

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

رحیم انتظاری^۱، دانشجوی دکتری؛ علی جبار رشیدی^۲، دانشیار

۱- مجتمع دانشگاهی برق و الکترونیک - دانشگاه صنعتی مالک اشتر - تهران - ایران - r_entezari@mut.ac.ir

۲- مجتمع دانشگاهی برق و الکترونیک - دانشگاه صنعتی مالک اشتر - تهران - ایران - rashidi@mut.ac.ir

چکیده: ناشناخته بودن حرکت اهداف از دید رادار باعث می‌شود تا تصویر تشکیل شده بر مبنای الگوریتم برد-داپلر (RD) دچار مات‌شدگی شود، زیرا این الگوریتم برای استخراج تصویر از اهدافی استفاده می‌شود که در طی زمان پردازش هم‌دوس (CPI) رادار، حرکت یکنواختی داشته باشند. به عبارت دیگر، شیفت فرکانسی داپلر اهداف باید در طی زمان تشکیل تصویر ثابت بماند؛ ولی در یک سناریوی واقعی، حرکت اهداف از دید رادار ناشناخته و همچنین غیریکنواخت هستند و شیفت فرکانسی داپلر آن‌ها متغیر با زمان است. به همین دلیل در این مقاله، با استفاده از تخمین پارامترهای حرکتی هدف، تغییری در الگوریتم RD داده می‌شود تا بتوان از آن برای استخراج تصویر از اهداف دارای حرکت غیریکنواخت نیز استفاده کرد. سپس تأثیر حذف فاز باقیمانده از سیگنال بازگشتی و جبران‌سازی حرکت چرخشی، بر ثابت نگه‌داشتن شیفت فرکانسی داپلر نقاط پراکنده‌گر نشان داده خواهد شد. نتایج شبیه‌سازی الگوریتم پیشنهادی از داده خام تا تشکیل تصویر نهایی، کارایی این الگوریتم را نشان می‌دهد.

واژه‌های کلیدی: رادار دهانه ترکیبی معکوس (ISAR)، حرکت غیریکنواخت، الگوریتم برد-داپلر (RD)، شیفت فرکانس داپلر.

Inverse Synthetic Aperture Radar (ISAR) Imaging of Targets with Non-Uniform Motion

R. Entezari¹, PhD Student, A. J. Rashidi², Associate Professor

1- Electrical and Electronic Engineering University Complex (EEEUC), Malek-e-Ashtar University of Technology (MUT), Tehran, Iran, Email: r_entezari@mut.ac.ir

2- Electrical and Electronic Engineering University Complex (EEEUC), Malek-e-Ashtar University of Technology (MUT), Tehran, Iran, Email: rashidi@mut.ac.ir

Abstract: The unknown relative movement of the targets with respect to radar, cause blurring image formation based on RD algorithm; because this algorithm is used for imaging of the targets with uniform motion during the coherent processing interval (CPI). In the other words, doppler frequency shift must remain constant during the image formation time; but in real scenario, targets have non-uniform and unknown motion relative to radar and doppler frequency shift is time-varying. For this reason, in this paper, we change the RD algorithm to extract image from non-uniform targets by target motion parameters estimation. Then, the impact of the removal of the residual phase in receive signal and rotational motion compensation on the invariance of doppler frequency shift of the scatterer points will be indicated. The simulation results of the proposed algorithm from raw data to final image formation show the effectiveness of this algorithm.

Keywords: Inverse synthetic aperture radar (ISAR), non-uniform motion, range-doppler (RD) algorithm, doppler frequency shift.

تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۴/۱۲/۲۲

تاریخ اصلاح مقاله: ۱۳۹۵/۰۴/۰۷

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۵/۰۶/۲۹

نام نویسنده مسئول: علی جبار رشیدی

نشانی نویسنده مسئول: ایران - تهران - لویزان - دانشگاه صنعتی مالک اشتر.

۱- مقدمه

استفاده از رادارهای تصویربردار، شروع نسل جدیدی از رادارها را برای کاربردهای خاص شامل می‌شود. رادارهای تصویربردار، رادارهایی با دقت تفکیک بالا هستند که به علت کاربردهایی همچون شناسایی هدف، تصویربرداری در شرایط مختلف جوی، قابلیت نفوذ در عمق و ... به شدت مورد استفاده قرار گرفته‌اند. ایده پیدایش این رادارها، با توجه به دقت تفکیک کم در جهت سمت^۱ شکل گرفت. در حقیقت برای حل مشکل دقت تفکیک در جهت سمت، از حرکت رادار نسبت به هدف بهره گرفته شد. این ایده برای اولین بار توسط کارل وایلی [۱] مطرح و منجر به پیدایش رادار دهانه ترکیبی^۲ (SAR) شد. رادار SAR اغلب به منظور تصویربرداری از هدف‌های ثابت مانند پوسته عوارض زمین، سطوح کشاورزی، آشکارسازی اهداف متحرک و ... به کار برده می‌شود. در این راستا، رادار دهانه ترکیبی معکوس^۳ (ISAR) از حرکت هدف (به جای حرکت رادار) به منظور افزایش دقت تفکیک در جهت برد-مقاطع^۴ (به جای سمت) بهره می‌برد. از این رادارها نیز برای تصویربرداری از اهداف متحرک مانند کشتی، هواپیما و ... استفاده می‌شود.

برای استخراج تصویر هدف در رادارهای دهانه ترکیبی، نیاز به الگوریتم‌های تشکیل تصویر است که داده‌های خام راداری را به تصویر تبدیل کنند. یکی از الگوریتم‌های متداول تشکیل تصویر، الگوریتم برد-داپلر^۵ (RD) [۲] می‌باشد. به منظور استخراج تصویر از یک هدف، ابتدا رادار دنباله‌ای از پالس‌ها را به سمت هدف ارسال می‌کند. بعد از برخورد پالس به هدف و منعکس شدن به سمت رادار، داده‌های بازگشتی در باند پایه نمونه‌برداری شده و در یک آرایه دوبعدی (برد و برد-مقاطع) ذخیره می‌شوند. این آرایه دوبعدی را داده خام می‌نامند.

به منظور افزایش دقت تفکیک در جهت برد، داده‌های خام از یک فیلتر منطبق در جهت برد عبور داده می‌شوند و نمایه‌های برد^۶ استخراج می‌شوند. از آنجا که اهداف به‌طور کلی دارای دو حرکت انتقالی و چرخشی می‌باشند، اثرات این حرکات، در تصویر باید حذف شوند. این فرآیند جبران‌سازی حرکت نامیده می‌شود. تأثیر حرکت انتقالی هدف، جابه‌جایی مکان نقاط پراکنده‌گر از یک سلول برد به سلول برد دیگر است که باعث نامرتب شدن نمایه‌های برد می‌شود. برای حذف اثر حرکت انتقالی هدف، جبران‌سازی حرکت انتقالی^۷ (TMC) انجام می‌شود. فرآیند متداول برای انجام جبران‌سازی حرکت انتقالی شامل دو مرحله مرتب‌سازی برد (جبران‌سازی حرکت کلی) و تنظیم فاز (جبران‌سازی حرکت جزئی) است. با انجام مرتب‌سازی نمایه‌های برد در طول زمان پردازش هم‌دوس^۸ (CPI) رادار، نقاط پراکنده‌گر در سلول‌های برد خودشان قرار می‌گیرند. برای انجام این کار روش‌های مختلفی از جمله همبستگی مقاطع [۳]، حداقل آن‌روپی [۴]، برد-مرکز [۵] و ... وجود دارد. بعد از انجام مرتب‌سازی نمایه‌های برد، ممکن است تابع فاز سیگنال بازگشتی، از یک پالس به پالس دیگر تغییرات غیرخطی داشته باشد. این رفتار غیرخطی تابع فاز، از حرکت

غیریکنواخت هدف ناشی می‌شود و می‌تواند منجر به شیفت فرکانسی داپلر متغیر با زمان شود. در نتیجه تابع فاز مربوط به هر سلول برد باید رفتار خطی داشته باشد تا شیفت فرکانسی داپلر نقاط پراکنده‌گر ثابت باشد. بنابراین نیاز به خطی‌سازی توابع فاز و به عبارتی ثابت نگه داشتن شیفت فرکانسی داپلر در هر سلول برد می‌باشد. این کار تنظیم فاز نام دارد. در نتیجه تنظیم فاز با ثابت نگه‌داشتن شیفت فرکانسی داپلر در هر سلول برد، تابع فاز را نیز به صورت خطی درمی‌آورد. در حقیقت لازمه اعمال تبدیل فوریه در مرحله جبران‌سازی حرکت انتقالی، ثابت بودن شیفت فرکانسی داپلر و عدم جابه‌جایی نمایه‌های برد نسبت به هم است. به منظور انجام تنظیم فاز نیز روش‌های مختلفی از جمله گرادیان فاز [۶]، رویکرد زیر دهانه [۷]، داپلر-مرکز [۵] و ... ارائه شده است.

اگر زمان تشکیل تصویر، زیاد باشد و یا هدف دارای حرکت چرخشی پیچیده یا سریع باشد، اعمال جبران‌سازی حرکت انتقالی کافی نخواهد بود. در این حالت، تابع فاز سیگنال بازگشتی همچنان دارای رفتار غیرخطی خواهد بود. در نتیجه برای حذف اثر حرکت چرخشی هدف، اعمال جبران‌سازی حرکت چرخشی^۹ (RMC) ضروری است. از مهم‌ترین الگوریتم‌های جبران‌سازی حرکت چرخشی، الگوریتم شکل‌دهی قطبی^{۱۰} (PFA) [۸] می‌باشد. در نهایت نیز با اعمال تبدیل فوریه در جهت پالس‌ها به هر سلول برد، تصویر برد-داپلر هدف تشکیل می‌شود.

به‌طور کلی الگوریتم RD مبتنی بر دو فرض برای تصویربرداری از اهداف متحرک ارائه شده است. فرض اول این است که اندازه هدف و زاویه چرخش هدف به اندازه کافی کوچک باشند. در حقیقت با این فرض، دقت تفکیک کم (در حد متر) قابل دستیابی است. فرض دوم این است که شیفت فرکانسی داپلر نقاط پراکنده‌گر در طول زمان CPI ثابت باشند. در نتیجه الگوریتم RD برای تصویربرداری از اهداف بدون مانور و یا اهدافی که رفتار همکار با رادار دارند، مناسب می‌باشند (در اهداف با رفتار همکار، سرعت و جهت حرکت هدف برای رادار مشخص است [۹]). به عبارت دیگر، الگوریتم RD برای استخراج تصویر از اهداف با حرکت یکنواخت (حرکت با سرعت ثابت روی مسیر مستقیم) مناسب می‌باشد. در واقع در این نوع حرکت، شیفت فرکانسی داپلر نقاط پراکنده‌گر در طول زمان CPI ثابت است. از لحاظ ریاضی برای این‌گونه اهداف، فقط پارامترهای مرتبه اول فاز سیگنال بازگشتی در تشکیل تصویر نقش دارند (پارامترهای مرتبه اول شامل سرعت انتقالی و سرعت زاویه‌ای می‌باشد) و از پارامترهای مرتبه دوم و بالاتر در فاز سیگنال بازگشتی صرف‌نظر شده است؛ اما با توجه به حرکت ناشناخته و مانوردار هدف و همچنین نیاز به دقت تفکیک بالا، این فرض‌ها بسیار محدودکننده است.

به‌طور کلی اهداف با حرکت غیریکنواخت (اهداف مانوری) به اهدافی گفته می‌شود که هدف دارای پارامترهای حرکتی مرتبه دوم و بالاتر باشد [۱۰]. اهداف مانوری در دودسته اهداف با مانور متوسط و اهداف با مانور زیاد تقسیم‌بندی می‌شوند. در اهداف با مانور متوسط،

تخمین پارامتر و روش‌های فیلترینگ مناسب، مورد استفاده قرار می‌گیرند [۱۱]، [۲۱].

در این مقاله، هدف ما استخراج تصویر از اهداف با حرکت غیریکنواخت در زمان CPI کم می‌باشد. با توجه به اینکه در زمان CPI کم، هدف دارای مانور زیادی نمی‌باشد، پارامترهای مرتبه سوم و بالاتر حرکتی هدف را صرف نظر کرده‌ایم. در نتیجه تمرکز ما بر اهداف با مانور متوسط (حرکت غیریکنواخت با شتاب ثابت) می‌باشد. همچنین از آنجا که حرکت هدف از دید رادار ناشناخته است، باید تخمینی از پارامترهای حرکتی هدف نیز داشته باشیم. اغلب الگوریتم‌های تخمین پارامتر نیاز به زمان CPI زیاد برای به دست آوردن دقت تفکیک بالا دارند ولی با توجه به اینکه هدف ما در این مقاله، تشکیل تصویر در زمان CPI کم می‌باشد، از روش پردازش نقاط برجسته^{۱۵} (PPP) [۲۲] استفاده می‌کنیم. این روش، بدون استفاده از تحلیل‌های زمان-فرکانس و روش‌های تخمین طیف ولی با استفاده از جستجوی فراگیر (برای حذف فاز اضافی ناشی از حرکت انتقالی) قادر به تخمین پارامترهای حرکتی هدف می‌باشد. با توجه به حذف پارامترهای مرتبه سوم و بالاتر از حرکت هدف، بار محاسباتی این جستجوی فراگیر زیاد نخواهد بود. نتایج شبیه‌سازی نیز نشان می‌دهد که در این حالت از تغییرپذیری بازمان طیف داپلر به شدت کاسته می‌شود و تصویر استخراج شده در این حالت دچار مات‌شدگی نیست. در نتیجه به دنبال آن هستیم که با تغییر اندکی در الگوریتم RD از آن در یک سناریوی واقعی که هدف دارای رفتار غیرهمکار و غیریکنواخت است، استفاده کنیم.

ساختار کلی مقاله نیز به صورت زیر است: در بخش دوم، ابتدا هندسه حرکتی هدف و مدل سیگنال دریافتی رادار را شرح می‌دهیم. در بخش سوم بلوک دیاگرام الگوریتم پیشنهادی را ارائه می‌دهیم؛ سپس فرآیند تشکیل داده خام و فشرده‌سازی برد مطرح خواهد شد. در بخش چهارم، فرآیند جبران‌سازی حرکت انتقالی شرح داده می‌شود. در این بخش، برای مرحله مرتب‌سازی برد از روش برد-مرکز ولی برای تخمین پارامترهای حرکت انتقالی و انجام تنظیم فاز و تخمین پارامترهای حرکت چرخشی از روش PPP استفاده می‌شود. در بخش پنجم، فرآیند اعمال جبران‌سازی حرکت چرخشی بیان می‌شود و نتیجه‌گیری نیز در بخش ۶ بیان خواهد شد.

۲- هندسه حرکتی هدف و مدل‌سازی سیگنال دریافتی

ابتدا فرض می‌کنیم هندسه حرکتی هدف با توجه به موقعیت رادار، به صورت شکل ۱ باشد (این شکل صرفاً برای بررسی پارامترهای حرکتی هدف بیان شده است). همان‌طور که در شکل ۱ 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 مد نظر است، از حرکت در جهت محور z صرف نظر می‌کنیم و فرض می‌کنیم که پراکنده‌گر نقطه‌ای

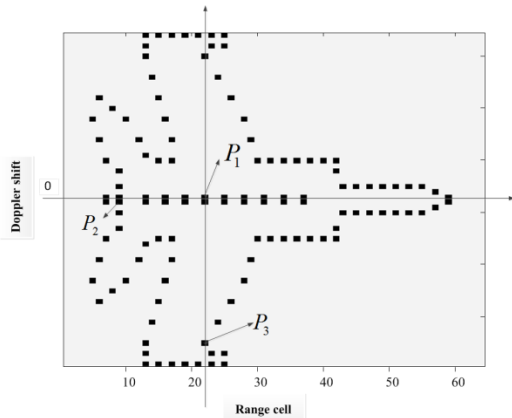
علاوه بر پارامترهای مرتبه اول حرکتی هدف، پارامترهای مرتبه دوم حرکتی هدف مانند شتاب انتقالی و شتاب زاویه‌ای نیز در نظر گرفته می‌شود و از پارامترهای مرتبه بالاتر صرف نظر می‌شود. این در حالی است که اهداف با مانور زیاد، پارامترهای مرتبه سوم (و حتی بالاتر) را نیز در نظر می‌گیرند. در برخی مقالات مانند [۱۱] به این اهداف، اهداف با حرکات پیچیده نیز گفته می‌شود.

در اهداف با مانور متوسط، سیگنال بازگشتی در هر سلول برد (اکوی سمت) بعد از تنظیم فاز با یک سیگنال مدوله‌شده فرکانسی خطی^{۱۱} (LFM) و در اهداف با مانور زیاد، سیگنال بازگشتی با یک سیگنال فاز مکعبی^{۱۲} (CPS) [۱۱] یا سیگنال مدوله‌شده فرکانسی درجه دوم^{۱۳} (QFM) [۱۲] مدل می‌شوند. سپس با توجه به مدل سیگنال دریافتی، تخمین پارامترهای حرکتی هدف صورت می‌گیرد. بر مبنای مدل سیگنال دریافتی، روش‌های مختلفی از تخمین پارامتر ارائه شده است. روش توزیع Lv [۱۳] از جمله روش‌های تخمین پارامتر بر مبنای سیگنال LFM و روش‌های مبتنی بر توزیع وینگر [۱۴] و تبدیل فوریه مقیاس‌بندی شده [۱۵] از جمله روش‌های تخمین پارامتر بر مبنای سیگنال CPS (یا QFM) است. علاوه بر روش‌های ذکر شده که با استفاده از مدل پارامتری اقدام به تخمین پارامترهای حرکتی هدف می‌کنند، روش‌های غیرپارامتری نیز وجود دارد که در این روش‌ها، مدلی برای سیگنال دریافتی در نظر گرفته نمی‌شود.

یکی از اولین روش‌هایی که برای استخراج تصویر از اهداف با حرکت غیریکنواخت و تولید تصاویر با دقت تفکیک بالا ارائه شد، روش RID^{۱۶} [۱۶] نامیده می‌شود که جایگزین الگوریتم RD برای استخراج تصاویر گردید. در این روش‌ها، آنالیز داپلر با یک تبدیل زمان-فرکانس جایگزین می‌شود که می‌تواند عبارت‌های فازی مرتبه بالاتر را نیز در نظر بگیرد. مشکل عمده برخی از این روش‌ها، بار محاسباتی زیاد، دقت تفکیک کمتر، گلبرگ‌های کناری زیاد و ایجاد عبارت متقاطع می‌باشد. برای بهبود دقت تفکیک و کاهش گلبرگ‌های کناری، برخی روش‌های تخمین طیف مانند تخمین گر کاپن [۱۷] و تخمین گر کالمن [۱۸] پیشنهاد شده است. این روش‌ها علاوه بر کاهش گلبرگ‌های کناری و مشکل دقت تفکیک، برای تصویربرداری از اهداف با حرکت غیریکنواخت پیشنهاد شده‌اند. با این حال، این دو روش، با فرض ایستا بودن سیگنال دریافتی به کار گرفته می‌شوند. در [۱۹] نیز با استفاده از جستجوی تطابق روشی برای استخراج تصویر از هدف‌های با پارامترهای غیریکنواخت ارائه شده است که نیازی به ایستا بودن سیگنال دریافتی ندارد؛ ولی مشکل این روش این است که فرآیند تشکیل تصویر به ازای تعدادی سرعت زاویه‌ای تکرار می‌شود که زمان محاسبات را به شدت افزایش می‌دهد. همچنین برای کاهش پیچیدگی محاسباتی ناشی از جستجوی فراگیر در برخی روش‌های زمان-فرکانس، روشی در [۲۰] با استفاده از الگوریتم ژنتیک پیشنهاد شده است. با این حال، هنوز هم روش‌های RID به همراه برخی روش‌های

که در این رابطه A_i نشان‌دهنده دامنه پراکندگی بازگشتی و (x_i, y_i) موقعیت i امین نقطه پراکنده‌گر است.

برای هدف از مدل پراکنده‌ای نقطه‌ای هواپیمای MIG-25 که از ۱۲۰ نقطه پراکنده‌گر با دامنه پراکندگی یکسان تشکیل شده است، استفاده می‌کنیم. مدل پراکندگی نقطه‌ای هدف در شکل ۲ نشان داده شده است (نقاط P_1, P_2, P_3 ، نقاطی هستند که برای پردازش‌های بخش‌های بعدی استفاده می‌شوند).



شکل ۲: مدل پراکندگی نقطه‌ای هدف

حال فرض می‌کنیم رادار در موقعیت $(0,0)$ قرار دارد و هدف از مکان $(U_0, W_0) = (350, 4000)$ با زاویه اولیه $\phi_0 = 0$ با سرعت اولیه $V_0 = 964$ m/s در حال حرکت است (حداکثر سرعت MIG-25 ارتفاع بالا). سایر پارامترهای حرکتی هدف نسبت به رادار در جدول ۱ بیان شده است.

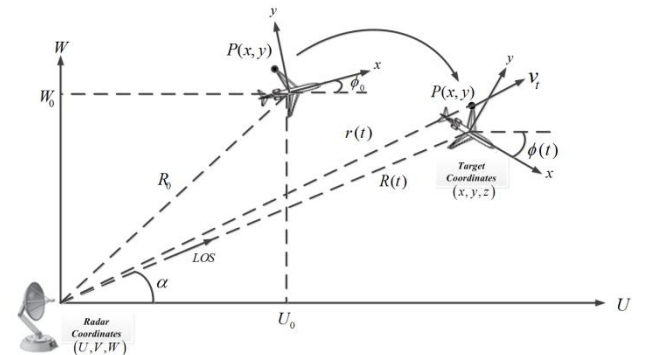
جدول ۱: پارامترهای حرکتی هدف

| پارامتر | مقدار |
|--------------------------|----------------------------------------|
| موقعیت اولیه | $(U_0, W_0) = (350, 4000)$ |
| فاصله اولیه هدف از رادار | $R_0 \approx 4000$ m |
| سرعت اولیه | $V_0 \approx 964$ m/s |
| شتاب اولیه | $A_0 \approx 110$ m/s ² |
| سرعت انتقالی اولیه | $(v_t)_0 \approx 84$ m/s |
| شتاب انتقالی اولیه | $(a_t)_0 \approx 618$ m/s ² |
| سرعت زاویه‌ای اولیه | $\omega_r = 0.28$ rad/sec |
| شتاب زاویه‌ای اولیه | $\alpha_r = 0.011$ rad/s ² |

۳- الگوریتم پیشنهادی

در این مقاله فرض بر این است که اهداف دارای رفتار غیرهمکار نسبت به رادار و حرکت غیریکنواخت با شتاب ثابت در طول زمان تشکیل تصویر می‌باشند. بلوک دیاگرام الگوریتم پیشنهادی در شکل ۳ نشان داده شده است (بلوک‌های نقطه‌چین، بلوک‌هایی هستند که به الگوریتم RD اضافه شده‌اند). از آنجا که مطالب به‌طور پیوسته ارائه می‌شود، لازم است تا تمامی بلوک‌های این الگوریتم توضیح داده شود. همچنین نتایج شبیه‌سازی هر قسمت به‌طور جداگانه در انتهای هر بخش گزارش می‌شود.

$P(x, y)$ دارای مؤلفه‌های حرکت چرخشی و انتقالی است. همچنین مرکز فاز و مبدأ مختصات هدف را در وسط هدف در نظر می‌گیریم.



شکل ۱: هندسه حرکتی هدف با توجه به رادار

اگر هدف در میدان دور رادار قرار گرفته باشد، فاصله لحظه‌ای نقطه پراکنده‌گر $P(x, y)$ از رادار مطابق رابطه (۱) تقریب زده می‌شود [۲۳].

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

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. اگر $R(t)$ و $\phi(t)$ را تا مرتبه دوم با استفاده از بسط تیلور بسط دهیم، داریم [۲۳]:

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

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

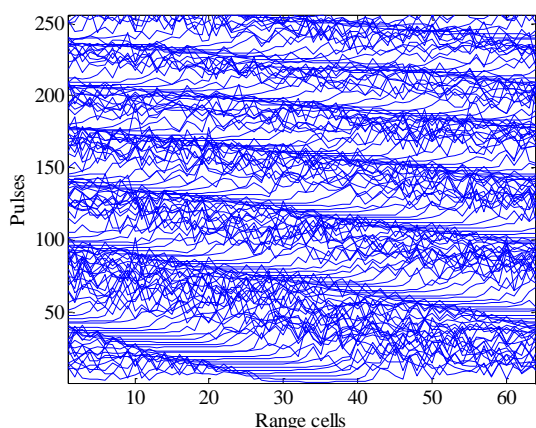
که در این رابطه R_0 فاصله اولیه هدف از رادار، v_r سرعت انتقالی^{۱۶} و a_r شتاب انتقالی^{۱۷} هدف و هر سه پارامترهای حرکت انتقالی هستند. همچنین ϕ_0 زاویه اولیه هدف نسبت به محور U ، ω_r سرعت زاویه‌ای^{۱۸} و α_r شتاب زاویه‌ای^{۱۹} هدف و هر سه پارامترهای حرکت چرخشی می‌باشند. در این حالت سیگنال بازگشتی از نقطه $P(x, y)$ در باند پایه را می‌توان به‌صورت زیر بیان کرد [۲۴]:

$$S_p(t) = A_p \cdot \exp \left[-j 2\pi f \left(2 \frac{r(t)}{c} \right) \right] \quad (3)$$

که در این رابطه A_p تابع چگالی بازگشتی یا دامنه پراکندگی بازگشتی از نقطه پراکنده‌گر P ، f فرکانس مرکزی رادار و c سرعت انتشار امواج الکترومغناطیسی است.

به‌منظور انجام شبیه‌سازی، فرض می‌کنیم هدف از مدل پراکندگی نقطه‌ای تبعیت می‌کند و از k نقطه پراکنده‌گر با دامنه پراکندگی یکسان تشکیل شده است. در نتیجه می‌توان سیگنال بازگشتی از هدف در باند پایه را به‌صورت تابعی از f و ϕ به‌صورت زیر بیان کرد [۲۴]:

$$S(f, \phi) = \exp \left[-j 4\pi f \frac{R(t)}{c} \right] \cdot \sum_{i=1}^k A_i \cdot \exp \left[-\frac{j 4\pi f}{c} [x_i \cos \phi - y_i \sin \phi] \right] \quad (4)$$



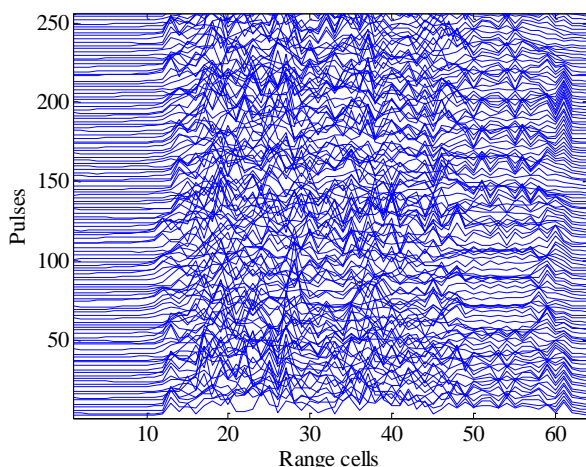
شکل ۴: نمایه‌های برد بعد از اعمال فشرده‌سازی برد

۴- جبران‌سازی حرکت انتقالی

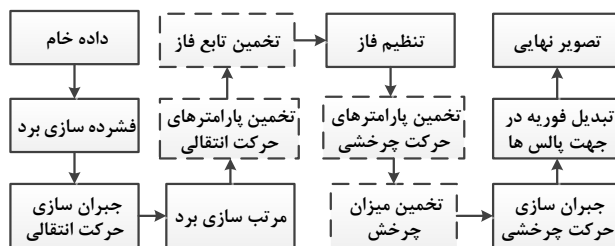
همان‌طور که بیان شد، فرآیند متداول برای اعمال جبران‌سازی حرکت انتقالی شامل دو مرحله مرتب‌سازی برد و تنظیم فاز است.

مرتب‌سازی برد

فرآیند حذف عبارت فاز ناشی از حرکت انتقالی، مرتب‌سازی برد نامیده می‌شود. در حقیقت با مرتب‌سازی برد، نمایه‌های برد در زیر هم مرتب می‌شوند و جابه‌جایی مکان نقاط پراکنده‌گر از یک سلول برد به سلول برد دیگر، از بین می‌رود. در این مقاله ما از روش برد-مرکز برای این کار استفاده کرده‌ایم. در این روش یک نمایه برد مرجع انتخاب می‌شود و بقیه نمایه‌های برد بر مبنای نمایه برد مرجع مرتب می‌شود. مرتب‌سازی نیز بر اساس قوی‌ترین پیک دامنه در هر نمایه برد صورت می‌پذیرد. یعنی در صورتی که قوی‌ترین پیک دامنه یک نمایه برد اندکی جابه‌جایی داشته باشد، با جابه‌جا کردن قوی‌ترین پیک دامنه و قرار دادن پیک‌ها در زیر هم، مرتب‌سازی برد صورت می‌پذیرد. تصویر نمایه‌های برد به‌دست‌آمده بعد از اعمال فرآیند مرتب‌سازی برد در شکل ۵ نشان داده شده است.



شکل ۵: نمایه‌های برد مرتب‌شده بعد از اعمال مرتب‌سازی برد



شکل ۳: بلوک دیاگرام الگوریتم پیشنهادی

داده خام

ابتدا رادار، دنباله‌ای از پالس‌ها را به سمت هدف ارسال می‌کند. فرض می‌کنیم پالس ارسالی رادار، قطار پالس موج پیوسته فرکانس پله‌ای^{۲۰} (SFCW) باشد که از N پالس و M پرست تشکیل شده است. در هر پرست، فرکانس از یک پالس به پالس دیگر به اندازه Δf تغییر می‌کند. جدول ۲ نیز پارامترهای مورد استفاده در رادار را بیان می‌کند.

با ارسال یک قطار پالس در طول زمان CPI، پالس‌های بازگشتی از هدف، بعد از انتقال به باند پایه نمونه‌برداری می‌شوند. در حقیقت بعد از انتقال یک پالس، مقادیر نمونه‌برداری شده در یک سطر از داده خام قرار می‌گیرد. این کار تا انتها و با ارسال آخرین پالس به همین شکل صورت می‌پذیرد. در نهایت داده خام تشکیل شده دارای ابعاد $N \times M = 64 \times 256$ می‌باشد.

جدول ۲: پارامترهای رادار

| پارامتر | مقدار |
|----------------------------------|-------------------------------------------------|
| فرکانس مرکزی رادار | $f = 9 \text{ GHz}$ |
| پهنای باند فرکانسی سیگنال ارسالی | $BW = N \cdot \Delta f = 512 \text{ MHz}$ |
| فرکانس پله‌ای | $\Delta f = 8 \text{ MHz}$ |
| فرکانس تکرار پالس | $PRF = 35 \text{ KHz}$ |
| تعداد پرست | $M = 256$ |
| تعداد پالس در هر پرست | $N = 64$ |
| زمان پردازش همدوس (CPI) | $T = \frac{M \times N}{PRF} = 0.46 \text{ sec}$ |

فشرده‌سازی برد

در این مرحله به‌منظور داشتن دقت تفکیک بالا در جهت برد، باید داده خام را از یک فیلتر منطبق در جهت برد عبور دهیم. بعد از اعمال فشرده‌سازی برد، نمایه‌های برد در دو جهت برد و پالس حاصل می‌شوند. نتایج شبیه‌سازی برای استخراج نمایه‌های برد، ناشی از اعمال فیلتر منطبق به داده‌های خام در شکل ۴ نشان داده شده است.

همان‌گونه که در شکل ۴ مشاهده می‌شود حرکت انتقالی هدف باعث شده است تا مکان نقاط پراکنده‌گر از یک سلول برد به سلول برد دیگر جابه‌جا شود. برای حذف اثرات مخرب این حرکت بر روی تصویر از جبران‌سازی حرکت انتقالی استفاده می‌شود.

همان‌طور که در شکل ۷ مشاهده می‌شود، تصویر دچار مات‌شدگی در جهت داپلر است. این بدان معنی است که طیف‌های داپلر هنوز در طول زمان CPI متغیر با زمان هستند؛ بدان معنی که اثر حرکت انتقالی به‌طور کامل حذف نشده است و خطای فاز باقی‌مانده باید حذف گردد (جبران‌سازی حرکت جزئی). در نتیجه داده‌های به‌دست‌آمده از مرتب‌سازی برد، نیاز به تنظیم فاز (حذف فاز باقیمانده) دارند. فرآیند ثابت‌نگه‌داشتن شیفت فرکانسی داپلر در بین سلول‌های برد، تنظیم فاز نام دارد.

تنظیم فاز

تنظیم فاز با ثابت‌نگه‌داشتن شیفت فرکانسی داپلر در هر سلول برد، تابع فاز را به‌صورت خطی درمی‌آورد. از آنجا که در این مقاله فرض بر این است که هدف دارای حرکت غیریکنواخت با شتاب ثابت در طول زمان CPI می‌باشد و همچنین هدف دارای رفتار غیرهمکار نسبت به رادار است، در نتیجه باید روشی استفاده کرد تا ابتدا پارامترهای حرکتی هدف را تخمین بزند. بدین منظور از روش پردازش نقاط برجسته استفاده می‌کنیم. با انجام این کار هم تنظیم فاز صورت گرفته و هم پارامترهای حرکت چرخشی برای استفاده در الگوریتم‌های جبران‌سازی حرکت چرخشی تعیین می‌شوند. در این روش نقاط پراکنده‌گری از هدف که تعیین‌کننده حرکت انتقالی و چرخشی هستند، انتخاب می‌شوند (نقاط برجسته).

برای حذف فاز باقی‌مانده ناشی از حرکت انتقالی، از روش پردازش نقاط برجسته استفاده می‌کنیم. برای این کار، ابتدا یک نقطه پراکنده‌گر P_1 روی هدف در نظر می‌گیریم (شکل ۲). از آنجا که برای جبران‌سازی حرکت انتقالی نیاز به دانستن تابع برد می‌باشد، در نتیجه این نقطه پراکنده‌گر باید در مرکز چرخش هدف انتخاب شود. بدون از دست رفتن کلیات مسئله فرض می‌کنیم زاویه سمت برابر صفر باشد ($\alpha = 0$). حال با تخمین پارامترهای سرعت انتقالی و شتاب انتقالی برای سلول برد شامل نقطه P_1 ، می‌توان تابع برد را با استفاده از رابطه (۶) محاسبه کرد.

$$R(t) = R_0 + v_r t + \frac{1}{2!} a_r t^2 + \dots \quad (6)$$

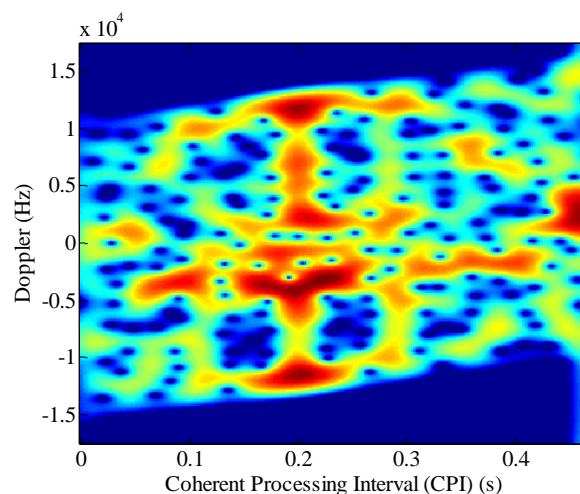
در حقیقت اگر بتوانیم پارامترهای حرکت انتقالی (a_r و v_r) را تخمین بزنیم، می‌توانیم تابع فاز بهینه ناشی از حرکت انتقالی را به‌صورت رابطه (۷) به دست آورده و در نهایت با ضرب عبارت $\exp\left[+j4\pi f \frac{R(t)}{c}\right]$ در سیگنال دریافتی باند پایه رابطه (۴)، سیگنال تنظیم فاز شده را به دست آوریم.

$$\begin{aligned} \varphi(t) &= \frac{4\pi f}{c} \left[R_0 + v_r t + \frac{1}{2!} a_r t^2 + \dots \right] \\ &= \frac{4\pi f}{c} R_0 + \frac{4\pi f}{c} v_r t + \frac{2\pi f}{c} a_r t^2 + \dots \end{aligned} \quad (7)$$

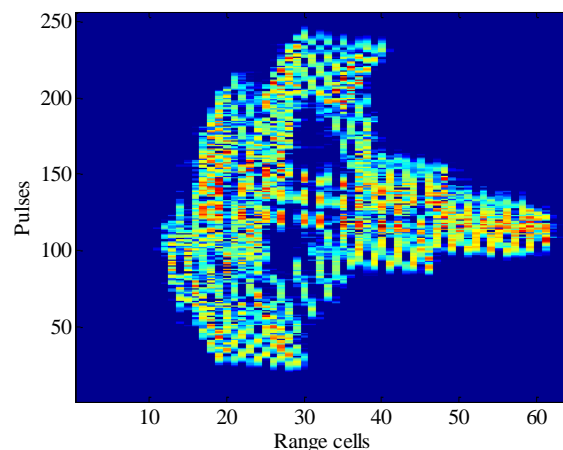
بعد از انجام فرآیند مرتب‌سازی برد، ممکن است سلول‌های برد دچار تغییرات فاز غیرخطی شده باشند. این تغییرات غیرخطی تابع فاز ناشی از حرکت غیریکنواخت هدف نسبت به رادار می‌باشد. طبق تعریف، تابع فاز سیگنال بازگشتی برابر است با [۲۳]:

$$\varphi(t) = \frac{4\pi f}{c} r(t) \quad (5)$$

که در این رابطه $r(t)$ فاصله لحظه‌ای نقطه پراکنده‌گر تا رادار است. در واقع تابع فاز، تابعی از فاصله لحظه‌ای هدف تا رادار می‌باشد و با حرکت هدف ممکن است تابع فاز دچار تغییرات غیرخطی شود و شیفت فرکانسی داپلر پراکنده‌گرها که بیانگر تغییرات زمانی تابع فاز است، با زمان تغییر کند. شکل ۶ نمایش طیف داپلر یک سلول برد خاص برحسب زمان CPI از یک پالس به پالس دیگر را بعد از اعمال روش برد-مرکز نشان می‌دهد.



شکل ۶: طیف داپلر یک سلول برد خاص بعد از اعمال روش برد-مرکز همان‌طور که در شکل ۶ مشاهده می‌شود، طیف داپلر نسبت به زمان CPI، ثابت نیست. این تغییرپذیری با زمان طیف داپلر نشان‌دهنده حرکت غیریکنواخت هدف می‌باشد. تصویر تشکیل شده هدف نیز در حوزه برد-داپلر بعد از اعمال فرآیند مرتب‌سازی برد در شکل ۷ نشان داده شده است.



شکل ۷: تصویر استخراج شده بعد از اعمال روش برد-مرکز

بعد از این که اثر حرکت انتقالی به طور کامل توسط جبران ساز حرکت انتقالی حذف شد، مرکز هدف حرکت انتقالی ندارد (شکل ۹)، یعنی هدف فقط حول مرکز مختصات خود می چرخد و مرکز هدف ثابت می شود. باز هم بدون از دست رفتن کلیات مسئله فرض می کنیم، زاویه سمت برابر صفر باشد ($\alpha = 0$). در این حالت، فاصله لحظه ای نقطه پراکنده گر P تا رادار برابر است با:

$$r(t) \cong R_0 + x_p \cdot \cos(\phi(t)) - y_p \cdot \sin(\phi(t)) \quad (8)$$

با نمایش هدف در مختصات قطبی (r_p, ϕ_p) و در صورتی که R_0 خیلی بزرگ تر از ابعاد هدف باشد، فاصله لحظه ای نقطه پراکنده گر P به صورت رابطه (۹) نوشته می شود [۸].

$$r(t) \cong R_0 + r_p \cdot \cos(\hat{\phi}_p) \quad (9)$$

که $\hat{\phi}_p$ میانگین زاویه چرخش نقطه پراکنده گر P در طول زمان CPI رادار و برابر $\hat{\phi}_p = \phi(t) + \phi_p$ و $r_p = \sqrt{x_p^2 + y_p^2}$ می باشد. از رابطه (۹) و با صرف نظر کردن از پارامترهای مرتبه سوم و بالاتر در $\phi(t)$ ، می توان سرعت (شیفت فرکانسی داپلر) و شتاب متناظر نقطه P را به صورت روابط (۱۰) به دست آورد [۸].

$$r'(t) \cong -r_p \omega_r \cdot \sin(\hat{\phi}_p) \quad (10)$$

$$r''(t) \cong -r_p \omega_r^2 \cdot \cos(\hat{\phi}_p) - r_p \alpha_r \cdot \sin(\hat{\phi}_p)$$

حال معادلات برد، سرعت و شتاب نقطه پراکنده گر P نسبت به مرکز چرخش به صورت روابط (۱۱) به دست می آید [۸].

$$r_{0,p}(t) = r_p \cdot \cos(\hat{\phi}_p)$$

$$r'_{0,p}(t) \cong -r_p \omega_r \cdot \sin(\hat{\phi}_p) \quad (11)$$

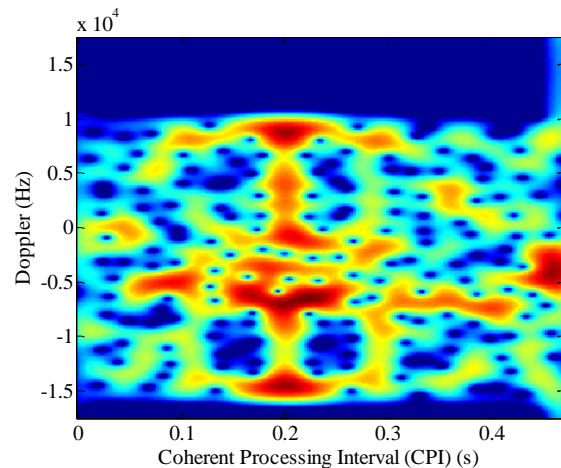
$$r''_{0,p}(t) \cong -r_p \omega_r^2 \cdot \cos(\hat{\phi}_p) - r_p \alpha_r \cdot \sin(\hat{\phi}_p)$$

حال می توان پارامترهای حرکت چرخشی (ω_r و α_r) را تخمین زد. برای این کار، چند نقطه برجسته (سته به تعیین مرتبه بسط تیلور)، دور از مرکز چرخش هدف انتخاب می شود.

تخمین پارامتر سرعت زاویه ای

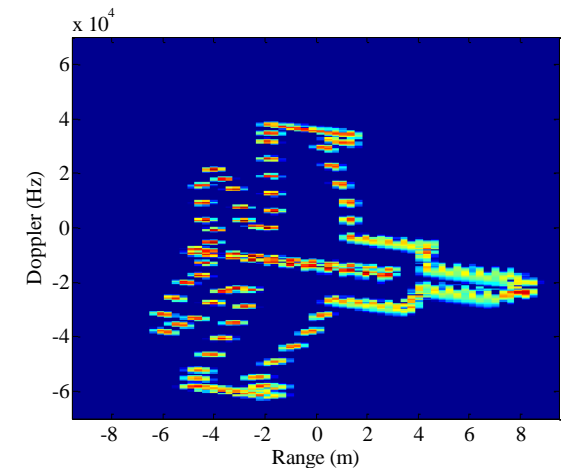
برای تخمین سرعت زاویه ای، ابتدا یک نقطه پراکنده گر P_2 به صورتی انتخاب می کنیم که شیفت فرکانسی داپلر آن مانند مرکز چرخش هدف ولی در یک سلول برد متفاوت از مرکز چرخش قرار می گیرد (شکل ۲). از آنجا که اثر سرعت انتقالی را حذف کردیم، در نتیجه مرکز چرخش فقط حول مرکز مختصات خود دارای چرخش است و حرکت انتقالی ندارد؛ در نتیجه شیفت فرکانسی داپلر مرکز چرخش صفر است و شیفت فرکانسی داپلر نقطه P_2 نیز صفر است پس $r'_{0,P_2}(t) = 0$ و میانگین زاویه چرخش نقطه P_2 در طول 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 [۸]:

با توجه به اینکه در مرحله مرتب سازی برد، جبران سازی عمده حرکت انتقالی انجام شد، اثر حرکت انتقالی تا حد زیادی از بین رفته است؛ یعنی در این مرحله، مقدار پارامترهای حرکت انتقالی بسیار ناچیز هستند. در نتیجه برای تخمین پارامترهای حرکت انتقالی در مرحله تنظیم فاز از جستجوی فراگیر استفاده می کنیم. همچنین، به دلیل صرف نظر کردن از پارامترهای مرتبه بالاتر در رابطه (۶)، حجم محاسبات ناشی از جستجوی فراگیر نیز به شدت کاهش می یابد. در نتیجه می توان با یک جستجوی فراگیر برای سلول برد شامل نقطه P_1 ، مقادیر سرعت انتقالی و شتاب انتقالی را تخمین زد. بعد از این که پارامترهای حرکت انتقالی تخمین زده شد، می توان تابع فاز بهینه سلول برد شامل نقطه P_1 را برای خطی سازی و در نهایت کاهش تغییر پذیری بازمان طیف داپلر استفاده کرد. شکل ۸، طیف داپلر بعد از انجام عمل تنظیم فاز را نشان می دهد. همان طور که در شکل ۸ مشاهده می شود از تغییر پذیری با زمان کاسته شده است.



شکل ۸: طیف داپلر یک سلول برد خاص بعد از اعمال تنظیم فاز

همچنین تصویر تشکیل شده بعد از انجام تنظیم فاز در شکل ۹ نشان داده شده است. همان طور که در شکل ۹ مشاهده می شود، اثر حرکت چرخشی هدف، هنوز در تصویر باقی مانده است. در نتیجه نیاز به اعمال جبران ساز حرکت چرخشی داریم.

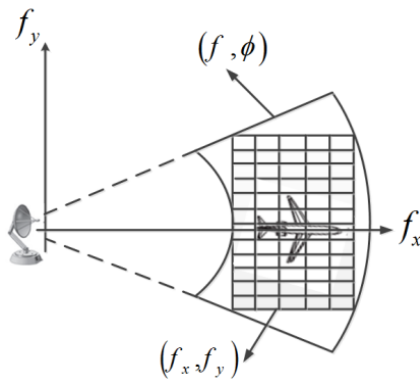


شکل ۹: تصویر استخراج شده بعد از انجام تنظیم فاز

سریع در نظر گرفته شده است). برای حذف اثر مخرب حرکت چرخشی در تصویر به دست آمده، باید از جبران ساز حرکت چرخشی استفاده نمود. در واقع اعمال جبران ساز حرکت چرخشی، منجر به کاهش تغییرپذیری با زمان طیف داپلر می شود. یکی از مهم ترین و پرکاربردترین الگوریتم های جبران سازی حرکت چرخشی، الگوریتم PFA می باشد. از لحاظ ریاضی، بعد از اعمال جبران سازی حرکت انتقالی، سیگنال دریافتی از هدف در باند پایه به صورت زیر قابل بیان است:

$$s(f, \phi) = \sum_{i=1}^k A_i \exp \left[-\frac{j4\pi f}{c} [x_i \cos \phi - y_i \sin \phi] \right] \quad (16)$$

داده های دریافتی رادار در این حالت به فرم قطبی (f, ϕ) می باشند. شکل ۱۰ نمایش داده های بازگشتی از هدف در فرم قطبی و تبدیل آن به فرم مستطیلی را نشان می دهد. اگر تصویر تشکیل شده با استفاده از تبدیل فوریه را در این حالت مشاهده کنیم، دچار مات شدگی است. در نتیجه برای تشکیل تصویر با استفاده از تبدیل فوریه، نیاز است تا داده های به فرم قطبی (f, ϕ) را به فرم مستطیلی (f_x, f_y) تبدیل کنیم.



شکل ۱۰: داده های بازگشتی از هدف در فرم قطبی و فرم مستطیلی [۲۴]

این داده ها از حوزه (f_x, f_y) به حوزه (f, ϕ) به صورت $f_x = \frac{2f}{c} \cos \phi$ و $f_y = \frac{2f}{c} \sin \phi$ به هم مرتبط هستند. در نتیجه برای اعمال الگوریتم PFA باید پهنای زاویه ای ϕ را داشته باشیم. با توجه به اینکه پارامترهای حرکت چرخشی در مرحله قبل تخمین زده شدند، از خروجی مرحله قبل می توان در این مرحله برای تعیین میزان چرخش هدف استفاده کرد. تبدیل داده ها از فرم قطبی به فرم مستطیلی معمولاً دارای خطاهایی است. برای حداقل کردن این خطا، چندین الگوریتم درون یابی وجود دارد که ما از درون یابی خطی استفاده کرده ایم. در نهایت نیز با اعمال تبدیل فوریه در جهت پالس ها، تصویر نهایی استخراج می شود. نتایج شبیه سازی برای استخراج تصویر نهایی در شکل ۱۱ نشان داده شده است.

$$r_{0,P_2} = r_{P_2} \cos \hat{\phi}_{P_2} = r_{P_2} \quad (12)$$

$$r''_{0,P_2} = -r_{P_2} \omega_r^2$$

در نتیجه سرعت زاویه ای را می توان به صورت زیر به دست آورد [۸]:

$$\omega_r = \sqrt{\frac{r''_{0,P_2}}{r_{0,P_2}}} \quad (13)$$

تخمین پارامتر شتاب زاویه ای

برای تخمین شتاب زاویه ای، ابتدا یک نقطه پراکنده گر P_3 به صورتی انتخاب می کنیم که در یک سلول برد مشابه با مرکز چرخش هدف ولی شیفیت فرکانسی 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 طول زمان CPI رادار نیز برابر $\hat{\theta}_{P_3} = \pm \frac{\pi}{2}$ می باشد. پس معادلات سرعت و شتاب نقطه برجسته P_3 به صورت روابط (۱۴) می باشد [۸].

$$r'_{0,P_3} = r_{P_3} \omega_r \quad (14)$$

$$r''_{0,P_3} = r_{P_3} \alpha_r$$

در نتیجه شتاب زاویه ای را می توان به صورت زیر به دست آورد [۸]:

$$\alpha_r = \omega_r \left(\frac{r''_{0,P_3}}{r'_{0,P_3}} \right) \quad (15)$$

در جدول ۳ مقادیر سرعت زاویه ای و شتاب زاویه ای تخمین زده شده نشان داده شده است.

جدول ۳: پارامترهای تخمین زده شده

| مقدار | پارامتر |
|--------------------------|-----------------------------|
| ۰٫۱۴ rad/s | سرعت زاویه ای تخمین زده شده |
| ۰٫۰۳۴ rad/s ² | شتاب زاویه ای تخمین زده شده |

بعد از تخمین سرعت زاویه ای و شتاب زاویه ای با روابط (۱۳) و (۱۵)، می توان تابع زاویه چرخش یا میزان چرخش هدف را با توجه به رابطه (۲) محاسبه کرد. از آنجا که پارامترهای حرکت چرخشی نیز تخمین زده شدند، اکنون می توان الگوریتم PFA را اعمال کرد.

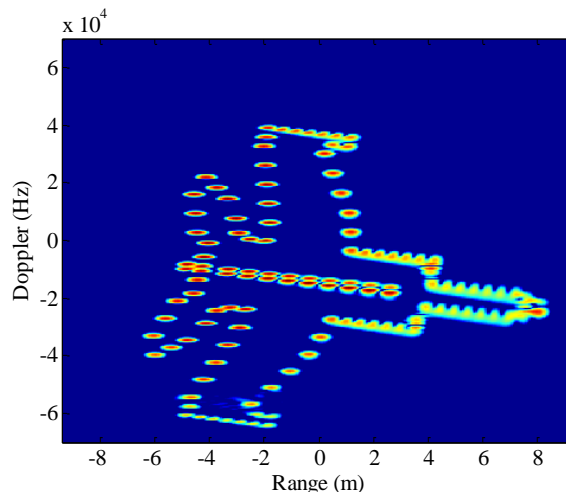
۵- جبران سازی حرکت چرخشی

به طور کلی، حرکت چرخشی باعث ایجاد فاز متغیر با زمان به صورت سهموی و در نتیجه طیف داپلر متغیر با زمان می شود. در این صورت تشکیل تصویر برد-داپلر مبتنی بر تبدیل فوریه، باعث ایجاد مات شدگی در محور داپلر می شود. در واقع افزایش زمان تشکیل تصویر و یا چرخش سریع و یا پیچیده هدف، باعث ایجاد اثرات مات شدگی در تصویر می شود (در جدول ۱، مقدار شتاب زاویه ای هدف برای چرخش

محدودیت ذاتی الگوریتم تشکیل تصویر RD در استخراج تصاویر از اهداف با حرکت غیریکنواخت، تغییری در الگوریتم RD داده شد تا بتوان از آن در یک سناریوی واقعی که اهداف دارای حرکت غیریکنواخت نسبت به رادار هستند، استفاده کرد. بدین منظور از روش پردازش نقاط برجسته در دو مرحله استفاده کردیم. در مرحله اول برای تخمین پارامترهای حرکت انتقالی و در نتیجه تخمین تابع برد به منظور حذف فاز باقیمانده از سیگنال بازگشتی و در مرحله دوم برای تخمین پارامترهای حرکت چرخشی و تعیین میزان چرخش هدف، از پردازش نقاط برجسته استفاده شد. همچنین جهت ارزیابی و صحت روش پیشنهادی، مدل پراکندگی نقطه‌ای هواپیمای MIG-25 به کار برده شد. نتایج شبیه‌سازی نیز نشان می‌دهد که در این حالت، تصویر دچار مات‌شدگی نخواهد بود.

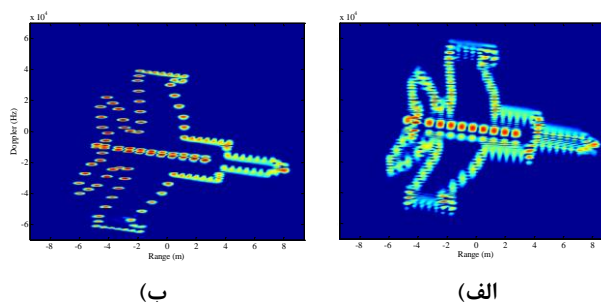
مراجع

- [1] Wiley, C. A, *Pulsed Doppler Radar Methods and Apparatus*, US Patent 3,196,436 filed in 1965.
- [2] J. L. Walker, "Range-Doppler imaging of rotating objects," *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, pp. 23-52, 1980.
- [3] C. C. Chen and H. C. Andrews, "Target-motion-induced radar imaging," *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, pp. 2-14, 1980.
- [4] G. Wang and Z. Bao, "The minimum entropy criterion of range alignment in ISAR motion compensation," *In IEEE Radar Conference*, pp. 236-239, No. 449, 1997.
- [5] T. Itoh, H. Sueda and Y. Watanabe, "Motion compensation for ISAR via centroid tracking," *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, vol. 32, pp. 1191-1197, 1996.
- [6] D. Wahl, P. Eichel, D. Ghiglia and C. Jakowatz, "Phase gradient autofocus-a robust tool for high resolution SAR phase correction," *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, vol. 30, pp. 827-835, 1994.
- [7] G. W. Donohoe, "Subaperture autofocus for synthetic aperture radar," *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, vol. 30, pp. 617-621, 1994.
- [8] R. Lipps and D. Kerr, "Polar reformatting for ISAR imaging," *In IEEE Radar Conference*, pp. 275-280, 1998.
- [9] جواد تقی زاده و سید علیرضا سیدین، «تصویرسازی در سونار روزنه مصنوعی معکوس چندپایه با استفاده از روش پس‌تابش فیلترشده»، *مجله مهندسی برق دانشگاه تبریز*، دوره ۴۶، شماره ۱، صفحات ۴۱-۵۲، ۱۳۹۵.
- [10] V. C. Chen and W. Miceli, "Time-varying spectral analysis for radar imaging of manoeuvring targets," *In Radar, Sonar and Navigation, IEEE Proceedings*, pp. 262-268, 1998.
- [11] J. Zheng, H. Liu, G. Liao, T. Su, Z. Liu and Q. H. Liu, "ISAR Imaging of Targets With Complex Motions Based on a Noise-Resistant Parameter Estimation Algorithm Without Nonuniform Axis," *IEEE Sensors Journal*, vol. 16, pp. 2509-2518, 2016.
- [12] Y. Wang and B. Zhao, "Inverse Synthetic Aperture Radar Imaging of Nonuniformly Rotating Target Based on the Parameters Estimation of Multicomponent Quadratic Frequency-Modulated Signals," *IEEE Sensors Journal*, vol. 15, pp. 4053-4061, 2015.



شکل ۱۱: تصویر استخراج‌شده بعد از اعمال جبران سازی حرکت چرخشی

همان‌طور که در شکل ۱۱ مشاهده می‌شود، تصویر استخراج‌شده بعد از اعمال جبران‌سازی حرکت چرخشی، دچار مات‌شدگی نیست و اثر حرکت‌های انتقالی و چرخشی از آن حذف شده است. در نهایت تصاویر استخراج شده از اهداف با حرکت غیریکنواخت با اعمال الگوریتم RD و الگوریتم پیشنهادی در شکل ۱۲ نشان داده شده است.



شکل ۱۲: تصاویر استخراج شده از اهداف با حرکت غیریکنواخت با اعمال: الف) الگوریتم RD ب) الگوریتم پیشنهادی

همان‌طور که در شکل ۱۲ مشاهده می‌شود، تصویر استخراج‌شده با الگوریتم RD به دلیل حرکت غیریکنواخت هدف، دچار ماتی شده است ولی در الگوریتم پیشنهادی با حذف فاز اضافی ناشی از حرکت غیریکنواخت و کاهش تغییرپذیری با زمان طیف داپلر، تصویر استخراج‌شده دچار مات‌شدگی نیست. البته لازم به ذکر است که برای اعمال الگوریتم RD فرض شده است که هدف دارای رفتار همکار نسبت به رادار می‌باشد؛ در نتیجه از تخمین پارامترهای حرکتی هدف نیز صرف‌نظر شده است.

۶- نتیجه‌گیری

در این مقاله، با اندکی تغییر در الگوریتم RD، از آن برای تشکیل تصویر از اهدافی استفاده شد که در طول زمان پردازش همدوس رادار، دارای شیفت فرکانس داپلر متغیر با زمان هستند. در واقع با توجه به

- Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, vol. 37, pp. 1432-1441, 2001.
- [19] G. Li, H. Zhang, X. Wang and X. G. Xia, "ISAR 2-D imaging of uniformly rotating targets via matching pursuit," *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, vol. 48, pp. 1838-1846, 2012.
- [20] J. Li and H. Ling, "ISAR motion detection and compensation using genetic algorithms," *In Aerospace/Defense Sensing, Simulation, and Controls*, pp. 380-388, 2001.
- [21] Y. Wang and Y. Lin, "ISAR imaging of non-uniformly rotating target via range-instantaneous-Doppler-derivatives algorithm," *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, vol. 7, pp. 167-176, 2014.
- [22] S. Werness, W. Carrara, L. Joyce and D. Franczak, "Moving target imaging algorithm for SAR data," *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, vol. 26, pp. 57-67, 1990.
- [23] C. Ozdemir, *Inverse Synthetic Aperture Radar Imaging With MATLAB Algorithms*, John Wiley & Sons, vol. 210, 2012.
- [24] V. C. Chen, *Inverse Synthetic Aperture Radar Imaging Principles, Algorithms and Applications*, The Institution of Engineering and Technology, 2014.
- [13] S. Luo, G. Bi, X. Lv and F. Hu, "Performance analysis on Lv distribution and its applications," *In Digital Signal Processing Journal*, vol. 23, no. 3, pp. 797-807, 2013.
- [14] Y. Wang, B. Zhao and J. Kang, "Asymptotic statistical performance of local polynomial Wigner distribution for the parameters estimation of cubic-phase signal with application in ISAR imaging of ship target," *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, vol. 8, no. 3, pp. 1087-1098, 2015.
- [15] X. Bai, R. Tao, Z. Wang and Y. Wang, "ISAR imaging of a ship target based on parameter estimation of multicomponent quadratic frequency modulated signals," *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 52, no. 2, pp. 1418-1429, Feb. 2014.
- [16] Z. Bao, G. Wang and L. Luo, "Inverse synthetic aperture radar imaging of maneuvering targets," *Optical Engineering*, vol. 37, pp. 1582-1588, May 1998.
- [17] Z. S. Liu, R. Wu and J. Li, "Complex ISAR imaging of maneuvering targets via the Capon estimator," *IEEE Transactions on Signal Processing*, vol. 47, pp. 1262-1271, 1999.
- [18] A. D. Lazarov, "Iterative MMSE method and recurrent Kalman procedure for ISAR image reconstruction," *IEEE*

زیرنویس‌ها

- ¹ Azimuth
- ² Synthetic Aperture Radar (SAR)
- ³ Inverse Synthetic Aperture Radar (ISAR)
- ⁴ Cross-range
- ⁵ Range-Doppler (RD)
- ⁶ Range Profiles
- ⁷ Translational Motion Compensation (TMC)
- ⁸ Coherent Processing Interval (CPI)
- ⁹ Rotational Motion Compensation (RMC)
- ¹⁰ Polar Formatting Algorithm (PFA)
- ¹¹ Linear Frequency Modulated (LFM)
- ¹² Cubic Phase Signal (CPS)
- ¹³ Quadratic Frequency Modulated (QFM)
- ¹⁴ Range Instantaneous Doppler (RID)
- ¹⁵ Prominent Point Processing (PPP)
- ¹⁶ Translation Velocity
- ¹⁷ Translation Acceleration
- ¹⁸ Angular Velocity
- ¹⁹ Angular Acceleration
- ²⁰ Stepped-Frequency Continuous Wave (SFCW)