نشریه علمی مهندسی فناوری اطلاعات مکانی

سال دهم، شماره اول، بهار ۱۴۰۱

Vol.10, No.1, Spring 2022

۶۹ -۸۷

مقاله پژوهشی

DOR: 20.1001.1.20089635.1401.10.1.3.7

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-10]

[DOR: 20.1001.1.20089635.1401.10.1.3.7]

[DOI: 10.52547/jgit.10.1.69]

مقایسه الگوریتم‌های پردازش سیگنال به‌منظور تشکیل تصویر سه‌بعدی رادار روزنه مصنوعی برای سامانه زمینی در باند میلیمتری

سیدبنیامین حسینی[۱]، جلال امینی[۲*]، صفی‌الدین 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 سه‌بعدی 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. بااین‌حال، طول روزنه مصنوعی در سامانه‌های *GBSAR* محدود است و علاوه‌براین، اختلاف بین برد نزدیک و دور، درمقایسه با سامانه‌های هوابرد یا ماهواره‌ای، زیاد است. موارد ذکرشده در سیگنال‌های دریافتی و درنتیجه کیفیت تصویر نهایی تاثیرگذار هستند. در این مقاله سه الگوریتم پردازش سیگنال بک‌پروجکشن(*BP*)، تبدیل فوریه (*FT*)، و رنج-مایگریشن (*RMA*) برای تشکیل تصویر سه‌بعدی در سامانه *GBSAR* توسعه‌پیداکرده و بررسی می‌شوند. سامانه مورد نظر در باند *W* فعالیت می‌کند و از دو ریل افقی و عمودی به‌منظور 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 سه‌بعدی 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. علاوه‌براین، تفکیک‌پذیری زاویه در الگوریتم *RMA* نسبت به تغییر برد اهداف پایدار است در حالیکه دو الگوریتم دیگر در فواصل نزدیک تفکیک‌پذیری ضعیفی را به‌همراه دارند. در بررسی فشرده‌سازی انرژی سیگنال، تصویر الگوریتم *RMA* نتایج ضعیف‌تری را به‌همراه داشت که باعث نتایج نامطلوب این الگوریتم در فواصل دور گردید. دو الگوریتم *FT* و *BP* در اکثر موارد نتایج مشابهی را به‌همراه داشتند که می‌تواند به‌علت شباهت در رویکرد هر دو الگوریتم باشد. الگوریتم *FT* برای سامانه مورد نظر تفکیک‌پذیری بهتری را به‌همراه داشت و درحالی‌که *BP* عملکرد مناسب‌تری در فشرده‌سازی به‌همراه 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: ۰۲۱۶۱۱۱۴۳۷۸

Email: jamini@ut.ac.ir

۱- مقدمه

امروزه سامانه‌های تصویربرداری رادار روزنه مصنوعی[1] (*SAR*) در بخش‌های وسیعی از سنجش‌ازدور کاربرد دارند. برتری اصلی تصویربرداری رادار روزنه مصنوعی نسبت به رادار معمولی را می‌توان در قابلیت تفکیک‌پذیری اهداف در راستای عمود بر برد دانست. این برتری با استفاده از هندسه تصویربرداری این نوع سامانه‌ها و بهره‌گیری از روش‌های پردازش سیگنال به‌وجود می‌آید.

در تصویربرداری رادار روزنه مصنوعی، سامانه در راستای عمود بر راستای برد و معمولا در مسیری خطی حرکت می‌کند. در حین حرکت، سنجنده رادار دائما 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 عمودبر برد خواهدبود. با این‌حال، 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. بطورکلی 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[3] *(BP)* در حیطه زمان و الگوریتم‌های *RDA*[4]، *PFA*[5]، *CSA*[6] و *RMA*[7] در حیطه فرکانس اشاره‌نمود [۴، ۵، و ۶]. عموما الگوریتم‌های حیطه زمان به‌علت استفاده از حلقه‌های تکرار دارای بارمحاسباتی 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 عموما کاربرد زیادی در سامانه‌های ماهواره‌ای و هوابرد دارند. به‌عنوان مثال، کاربرد و توسعه الگوریتم‌های *BP* و *RDA* برای سامانه هوایی با موج پیوسته مدوله‌شده در باند *X* در پژوهش[۸] ارائه شده‌است. 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 هوابرد *SAR* نام برد. مقاله [۳] مروری بر کاربرد الگوریتم‌های ذکرشده، در سامانه‌های هوابرد 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 به‌تنهایی کافی نیست و همچنان تصحیح خطاهای حرکتی به‌عنوان 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 جلب‌کرده‌است [۹ و ۱۰]. سامانه‌های *GBSAR*، دارای قابلیت‌ها و برتری‌های زیادی در مقایسه‌های سامانه‌های هوابرد و ماهواره‌ای هستند.

[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*
[8] *Ground-Based SAR (GBSAR)*

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-10]
[DOR: 20.1001.1.20089635.1401.10.1.3.7]
[DOI: 10.52547/jgit.10.1.69]

سامانه‌های زمینی عموما 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. علاوه‌براین 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 مدل-های متنوعی از روزنه مصنوعی نیز مود توجه قرارگرفته است [۹]. به‌عنوان 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[1] چندین برابر برد نزدیک[2] است. نکات ذکرشده، تاثیر مستقیمی در کیفیت تصویر نهایی راداری دارند [۱۶]. از این‌رو، بررسی و ارزیابی عملکرد الگوریتم‌های تشکیل تصویر، قبل بهره‌برداری از تصویر *GBSAR* از اهمیت بالایی برخوردار است.

همانطور که اشاره‌شد، سامانه‌های زمینی چالش اصلی مربوط به سامانه‌های هوابرد و ماهواره‌ای یعنی اثرات 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 خواهندداشت [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 قرارگیرند. 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، ارائه‌شده‌اند. به-عنوان مثال، زو و ساتو (۲۰۱۹) الگوریتمی برمبنای 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 سال-های اخیر، استفاده از الگوریتم‌های تخمین سیگنال و استخراج اهداف مانند، الگوریتم‌های کپون[3]، *MUSIC*[4]، و حسگری فشرده[5] نیز در تصویربرداری سامانه‌های زمینی رواج پیداکرده‌اند. الگوریتم‌های مذکور عموما با

[1] *Far range*
[2] *Near range*
[3] *Capon*
[4] *MUltiple SIgnal Classification*
[5] *Compressive sensing*

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-10]
[DOR: 20.1001.1.20089635.1401.10.1.3.7]
[DOI: 10.52547/jgit.10.1.69]

بهره‌گیری از ماتریس کوواریانس حاصل از سیگنال‌های به آشکارسازی اهداف داخل تصویر می‌پردازند که با وجود اینکه می‌توانند عملکرد مناسبی داشته‌باشند 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 شبیه-سازی 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 چندورودی-چندخروجی[1] ($MIMO$) در باند W با ترکیب تصویربرداری رادار روزنه مصنوعی زمینی مورد بررسی قرارگرفتند. 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 دوبعدی تشکیل‌شده 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 به‌منظور تشکیل تصویر سه‌بعدی راداری بیان می‌شوند. معیارهای ارزیابی در بخش سوم بیان می‌شوند. در بخش چهارم، نتایج شبیه‌سازی مورد بررسی و ارزیابی قرار می‌گیرند. درنهایت، 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 به‌منظور ایجاد تصویر راداری سه‌بعدی بیان می‌شود. سپس، مدل سیگنال دریافتی، و نحوه عملکرد الگوریتم‌های پردازش سیگنال به‌منظور 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 وجودندارد. به‌منظور رفع این محدودیت از روش تصویربرداری رادار روزنه مصنوعی استفاده می-شود. در این روش سنجنده در راستایی عمود بر راستای برد حرکت کرده و به ارسال، دریافت، و تجمیع همدوس[2] 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. درنتیجه، 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 قرارگرفته و با گام‌های تعیین‌شده 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 درنهایت 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 علاوه‌بر تفکیک‌پذیری برد و زاویه آزیموت (افقی)، به تفکیک‌پذیری در راستای ارتفاع (زاویه عمودی) نیز دست‌یافت. درنتیجه می‌توان به موقعیت سه‌بعدی اهداف رسید و باعث کاهش بروز خطاهای هندسی رایج در تصاویر راداری مانند کوتاه‌شدگی(*Foreshortening*) و هم‌پوشانی (*Layover*) شد.

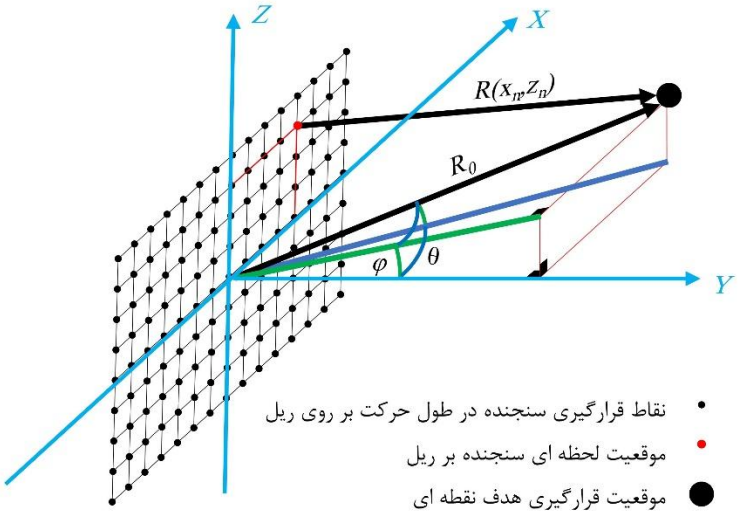
شکل(۱) هندسه تصویربرداری رادار با روزنه مصنوعی

[1] *Multiple input multiple output*

[2] *Coherent*

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-10]
[DOR: 20.1001.1.20089635.1401.10.1.3.7]
[DOI: 10.52547/jgit.10.1.69]

دوبعدی را نمایش می‌دهد. در این حالت سنجنده بصورت گام به گام بر روی صفحه حرکت‌کرده و به ارسال و دریافت سیگنال از محیط می‌پردازش. داده ذخیره شده بصورت یک ماتریس سه‌بعدی خواهدبود که هر یک از ابعاد آن بیانگر راستاهای برد (محور y)، آزیموت (زاویه افقی، محور x)، و ارتفاع (زاویه عمودی، محور z) خواهندبود.



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

۲-۲- پردازش سیگنال رادار روزنه مصنوعی

بطورکلی 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.

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 ذخیره‌شده در ماتریس داده بصورت رابطه (۲) بیان می‌شود [۲۳].

رابطه(۲)

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

[۱] *Fourier transform*

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-10]
[DOR: 20.1001.1.20089635.1401.10.1.3.7]
[DOI: 10.52547/jgit.10.1.69]

در رابطه (۲)، عبارت $k_r=4\pi/\lambda$ بیانگر عدد موج[1] یا فرکانس مکانی[2] در راستای برد است. عبارت $s(x,y,z)$ که بیانگر بازتابندگی[3] هدف در نقطه (x,y,z) می‌باشد، از معکوس رابطه (۲) و پس از دریافت تمام سیگنال‌های سنجنده در طول روزنه مصنوعی، طبق رابطه (۳) محاسبه می‌شود [۲۳].

رابطه(۳)

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

در رابطه (۳)، A بیانگر صفحه‌ای است که سنجنده به‌منظور ایجاد روزنه مصنوعی بر آن حرکت می‌کند.

۲-۲-۲-تشکیل تصویر رادار روزنه مصنوعی

بطورکلی، هدف الگوریتم‌های تشکیل تصویر رادار روزنه مصنوعی، براورد 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 بیان‌شده و روابط ریاضی آن‌ها برای تصویربرداری سه‌بعدی ارائه می‌گردند.

۲-۲-۲-۱-تشکیل تصویر با الگوریتم *BP*

الگوریتم *BP* با فشرده‌سازی سیگنال با استفاده از فیلتر منطبق به حل معادله رابطه (۳) و تشکیل تصویر رادار روزنه مصنوعی می‌پردازد. فیلتر منطبق به‌نوعی عملگر کانولوشن در حوزه زمان است و در حالتی که نیاز به فشرده‌سازی سیگنال در دو راستا (آزیموت و ارتفاع) باشد، آنگاه می‌توان این فیلتر را دوبعدی فرض نمود. بنابراین، در مرحله نخست سیگنال خام $d(x_n,k_r,z_n)$ در راستای برد فشرده می‌شود. لازم به ذکر است که در سامانه‌های با سیگنال *FMCW*[4]، فشرده‌سازی در راستای برد با اعمال تبدیل فوریه یک‌بعدی به سیگنال خام در این راستا بدست می‌آید. درنهایت، فیلتر منطبق در راستای آزیموت و ارتفاع بصورت رابطه (۴) بر سیگنال فشرده‌شده در برد اعمال می‌شود [۱۴ و ۱۹].

رابطه(۴)

$$s(\phi,\theta,R)=\iint_A d_{rc}(x_n,R,z_n)\times MF(x_n,z_n)\times dx_n dz_n$$

در رابطه (۴)، ϕ، و θ به‌ترتیب بیانگر زاویه قائم، و زاویه افقی هدف نقطه‌ای از مبدا سیستم مختصات کروی هستند. (x_n,z_n) بیانگر موقعیت لحظه‌ای قرارگیری سنجنده بر روی صفحه A است. $d_{rc}(x_n,R,z_n)$ بیانگر سیگنال خام فشرده‌شده در راستای برد، و $MF(x_n,z_n)$ بیانگر فیلتر منطبق است که در رابطه (۵) بیان می‌شود.

رابطه(۵)

$$MF(x_n,z_n)=\exp(jk_rR(x_n,z_n))$$

بنابراین مراحل پردازشی الگوریتم *BP* را می‌توان بصورت زیر بیان‌نمود:

۱- فشرده‌سازی سیگنال خام در راستای برد

۲- ایجاد شبکه منظم سه‌بعدی 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 می‌گیرد.

۲-۲-۲-۲-تشکیل تصویر براساس تبدیل فوریه

محاسبه فاصله سنجنده تا هدف که در رابطه (۱) بیان‌شد را می‌توان در سیستم مختصات کروی برای هدفی واقع در (ϕ,θ,R_0) بصورت رابطه (۶) بیان‌نمود.

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 نقطه‌ای از مرکز سیستم مختصات کروی است. با تقریب بسط تیلور چندمتغیره، می‌توان رابطه(۶) را بصورت رابطه (۷) بازنویسی‌کرد.

رابطه(۷)

$$R(x_n,z_n)\cong R_0-x_n\sin\theta-z_n\sin\phi$$

با جایگذاری رابطه(۷) در رابطه(۳) می‌توان، سیگنال

[1] *Wavenumber*
[2] *Spatial frequency*
[3] *Reflectivity*
[4] *Frequency modulated continuous wave*

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-10]
[DOR: 20.1001.1.20089635.1401.10.1.3.7]
[DOI: 10.52547/jgit.10.1.69]

بازتابندگی هدف در (ϕ,θ,R_0) را بصورت رابطه(۸) بازنویسی‌کرد. رابطه (۸) را می‌توان بصورت رابطه(۹) بیان‌نمود که در آن فرکانس سیگنال به دو بخش فرکانس حامل (f_c) و فرکانس مدولاسیون (f_m) تفکیک می‌شود.

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

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

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.

۲-۲-۲-۳-تشکیل تصویر با الگوریتم *RMA*

الگوریتم *RMA* مشابه الگوریتم تبدیل فوریه تماما 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) به‌ترتیب 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 (آزیموت و ارتفاع)، به‌منظور انتقال داده خام به فضای فرکانسی در هر سه‌راستای 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 معمولا برابر با فاصله مرکز تصویربرداری از مرکز آنتن سنجنده یا برابر با صفر درنظر 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

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-10]
[DOR: 20.1001.1.20089635.1401.10.1.3.7]
[DOI: 10.52547/jgit.10.1.69]

است. درنهایت، پس از این تبدیل معادله سیگنال به‌شکل رابطه (۱۴) می‌شود.

۴- مرحله چهارم مختص تبدیل فضا از فضای فرکانس به فضای مکان است. همانطور که در رابطه (۱۴) بیان می‌شود، سیگنال در فضای فرکانسی و در شبکه منظمی قرار دارد. بنابراین، با اعمال تبدیل فوریه سه‌بعدی می‌توان به فضای مکان رسید و بدین‌ترتیب تصویر نهایی ایجاد می‌شود (رابطه (۱۵)).

رابطه(۱۰)
$$D(k_x,k_r,k_z)=2DFT\left\{d\left(x,k_r,z\right)\right\}=\iint d\left(x,k_r,z\right)\times\exp\left(-jk_x x-jk_z z\right)dxdz$$

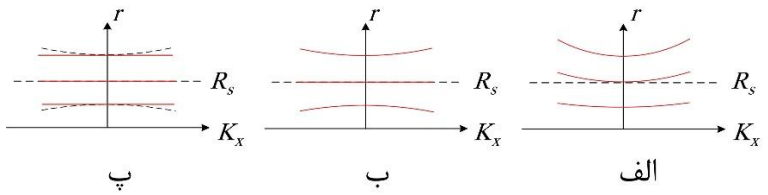
رابطه(۱۱)
$$D(k_x,k_r,k_z)\cong\exp\left\{-j\left(k_x x+k_z z+y\sqrt{k_r{}^2-k_x{}^2-k_z{}^2}-R_s k_r\right)\right\}$$

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

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

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

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



شکل ۲: تاثیر اعمال فیلتر منطبق و تبدیل استولت در برطرف‌کردن انحنای برد اهداف در الگوریتم *RMA*: الف) سیگنال فشرده‌شده در برد قبل از تصحیح انحنا. ب) تصحیح انحنای برد اهداف نسبت به خط برد مرجع با اعمال فیلتر منطبق دوبعدی (رابطه (۱۲)). پ) تصحیح انحنای برد اهداف پس از تبدیل و درون‌یابی استولت

۲-۳- معیارهای ارزیابی

در این مقاله، نتایج بدست‌آمده توسط چهار معیار تفکیک‌پذیری زاویه‌ای، نسبت لوب بیشینه به لوب کناری (*PSLR*[۱])، نسبت نسبت لوب اصلی به تجمیع لوب‌های کناری (*ISLR*[۲]) و نسبت سیگنال به کلاتر (*SCR*[۳]) ارزیابی می‌شوند.

تفکیک‌پذیری زاویه‌ای در حالت رادار روزنه مصنوعی مطابق رابطه (۱۶) محاسبه می‌شود که واحد آن به

[۱] *Peak sidelobe ratio (PSLR)*

[۲] *Integrated sidelobe ratio (ISLR)*

[۳] *Signal to clutter ratio (SCR)*

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-10]
[DOR: 20.1001.1.20089635.1401.10.1.3.7]
[DOI: 10.52547/jgit.10.1.69]

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

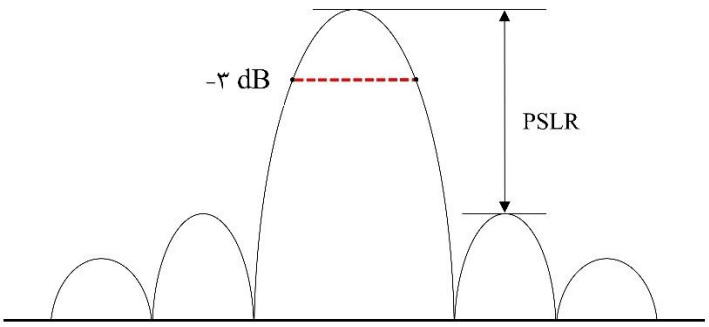
محاسبه *SCR* به‌وسیله رابطه (۱۸) صورت می‌گیرد. در این رابطه A_t و A_c به‌ترتیب بیانگر محدوده هدف و محدوده کلاتر در تصویر و N_c تعداد پیکسل‌های موجود در محدوده کلاتر هستند [۲۷].

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.

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

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

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



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

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-10]
[DOR: 20.1001.1.20089635.1401.10.1.3.7]
[DOI: 10.52547/jgit.10.1.69]

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.

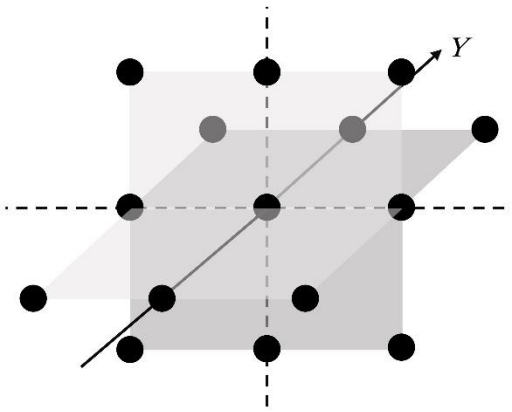
جدول(۱) مشخصات کامل سامانه شبیه‌سازی شده را بیان می‌کند. در این بخش پانزده پراکنده‌گر نقطه‌ای با شدت پراکندگی یکسان در فضای سه‌بعدی شبیه‌سازی شدند.

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 قرارگرفته‌اند.

شکل(۵) نیز نتایج تشکیل تصویر توسط سه الگوریتم بیان‌شده را در دو راستای آزیموت و ارتفاع نمایش می‌دهد.

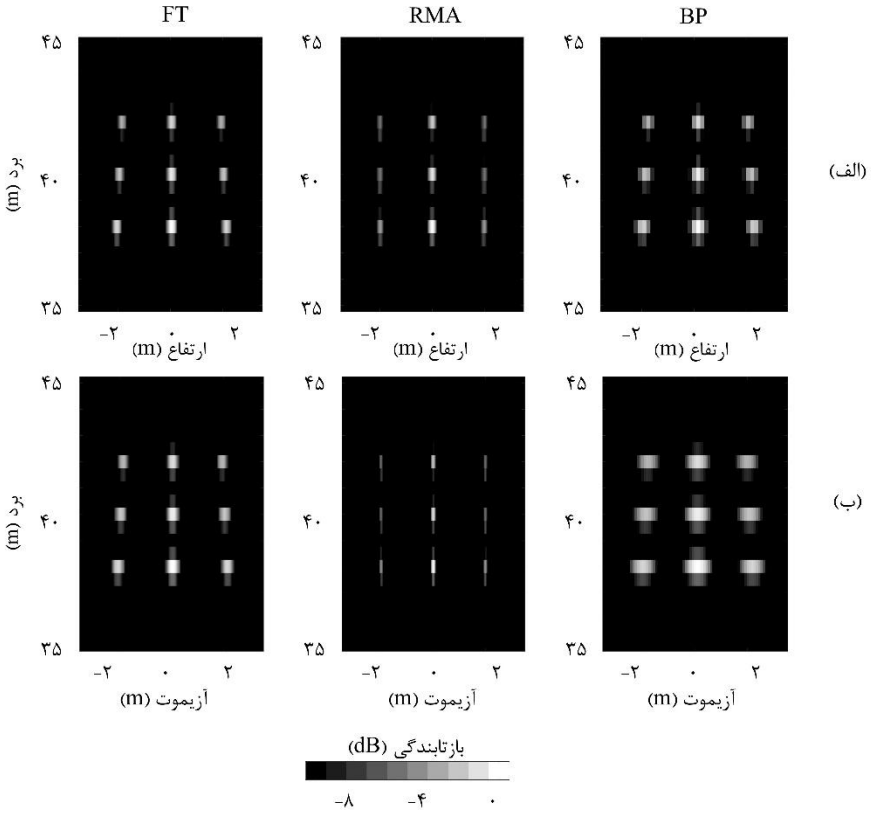
جدول ۱: پارامترهای اساسی سامانه رادار روزنه مصنوعی شبیه‌سازی شده

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) قرارگرفته‌اند.

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-10]
[DOR: 20.1001.1.20089635.1401.10.1.3.7]
[DOI: 10.52547/jgit.10.1.69]



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*)

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، باتابندگی هدف در موقعیت (۰، ۴۰، ۲) در الگوریتم‌های *RMA*، *BP* و *FT* به‌ترتیب ۵٫۴۳-، ۲٫۳۵-، و ۲٫۳- دسی‌بل بدست آمده که شدت الگوریتم *RMA* نسبت به دو الگوریتم دیگر بیش از ۳ دسی‌بل ضغیف‌تر است.

در تصویربرداری راداری فواصل نزدیک و دور براساس شرط فرانهوور به‌ترتیب 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 دوردست محسوب می‌شوند. به‌همین ترتیب درصورتیکه طول آنتن ۹۰ سانتی‌متر باشد، محدوده بین ۸٫۲ تا ۴۱۶٫۱ به‌عنوان میدان نزدیک و خارج از آن نیز میدان دوردست محسوب می‌شود.

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

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

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-10]
[DOR: 20.1001.1.20089635.1401.10.1.3.7]
[DOI: 10.52547/jgit.10.1.69]

جدول ۲: شدت بازتابندگی اهداف بر اساس الگوریتم‌های تشکیل تصویر

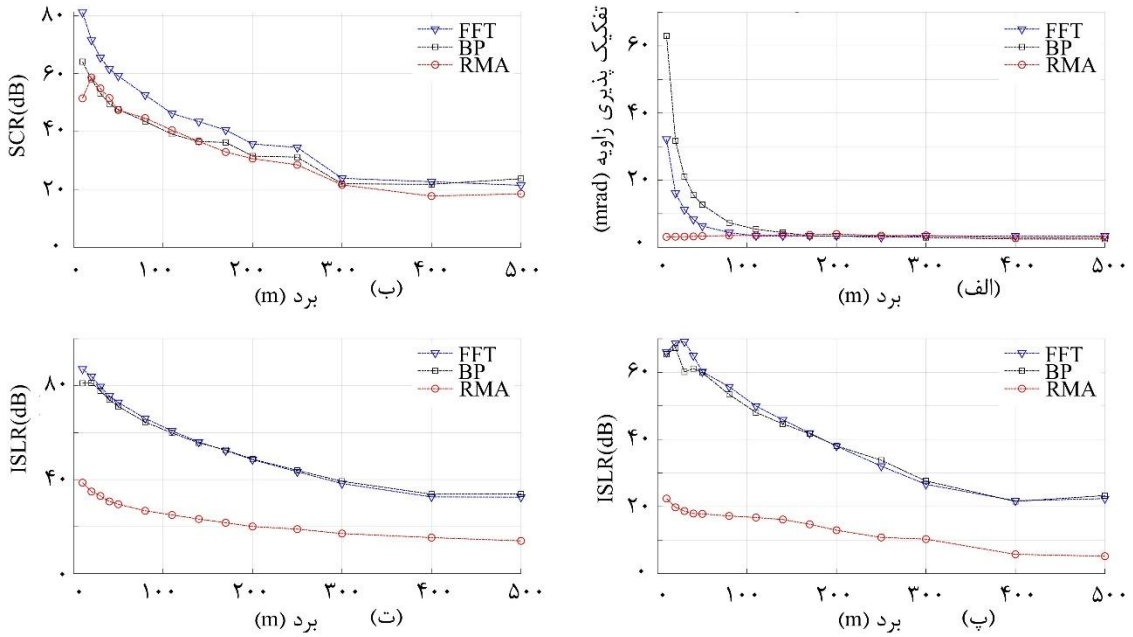
موقعیت هدف	میزان بازتابندگی (دسی‌بل)		
(x,y,z)	BP	RMA	FT
(۰، ۳۸، ۰)	۰	۰	۰
(۰، ۳۸، ۲)	-۱٫۷۱	-۳٫۹۳	-۱٫۶۴
(۰، ۳۸، -۲)	-۱٫۶۹	-۳٫۹۹	-۱٫۶۳
(۰، ۴۰، ۰)	-۰٫۷۲	-۱٫۰۱	-۰٫۷۱
(۰، ۴۰، ۲)	-۲٫۳۵	-۵٫۴۳	-۲٫۳
(۰، ۴۰، -۲)	-۲٫۳۵	-۵٫۴۹	-۲٫۲۶
(۰، ۴۲، ۰)	-۱٫۴۱	-۱٫۹۹	-۱٫۴
(۰، ۴۲، ۲)	-۲٫۹۷	-۵٫۳۷	-۲٫۸۸
(۰، ۴۲، -۲)	-۲٫۹۷	-۵٫۴۲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

شکل(۶) و (۷) به‌ترتیب 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 میلی-رادیان به‌ترتیب در راستاهای ارتفاع و آزیموت است. درحالیکه، در شرایط مشابه، الگوریتم‌های BP و FT به-ترتیب دارای تفکیک‌پذیری ۳۵ و ۱۸ میلی‌رادیان در راستای ارتفاع؛ و تفکیک‌پذیری ۶۵ و ۳۵ میلی‌رادیان در راستای آزیموت هستند.

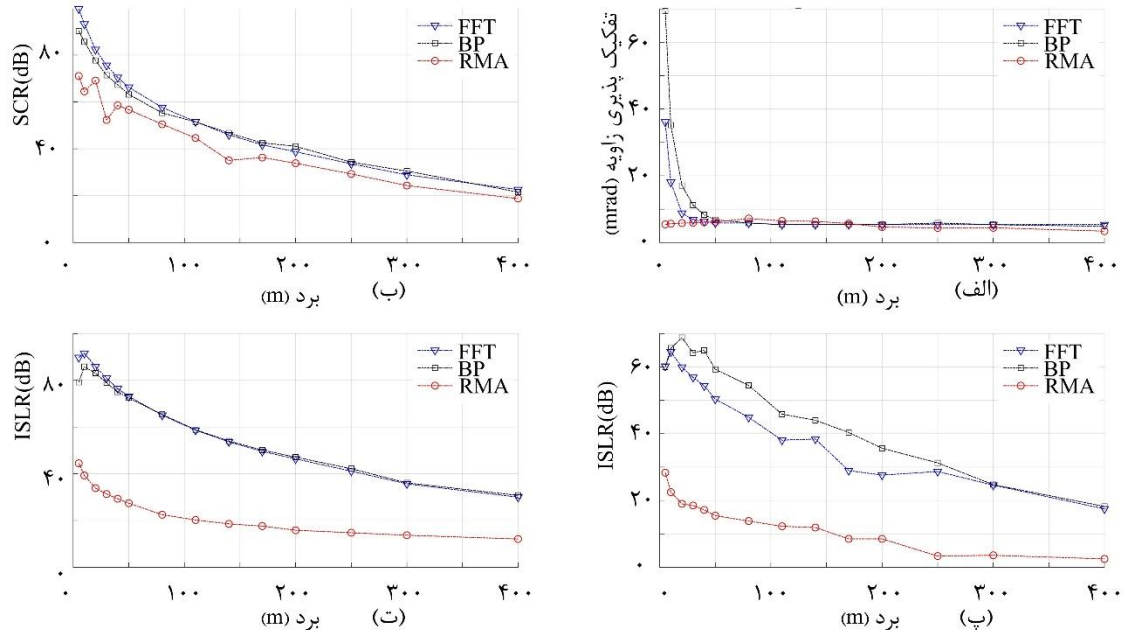
با این حال با افزایش فاصله هدف تا سنجنده و نزدیک شدن به میدان دور، تفکیک‌پذیری الگوریتم‌های BP و FT نیز با تفکیک‌پذیری RMA منطبق می‌شوند. بنابراین در میدان دور، برای سامانه با مشخصات جدول(۱) تفکیک‌پذیری در راستای ارتفاع حدود ۷٫۵ میلی‌رادیان و در رستای آزیموت حدود ۵ میلی‌رادیان بدست آمدند.

برای ارزیابی قدرت فشرده‌سازی الگوریتم‌ها می‌توان به بررسی نمودارهای SCR، $ISLR$ 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 بیان-شده در الگوریتم‌های مورد بررسی کاهش می‌یابند. با این حال، با اینکه الگوریتم‌های BP و FT نتایج مشابهی را کسب‌کردند 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.

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-10]
[DOR: 20.1001.1.20089635.1401.10.1.3.7]
[DOI: 10.52547/jgit.10.1.69]



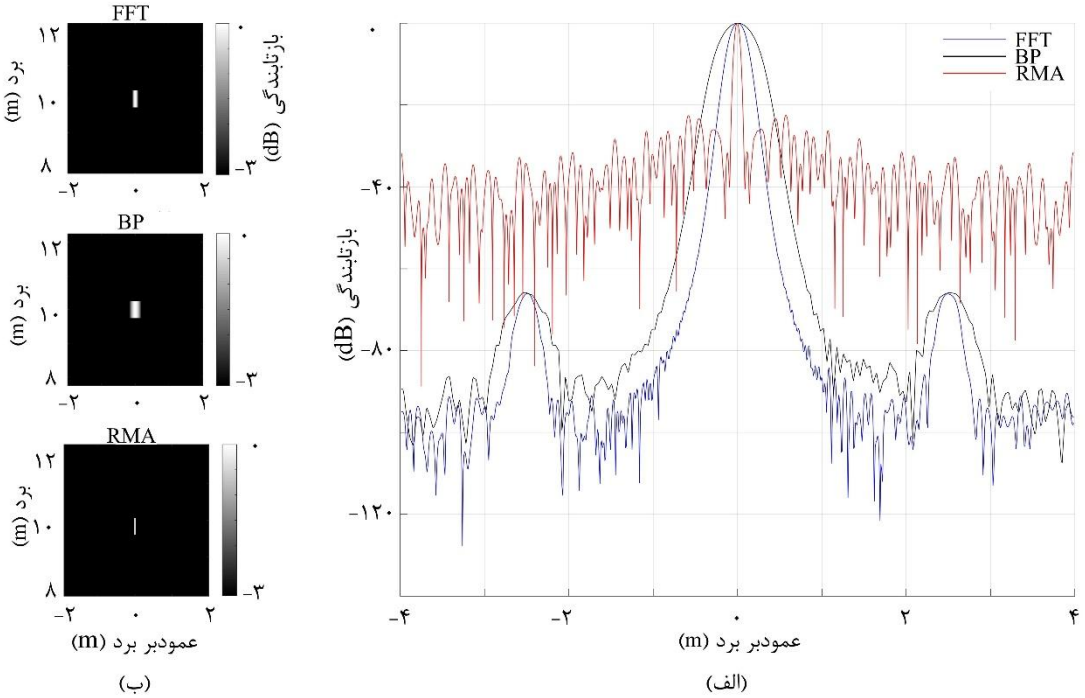
شکل۶: نتایج ارزیابی تشکیل تصویر در راستای آزیموت برای اهداف در بردهای مختلف. (الف) نمودار تغییرات تفکیک‌پذیری زاویه نسبت به برد. (ب) نمودار تغییرات *SCR* نسبت به برد. (پ) نمودار تغییرات *PSLR* نسبت به برد. (ت) نمودار تغییرات *ISLR* نسبت به برد.



شکل۷: نتایج ارزیابی تشکیل تصویر در راستای ارتفاع برای اهداف در بردهای مختلف. (الف) نمودار تغییرات تفکیک‌پذیری زاویه نسبت به برد. (ب) نمودار تغییرات *SCR* نسبت به برد. (پ) نمودار تغییرات *PSLR* نسبت به برد. (ت) نمودار تغییرات *ISLR* نسبت به برد.

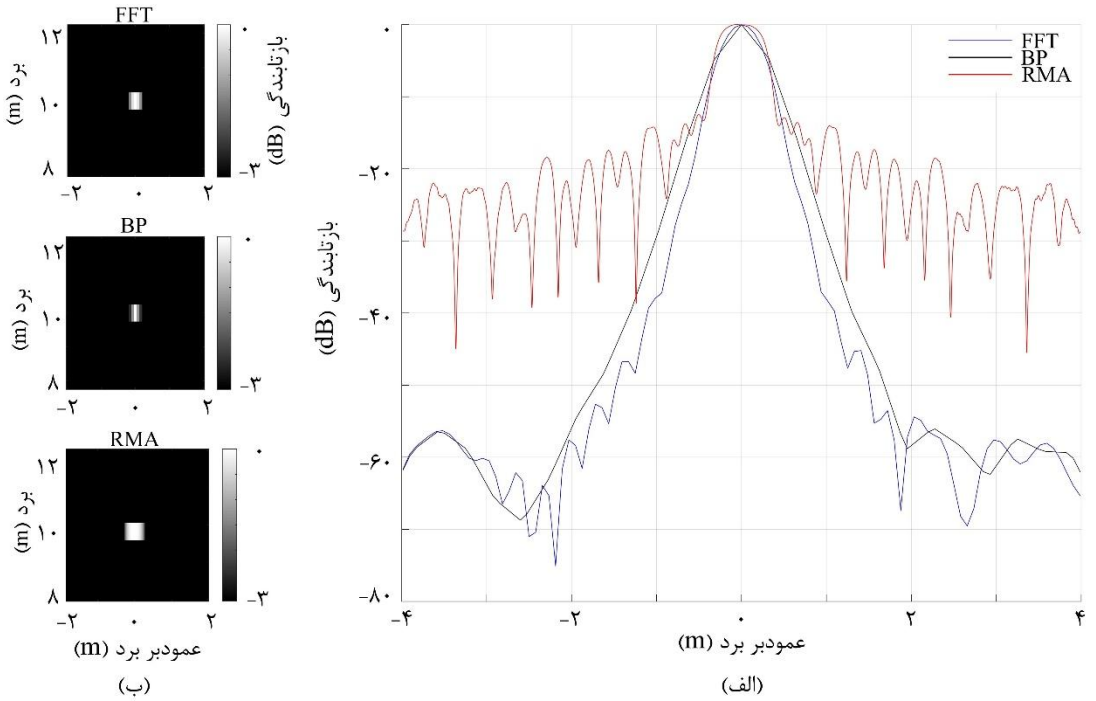
[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-10]
[DOR: 20.1001.1.20089635.1401.10.1.3.7]
[DOI: 10.52547/jgit.10.1.69]

شکل(۸)، شکل(۹) و شکل(۱۰)، نگاه دقیق‌تری را به نتایج فشرده‌سازی و تشکیل تصویر سه الگوریتم مورد بررسی به‌ترتیب 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 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.

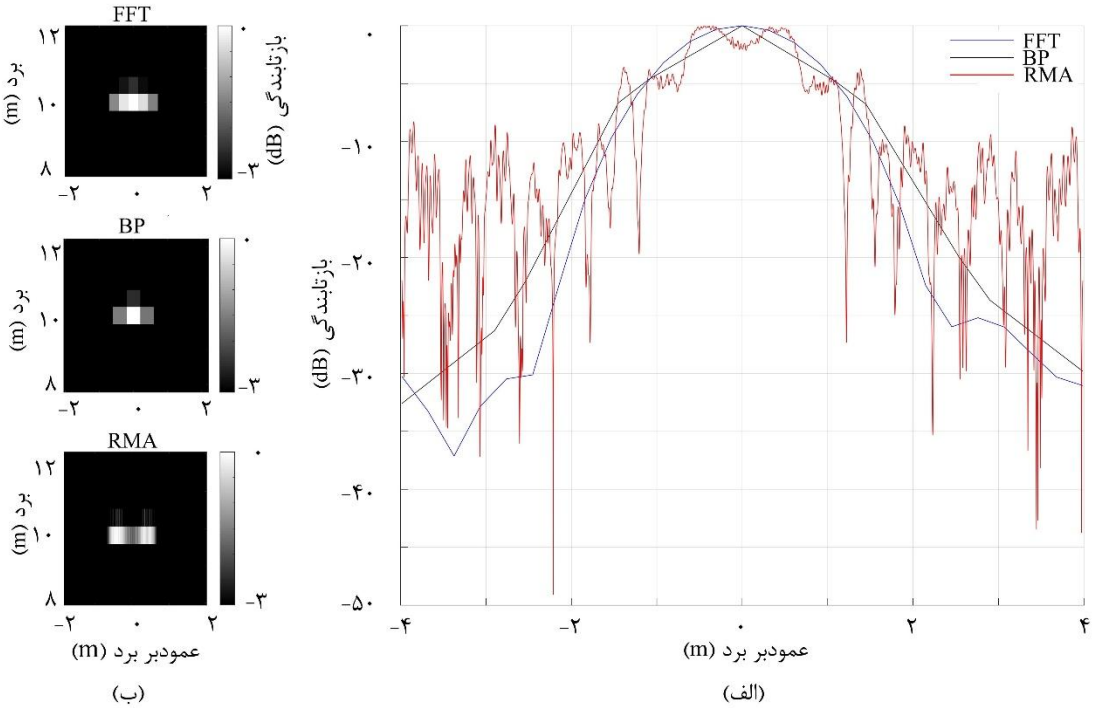


شکل ۸: نتیجه تشکیل تصویر هدف در فاصله ۱۰ متری. (الف) سیگنال یک‌بعدی فشرده‌شده هدف در راستای عمود بر برد. (ب) تصاویر تشکیل‌شده توسط الگوریتم‌های مورد بررسی

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-10]
[DOR: 20.1001.1.20089635.1401.10.1.3.7]
[DOI: 10.52547/jgit.10.1.69]



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

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-10]
[DOR: 20.1001.1.20089635.1401.10.1.3.7]
[DOI: 10.52547/jgit.10.1.69]

۳-بحث

در این بخش سعی‌شده تا براساس نتایج ارائه‌شده در بخش قبلی، عملکرد الگوریتم‌های بررسی‌شده از جنبه‌های گوناگون از جمله تفکیک‌پذیری و کشف اهداف، مورد بحث و مقایسه قرار گیرد.

۳-۱- قدرت تفکیک‌پذیری

الگوریتم *RMA* تفکیک‌پذیری زاویه‌ای بهتری را در هر دو راستای افقی و عمودی، نسبت به دو الگوریتم تشکیل تصویر دیگر بدست آورد. بطور دقیق‌تر، طبق نمودارهای شکل۶-الف) و شکل۷-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 تفکیک‌پذیری بسیار ضعیفی هستند و با افزایش فاصله هدف از فضای میدان نزدیک، می‌توان مشاهده‌کرد که تفکیک‌پذیری الگوریتم‌های *BP* و *FT* نیز با تفکیک‌پذیری *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 آزیموت، 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. بطوری‌که 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 تفکیک‌پذیری ضعیف آن‌ها در مقایسه با الگوریتم *RMA* در فواصل نزدیک باشد.

۳-۲- قدرت فشرده‌سازی اهداف

با افزایش برد اهداف می‌توان دریافت که سطح معیارهای *SCR*، *ISLR*، و *PSLR* کاهش‌یابد (شکل۶) و شکل۷) 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 بررسی‌شده است [۲۹]. با این حال، الگوریتم‌های *BP* و *FT* در هر سه معیار ذکرشده عملکرد بهتری را نسبت به *RMA* ارائه‌کردند. درحالیکه، عملکرد نسبتا قوی‌تر *FT*، در مقایسه با *BP* را می‌توان به‌علت نرم کردن سیگنال‌ها با نمونه‌افزایی در فرایند تبدیلات فوریه دانست. با این‌حال، وجود مقادیر *SCR* بسیار نزدیک در هر سه الگوریتم (شکل۶-ب) و شکل۷-ب))، بیانگر قابلیت کشف اهداف در الگوریتم *RMA* با وجود قدرت فشرده‌سازی ضعیف‌تر نسبت به الگوریتم‌های *BP* و *FT* است.

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

همچنین، همانطور که در قسمت مقدمه اشاره‌شد، در حالت‌های تصویربرداری هوابرد و فضایی که دارای طول روزنه مصنوعی نامحدود هستند، عموما 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 قراردارند و با افزایش فاصله، عوارض برداشت‌شده نیز افزایش می‌یابند [۱۶]. درنتیجه، برای فشرده‌سازی اهداف در فواصل دور از سنجنده GBSAR با کمک الگوریتم RMA نیاز به نمونه‌برداری بسیار زیاد در راستای عمودبر برد است که باعث افزایش شدید بار محاسباتی الگوریتم و عملا غیرکاربردی بودن آن برای فواصل دور می‌شود [۱۳].

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-10]
[DOR: 20.1001.1.20089635.1401.10.1.3.7]
[DOI: 10.52547/jgit.10.1.69]

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. درنتیجه، می‌توان با ایجاد روزنه مصنوعی در راستاهای آزیموت 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. بطورکلی، 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 آزیموت و ارتفاع می‌گردد. در نتیجه، در این مقاله الگوریتم‌های بیان‌شده برای تصویربرداری سه‌بعدی راداری توسعه پیداکردند. در ابتدا نتایج تشکیل تصویر با حضور پانزده هدف پراکنده‌گر در محیط تصویر مورد بررسی قرارگرفتند. طبق نتایج، هر سه الگوریتم نتایج مناسبی را داشتند. با این حال، در الگوریتم *RMA* اهداف متمرکزتر ظاهرشدند ولی در مقابل با افزایش زاویه اهداف از مرکز تصویر، میزان انرژی بازتابی اهداف در الگوریتم *RMA* در مقایسه با دو الگوریتم دیگر کاهش شدیدتری را شاهد 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، *ISLR*، *PSLR*، و *SCR* مورد بررسی قرار گرفتند. طبق نتایج، تفکیک‌پذیری زاویه در تصویر حاصل از *RMA* در مقابل تغییرات برد اهداف مقاوم بوده و حساسیتی نشان‌نداد. درحالی 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 عمل‌کرد. 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. درنهایت، 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 علاوه‌بر 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.

مراجع

[1] *I. G. CummingF 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*

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-10]
[DOR: 20.1001.1.20089635.1401.10.1.3.7]
[DOI: 10.52547/jgit.10.1.69]

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-Fąfara, 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. Esmaeilzade, and M. Nekoee, "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

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-10]
[DOR: 20.1001.1.20089635.1401.10.1.3.7]
[DOI: 10.52547/jgit.10.1.69]

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.

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-10]
[DOR: 20.1001.1.20089635.1401.10.1.3.7]
[DOI: 10.52547/jgit.10.1.69]

K. N. TOOSI UNIVERSITY OF TECHNOLOGY
FACULTY OF GEODESY AND GEOMATICS ENGINEERING

Journal of Geospatial Information Technology
Vol.10, No.1, Spring 2022

Research Paper

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 satéllite 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.*

Correspondence Address*: Remote Sensing Group, Department of Surveying and Geospatial Engineering, College of Engineering, University of Tehran.*
Tel*: + 98 21 61114378.*
Email: *jamini@ut.ac.ir*

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-10]
[DOR: 20.1001.1.20089635.1401.10.1.3.7]
[DOI: 10.52547/jgit.10.1.69]