

مقایسه الگوریتم‌های پردازش سیگنال به منظور تشکیل تصویر سه بعدی رادار روزنه مصنوعی برای سامانه زمینی در باند میلیمتری

سیدبنیامین حسینی^۱، جلال امینی^{۲*}، صفی الدین صفوی نائینی^۳

۱- دانشجوی دکتری سنجش از دور، دانشکده مهندسی نقشه‌برداری و اطلاعات مکانی، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران
۲- استاد گروه فتوگرامتری و سنجش از دور، دانشکده مهندسی نقشه‌برداری و اطلاعات مکانی، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران
۳- استاد دانشکده برق و کامپیوتر، دانشگاه واترلو کانادا

تاریخ دریافت مقاله: ۱۴۰۰/۰۷/۱۲ تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۱/۰۲/۰۷

چکیده

این مقاله به بررسی عملکرد قابلیت تصویربرداری رادارروزنه‌مصنوعی سه بعدی در سامانه زمینی با طول موج میلیمتری می‌پردازد. افزایش کاربردهای سنجش‌ازدور راداری و نیاز به داده‌های متنوع، توجه زیادی را به توسعه سامانه‌های رادار زمینی جلب کرده‌است. سامانه‌های رادارروزنه‌مصنوعی زمینی (GBSAR) دارای زاویه دید مناسب، نرخ تصویربرداری بالا، و هزینه ساخت و نگهداری کم هستند. با این حال، طول روزنه مصنوعی در سامانه‌های GBSAR محدود است و علاوه بر این، اختلاف بین برد نزدیک و دور، درمقایسه با سامانه‌های هوابرد یا ماهواره‌ای، زیاد است. موارد ذکرشده در سیگنال‌های دریافتی و در نتیجه کیفیت تصویر نهایی تأثیرگذار هستند. در این مقاله سه الگوریتم پردازش سیگنال بک‌پروجکشن (BP)، تبدیل فوریه (FT)، و رنج-مایگریشن (RMA) برای تشکیل تصویر سه بعدی در سامانه GBSAR توسعه‌پیدا کرده و بررسی می‌شوند. سامانه مورد نظر در باند W فعالیت می‌کند و از دو ریل افقی و عمودی به منظور ایجاد روزنه مصنوعی بهره می‌برد. الگوریتم‌های ذکرشده، توسط دو آزمایش مختلف در محیط شبیه‌سازی مورد بررسی و ارزیابی قرار می‌گیرند. همچنین، از چهار معیار تفکیک‌پذیری زاویه، $PSLR$ ، $ISLR$ و SCR جهت ارزیابی و مقایسه نتایج بهره گرفته می‌شود. طبق نتایج شبیه‌سازی هر سه الگوریتم نتایج قابل قبولی را در تشکیل تصویر سه بعدی از سیگنال خام بدست آوردند. با مشاهده تصاویر حاصل از الگوریتم RMA می‌توان دریافت که در راستای عمودبر برد با افزایش فاصله هدف از مرکز تصویر، شدت انرژی بازتابی توسط این الگوریتم ضعیف‌تر از دو الگوریتم دیگر است. علاوه بر این، تفکیک‌پذیری زاویه در الگوریتم RMA نسبت به تغییر برد اهداف پایدار است در حالیکه دو الگوریتم دیگر در فواصل نزدیک تفکیک‌پذیری ضعیفی را به همراه دارند. در بررسی فشرده‌سازی انرژی سیگنال، تصویر الگوریتم RMA نتایج ضعیف‌تری را به همراه داشت که باعث نتایج نامطلوب این الگوریتم در فواصل دور گردید. دو الگوریتم BP و FT در اکثر موارد نتایج مشابهی را به همراه داشتند که می‌تواند به علت شباهت در رویکرد هر دو الگوریتم باشد. الگوریتم FT برای سامانه مورد نظر تفکیک‌پذیری بهتری را به همراه داشت و درحالی که BP عملکرد مناسب‌تری در فشرده‌سازی به همراه داشت.

کلید واژه‌ها: الگوریتم رنج-مایگریشن، الگوریتم بک‌پروجکشن، تبدیل فوریه، حوزه فرکانس، حوزه زمان

* نویسنده مکاتبه کننده: تهران، تقاطع خیابان کارگر شمالی و جلال آل احمد، دانشکده فنی دانشگاه تهران، دانشکده نقشه‌برداری و اطلاعات مکانی، گروه فتوگرامتری و سنجش از دور.
تلفن: ۰۲۱۶۱۱۴۳۷۸

۱- مقدمه

امروزه سامانه‌های تصویربرداری رادار روزنه مصنوعی^۱ (SAR) در بخش‌های وسیعی از سنجش‌ازدور کاربرد دارند. برتری اصلی تصویربرداری رادار روزنه مصنوعی نسبت به رادار معمولی را می‌توان در قابلیت تفکیک-پذیری اهداف در راستای عمود بر برد دانست. این برتری با استفاده از هندسه تصویربرداری این نوع سامانه‌ها و بهره‌گیری از روش‌های پردازش سیگنال به-وجود می‌آید.

در تصویربرداری رادار روزنه مصنوعی، سامانه در راستای عمود بر راستای برد و معمولاً در مسیری خطی حرکت می‌کند. در حین حرکت، سنجنده رادار دائماً مشغول به ارسال و دریافت سیگنال بازتابی از محیط پایشی است [۱]. در نتیجه، داده ذخیره‌شده بصورت ماتریسی چندبعدی متشکل از راستای برد و راستاهای عمود بر برد خواهد بود. با این حال، در سیگنال خام دریافتی اهداف قابل تفکیک نیستند و انرژی بازتابی از آن‌ها در داخل ماتریس داده پراکنده است [۲].

الگوریتم‌های پردازش سیگنال متفاوتی با هدف رسیدن به تصویر متمرکز از سیگنال خام توسعه یافته‌اند. بطور کلی می‌توان روند کار این الگوریتم‌ها را به دو حوزه زمان و فرکانس تقسیم‌بندی نمود [۳]. از جمله این‌ها می‌توان به الگوریتم‌های کورلیشن در زمان TDC^2 و بک‌پروجکشن^۳ (BP) در حیطه زمان و الگوریتم‌های RDA^4 ، PFA^5 ، CSA^6 و RMA^7 در حیطه فرکانس اشاره نمود [۴، ۵، ۶]. عموماً الگوریتم‌های حیطه زمان به علت استفاده از حلقه‌های تکرار دارای بار محاسباتی بالاتری نسبت به الگوریتم‌های حیطه

فرکانس هستند. با این حال، الگوریتم‌های حیطه فرکانس برخلاف الگوریتم‌های حیطه زمان عملکرد مناسبی در تصویربرداری با هندسه پیچیده و روزنه مصنوعی غیرخطی ندارند [۷].

الگوریتم‌های مذکور عموماً کاربرد زیادی در سامانه‌های ماهواره‌ای و هواپرد دارند. به عنوان مثال، کاربرد و توسعه الگوریتم‌های BP و RDA برای سامانه هوایی با موج پیوسته مدوله‌شده در باند X در پژوهش [۸] ارائه شده است. طبق این پژوهش، الگوریتم BP با توجه به اینکه در حوزه زمان پردازش می‌شود، می‌تواند با اطلاعات حرکتی سکو در طول پرواز تلفیق‌شده تا بصورت همزمان فرایند تشکیل تصویر و تصحیح خطاهای حرکتی نیز صورت بگیرد. در مقابل، الگوریتم RDA با تبدیل فوریه و انتقال به فضای فرکانسی، قابلیت حل همزمان تشکیل تصویر و تصحیح خطاهای حرکتی را دارا نیست. بطور دقیق‌تر می‌توان دو مورد بار محاسباتی الگوریتم تشکیل تصویر و خطاهای ناشی از جابجایی سنجنده در طول پرواز را دو چالش اصلی در سامانه‌های هواپرد SAR نام برد. مقاله [۳] مروری بر کاربرد الگوریتم‌های ذکرشده، در سامانه‌های هواپرد با تفکیک‌پذیر بسیار بالا از نقطه‌نظر تصحیحات حرکتی می‌پردازد. بطوریکه الگوریتم‌های حوزه فرکانس با وجود اینکه بصورت جزئی اثرات حرکتی را رفع می‌کنند ولی در سامانه‌های با تفکیک‌پذیری بالا این تصحیح به-تنهایی کافی نیست و همچنان تصحیح خطاهای حرکتی به عنوان چالشی وابسته به سامانه‌های ناوبری با دقت بالا باقی مانده است.

در سال‌های اخیر با افزایش کاربرد سنجش از دور راداری و افزایش نیاز به داده‌های متنوع راداری، توسعه سامانه‌های رادار روزنه مصنوعی زمینی ($GBSAR^8$) توجهات زیادی را جلب کرده است [۹ و ۱۰]. سامانه‌های GBSAR، دارای قابلیت‌ها و برتری‌های زیادی در مقایسه‌های سامانه‌های هواپرد و ماهواره‌ای هستند.

⁸ Ground-Based SAR (GBSAR)

¹ Synthetic Aperture Radar

² Time Domain Correlation

³ Backprojection

⁴ Range-Doppler Algorithm

⁵ Polar Format Algorithm

⁶ Chirp Scaling Algorithm

⁷ Range Migration Algorithm

اتمسفری، تکرار زمانی پایین، و خطاهای ناشی از جابجایی سنجنده را تا حد قابل توجهی رفع می‌کنند. در مقابل، از چالش‌های تصویربرداری SAR در این نوع سامانه‌ها می‌توان به محدود بودن طول روزنه مصنوعی اشاره نمود که باعث می‌شود تا در مقایسه با سایر سامانه‌های هوابرد و ماهواره‌ای که از طول روزنه مصنوعی نامحدود و بسیار بلندتر بهره می‌برند، دارای تفکیک‌پذیری زاویه‌ای کمتری باشد. همینطور، این محدودیت باعث می‌گردد تا تفکیک‌پذیری زاویه‌ای وابسته به برد اهداف باشد، بطوری که اهداف در فواصل دورتر تفکیک‌پذیری کمتری خواهند داشت [۱۶]. چالش بعدی را می‌توان به محدوده وسیع برد کمینه و بیشینه قرارگیری اهداف در دید سنجنده زمینی اشاره نمود که باعث می‌شود تا اهداف در محدوده میدان نزدیک سنجنده نیز در تصویر قرار گیرند. در حالیکه، در میدان نزدیک، فرض صفحه‌ای بود موج برقرار نبوده و هندسه تصویربرداری راداری ایده‌آلی محسوب نمی‌شود [۱۷]. بنابراین، الگوریتم تشکیل تصویر مورد استفاده باید از جهت میزان حساسیت به چالش‌های مذکور بررسی شود.

در سال‌های اخیر، الگوریتم‌های متنوعی به‌منظور بهبود تصویربرداری در سامانه‌های زمینی، ارائه شده‌اند. به عنوان مثال، زو و ساتو (۲۰۱۹) الگوریتمی بر مبنای تبدیل فوریه فرکشنال ارائه کرد که با وجود بار محاسباتی بیشتر، در مقایسه با الگوریتم تشکیل تصویر فوریه عملکرد قوی‌تری در فشرده‌سازی اهداف در فواصل نزدیک ارائه می‌کرد [۱۸]. همینطور، در سال‌های اخیر، استفاده از الگوریتم‌های تخمین سیگنال و استخراج اهداف مانند، الگوریتم‌های کیون^۳، MUSIC^۴، و حسگری فشرده^۵ نیز در تصویربرداری سامانه‌های زمینی رواج پیدا کرده‌اند. الگوریتم‌های مذکور عموماً با

سامانه‌های زمینی عموماً زاویه دید مناسب‌تر و متمرکزتری را در مناطق با مساحت کوچک دارند. نرخ تولید داده در سامانه‌های زمینی می‌تواند در حدود چند ساعت یا حتی در بعضی از سامانه‌ها در کسری از ثانیه باشد. علاوه بر این موارد، سامانه‌های زمینی با توجه به بهره بردن از سنجنده با توان پایین، هزینه ساخت و نگهداری بسیار کمتری دارند [۱۱ و ۱۲].

در سامانه GBSAR بطور معمول سنجنده رادار بر روی یک ریل مکانیکی قرار می‌گیرد و سپس با گام‌های معینی در مسیری خطی عمود بر راستای برد حرکت می‌کند. در هر یک از این گام‌ها فرایند ارسال، دریافت، و ذخیره سیگنال بازتابی تکرار می‌شود. بطور متداول سامانه‌های GBSAR از ریلی یک‌بعدی بهره‌مند هستند که باعث تفکیک‌پذیری اهداف پراکنده‌گر در راستاهای برد و آزیموت افقی می‌شود [۱۳ و ۴]. با این حال، در سال‌های اخیر با پیشرفت سامانه‌های زمینی، ارائه مدل‌های متنوعی از روزنه مصنوعی نیز مود توجه قرار گرفته است [۹]. به عنوان مثال، پژوهشگران در مقاله [۱۵] به توسعه سامانه زمینی در باند L با استفاده از ریلی دوبعدی با هدف تصویربرداری از درختان پرداختند.

با وجود قابلیت‌های GBSAR، این سامانه‌ها دارای محدودیت در ایجاد طول روزنه مصنوعی هستند. این مورد باعث تحت تاثیر قراردادن تفکیک‌پذیری اهداف در راستای عمود بر برد می‌شود. علاوه بر این، برخلاف سامانه‌های هوابرد و ماهواره‌ای، در تصویربرداری این نوع سامانه‌ها، برد دور^۱ چندین برابر برد نزدیک^۲ است. نکات ذکر شده، تاثیر مستقیمی در کیفیت تصویر نهایی راداری دارند [۱۶]. از این رو، بررسی و ارزیابی عملکرد الگوریتم‌های تشکیل تصویر، قبل بهره‌برداری از تصویر GBSAR از اهمیت بالایی برخوردار است.

همانطور که اشاره شد، سامانه‌های زمینی چالش اصلی مربوط به سامانه‌های هوابرد و ماهواره‌ای یعنی اثرات

^۳ Capon^۴ Multiple Signal Classification^۵ Compressive sensing^۱ Far range^۲ Near range

عملکرد الگوریتم‌های پردازش سیگنال به منظور تشکیل تصویر راداری از سیگنال خام بیان می‌شود.

۲-۱- هندسه تصویربرداری رادار روزنه مصنوعی در سامانه زمینی

یک سامانه راداری بطور معمول تنها قابلیت تشخیص و تفکیک اهداف در راستای دید خود را دارا است و قابلیت تشخیص زاویه قرارگیری هدف نسبت به سنجنده وجود ندارد. به منظور رفع این محدودیت از روش تصویربرداری رادار روزنه مصنوعی استفاده می‌شود. در این روش سنجنده در راستای عمود بر راستای برد حرکت کرده و به ارسال، دریافت، و جمعیت همدوس^۲ سیگنال‌ها در این راستا می‌پردازد. در نهایت پس از دریافت و ذخیره سیگنال خام توسط سنجنده، تصویر رادار روزنه مصنوعی توسط روش‌های پردازش سیگنال و تشکیل تصویر ایجاد می‌گردد. در نتیجه، علاوه بر برد، زاویه قرارگیری اهداف نیز نمایان می‌شود. در این مقاله تمرکز بر روی تصویربرداری رادار روزنه مصنوعی در سامانه‌های زمینی است. بطور معمول در این سامانه‌ها، سنجنده بر روی یک ریل مکانیکی قرار گرفته و با گام‌های تعیین شده در راستای عمود بر برد حرکت می‌کند. در ساختار متداول این سامانه‌ها، از ریل افقی استفاده می‌شود که باعث ایجاد روزنه مصنوعی در راستای آزیموت و در نهایت ایجاد تصویر رادار روزنه مصنوعی با قابلیت تفکیک‌پذیری زاویه آزیموت اهداف می‌شود. با این حال، با ساختاری نوین و افزودن روزنه مصنوعی در راستای ارتفاع، می‌توان علاوه بر تفکیک‌پذیری برد و زاویه آزیموت (افقی)، به تفکیک‌پذیری در راستای ارتفاع (زاویه عمودی) نیز دست یافت. در نتیجه می‌توان به موقعیت سه‌بعدی اهداف رسید و باعث کاهش بروز خطاهای هندسی رایج در تصاویر راداری مانند کوتاه‌شدگی (Foreshortening) و هم‌پوشانی (Layover) شد.

شکل (۱) هندسه تصویربرداری رادار با روزنه مصنوعی

بهره‌گیری از ماتریس کوواریانس حاصل از سیگنال‌ها از به آشکارسازی اهداف داخل تصویر می‌پردازند که با وجود اینکه می‌توانند عملکرد مناسبی داشته باشند ولی بار محاسباتی بسیار بالایی دارند [۱۹ و ۲۰].

یکی از مراحل مهم در توسعه سامانه‌های سنجش از دوری، بررسی و ارزیابی عملکرد آن‌ها در محیط شبیه‌سازی پیش از بهره‌برداری عملیاتی است [۲۱]. از این رو، هدف اصلی از ارائه این مقاله، بررسی، ارزیابی، و مقایسه عملکرد الگوریتم‌های تشکیل تصویر رادار روزنه مصنوعی برای سامانه زمینی در باند فرکانسی W با طول موج میلیمتری است. در پژوهش‌های پیشین قابلیت افزایش تفکیک‌پذیری و بهبود پایش جابجایی [۲۲] رادارهای چندرودی-چندخروجی^۱ (MIMO) در باند W با ترکیب تصویربرداری رادار روزنه مصنوعی زمینی مورد بررسی قرار گرفتند. در مقاله پیشرو، قابلیت تصویربرداری سه‌بعدی رادار روزنه مصنوعی در این نوع از سامانه‌ها مورد بررسی و ارزیابی قرار می‌گیرد. سامانه مورد نظر از ریلی دوبردی تشکیل شده که قابلیت تشکیل آنتن مجازی و تفکیک‌پذیری در راستاهای آزیموت و ارتفاع را امکان‌پذیر می‌کند. در ادامه این مقاله، در بخش دوم این مقاله، مبانی تئوری مربوط به سه الگوریتم پردازش سیگنال شامل الگوریتم BP در حوزه زمان، و الگوریتم‌های تبدیل فوریه (FT) و RMA در حوزه فرکانس به منظور تشکیل تصویر سه‌بعدی راداری بیان می‌شوند. معیارهای ارزیابی در بخش سوم بیان می‌شوند. در بخش چهارم، نتایج شبیه‌سازی مورد بررسی و ارزیابی قرار می‌گیرند. در نهایت، نتیجه‌گیری حاصل از این پژوهش در بخش پنجم بیان می‌گردد.

۲- مبانی تئوری

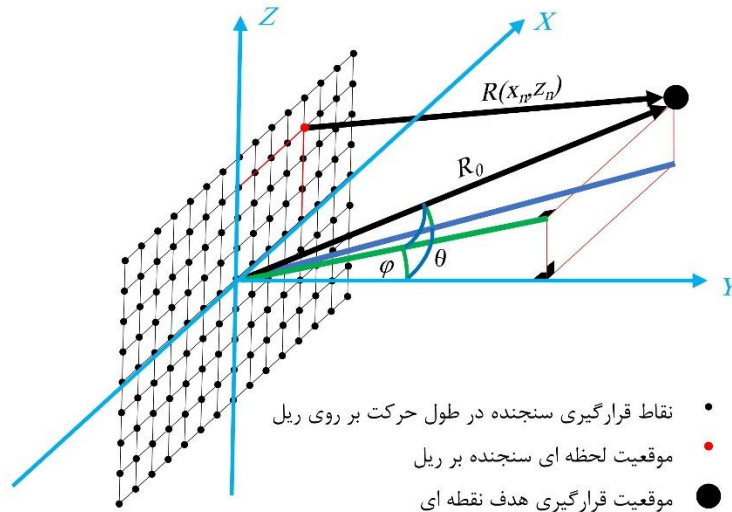
در این بخش مبانی و اصول تئوری مورد نیاز در این مقاله ارائه می‌گردد. در ابتدا، هندسه تصویربرداری رادار روزنه مصنوعی به منظور ایجاد تصویر راداری سه‌بعدی بیان می‌شود. سپس، مدل سیگنال دریافتی، و نحوه

² Coherent

¹ Multiple input multiple output

که هر یک از ابعاد آن بیانگر راستاهای برد (محور y)، آزیموت (زاویه افقی، محور x)، و ارتفاع (زاویه عمودی، محور z) خواهند بود.

دوبعدی را نمایش می‌دهد. در این حالت سنجنده بصورت گام به گام بر روی صفحه حرکت کرده و به ارسال و دریافت سیگنال از محیط می‌پردازد. داده ذخیره شده بصورت یک ماتریس سه‌بعدی خواهد بود



شکل ۱: هندسه تصویربرداری GBSAR با روزنه دوبعدی در راستاهای آزیموت و ارتفاع

۲-۲-۱- مدل سیگنال

همانطور که شکل ۱ بیان می‌کند، سنجنده رادار در صفحه دوبعدی با معادله $y = 0$ ، حرکت کرده و باعث ایجاد آنتن مجازی بسیار بزرگتری در این صفحه می‌شود. طبق این هندسه، فاصله لحظه‌ای سنجنده در موقعیت $(x_n, 0, z_n)$ نسبت به هدفی در موقعیت (x, y, z) بصورت رابطه (۱) تعریف می‌شود.

رابطه (۱)

$$R(x_n, z_n) = \sqrt{(x - x_n)^2 + y^2 + (z - z_n)^2}$$

نتیجه سیگنال خام بازتابی از هدف نقطه‌ای و ذخیره شده در ماتریس داده بصورت رابطه (۲) بیان می‌شود [۲۳].

رابطه (۲)

$$d(x_n, k_r, z_n) = s(x, y, z) \times \exp(-jk_r R(x_n, z_n))$$

۲-۲-۲ پردازش سیگنال رادار روزنه مصنوعی

بطور کلی می‌توان گفت که هدف الگوریتم‌های تشکیل تصویر رادار روزنه مصنوعی، فشرده‌سازی سیگنال در راستای عمود بر برد و افزایش نسبت سیگنال به نویز در موقعیت قرارگیری هدف پراکنده‌گر در تصویر هستند. الگوریتم‌های تشکیل تصویر رادار روزنه مصنوعی به دو گروه عمده پردازش در حوزه زمان و پردازش در حوزه فرکانس دسته‌بندی می‌شوند. در این مقاله سه الگوریتم پرکاربرد BP، تبدیل فوریه^۱ (FT)، و RMA مورد بررسی، ارزیابی، و مقایسه قرار می‌گیرند. در ادامه این بخش ابتدا مدل سیگنال خام و سیگنال هدف در حالت تصویربرداری سه‌بعدی بیان می‌شوند. سپس مبانی و روابط ریاضی مربوط به الگوریتم‌های تشکیل تصویر نامبرده، بیان شده و برای حالت تصویربرداری سه‌بعدی توسعه پیدا می‌کنند.

^۱ Fourier transform

در راستای آزمون و ارتفاع بصورت رابطه (۴) بر سیگنال فشرده شده در برد اعمال می شود [۱۴ و ۱۹].

رابطه (۴)

$$s(\phi, \theta, R) = \iint_A d_n(x_n, R, z_n) \times MF(x_n, z_n) \times dx_n dz_n$$

در رابطه (۴)، ϕ و θ به ترتیب بیانگر زاویه قائم، و زاویه افقی هدف نقطه ای از مبدا سیستم مختصات کروی هستند. (x_n, z_n) بیانگر موقعیت لحظه ای قرارگیری سنجنده بر روی صفحه A است. $d_{rc}(x_n, R, z_n)$ بیانگر سیگنال خام فشرده شده در راستای برد، و $MF(x_n, z_n)$ بیانگر فیلتر منطبق است که در رابطه (۵) بیان می شود. $MF(x_n, z_n) = \exp(jk_r R(x_n, z_n))$ رابطه (۵) بنابراین مراحل پردازشی الگوریتم BP را می توان بصورت زیر بیان نمود:

- ۱- فشرده سازی سیگنال خام در راستای برد
 - ۲- ایجاد شبکه منظم سه بعدی از محیط تصویربرداری در مختصات کروی
 - ۳- محاسبه فیلتر منطبق در نقطه از قرارگیری آنتن در صفحه روزنه مصنوعی
 - ۴- ضرب فیلتر منطبق در سیگنال خام
 - ۵- تکرار مراحل ۳ و ۴ برای تمام نقاطی که آنتن در طی ایجاد روزنه مصنوعی قرار می گیرد.
 - ۲-۲-۲-۲- تشکیل تصویر براساس تبدیل فوریه
- محاسبه فاصله سنجنده تا هدف که در رابطه (۱) بیان شد را می توان در سیستم مختصات کروی برای هدفی واقع در (ϕ, θ, R_0) بصورت رابطه (۶) بیان نمود.

رابطه (۶)

$$R(x_n, z_n) = \sqrt{(R_0 \sin \theta - x_n)^2 + (R_0 \cos \theta \cos \phi)^2 + (R_0 \sin \phi - z_n)^2}$$

در رابطه (۶)، $R(x_n, z_n)$ بیانگر فاصله هدف از سنجنده در لحظه قرارگیری سنجنده در نقطه (x_n, z_n) و R_0 بیانگر موقعیت هدف نقطه ای از مرکز سیستم مختصات کروی است. با تقریب بسط تیلور چندمتغیره، می توان

رابطه (۶) را بصورت رابطه (۷) بازنویسی کرد.

$$R(x_n, z_n) \cong R_0 - x_n \sin \theta - z_n \sin \phi \quad \text{رابطه (۷)}$$

با جایگذاری رابطه (۷) در رابطه (۳) می توان، سیگنال

در رابطه (۲)، عبارت $k_r = 4\pi/\lambda$ بیانگر عدد موج^۱ یا فرکانس مکانی^۲ در راستای برد است. عبارت $s(x, y, z)$ که بیانگر بازتابندگی^۳ هدف در نقطه (x, y, z) می باشد، از معکوس رابطه (۲) و پس از دریافت تمام سیگنال های سنجنده در طول روزنه مصنوعی، طبق رابطه (۳) محاسبه می شود [۲۳].

رابطه (۳)

$$s(x, y, z) = \iiint_{A, k_r} d(x_n, k_r, z_n) \times \exp(jk_r R(x_n, z_n)) \times dx_n dz_n dk_r$$

در رابطه (۳)، A بیانگر صفحه ای است که سنجنده به منظور ایجاد روزنه مصنوعی بر آن حرکت می کند.

۲-۲-۲- تشکیل تصویر رادار روزنه مصنوعی

بطور کلی، هدف الگوریتم های تشکیل تصویر رادار روزنه مصنوعی، برآورد سیگنال $s(x, y, z)$ از سیگنال مشاهداتی (خام) $d(x_n, k_r, z_n)$ است. در این بخش مبانی تئوری سه الگوریتم پردازش سیگنال کاربردی در زمینه تشکیل تصویر رادار روزنه مصنوعی بیان شده و روابط ریاضی آن ها برای تصویربرداری سه بعدی ارائه می گردند.

۲-۲-۲-۱- تشکیل تصویر با الگوریتم BP

الگوریتم BP با فشرده سازی سیگنال با استفاده از فیلتر منطبق به حل معادله رابطه (۳) و تشکیل تصویر رادار روزنه مصنوعی می پردازد. فیلتر منطبق به نوعی عملگر کانولوشن در حوزه زمان است و در حالتی که نیاز به فشرده سازی سیگنال در دو راستا (آزمون و ارتفاع) باشد، آنگاه می توان این فیلتر را دوبعدی فرض نمود. بنابراین، در مرحله نخست سیگنال خام $d(x_n, k_r, z_n)$ در راستای برد فشرده می شود. لازم به ذکر است که در سامانه های با سیگنال $FMCW^4$ ، فشرده سازی در راستای برد با اعمال تبدیل فوریه یک بعدی به سیگنال خام در این راستا بدست می آید. در نهایت، فیلتر منطبق

¹ Wavenumber

² Spatial frequency

³ Reflectivity

⁴ Frequency modulated continuous wave

فرکانس حامل (f_c) و فرکانس مدولاسیون (f_m) تفکیک می‌شود.

بازتابندگی هدف در (ϕ, θ, R_0) را بصورت رابطه (۸) بازنویسی کرد. رابطه (۸) را می‌توان بصورت رابطه (۹) بیان نمود که در آن فرکانس سیگنال به دو بخش

$$s(\phi, \theta, R_0) = \iiint_{A, k_r} d(x_n, k_r, z_n) \times \exp(jk_r(R_0 - x_n \sin \theta - z_n \sin \phi)) \times dx_n dz_n dk_r \quad \text{رابطه (۸)}$$

$$s(\phi, \theta, R_0) = \iiint_{A, k_r} d(x_n, f, z_n) \times \exp \left[j 2\pi \left(f \frac{2R_0}{c} - x_n \frac{2f_c \sin \theta}{c} - z_n \frac{2f_c \sin \phi}{c} \right) \right] \times \exp \left[-j 2\pi x_n \frac{2f_m \sin \theta}{c} - j 2\pi z_n \frac{2f_m \sin \phi}{c} \right] \times dx_n dz_n df \quad \text{رابطه (۹)}$$

(آزیموت و ارتفاع)، به‌منظور انتقال داده خام به فضای فرکانسی در هر سه راستای فرکانس برد، فرکانس آزیموت، و فرکانس ارتفاع است. رابطه (۱۰) سیگنال خام دریافتی را در فضای فرکانسی بیان می‌کند. نتیجه انتگرال رابطه (۱۰) با حل تحلیلی فاز مانا بصورت رابطه (۱۱) بدست می‌آید. در این رابطه R_s بیانگر برد مرجع است که معمولاً برابر با فاصله مرکز تصویربرداری از مرکز آنتن سنجنده یا برابر با صفر در نظر گرفته می‌شود.

۲- مرحله دوم بیانگر اعمال فیلتر منطبق در فضای فرکانسی است. رابطه (۱۲) بیانگر فیلتر منطبق الگوریتم RMA است. با ضرب نقطه‌ای این فیلتر، فاز سیگنال در حوزه فرکانس به نقطه برد مرجع منتقل می‌شود و باعث می‌گردد تا انحنای برد اهدافی که فاصله‌ای به اندازه R_s از سنجنده هستند برطرف شود (شکل ۲).

پس از اعمال فیلتر منطبق خروجی سیگنال در حوزه فرکانس بصورت رابطه (۱۳) بیان می‌شود.

۳- مرحله سوم مربوط به تبدیل و درون‌یابی استولت ($Stolt$) می‌شود. در این مرحله، هدف حذف کامل

انحنای برد اهداف با تبدیل $k_y = \sqrt{k_r^2 - k_x^2 - k_z^2}$ است (شکل ۲). تغییر فضای $k_r \rightarrow k_y$ در عمل با درون‌یابی یک‌بعدی برای مقادیر k_x و k_z امکان‌پذیر

در رابطه (۹)، معادله نمایی اول بیانگر کرنل سه‌بعدی تبدیل فوریه است و معادله نمایی دوم بیانگر فاز باقیمانده و قابل چشم‌پوشی است [۱۶]. بنابراین، طبق رابطه (۹) و اثبات بیان‌شده، تصویر سه‌بعدی بازتابی از هدف با تبدیل فوریه سه‌بعدی از فضای فرکانسی به فضای مکان منتقل در سیستم مختصات کروی منتقل و تشکیل می‌شود. این عمل در واقع تقریبی از فیلتر منطبق الگوریتم BP است. با این تفاوت که در حوزه فرکانس و با استفاده از تبدیل فوریه اعمال می‌شود.

۲-۲-۳- تشکیل تصویر با الگوریتم RMA

الگوریتم RMA مشابه الگوریتم تبدیل فوریه تماماً در حوزه فرکانس پردازش می‌شود. تفاوت عمده این الگوریتم با الگوریتم‌های مبتنی بر فیلتر منطبق، سیستم مختصات تشکیل تصویر است. تصاویر دوبعدی و سه‌بعدی متشکل از الگوریتم‌های فیلتر منطبق (حوزه زمان یا فرکانس) به ترتیب در سیستم مختصات قطبی و کروی تشکیل می‌شوند که یکی از محورها معادل راستای برد و محورهای دیگر مربوط به زاویه چرخش آنتن بصورت مجازی است. در مقابل، در الگوریتم RMA تصویر نهایی در مختصات کارتزین تشکیل می‌شود [۴]. این الگوریتم از چهار مرحله اصلی به‌منظور تشکیل تصویر بهره می‌برد [۴، ۱۳، ۲۳ و ۲۵]:

۱- مرحله اول تبدیل فوریه در راستاهای عمود بر برد

می‌شود، سیگنال در فضای فرکانسی و در شبکه منظمی قرار دارد. بنابراین، با اعمال تبدیل فوریه سه-بعدی می‌توان به فضای مکان رسید و بدین ترتیب تصویر نهایی ایجاد می‌شود (رابطه (۱۵)).

است. در نهایت، پس از این تبدیل معادله سیگنال به-شکل رابطه (۱۴) می‌شود.

۴- مرحله چهارم مختص تبدیل فضا از فضای فرکانس به فضای مکان است. همانطور که در رابطه (۱۴) بیان

$$D(k_x, k_r, k_z) = 2DFT \{d(x, k_r, z)\} = \iint d(x, k_r, z) \times \exp(-jk_x x - jk_z z) dx dz \quad \text{رابطه (۱۰)}$$

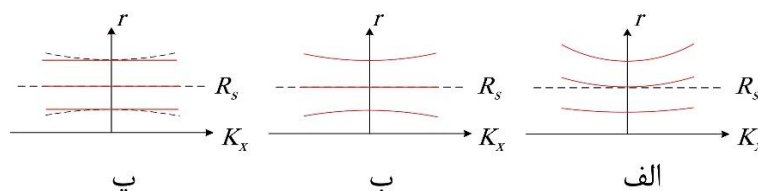
$$D(k_x, k_r, k_z) \cong \exp \left\{ -j \left(k_x x + k_z z + y \sqrt{k_r^2 - k_x^2 - k_z^2} - R_s k_r \right) \right\} \quad \text{رابطه (۱۱)}$$

$$H_{mf}(k_x, k_r, k_z) = \exp \left\{ j \left(R_s \sqrt{k_r^2 - k_x^2 - k_z^2} - R_s k_r \right) \right\} \quad \text{رابطه (۱۲)}$$

$$D_2(k_x, k_r, k_z) = H_{mf}(k_x, k_r, k_z) \cdot D(k_x, k_r, k_z) \\ = \exp \left\{ -j \left(k_x x + (y - R_s) \sqrt{k_r^2 - k_x^2 - k_z^2} + k_z z \right) \right\} \quad \text{رابطه (۱۳)}$$

$$D_3(k_x, k_y, k_z) = \exp \left\{ -j \left(k_x x + k_y (y - R_s) + k_z z \right) \right\} \quad \text{رابطه (۱۴)}$$

$$s(x, y, z) = 3DIFT \{D_3(k_x, k_y, k_z)\} \quad \text{رابطه (۱۵)}$$



شکل ۲: تاثیر اعمال فیلتر منطبق و تبدیل استولت در برطرف کردن انحنای برد اهداف در الگوریتم RMA: الف) سیگنال فشرده-شده در برد قبل از تصحیح انحنای برد اهداف نسبت به خط برد مرجع با اعمال فیلتر منطبق دوبعدی (رابطه (۱۲)). ب) تصحیح انحنای برد اهداف پس از تبدیل و درون‌یابی استولت

لوب‌های کناری ($ISLR^2$) و نسبت سیگنال به کلاتر (SCR^3) ارزیابی می‌شوند. تفکیک‌پذیری زاویه‌ای در حالت رادار روزنه مصنوعی مطابق رابطه (۱۶) محاسبه می‌شود که واحد آن به

۲-۳- معیارهای ارزیابی

در این مقاله، نتایج بدست‌آمده توسط چهار معیار تفکیک‌پذیری زاویه‌ای، نسبت لوب بیشینه به لوب کناری ($PSLR^1$)، نسبت نسبت لوب اصلی به تجميع

² Integrated sidelobe ratio (ISLR)

³ Signal to clutter ratio (SCR)

¹ Peak sidelobe ratio (PSLR)

هدف با تجمیع انرژی لوب‌های کناری در راستای عمود بر برد محاسبه می‌شود [۲۶].

محاسبه SCR به‌وسیله رابطه (۱۸) صورت می‌گیرد. در این رابطه A_t و A_c به‌ترتیب بیانگر محدوده هدف و محدوده کلاتر در تصویر و N_c تعداد پیکسل‌های موجود در محدوده کلاتر هستند [۲۷].

لازم به ذکر است که مقدار کوچک تفکیک‌پذیری زاویه-ای و مقادیر بزرگ سه معیار دیگر بیانگر قابلیت بهتر الگوریتم تشکیل تصویر مورد بررسی است.

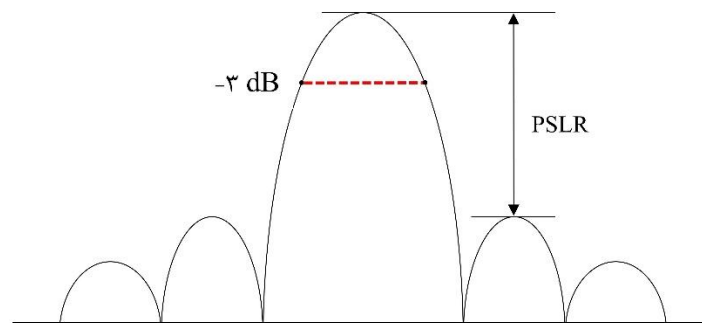
رادیان است. با این حال، این رابطه بیانگر میزان قدرت تفکیک در حالت ایده‌آل است و برای ارزیابی تفکیک-پذیری هدف توسط الگوریتم، مطابق شکل (۳)، محدوده ۳- دسی‌بل هدف در راستای عمود بر برد محاسبه می‌شود.

مقدار $PSLR$ طبق شکل (۳) از اختلاف بین مقدار انرژی بیشینه هدف و بزرگترین لوب‌کناری آن در راستای عمود بر برد با واحد دسی‌بل محاسبه می‌شود. معیار $ISLR$ نیز به همین ترتیب طبق رابطه (۱۷) براساس اختلاف بین مقدار انرژی محدوده ۳- دسی‌بل

$$\rho_{az} = \frac{\lambda_c}{2L_s} \quad \text{رابطه (۱۶)}$$

$$ISLR = 20 \times \log \left(\frac{\sum_{-3dB} |s(i)|}{\sum |s(i)| - \sum_{-3dB} |s(i)|} \right) \quad \text{رابطه (۱۷)}$$

$$SCR = 20 \times \log \left(\frac{\max_{(i,j) \in A_t} |s(i,j)|}{\frac{1}{N_c} \sum_{(i,j) \in A_c} |s(i,j)|} \right) \quad \text{رابطه (۱۸)}$$



شکل ۳: سیگنال فشرده‌شده هدف (لوب اصلی) به همراه لوب‌های کناری

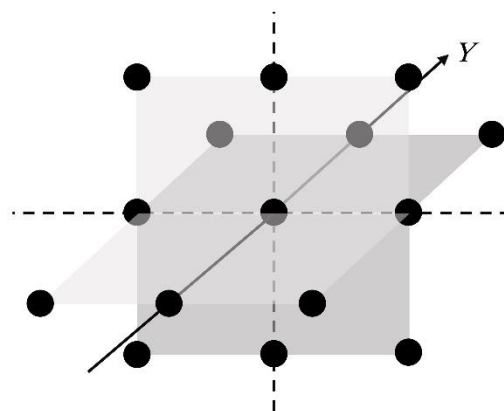
۳- نتایج

در این بخش نتایج مربوط به شبیه‌سازی تشکیل تصویر رادار روزنه مصنوعی برای سامانه زمینی توسط الگوریتم‌های بیان‌شده ارائه می‌گردند. این سامانه از سنجنده راداری در باند فرکانسی W با فرکانس حامل ۷۷ گیگاهرتز و پهنای باند ۳۰۰ مگاهرتز بهره می‌برد. مطابق هندسه بیان‌شده در شکل (۱)، سنجنده بر ریل مکانیکی دوبعدی با طول ۹۰ سانتی‌متر در راستای آزیموت و ۵۰ سانتی‌متر در راستای ارتفاع حرکت و به ارسال و دریافت سیگنال می‌پردازد. جدول (۱) مشخصات کامل سامانه شبیه‌سازی شده را

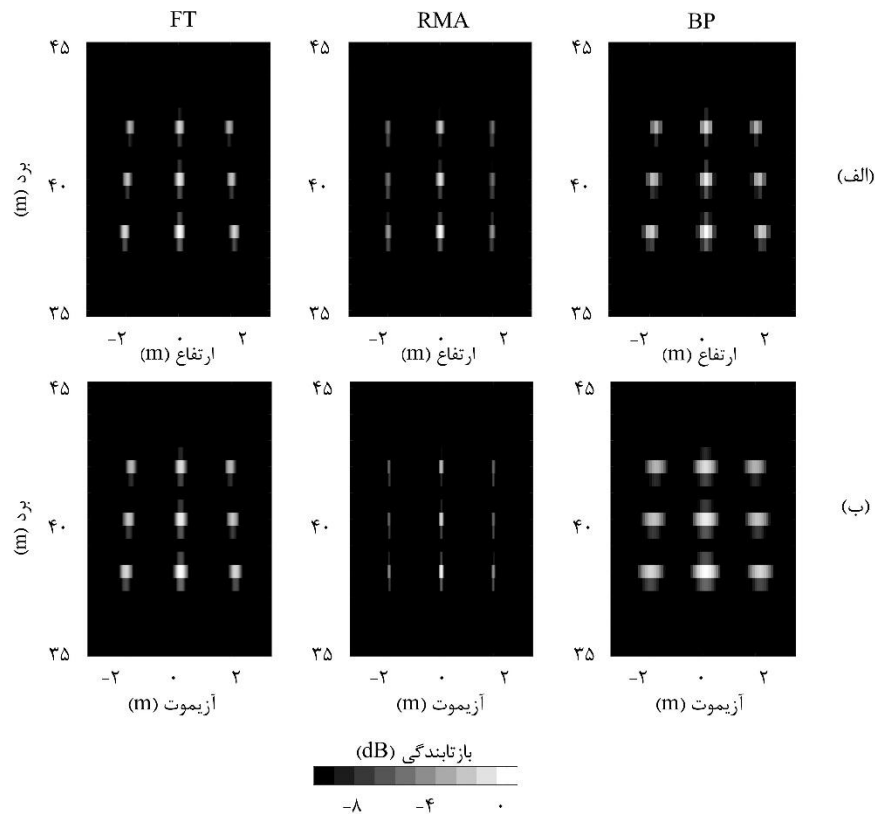
بیان می‌کند. در این بخش پانزده پراکنده‌گر نقطه‌ای با شدت پراکندگی یکسان در فضای سه‌بعدی شبیه‌سازی شدند. شکل (۴) هندسه قرارگیری این اهداف را نمایش می‌دهد. این اهداف در محدوده ۳۸ تا ۴۲ متری محور Y و در محدوده ۲- تا ۲+ متری محورهای x و z (راستای آزیموت و ارتفاع) بطور منظم قرار گرفته‌اند. شکل (۵) نیز نتایج تشکیل تصویر توسط سه الگوریتم بیان‌شده را در دو راستای آزیموت و ارتفاع نمایش می‌دهد.

جدول ۱: پارامترهای اساسی سامانه رادار روزنه مصنوعی شبیه‌سازی شده

پارامتر	مقدار
توان فرستنده	۱/۵ میلی وات
عدد نویز	۱۵ دسی بل
محدوده فرکانس حامل	۷۷ گیگاهرتز
پهنای باند سیگنال	۳۰۰ مگاهرتز
بهره آنتن فرستنده	۳۰ دسی بل
بهره آنتن گیرنده	۳۰ دسی بل
طول چرپ	۶۰ میکرو ثانیه
طول ریل افقی	۹۰ سانتی متر
طول ریل عمودی	۵۰ سانتی متر



شکل ۴: هندسه قرارگیری اهداف نقطه‌ای شبیه‌سازی شده در محیط سه‌بعدی. ۱۵ هدف بصورت منظم در برد ۳۸ تا ۴۲ (محور Y) و موقعیت‌های آزیموت و ارتفاع ۲- تا ۲+ (محورهای x و z) قرار گرفته‌اند.



شکل ۵: نتیجه تصویر رادار روزنه مصنوعی اهداف شبیه‌سازی. (الف) در صفحه راستای برد و ارتفاع (صفحه $y-z$). (ب) در صفحه راستای برد و آزیموت (صفحه $y-x$)

شرط فرانهور به ترتیب طبق روابط (۱۹) و (۲۰) تعریف می‌شوند [۲۸]. طبق این تعاریف، برای روزنه‌ای به طول ۵۰ سانتی‌متر، محدوده بین ۳/۴ تا ۱۲۸/۴ متر به‌عنوان محدوده نزدیک و فواصل دورتر نیز به‌عنوان میدان دور دست محسوب می‌شوند. به همین ترتیب در صورتیکه طول آنتن ۹۰ سانتی‌متر باشد، محدوده بین ۸/۲ تا ۴۱۶/۱ به‌عنوان میدان نزدیک و خارج از آن نیز میدان دور دست محسوب می‌شود.

$$0.6 \left(\frac{L^3}{\lambda} \right)^{0.5} < R < \frac{2L^2}{\lambda} \quad \text{رابطه (۱۹)}$$

$$R > \frac{2L^2}{\lambda} \quad \text{رابطه (۲۰)}$$

در جدول (۲) میزان بازتابندگی بدست‌آمده توسط الگوریتم‌های تشکیل تصویر برای هر هدف بصورت جداگانه بیان می‌شود. با توجه به این نتایج، می‌توان دریافت که تصویر حاصل از الگوریتم RMA اهداف را فشرده‌تر و با تفکیک‌پذیری بهتری نمایش می‌دهد. با این حال با بررسی شدت بازتابندگی اهداف در جدول (۲) می‌توان دریافت که میزان افت بازتابندگی اهداف در اطراف تصویر الگوریتم RMA بسیار شدیدتر از دو الگوریتم دیگر است. به‌عنوان مثال، بازتابندگی هدف در موقعیت (۰، ۴۰، ۲) در الگوریتم‌های RMA ، BP و FT به ترتیب ۵/۴۳، ۲/۳۵ و ۲/۳ دسی‌بل بدست آمده که شدت الگوریتم RMA نسبت به دو الگوریتم دیگر بیش از ۳ دسی‌بل ضعیف‌تر است. در تصویربرداری راداری فواصل نزدیک و دور براساس

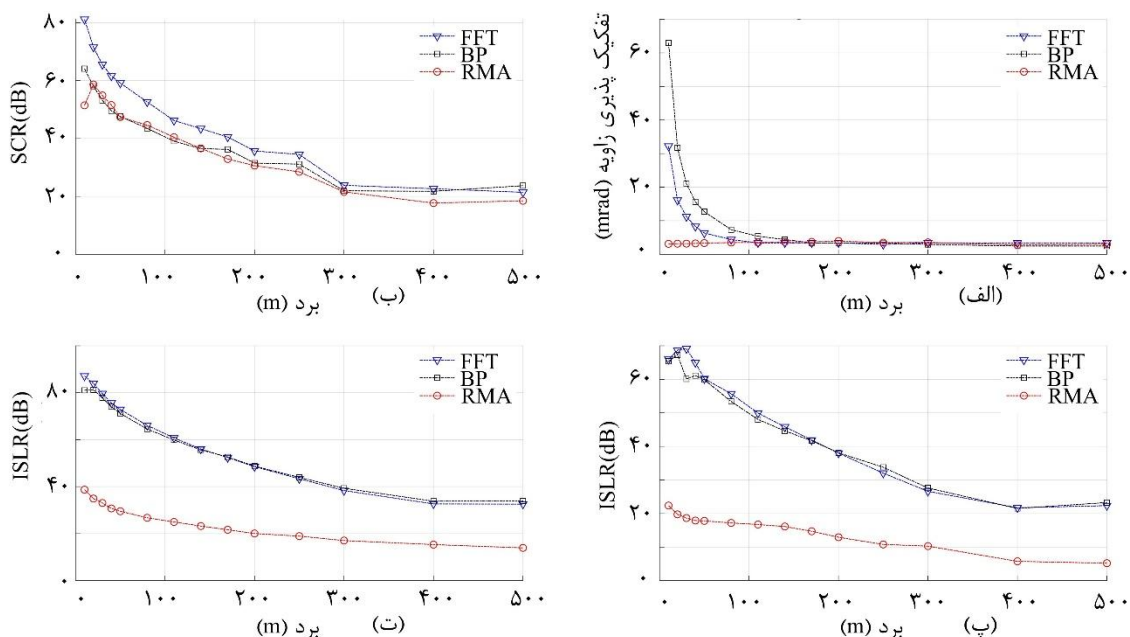
جدول ۲: شدت بازتابندگی اهداف بر اساس الگوریتم‌های تشکیل تصویر

میزان بازتابندگی (دسی‌بل)			موقعیت هدف (x,y,z)
FT	RMA	BP	
۰	۰	۰	(۰، ۳۸، ۰)
-۱٫۶۴	-۳٫۹۳	-۱٫۷۱	(۲، ۳۸، ۰)
-۱٫۶۳	-۳٫۹۹	-۱٫۶۹	(-۲، ۳۸، ۰)
-۰٫۷۱	-۱٫۰۱	-۰٫۷۲	(۰، ۴۰، ۰)
-۲٫۳	-۵٫۴۳	-۲٫۳۵	(۲، ۴۰، ۰)
-۲٫۲۶	-۵٫۴۹	-۲٫۳۵	(-۲، ۴۰، ۰)
-۱٫۴	-۱٫۹۹	-۱٫۴۱	(۰، ۴۲، ۰)
-۲٫۸۸	-۵٫۳۷	-۲٫۹۷	(۲، ۴۲، ۰)
-۲٫۸۸	-۵٫۴۲	-۲٫۹۷	(-۲، ۴۲، ۰)
-۱٫۶۵	-۳٫۶۸	-۲٫۰۶	(۰، ۳۸، ۲)
-۱٫۶۵	-۳٫۷۷	-۱٫۹۶	(۰، ۳۸، -۲)
-۲٫۴۷	-۵٫۳۷	-۲٫۵۹	(۰، ۴۰، ۲)
-۲٫۴۳	-۵٫۴۶	-۲٫۶۵	(۰، ۴۰، -۲)
-۳٫۱۹	-۵٫۲۴	-۳٫۰۶	(۰، ۴۲، ۲)
-۳٫۲	-۵٫۲۹	-۳٫۰۲	(۰، ۴۲، -۲)

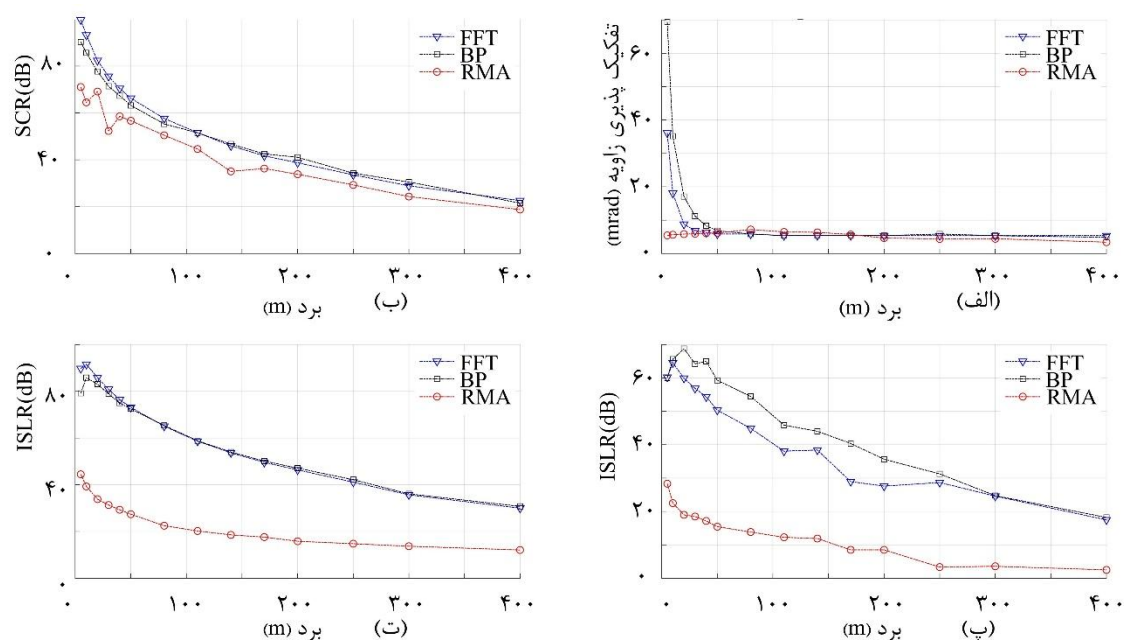
شدن به میدان دور، تفکیک‌پذیری الگوریتم‌های *BP* و *FT* نیز با تفکیک‌پذیری *RMA* منطبق می‌شوند. بنابراین در میدان دور، برای سامانه با مشخصات جدول (۱) تفکیک‌پذیری در راستای ارتفاع حدود ۷٫۵ میلی‌رادیان و در رستای آزیموت حدود ۵ میلی‌رادیان بدست آمدند.

برای ارزیابی قدرت فشرده‌سازی الگوریتم‌ها می‌توان به بررسی نمودارهای *ISLR*، *SCR* و *PSLR* پرداخت. از شکل (۶) بخش ب، پ، و ت و شکل (۷) بخش ب، پ، و ت می‌توان دریافت که با افزایش فاصله هدف از سنجنده و کاهش انرژی بازتابی آن، هر سه معیار بیان‌شده در الگوریتم‌های مورد بررسی کاهش می‌یابند. با این حال، با اینکه الگوریتم‌های *BP* و *FT* نتایج مشابهی را کسب کردند ولی الگوریتم *RMA* عملکرد ضعیفی را از خود نشان داده است. بطوریکه قدرت فشرده‌سازی بطور میانگین در تمام حالات حدود ۲۰ دسی‌بل ضعیف‌تر از دو الگوریتم دیگر است.

شکل (۶) و (۷) به ترتیب تاثیر فاصله هدف تا سنجنده را در فشرده‌سازی سیگنال در راستاهای عمود بر برد آزیموت و ارتفاع نمایش می‌دهند. بدین منظور فرایند شبیه‌سازی و تشکیل تصویر برای اهداف نقطه‌ای در فواصل ۵ تا ۵۰۰ متری از سنجنده صورت‌گرفت. همانطور که مشاهده می‌شود، تفکیک‌پذیری زاویه‌ای الگوریتم *RMA* نسبت به برد هدف ثابت است. درحالی‌که دو الگوریتم *BP* و *FT* هر دو در تصویربرداری از اهداف نزدیک دارای تفکیک‌پذیری ضعیفی هستند. به‌عنوان مثال، در فاصله ۱۰ متری هدف از سنجنده، الگوریتم *RMA* دارای تفکیک‌پذیری ۷٫۵ و ۵ میلی‌رادیان به‌ترتیب در راستاهای ارتفاع و آزیموت است. درحالی‌که، در شرایط مشابه، الگوریتم‌های *BP* و *FT* به‌ترتیب دارای تفکیک‌پذیری ۳۵ و ۱۸ میلی‌رادیان در راستای ارتفاع؛ و تفکیک‌پذیری ۶۵ و ۳۵ میلی‌رادیان در راستای آزیموت هستند. با این حال با افزایش فاصله هدف تا سنجنده و نزدیک



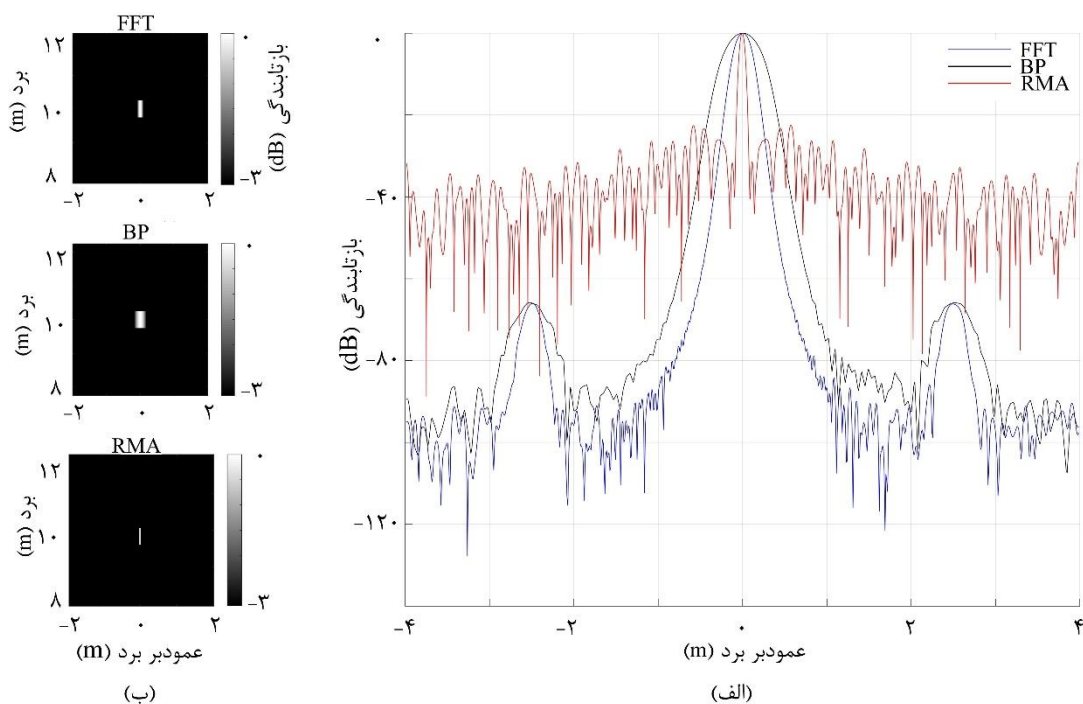
شکل ۶: نتایج ارزیابی تشکیل تصویر در راستای آزمون برای اهداف در بردهای مختلف. (الف) نمودار تغییرات تفکیک پذیری زاویه نسبت به برد. (ب) نمودار تغییرات SCR نسبت به برد. (پ) نمودار تغییرات PSNR نسبت به برد. (ت) نمودار تغییرات ISLR نسبت به برد.



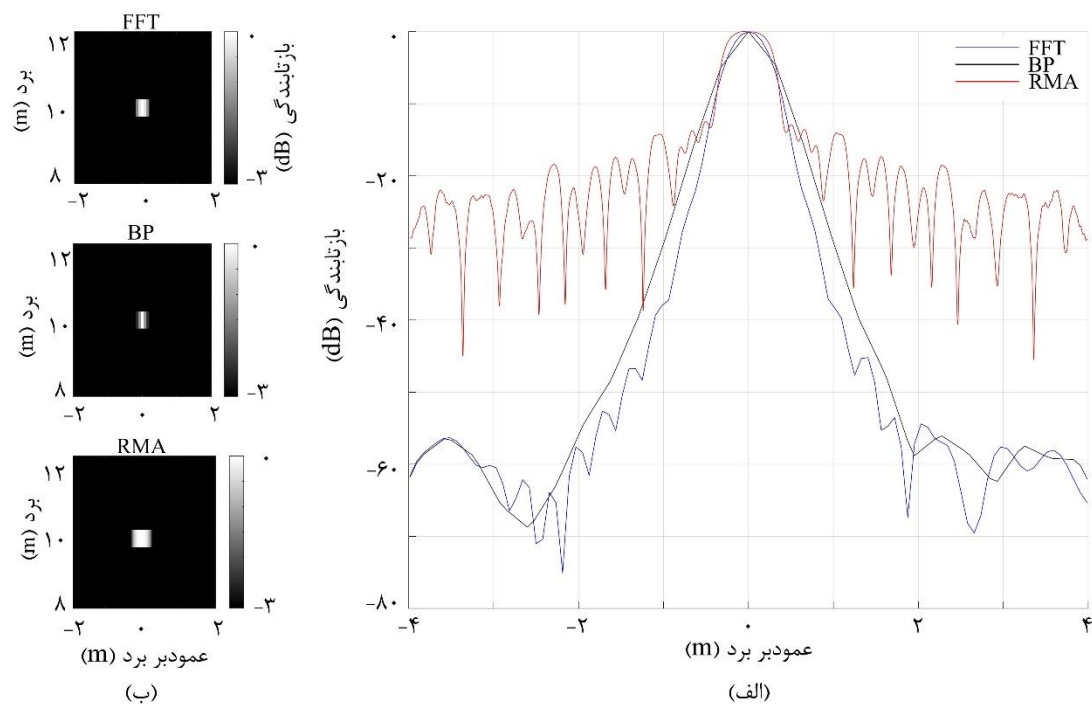
شکل ۷: نتایج ارزیابی تشکیل تصویر در راستای ارتفاع برای اهداف در بردهای مختلف. (الف) نمودار تغییرات تفکیک پذیری زاویه نسبت به برد. (ب) نمودار تغییرات SCR نسبت به برد. (پ) نمودار تغییرات PSNR نسبت به برد. (ت) نمودار تغییرات ISLR نسبت به برد.

الگوریتم دیگر دارا است. در مقابل با افزایش فاصله هدف (شکل (۹) و (۱۰)) قدرت تفکیک الگوریتم‌های *BP* و *FT* به *RMA* نزدیک می‌شوند درحالی‌که، همچنان فشرده‌سازی و سایر معیارهای ارزیابی الگوریتم *RMA* ضعیف باقی مانده است. با توجه به شکل (۱۰) می‌توان دریافت که در تصویر *RMA* هدف با کیفیت بسیار پایین و سطح نویز بالا استخراج شده‌است.

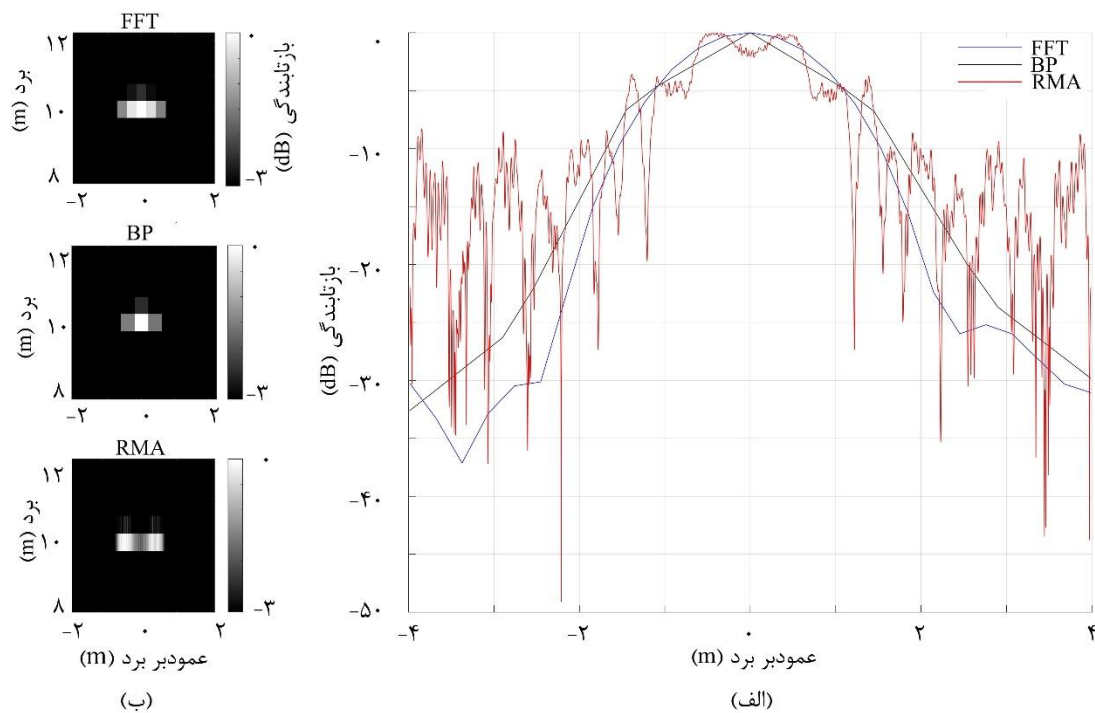
شکل (۸)، شکل (۹) و شکل (۱۰)، نگاه دقیق‌تری را به نتایج فشرده‌سازی و تشکیل تصویر سه الگوریتم مورد بررسی به ترتیب برای اهداف در فواصل ۱۰، ۸۰ و ۳۰۰ متری دارند. طبق نتایج شکل (۸)، می‌توان دریافت که در فاصله نزدیک (در این مثال ۱۰ متر) الگوریتم *RMA* با وجود فشرده‌سازی ضعیف‌تر و سطح سیگنال نویز بالاتر ولی تفکیک‌پذیری بسیار بهتری را نسبت به دو



شکل ۸: نتیجه تشکیل تصویر هدف در فاصله ۱۰ متری. (الف) سیگنال یک‌بعدی فشرده‌شده هدف در راستای عمود بر برد. (ب) تصاویر تشکیل‌شده توسط الگوریتم‌های مورد بررسی



شکل ۹: نتیجه تشکیل تصویر هدف در فاصله ۸۰ متری. (الف) سیگنال یک‌بعدی فشرده‌شده هدف در راستای عمود بر برد. (ب) تصاویر تشکیل‌شده توسط الگوریتم‌های مورد بررسی



شکل ۱۰: نتیجه تشکیل تصویر هدف در فاصله ۳۰۰ متری. (الف) سیگنال یک‌بعدی فشرده‌شده هدف در راستای عمود بر برد. (ب) تصاویر تشکیل‌شده توسط الگوریتم‌های مورد بررسی

۳- بحث

در این بخش سعی شده تا براساس نتایج ارائه شده در بخش قبلی، عملکرد الگوریتم‌های بررسی شده از جنبه‌های گوناگون از جمله تفکیک پذیری و کشف اهداف، مورد بحث و مقایسه قرار گیرد.

۳-۱- قدرت تفکیک پذیری

الگوریتم *RMA* تفکیک پذیری زاویه‌ای بهتری را در هر دو راستای افقی و عمودی، نسبت به دو الگوریتم تشکیل تصویر دیگر بدست آورد. بطور دقیق‌تر، طبق نمودارهای شکل ۶-الف) و شکل ۷-الف)، می‌توان دریافت که الگوریتم *RMA* ثبات بالایی در حفظ قدرت تفکیک زاویه ارائه می‌کند. درحالیکه، الگوریتم‌های *BP* و *FT* هر دو در فواصل کوتاه از سنجنده دارای تفکیک پذیری بسیار ضعیفی هستند و با افزایش فاصله هدف از فضای میدان نزدیک، می‌توان مشاهده کرد که تفکیک پذیری الگوریتم‌های *BP* و *FT* نیز با تفکیک پذیری *RMA* منطبق می‌شوند. عامل اصلی این نتایج می‌تواند فرایند تصحیح فاز در الگوریتم *RMA* باشد. درواقع، این الگوریتم در دو مرحله با اعمال فیلتر منطبق و سپس درون‌یابی استولت در فضای فرکانس برد و فرکانس آزمون، باعث تصحیح فاز مربوط به انحراف برد اهداف می‌شود [۴]. این انحراف با توجه به هندسه تصویربرداری *SAR*، در فواصل نزدیک بسیار شدید، و با افزایش فاصله هدف از سنجنده، کاهش می‌یابد. بطوری که در میدان دور، اثرات آن جزئی و قابل اغماق است [۱]، [۴]. درنتیجه، عدم وجود این تصحیح در دو الگوریتم دیگر می‌تواند از عوامل اصلی تفکیک پذیری ضعیف آن‌ها در مقایسه با الگوریتم *RMA* در فواصل نزدیک باشد.

۳-۲- قدرت فشرده سازی اهداف

با افزایش برد اهداف می‌توان دریافت که سطح معیارهای *ISLR*، *SCR* و *PSLR* کاهش یابد (شکل ۶) و (شکل ۷) قسمت‌های ب، پ، و ت). عامل اصلی این اتفاق را می‌توان در کاهش توان بازتابی هدف و سطح سیگنال به نویز عنوان نمود که با معادله اساسی رادار و رابطه

بین برد هدف و توان بازتابی همخوانی دارد و پدیده‌ای مشترک در الگوریتم‌های بررسی شده است [۲۹]. با این حال، الگوریتم‌های *BP* و *FT* در هر سه معیار ذکر شده عملکرد بهتری را نسبت به *RMA* ارائه کردند. درحالیکه، عملکرد نسبتاً قوی‌تر *FT*، در مقایسه با *BP* را می‌توان به علت نرم کردن سیگنال‌ها با نمونه‌افزایی در فرایند تبدیلات فوریه دانست. با این حال، وجود مقادیر *SCR* بسیار نزدیک در هر سه الگوریتم (شکل ۶-ب) و (شکل ۷-ب))، بیانگر قابلیت کشف اهداف در الگوریتم *RMA* با وجود قدرت فشرده سازی ضعیف‌تر نسبت به الگوریتم‌های *BP* و *FT* است.

در بررسی نتایج فشرده سازی در فواصل دور (به عنوان مثال شکل (۱۰)) می‌توان به عدم توانایی *RMA* در فشرده سازی عمود بر برد، در این فواصل پی برد. در واقع، برخلاف دو الگوریتم دیگر، تصویر حاصل از الگوریتم *RMA* بطور مستقیم در مختصات کارترین ایجاد می‌شود. بطور دقیق‌تر، در مرحله تبدیل استولت و در فضای فرکانس، سیگنال‌های قرار گرفته در فضای قطبی، با یک تبدیل به فضای کارترین تصویر می‌شوند [۴].

همچنین، همانطور که در قسمت مقدمه اشاره شد، در حالت‌های تصویربرداری هوابرد و فضایی که دارای طول روزنه مصنوعی نامحدود هستند، عموماً محدوده تصویربرداری دارای شکلی منظم و مستطیلی است. در مقابل، در تصویربرداری توسط سامانه‌های زمینی، شکل تصویر بصورت قطاعی از دایره است، بطوری که در فواصل کم عارضه‌های کمتری در محدوده دید رادار قرار دارند و با افزایش فاصله، عوارض برداشت شده نیز افزایش می‌یابند [۱۶]. درنتیجه، برای فشرده سازی اهداف در فواصل دور از سنجنده *GBSAR* با کمک الگوریتم *RMA* نیاز به نمونه برداری بسیار زیاد در راستای عمود بر برد است که باعث افزایش شدید بار محاسباتی الگوریتم و عملاً غیر کاربردی بودن آن برای فواصل دور می‌شود [۱۳].

۴- نتیجه‌گیری

سامانه‌های راداری به‌تنهایی قابلیت اندازه‌گیری فقط در راستای برد را دارا هستند. از این‌رو با افزودن قابلیت روزنه مصنوعی و بهره‌گیری از روش‌های پردازش سیگنال، اندازه‌گیری در راستاهای عمود بر برد نیز میسر می‌گردد. در نتیجه، می‌توان با ایجاد روزنه مصنوعی در راستاهای آزمون و یا ارتفاع، به تصاویر دو و یا سه‌بعدی راداری دست‌یافت. در این مقاله، قابلیت تصویربرداری سه‌بعدی راداری در یک سامانه زمینی با باند فرکانسی W مورد بررسی قرار گرفت. بطور کلی، بررسی و توسعه الگوریتم تشکیل تصویر در سامانه‌های $GBSAR$ به‌علت وجود محدودیت در طول روزنه مصنوعی و همچنین اختلاف زیاد بین برد نزدیک و برد دور محدوده تصویربرداری، از اهمیت بسیار بالایی برخوردار است. در این مقاله سه الگوریتم پردازش سیگنال پرکاربرد BP در حوزه زمان، و الگوریتم‌های تبدیل فوریه، و RMA در حوزه فرکانس به‌منظور تشکیل تصویر از سیگنال خام سامانه $GBSAR$ در باند فرکانسی W توسعه، و در محیط شبیه‌سازی بررسی، و ارزیابی شدند. استفاده از روزنه مصنوعی دو بعدی باعث تفکیک‌پذیری در دو راستای آزمون و ارتفاع می‌گردد. در نتیجه، در این مقاله الگوریتم‌های بیان‌شده برای تصویربرداری سه‌بعدی راداری توسعه پیدا کردند. در ابتدا نتایج تشکیل تصویر با حضور پانزده هدف پراکنده-گر در محیط تصویر مورد بررسی قرار گرفتند. طبق نتایج، هر سه الگوریتم نتایج مناسبی را داشتند. با این حال، در الگوریتم RMA اهداف متمرکزتر ظاهر شدند ولی در مقابل با افزایش زاویه اهداف از مرکز تصویر، میزان انرژی بازتابی اهداف در الگوریتم RMA در مقایسه با دو الگوریتم دیگر کاهش شدیدی را شاهد

مراجع

- [1] I. G. Cumming and H. Wong, "Digital Processing of Synthetic Aperture Radar Data: Algorithms and Implementation, Artech House, Norwood (2005)," Google Sch.
- [2] F. Ulaby et al., Microwave radar and radiometric remote sensing. Ann Arbor: University of Michigan Press, 2014.
- [3] A. Reigber et al., "Very-High-Resolution Airborne Synthetic Aperture Radar

بود و نتایج ضعیف‌تری را به همراه داشت. در شبیه‌سازی دوم تاثیر برد اهداف بر فشرده‌سازی آن‌ها توسط الگوریتم‌ها و با چهار معیار تفکیک‌پذیری زاویه‌ای، $PSLR$ ، $ISLR$ و SCR مورد بررسی قرار گرفتند. طبق نتایج، تفکیک‌پذیری زاویه در تصویر حاصل از RMA در مقابل تغییرات برد اهداف مقاوم بوده و حساسیتی نشان‌داد. در حالی که، دو الگوریتم دیگر، در محدوده میدان نزدیک، تفکیک‌پذیری ضعیف‌تری را حاصل شدند. در بررسی فشرده‌سازی انرژی سیگنال، الگوریتم RMA نتایج ضعیف‌تری را به همراه داشت و بطور میانگین در سه معیار $PSLR$ ، $ISLR$ و SCR حداقل ۲۰ دسی‌بل از دو الگوریتم دیگر ضعیف‌تر عمل کرد. در حالی که الگوریتم‌های BP و FT عملکرد مشابهی به‌همراه داشتند. با این تفاوت که الگوریتم FT در اکثر موارد تفکیک‌پذیری بهتری از BP به‌همراه داشت و در مقابل عملکرد BP در سه معیار دیگر کمی بهتر از FT بود. در نهایت، طبق بررسی تمام نتایج، می‌توان دریافت که در فواصل نزدیک و در مواقعی که هدف به مرکز تصویر نزدیک باشد الگوریتم RMA عملکرد بسیار بهتری را به‌همراه دارد. در حالی که، با افزایش برد اهداف، عملکرد RMA نامطلوب بوده و سطح نویز بسیار بالا می‌رود. در مقابل الگوریتم‌های FT و BP در فواصل دور علاوه بر بهبود تفکیک‌پذیری، از قدرت فشرده‌سازی قابل قبولی نیز برخوردار هستند. در مقایسه دو الگوریتم FT و BP نیز، با وجود اینکه الگوریتم FT تقریبی از BP در فضای فرکانس است، ولی برای سامانه مورد نظر این مقاله، نتایج بسیار نزدیکی به BP به‌همراه داشت. علاوه بر این نیز پیاده‌سازی در حوزه فرکانس موجب سرعت پردازشی بالای این الگوریتم است.

- Imaging: Signal Processing and Applications," *Proc. IEEE*, vol. 101, no. 3, pp. 759–783, Mar. 2013.
- [4] W. G. Carrara, R. S. Goodman, and R. M. Majewski, *Spotlight synthetic aperture radar: signal processing algorithms*. Boston: Artech House, 1995.
- [5] A. Ribalta, "Time-domain reconstruction algorithms for FMCW-SAR," *IEEE Geosci. Remote Sens. Lett.*, vol. 8, no. 3, pp. 396–400, 2011.
- [6] E. C. Zaugg, "Generalized image formation for pulsed and LFM-CW synthetic aperture radar," 2010.
- [7] M. Okoń-Fajfara, P. Serafin, and A. Kawalec, "An analysis of Chosen Image Formation Algorithms for Synthetic Aperture Radar with FMCW," *Int. J. Electron. Telecommun.*, vol. 62, no. 4, pp. 323–328, Jan. 2016.
- [8] E. C. Zaugg and D. G. Long, "Theory and application of motion compensation for LFM-CW SAR," *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, vol. 46, no. 10, pp. 2990–2998, 2008.
- [9] M. Pieraccini and L. Miccinesi, "Ground-based radar interferometry: A bibliographic review," *Remote Sens.*, vol. 11, no. 9, p. 1029, 2019.
- [10] B. Hosseiny, J. Amini, M. Esmailzade, and M. Nekoei, "Range Migration Algorithm in the Processing Chain of Signals of a Ground-Based SAR Sensor," *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spat. Inf. Sci.*, vol. 42, pp. 521–525, 2019.
- [11] Y. Wang et al., "Ground-Based Differential Interferometry SAR: A Review," *IEEE Geosci. Remote Sens. Mag.*, vol. 8, no. 1, pp. 43–70, 2020.
- [12] O. Monserrat, M. Crosetto, and G. Luzi, "A review of ground-based SAR interferometry for deformation measurement," *ISPRS J. Photogramm. Remote Sens.*, vol. 93, pp. 40–48, 2014.
- [13] G. L. Charvat, *Small and short-range radar systems*. CRC Press, 2014.
- [14] B. Hosseiny, J. Amini, and S. Safavi-Naeini, "Simulation and Evaluation of an mm-Wave MIMO Ground-Based SAR Imaging System for Displacement Monitoring," in *2021 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium IGARSS, 2021*, pp. 8213–8216.
- [15] J. F. Penner and D. G. Long, "Ground-based 3D radar imaging of trees using a 2D synthetic aperture," *Electronics*, vol. 6, no. 1, p. 11, 2017.
- [16] J. Fortuny-Guasch, "A fast and accurate far-field pseudopolar format radar imaging algorithm," *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, vol. 47, no. 4, pp. 1187–1196, 2009.
- [17] M. E. Yanik, D. Wang, and M. Torlak, "Development and Demonstration of MIMO-SAR mmWave Imaging Testbeds," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 126019–126038, 2020.
- [18] L. Zou and M. Sato, "An Efficient and Accurate Gb-SAR Imaging Algorithm Based on the Fractional Fourier Transform," *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, vol. 57, no. 11, pp. 9081–9089, Nov. 2019.
- [19] W. Feng, J. M. Friedt, G. Nico, and M. Sato, "3-D ground-based imaging radar based on C-band cross-MIMO array and tensor compressive sensing," *IEEE Geosci. Remote Sens. Lett.*, vol. 16, no. 10, pp. 1585–1589, Oct. 2019.
- [20] M. Pieraccini, N. Rojhani, and L. Miccinesi, "Compressive sensing for ground based synthetic aperture radar," *Remote Sens.*, vol. 10, no. 12, p. 1960, 2018.
- [21] B. Hosseiny and J. Amini, "Evaluation of a Signal Processing Algorithm in a Ground-Based SAR System in Simulated Environment," *ISSGE*, vol. 8, no. 2, pp. 189–198, Dec. 2018.
- [22] B. Hosseiny, J. Amini, and S. Safavi-Naeini, "Evaluating the deformation monitoring

- capability of a ground based SAR system with MIMO antenna," *Eng. J. Geospatial Inf. Technol.*, vol. 9, no. 1, pp. 21–40, 2021.
- [23] J. M. Lopez-Sanchez and J. Fortuny-Guasch, "3-D radar imaging using range migration techniques," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 48, no. 5, pp. 728–737, May 2000.
- [24] M. Soumekh, *Synthetic aperture radar signal processing*, vol. 7. New York: Wiley, 1999.
- [25] X. Mao, X. He, and D. Li, "Knowledge-Aided 2-D autofocus for spotlight SAR range migration algorithm imagery," *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, vol. 56, no. 9, pp. 5458–5470, Sep. 2018.
- [26] E. Yigit, S. Demirci, C. Ozdemir, and M. Tekbas, "Short-range ground-based synthetic aperture radar imaging: performance comparison between frequency-wavenumber migration and back-projection algorithms," *J. Appl. Remote Sens.*, vol. 7, no. 1, p. 73483, 2013.
- [27] Y. Lim and S. Nam, "Target-to-Clutter Ratio Enhancement of Images in Through-the-Wall Radar Using a Radiation Pattern-Based Delayed-Sum Algorithm," *J. Electromagn. Eng. Sci.*, vol. 14, no. 4, pp. 405–410, Dec. 2014.
- [28] D. Massonnet, J.-C. Souyris, and J.-C. Souyris, *Synthetic Aperture Radar Imaging*. EFPL Press, 2008.
- [29] M. A. Richards, J. Scheer, W. A. Holm, and W. L. Melvin, *Principles of modern radar*. Citeseer, 2010.



Comparison Study of Signal Processing Algorithms for 3D SAR Imaging of MM-WAVE GBSAR System

Seyed Benyamin Hosseini ¹, Jalal amini ^{2*}, Safiodin Safavi Naeini ³

1- Ph.D. candidate of remote sensing in Department of Surveying and Geospatial Engineering, College of Engineering, University of Tehran

2- Professor in Department of Surveying and Geospatial Engineering, College of Engineering, University of Tehran

3- Professor in Faculty of Electrical and Computer Engineering, University of Waterloo, ON., Canada

Abstract

This paper evaluates and compares the three-dimensional imaging algorithms for an mm-wave ground based synthetic aperture radar system. There has been significant attention to the development of new ground-based synthetic aperture radar (GBSAR) systems by increasing the demands for various radar remote sensing applications and data. GBSAR systems have unique capabilities, including optimum visual angle to the area of interest, high imaging rate, and low manufacturing and maintenance costs. However, the drawbacks of GBSAR systems can be their limited length of synthetic aperture and high variation between the near and far range comparing to the airborne and satellite systems. These can affect the received signals and, consequently, the final radar image. To this end, in this paper, three signal processing algorithms, including the Backprojection (BP), Fourier Transform (FT), and Range Migration (RMA), are evaluated for three-dimensional SAR imaging of a GBSAR. This system operates in W frequency band and consists of a two-dimensional mechanical rail to generate a planar synthetic aperture. The above algorithm were investigated in a simulation environment using two different experiments, and the results were evaluated with four metrics, including angular resolution, peak sidelobe ratio (PSLR), integrated sidelobe ratio (ISLR), and signal-to-clutter ratio (SCR). According to the obtained results, all three algorithms presented acceptable imaging results. However, RMA demonstrated a high sensitivity of the target reflectivity to its distance from the zero Doppler line. Furthermore, RMA had more stability in decreasing the angular resolution by increasing the target's range than the BP and FT algorithms. In contrast, BP and FT obtained poor results in near-field areas. In the case of signal compression, generally, RMA got poor results compared to the other two algorithms, which led to inappropriate results in far distances. Because of having a similar attitude, BP and FT, mostly obtained similar results. However, FT obtained more appealing results with better angular resolution, while the BP algorithm demonstrated slightly better signal compression.

Key words: Range migration algorithm, Backprojection, Fourier transform, Frequency domain, Time domain.