نشربه علمي مهندسي فناوري اطلاعات مكاني

سال دهم، شماره اول، بهار ۱۴۰۱ Vol.10, No.1, Spring 2022 ۱۹–۸۷

مقالہ پژوهشی DOR: <u>20.1001.1.20089635.1401.10.1.3.7</u>



سیدبنیامین حسینی'، جلال امینی'*، صفیالدین صفوی نائینی ّ

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

چکیدہ

این مقاله به بررسی عملکرد قابلیت تصویربرداری رادارروزنهمصنوعی سهبعدی در سامانه زمینی با طول موج میلیمتری می پردازد. افزایش کاربردهای سنجش(زدور 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. بااین حال، 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 سیگنال های دریافتی و درنتیجه کیفیت تصویر نهایی تاثیرگذار هستند. در این مقاله سه الگوریتم پردازش سیگنال بکپروجکشن(*BB*)، تبدیل فوریه (*T*)، و رنج مایگریشن (*RMA*) برای تشکیل تصویر سهبعدی در سامانه محقوعی بهره میبرد. الگوریتمهای 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 شبیه سازی مورد بررسی و ارزیابی قرار میگیرند. همچنین، از چهار معیار تفکیک پذیری زاویه، میشوند. سامانه مورد نظر در باند *W* فعالیت میکند و از دو ریل افقی و عمودی به منظور ایجاد روزنه مصنوعی بهره میبرد. الگوریتمهای دکرشده، توسط دو آزمایش مختلف در محیط شبیه سازی مورد بررسی و ارزیابی قرار میگیرند. همچنین، از چهار معیار تفکیک پذیری زاویه، تصویر سهبعدی از سیگنال خام بدست آوردند. با مشاهده تصاویر حاصل از الگوریتم محیاری هر سه الگوریتم نتایج قابل قبولی را در تشکیل تصویر سهبعدی از سیگنال خام بدست آوردند. با مشاهده تصاویر حاصل از الگوریتم هیهان دریافت که در راستای عمودبر برد با افزایش تصویر سهبعدی از سیگنال خام بدست آوردند. با مشاهده تصاویر حاصل از الگوریتم هر محمان دریافت که در راستای عمودبر برد با افزایش تصویر سهبعدی از مرکز تصویر، شداف پایدار است در حالکه دو الگوریتم دیگر در فواصل نزدیک تفکیک پذیری زغیکی پذیری زاویه در واصله هدف از مرکز تصویر، شدت ایزری بانه معانه تنایج ضعیفتری را به همراه داشت که باعث نتایج نامطلوب این الگوریتم می زوی در طواصل الگوریتم می وزد کر می می نویند مر دو الگوریتم با مرد در در فواصل الگوریتم برای سرده سازی این رویکرد هر دو الگوریتم بر می می می می می می مانو دریک و مورر داریک که عول در می می می می مرد

كليد واژهها : الگوريتم رنج-مايگريشن، الگوريتم بك پروجكشن، تبديل فوريه، حوزه فركانس، 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: ۲۱۶۱۱۱۴۳۷۸

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 پذیری با استفاده از هندسه تصویربرداری این نوع سامانهها و بهره گیری از روشهای پردازش سیگنال به-وجود 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 خواه دبود. 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 متفاوتی با هدف رسیدن بطورکلی میتوان روند کار این الگوریتمها را به دو حوزه زمان و فرکانس تقسیم بندی نمود [۳]. از جمله اینها میتوان به الگوریتمهای کورلیشن در زمان اینها میتوان به الگوریتمهای کورلیشن در زمان و بیکپروجکشت^۳ (BP) در حیطه زمان و الگوریتمهای ۲۵۸۴، ۵۶۶۹ و ۲۸۸۴ در حیطه فرکانس اشارهنمود [۴، ۵، و ۶]. عموما الگوریتمهای حیطه زمان بهعلت استفاده از حلقههای تکرار دارای بارمحاسباتی بالاتری نسبت به الگوریتمهای حیطه

- 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

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 یژوهش[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 تبديل فوريه و انتقال به فضاى فركانسى، 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 بـرد. مقالـه [۳] مـروری بـر کاربرد الگوریتمهای ذکرشده، در سامانههای هوابرد با تفکیک پذیر بسیار بالا از نقطهنظر تصحیحات حرکتی می پردازد. بطوریکه الگوریتمهای حوزه فرکانس با وجود اینکه بصورت جزئی اثرات حرکتی را رفع میکنند ولی در سامانههای با تفکیک پذیری بالا این تصحیح به-تنهایی 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 سنجنش از دور راداری و افزایش نیاز به دادههای متنوع راداری، توسعه سامانههای رادار روزنه مصنوعی زمینی (^GBSAR) توجهات زیادی را جلبکردهاست [۹ و ۱۰]. سامانههای GBSAR، دارای قابلیتها و برتریهای زیادی در مقایسههای سامانههای هوابرد و ماهوارهای هستند.

⁸ Ground-Based SAR (GBSAR)

سامانه های زمینی عموما زاویه دید مناسبتر و متمرکزتری را در مناطق با مساحت کوچک دارند. نرخ تولید داده در سامانه های زمینی می تواند در حدود چند ساعت یا حتی در بعضی از سامانه ها در کسری از ثانیه باشد. علاوه براین موارد، سامانه های 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 می گیرد و سپس با گامهای معینی در مسیری خطی عمود بر راستای برد حرکت می کند. در هر یک از این گامها فرایند ارسال، دریافت، و ذخیره سیگنال بازتابی تکرار می شود. بطور متداول سامانههای GBSAR از ریلی یک بعدی بهرهمند هستند که باعث تفکیک پذیری اهداف پراکنده گر در راستاهای برد و آزیموت افقی می شود [۱۳ و ۴]. با این حال، در سال های اخیر با پیشرفت سامانههای زمینی، ارائه مدل-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 تفکیک پذیری 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^۲ 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 چـالش اصـلی مربوط به سامانههای هوابرد و مـاهوارهای یعنـی اثـرات

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 مي توان به محدود بودن طول روزنه مصنوعي اشارہ نمود که باعث مے شود تا در مقایسه با سایر سامانههای هوابرد و ماهوارهای که از طول روزنه مصنوعی نامحدود و بسیار بلندتر بهره میبرند، دارای تفکیک پذیری زاویه ای کمتری باشد. همینطور، این محدودیت باعث می گردد تا تفکیک پذیری زاویهای وابسته به برد اهداف باشد، بطوری که اهداف در فواصل دورتر تفکیک یدیری کمتری خواهندداشت [۱۶]. چالش بعدی را می توان به محدوده وسیع برد کمینه و بیشینه قرارگیری اهداف در دید سنجنده زمینی اشاره-نمود که باعث می شود تا اهداف در محدوده میدان نزدیک سنجنده نیز در تصویر قرارگیرند. در حالیکه، در میدان نزدیک، فرض صفحهای بود موج برقرار نبوده و هندسه تصويربردارى رادارى ايدهآلى محسوب نمىشود [۱۷]. بنابراین، الگوریتم تشکیل تصویر مورد استفاده باید از جهت میزان حساسیت به چالشهای مذکور بررسی شود.

در سالهای اخیر، الگوریتمهای متنوعی به منظور بهبود تصویربرداری در سامانههای زمینی، ارائه شدهاند. 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-فواصل نزدیک ارائه میکرد [۱۸]. همینطور، در سال های اخیر، استفاده از الگوریتمهای تخمین سیگنال و استخراج اهداف مانند، الگوریتمهای کپون^۳، ⁴DUSIC و حسگری فشرده^۵ 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

بهره گیری از ماتریس کوواریانس حاصل از سیگنال هاز به آشکارسازی اهداف داخل تصویر می پردازند که با وجود اينكه مىتوانند عملكرد مناسبى داشتهباشند ولى بار محاسباتی بسیار بالایی دارند [۱۹ و ۲۰]. یکی از مراحل مهم در توسعه سامانه های سنجش از دوری، بررسی و ارزیابی عملکرد آنها در محیط شبیه-سازی پیش از بهرهبرداری عملیاتی است [۲۱]. از این رو، هدف اصلى از ارائه ايـن مقالـه، بررسـي، ارزيـابي، و مقايسه عملكرد الگوريتمهاى تشكيل تصوير رادار روزنه مصنوعی برای سـامانه زمینـی در بانـد فرکانسـی W بـا طول موج میلیمتری است. در پژوهشهای پیشین قابلیت افزایش تفکیکپذیری و بهبود پایش جابجایی [۲۲] رادارهای چندورودی-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 سامانه ها مورد بررسی و ارزیابی قرار می گیرد. سامانه مورد نظر از ریلی دوبعدی 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 الگوريتم پردازش سيگنال شامل الگوريتم 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 می گیرند. درنهایت، نتیجه گیری حاصل از این پژوهش در بخش پنجم بیان می گردد. ۲- مبانی تئوری

در این بخش مبانی و اصول تئوری مورد نیاز در این مقاله ارائه می گردد. در ابتدا، هندسه تصویربرداری رادار روزنه مصنوعی بهمنظور ایجاد تصویر راداری سهبعدی بیان می شود. 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-شـود. در ایـن روش سـنجنده در راسـتایی عمـود بـر راستای برد حرکت کرده و به ارسال، دریافت، و تجمیع همدوس^۲ سیگنالها در این راستا می پردازد. در نهایت پس از دریافت و ذخیره سیگنال خام توسط سنجنده، تصویر رادار روزنه مصنوعی توسط روش های پردازش سیگنال و تشکیل تصویر ایجاد می گردد. درنتیجه، علاوه بر برد، زاویه قرار گیری اهداف نیز نمایان می شود. در این مقاله تمرکز بـر روی تصویربرداری رادار روزنـه مصنوعی در سامانههای زمینی است. بط ور معم ول در این سامانه ها، سنجنده بر روی یک ریل مکانیکی قرار گرفته و با گامهای تعیینشده در راستای عمود بر برد حرکت میکند. در ساختار متداول این سامانه ها، از ریل افقے استفادہ مے شود کے باعث ایجاد روزنہ مصنوعی در راستای آزیموت و درنهایت ایجاد تصویر رادار روزنه مصنوعي با قابلیت تفکیکپذیری زاویه آزیموت اهداف می شود. با این حال، با ساختاری نوین و افزودن روزنیه مصنوعی در راستای ارتفاع، میتوان علاوهبر تفکیکیذیری برد و زاویه آزیموت (افقے)، به تفکیک پذیری 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 همیوشانی (Layover) شد.

شکل(۱) هندسه تصویربرداری رادار با روزنه مصنوعی

Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2025-07-02

¹ Multiple input multiple output

² Coherent

مقایســه الگــوریتمهــای پــردازش ســیگنال بــهمنظـور ... سید بنیامین حسینی و همکاران

> 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 ۷)، 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 بطور کلی می توان 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 پراکنده گر 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 می گیرند. در ادامه این برخش ابتدا مدل سیگنال خام و سیگنال هدف در حالت تصویربرداری سهبعدی بیان می شوند. سپس مبانی و روابط ریاضی مربوط به الگوریتمهای تشکیل تصویر نامبرده، بیان شده و برای حالت تصویربرداری سهبعدی توسعه پیدا می کنند.

٧٣

ا - ۱ - ۱ - مدل سیکتال
همانطور که شکل ۱) بیان می کند، سنجنده رادار در
صفحه دوبعدی با معادله
$$0 = v$$
, حرکت کرده و باعث
ایجاد آنتن مجازی بسیار بزرگتری در این صفحه می
شود. طبق این هندسه، فاصله لحظهای سنجنده در
موقعیت (x,y,z) نسبت به هدفی در موقعیت (x,y,z)
موقعیت (x,y,z) نسبت به هدفی در موقعیت (x,y,z)
بصورت رابطه (۱) تعریف میشود.
(۱) بیان (1)
 $R(x_n, z_n) = \sqrt{(x - x_n)^2 + y^2 + (z - z_n)^2}$
شده در ماتریس داده بصورت رابطه (۲) بیان می شود
(۲) بیان می شود
(۲) بله (۲)
رابطه (۲)

نشریه علمی – مهندسی فناوری اطلاعات مکانی

سال دهم ● شماره اول ● بهار ۱۴۰۱

در راستای آزیموت و ارتفاع بصورت رابطه (۴) بر سیگنال فشرده شده در برد اعمال می شود [۱۴ و ۱۹]. (ابطه(۴) $s(\phi, \theta, R) = \iint d_{R}(x_{n}, R, z_{n}) \times MF(x_{n}, z_{n}) \times dx_{n} dz_{n}$ در , ابطه (۴)، *φ*، و *θ* بهترتیب بیانگر زاویه قائم، و زاویـه افقی هدف نقطهای از مبدا سیستم مختصات کروی هستند. (*x_n,z_n*) بیانگر موقعیت لحظهای قرار گیری 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 می شود. $MF(x_n, z_n) = \exp(jk_r R(x_n, z_n))$ رابطه(۵) بنابراین مراحل پردازشی الگوریتم BP را میتوان بصورت زیر بیان نمود: 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 مصنوعى 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 میتوان در سیستم مختصات کروی برای هـدفی واقع در (ϕ, θ, R_0) بصورت رابطه (φ) بیان نمود. (ابطه(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 قرار گیری سنجنده در نقطه (x_n, z_n) و R₀ بیانگر موقعیت هدف نقطهای از مرکز سیستم مختصات کروی است. با تقريب بسط تيلور چندمتغيره، مىتوان

> $R(x_n, z_n) \cong R_0 - x_n \sin \theta - z_n \sin \phi$ (۷) رابطه با جایگذاری رابطه(۷) در رابطه(۳) می توان، سیگنال

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

در رابطه (۲)، عبارت $k_r=4\pi/\lambda$ بیانگر عدد صوج ^۱ یا فرکانس مکانی^۲ در راستای برد است. عبارت (s(x,y,z) میباشد، از که بیانگر بازتابندگی^۳ 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].

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

در رابطه (۳)، *A* بیانگر صفحهای است که سنجنده به-منظور 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_n,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 می گردند. **۲-۲-۲-۲-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 می پردازد. 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 می توان این فیلتر را دوبعدی فرض نمود. بنابراین، در مرحله نخست سیگنال خام (*(xn,kr,zn) در* راستای برد فشرده می شود. لازم به ذکر است که در سامانههای با سیگنال ^{FMCW} فشردهسازی در راستای برد با اعمال تبدیل فوریه یک بعدی به سیگنال خام در این راستا بدست می آید. درنهایت، فیلتر منطبق

¹ Wavenumber

² Spatial frequency

³ Reflectivity

⁴ Frequency modulated continuous wave

مقایســه الگــوریتمهـای پـردازش ســیگنال بــهمنظـور... سید بنیامین حسینی و همکار ان

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

$$s(\phi, \theta, R_{0}) = \iiint_{A,k_{c}} d(x_{n}, f, z_{n}) \times \exp\left[j 2\pi \left(f \frac{2R_{0}}{c} - x_{n} \frac{2f_{c} \sin \theta}{c} - z_{n} \frac{2f_{c} \sin \phi}{c}\right)\right] \times \exp\left[-j 2\pi x_{n} \frac{2f_{m} \sin \theta}{c} - j 2\pi z_{n} \frac{2f_{m} \sin \phi}{c}\right] \times dx_{n} dz_{n} df$$

$$(9)$$

(آزیموت و ارتفاع)، بهمنظور انتقال داده خام به فضای فرکانسی در هـر سـهراسـتای فرکـانس بـرد، فرکـانس آزیموت، و فرکانس ارتفاع اسـت. رابطـه (۱۰) سـیگنال خام دریافتی را در فضای فرکانسی بیان میکند.

نتیجه انتگرال رابطـه (۱۰) بـا حـل تحلیلـی فـاز مانـا بصورت رابطه (۱۱) بدست مـیآیـد. در ایـن رابطـه *R*s بیانگر برد مرجع است که معمولا برابر بـا فاصـله مرکـز تصویربرداری از مرکز آنتن سـنجنده یـا برابـر بـا 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 می گردد تا انحنای برد اهدافی که فاصلهای به اندازه Rs 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 درون یابی استولت (Stolt) می شود. در این مرحله، هدف حذف کامل $k_y = \sqrt{k_r^2 - k_z^2 - k_z^2}$ انحنای برد اهداف با تبدیل است $k_y = \sqrt{k_r^2 - k_z^2 - k_z^2}$ محمل با است (شکل ۲)). تغییر فضای $k_r \to k_y$ در عمل با درون یابی یک بعدی برای مقادیر k_z و z_k امکان پذیر

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.

RMA - ۲-۲-۳ - تشكيل تصوير با الگوريتم

الگوریتم *RMA* مشابه الگوریتم تبدیل فوریه تماما در حوزه فرکانس پردازش می شود. 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 می شوند که یکی از محورها معادل راستای برد و محورهای دیگر مربوط به زاویه چرخش راستای برد و محورهای دیگر مربوط به زاویه چرخش انتن بصورت مجازی است. در مقابل، در الگوریتم *RMA* تصویر نهایی در مختصات کارتزین تشکیل می شود [۴]. این الگوریتم از چهار مرحله اصلی به منظور تشکیل تصویر بهره می برد [۴، ۱۳، ۲۳ و ۲۵]:

DOI: 10.52547/jgit.10.1.69] [DOR: 20.1001.1.20089635.1401.10.1.3.7

نشریہ علمی – مہندسی فناوری اطلاعات مکانی

سال دهم ● شماره اول ● بهار ۱۴۰۱

$$D(k_x,k_r,k_z) = 2DFT \left\{ d\left(x,k_r,z\right) \right\} = \iint d\left(x,k_r,z\right) \times \exp\left(-jk_x x - jk_z z\right) dxdz \qquad (1)$$

$$D(k_{x},k_{r},k_{z}) \cong \exp\left\{-j\left(k_{x}x+k_{z}z+y\sqrt{k_{r}^{2}-k_{z}^{2}-k_{z}^{2}}-R_{s}k_{r}\right)\right\}$$
(1)

$$H_{mf}(k_{x},k_{r},k_{z}) = \exp\left\{j\left(R_{s}\sqrt{k_{r}^{2}-k_{z}^{2}-k_{z}^{2}}-R_{s}k_{r}\right)\right\}$$
(17)

$$D_{2}(k_{x},k_{r},k_{z}) = H_{mf}(k_{x},k_{r},k_{z}) \cdot D(k_{x},k_{r},k_{z})$$

= exp $\left\{-j\left(k_{x}x + (y-R_{s})\sqrt{k_{r}^{2} - k_{z}^{2} - k_{z}^{2}} + k_{z}z\right)\right\}$ (17)

$$D_{3}(k_{x},k_{y},k_{z}) = \exp\{-j(k_{x}x + k_{y}(y - R_{s}) + k_{z}z)\}$$
(14)

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



شکل ۲: تاثیر اعمال فیلتر منطبق و تبدیل استولت در برطرفکردن انحنای برد اهداف در الگوریتم *RMA:* الف) سیگنال فشرده-شده 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 تفکیک پذیری زاویه ای، نسبت لوب بیشینه به لوب کناری ('PSLR)، نسبت نسبت لوب اصلی به تجمیع

[\] Peak sidelobe ratio (PSLR)

لوبهای کناری (^۲ISLR) 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

² Integrated sidelobe ratio (ISLR)

³ Signal to clutter ratio (SCR)

۷۶

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 می شود.

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

مقایسـه الگـوریتمهـای پـردازش سـیگنال بـهمنظـور... سید بنیامین حسینی و همکار ان

هدف با تجمیع انرژی لوبهای کناری در راستای عمود بر برد محاسبه می شود [۲۶]. محاسبه SCR بهوسیله رابطه (۱۸) صورت می گیرد. در این رابطه A_t و A_c بهترتیب بیانگر محدوده هدف و محدوده کلاتر در تصویر و *N* تعداد پیکسلهای موجود در محدوده کلاتر هستند [۲۷]. لازم به ذکر است که مقدار کوچک تفکیک پذیری زاویه-

ای و مقادیر بزرگ سه معیار دیگر بیانگر قابلیت بهتـر الگــوریتم تشــکیل تصــویر مــورد بررســی اســت.

 $\rho_{az} = \frac{\lambda_c}{2L_s}$ $ISLR = 20 \times \log\left(\frac{\sum_{-3dB} |s(i)|}{\sum_{i} |s(i)| - \sum_{i} |s(i)|}\right)$

رابط_ه(۱۸)

(18), ابطه

رابطه(۱۷)





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

۳- نتايج

در این بخش نتایج مربوط به شبیهسازی تشکیل تصویر رادار روزنه مصنوعی برای سامانه زمینی توسط الگوریتمهای بیان شده ارائه می گردند. 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 می پردازد. جدول(۱) مشخصات کامل سامانه شبیهسازی شده را

بیان می کند. در این بخش پانزده پراکنده گر نقطهای با شدت پراکندگی یکسان در فضای سهبعدی شبیهسازی شدند.

شکل(۴) هندسه قرار گیری این اهداف را نمایش می-دهد. این اهداف در محدوده ۳۸ تا ۴۲ متری محور y و در محدوده ۲- تا ۲+ متـری محورهـای x و z (راسـتای آزیموت و ارتفاع) بطور منظم قرار گرفتهاند.

شكل(۵) نيز نتايج تشكيل تصوير توسط سه الگوريتم بیان شده را در دو راستای آزیموت و ارتفاع نمایش می-دهد.

| مدول ۱: پارامترهای اساسی سامانه رادار روزنه مصنوعی شبیهسازی شده | | | | |
|---|--------------------|--|--|--|
| مقدار | پارامتر | | | |
| ۱٫۵ میلی وات | توان فرستنده | | | |
| ۱۵ دسی بل | عدد نویز | | | |
| ۷۷ گیگاهرتز | محدوده فركانس حامل | | | |
| ۳۰۰ مگاهرتز | پهنای باند سیگنال | | | |
| ۳۰ دسی بل | بهره آنتن فرستنده | | | |
| ۳۰ دسی بل | بهره آنتن گیرنده | | | |
| ۶۰ میکرو ثانیه | طول چرپ | | | |
| ۹۰ سانتی متر | طول ریل افقی | | | |
| ۵۰ سانتی متر | طول ریل عمودی | | | |

| شبیهسازی شده | روزنه مصنوعي ا | سامانه رادار ر | های اساسی | ۱: پارامتره | جدول |
|--------------|----------------|----------------|-----------|-------------|------|
|--------------|----------------|----------------|-----------|-------------|------|



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



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

شرط فرانهوور بهترتیب طبق روابط (۱۹) و (۲۰) تعریف می شوند [۲۸]. طبق این تعاریف، برای روزنهای به طول ۵۰ سانتی متر، محدوده بین ۳٫۴ تا ۱۲۸٫۴ متر به عنوان محدوده نزدیک و فواصل دورتر نیز به عنوان میدان دوردست محسوب می شوند. به همین ترتیب در صورتیکه طول آنتن ۹۰ سانتی متر باشد، محدوده بین ۲٫۸ تا طول آنتن میدان نزدیک و خارج از آن نیز میدان دوردست محسوب می شود.

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

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

در جـدول(۲) میـزان بازتابنـدگی بدستآمـده توسط الگوریتمهای تشکیل تصویر بـرای هـر هـدف بصورت جداگانه بیان میشود. با توجه به ایـن نتـایج، مـیتـوان فریافت که تصویر حاصـل از الگـوریتم *RMA* اهـداف را فشردهتر و با تفکیکپذیری بهتری نمایش مـیدهـد. بـا ایـن حـال بـا بررسـی شـدت بازتابنـدگی اهـداف در جدول(۲) میتوان دریافت که میـزان افت بازتابنـدگی اهداف در اطراف تصویر الگوریتم *RMA* بسـیار شـدیدتر او دو الگوریتم دیگر است. بـهعنـوان مثـال، باتابنـدگی هدف در موقعیت (۰، ۴۰، ۲) در الگـوریتمهـای *RMA* بدست آمده کـه شـدت الگـوریتم *RMA* نسـبت بـه دو بدست آمده کـه شـدت الگـوریتم *RMA* نسـبت بـه دو الگوریتم دیگر بیش از ۳ دسیبل ضعیفتر است.

| میزان باز تابندگی (دسیبل) | | | موقعيت هدف | |
|----------------------------|----------------------------|-------------------------|--------------|--|
| FT | RMA | BP | (x,y,z) | |
| • | • | • | (۰، ۲۸، ۰) | |
| -1,84 | -٣,٩٣ | - 1/Y 1 | (۰، ۲۸، ۲) | |
| -1,8W | -٣,٩٩ | - 1 <i>j</i> 89 | (۰، ۳۸، ۲-) | |
| -• _/ Y 1 | - \ /• \ | -• _/ Y۲ | (•, ••, •) | |
| -۲, ۳ | -۵/۴۳ | -۲٫۳۵ | (*, **, ۲) | |
| - ۲ /۲۶ | -۵/۴۹ | -۲٫۳۵ | (•, •4, ۲-) | |
| - 1,F | - 1,99 | -1/41 | (• , ۲۴, •) | |
| $-\Upsilon/\Lambda\Lambda$ | -Δ,ΨY | - ۲ /۹۷ | (•, ۲۴, ۲) | |
| -۲٫۸۸ | -۵,۴۲ | - ۲ /۹۲ | (•, ۲۴, ۲-) | |
| -1, ۶ δ | -Ψ _/ ۶λ | - ۲ /•۶ | (۲، ۳۸، ۰) | |
| -1, ۶ δ | -Ψ _/ ΥΥ | - \ , \\$ | (۲-، ۳۸، ۰) | |
| -۲٫۴۷ | -Δ, ϔ Ϋ | -۲٫۵۹ | (۲, ۰۴, ۰) | |
| ۳۴/۲ | -۵,۴۶ | - ۲ /۶۵ | (۲-, ۰۴, ۰) | |
| -٣,١٩ | -۵,۲۴ | - ٣ ,• <i>۶</i> | (7, 77, •) | |
| -٣,٢ | <i>−</i> Δ _/ ۲۹ | - ٣ /• ٢ | (1-, 11, 1) | |

جدول ۲: شدت باز تابندگی اهداف بر اساس الگوریتمهای تشکیل تصویر

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 تـا ۵۰۰ متری از سنجنده صورت گرفت. همانطور که مشاهده میشود، تفکیکپذیری زاویهای الگوريتم RMA نسبت به برد هدف ثابت است. در حالیکه 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، الگوريتم RMA دارای تفکيک پذيری ۷/۵ و ۵ ميلي-رادیان بهترتیب در راستاهای ارتفاع و آزیموت است. در حالیکه، در شرایط مشابه، الگوریتمهای BP و FT به-ترتیب دارای تفکیک بذیری ۳۵ و ۱۸ میلی رادیان در راستای ارتفاع؛ و تفکیکپذیری ۶۵ و ۳۵ میلے رادیان در راستای آزیموت هستند.

با این حال با افزایش فاصله هدف تا سنجنده و نزدیک

شدن به میدان دور، تفکیک پذیری الگوریتمهای BP و FT نیز با تفکیک پذیری RMA منطبق می شوند. بنابراین در میدان دور، برای سامانه با مشخصات جدول(۱) تفکیک پذیری در راستای ارتفاع حدود ۸/۵ میلی رادیان و در رستای آزیموت حدود ۵ میلی رادیان بدست آمدند.

برای ارزیابی قدرت فشرده سازی الگوریتم ها می توان به بررسی نمودارهای ISLR ، SCR و PSLR پرداخت. از شکل(۶) بخش ب، پ، و ت و شکل(۷) بخش ب، پ، و ت می توان دریافت که با افزایش فاصله هدف از سنجنده و کاهش انرژی بازتابی آن، هر سه معیار بیان-شده در الگوریتم های مورد بررسی کاهش می یابند. با این حال، با اینکه الگوریتم های PB و FT نتایج مشابهی را کسب کردند ولی الگوریتم RMA عملکرد ضعیفی را از خود نشان داده است. بطوریکه قدرت فشرده سازی بطور میانگین در تمام حالات حدود ۲۰ دسی بل ضعیفتر از دو الگوریتم دیگر است.



شکل۶: نتایج ارزیابی تشکیل تصویر در راستای آزیموت برای اهداف در بردهای مختلف. (الف) نمودار تغییرات تفکیک پذیری 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 تفکیک پذیری 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.

نشریه علمی – مهندسی فناوری اطلاعات مکانی

سال دهم ● شماره اول ● بهار ۱۴۰۱

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 تفکیک پذیری 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 معیف 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



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 سعیشده تا براساس نتایج ارائه شده در بخش قبلی، عملکرد الگوریتمهای بررسی شده از جنبه-های گوناگون از جمله تفکیک پذیری و کشف اهداف، مورد بحث و مقایسه قرار گیرد.

۳-۱- قدرت تفکیک پذیری

الگوریتم RMA تفکیکپذیری زاویهای بهتری را در هـر 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 تفكيك زاويه ارائه ميكند. درحاليكه، الگوريتمهاي BP و FT هر دو در فواصل کوتاه از سنجنده دارای تفکیک-یذیری بسیار ضعیفی هستند و با افزایش فاصله هدف از فضای میدان نزدیک، می توان مشاهده کرد که تفکیک-یذیری الگوریتم های BP و FT نیز با تفکیک پذیری RMA منطبق می شوند. عامل اصلی این نتایج می تواند فرايند تصحيح فاز در الگوريتم RMA باشد. درواقع، اين الگوریتم در دو مرحله با اعمال فیلتر منطبق و سیس درونیابی استولت در فضای فرکانس برد و فرکانس آزیموت، باعث تصحیح فاز مربوط به انحراف برد اهداف م_____ مـ___ مــ___ المار الم تصویربرداری SAR، در فواصل نزدیک بسیار شدید، و با افزایش فاصله هدف از سنجنده، کاهش میابد. بطوری که در میدان دور، اثرات آن جزئی و قابل اغماق است [1], [۴]. درنتیجه، عدم وجود این تصحیح در دو الگوريتم ديگر مي تواند از عوامل اصلي تفكيك يذيري ضعيف آنها در مقايسه با الگوريتم RMA در فواصل نزدیک باشد.

۲-۲- قدرت فشردهسازی اهداف

با افزایش برد اهداف می توان دریافت که سطح معیارهای SCR، SCR و PSLR کاهشیابد (شکل۶) و شکل۷) قسمتهای ب، پ، و ت). عامل اصلی این اتفاق را می توان 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. در حالیکه، عملکرد نسبتا قوی *TT*، در مقایسه با *BP* را می *ت*وان بهعلت نرم کردن سیگنالها با نمونهافزایی در فرایند SCR به علات 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 ضعیف *ت*ر نسبت به الگوریتم های *BP* و *TT* است.

در بررسی نتایج فشردهسازی در فواصل دور (بهعنوان مثال شکل (۱۰)) می توان 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 ایجاد میشود. بطور دقیقتر، در مرحله تبدیل استولت و ایجاد میشود. بطور دقیقار، در مرحله تبدیل استولت و [۴].

همچنین، همانطور که در قسمت مقدمه اشارهشد، در حالتهای تصویربرداری هوابرد و فضایی که دارای طول روزنـه مصـنوعی نامحـدود هسـتند، عمومـا محـدوده تصویربرداری دارای شکلی منظم و مستطیلی است. در مقابل، در تصویربرداری توسط سامانههای زمینی، شکل تصویر بصورت قطـاعی از دایـره است، بطـوری کـه در فواصل کم عارضههای کمتـری در محـدوده دیـد رادار قراردارند و با افزایش فاصله، عوارض برداشـتشـده نیـز افزایش مییابنـد [۱۶]. درنتیجـه، بـرای فشـردهسازی افزایش مییابنـد [۱۶]. درنتیجـه، بـرای فشـردهسازی افزایش مییابنـد از ۲۱]. درنتیجـه بـرای فشـردهسازی راستای عمودبر برد است که باعـث افـزایش شـدید بـار راستای الگوریتم و عملا غیرکاربردی بـودن آن بـرای فواصل دور میشود [۱۳].

سامانههای راداری بهتنهایی قابلیت اندازه گیری فقط در راستای برد را دارا هستند. از اینرو با افزودن قابلیت روزنه مصنوعی و بهره گیری از روشهای پردازش سیگنال، اندازه گیری در راستاهای عمود بر برد نیز میسر می گردد. درنتیجه، می توان 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 وجبود محدودیت در طبول 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 تفکیک پذیری در دو راستای آزیموت و ارتفاع می گردد. در نتیجه، در این مقاله الگوریتمهای بیان شده برای تصویربرداری سهبعدی راداری توسعه پیداکردند. در ابتدا نتايج تشكيل تصوير با حضور يانزده هدف يراكنده-گر در محیط تصویر مورد بررسی قرارگرفتند. طبق نتايج، هر سه الگوريتم نتايج مناسبي را داشتند. با اين حال، در الگوریتم RMA اهداف متمرکزتر ظاهرشدند ولی در مقابل با افزایش زاویـه اهـداف از مرکـز تصـویر، میـزان انـرژی بازتـابی اهـداف در الگـوریتم RMA در مقایسه با دو الگوریتم دیگر کاهش شدیدتری را شاهد

مراجع

- [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 شبیه-سازی دوم تاثیر برد اهداف بر فشردهسازی آنها توسط الگوریتمها و با چهار معیار تفکیکپذیری زاویهای، PSLR ،ISLR و SCR و SCR مورد بررسی قرار گرفتند. طبق نتایج، تفکیک پذیری 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 ISLR ، PSLR و SCR حداقل ۲۰ دسیبل از دو الگوریتم دیگر ضعیفتر عمل کرد. در حالی که الگوریتمهای BP و FT عملکرد مشابهی به-همراه داشتند. با این تفاوت که الگوریتم FT در اکثر موارد تفکیک پذیری بهتری از BP بههمراه داشت و در مقابل عملکرد BP در سه معیار دیگر کمی بهتر از FT بود. درنهایت، طبق بررسی تمام نتایج، می توان 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 می رود. در مقابل الگوریتمهای FT و BP در فواصل دور علاوهبر بهبود تفکیکپذیری، از قدرت فشردهسازی قابل قبولی نیز برخوردار هستند. در مقایسه دو الگوريتم FT و BP نيز، با وجود اينكه الگوريتم 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.

[1] I. G. CummingF and H. Wong, "Digital Processing of Synthetic Aperture Radar Data: Algorithms and Implementation, Artech House, Norwood (2005)," Google Sch.

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, "Groundbased 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, "Groundbased 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

سید بنیامین حسینی و همکار ان

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 Throughthe-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.



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 Hosseini¹, Jalal amini^{2*}, Safiodin Safavi Naeini³

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 threedimensional SAR imaging of a GBSAR. This system operates in W frequency band and consists of a twodimensional 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-toclutter 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