تخمین زده شود؛

۴-۱- تشکیل معادله ماتریسی سیگنال دریافتی از اهداف چندگانه

در ابتدا باید سیگنال بازگشتی معادله (۱۴) از K هدف را به شکل ماتریسی مانند رابطه (۱۷) نوشت:

آن برای باند X و در خلاف جهت باد برای قطبش های متفاوت در (۱۱) بیان شده است:

$$V_{Doppler_VV} \square 0.25 + 0.18U \quad (12)$$

$$V_{Doppler_HH} \square 0.25 + 0.2U$$

این موضوع باید ذکر گردد که مقدار سرعت باد بر اساس حالت دریا^۱ تعیین می گردد؛ به عبارت دیگر مقادیر مختلف سرعت باد منجر به ایجاد حالت های متفاوتی از دریا می شود. به طور اجمالی اشاره شود که حالت دریا عبارتی است که به وسیله دریانوردان به عنوان معیاری برای ارتفاع موج به کار می رود [۲۵]؛ حالت دریا را می توان با استفاده از مقادیر عددی نشان داد و یا با عبارات کیفی توصیف کرد. به طور کلی، هر چه سرعت باد بیشتر باشد مقدار عددی متناظر با حالت دریا نیز بزرگتر خواهد بود. رابطه حالت دریا با سرعت باد در جدولی در مرجع شماره [۲۶] بیان شده است.

در پایان این بخش تاکید شود که برای درک کامل فرآیند شبیه سازی کلاتر دریا طبق روند نشان داده شده در شکل (۱)، مراجع [۲۰ و ۲۲] مطالعه شود.

۳- معادله سیگنال بازگشتی از اهداف چندگانه در ISAR

فرض شود رادار تصویربرداری، شکل موج فرکانس پله ای را با تعداد M قطار پالس که هر قطار دارای N پالس است ارسال می کند. در این صورت سیگنال بازگشتی باند پایه از یک هدف دوبعدی با پراکنده گرهای^۲ پیوسته به ازای قطار m ام و پالس n ام (که متناظر با زمان $t_{m,n}$ است) به صورت زیر نوشته می شود [۲۷]:

$$S_i(t_{m,n}) = \exp\left[-j4\pi f_n \frac{R(t_{m,n})}{c}\right] \times \iint \rho(x,y) \cdot \exp\left\{-j\frac{4\pi f_n}{c} [x \cos \theta(t_{m,n}) - y \sin \theta(t_{m,n})]\right\} dx dy \quad (13)$$

دقت شود در رابطه ی فوق فرکانس f_n برابر با $f_0 + n\Delta f$ است که در آن $n = 0, 1, 2, \dots, N-1$ ، f_0 فرکانس شروع هر قطار و Δf گام فرکانسی می باشد. همچنین c سرعت نور است. حال اگر فرض شود که K هدف در صحنه تصویربرداری قرار داشته باشند آن گاه معادله سیگنال بازگشتی از همه اهداف را می توان به صورت رابطه (۱۴) نوشت:

¹ Sea state
² Scatterer

۴-۲- تشکیل تصویر اهداف در گروه‌های مختلف

حال مطابق با توضیحات بیان شده در رابطه با گروه‌بندی اهداف فرض شود که بتوان K هدف را با توجه به مولفه‌های حرکت انتقالی آن‌ها در تعداد G گروه دسته‌بندی کرد. از طرفی فرض شود i امین گروه از اهداف که با g_i نشان داده می‌شود دارای k_i تا هدف باشد؛ بر اساس ایده گروه‌بندی اهداف، سیگنال دریافتی از همه‌ی گروه‌ها در شکل ماتریسی به صورت زیر نوشته می‌شود:

$$\mathbf{S}_i^v = \mathbf{C}_{g_1} \mathbf{F} \boldsymbol{\rho}_{g_1}^v + \mathbf{C}_{g_2} \mathbf{F} \boldsymbol{\rho}_{g_2}^v + \dots + \mathbf{C}_{g_G} \mathbf{F} \boldsymbol{\rho}_{g_G}^v \quad (20)$$

\mathbf{C}_{g_i} و $\boldsymbol{\rho}_{g_i}^v$ به ترتیب تصویر و عبارت فاز خارجی گروه i ام از اهداف را نشان می‌دهد. در واقع هر کدام از عبارت‌های $\mathbf{S}_i^v = \mathbf{C}_{g_i} \mathbf{F} \boldsymbol{\rho}_{g_i}^v$ بیانگر سیگنال گروه g_i است که مجموعی از سیگنال k_i تا هدف را دارا می‌باشد. رابطه (۲۱) را می‌توان به صورت زیر بازنویسی کرد:

$$\mathbf{S}_i^v = (\mathbf{C}_{g_1} \mathbf{F} \quad \mathbf{C}_{g_2} \mathbf{F} \quad \dots \quad \mathbf{C}_{g_G} \mathbf{F}) \begin{pmatrix} \boldsymbol{\rho}_{g_1}^v \\ \boldsymbol{\rho}_{g_2}^v \\ \vdots \\ \boldsymbol{\rho}_{g_G}^v \end{pmatrix} \quad (21)$$

به طوری که:

$$\begin{aligned} \mathbf{S}_i^v &= [\mathbf{B}]_{MN \times 1} \\ (\mathbf{C}_{g_1} \mathbf{F} \quad \mathbf{C}_{g_2} \mathbf{F} \quad \dots \quad \mathbf{C}_{g_G} \mathbf{F}) &= [\mathbf{A}]_{MN \times GMN} \\ \begin{pmatrix} \boldsymbol{\rho}_{g_1}^v \\ \boldsymbol{\rho}_{g_2}^v \\ \vdots \\ \boldsymbol{\rho}_{g_G}^v \end{pmatrix} &= [\mathbf{X}]_{GMN \times 1} \end{aligned} \quad (22)$$

به طور خلاصه روابط فوق به صورت زیر بازنویسی می‌شود:

$$\mathbf{A} \mathbf{X} = \mathbf{B} \quad (23)$$

که \mathbf{X} مجهول و \mathbf{B} داده‌های اندازه‌گیری شده می‌باشد. با توجه به این که تعداد سطرهای ماتریس \mathbf{A} کم‌تر از تعداد ستون‌های آن است، رابطه ماتریسی (۲۴) بیانگر یک دستگاه معادلات فرومعین می‌باشد که به صورت زیر قابل حل خواهد بود [۳۰]:

$$\min \|\mathbf{X}\|_1 \quad \text{subject to} \quad \mathbf{A} \mathbf{X} = \mathbf{B} \quad (24)$$

در معادله (۲۵) نماد $\|\cdot\|_1$ بیانگر نرم یک است. برای این که بردار تصاویر هر گروه از اهداف را بازسازی کرد باید مولفه‌های حرکت انتقالی هر گروه از اهداف را تخمین زد؛ این کار را می‌توان با استفاده از مسئله بهینه‌سازی تجمعی ذرات (PSO) انجام داد. بدین ترتیب که هر بار ماتریس \mathbf{A} به‌ازای مقادیر مختلف مولفه‌های حرکت انتقالی هر گروه از اهداف به‌روز شده، و سپس بردار تصاویر \mathbf{X} بازسازی می‌شود؛ سپس بردار باقی‌مانده \mathbf{r} به صورت زیر (رابطه ۲۶) حساب می‌شود:

$$\mathbf{r} = \mathbf{B} - \mathbf{A} \mathbf{X} \quad (25)$$

$$\mathbf{S}_i^v = \mathbf{C}_1 \mathbf{F} \boldsymbol{\rho}_1^v + \mathbf{C}_2 \mathbf{F} \boldsymbol{\rho}_2^v + \dots + \mathbf{C}_K \mathbf{F} \boldsymbol{\rho}_K^v \quad (16)$$

که در آن \mathbf{S}_i^v و $\boldsymbol{\rho}_k^v$ به‌ازای $k = 1, 2, \dots, K$ بردارهایی با MN درایه است که به ترتیب بیانگر بردار سیگنال دریافتی و بردار تصویر هدف k ام می‌باشد. دقت شود که هر کدام از این دو بردار با پشت سرهم قرار گرفتن ستون‌های مربوط به ماتریس متناظر با آن‌ها تشکیل شده است؛ دقت شود که هر کدام از ماتریس‌های مذکور دارای ابعاد $M \times N$ است که اندیس‌های سطر $m = 0, 1, \dots, M - 1$ مربوط به قطرها و اندیس‌های ستون $n = 0, 1, \dots, N - 1$ مربوط به پالس‌ها می‌باشد. ماتریس \mathbf{C}_k به‌ازای $k = 1, 2, \dots, K$ از پشت سرهم قرار گرفتن ستون‌های ماتریس عبارت فاز خارجی متناظر با هدف k ام و سپس قطری کردن بردار به دست آمده نتیجه می‌شود. رابطه (۱۸) نحوه تشکیل ماتریس \mathbf{C}_k را که ابعادی برابر با $MN \times MN$ دارد بیان می‌کند.

$$\begin{aligned} \mathbf{C}_k &= \text{diag} \left\{ \text{vect} \left\{ \begin{bmatrix} P_{1,1} & P_{1,2} & \dots & P_{1,N} \\ P_{2,1} & P_{2,2} & \dots & P_{2,N} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ P_{M,1} & P_{M,2} & \dots & P_{M,N} \end{bmatrix} \right\} \right\} \\ &= \text{diag} \left\{ \left[[P_{1,1} \dots P_{M,1}] \dots [P_{1,N} \dots P_{M,N}] \right]^T \right\} \\ &= \begin{bmatrix} P_{1,1} & 0 & \dots & \dots & \dots & 0 \\ 0 & \ddots & \ddots & \ddots & \ddots & 0 \\ \vdots & \ddots & P_{M,1} & \ddots & \ddots & \vdots \\ \vdots & \ddots & \ddots & \ddots & P_{1,N} & \vdots \\ \vdots & \ddots & \ddots & \ddots & \ddots & 0 \\ 0 & \dots & \dots & \dots & \dots & 0 & P_{M,N} \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (17)$$

به طوری که $p_{m,n} = \exp[-j4\pi f_n R_k(t_{m,n})/c]$ و $[\cdot]^T$

بیانگر ترانزپوز می‌باشد. در رابطه (۱۷) همچنین \mathbf{F} ماتریسی با ابعاد $MN \times MN$ است که از حاصل ضرب کرونکر [۲۹] ماتریس تبدیل فوریه یک بعدی در راستای ستون (\mathbf{F}_N) در ماتریس تبدیل فوریه یک بعدی در راستای سطر (\mathbf{F}_M) به صورت زیر به دست می‌آید.

$$\mathbf{F} = \mathbf{F}_N \otimes \mathbf{F}_M \quad (18)$$

که در آن نماد \otimes بیانگر ضرب کرونکر می‌باشد. دقت شود که در معادله (۱۷)، \mathbf{C}_k و $\boldsymbol{\rho}_k^v$ به‌ازای $k = 1, 2, \dots, K$ مجهول هستند. \mathbf{C}_k ها از حرکت انتقالی اهداف نتیجه می‌شود و برای تشکیل آن لازم است تا مولفه‌های حرکت انتقالی اهداف تخمین زده شود. اگر فرض شود که \hat{v}_k و \hat{a}_k به ترتیب سرعت و شتاب تخمین زده شده هدف k ام باشد عبارت فاز خارجی متناظر با k امین هدف که ماتریس \mathbf{C}_k را می‌سازد برابر است با:

$$k - \text{th external phase term} = \exp \left[-j \frac{4\pi f_n}{c} \left(\hat{v}_k t_{m,n} + \frac{1}{2} \hat{a}_k t_{m,n}^2 \right) \right] \quad (19)$$

کاهش کلاتر و جبران‌سازی حرکتی رادار هر دو در [۳۱] به‌وسیله پردازش فضا-داپلر وفقی انجام شده است. با توجه به [۳۱] در یک سامانه SAR نوعی P کاناله معمولاً یک آنتن پالس‌ها را ارسال می‌کند و همه P آنتن امواج بازتابیده از صحنه تصویربرداری را دریافت می‌کند؛ مطابق با این موضوع، فرض شده سامانه ISAR مورد بحث در این پروژه نیز چنین چینی داشته باشد. با فرض این که رادار شکل موج فرکانس پله‌ای ارسال کند می‌توان سیگنال دریافتی در کانال p ام را به‌صورت زیر نوشت:

$$S_p(m, n) = S_{t,p}(m, n) + S_{c,p}(m, n) \quad (26)$$

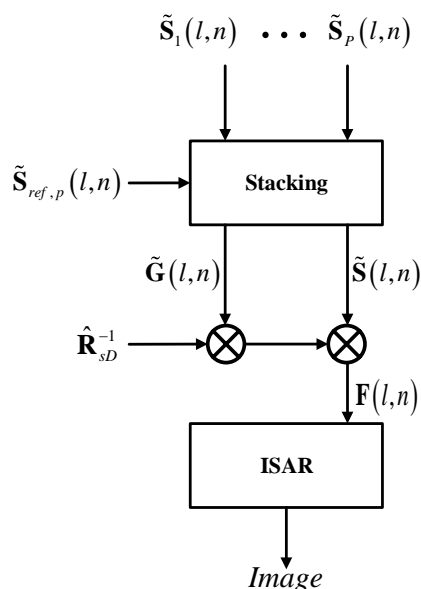
به‌طوری $S_{t,p}(m, n)$ سیگنال مربوط به اهداف و $S_{c,p}(m, n)$ مربوط به کلاتر است. همچنین m اندیس قطارها (زمان کند) و n اندیس پالس‌ها (فرکانس و زمان تند) می‌باشد. طیف سیگنال دریافتی در کانال p ام برابر است با:

$$\tilde{S}_p(l, n) = \tilde{S}_{t,p}(l, n) + \tilde{S}_{c,p}(l, n) \quad (27)$$

که در آن طیف داپلر سیگنال هدف و کلاتر در کانال p ام به‌صورت زیر نوشته می‌شود [۳۱]:

$$\begin{aligned} \tilde{S}_{t,p}(l, n) &= DFT_m \{ S_{t,p}(m, n) \} \\ \tilde{S}_{c,p}(l, n) &= DFT_m \{ S_{c,p}(m, n) \} \end{aligned} \quad (28)$$

در روابط اخیر نماد $DFT_m \{ \cdot \}$ بیانگر تبدیل فوریه گسسته در راستای اندیس قطارها می‌باشد. روند کاهش اثر کلاتر دریا و همچنین پردازش تشکیل تصویر در شکل (۲) نشان داده شده است.



شکل (۲): روند کاهش اثر کلاتر و پردازش گر تصویر [۳۱].

روابط (۳۳-۳۰) بردارهای تعریف شده را در حوزه داپلر در مرحله پشته‌سازی^۳ بیان می‌کند [۳۱].

اگر نرم دو برای بردار باقی‌مانده \mathbf{r} به مقدار حداقل خود رسیده باشد، آنگاه مقادیر تخمین زده‌شده برای مولفه‌های حرکت انتقالی گروه‌ها و هم‌چنین بردار تصاویر بازسازی شده \mathbf{X} پذیرفته خواهد شد.

مسئله‌ای که در اینجا باید به آن اشاره شود تعداد گروه‌ها و نحوه تعیین آن می‌باشد؛ بهینه‌ترین تعداد گروه‌ها برابر با تعداد اهداف موجود در صحنه تصویربرداری است؛ چون در این حالت هر هدف در یک گروه قرار خواهد گرفت و تخمین مولفه‌های حرکت انتقالی و در نتیجه جبران‌سازی آن برای هر هدف به‌طور مجزا انجام می‌شود. تخمین زدن تعداد گروه‌ها چالشی است که در این مقاله مورد بررسی قرار نگرفته است؛ اما واضح است که هر چه تعداد گروه‌ها بیشتر باشد تعداد اهداف هر گروه کمتر بوده و در نهایت جبران‌سازی حرکت انتقالی برای هر هدف با دقت بالاتری انجام می‌پذیرد؛ باید دقت شود که افزایش تعداد گروه‌ها با توجه به ابعاد ماتریس‌های بیان شده در (۲۳)، می‌تواند بار محاسباتی بیشتری را به پردازنده تحمیل کند؛ از طرفی ممکن است تعداد گروه‌ها بیشتر از تعداد اهداف در نظر گرفته شود که این انتخاب علاوه بر بهینه نبودن، حجم پردازش را بدون دستیابی به نتیجه مفیدی بالا می‌برد. تخمین بهینه تعداد گروه‌ها موضوعی است که ان‌شاء... در تحقیقات آتی مورد مطالعه قرار خواهد گرفت.

مسئله دیگری که باید مورد بحث قرار گیرد، نحوه دسته‌بندی اهداف در گروه‌های مختلف در این روش می‌باشد. با توجه به توضیحات گذشته، اهدافی که مولفه‌های حرکتی مشابهی دارند در یک گروه قرار می‌گیرند و تصویر آن‌ها در یک قاب تشکیل می‌شود؛ همچنین با توجه به آن‌چه که در بند قبل تشریح شد، یکی از عوامل گروه‌بندی اهداف، تعداد گروه‌ها می‌باشد؛ علاوه بر آن، تعداد اهداف و مولفه‌های حرکت انتقالی هر هدف نیز در نحوه گروه‌بندی آن‌ها نقش دارد. اگر تعداد گروه‌ها با تعداد اهداف برابر باشد، هر هدف در یک گروه قرار می‌گیرد؛ اما اگر تعداد اهداف از تعداد گروه‌ها بیشتر باشد، اهدافی که مولفه‌های حرکت انتقالی آن‌ها نسبت به هم اختلاف کمتری دارند، در یک گروه قرار می‌گیرند؛ چون در این صورت است که نرم دو برای بردار باقی‌مانده \mathbf{r} بیان شده در (۲۶) حداقل می‌شود.

۵- کاهش اثر کلاتر دریا با استفاده از روش SDAP

در [۳۱] از روش پردازش فضا-داپلر وفقی (SDAP)^۱ برای کاهش یک کلاتر ایستادن و قوی در سامانه SAR چند کاناله^۲ استفاده شده که مبنای کاهش اثر کلاتر دریا در این مقاله قرار گرفته است. از آنجا که در سامانه SAR سکوی رادار متحرک است،

^۳ Stacking

^۱ Space-Doppler Adaptive Processing
^۲ Multichannel SAR

که در آن θ_{gr} بیانگر زاویه خیزش است.

همچنین داریم [۳۱]:

$$\mathbf{F}(l, n) = \tilde{\mathbf{W}}^H(l, n) \tilde{\mathbf{S}}(n) \quad (36)$$

به طوری که:

$$\tilde{\mathbf{W}}(l, n) = \delta \tilde{\mathbf{R}}_{sd}^{-1} \tilde{\mathbf{G}}(l, n) \in C^{MP \times 1} \quad (37)$$

در رابطه (۳۸)، $\hat{\mathbf{R}}_{sd}$ تخمینی از ماتریس دقیق طیف توان متقابل کلاتر^۱ \mathbf{R}_{sd} است و به صورت زیر تعریف می شود:

$$\hat{\mathbf{R}}_{sd} = \frac{1}{N_r} \sum_{n_r=1}^{N_r} \tilde{\mathbf{Z}}(n_r) \tilde{\mathbf{Z}}^H(n_r) \in C^{MP \times MP} \quad (38)$$

در حالی که:

$$\delta = \frac{1}{\sqrt{\tilde{\mathbf{G}}^H(l, n) \hat{\mathbf{R}}_{sd}^{-1} \tilde{\mathbf{G}}(l, n)}} \quad (39)$$

همچنین بردار $\tilde{\mathbf{Z}}(n_r)$ در (۳۹) یک داده بدون حضور هدف^۲ را در سلول برد n_r تعریف می کند [۳۱]. دقت شود که خروجی پردازش وقتی فضا-داپلر ماتریس \mathbf{F} است که در رابطه (۳۷) بیان شده است. ماتریس \mathbf{F} در واقع حوزه داپلر سیگنال تشکیل تصویر اهداف، طبق روش گروه بندی اهداف که در این مقاله مطرح شد استفاده کرد؛ بدین منظور نیاز است تا ماتریس داده خام سیگنال اهداف در دسترس باشد که با اعمال تبدیل فوریه معکوس بر روی ماتریس \mathbf{F} در راستای زمان کند به دست می آید. سپس می توان ماتریس حاصل را در روش گروه بندی اهداف مورد پردازش قرار داد. با توجه به مباحث مطرح شده، در اینجا می توان الگوریتم نهایی را برای تصویربرداری ISAR از اهداف چندگانه مبتنی بر ایده گروه بندی در حضور کلاتر دریا ارائه کرد. این الگوریتم در شکل (۴) نشان داده شده است.

$$\tilde{\mathbf{S}}(l, n) = \frac{1}{P} [\tilde{\mathbf{S}}_1(l, n) \dots \tilde{\mathbf{S}}_p(l, n)]^T \in C^{P \times 1} \quad (29)$$

$$\tilde{\mathbf{S}}_{ref}(l, n) = \frac{1}{P} [\tilde{\mathbf{S}}_{1,ref}(l, n) \dots \tilde{\mathbf{S}}_{p,ref}(l, n)]^T \in C^{P \times 1} \quad (30)$$

$$\tilde{\mathbf{S}}(n) = [\tilde{\mathbf{S}}^T(0, n) \dots \tilde{\mathbf{S}}^T(M-1, n)]^T \in C^{M \times P \times 1} \quad (31)$$

$$\tilde{\mathbf{G}}(l, n) = [\tilde{\mathbf{S}}_{ref}^T(l, n) \dots \tilde{\mathbf{S}}_{ref}^T(l-M-1, n)]^T \in C^{M \times P \times 1} \quad (32)$$

همانطور که قبلا هم گفته شد این روش در [۳۱] برای سامانه SAR به کار گرفته شده است؛ از این رو بردار مرجع با توجه به حرکت سکوی رادار تشکیل می شود؛ اما از آنجا که در ISAR سکوی رادار ثابت است مولفه های حرکتی سرعت $v_{platform}$ و شتاب $a_{platform}$ مربوط به آن برابر با صفر در نظر گرفته می شود؛

$$\tilde{\mathbf{S}}_{p,ref}(l, n) = DFT_m \{ \mathbf{S}_{p,ref}(m, n) \} = DFT_m \left\{ \exp \left[-j \frac{4\pi f}{c} \left(v_{platform} + \frac{1}{2} a_{platform} t^2 \right) \exp(j\phi_p) \right] \right\} \quad (33)$$

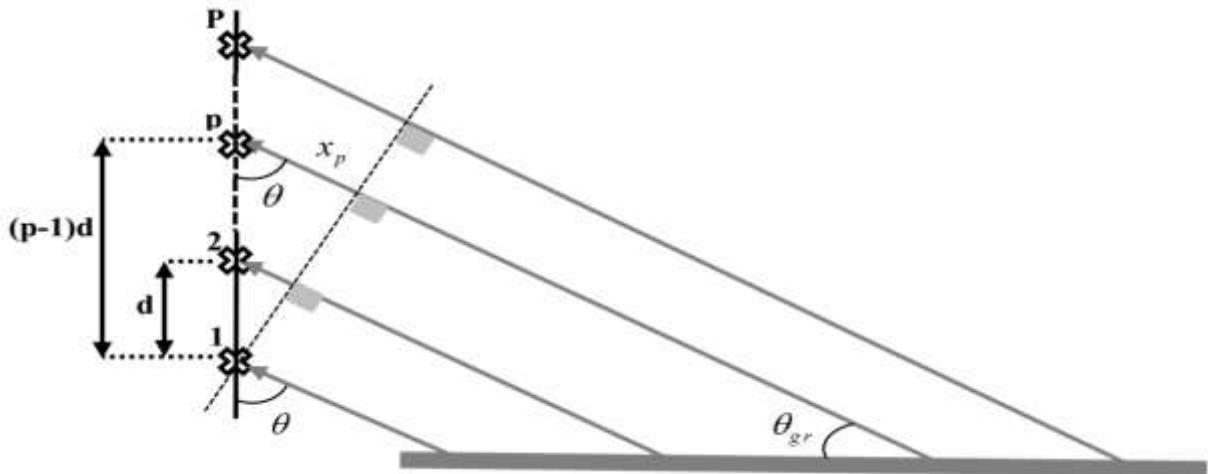
ϕ_p فازی است که در اثر کانال p ام به سیگنال دریافت شده اعمال می شود [۳۲]:

$$\phi_p = p \frac{2\pi}{\lambda} d \cos(\theta) \quad (34)$$

در رابطه (۳۵) d فاصله بین آرایه های آنتن است. زاویه θ نیز در شکل (۳) نشان داده شده است.

دقت شود چینی که برای عنصرهای آنتن آرایه ای در نظر گرفته شده مطابق شکل (۳) می باشد. به طوری که θ برابر است با:

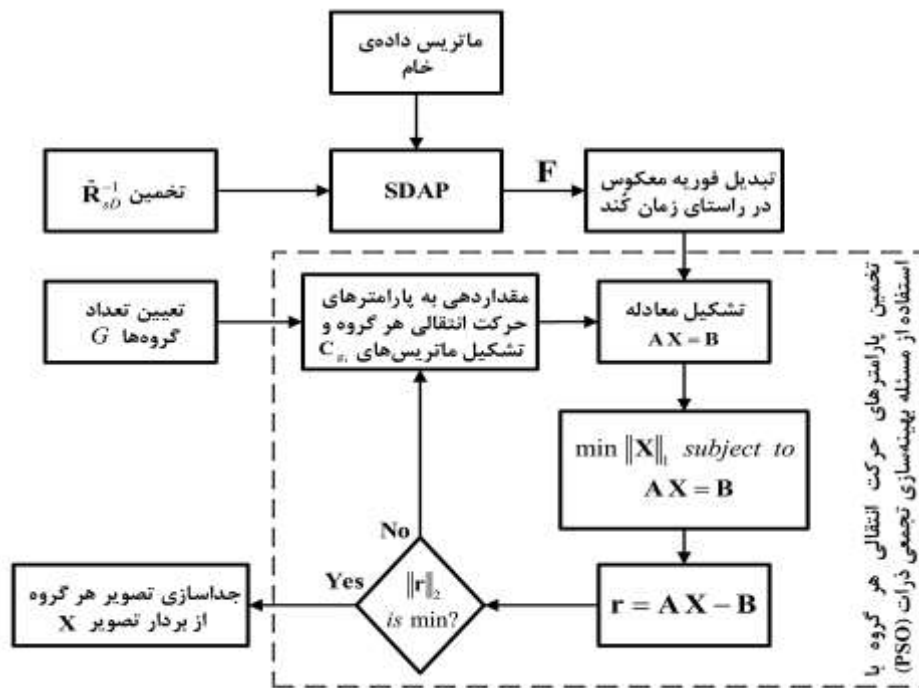
$$\theta = 90 - \theta_{gr} \quad (35)$$



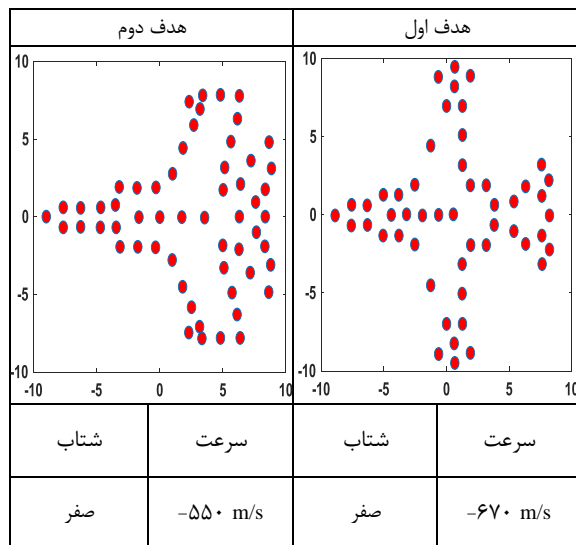
شکل (۳): چینش عنصرهای آنتن آرایه فازی.

¹ Exact clutter cross-power spectral matrix

² Target-free data



شکل (۴): الگوریتم تصویربرداری از اهداف چندگانه هوایی در حضور کلاتر دریا.



شکل (۵): الگو پراکنده‌گر نقطه‌ای و مولفه‌های حرکتی اهداف در شبیه‌سازی اول.

طیف داپلر کلاتر دریا که متناظر با مقادیر جدول (۱) شبیه‌سازی شده در شکل (۶) نشان داده شده است. با اعمال الگوریتم SDAP به منظور کاهش اثر کلاتر دریا و سپس با به‌کارگیری روش تصویربرداری از اهداف چندگانه مبتنی بر گروه‌بندی اهداف، تصویر هر گروه بازسازی می‌شود؛ لازم به‌ذکر است که بازسازی تصویر هر گروه با استفاده از الگوریتم CoSaMP [۳۳] انجام می‌گیرد. نتایج به‌دست آمده پس از بازسازی تصویر اهداف در شکل (۷ و ۸) نشان داده شده است.

۶- شبیه‌سازی و ارائه نتایج

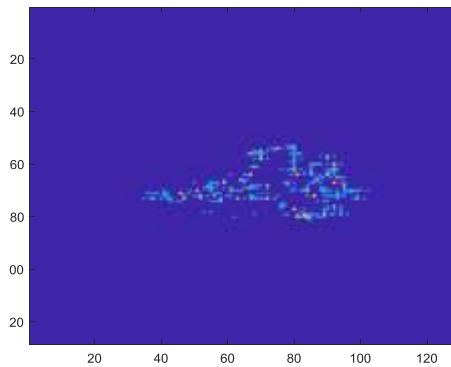
برای شبیه‌سازی روش پیشنهادی، فرض شده اهدافی که مولفه‌های حرکتی نزدیک به هم دارند دارای الگو پراکنده‌گر نقطه‌ای مشابه هستند؛ بنابراین طبق روش گروه‌بندی اهداف انتظار می‌رود اهداف دارای الگو پراکنده‌گر یکسان در یک گروه قرار گرفته و در یک قاب تصویر نشان داده شوند؛ از این طریق می‌توان نتایج به‌دست آمده از این روش را صحت‌سنجی کرد. در این شبیه‌سازی از شکل موج فرکانس پله‌ای که تعداد قطرها و پالس‌های آن برابر با ۱۲۸ می‌باشد استفاده شده است. فرکانس شروع هر قطار برابر با ۹/۵ GHz و همچنین پهنای باند آن ۵۰۰ MHz است. فرکانس تکرار قطار نیز برابر با ۱ KHz است. لازم به‌ذکر است که در پردازش وقتی فضا-داپلر (SDAP) تعداد کانال‌ها برابر با $P = 3$ و فاصله آن‌ها برابر با $d = 0.2$ m در نظر گرفته شده است.

۶-۱- شبیه‌سازی اول: تصویربرداری از دو هدف

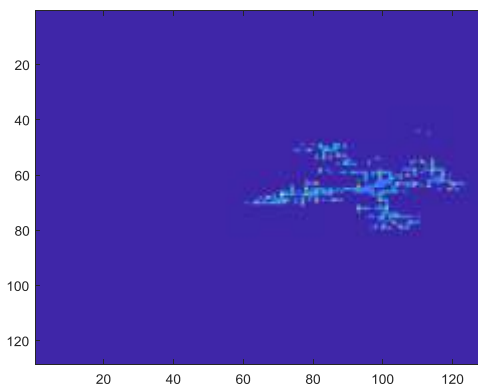
به‌ازای نسبت سیگنال به کلاتر ۳ dB-

در آزمایش اول از دو هدف برای شبیه‌سازی تصویربرداری ISAR در حضور کلاتر دریا استفاده شده است که الگو پراکنده‌گر نقطه‌ای و مولفه‌های حرکتی اهداف در شکل (۵) آمده است. همچنین مقادیر مربوط به مولفه‌های محیط دریا برای شبیه‌سازی کلاتر آن در جدول (۱) بیان شده است.

¹ Compressive Sampling Matched Pursuit



شکل (۷): تصویر بازسازی شده گروه اول در شبیه‌سازی اول با تخمین سرعت برابر با $550/4757 \text{ m/s}$ برای این گروه.



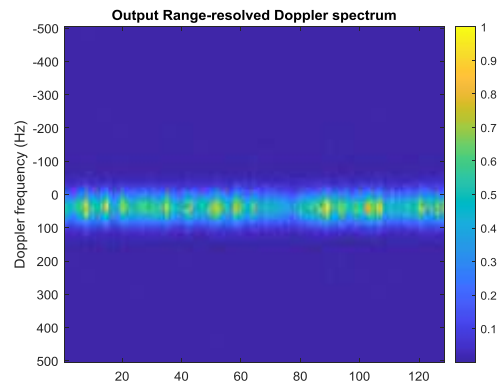
شکل (۸): تصویر بازسازی شده گروه دوم در شبیه‌سازی اول با تخمین سرعت برابر با $669/9378 \text{ m/s}$ برای این گروه.

۶-۲- شبیه‌سازی دوم: تصویربرداری از سه هدف به‌ازای نسبت سیگنال به کلاتر 10 dB

در این جا سه هدف در نظر گرفته شده که دو هدف مولفه‌های حرکتی نزدیک به هم دارد و انتظار می‌رود که با استفاده از روش گروه‌بندی اهداف، در نهایت این دو هدف در یک گروه قرار بگیرد. الگو پراکنده‌گر نقطه‌ای و مولفه‌های حرکتی اهداف در شکل (۹) آمده است. همچنین از مشخصات بیان شده در جدول (۲) برای محیط دریا استفاده شده است.

جدول (۱): مولفه‌های محیطی کلاتر دریا در شبیه‌سازی اول.

مقادیر	مولفه‌ها
$2/1 \text{ m/s}$	سرعت باد (U)
۸	مولفه شکل (a)
$0/14$	مولفه مقیاس (b)
-3 dB	نسبت سیگنال به کلاتر (SCR)



شکل (۶): طیف داپلر کلاتر دریا به ازای جابه‌جایی فرکانسی برابر با $f_{Doppler} = 39/77 \text{ Hz}$ و پهنای طیف داپلر 3 dB برابر با $B = 31/92 \text{ Hz}$ ؛ محور افقی اندیس پالس‌ها را نشان می‌دهد.

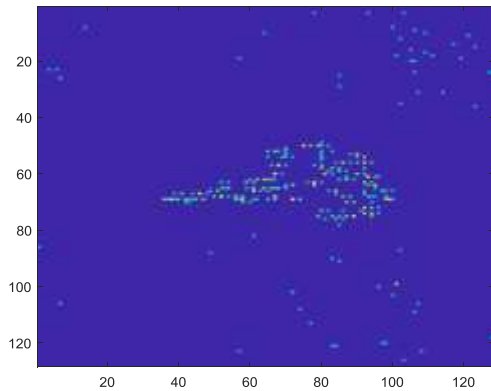
باید یادآوری شود که جست‌وجوی مولفه‌های حرکت انتقالی هر گروه در این آزمایش با استفاده از PSO [۲۸] و با تابع هزینه نرم دو برای بردار باقی‌مانده \mathbf{z} بیان شده در رابطه (۲۶) انجام گرفته است که سرعت تخمین زده شده برای گروه اول و دوم به ترتیب دارای مقادیر $550/4757 \text{ m/s}$ و $669/9378 \text{ m/s}$ می‌باشد؛ مقایسه مقادیر تخمین زده شده با مقادیر واقعی بیان شده در شکل (۵)، دقت بالای مقادیر تخمین زده شده را نشان می‌دهد.

دقت شود که به‌منظور تسریع در انجام فرآیند شبیه‌سازی، بازسازی تصویر هر گروه با استفاده از الگوریتم CoSaMP، با تعداد تُنکی^۱ برابر با ۶۰۰ انجام شده است. برای آشنایی با جزئیات این الگوریتم به [۳۳ و ۳۴] مراجعه شود.

هدف سوم		هدف دوم		هدف اول	
شتاب	سرعت	شتاب	سرعت	شتاب	سرعت
-4 m/s^2	-540 m/s	-15 m/s^2	-620 m/s	-6 m/s^2	-550 m/s

شکل (۹): الگو پراکنده‌گر نقطه‌ای و مولفه‌های حرکتی سه هدف در شبیه‌سازی دوم.

^۱ Sparsity



شکل (۱۲): تصویر بازسازی شده گروه دوم در شبیه‌سازی دوم با تخمین سرعت و شتاب به ترتیب برابر با $619/9724 \text{ m/s}$ و $-15/2667 \text{ m/s}^2$ برای این گروه.

مقدار تخمین زده شده برای سرعت و شتاب هر گروه با استفاده از رویکرد گروه‌بندی اهداف و با به‌کارگیری PSO در جدول (۳) ذکر شده است.

جدول (۳): سرعت و شتاب تخمین زده شده برای دو گروه در شبیه‌سازی دوم.

شتاب (m/s^2)	سرعت (m/s)	گروه اول
-۶۱۰۲۱۲	-۵۵۰/۰۶۰۶	
-۱۵/۲۶۶۷	-۶۱۹/۹۷۲۴	گروه دوم

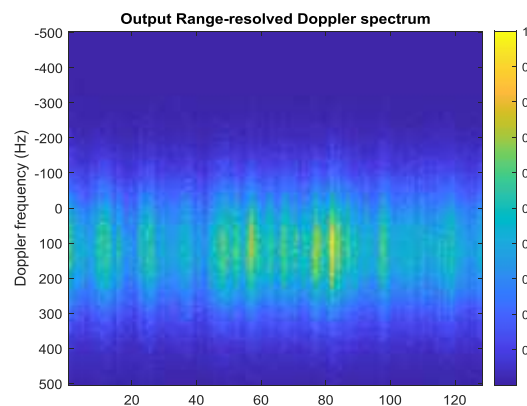
۷- نتیجه‌گیری

در این مقاله ایده گروه‌بندی اهداف با توجه به مولفه‌های حرکت انتقالی آن‌ها و با استفاده از تابع هزینه کمترین نرم دو برای بردار باقی‌مانده \mathbf{r} به منظور بازسازی تصویر هر گروه از اهداف صورت گرفته است؛ بهترین نتیجه در این روش در حالتی به دست می‌آید که تعداد گروه‌ها برابر با تعداد اهداف موجود در صحنه تصویربرداری باشد؛ در این حالت هر هدف در یک گروه مجزا قرار گرفته و جبران‌سازی حرکت انتقالی برای هر هدف به‌طور جداگانه انجام می‌شود که منجر به جبران‌سازی حرکتی جزئی^۱ خواهد شد. در این حالت با کیفیت‌ترین تصویر برای هر هدف تشکیل می‌شود. اگر تعداد گروه‌ها به‌گونه‌ای انتخاب گردد که کمتر از تعداد اهداف باشد، در این صورت وضوح تصویر هر گروه زمانی بالا خواهد بود که مولفه‌های حرکت انتقالی چند هدف نسبت به سایر اهداف خیلی به هم نزدیک باشد؛ در این حالت این اهداف در یک گروه در نظر گرفته شده و مولفه‌های حرکت انتقالی تخمین زده شده برای آن گروه می‌تواند عبارت فاز خارجی ناشی از حرکت انتقالی تمامی اهداف موجود در آن گروه را تا حد خوبی خنثی نماید و تصاویری را با وضوح بالا از هر هدف به دست دهد؛ اما اگر مولفه‌های حرکت انتقالی اهداف مشابه هم نباشد، آنگاه مقادیری که برای مولفه‌های حرکتی اهداف یک گروه تخمین زده

جدول (۲): مولفه‌های محیطی کلاتر دریا در شبیه‌سازی دوم.

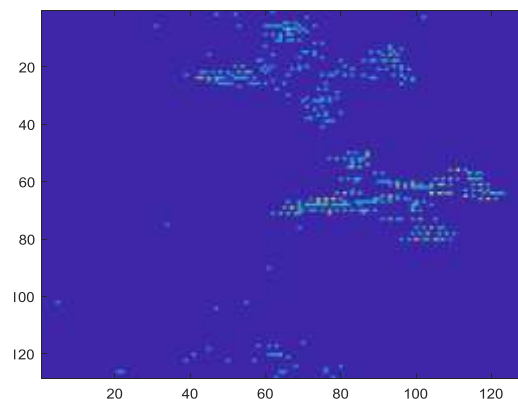
مقادیر	مولفه‌ها
$8/75 \text{ m/s}$	سرعت باد (U)
۴	مولفه شکل (a)
۰/۳	مولفه مقیاس (b)
-۱۰ dB	نسبت سیگنال به کلاتر (SCR)

طیف داپلر کلاتر دریای تولید شده در این آزمایش به‌ازای مولفه‌های محیطی جدول (۲) در شکل (۱۰) نمایش داده شده است. در این آزمایش نیز از الگوریتم CoSaMP و با میزان تنگی برابر با ۶۰۰ برای بازسازی تصاویر استفاده شده است.



شکل (۱۰): طیف داپلر کلاتر دریا به ازای جابه‌جایی فرکانسی برابر با $f_{Doppler} = 115/5 \text{ Hz}$ و پهنای طیف داپلر ۳ dB برابر با $B = 113 \text{ Hz}$ ؛ محور افقی اندیس پالس‌ها را نشان می‌دهد.

با دقت به مقادیر تخمین زده شده برای مولفه‌های حرکتی هر گروه، مشاهده می‌شود که برای گروه اول که دو هدف را در خود جای داده است، مقادیر به دست آمده به یکی از اهداف نزدیکتر است و به دلیل این که مولفه‌های حرکتی دو هدف در گروه اول به هم نزدیک هستند، تصویری با کیفیت قابل قبول از این دو هدف در گروه اول تشکیل شده است. تصویر گروه‌ها در شکل (۱۱ و ۱۲) نشان داده شده است.



شکل (۱۱): تصویر بازسازی شده گروه اول در شبیه‌سازی دوم با تخمین سرعت و شتاب به ترتیب برابر با $550/0606 \text{ m/s}$ و -610212 m/s^2 برای این گروه.

^۱ Fine motion compensation

- based on image segmentation and short-time Fourier transform," in *2012 5th international congress on image and signal processing*, pp. 1832–1836, 2012.
- [9] J. Zhao, Y.-Q. Zhang, X. Wang, S. Wang, and F. Shang, "A novel method for ISAR imaging of multiple maneuvering targets," *Prog. Electromagn. Res.*, vol. 81, pp. 43–54, 2019.
- [10] J. Chen, H. Xiao, H. Fan, and Z. Song, "ISAR imaging of multiple moving targets using signals separation," in *Proceedings 2013 International Conference on Mechatronic Sciences, Electric Engineering and Computer (MEC)*, pp. 1156–1159, 2013.
- [11] J. Chen, H. Xiao, Z. Song, and H. Fan, "Simultaneous ISAR imaging of group targets flying in formation," *Chinese J. Aeronaut.*, vol. 27, no. 6, pp. 1554–1561, 2014.
- [12] C. Jian-Wen, J. Ke-Peng, and W. Jun, "ISAR imaging of multiple targets based on FrFT-CLEAN," *2009 International Conference on Microwave Technology and Computational Electromagnetics*, Beijing, pp. 137–140, 2009.
- [13] Y. Li, Y. Fu, X. Li, and L. Le-Wei, "ISAR imaging of multiple targets using particle imaging of multiple targets using particle swarm optimisation-adaptive joint time frequency approach," *IET Signal Process.*, vol. 4, no. 4, pp. 343–351, 2010.
- [14] Y. Li, Y. Jia, Y. Fu, and X. Li, "Multiple moving targets ISAR imaging based on discrete match Fourier transformation," in *2008 International Conference on Radar*, pp. 48–53, 2008.
- [15] F. Totir, E. Radoi, L. Anton, C. Ioana, A. Serbanescu, and S. Stankovic, "Advanced sea clutter models and their usefulness for target detection," *MTA Rev.*, vol. 18, no. 3, pp. 257–272, 2008.
- [16] X. Hua, Y. Cheng, Y. Li, Y. Shi, H. Wang, and Y. Qin, "Target detection in sea clutter via weighted averaging filter on the Riemannian manifold," *Aerosp. Sci. Technol.*, vol. 70, pp. 47–54, 2017.
- [17] A. Jayaprakash, G. R. Reddy, and N. Prasad, "Small target detection within sea clutter based on fractal analysis," *Procedia Technol.*, vol. 24, pp. 988–995, 2016.
- [18] J. Liu, H. Meng, H. Zhang, and X. Wang, "Radar sea clutter suppression and target indication with a spatial tracking filter," *Tsinghua Sci. Technol.*, vol. 15, no. 2, pp. 228–234, 2010.
- [19] X. Shen, Z. Song, Y. Zhu, and Q. Fu, "Fractal detector design and application in maritime target detection," *J. Syst. Eng. Electron.*, vol. 28, no. 1, pp. 27–35, 2017.
- [20] J. Wang and X. Xu, "Simulation of correlated low-grazing-angle sea clutter based on phase retrieval," *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, vol. 53, no. 7, pp. 3917–3930, 2015.
- [21] S. Bocquet, "Simulation of correlated Pareto distributed sea clutter," in *2013 International Conference on Radar*, pp. 258–261, 2013.
- [22] J. Wang and X. Xu, "Simulation of Pareto distributed temporally and spatially correlated low grazing angle sea clutter," in *2014 International Radar Conference*, pp. 1–6, 2014.
- [23] Y. Dong, L. Rosenberg, and G. V. Weinberg, "Generating correlated gamma sequences for sea-clutter simulation," 2012.
- [24] A. M. Raynal and A. W. Doerry, "Doppler characteristics of sea clutter," 2010.
- [25] M. I. Skolnik, *Introduction to radar systems*, 3rd ed. New York: McGraw-Hill Education, 2001.
- [26] K. Ward, R. Tough, and S. Watts, *Sea Clutter* می‌شود نمی‌تواند عبارت فاز خارجی همه اهداف آن گروه را تا حد خوبی خنثی کند و در این صورت امکان دستیابی به یک تصویر با کیفیت برای همه اهداف وجود نخواهد داشت؛ در واقع در این حالت جبران‌سازی حرکتی عمده^۱ برای اهداف آن گروه انجام شده است نه یک جبران‌سازی حرکتی جزئی. بنابراین می‌توان گفت هر چه تعداد گروه‌ها در این روش بیشتر باشد تخمین مولفه‌های حرکت انتقالی برای هر گروه دقیق‌تر خواهد بود و در نتیجه جبران‌سازی حرکت انتقالی به‌صورت جزئی انجام خواهد شد که منجر به تشکیل تصویری با وضوح مناسب می‌شود.
- با توجه به تصاویر به‌دست آمده در دو شبیه‌سازی انجام شده، هر چه نسبت سیگنال به کلتر (SCR) بالاتر باشد، بازسازی تصویر هرگروه با دقت بیشتری انجام خواهد شد و منجر به تشکیل تصاویر ISAR با وضوح بالاتر می‌شود. از آن‌جا که سناریوی مطرح شده در این مقاله (بررسی تشکیل تصویر ISAR در حضور اهداف هوایی چندگانه در کلتر دریا) یک سناریوی جدید بوده، نتایج به‌دست آمده را می‌توان قابل قبول دانست به‌طوری که پیشرفت این الگوریتم و همچنین بهبود عملکرد آن در محیطی با کلتر قوی‌تر، در آینده امیدوارکننده خواهد بود.

۸- مراجع

- [1] G. G. Choi, S. H. Park, H. T. Kim, and K. T. Kim, "ISAR imaging of multiple targets based on particle swarm optimization and hough transform," *J. Electromagn. Waves Appl.*, vol. 23, no. 14–15, pp. 1825–1834, 2009.
- [2] X. Dong, Y. Zhang, X. Gu, and W. Zhai, "ISAR imaging of multiple targets based on sparse representations," in *2015 IEEE International Conference on Microwaves, Communications, Antennas and Electronic Systems (COMCAS)*, pp. 1–4, 2015.
- [3] Shi Jun, Zhang Xiaoling, and Huang Shuwei, "Multi-target ISAR imaging method," in *Proceedings. 2005 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2005. IGARSS '05.*, vol. 7, pp. 4745–4748, 2005.
- [4] S.-H. Park, H.-T. Kim, and K.-T. Kim, "Segmentation of ISAR images of targets moving in formation," *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, vol. 48, no. 4, pp. 2099–2108, 2009.
- [5] J.-H. Jung, K.-T. Kim, S.-H. Kim, and S.-H. Park, "An efficient ISAR imaging method for multiple targets," *Prog. Electromagn. Res.*, vol. 146, pp. 133–142, 2014.
- [6] L. Liu, F. Zhou, M. Tao, and Z. Zhang, "A novel method for multi-targets ISAR imaging based on particle swarm optimization and modified CLEAN technique," *IEEE Sens. J.*, vol. 16, no. 1, pp. 97–108, 2015.
- [7] D. Xiao, F. Su, and J. Wu, "A method of ISAR imaging for multiple targets," in *2012 IEEE 11th International Conference on Signal Processing*, 2012, vol. 3, pp. 2011–2015.
- [8] D. Xiao, F. Su, and J. Wu, "Multi-target ISAR imaging

¹ Coarse motion compensation

- [31] A. Bacci, D. Gray, M. Martorella, and F. Berizzi, "Space-Doppler processing for multichannel ISAR imaging of non-cooperative targets embedded in strong clutter," in *2013 International Conference on Radar*, pp. 43–47, 2013.
- [32] S. Kemkemian, J.-F. Degurse, V. Corretja, and R. Cottron, "Sea clutter modelling for space-time processing," in *2016 17th International Radar Symposium (IRS)*, pp. 1–6, 2016.
- [33] MathWorks, "CoSaMP and OMP for sparse recovery." <https://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/32402-cosamp-and-omp-for-sparse-recovery>.
- [34] D. Needell and J. A. Tropp, "CoSaMP: Iterative signal recovery from incomplete and inaccurate samples," *Appl. Comput. Harmon. Anal.*, vol. 26, no. 3, pp. 301–321, 2009.
- [27] V. C. Chen, *Inverse Synthetic Aperture Radar Imaging; Principles*. Institution of Engineering and Technology, 2014.
- [28] MathWorks, "Particle Swarm Optimization." <https://www.mathworks.com/help/gads/particleswarm.html>.
- [29] E. Weisstein, "Kronecker Product." <http://mathworld.wolfram.com/KroneckerProduct.html>.
- [30] M. Mozaffari and S. Samadi, "Sampling Rate Reduction and System Performance Improvement of FMCW Radar Using Dual Compressed Sensing Technique," *Radar*, vol. 4, pp. 39–53, 2016. (In Persian)

