تخمین ضریب مقیاس برد قائم در تصاویر رادار دهانه ترکیبی معکوس

سید محمد مهدی موسوی شوشتری[۱]، سید علیرضا سیدین[۲]

[۱]دانشجوی مقطع کارشناسی ارشد دانشگاه فردوسی مشهد، mousavishoushtari@mail.um.ac.ir

[۲]دانشیار گروه برق دانشگاه فردوسی مشهد، seyedin@um.ac.ir

چکیده – رادارها با پردازش زمان و طیف سیگنال دریافتی، اطلاعاتی از حضور، برد و سرعت هدف در اختیار قرار می‌دهند. علاوه بر این موارد، در رادار دهانه ترکیبی معکوس، تصویری دوبعدی از هدف ایجاد می‌شود که به کمک آن می‌توان نوع هدف را تشخیص داد. با مقیاس دهی به ابعاد این تصویر، تخمینی از اندازه هدف برحسب متر در دو بعد برد و برد قائم ایجاد می‌شود که یکی از پارامترهای مهم در شناسایی هدف است. در محاسبه ضریب مقیاس تصویر، نیاز به تخمین سرعت دورانی هدف است. سرعت دورانی، با معلوم بودن نرخ چیرپ فاز سیگنال بازگشتی از هدف دوار و موقعیت مرکز دوران قابل تخمین زدن است. در این مقاله با بهره‌گیری از تکنیک بیان تنک، روشی جدید در تخمین سرعت دورانی از روی فاز سیگنال بازگشتی ارائه شده است. شبیه‌سازی‌ها نشان می‌دهد دقت تخمین این روش با کاهش تعداد پالس‌های دریافتی از هدف، همچنان ثابت باقی مانده و نسبت به سایر روش‌ها عملکرد بهتری دارد.

کلید واژه: رادار دهانه ترکیبی معکوس- برد قائم- نرخ چیرپ- بیان تنک.

۱- مقدمه

رادار دهانه ترکیبی معکوس[۱](ISAR) نوعی از رادارهای تصویر بردار است که در آن، از اهداف متحرک، تصویری دو بعدی در راستای برد- برد قائم[۲] ساخته می‌شود. امکان تصویر سازی از فاصله دور و در شرایط مختلف جوی باعث شده تا این تصاویر در کاربردهای مختلف مورد استفاده قرار گیرند[۱]. مهم‌ترین کاربرد این تصاویر، تشخیص و شناسایی نوع هدف است[۲]. به منظور شناسایی نوع هدف بر اساس تصویر ISAR، لازم است تا ویژگی‌های مناسبی از تصویر استخراج شود. از مهم‌ترین ویژگی‌های قابل استخراج، شکل و ابعاد هدف است. روش‌های مختلفی به منظور افزایش کیفیت شکل تصویر و تخمین دقیق ابعاد هدف از تصویر مطرح شده است.

روش‌های مطرح شده در ساخت تصویر ISAR، تصاویری در حوزه زمان تند- فرکانس داپلر می‌سازند. لذا برای محاسبه ابعاد هدف از روی تصویر، لازم است تا ابعاد آن از زمان تند- فرکانس داپلر، به برد- برد قائم تبدیل شود تا واحد تصویر، از ثانیه – هرتز به متر – متر مبدل گردد. با ضرب کردن ضریب $c/2$ در بعد زمان تند تصویر(که در آن c سرعت نور است)، تغییر مقیاس صورت گرفته و زمان تند، به برد تبدیل می‌شود و واحد آن از ثانیه به متر مبدل می‌گردد. برای تبدیل بعد داپلر تصویر به برد قائم، لازم است تا بعد داپلر تصویر، در ضریب مقیاس برد قائم[۳] (CRS) ضرب شود. برای محاسبه CRS، لازم است تا سرعت چرخشی هدف تخمین زده شود. غیر همکارانه بودن[۴] حرکت هدف و طبیعت متغییر با زمان آن، از جمله چالش‌هایی است که موجب پیچیدگی تخمین سرعت دورانی می‌شود. روش‌های

[۱] Inverse Synthetic Aperture Radar

[۲] Range- CrossRange

[۳] Cross-Range Scaling

[۴] NonCooperative

متعددی برای تخمین سرعت دورانی، به منظور مقیاس دهی بردقائم تصاویر ISAR مطرح شده‌اند. این روش‌ها در دو بخش کلی قابل تقسیم بندی هستند. در بخش اول، سرعت دورانی هدف به کمک تنوع مکانی تعدادی رادار یا استفاده از داده‌های حسگر کمکی مانند رادار رهگیر تعیین می‌شود[۴-۳]. هزینه‌بر بودن و عدم دقت در تخمین سرعت دورانی هدف دوار، موجب شده تا در عمل از این روش کمتر استفاده شود. در بخش دوم، سرعت دورانی به کمک پردازش داده‌های جمع آوری شده تخمین زده می‌شود. مجموعه روش‌های بیان شده در این بخش، در سه دسته قابل دسته بندی است. در روش‌های دسته اول، سرعت دورانی با استفاده از کیفیت تصویر تشکیل شده تخمین زده می‌شود[۷-۵]. مهم‌ترین اشکال این روش‌ها در زیاد بودن حجم محاسبات در تخمین سرعت دورانی است. در روش‌های دسته دوم، سرعت دورانی، با استفاده از تطبیق تصویر بین تعدادی از مجموعه تصاویر متوالی، تخمین زده می‌شود[۸-۱۰]. روش‌های این دسته در مقایسه با دسته قبل، حجم محاسبات کمتری دارد اما مهم‌ترین چالش آن، وابستگی به وجود تعدادی تصویر است که در آن، هدف با سرعت ثابت چرخیده باشد. مانوری بودن حرکت هدف یا تغییر شکل تصویر به دلیل دوران و در سایه قرار گرفتن قسمتی از هدف ، از جمله دلایلی هستند که موجب عدم کارایی این روش در برخی سناریوهای کاری می‌شوند. در دسته سوم، سرعت دورانی هدف، از تاریخچه فاز سیگنال دریافتی تخمین زده می‌شود[۱۴-۱۱]. با توجه به اینکه این روش حجم محاسبات کمتری دارد، در کاربردهایی که در آن نیاز به تصویرسازی به هنگام[۵] وجود دارد، از آن استفاده می‌شود. مهم‌ترین چالشهای این روش، افت دقت آن در SNR های پایین و تعداد پالس ارسالی کم، انتخاب برد مناسب و نحوه تخمین سرعت دورانی از تاریخچه فاز شده است.

در این مقاله، روشی جدید در محاسبه ضریب مقیاس تصویر ISAR ارائه می‌شود که در آن ضریب مقیاس، با استفاده از تاریخچه فاز سیگنال دریافتی محاسبه می‌شود. در این روش، ابتدا تعدادی سبد برد مناسب با استفاده از معیار واریانس پوش سبد برد انتخاب می‌شوند و در مرحله بعد، از با استفاده از تاریخچه فاز سبدهای برد انتخاب شده، سرعت دورانی هدف با استفاده از تکنیک بیان تنک[۶] (SR) تخمین زده می‌شود. نتایج نشان می‌دهد با کاهش تعداد پالس‌های دریافتی از هدف، تخمین سرعت دورانی با استفاده از این روش ، در مقایسه با سایر روش‌های تخمین سرعت دورانی، دقت بهتر و پایدار تری دارد. لذا امکان استفاده از آن در داده‌های دهانه تنک(SA)[۷] نیز وجود دارد.

در ادامه و در بخش ۲-۱ پس از مدلسازی فاز سیگنال دریافتی از هدف، نحوه محاسبه ضریب مقیاس برد قائم از روی تاریخچه فاز دریافتی بیان می‌شود. در ادامه این بخش ابتدا تکنیک SR به اختصار بیان شده و در بخش ۲-۳، تخمین سرعت دورانی از سیگنال دریافتی، به صورت یک مسئلهSR مدلسازی می‌شود. در بخش ۳ الگوریتم پیشنهادی جهت تخمین سرعت دورانی بیان، و نتایج آن در بخش ۴ نمایش داده شده است. در بخش ۵ جمع بندی مطالب، ارائه شده است.

۲- مدل سیگنال بازگشتی از هدف و تخمین سرعت دورانی

۲-۱- مدلسازی سیگنال دریافتی

تصویر ISAR، تصویری دوبعدی از هدف سه بعدی است که نشان دهنده موقعیت پراکنده سازهای آن در صفحه برد-داپلر یا صفحه تصویر[۸] است. حرکت پایه برای تصویرسازی ISAR و تفکیک پراکنده سازهای هدف در برد قائم، حرکت دورانی با سرعت ثابت است. مطابق شکل ۱ با چرخش هدف حول مرکز دوران و با سرعت چرخشی Ω، پراکنده سازهایی از هدف که در

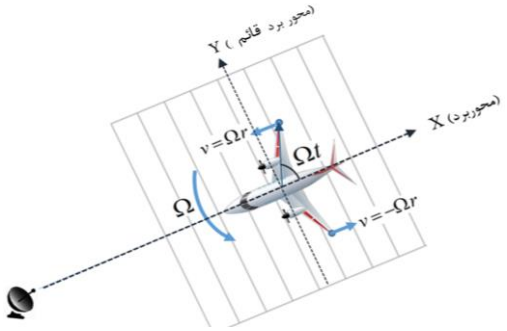
[۵] Real Time

[۶] Sparse Respresentation

[۷] Sparse Aperture

[۸] Image Plane

یک برد واقع شده‌اند، سرعت خطی متفاوت و در نتیجه فرکانس داپلر متفاوتی پیدا می‌کنند. لذا می‌توان با پردازش داپلر داده‌های دریافتی، نقاط موجود در یک برد را از یکدیگر تفکیک کرد و تصویر هدف در برد قائم را تشکیل داد.



شکل ۱: حرکت دورانی هدف و تفکیک اهداف واقع در یک برد با پردازش داپلر داده‌های دریافتی

در سناریوی واقعی، هدف رفتاری غیر همکارانه دارد و حرکت آن می‌تواند شامل حرکت‌های دورانی و انتقالی باشد. در نتیجه لازم است قبل از پردازش داپلر داده‌های دریافتی، تأثیر حرکت انتقالی از داده‌های خام حذف شود. این کار توسط روش‌های جبران سازی حرکت انجام می‌گیرد. پس از جبران سازی داده دریافتی و با اعمال تبدیل فوریه می‌توان اهداف را در فرکانس داپلر، از یکدیگر تفکیک کرد. با در نظر گرفتن هندسه شکل ۱، فاز داده جبران سازی شده در پروفایل برد k ام برابر است با[۱۴] :

(۱)

$$S_k(t) = \sum_i A_{i,k} \exp\left(-j2\pi \frac{2}{\lambda}\left[x_k.\cos(\Omega t) + y_i \sin(\Omega t)\right]\right)$$

در رابطه فوق x_k و y_i به ترتیب موقعیت برد و برد قائم پراکنده ساز از مرکز دوران، $A_{i,k}$ ضریب بازتاب پذیری پراکنده ساز، Ω سرعت دورانی هدف و λ طول موج سیگنال ارسالی است. با در نظر گرفتن حرکت چرخشی یکنواخت و بازه کوتاه جمع آوری داده، به طوری که کل چرخش هدف در طول زمان پردازش داده‌ها کمتر از ۵ درجه باشد، سیگنال فوق به شکل زیر قابل بازنویسی است[۲].

$$S_k(t) = \sum_i A_{i,k} \exp\left(-j2\pi \frac{2}{\lambda}\left[x_k.\left(1-\frac{(\Omega t)^2}{2}\right) + y_i \Omega t\right]\right) \quad (۲)$$

با اعمال تبدیل فوریه به داده‌های واقع در یک برد، اهداف در فرکانس داپلر از یکدیگر تفکیک می‌شوند. با توجه به رابطه فوق، رابطه فرکانس داپلر و موقعیت برد قائم هدف برابر است با:

$$f_d = \frac{2\Omega}{\lambda} y_{Cross-Range} \quad (۳)$$

همان‌طور که از رابطه فوق پیداست برای تبدیل بعد داپلر تصویر به برد قائم، لازم است تا سرعت چرخشی هدف تخمین زده شود. با توجه به رابطه *(۲)*، سیگنال دریافتی در هر برد، مجموعی از سیگنال‌های چیرپ با نرخ چیرپ ثابت است. ارتباط نرخ چیرپ این سیگنال‌ها و سرعت دورانی هدف در رابطه *(۴)* نشان داده شده است. با توجه به این رابطه می‌توان با تخمین نرخ چیرپ، سرعت دورانی هدف را تعیین کرد.

$$Estimated\ Chirp\ Rate = \frac{2x_k\Omega^2}{\lambda} \quad (۴)$$

نکته‌ای که در رابطه فوق وجود دارد آن است که x_k موقعیت پراکنده ساز نسبت به مرکز دوران است. از آنجایی که موقعیت مرکز دوران نامعلوم است، تخمین سرعت دورانی از یک پروفایل برد ممکن نیست. به این منظور، در [۱۲] نرخ چیرپ از اختلاف فاز دو پروفایل برد تخمین زده شده و در[۱۴,۱۳] ، نویسنده از رابطه خطی بین برد- نرخ چیرپ تخمینی استفاده کرده و پس از تخمین نرخ چیرپ برای تعدادی از سبدهای برد، شیب خط نمودار برد- نرخ چیرپ را تخمین زده و بر اساس آن سرعت دورانی هدف را محاسبه کرده است نشان داده استفاده از اطلاعات چند سبد برد، موجب افزایش دقت تخمین در SNR های کم می‌شود.

۲-۲- معرفی تکنیک SR

SR یکی از تکنیک هایی است که در پردازش سیگنال در حوزه‌های مختلفی نظیر فشرده سازی-نمونه برداری- کاهش نویز-طبقه بندی و استخراج ویژگی مورد استفاده قرار گرفته است. هدف این تکنیک، پیدا کردن بردار x در مسئله زیراست.

$$b_{1\times m} = x_{1\times n} A_{n\times m} \qquad m << n \quad (۵)$$

در رابطه فوق b نمونه‌های سیگنال و A ماتریس دیکشنری است. SR با در نظر گرفتن قید تنک‌ترین پاسخ، x را با استفاده از حل مسئله زیر پیدا می‌کند.

$$\min\{\| x \|_0\} \quad \text{S.t.}\{b = xA\} \quad (۶)$$

با توجه به حل غیرعملی مسئله نرم صفر، با در نظر گرفتن شرایط اشاره شده در [۱۵]، می‌توان به‌جای نرم صفر، از نرم یک استفاده نمود و مسئله معادل زیر را برای داده‌های نویزی حل کرد.

$$\hat{x} = \arg\min(\| b - xA \|_2 + \| x \|_1) \quad (۷)$$

۲-۳- مدلسازی تخمین سرعت دورانی به صورت مسئله SR

استفاده از تکنیک SR امروزه در کاربردهای راداری گسترش زیادی پیدا کرده است. در ISAR نیز از این روش در تصویرسازی به وفور استفاده شده است. مهم‌ترین مزیت استفاده از این روش در تصویرسازی ISAR، دستیابی به تصویری با قدرت تفکیک مناسب، پایداری کیفیت تصویر تشکیل شده در برابر کاهش تعداد نمونه‌های جمع آوری شده و تصویرسازی مناسب در SNR های کم است. با توجه به رابطه(۴) مشاهده می‌شود برای تخمین سرعت دورانی می‌توان از تخمین نرخ چیرپ استفاده کرد. با توجه به اینکه همه پراکنده سازهای واقع در یک سبد برد، نرخ چیرپ یکسانی دارند و تفاوت آن‌ها در فرکانس داپلر است، تجزیه سیگنال بازگشتی از هدف، روی دیکشنری متشکل از سیگنال‌هایی با نرخ چیرپ مختلف، تنک است. با استفاده از این نکته می‌توان نرخ چیرپ سیگنال دریافتی را با استفاده از تکنیک SR پیدا کرد. رابطه یک سیگنال چیرپ به صورت زیر قابل بیان است.

$$S(t)=\exp\left(-j2\pi[\alpha+f_d\,t+\gamma t^2]\right) \qquad (۸)$$

که در آن t بردار زمان گسسته و شامل m عنصر در نظر گرفته می‌شود. با صرف نظر از جمله فاز ثابت، رابطه فوق را می‌توان به صورت حاصلضرب درایه به درایه دو بردار و به صورت زیر در نظر گرفت.

$$\begin{aligned} &S_{1\times m}=B_{1\times m}.A_{1\times m} \\ &A=\left(-j2\pi f_d\,t\right)\ ,\ B=\left(-j2\pi\gamma t^2\right) \end{aligned} \qquad (۹)$$

با توجه به ماهیت تنک بیان بردار B روی دیکشنری سیگنال نرخ چیرپ، می‌توان آن را به صورت زیر باز نویسی کرد.

$$B_{1\times m}=x_{1\times p}C_{p\times m} \qquad \|x\|_0<<p \qquad (۱۰)$$

که در آن C دیکشنری مجموعه سیگنال چیرپ است و به صورت زیر ساخته می‌شود:

$$\begin{aligned} &C(i,j)=\exp(-j2\pi\gamma_i t_j^{\,2}) \\ &1\le i\le p\ ,\ 1\le j\le m \end{aligned} \qquad (۱۱)$$

با جایگذاری رابطه (۹) در (۱۰) و قطری کردن بردار A به منظور حذف عملگر ضرب درایه به درایه داریم:

$$S_{1\times m}=B_{1\times m}.A_{1\times m}=(\mathrm{x}_{1\times p}C_{p\times m})\mathrm{D}_{m\times m}(A) \qquad (۱۲)$$

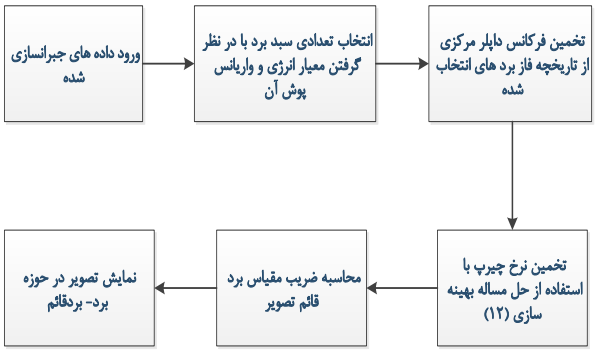
در رابطه فوق، $D(A)$ ماتریس قطری بردار A است. با توجه به اینکه سیگنال رابطه *(۲)* مجموعی از سیگنال‌های نرخ چیرپ با نرخ چیرپ ثابت است، لازم است تا پس از تخمین فرکانس‌های داپلر مرکزی از تصویر، بردار A به صورت مجموع سیگنال‌هایی با فرکانس داپلر ثابت ساخته شود. پس از آن، به کمک تکنیک SR نرخ چیرپ، با استفاده از حل معادله بهینه سازی زیر تخمین زده می‌شود.

$$\hat{\mathrm{x}}=\arg\min(\|S-\mathrm{x}\,C\,\mathrm{D}(A)\|_2+\|\mathrm{x}\|_1) \qquad (۱۳)$$

با توجه به اینکه طبق مدل دریافتی، سیگنال فاز درون سبد برد دارای یک نرخ چیرپ است، مقدار نرم صفر بردار x در رابطه فوق ۱ است. لذا شرط اشاره شده در [۱۵] با تقریب زیادی برآورده می‌شود و پاسخ مسئله فوق یکتا خواهد بود.

۳- روش پیشنهادی در تخمین ضریب مقیاس برد قائم

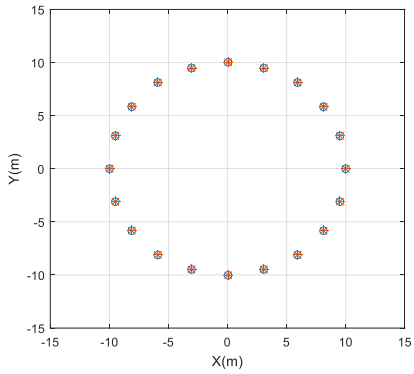
در این روش فرض بر آن است که عملیات جبرانسازی حرکت انتقالی روی داده‌های خام انجام شده و تصویر هدف بعنوان ورودی به الگوریتم وارد شده است. به منظور تخمین سرعت دورانی در این روش، ابتدا لازم است تا تعدادی سبد برد مرجع انتخاب شوند. معیار در نظر گرفته شده برای انتخاب برد مرجع، واریانس پوش سبد برد در نظر گرفته شده است. مهم‌ترین تفاوت روش پیشنهادی با روش‌های [۱۴-۱۱]، نحوه تخمین نرخ چیرپ از سبد برد انتخاب شده است. در روش پیشنهادی، نرخ چیرپ، به کمک تکنیک SR و با حل مسئله (۱۳)تخمین زده می‌شود. برای این منظور، ابتدا فرکانس داپلر سیگنال، با استفاده از FFT تخمین زده می‌شود. در گام بعد، بردار A ساخته شده و عناصر آن روی قطر ماتریس مربعی قرار داده می‌شود. با استفاده از جعبه ابزار CVX، معادله بهینه سازی (۱۳)حل شده و با توجه به پاسخ آن، نرخ چیرپ تخمین زده می‌شود. در مرحله بعد، شیب نمودار نرخ چیرپ- برد با تخمینگر LSE تخمین زده شده و بر اساس آن، سرعت دورانی هدف و در نتیجه ضریب مقیاس برد قائم، محاسبه می‌شود. بلوک دیاگرام روش پیشنهادی در شکل۲ نمایش داده شده است. از آنجایی که تنکی پاسخ، وابسته به نحوه ساخت دیکشنری است، قرار دادن مقداری اشتباه در ساخت بردار A، منجر به دور شدن پاسخ از مقدار بهینه خود می‌شود. بدین منظور در این روش، برای تخمین بهتر فرکانس مرکزی، ابتدا یک پنجره در داده‌های سبد برد ضرب می‌شود و فرکانس‌های مرکزی از تبدیل فوریه آن استخراج می‌گردد.



شکل۲: بلوک دیاگرام روش پیشنهادی در مقیاس دهی تصویر ISAR

۴- نتیجه شبیه‌سازی

در این بخش نتایج شبیه‌سازی روش پیشنهادی روی داده‌های شبیه‌سازی شده نشان داده شده و نتایج آن با روش‌های [۱۱]و [۱۴] مقایسه شده است. در این شبیه‌سازی، هدف، به شکل یک دایره با شعاع ۱۰متر و متشکل از ۲۰ پراکنده ساز نقطه‌ای مطابق شکل ۳ در نظر گرفته شد. پارامترهای شبیه‌سازی، در جدول ۱ نشان داده شده است.

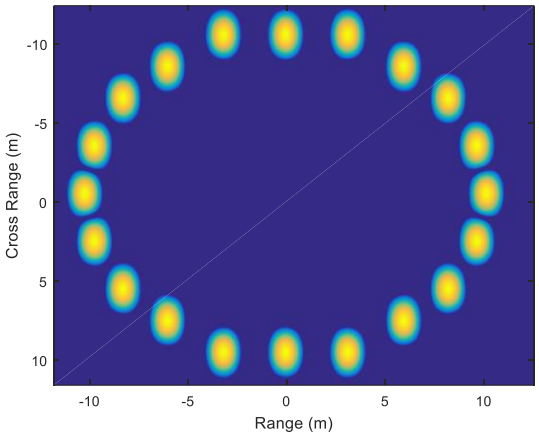


شکل ۳: هدف در نظر گرفته شده در شبیه‌سازی

جدول ۱: مقادیر پارامترهای در نظر گرفته شده در شبیه‌سازی

پارامتر	مقدار
موقعیت رادار	[0 0 0]
فرکانس مرکزی	10 GHz
پهنای باند	150 MHz
PRF	1024 Hz
موقعیت هدف	[2000 0 0]
سرعت حرکت دورانی	3 deg/sec
CPI	0.5 Sec
SNR	10 dB

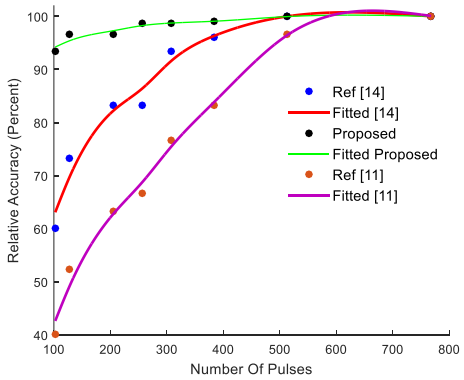
پس از جمع آوری داده و اجرای جبرانسازی حرکت، تصویر هدف در حوزه برد داپلر، قابل تشکیل است. پس از تشکیل تصویر، باید ابعاد آن را مقیاس دهی کرد. طبق روش پیشنهادی، تعداد ۵ سبد برد با در نظرگرفتن معیار واریانس پوش سبدهای برد، جهت تخمین سرعت دورانی انتخاب گردید. پس از آن، با استفاده از روش پیشنهادی، نرخ چیرپ بردهای انتخاب شده تخمین زده شدند و به کمک آن سرعت دورانی و ضریب مقیاس بردقائم محاسبه گردید. شکل ۴ تصویر هدف را با ابعاد برد-بردقائم نشان می‌دهد.



شکل ۴: تصویر ISAR هدف در برد- بردقائم با استفاده از روش پیشنهادی

در این تصویر، اندازه هدف در برد قائم برابر ۲۱ و در برد برابر ۱۹ متر است که به ابعاد واقعی آن نزدیک است.

شکل۵، دقت نسبی تخمین سرعت دورانی تخمین زده شده را به ازای تعداد پالس‌های دریافتی نشان می‌دهد. در این شکل، دقت نسبی، برابر حاصل نسبت خطای تخمین به مقدار واقعی است. همانطور که از این شکل پیداست، با کاهش تعداد پالس‌های زمان آهسته، روش پیشنهادی نسبت به [۱۱] و [۱۴]، تخمین دقیق‌تر و پایدار تری از سرعت دورانی می‌زند. دلیل این امر، عملکرد مناسب تکنیک SR در بازیابی اطلاعات از حجم کم داده‌های جمع آوری شده است.



شکل ۵: دقت تخمین سرعت دورانی با تغییر SNR در روش‌های [۱۱]، [۱۴] و روش پیشنهادی.

جدول ۲، مدت‌زمان اجرای روش‌های مختلف را نشان می‌دهد. با توجه به این جدول مشاهده می‌شود مدت‌زمان اجرای روش [۱۴]

به دلیل استفاده از الگوریتم FFT کمترین مقدار را دارد. زمان اجرای روش پیشنهادی و [۱۱] که در آن از تبدیل فوریه کسری استفاده شده است، در حدود یکدیگر است. زیاد بودن زمان روش پیشنهادی، به دلیل فرایند تخمین با استفاده از حل معادله بهینه سازی است. می‌توان با استفاده از روش مناسب در حل بهینه سازی، مدت زمان را کاهش داد.

جدول ۲: مدت زمان اجرای روش‌های تخمین سرعت دورانی

روش	مرجع [۱۱]	روش پیشنهادی	مرجع [۱۴]
مدت زمان اجرا (ثانیه)	۳٫۵	۳٫۸	۰٫۵

لازم به ذکر است در روش پیشنهادی، نحوه تخمین فرکانس داپلر مرکزی در ساخت دیکشنری، تأثیر مستقیمی در تخمین درست سرعت دورانی خواهد داشت و عدم تخمین مناسب آن، منجر به عدم تنکی پاسخ و در نتیجه عدم همگرایی مسئله می‌شود.

۵- نتیجه‌گیری

در این مقاله روشی جدید برای محاسبه ضریب مقیاس برد قائم در تصاویر ISAR، برمبنای تخمین نرخ چیرپ ارائه شد. مهم‌ترین تفاوت این روش با دیگر روش‌ها، نحوه انتخاب سبد برد مناسب و نحوه تخمین نرخ چیرپ است. در روش پیشنهادی، نرخ چیرپ به کمک تکنیک SR تخمین زده می‌شود. مهم‌ترین مزیت این روش، پایداری عملکرد تخمین با کاهش تعداد پالس‌های دریافتی از هدف است. همچنین چالش این روش، نحوه ساخت دیکشنری و در نظر گرفتن فرکانس داپلر در ساخت آن است. عدم ساخت مناسب دیکشنری منجر به عدم تنکی پاسخ و در نتیجه عدم تخمین مناسب ضریب مقیاس بردقائم تصویر خواهد شد.

مراجع

[1] V. C. Chen, M.Martorella," Inverse Synthetic Aperture Radar Imaging Principles, Algorithms and Applications", SciTech, 2014.

[2] C. ÖZDEMIR," Inverse Synthetic Aperture Radar Imaging with MATLAB Algorithms", Turkey: Wiley, 2012.

[3] G.Wang. "Reseach on motion and system compensation of ISAR" Ph.D. Dissertation, Harbin Institute of Technology, pp.70-85, 1996.

[4] G.Wang, X. G.Xia, V. C. Chen, "Three-dimensional ISAR imaging of maneuvering targets using three receivers." *IEEE Transactions on Image Processing*, 10(3), pp.436-447. 2001.

[5] B.C.Flores, A.Ugarte, "Refinement of range–Doppler imagery by feedback control" *.SPIE—Automatic Object Recognition, volIII. 1960, pp. 36–46*,1993.

[6] B.Jiu, H.Liu, L.Zhang, Y.Cong, Z. Bao, "Joint ISAR Imaging and Cross-Range Scaling Method Based on Compressive Sensing With Adaptive Dictionary*." IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 63(5), pp.2112-2121*, 2015.

[7] J.Sheng, M.Xing, L.Zhang, M. Q.Mehmood, L. Yang. "ISAR cross-range scaling by using sharpness maximization." *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 12(1), pp. 165-169*, 2015.

[8] C.M.Yeh, J.Xu, Y.N. Peng, X.T.Wang, "Cross-Range Scaling for ISAR Based on Image Rotation Correlation",*IEEE GEOSCIENCE AND REMOTE SENSING LETTERS,6(3),pp.597-601*,2009.

[9] Z. Xu, L.Zhang, M.Xing, "Precise Cross-Range Scaling for ISAR Images Using Feature Registration*", IEEE GEOSCIENCE AND REMOTE SENSING LETTERS, 11(10) ,pp.1792-1796*,2014.

[10] B.S.KANG,J.H. BAE,M.S.KANG,E.YANG,K.T. KIM, "ISAR Cross-Range Scaling via Joint Estimation of Rotation Center and Velocity*", IEEE TRANSACTIONS ON AEROSPACE AND ELECTRONIC SYSTEMS,52(4),pp.2023-2029.*2016.

[11] J.Gao, F.Su , "A new cross-range scaling algorithm based on FRFT. " *In IEEE 10th INTERNATIONAL CONFERENCE ON SIGNAL PROCESSING PROCEEDINGS (pp. 2043-2046)*. 2010, October.

[12] S. B.Peng, J.Xu, Y. N.Peng, J. B.Xiang, X. G.Xia, "Inverse synthetic aperture radar rotation velocity estimation based on phase slope difference of two prominent scatterers." *IET radar, sonar & navigation, 5(9), pp.1002-1009.* 2011.

[13] T.Yang, L.Yang, G.Bi, "ISAR cross-range scaling algorithm based on LVD." *In Telecommunications and Signal Processing (TSP), 2016 39th International Conference on (pp. 643-647).* 2016, December.

[14] M. Martorella, "Novel approach for ISAR image cross-range scaling. " *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 44(1), pp.281-294.* 2008.

[15] Donoho, David L., and Michael Elad. "Optimally sparse representation in general (nonorthogonal) dictionaries via ℓ1 minimization." *Proceedings of the National Academy of Sciences* 100.5,pp.2197-2202. 2003: