
Inverse Synthetic Aperture Radar (ISAR) Imaging of Targets with Non-Uniform Motion and Constant Acceleration based on Compressed Sensing

R. Entezari*, A.J. Rashidi

* Malek-e-Ashtar University of Technology (MUT)

(Received: 15/07/2020, Accepted: 11/01/2021)

ABSTRACT

Compressed sensing (CS)-based inverse synthetic aperture radar (ISAR) imaging usually considers the uniform motion of targets. However, in practical scenarios, targets usually have non-uniform motion, which creates a time-varying Doppler frequency shift that causes the ISAR image to be blurred. Also, the basis matrix used in CS-based ISAR imaging is related to the rotational motion parameters which should also be estimated. However, the targets are assumed to have cooperative behavior with respect to the radar; that is the target motion is known a priori and parameter estimation is not considered. In this paper, an improved version of CS-based imaging for non-uniform motion with constant acceleration and non-cooperative targets is proposed and the best sparse representation is extracted. Simulation results show that the proposed algorithm is more efficient than other methods even without rotational motion compensation and provides higher image contrast.

Keywords: Inverse Synthetic Aperture Radar (ISAR), Non-uniform motion, Compressed sensing (CS), Basis Matrix

* Corresponding Author Email: r_entezari@mut.ac.ir

علمی - پژوهشی

استخراج تصویر از اهداف با حرکت غیریکنواخت و شتاب ثابت در رادار دهانه ترکیبی معکوس

مبتنی بر حسگری فشرده

رحیم انتظاری^{۱*}، علی جبار رشیدی^۲

۱- دکتری، مجتمع دانشگاهی برق و کامپیوتر، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، ۲- دانشیار، مجتمع دانشگاهی برق و کامپیوتر، دانشگاه صنعتی مالک اشتر (دریافت: ۱۳۹۹/۰۴/۲۶، پذیرش: ۱۳۹۹/۱۰/۲۲)

چکیده

در تصویربرداری مبتنی بر حسگری فشرده (CS) در رادار دهانه ترکیبی معکوس (ISAR)، معمولاً حرکت یکنواختی برای اهداف در نظر گرفته می‌شود. با این حال معمولاً در سناریوهای عملی، اهداف دارای حرکت غیریکنواخت هستند که این حرکت باعث ایجاد شیفت فرکانس داپلر متغیر با زمان شده و تصویر ISAR دچار ماتی خواهد شد. همچنین از آنجا که ماتریس پایه مورد استفاده در تصویربرداری ISAR مبتنی بر حسگری فشرده به پارامترهای حرکت چرخشی وابسته است، مقادیر این پارامترها نیز باید تخمین زده شود. این در حالی است که معمولاً رفتار اهداف نسبت به رادار به صورت همکارانه در نظر گرفته می‌شود؛ یعنی فرض می‌شود که حرکت اهداف از دید رادار از قبل شناخته شده است و مسئله تخمین پارامترها در نظر گرفته نمی‌شود. در این مقاله، روشی بهبودیافته به منظور استخراج تصویر مبتنی بر حسگری فشرده برای حرکت غیریکنواخت با شتاب ثابت و غیرهمکارانه اهداف پیشنهاد و بهترین نمایش تنک برای ماتریس پایه استخراج شده است. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که الگوریتم پیشنهادی کارایی بهتری نسبت به سایر روش‌ها حتی بدون جبران‌سازی حرکت چرخشی دارد و همچنین کنتراست تصویر بالاتری ارائه می‌کند.

کلیدواژه‌ها: رادار دهانه ترکیبی معکوس (ISAR)، حرکت غیریکنواخت، حسگری فشرده (CS)، ماتریس پایه

۱- مقدمه

داده است که سامانه راداری را در جمع‌آوری و ذخیره‌سازی داده‌ها با مشکل مواجه می‌کند. همچنین افزایش زمان CPI، منجر به ایجاد شیفت فرکانس داپلر متغیر با زمان و تولید حجم زیادی داده بر طبق تئوری نمونه‌برداری شانون-نایکوئیست خواهد شد. به علاوه منجر به پیچیده‌تر شدن فرآیند جبران‌سازی حرکت و پیچیدگی سامانه راداری می‌شود. از طرفی با افزایش زمان CPI، زاویه دید اهداف نسبت به رادار تغییر کرده و مشخصات پراکندگی اهداف به صورت نوسانی تغییر می‌کنند و در نتیجه تصویر استخراج شده دچار ماتی خواهد شد. با توجه به مشکلات جمع‌آوری داده راداری با زمان CPI زیاد و از طرفی دستیابی به دقت تفکیک برد-مقطع مورد نظر، نیاز به روش‌هایی است که در زمان CPI اندک، تصویر با دقت تفکیک مناسبی را استخراج کنند.

به‌طور کلی رویکردهایی که در رادارهای تصویربرداری و به‌خصوص رادار ISAR برای تصویربرداری در زمان CPI کم، ارائه شده است را می‌توان در سه دسته اصلی تقسیم‌بندی کرد: دسته اول مربوط به روش‌های مبتنی بر تخمین طیف است [۴]. دسته دوم مربوط به روش‌های برون‌یابی پهنای باند [۵] و دسته سوم مربوط به

رادارهای تصویربرداری از جمله رادار دهانه ترکیبی معکوس^۱ (ISAR) نقش مهمی در کاربردهای نظامی مانند تشخیص اهداف، طبقه‌بندی اهداف، کنترل ترافیک هوایی، دفاع موشکی و به‌طور کلی پدافند غیرعامل ایفا می‌کنند [۱-۳]. تصویر ISAR دوبعدی نگاشتی از فضای خام سیگنال‌های بازگشتی به صفحه برد و برد-مقطع می‌باشد. دقت تفکیک نیز متناسب با ابعاد تصویر در دو راستای برد و برد-مقطع تعریف می‌شود. دقت تفکیک در راستای برد برابر است با $c/2BW$ که c سرعت انتشار امواج الکترومغناطیسی و BW پهنای باند سیگنال ارسالی است. همچنین دقت تفکیک در راستای برد-مقطع برابر است با $c/2f_c \omega_r T_a$ که f_c فرکانس مرکزی رادار، ω_r سرعت زاویه‌ای و T_a زمان پردازش همدوس^۲ (CPI) رادار است. در نتیجه بهبود دقت تفکیک در راستای برد و برد-مقطع به ترتیب متناسب با افزایش پهنای باند سیگنال ارسالی و افزایش زمان CPI است. با این حال، افزایش پهنای باند معادل تولید حجم زیادی از

* رایانامه نویسنده مسئول: r_entezari@mut.ac.ir

^۱ Inverse Synthetic Aperture Radar (ISAR)^۲ Coherent Processing Interval (CPI)

زمان-فرکانس جایگزین می‌شود. با این حال، این روش‌ها دارای معایبی از جمله بار محاسباتی زیاد، دقت تفکیک کمتر، گلبگرهای کناری زیاد، توانایی کاهش نویز ضعیف و ایجاد عبارت متقاطع می‌باشند. مبتنی بر CS و با در نظر گرفتن حرکت غیریکنواخت هدف، در [۱۷] روشی برای استخراج تصویر ارائه شد. این روش از پایه تبدیل فوریه منطبق استفاده می‌کند. با این حال، این روش با چالش‌هایی مانند بار محاسباتی زیاد و حساسیت بالا به SNR مواجه است. در [۱۸] روشی برای استخراج تصویر از اهداف با حرکت مانوری با نام SL0 ترتیبی (SSL0) پیشنهاد شد که الگوریتم ارائه شده دارای زمان محاسباتی زیاد است و همچنین تنظیم معیار توقف الگوریتم، مشکل است. همچنین در [۱۹ و ۲۰] نیز، نویسندگان روشی برای تصویربرداری از اهداف با حرکت مانوری و به ترتیب در حضور شتاب زاویه‌ای و چرخ زاویه‌ای ارائه کردند. در این مقالات، با استفاده از تجزیه و تحلیل حساسیت نشان داده شده است که در نظر نگرفتن پارامترهای حرکت غیریکنواخت منجر به عدم تطابق در ماتریس پایه خواهد شد. این موضوع باعث کاهش دامنه و جابه‌جایی مکان نقاط پراکنده‌گر خواهد شد و خطای بازسازی نیز افزایش می‌یابد. با این حال، روش‌های ارائه شده دارای بار محاسباتی زیاد به دلیل تخمین ماتریس همبستگی تعریف شده در مقاله هستند.

چالش دوم مربوط به در نظر نگرفتن فرآیند جبران‌سازی حرکت انتقالی هدف و سرعت‌های واقعی اهداف است [۴، ۸]. در واقع در این مقالات، فرض می‌شود که جبران‌سازی حرکت انتقالی هدف به‌طور کامل انجام شده است و فرض می‌شود که خطای فاز باقیمانده ناشی از حرکت انتقالی به‌طور کامل حذف شده است. این در حالی است که فرآیند جبران‌سازی حرکت انتقالی با فرض سرعت بالای اهداف و همچنین حرکت غیریکنواخت، پیچیده‌تر می‌شود و خطای به وجود آمده به‌طور مستقیم روی خطای فاز حرکت چرخشی تأثیرگذار است [۲۱].

چالش سوم، مربوط به در نظر نگرفتن تخمین پارامترهای حرکتی هدف است. در این حالت، فرض می‌شود که ماتریس پایه مورد استفاده در CS ثابت است و از قبل نیز شناخته شده است [۴، ۸ و ۲۲]. با این حال، ماتریس پایه استفاده شده، به پارامترهای حرکت چرخشی وابسته است که با توجه به رفتار غیرهمکارانه اهداف نسبت به رادار و نامعلوم بودن پارامترهای حرکتی هدف، باید تخمینی از این پارامترها در دسترس باشد (در اهداف با رفتار همکارانه، پارامترهای حرکت هدف برای رادار مشخص است). همچنین ثابت فرض کردن ماتریس پایه باعث می‌شود تا فقط بتوان سیگنال‌های ایستار را مدل کرد. این در حالی است که سیگنال

روش‌های حسگری فشرده^۱ (CS) [۶] است. از جمله معایب دو روش اول می‌توان به حساسیت در مقابل تغییرات نویز، خطاهای مدل‌سازی و وابستگی دقت تفکیک به دقت تخمین اشاره کرد. به همین منظور روش‌های تصویربرداری مبتنی بر CS با زمان CPI کم در چند سال اخیر معرفی گردیده است. تئوری CS [۷] بیان می‌کند که یک سیگنال تنک را می‌توان با تعداد محدودی اندازه‌گیری و با احتمال بالا، بازسازی کرد. در رادار ISAR، تصویر دارای خاصیت تنکی است؛ یعنی تعداد نقاط پراکنده‌گر غالب نگاشت شده بر صفحه تصویر، از تعداد کل پیکسل‌های تشکیل‌دهنده تصویر کمتر است.

به منظور بهبود دقت تفکیک برد-متقاطع در زمان CPI کم با استفاده از روش‌های CS، روشی در [۶] ارائه شد. سپس در [۸] نسخه بهبودیافته‌ای از الگوریتم ارائه شده در [۶] به منظور مقابله با نویز و کلاتر قوی با استفاده از تصویرسازی هم‌دوس و بهینه‌سازی وزن‌دهی شده به کار گرفته شد. همچنین در [۹]، به جای ارسال سیگنال‌های پهن باند از سیگنال‌های تنک استفاده شد. این کار منجر به اندازه‌گیری‌های کمتر و دست‌یابی به تصویر با کیفیت بالاتر شد. برای کاهش ماتی تصویر، در [۱۰] از ایده الگوریتم نرم صفر هموار شده^۲ (SL0) بهره گرفته شد. علاوه بر این، در [۱۱] از روش‌های مبتنی بر CS برای رادار آرایه فازی ISAR و به منظور تشکیل تصویر از چندین هدف، بهره گرفته شد. در [۱۲]، از روش‌های آماری برای بازسازی تصویر تنک ISAR استفاده شد. با این حال در تمامی روش‌های ذکر شده برای استخراج تصویر ISAR با استفاده از حسگری فشرده، چالش‌هایی وجود دارد که به برخی از آن‌ها اشاره می‌کنیم.

چالش اول مربوط به در نظر نگرفتن حرکت غیریکنواخت برای حرکت اهداف است. همان‌طور که در [۱۳] اشاره شده است، در کاربردهای واقعی، اهداف دارای حرکات مانوری هستند. برای اهداف با حرکت مانوری مانند موشک‌ها، شیفت فرکانس داپلر نقاط پراکنده‌گر در طی زمان CPI متغیر با زمان خواهد بود. به عبارت دیگر در این اهداف، پارامترهای مرتبه بالای حرکت چرخشی، در طی زمان CPI ثابت نیستند؛ بنابراین، در این حالت، الگوریتم برد-داپلر^۳ (RD) [۱۴] قادر به استخراج تصویر با کیفیت مناسب نیست؛ زیرا الگوریتم RD برای استخراج تصویر از اهداف با حرکت یکنواخت به کار می‌رود. این مشکل، توسط خانواده الگوریتم‌های RID^۴ در [۱۵] و [۱۶] تا حد زیادی مرتفع شد. در این روش‌ها، برای دست‌یابی به تصویر با کیفیت بهتر، تجزیه و تحلیل داپلر با یک تبدیل

^۱ Compressed sensing (CS)

^۲ Smoothed- ℓ_0 (SL0)

^۳ Range-Doppler (RD)

^۴ Range Instantaneous Doppler (RID)

می‌دهیم و سپس تخمین پارامترهای حرکتی هدف برای استفاده در ماتریس پایه انجام می‌شود. در انتهای این بخش، روش استخراج تصویر مبتنی بر حسگری فشرده ارائه می‌شود و در انتها نیز نتیجه‌گیری بیان خواهد شد.

۲- کلیات حسگری فشرده

حسگری فشرده، روشی در پردازش سیگنال برای نمونه‌برداری از سیگنال‌های تنک^۵ و یا سیگنال‌های فشرده‌پذیر با نرخ کمی کمتر از نرخ نایکوئیست است که برای اولین بار در [۷] و [۲۷] ارائه شد. سیگنال k -تنک، سیگنالی است که حداکثر k درایه غیر صفر داشته باشد. فرض کنید $x_{n \times 1}$ سیگنالی باشد که دارای نمایش k -تنک^۶ در حوزه مشخصی مانند $\Psi_{n \times n}$ باشد یعنی $x_{n \times 1} = \Psi_{n \times n} s_{n \times 1}$ که Ψ ماتریس پایه^۷ نامیده می‌شود. با m اندازه‌گیری از سیگنال x که $m \ll n$ است، داریم $y_{m \times 1} = \phi_{m \times n} x_{n \times 1}$ که ϕ ماتریس اندازه‌گیری نامیده می‌شود. همچنین به بردار y ، بردار اندازه‌گیری گفته می‌شود. در نهایت مدل ریاضی CS به صورت $y_{m \times 1} = \phi_{m \times n} \Psi_{n \times n} s_{n \times 1}$ خواهد شد که $\Theta = \phi \Psi$ ، ماتریس حسگری نامیده می‌شود. از آنجاکه تعداد مجهولات از تعداد معلومات در معادله CS بیشتر است، این معادله یک معادله فرومعیین است. این معادله در حالت کلی بی‌شمار جواب دارد؛ ولی در صورت تنک بودن بردار مجهولات s ، تعداد جواب‌ها متناهی خواهند شد. به‌طور کلی دو مسئله در CS مطرح است: مسئله نمونه‌برداری و مسئله بازسازی.

فرآیند نمونه‌برداری، طراحی مناسب ماتریس حسگری است به‌گونه‌ای که بتوان جواب یکتای معادله CS را تضمین کرد. در حقیقت، ماتریس حسگری مناسب منجر به یافتن جواب یکتا در مسئله CS خواهد شد. بهترین شرط برای بررسی مناسب بودن ماتریس طراحی‌شده، خاصیت ایزومتري محدودشده^۸ (RIP) [۲۸] است که بازسازی پایدار سیگنال‌های تنک در حضور نویز را تضمین می‌کند. ولی برای یک ماتریس حسگری، ارضای خاصیت RIP، نیاز به جستجوی ترکیباتی روی همه زیر ماتریس‌ها دارد و بنابراین، بررسی خاصیت RIP برای یک ماتریس حسگری دلخواه، از نوع مسئله NP-سخت^۸ خواهد بود. با این حال، نشان داده شده است که برای ماتریس‌های تصادفی مانند ماتریس گوسی، برنولی و ماتریس فوریه جزئی، خاصیت RIP با احتمال بالا و با تعداد اندازه‌گیری $m = \mathcal{O}(k \log n/k)$ برقرار است [۲۹].

بازگشتی از هدف، معمولاً سیگنالی غیر ایستان است. در [۲۳] روشی برای استخراج تصویر از اهداف با حرکت یکنواخت ارائه شد که در آن ماتریس پایه به‌سرعت چرخش نامعلوم وابسته است. با این حال، روش ارائه‌شده برای تخمین پارامتر سرعت چرخش، زمان محاسباتی زیادی نیاز دارد و توسط جستجو در بین تمامی مقادیر کاندید برای سرعت چرخش با شرط بیشینه شدن کنتراست تصویر انجام می‌شود. برای حل این مشکل، در [۲۴] روشی وقتی برای بازسازی تصویر ISAR با استفاده از الگوریتم OMP اصلاح‌شده، ارائه شد که در هر لحظه سرعت چرخش را تخمین زده و ماتریس پایه را به‌روزرسانی می‌کند. با این حال، روش ارائه‌شده برای اهداف با حرکت یکنواخت مناسب است و اهداف مانوری را در نظر نمی‌گیرد. البته لازم به ذکر است که در مقاله [۲۵] برخی چالش‌های ذکرشده در بالا بیان و راه‌حل‌های متناسب با آن ارائه شده است ولی سناریوی استخراج تصویر ارائه‌شده در [۲۵]، مبتنی بر جمع‌آوری داده از دهانه تنک^۱ است. این در حالی است که در روش پیشنهادی از سناریوی دهانه کامل^۲ (ثابت کامل اطلاعات دهانه ترکیبی) رادار ISAR استفاده شده است.

در این مقاله، با توجه به چالش‌های بیان‌شده در بالا، روش جدیدی برای استخراج تصویر ISAR از اهداف با حرکت غیریکنواخت با شتاب ثابت و مبتنی بر حسگری فشرده ارائه می‌گردد که دقت تفکیک در راستای برد-مقاطع را بهبود می‌بخشد. همچنین از آنجاکه حرکت هدف از دید رادار ناشناخته و غیرهمکارانه است، از تخمین پارامترهای حرکتی هدف برای به‌روزرسانی ماتریس پایه استفاده می‌شود و به‌علاوه فرآیند جبران‌سازی حرکت انتقالی به‌طور کامل و با فرض اهداف با سرعت‌های واقعی انجام می‌شود. همچنین از شکل موج فرکانس پله‌ای^۳ (SF) به خاطر پردازش تک فرکانس در هر زمان و سخت‌افزار ساده‌تر، به‌جای شکل موج مدوله‌شده فرکانس خطی^۴ (LFM) استفاده می‌گردد [۲۶، ۲۲]. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که حتی بدون جبران‌سازی حرکت چرخشی، تصویر به‌دست‌آمده با الگوریتم پیشنهادی با تعداد نمونه‌های کمتر، متمرکزتر است و کنتراست بهتری نسبت به الگوریتم‌های دیگر از خود نشان می‌دهد.

ساختار کلی مقاله نیز به‌صورت زیر است: در بخش دوم، تئوری حسگری فشرده به‌اختصار بیان می‌گردد. در بخش سوم، بلوک دیگرام الگوریتم پیشنهادی ارائه می‌شود. در این بخش، ابتدا مدل سیگنال رادار ISAR مبتنی بر شکل موج فرکانس پله‌ای را شرح

⁵ Sparse

⁶ Basis Matrix

⁷ Restricted Isometry Property (RIP)

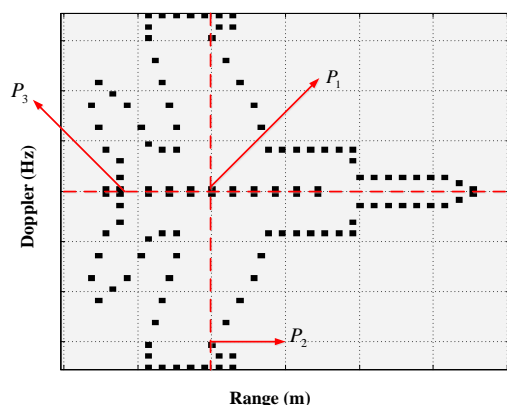
⁸ NP-Hard

¹ Sparse aperture

² Full aperture

³ Stepped-Frequency (SF)

⁴ Linear Frequency Modulated (LFM)



شکل (۲): مدل پراکندگی نقطه‌ای هدف.

فرض می‌کنیم رادار در مبدأ مختصات قرار دارد و هدف از مکان $(U_0, W_0) = (350, 4000)$ با سرعت اولیه $V_0 = 964$ m/s (حداکثر سرعت MIG-25 در ارتفاع بالا) در حال حرکت است. همچنین برای پالس ارسالی رادار از شکل موج SF که از N پالس و M برست تشکیل شده است، استفاده می‌کنیم. این شکل موج‌ها به دلیل پردازش و سخت‌افزار ساده‌تر بسیار مورد استفاده قرار می‌گیرند. پارامترهای رادار و پارامترهای حرکتی هدف به ترتیب در جدول (۱) و جدول (۲) بیان شده است.

جدول (۱): پارامترهای رادار.

مقدار	پارامتر
$f_c = 3$ GHz	فرکانس مرکزی رادار
$BW = N \cdot \Delta f = 640$ MHz	پهنای باند فرکانسی سیگنال ارسالی
$\Delta f = 5$ MHz	پله فرکانسی
$PRF = 35$ KHz	فرکانس تکرار پالس
$M = 128$	تعداد برست
$N = 128$	تعداد پالس در هر برست
$T = \frac{M \times N}{PRF} = 0.46$ sec	زمان پردازش همدوس (CPI)

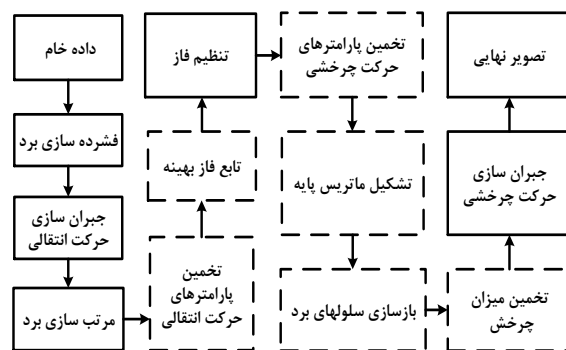
جدول (۲): پارامترهای حرکتی هدف.

مقدار	پارامتر
$(U_0, W_0) = (350, 4000)$	موقعیت اولیه
$R_0 \approx 4000$ m	فاصله اولیه هدف از رادار
$V_0 = 964$ m/s	سرعت اولیه
$A_0 = 110$ m/s ²	شتاب اولیه
$(v_r)_0 \approx 84$ m/s	سرعت انتقالی اولیه
$(a_r)_0 \approx 618$ m/s ²	شتاب انتقالی اولیه
$\omega_r = 0.38$ rad/sec	سرعت زاویه‌ای اولیه
$\alpha_r = 0.011$ rad/s ²	شتاب زاویه‌ای اولیه

فرآیند بازسازی نیز، بازسازی سیگنال تنک $s_{m \times 1}$ با استفاده از اندازه‌گیری‌های $y_{m \times 1}$ و ماتریس حسگری Θ است. الگوریتم‌های متعددی برای بازسازی سیگنال تنک ارائه شده است که می‌توان آن‌ها را در سه دسته کلی تقسیم‌بندی کرد: روش‌های مبتنی بر بهینه‌سازی مانند [۳۰]، روش‌های حریمانه مانند [۳۱] و روش‌های آماری مانند [۳۲] و [۳۳]. در این مقاله، تمرکز بر روی ماتریس‌های تصادفی است و فرآیند بازسازی نیز با استفاده از الگوریتم SLO انجام می‌پذیرد. این الگوریتم دارای دقت و سرعت بالا است و مقاومت خوبی نسبت به نویز دارد.

۳- الگوریتم پیشنهادی

بلوک دیاگرام الگوریتم پیشنهادی در شکل (۱) نشان داده شده است. لازم به ذکر است که استخراج تصویر از اهداف با حرکت غیریکنواخت در رادار ISAR در [۱۳] مورد بررسی قرار گرفته است که در این مقاله از آن با نام «الگوریتم RD بهبودیافته» یاد می‌شود. (بلوک‌های نقطه‌چین، بلوک‌هایی هستند که به الگوریتم RD الگوریتم RD بهبودیافته اضافه شده‌اند). برای اهداف مانوری، حرکت‌های غیریکنواخت انتقالی و چرخشی در طی زمان CPI در نظر گرفته می‌شود [۳۴]. لازم به ذکر است، از آنجاکه برخی بلوک‌های الگوریتم پیشنهادی در [۱۳] توضیح داده شده است، از توضیح مجدد آن‌ها خودداری می‌کنیم و فقط نتایج شبیه‌سازی را بیان می‌کنیم.



شکل (۱): بلوک دیاگرام الگوریتم پیشنهادی.

برای هدف از مدل پراکندگی نقطه‌ای هواپیمای MIG-25 که از ۱۲۰ نقطه پراکنده‌گر با دامنه پراکندگی یکسان تشکیل شده است، استفاده می‌کنیم. این مدل در شکل (۲) نشان داده شده است (نقاط P_1 ، P_2 و P_3 ، نقاطی هستند که برای تخمین پارامترهای حرکتی هدف استفاده می‌شود).

مختصات (U_0, W_0) قرار گرفته است. فاصله لحظه‌ای نقطه پراکنده‌گر $P(x, y)$ از رادار مطابق رابطه (۱) تقریب زده می‌شود [۳۵].

$$r(t) \cong R(t) + x_p \cdot \cos(\phi(t) - \alpha) - y_p \cdot \sin(\phi(t) - \alpha) \quad (1)$$

که در این رابطه، (x_p, y_p) موقعیت نقطه پراکنده‌گر P در مختصات هدف، $R(t)$ فاصله لحظه‌ای مبدأ مختصات هدف از رادار (تابع برد)، $\phi(t)$ زاویه محور x هدف نسبت به محور موازی محور U تابع زاویه چرخش و α زاویه سمت است. با بسط تیلور $R(t)$ و $\phi(t)$ تا مرتبه دوم، داریم [۳۵]:

$$R(t) = R_0 + v_r t + \frac{1}{2} a_r t^2 + \dots \quad (2)$$

و

$$\phi(t) = \phi_0 + \omega_r t + \frac{1}{2} \alpha_r t^2 + \dots \quad (3)$$

که در این رابطه، R_0 فاصله اولیه هدف از رادار، v_r سرعت انتقالی، a_r شتاب انتقالی هدف و هر سه پارامترهای حرکت انتقالی هستند. همچنین ϕ_0 زاویه اولیه هدف نسبت به محور U ، ω_r سرعت زاویه‌ای، α_r شتاب زاویه‌ای هدف و هر سه پارامترهای حرکت چرخشی می‌باشند. بعد از اعمال جبران‌سازی حرکت انتقالی، مرکز هدف دارای حرکت انتقالی نیست یعنی $R(t) = R_0$. از آنجاکه تصویربرداری در CPI کم مدنظر است، فرض می‌کنیم زمان CPI رادار اندک باشد. همچنین بدون از دست رفتن کلیت مسئله و برای ساده شدن، فرض می‌کنیم زاویه سمت برابر صفر باشد. در این حالت داریم:

$$r(t) \cong R_0 + x_p - y_p \cdot \phi(t) \quad (4)$$

معادله شکل موج SF با M برست و N پالس را به صورت معادله (۵) در نظر می‌گیریم.

$$S_r(n, \tau) = \text{rect}\left(\frac{\tau}{T_p}\right) \cdot \exp(j 2\pi f_n \tau) \quad (5)$$

که τ زمان تند^۱، تابع مستطیلی واحد و T_p عرض پالس است. در این حالت سیگنال بازگشتی از نقطه $P(x, y)$ را می‌توان به صورت زیر بیان کرد:

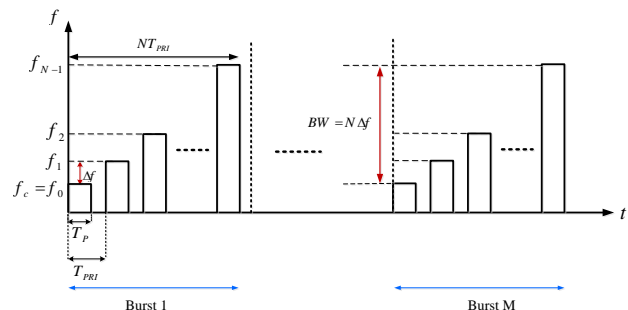
$$S_r(n, \tau, t) \approx A_p \cdot \exp\left(\frac{\tau - 2r(t)}{T_p}\right) \cdot \exp\left(j 2\pi f_n \left(\tau - \frac{2r(t)}{c}\right)\right) \quad (6)$$

که دامنه پراکندگی بازگشتی از نقطه پراکنده‌گر $P(x, y)$ و t زمان کند^۲ است. با فرض سیگنال مرجع دم‌دولاسیون به صورت زیر:

$$S_{ref}(n, \tau) = \exp(j 2\pi f_n \tau) \quad (7)$$

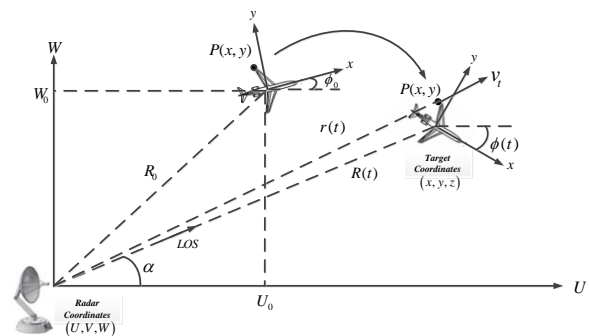
۳-۱- مدل سیگنال ISAR مبتنی بر شکل موج SF

در این بخش ابتدا مروری بر شکل موج فرکانس پله‌ای SF می‌کنیم و سپس مدل سیگنال ISAR را برحسب این شکل موج شرح خواهیم داد. شکل موج SF در صفحه زمان-فرکانس در شکل (۳) نشان داده شده است. این شکل موج، از M برست و N پالس در هر برست تشکیل شده است. در هر برست، دنباله‌ای از N پالس باند باریک وجود دارد که فرکانس حامل آن‌ها از یک پالس به پالس دیگر، دارای افزایشی به اندازه پله فرکانسی Δf است یعنی فرکانسی است. در نتیجه پهنای باند شکل موج SF، برابر $BW = N \Delta f$ خواهد بود. مطابق با شکل (۳)، T_{PRI} فاصله تکرار پالس و T_p عرض پالس است.



شکل (۳): شکل موج SF در صفحه زمان-فرکانس.

برای بیان مدل سیگنال ISAR، ابتدا هندسه حرکتی هدف با توجه به رادار را مطابق شکل (۴) در نظر می‌گیریم.



شکل (۴): هندسه حرکتی هدف با توجه به رادار.

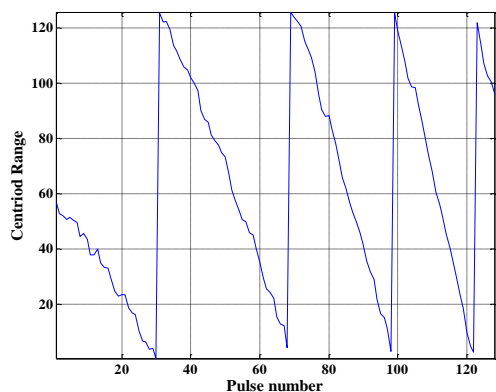
همان‌طور که مشاهده می‌شود، از یک محور مختصات (x, y, z) برای هدف و یک محور مختصات (U, V, W) برای رادار استفاده شده است. با توجه به این‌که در این مقاله تشکیل تصویر دوبعدی مدنظر است، از حرکت در راستای محور z صرف‌نظر می‌کنیم و فرض می‌کنیم که پراکنده‌گر نقطه‌ای $P(x, y)$ دارای مؤلفه‌های حرکت چرخشی و انتقالی است. مرکز فاز و مبدأ مختصات را نیز در وسط هدف در نظر می‌گیریم. همچنین فرض می‌کنیم، هدف در میدان دور رادار در

¹ Fast time

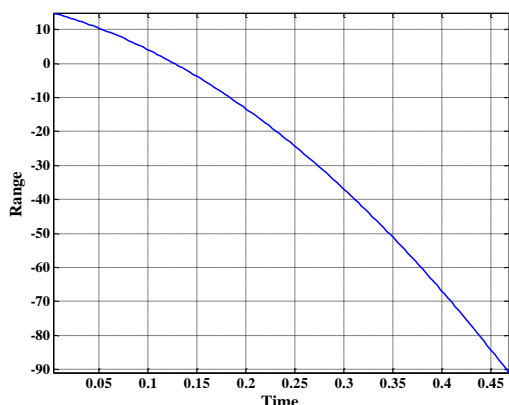
² Slow time

نمایه‌های برد اعمال می‌شود. برای حذف اثر حرکت انتقالی از تصویر، جبران‌سازی حرکت انتقالی انجام می‌شود. فرآیند متداول برای جبران‌سازی حرکت انتقالی شامل دو مرحله مرتب‌سازی برد (جبران‌سازی کلی) و تنظیم فاز (جبران‌سازی جزئی) است. برای انجام مرتب‌سازی برد، می‌توان از روش برد-مرکز [۳۶] استفاده کرد. در این روش، نقاط مرکز نمایه‌های برد محاسبه می‌شوند و مرتب‌سازی نمایه‌های برد بر مبنای نمایه برد مرجع و با استفاده از تابع برد انجام می‌شود. نقاط مرکز نمایه‌های برد و تابع برد تخمین زده شده $R(t)$ به ترتیب در شکل (۵) و شکل (۶) نشان داده شده است. همچنین شکل (۷) نشان‌دهنده نمایه‌های برد قبل و بعد از فرآیند مرتب‌سازی برد است.

از آنجاکه در پردازش‌های ISAR مبتنی بر CS، نیاز به مراکز پراکنده‌گر غالب داریم، برای تخمین پارامترهای حرکت انتقالی باقیمانده و حرکت چرخشی، از روش پردازش نقاط برجسته (PPP) [۳۸] استفاده می‌کنیم. این روش در مقایسه با روش‌های دیگر، عملکرد خوبی در زمان استفاده از نقاط پراکنده‌گر غالب از خود نشان می‌دهد.



شکل (۵): نقاط مرکز نمایه‌های برد.



شکل (۶): تابع برد تخمین زده شده از نقاط مرکز.

سیگنال دریافتی در باند پایه بعد از فرآیند دمدولاسیون مطابق معادله (۸) به دست می‌آید.

$$S_d(n, \tau, t) = S_r(n, \tau, t) S_{ref}^*(n, \tau) = A_p \cdot \text{rect} \left(\frac{\tau - \frac{2r(t)}{c}}{T_p} \right) \cdot \exp \left(j 2\pi f_n \left(\tau - \frac{2r(t)}{c} \right) \right) \cdot \exp(j 2\pi f_n \tau) \quad (8)$$

بعد از اعمال فشردگی برد، سیگنال دریافتی به صورت زیر به دست می‌آید [۲۳]:

$$S_d(n, \tau, t) \approx A_p a \left(\tau - \frac{2r(t)}{c} \right) \cdot \exp \left(-j \frac{4\pi f_n r(t)}{c} \right) \quad (9)$$

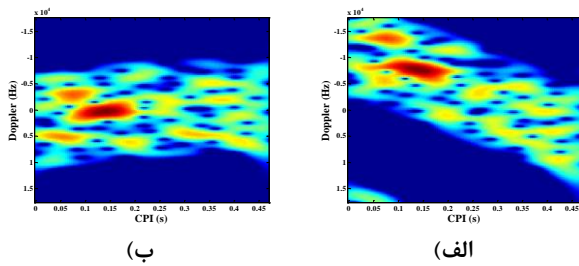
که $a(\cdot)$ نشان‌دهنده پروفایل مختلط سیگنال بعد از فشردگی برد است. فرض می‌کنیم هدف از مدل پراکنندگی نقطه‌ای تبعیت می‌کند و از K نقطه پراکنده‌گر با دامنه پراکنندگی یکسان تشکیل شده است. با اعمال جبران‌سازی حرکت انتقالی توسط روش‌های متداول مانند [۳۶، ۳۷] و با جایگذاری معادلات (۳) و (۴) در (۹) و با صرف نظر کردن از عبارت فازی ثابت، سیگنال دریافتی در هر سلول برد را می‌توان به صورت زیر نوشت:

$$S(t) = \sum_{i=1}^K A_i \cdot \exp \left[-j 2\pi \left(f_i t + \frac{1}{2} \beta_i t^2 \right) \right] \quad (10)$$

که $A_i = -\frac{2y_p \alpha_r}{\lambda}$ و $f_i = -\frac{2y_p \omega_r}{\lambda}$ به ترتیب دامنه، شیفت فرکانس داپلر و نرخ فرکانس داپلر نقطه پراکنده‌گر i ام و λ طول موج است. توجه شود که عبارت آخر در معادله (۱۰) نشان‌دهنده شیفت فرکانس داپلر متغیر با زمان است و همان‌طور که گفته شد، تصویر ISAR به دست آمده در این حالت، در حوزه داپلر دچار ماتی خواهد بود. با اعمال تبدیل فوریه در راستای برد-مقاطع به معادله (۱۰)، تصویر ISAR با الگوریتم RD حاصل می‌شود. ولی همان‌طور که در [۱۳] نشان داده شده است، الگوریتم RD در دو مورد با مشکل مواجه خواهد شد: مورد اول زمانی است که داده‌های اندازه‌گیری شده برای دست‌یابی به دقت تفکیک مناسب، بسیار کم باشد؛ زیرا دقت تفکیک در راستای برد-مقاطع متناسب با زمان CPI است و زمان CPI نیز با تعداد پالس و پرست متناسب است. مورد دوم زمانی است که اهداف دارای حرکت غیریکنواخت باشند؛ زیرا در این حالت تصویر ISAR دچار ماتی خواهد شد؛ بنابراین، الگوریتم RD فقط برای حرکت یکنواخت اهداف و با فرض در دسترس بودن داده‌های به اندازه کافی، مناسب است.

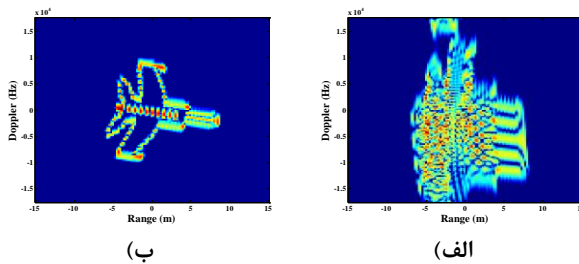
با نمونه‌برداری از سیگنال دریافتی در باند پایه و تشکیل داده خام در راستای زمان تند و زمان کند، فشردگی برد برای یافتن

¹ Prominent Point Processing (PPP)



شکل (۸): طیف داپلر یک سلول برد خاص بعد از الف) مرتب‌سازی برد، ب) تنظیم فاز.

شکل (۸-الف) نشان می‌دهد که حرکت غیریکنواخت باعث ایجاد شیفت فرکانس داپلر متغیر با زمان خواهد شد. همان‌طور که در شکل (۸-ب) نیز مشاهده می‌شود، با اعمال تنظیم فاز، از تغییرپذیری با زمان طیف داپلر کاسته شده است. همچنین شکل (۹) نشان‌دهنده تصویر استخراج‌شده ISAR بعد از مرتب‌سازی برد و تنظیم فاز است.



شکل (۹): تصویر ISAR استخراج‌شده بعد از الف) مرتب‌سازی برد، ب) تنظیم فاز.

همان‌طور که در شکل (۹-ب) نشان داده شده است، تصویر به‌دست‌آمده بعد از تنظیم فاز هنوز در حوزه داپلر دچار ماتی است و جبران‌سازی حرکت چرخشی مورد نیاز است. در حقیقت، همان‌طور که در چالش دوم بیان شد، خطای فاز باقیمانده ناشی از حرکت انتقالی به‌طور کامل حذف نشده است.

۳-۳- تخمین پارامترهای حرکت چرخشی

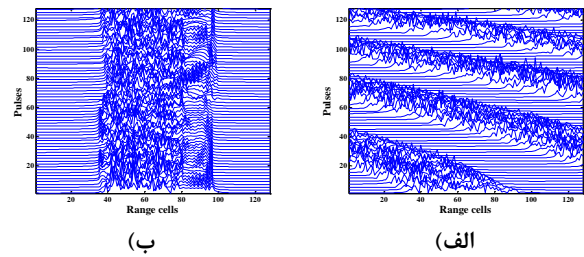
با فرض $\alpha = 0$ ؛ فاصله لحظه‌ای نقطه پراکنده‌گر $P(x, y)$ از رادار برابر است با:

$$r(t) \cong R_0 + x_p \cdot \cos\phi(t) - y_p \sin\phi(t) \quad (13)$$

با نمایش هدف در مختصات قطبی (r_p, ϕ_p) و در صورتی که R_0 خیلی بزرگ‌تر از ابعاد هدف باشد، فاصله لحظه‌ای نقطه پراکنده‌گر P برابر است با [۳۹]:

$$r(t) \cong R_0 + r_p \cdot \cos(\hat{\phi}_p) \quad (14)$$

که $\hat{\phi}_p$ میانگین زاویه چرخش نقطه پراکنده‌گر P در طی زمان CPI و $r_p = \sqrt{x_p^2 + y_p^2}$ و $\phi_p = \tan^{-1}(y_p/x_p)$ که $\hat{\phi}_p = \phi(t) + \phi_p$ است. در نهایت با صرف‌نظر کردن از پارامترهای مرتبه سوم و بالاتر



شکل (۷): نمایه‌های برد الف) قبل از مرتب‌سازی برد، ب) بعد از مرتب‌سازی برد.

۳-۲- تخمین پارامترهای حرکت انتقالی باقیمانده

همان‌طور که بیان شد، سیگنال دریافتی در باند پایه از نقطه پراکنده‌گر $P(x, y)$ را می‌توان به‌صورت زیر بیان کرد:

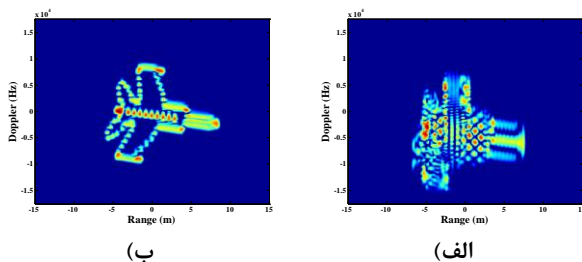
$$S(n, t) \approx A_p \cdot \exp\left(-j \frac{4\pi f_n r(t)}{c}\right) \quad (11)$$

با جایگذاری معادله (۱) برای $\alpha = 0$ ، سیگنال دریافتی در باند پایه از K نقطه پراکنده‌گر مطابق زیر به‌دست می‌آید:

$$S(n, t) \approx A_p \cdot \exp\left(-j \frac{4\pi f_n R(t)}{c}\right) \cdot \sum_{i=1}^K A_i \cdot \exp\left(-j \frac{4\pi f_n}{c} \cdot (x_i \cos\phi(t) - y_i \sin\phi(t))\right) \quad (12)$$

بعد از اعمال مرتب‌سازی برد، تصویر ISAR هنوز دارای ماتی است؛ زیرا شیفت فرکانس داپلر نقاط پراکنده‌گر به خاطر حرکت غیریکنواخت، متغیر با زمان است. در حقیقت تأثیر حرکت انتقالی هنوز به‌طور کامل حذف نشده است و جبران‌سازی جزئی به‌منظور حذف خطای فاز باقیمانده باید انجام پذیرد. برای تخمین پارامترهای حرکت انتقالی باقیمانده، از جستجوی فراگیر استفاده می‌کنیم. لازم به ذکر است که بعد از جبران‌سازی حرکت انتقالی، عبارت ثابت R_0 برابر صفر خواهد شد و مقادیر v_t و a_t بسیار کم هستند و بقیه ضرایب مرتبه بالا به خاطر زمان CPI کم، قابل چشم‌پوشی می‌باشند. در این حالت جستجوی فراگیر بار محاسباتی زیادی وارد نمی‌کند. برای این منظور، نقطه پراکنده‌گر P_1 را برای تخمین تابع برد $R(t)$ در نظر می‌گیریم. از آنجایی که تابع برد، فاصله بین رادار و مرکز چرخش است، این نقطه را در مرکز چرخش هدف انتخاب می‌کنیم. با تخمین تابع برد در سلول بردی که مرکز چرخش در آن قرار می‌گیرد، تنظیم فاز با ضرب معادله (۱۲) در تابع فاز بهینه $\exp[j4\pi f_n R(t)/c]$ و حذف خطای فازی ناشی از آن انجام می‌شود. در این حالت، شیفت فرکانس داپلر نقاط پراکنده‌گر در طی زمان CPI ثابت می‌شود و تصویر ISAR حول مرکز چرخش هدف، ثابت می‌ماند. در شکل (۸)، طیف داپلر یک سلول برد خاص، در طی زمان CPI بعد از مرتب‌سازی برد و تنظیم فاز نشان داده شده است.

بعد از تخمین سرعت زاویه‌ای با رابطه (۱۷) و شتاب زاویه‌ای با رابطه (۱۹) می‌توان تابع زاویه چرخش یا میزان چرخش هدف را با توجه به رابطه (۳) محاسبه کرد. از آنجا که پارامترهای حرکت چرخشی نیز تخمین زده شدند، اکنون می‌توان الگوریتم شکل‌دهی قطبی^۱ (PFA) [۳۹] را اعمال کرد. شکل (۱۰) نشان‌دهنده تصویر ISAR استخراج‌شده از اهداف با حرکت غیریکنواخت با الگوریتم RD و الگوریتم RD بهبودیافته است.



شکل (۱۰): تصویر ISAR استخراج‌شده با حرکت غیریکنواخت با الگوریتم RD، (ب) الگوریتم RD بهبودیافته.

جدول (۳) نشان‌دهنده مقادیر تخمین زده‌شده پارامترهای حرکت چرخشی است.

جدول (۳): تخمین پارامترهای حرکت چرخشی.

مقدار	پارامتر
0.27 rad/s	سرعت زاویه‌ای
0.013 rad/s ²	شتاب زاویه‌ای

۴-۳- استخراج تصویر ISAR مبتنی بر حسگری فشرده

همان‌طور که گفته شد، برای استخراج تصویر با الگوریتم RD، زمان CPI باید به اندازه کافی بزرگ باشد تا دقت تفکیک برد-مقاطع مناسب را فراهم کند؛ بنابراین، در زمان CPI اندک، الگوریتم RD قادر به استخراج تصویر بدون ماتی نیست. همچنین زمانی که تعداد نمونه‌ها از حد معینی کمتر باشند، الگوریتم RD بهبودیافته نیز در استخراج تصویر دچار کاهش دقت تفکیک برد-مقاطع خواهد شد. در نتیجه برای استخراج تصویر در زمان CPI کم و با تعداد محدودی نمونه، به سراغ حسگری فشرده می‌رویم. فرض می‌کنیم ابعاد ماتریس تصویر $M \times N$ باشد که M تعداد سلول‌های داپلر و N تعداد سلول‌های برد است. سپس فرض می‌کنیم، رادار تعداد $L < M$ برست به سمت هدف ارسال می‌کند. سیگنال دریافتی در هر سلول برد با فرض اضافه شدن نویز جمع‌شونده $n(t)$ ، به صورت رابطه (۲۰) قابل بیان است:

$$S(t) = \sum_{i=1}^K A_i \cdot \exp \left[-j 2\pi \left(f_{i,t} + \frac{1}{2} \beta_i t^2 \right) \right] + n(t) \quad (20)$$

در $\phi(t)$ می‌توان معادلات برد، سرعت (شیفت فرکانسی داپلر) و شتاب نقطه پراکنده‌گر P نسبت به مرکز چرخش را به صورت روابط (۱۵) بیان کرد [۳۹]:

$$\begin{aligned} r_{0,P}(t) &= r_p \cdot \cos(\hat{\phi}_p) \\ r'_{0,P}(t) &\cong -r_p \omega_r \cdot \sin(\hat{\phi}_p) \\ r''_{0,P}(t) &\cong -r_p \omega_r^2 \cdot \cos(\hat{\phi}_p) - r_p \alpha_r \cdot \sin(\hat{\phi}_p) \end{aligned} \quad (15)$$

حال می‌توان پارامترهای حرکت چرخشی (α_r, ω_r) را تخمین زد. برای این کار، چند نقطه برجسته (بسته به تعیین مرتبه بسط تیلور)، انتخاب می‌شود. برای تخمین سرعت زاویه‌ای، ابتدا یک نقطه پراکنده‌گر P_2 به صورتی انتخاب می‌کنیم که شیفت فرکانس داپلر آن مانند مرکز چرخش هدف ولی در یک سلول برد متفاوت از مرکز چرخش قرار می‌گیرد (شکل (۲)). از آنجا که اثر سرعت انتقالی را حذف کردیم، در نتیجه هدف فقط حول محور دارای چرخش است و حرکت انتقالی ندارد؛ در نتیجه شیفت فرکانسی داپلر مرکز چرخش صفر است و شیفت فرکانس داپلر نقطه P_2 نیز صفر است پس $r'_{0,P_2}(t) = 0$ و میانگین زاویه چرخش نقطه P_2 در طی زمان CPI رادار نیز برابر صفر است $(\hat{\phi}_{p_2} = 0)$. بنابراین معادلات برد و شتاب متناظر با نقطه P_2 نیز برابر است با [۳۹]:

$$\begin{aligned} r_{0,P_2} &= r_{p_2} \cos \hat{\phi}_{p_2} = r_{p_2} \\ r''_{0,P_2} &= -r_{p_2} \omega_r^2 \end{aligned} \quad (16)$$

حال می‌توان سرعت زاویه‌ای را به صورت رابطه (۱۷) تخمین زد.

$$\omega_r = \sqrt{\frac{r''_{0,P_2}}{r_{0,P_2}}} \quad (17)$$

برای تخمین شتاب زاویه‌ای، باید یک نقطه پراکنده‌گر P_3 به صورتی انتخاب کرد که در یک سلول برد مشابه با مرکز چرخش هدف قرار گیرد ولی شیفت فرکانس داپلر متفاوت با مرکز چرخش داشته باشد (شکل (۲)). با توجه به اینکه برای نقطه P_3 ، $r_{0,P_3} = 0$ است در نتیجه میانگین زاویه چرخش نقطه P_3 در طی زمان CPI رادار نیز برابر $\hat{\phi}_{p_3} = \pm \frac{\pi}{2}$ می‌باشد. پس معادلات سرعت و شتاب نقطه برجسته P_3 به صورت روابط (۱۸) می‌باشد [۳۹].

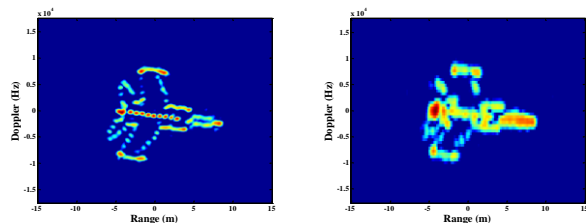
$$\begin{aligned} r'_{0,P_3} &= r_{P_3} \omega_r \\ r''_{0,P_3} &= r_{P_3} \alpha_r \end{aligned} \quad (18)$$

در نتیجه شتاب زاویه‌ای را می‌توان به صورت رابطه (۱۹) تخمین زد.

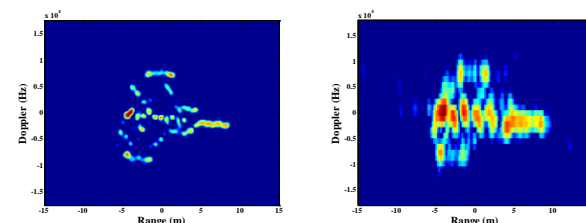
$$\alpha_r = \omega_r \left(\frac{r''_{0,P_3}}{r'_{0,P_3}} \right) \quad (19)$$

¹ Polar Formatting Algorithm (PFA)

(۲۴) یک مسئله NP-کامل^۱ است. الگوریتم‌های مختلفی برای حل این مسئله ارائه شده است ولی در این مقاله از الگوریتم SL0 برای بازسازی سیگنال تنک استفاده می‌شود که مبتنی بر تقریب نرم صفر با دنباله پیوسته‌ای از توابع است. این الگوریتم دارای دقت و سرعت بالایی در بازسازی سیگنال تنک است. در نهایت با اعمال الگوریتم SL0 به $M \times N$ سلول برد، تصویر ISAR با ابعاد $M \times N$ استخراج می‌گردد. همچنین نویز گوسی سفید جمع شونده، با نسبت سیگنال به نویز $SNR = 4 \text{ dB}$ به داده‌های اندازه‌گیری شده اعمال می‌شود. نتایج شبیه‌سازی در دو قسمت ارائه می‌شود. در قسمت اول، تصاویر ISAR استخراج شده به وسیله الگوریتم RD بهبود یافته و الگوریتم پیشنهادی و با تعداد برست‌های متفاوت (۳۲ و ۱۶ برست) و تعداد ۱۲۸ پالس، به ترتیب در شکل (۱۱) و شکل (۱۲) نشان داده شده است. همان‌طور که در قسمت الف) شکل (۱۱) و قسمت الف) شکل (۱۲) مشاهده می‌شود، کاهش تعداد پالس‌های ارسالی رادار، باعث عدم تفکیک مکانی نقاط پراکنده‌گر در تصویر شده است. باین‌حال، استفاده از حسگری فشرده منجر به بازسازی بهتر سیگنال تنک ISAR با توجه به تعداد اندک نمونه‌ها، شده است. البته در مورد تصاویر استخراج شده با الگوریتم‌های RD و الگوریتم‌های RD بهبود یافته این انتظار را داشتیم؛ زیرا دقت تفکیک برد-مقاطع متناسب با تعداد پالس‌های ارسالی رادار است.



شکل (۱۱): تصویر ISAR استخراج شده با تعداد ۳۲ برست، ۱۲۸ پالس و $SNR = 4 \text{ dB}$ با الف) الگوریتم RD بهبود یافته ب) الگوریتم پیشنهادی.



شکل (۱۲): تصویر ISAR استخراج شده با تعداد ۱۶ برست، ۱۲۸ پالس و $SNR = 4 \text{ dB}$ با الف) الگوریتم RD بهبود یافته، ب) الگوریتم پیشنهادی.

در قسمت دوم، تصاویر ISAR استخراج شده به وسیله الگوریتم RD بهبود یافته و الگوریتم پیشنهادی و بدون در نظر گرفتن

سری زمانی را به صورت $t = [1:L]^T \Delta t$ در نظر می‌گیریم که $L = T_a / \Delta t$ تعداد برست، Δt دقت تفکیک زمان کند و T_a زمان CPI رادار است. همچنین محور داپلر را نیز به صورت $f = [1:M]^T \Delta f$ در نظر می‌گیریم که $M = f_b / \Delta f$ تعداد سلول داپلر، Δf دقت تفکیک فرکانس داپلر و f_b فرکانس تکرار برست است. توجه شود که مقادیر f_i و β_i از مقادیر تخمین زده شده در بخش‌های قبل جایگزین می‌شوند. از L برست بازگشتی در باند پایه، تعداد N نمونه و با فرکانس نایکوئیست استخراج می‌شود. در نهایت فرم گسسته سازی شده سیگنال دریافتی در هر سلول برد به صورت زیر قابل بیان است:

$$S = \Psi x + n \quad (21)$$

که S داده اندازه‌گیری شده با ابعاد $L \times 1$ ، بردار شامل دامنه‌های K نقطه پراکنده‌گر با ابعاد $M \times 1$ و ماتریس پایه با ابعاد $L \times M$ و با عناصر زیر است:

$$\Psi = [\psi_1, \dots, \psi_M] \quad (22)$$

که هر کدام از ستون‌های Ψ به صورت زیر است:

$$\psi_q = \exp \left[-j 2\pi f(q)t - \frac{1}{2} \beta(q)t^2 \right]; \quad 1 \leq q \leq M \quad (23)$$

همان‌طور که مشاهده می‌شود، ماتریس پایه به پارامترهای حرکت چرخشی وابسته است. در این مقاله، با توجه به این که زمان CPI مدنظر است، فقط سرعت زاویه‌ای و شتاب زاویه‌ای را در نظر می‌گیریم و از پارامترهای مرتبه بالاتر مانند چرخ صرف‌نظر می‌کنیم. در برخی از روش‌هایی که ذکر شد، سرعت زاویه‌ای ثابت است و از شتاب زاویه‌ای و پارامترهای مرتبه بالاتر صرف‌نظر شده است؛ یعنی $\beta = 0$ است. این در حالی است که کیفیت تصویر استخراج شده برای اهداف با حرکت غیریکنواخت، بستگی به شتاب زاویه‌ای و توصیف دقیق ماتریس پایه دارد. علاوه بر این، در [۱۹] نشان داده شده است که بازسازی سیگنال به توصیف دقیق ماتریس پایه بستگی دارد.

معادله (۲۱) یک معادله فرومعین است و ماتریس پایه Ψ ، ماتریس مبتنی بر چیرپ است که در [۴۰] نشان داده شده است که این ماتریس نسبت به ماتریس‌های تصادفی رفتار بهتری در مقابل نویز از خود نشان می‌دهد و برای بازسازی سیگنال تنک، مناسب است؛ بنابراین، می‌توان بردار تنک x را توسط بردار اندازه‌گیری S و ماتریس پایه Ψ با حل مسئله بهینه‌سازی زیر بازسازی کرد:

$$\min \|x\|_0, \quad \text{s.t.} \quad \|S - \Psi x\|_2 \leq \epsilon \quad (24)$$

که ϵ کران بالای سطح نویز و $\| \cdot \|_0$ نرم صفر بردار است. از آنجاکه مسئله نرم صفر، محدب و مشتق‌پذیر نیست، یافتن جواب مسئله بهینه‌سازی

^۱ NP-complete

جدول (۴): ارزیابی عملکرد تصویر ISAR استخراج شده.

۸		۴		SNR (dB)
۳۲		۳۲		تعداد برست
RD بهبودیافته	پیشنهادی	RD بهبودیافته	پیشنهادی	الگوریتم
۴/۱۴	۵/۸۴	۳/۹۹	۵/۷۵	IC
۸		۴		SNR (dB)
۱۶		۱۶		تعداد برست
RD بهبودیافته	پیشنهادی	RD بهبودیافته	پیشنهادی	الگوریتم
۳/۳۱	۷/۰۱	۳/۱۵	۶/۴۳	IC

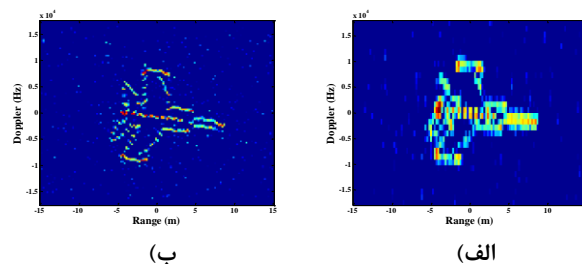
۴- نتیجه گیری

در این مقاله، بر اساس داده‌های اندک به دست آمده در زمان CPI کم و به منظور دستیابی به دقت تفکیک برد-مقاطع مناسب، استخراج تصویر از اهداف مبتنی بر حسگری فشرده معرفی شد. همچنین با توجه به مشخصات حرکتی هدف در سناریوهای عملی، حرکت غیریکنواخت با شتاب ثابت برای اهداف در نظر گرفته شد. از طرفی، با توجه به حرکت غیرهمکارانه هدف از دید رادار و وابسته بودن ماتریس پایه استخراج شده به پارامترهای حرکت چرخشی، تخمینی از پارامترهای حرکتی هدف انجام شد تا بهترین نمایش تنک برای استخراج تصویر ISAR حاصل گردد. یافتن بهترین نمایش تنک، منجر به مدل کردن مناسب رفتار غیر ایستار سیگنال بازگشتی در ISAR، عدم جابه‌جایی مکانی نقاط پراکنده‌گر و بازسازی بهتر صحنه هدف خواهد شد. همچنین برای در نظر گرفتن خطای فاز انتقال داده شده به جبران‌سازی حرکت چرخشی، فرآیند کامل جبران‌سازی حرکت انجام گرفت. نتایج شبیه‌سازی و عددی نشان‌دهنده برتری الگوریتم پیشنهادی در استخراج تصویر ISAR بر دیگر روش‌ها با تعداد اندکی از داده‌های اندازه‌گیری شده است.

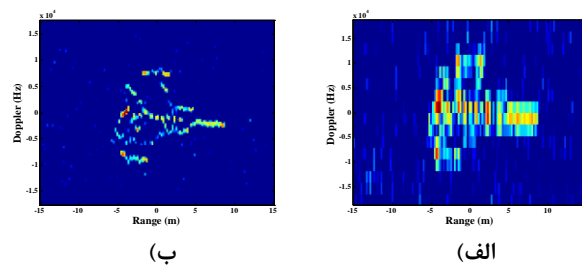
۵- مراجع

- [1] M. Martorella, E. Giusti, L. Demi, Z. Zhou, A. Cacciamano, F. Berizzi, and B. Bates, "Target recognition by means of polarimetric ISAR images," IEEE TAES, vol. 47, no. 1, pp. 225-239, Jan. 2011.
- [2] D. Pastina and C. Spina, "Multi-feature based automatic recognition of ship targets in ISAR," IET radar, sonar & nav, vol. 3, no. 4, pp. 406-423, Aug. 2009.
- [3] S. Askari and M. Kazerooni, "Time Frequency Analysis of two Dimensional Shift Frequency Jamming in Image of Synthetic Aperture Radar with Diving Platform Using Passive Defense," Journal of Electrical & Cyber Defence, vol. 4, no. 3, pp. 61-70, 2016. (In Persian)
- [4] Z.-S. Liu, R. Wu, and J. Li, "Complex ISAR imaging of maneuvering targets via the capon estimator," IEEE Trans on Signal Processing, vol. 47, no. 5, pp. 1262-1271, May. 1999.
- [5] K. Suwa and M. Iwamoto, "A two-dimensional bandwidth extrapolation technique for polarimetric synthetic aperture radar images," IEEE TGRS, vol. 45, pp. 45-54, 2007.

جبران‌سازی حرکت چرخشی و با تعداد برست‌های متفاوت (۳۲ و ۱۶ برست) و تعداد ۱۲۸ پالس، به ترتیب در شکل (۱۳) و شکل (۱۴) نشان داده شده است. نتایج شبیه‌سازی‌ها نشان می‌دهد که الگوریتم پیشنهادی، بهبود قابل توجهی در تصویر استخراج شده در مقایسه با الگوریتم RD بهبودیافته، حتی بدون اعمال جبران‌سازی حرکت چرخشی دارد.



شکل (۱۳): تصویر ISAR استخراج شده بدون جبران‌سازی حرکت چرخشی با تعداد ۳۲ برست، ۱۲۸ پالس و $SNR = 4 \text{ dB}$ با الف) الگوریتم RD بهبودیافته، ب) الگوریتم پیشنهادی.



شکل (۱۴): تصویر ISAR استخراج شده بدون جبران‌سازی حرکت چرخشی با تعداد ۱۶ برست، ۱۲۸ پالس و $SNR = 4 \text{ dB}$ با الف) الگوریتم RD بهبودیافته، ب) الگوریتم پیشنهادی.

یکی از معیارهای ارزیابی کیفیت تصویر استخراج شده توسط الگوریتم‌های مختلف، معیار کنتراست تصویر^۱ (IC) است. این معیار برای ارزیابی کیفیت تصویر بازسازی شده به کار می‌رود و به صورت زیر تعریف می‌شود [۴۱]:

$$IC = \frac{\sqrt{E \left[\left[|I|^2 - E(|I|^2) \right]^2 \right]}}{E(|I|^2)} \quad (25)$$

که I نشان‌دهنده تصویر ISAR است. برای یک تصویر ISAR، مقادیر بالای IC نشان‌دهنده متمرکز بودن تصویر ISAR می‌باشد. نتایج عددی با تعداد برست‌های مختلف و به ازای SNR های 4 dB و 8 dB در جدول (۴) نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، تصاویر استخراج شده توسط الگوریتم پیشنهادی دارای کنتراست بالاتری نسبت به الگوریتم RD بهبودیافته است.

¹ Image Contrast (IC)

- [23] G. Li, H. Zhang, X. Wang, and X. G. Xia, "ISAR 2-D imaging of uniformly rotating targets via matching pursuit," *IEEE TAES*, vol. 48, no. 2, pp. 1838–1846, Apr. 2012.
- [24] W. Rao, G. Li, X. Wang, and X. G. Xia, "Adaptive sparse recovery by parametric weighted l_1 minimization for ISAR imaging of uniformly rotating targets," *IEEE JSTARS*, vol. 6, no. 2, pp. 942–952, Apr. 2013.
- [25] M.S. Kang and K.T. Kim, "ISAR imaging and cross-range scaling of high-speed maneuvering target with complex motion via compressive sensing," *IET radar, sonar & nav*, 2017.
- [26] S. R. Axelsson, "Analysis of random step frequency radar and comparison with experiments," *IEEE TGRS*, vol. 45, no. 4, pp. 890–904, Apr. 2007.
- [27] E. J. Candès, "Compressive sampling," in *Proceedings of the ICM*, pp. 1433–1452, 2006.
- [28] E. J. Candès and T. Tao, "Decoding by linear programming," *IEEE Trans on Information Theory*, vol. 51, no. 12, pp. 4203–4215, Dec. 2005.
- [29] E. J. Candès and T. Tao, "Near-optimal signal recovery from random projections: universal encoding strategies?," *IEEE trans on information theory*, vol. 52, no. 12, pp. 5406–5425, Dec. 2006.
- [30] G. H. Mohimani, M. Babaie-Zadeh, and C. Jutten, "Complex-valued sparse representation based on smoothed l_0 norm," presented at the *IEEE ICASSP*, Las Vegas, NV, USA, pp. 3881–3884, 2008.
- [31] Y. C. Pati, R. Rezaifar, and P. S. Krishnaprasad, "Orthogonal matching pursuit: Recursive function approximation with applications to wavelet decomposition," in *Proceedings of 27th Asilomar conference on signals, systems and computers*, pp. 40–44, 1993.
- [32] A. Rashidi, I. Faramarzi, and R. Entezari, "A Variational Bayesian approach to Block-Sparse Reconstruction based on Intra-Cluster Relevance," in *Conference on Knowledge Based Engineering and Innovation (KBEI)*, pp. 692–696, 2019.
- [33] R. Entezari and A. Rashidi, "Continuity pattern-based sparse Bayesian learning for inverse synthetic aperture radar imaging," *J. Appl. Remote Sens.*, vol. 12, p. 036010, 2018.
- [34] V. C. Chen and W. Miceli, "Time-varying spectral analysis for radar imaging of maneuvering targets," *IEE Proceedings Radar, Sonar & Nav*, vol. 145, no. 5, pp. 262–268, 1998.
- [35] C. Ozdemir, "Inverse Synthetic Aperture Radar Imaging with MATLAB Algorithms," *John Wiley & Sons*, vol. 210, 2012.
- [36] T. Itoh, H. Sueda, and Y. Watanabe, "Motion compensation for ISAR via centroid tracking," *IEEE TAES*, vol. 32, no. 3, pp. 1191–1197, July 1996.
- [37] T. Thayaparan, L. Stankovic, C. Wernik, and M. Dakovic, "Real-time motion compensation, image formation and image enhancement of moving targets in ISAR and SAR using s-method-based approach," *IET Signal Processing*, vol. 2, no. 3, pp. 247–264, Sept. 2008.
- [38] S. Werness, W. Carrara, L. Joyce and D. Franczak, "Moving target imaging algorithm for SAR data," *IEEE TAES*, vol. 26, pp. 57–67, 1990.
- [39] R. Lipps and D. Kerr, "Polar reformatting for ISAR imaging," in *IEEE Radar Conference*, pp. 275–280, 1998.
- [40] L. Applebaum, et al., "Chirp sensing codes: deterministic compressed sensing measurements for fast recovery," *Applied and Computational Harmonic Analysis*, vol. 26, no. 2, pp. 283 – 290, Mar. 2009.
- [6] L. Zhang, M. Xing, C.W. Qiu, J. Li, and Z. Bao, "Achieving higher resolution ISAR imaging with limited pulses via compressed sampling," *IEEE GRSL*, vol. 6, no. 3, pp. 567–571, July. 2009.
- [7] D. L. Donoho, "Compressed sensing," *IEEE Trans on information theory*, vol. 52, no. 4, pp. 1289–1306, Apr. 2006.
- [8] L. Zhang, M. Xing, C. W. Qiu, J. Li, J. Sheng, Y. Li, and Z. Bao, "Resolution enhancement for inverted synthetic aperture radar imaging under low SNR via improved compressive sensing," *IEEE TGRS*, vol. 48, no. 10, pp. 3824–3838, Oct. 2010.
- [9] H. Wang, Y. Quan, M. Xing, and S. Zhang, "ISAR imaging via sparse probing frequencies," *IEEE GRSL*, vol. 8, no. 3, pp. 451–455, May. 2011.
- [10] J. Lv, L. Huang, Y. Shi, and X. Fu, "Inverse synthetic aperture radar imaging via modified smoothed l_0 norm," *IEEE AWPL*, vol. 13, pp. 1235–1238, June. 2014.
- [11] G. Li, Q. Hou, S. Xu, and Z. Chen, "Multi-target simultaneous ISAR imaging based on compressed sensing," *EURASIP J. Adv. Signal Processing*, vol. 2016, no. 1, pp. 1–11, Feb. 2016.
- [12] L. Zhang, H. Wang, and Z.-j. Qiao, "Resolution enhancement for ISAR imaging via improved statistical compressive sensing," *EURASIP J. Adv. Signal Processing*, vol. 2016, no. 1, p. 80, July. 2016.
- [13] R. Entezari and A. J. Rashidi, "Inverse Synthetic Aperture Radar (ISAR) Imaging of Targets with Non-Uniform Motion," *Tabriz Journal of Electrical Engineering (TJEE)*, vol. 47, pp. 391–400, 2017. (In Persian)
- [14] J. L. Walker, "Range-Doppler imaging of rotating objects," *IEEE TAES*, pp. 23–52, 1980.
- [15] Y. Wang, "Inverse synthetic aperture radar imaging of maneuvering target based on range-instantaneous-Doppler and range-instantaneous chirp-rate algorithms," *IET radar, sonar & nav*, vol. 6, no. 9, pp. 921–928, Dec. 2012.
- [16] J. Zheng, T. Su, W. Zhu, L. Zhang, Z. Liu, and Q. H. Liu, "ISAR imaging of non-uniformly rotating target based on a fast parameter estimation algorithm of cubic phase signal," *IEEE TGRS*, vol. 53, no. 9, pp. 4727–4740, Sept. 2015.
- [17] J. Liu, X. Li, S. Xu, and Z. Zhuang, "ISAR imaging of non-uniform rotation targets with limited pulses via compressed sensing," *PIER B*, vol. 41, pp. 285–305, June 2012.
- [18] Z. Liu, P. You, X. Wei, and X. Li, "Dynamic ISAR imaging of maneuvering targets based on sequential SL_0 ," *IEEE GRSL*, vol. 10, no. 5, pp. 1041–1045, Sept. 2013.
- [19] A. S. Khwaja and X.-P. Zhang, "Compressed sensing ISAR reconstruction in the presence of rotational acceleration," *IEEE JSTARS*, vol. 7, no. 7, pp. 2957–2970, July 2014.
- [20] A. S. Khwaja and M. Cetin, "Compressed sensing ISAR reconstruction considering highly maneuvering motion," *Electronics*, vol. 6, no. 1, p. 21, Mar. 2017.
- [21] G. Xu, M. Xing, L. Yang, and Z. Bao, "Joint approach of translational and rotational phase error corrections for high-resolution inverse synthetic aperture radar imaging using minimum-entropy," *IET radar, sonar & nav*, vol. 10, no. 3, pp. 586–594, Mar. 2016.
- [22] L. Zhang, Z. Qiao, M. Xing, Y. Li, and Z. Bao, "High-resolution ISAR imaging with sparse stepped-frequency waveforms," *IEEE TGRS*, vol. 49, no. 11, pp. 4630–4651, Nov. 2011.

bistatic ISAR with DVB-T signals," IEEE Trans on AES, vol. 51, no. 3, pp. 2166–2180, 2015.

[41] W. Qiu, E. Giusti, A. Bacci, M. Martorella, F. Berizzi, H. Zhao, and Q. Fu, "Compressive sensing-based algorithm for passive