

بهبود جبران سازی حرکات سکو در رادار دهانه‌ی مصنوعی با استفاده از الگوریتم پس تابش بهبودیافته (Imp-BP) بر اساس داده‌های INS و GPS

رضا کیوان شکوه^۱، استادیار، محمدحسن زنگانه^۲، دانشجوی کارشناسی ارشد

۱- دانشکده مهندسی برق- دانشگاه جامع امام حسین (علیه‌السلام) - تهران - ایران - rkayvanshokooh@ihu.ac.ir

۲- دانشکده مهندسی برق- دانشگاه جامع امام حسین (علیه‌السلام) - تهران - ایران - M.H.Zangaaneh@ihu.ac.ir

چکیده: یکی از ابزار مناسب جهت تشکیل تصویرهای هوایی استفاده از رادار دهانه مصنوعی با قابلیت پردازش در جهت برد و سمت است. به دلیل ارائه تصویر از سطح زمین توسط این نوع رادار، به تفکیک پذیری در سمت^۱ و تفکیک پذیری در برد^۲ بالایی احتیاج است. الگوریتم‌های حوزه‌ی فرکانس تصویربرداری SAR^3 با فشردگی سیگنال‌های رادار در جهت برد و سمت یک تصویر دوبعدی از هدف تشکیل می‌دهند، همچنین به دلیل استفاده از فیلتر منطبق در حوزه‌ی فرکانس دارای حجم محاسباتی کمی هستند. در عوض با محدودیت‌هایی همانند پیچیدگی الگوریتم برد دوپلر در زاویه کجی بالا، محدودیت استفاده از الگوریتم مقیاس بندی چیرپ در پردازش کششی، جبران سازی مهاجرت سلول برد و ... مواجه هستند. در حوزه‌ی زمان دو الگوریتم همبستگی حوزه‌ی زمان^۴ (TDC) و الگوریتم پس تابش (BPA) با استفاده از همبستگی متقابل سیگنال دریافتی و سیگنال مرجع برای برد و سمت، تصویر هدف را تشکیل می‌دهند. الگوریتم پس تابش با استفاده از پردازش دسته‌ای اهداف نسبت به الگوریتم همبستگی حوزه‌ی زمان که پردازش آن پیکسل به پیکسل است، حجم محاسباتی کمتری دارد. برای برخی مودهای تصویربرداری که به زاویه کجی بالا نیاز دارند، به دلیل معادله‌ی برد غیرخطی در این نوع سیستم راداری، استفاده از هر نوع تقریبی برای این معادله مجاز نیست. در این مقاله با پیشنهاد الگوریتم بهبودیافته پس تابش (Imp-BP) و جبران سازی مناسب نتایج خوبی به دست آمد. با بررسی نتایج شبیه‌سازی شده در ۴ حالت مختلف نشان داده شد که الگوریتم Imp-BP تفکیک پذیری و PSNR را حدود ۴۰ درصد بهبود داده است.

واژه‌های کلیدی: رادار دهانه‌ی مصنوعی، الگوریتم پس تابش، جبران سازی خطای حرکتی، تفکیک پذیری برد و سمت.

Improving the Compensation of Platform Movements in Synthetic Aperture Radar using Improved Back Projection algorithm based on INS and GPS data

Reza Kayvan shokoh¹, Assistant Professor, Mohammad Hassan zangaaneh², MSc Student

1- Faculty of Electrical Engineering, University of Imam Hossein, Tehran, Iran, Email: rkayvanshokooh@ihu.ac.ir

2- Faculty of Electrical Engineering, University of Imam Hossein, Tehran, Iran, Email: M.H.Zangaaneh@ihu.ac.ir

Abstract: One of the suitable tools for forming aerial images is the use of Synthetic Aperture Radar with processing capabilities in range and direction. These types of radars are needed to high resolution in the azimuth and range. SAR imaging algorithms in Frequency domain form a two-dimensional image by compressing radar signals in the direction of the range and Azimuth, and due to the use of a matched filter in the frequency domain, they have low cost computational. Instead, they face limitations such as the complexity of the range Doppler algorithm at high tilt angles, the limitation of using the Chirp scaling algorithm in tensile processing, compensation of range cell migration, etc. In the time domain, two Time Domain Correlation algorithms (TDC) and Back-Projection Algorithm (BPA) use the mutual correlation of the received signal and the reference signal for the range and azimuth of the target image. The Back-Projection algorithm uses batch processing of targets, compared to the time domain correlation algorithm, which is pixel-by-pixel processing, and has a lower computational cost. For some imaging modes that require a high tilt angle, due to the nonlinear range equation of this type of radar system, the use of any kind of approximation in this equation is not allowed. In this paper, good results were obtained by proposing an improved Back-Projection (Imp-BP) algorithm and appropriate compensation. By examining the simulated results in 4 different modes, it was shown that the Imp-BP algorithm has improved the resolution and PSNR by about 40%.

Keywords: Synthetic Aperture Radar, Back-Projection Algorithm, motion compensation, range and azimuth resolution.

تاریخ ارسال مقاله: ۱۴۰۱/۰۶/۱۴

تاریخ اصلاح مقاله: ۱۴۰۲/۰۳/۲۹

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۲/۰۴/۲۱

نام نویسنده مسئول: رضا کیوان شکوه

نشانی نویسنده مسئول: تهران - دانشگاه جامع امام حسین (ع) - دانشکده برق - گروه مخابرات.

۱- مقدمه

یکی از موضوعات مهم و کاربردی در صنایع نظامی و غیرنظامی ارائه‌ی تصویر از یک ناحیه‌ی جغرافیایی است. تصویربرداری با استفاده از سیستم‌های اپتیک یا نور مرئی نیاز به شرایط آب و هوایی مناسبی دارد، همچنین این سیستم‌ها به دلیل ماهیت تصویربرداری قادر به حفظ تفکیک‌پذیری نمی‌باشند. یکی از تکنولوژی‌های پیشرفته ساخته‌شده توسط بشر استفاده رادار تصویربرداری است، که به دلیل کاربردهای مختلف الگوریتم‌های متفاوتی برای پردازش سیگنال و در نهایت تشکیل تصویر معرفی شده است. رادارهای تصویربرداری در حالات مختلفی بنا بر تعریف کاربر تصویر ناحیه موردنظر را ایجاد می‌کنند، که در حالت کلی پترن آنتن باید در دو حالت با زاویه‌ی کجی بالا و زاویه‌ی کجی پایین، بر روی ناحیه‌ی مورد قرار گیرد. کاربردهایی مبتنی بر زاویه کجی^۵ بالا به دلیل عدم استفاده از تقریب دارای حجم محاسباتی بالایی هستند، بنابراین اهمیت استفاده از یک سیستم با قابلیت تصویر با پردازش زوایای کجی بالا یا پایین موردتوجه قرار گرفته‌شده است. در حین حرکت به دلیل عوامل خارجی و داخلی همانند ناپایداری پرنده، باد و ... پرنده نسبت به مسیر ایدئال خود دچار خطا می‌شود. در این مقاله الگوریتم بهبودیافته پس‌تابش^۶ (Imp-BP) که مبتنی بر حوزه‌ی زمان است برای تشکیل تصویر و جبران سازی خطای حرکت سکو پیشنهاد شده است. طراحی سیستم‌های تشکیل تصویر در SAR به دلیل وجود الگوریتم‌های متعدد و دستگاه‌هایی که می‌توانند مورد استفاده قرار گیرند، می‌تواند یک موضوع چالش‌برانگیز باشد. رادار SAR از چهار حالت عملیاتی: نقشه‌نویاری^۷، نور نقطه‌ای^۸، دایره‌ای و اسکن برای تصویربرداری از ناحیه موردنظر استفاده می‌کند. به دلیل الگوی تابش متفاوت در هر یک از این روش‌ها، در [1] الگوریتم برد-دوپلر (RDA) در سال ۱۹۷۶ تا ۱۹۷۸ برای پردازش داده راداری ماهواره‌ی SEASAT توسعه یافت، اولین تصویر SAR فضایی در سال ۱۹۷۸ با این الگوریتم تولید شد [2]. به دلیل حجم محاسباتی پایین در حالت مقدار زاویه‌ی کجی کم نسبت به سایر الگوریتم‌های حوزه‌ی فرکانس، امروزه کاربرد بیشتری دارد. دو مشکل جدی این الگوریتم، استفاده از درون‌یابی برای اصلاح مهاجرت سلول برد و پیچیدگی محاسباتی بالا در حالت زاویه کجی زیاد است [3].

به‌علاوه در حالت ایدئال برای تعیین میزان خطا از سامانه‌های GPS و INS استفاده می‌شود. در این حالت، برای جبران سازی باید روی تمامی داده‌های دریافتی پردازش به‌صورت جداگانه انجام شود. پردازش روی داده خام برای جبران سازی به دو دسته روش تمرکز خودکار و روش جابه‌جایی انعکاس‌پذیری تقسیم می‌شود که در مراجع [4] و [5] به‌صورت مفصل به آن‌ها پرداخته شده است.

پس‌از آن در سال ۱۹۹۴ الگوریتم مقیاس بندی چیرپ^۹ (CSA) به‌طور مشخص برای حذف درون‌یابی الگوریتم برد دوپلر معرفی شد [6]، که به‌جای استفاده از درون‌یابی با ضرب یک‌فاز، مهاجرت سلول برد اصلاح می‌شود. به دلیل اینکه از حوزه‌ی فرکانس دوبعدی در این الگوریتم

استفاده می‌گردد، قابلیت پردازش کششی^{۱۰} برای تشکیل تصویر مهیا نیست. همچنین همانند الگوریتم برد دوپلر بار محاسباتی و پیچیدگی پیاده‌سازی بالایی در حالت زاویه‌ی کجی زیاد دارد. برای جبران معایب الگوریتم‌های برد دوپلر و مقیاس بندی چیرپ در [7] الگوریتمی در سال ۱۹۹۷ بنام امگا-کی معرفی شد. این الگوریتم با یک عملیات بر روی سیگنال دریافتی در حوزه‌ی فرکانس دوبعدی وابستگی معادله‌ی برد به زمان سمت را تصحیح می‌کند. با استفاده از این خاصیت، پردازش و ایجاد تصویر از سیگنال‌های دریافتی با زاویه‌ی کجی بالا میسر می‌شود، اما مشکل اصلاح مهاجرت سلول برد توسط درون‌یاب و فرض ثابت بودن سرعت سکو، این الگوریتم را با محدودیت‌های زیادی مواجه می‌کند. در [8] الگوریتم BFFBP^{۱۱} با در نظر گرفتن جبران سازی خطاهای حرکتی^{۱۲} برای متمرکز کردن داده‌های ارائه‌شده است. این الگوریتم علاوه بر تصحیح RCM^{۱۳} می‌تواند ارتباط برد-سمت را کنترل کند. اما برای کاهش بار محاسباتی، تصاویر فرعی^{۱۴} را در مختصات قطبی نشان می‌دهد و بر این باور است که نمایش تصویر در مختصات قطبی مزایایی نسبت به دکارتی دارد. سپس یک روش تصحیح خطای فاز^{۱۵} PEC برای کاهش تأثیر خطاهای فاز ناشی از درون‌یابی پیشنهاد کرده که می‌تواند دقت بالایی برای درون‌یابی در BFFBPA به ارمغان آورد. در [9] یک رویکرد جدید برای پردازش سیگنال‌های SAR با دهانه‌ی پهن و زاویه‌ی کجی زیاد پیشنهاد شده است. در این روش طیف دوبعدی تصویر SAR از طریق الگوریتم امگا-کی با کمک DMA^{۱۶} به جبران خطای حرکتی کمک می‌کند. سپس خطاهای حرکتی TAD^{۱۷} باقیمانده با پردازش BP و تبدیل دهانه‌ی پهن به دهانه‌های کوچک‌تر تصحیح می‌شوند. از آنجایی که دهانه‌های جدید به‌طور قابل توجه کوتاه‌تر از دهانه‌های اصلی هستند، بار محاسباتی BPA کاهش می‌یابد، اما از آنجایی که در این روش از الگوریتم امگا-کی استفاده شده به‌اندازه‌ی کافی دقیق نیست. در [10] یک روش تصویربرداری برای داده‌های CSAR^{۱۸} با توجه به الگوریتم BPI^{۱۹} با الگوریتم متمرکز سازی خودکار پیشنهاد شده است. مرحله اول تقسیم کل دیافراگم به چندین زیر دهانه، مرحله دوم پردازش داده‌ها در زیر دهانه با روش BP و تمرکز دهی خودکار و آخرین مرحله دریافت تصویر نهایی CSAR با ادغام تصاویر فرعی به‌دست آمده از پردازش زیر دهانه است، در این مقاله برای جبران سازی خطاهای حرکتی از روش ABP^{۲۰} استفاده می‌شود، اما اگر معیار حداکثر تفکیک‌پذیری تصویر یا توزیع انرژی داده‌های تصویر نامتعادل باشد، روش متمرکز سازی خودکار دچار خطای تخمینی جدی می‌شود. در [11] یک الگوریتم تصویربرداری تطبیقی به نام AFFBPA^{۲۱} برای SAR با تفکیک‌پذیری بالا و زاویه‌ی کجی زیاد پیشنهاد شده است. در این مقاله با ادغام تکنیک تشخیص هدف در روند تشکیل تصویر، هدف موردنظر و کلاتر را می‌توان از هم متمایز کرد. با استفاده از نتیجه تشخیص، تنها پیکسل‌های هدف در طول شکل‌گیری تصویر حفظ و متمرکز می‌شوند. در این الگوریتم بدون از دست دادن تمرکز، بار

محاسباتی کلی AFFBP در مقایسه با FFBP کاهش می‌یابد اما در این الگوریتم روشی برای جبران خطای حرکتی ارائه نشده است. در [12]، الگوریتم جدید شبه مختصات قطبی مبتنی بر FFBP همراه با جبران حرکت مبتنی بر داده برای تصویربرداری SAR پیشنهاد شده است. با استفاده از تجزیه عدد موج^{۲۲}، طیف تحلیلی یک تصویر شبکه شبه قطبی به دست می‌آید، که در آن خطاهای فاز ناشی از انحرافات مسیر را می‌توان به راحتی بررسی کرد و متمرکز سازی خودکار فاز را می‌توان به طور سازگار گنجانند. علاوه بر این، رابطه بین خطاهای فاز و مهاجرت سلول برد غیر سیستماتیک^{۲۳} (NsRCM) با توجه به طیف تصویر آشکار می‌شود، که بر اساس آن اصلاح NsRCM برای بهبود بیشتر کیفیت تمرکز تصویر در برنامه‌های SAR با تفکیک پذیری بالا ایجاد می‌شود، اما یک عیب این روش حجم محاسباتی بالای آن است. در [13] یک تکنیک متمرکز سازی خودکار برای تصویربرداری رادار SAR هوا برد برای زاویه کجی زیاد ارائه می‌شود، که جبران سازی خطاهای فاز ناشی از انحراف مسیر در برد و سمت را ارائه می‌دهد که یک مدل خطای فاز دوبعدی پیشنهاد شده است. متمرکز سازی خودکار عمدتاً از سه مرحله پردازش تشکیل شده است، ابتدا چندین تصویر محلی به طور خودکار بر اساس عملکرد پنجره گذاری در هر دو بعد برد و سمت انتخاب می‌شوند. بعداً آن برای هر تصویر، هسته متمرکز سازی خودکار بر اساس گرادینان فاز زاویه کجی برای تخمین تابع خطای فاز اعمال می‌شود. سپس توابع خطای فاز محلی برای حل مدل خطای فاز متغیرهای فضایی دوبعدی با استفاده از روش حداقل مجذور کل وزن دار ترکیب می‌شوند، اما دارای حجم محاسباتی بالا به دلیل تعداد مراحل پردازش است. محققان در [14] یک الگوریتم FFBP را برای بازسازی تصویر^{۲۴} BFSAR در سیکر SAR مورد بررسی قرار داده‌اند. این الگوریتم همچنین بر اساس تکنیک پردازش زیر دهانه برای کاهش بار محاسباتی طراحی شده است و تصاویر را در سیستم مختصات قطبی نشان می‌دهد. ابتدا، هندسه تصویربرداری و مدل سیگنال BFSAR ایجاد می‌شود. سپس، با در نظر گرفتن پیکربندی ویژه پرتاب BFSAR، یک سیستم مختصات قطبی جدید که منشأ آن توسط موقعیت فرستنده و گیرنده تعیین می‌شود، ایجاد می‌گردد. همچنین جهت افزایش سرعت الگوریتم پیشنهادی از الگوریتم پس تابش مستقیم^{۲۵} (DBP) استفاده می‌شود. در [15] یک الگوریتم تشکیل تصویر جدید برای پردازش سیگنال‌های SAR با تفکیک پذیری بسیار بالا پیشنهاد شده است. به دلیل هدایت آنتن در طول مسیر، پهنای باند دوپلر داده‌های SAR دریافتی به طور قابل توجهی فراتر از یک بازه فرکانس تکرار پالس گسترش می‌یابد. علاوه بر این، باعث کوپلینگ سمت- برد می‌شود و نمی‌توان آن را با یک مدل خطی نمایش داد. در این مقاله، ابتدا پهنای باند دوپلر را با روش جدید پردازش دی چیرپ سمت در حوزه فرکانس کاهش داده، سپس داده‌ها توسط الگوریتم امگا-کی پردازش می‌شوند. پس از آن، مفهوم مدولاسیون چیرپ برای بازسازی داده‌های جدید با دهانه‌های بسیار کوچک تر استفاده می‌شود.

بنابراین بهره پردازش و دقت را می‌توان با تنظیم طول روزه‌های جدید کنترل کرد، اما در این روش به بحث جبران خطای حرکتی پرداخته نشده است. در [16] الگوریتم‌های تصویربرداری SAR ترا هرتز بررسی شده است که برای تصویربرداری دوبعدی تفکیک پذیری بهتری در سمت دارد، اما ممکن است به دلیل درون‌یابی استولت^{۲۶} مقداری ورنهاد^{۲۷} وجود داشته باشد. برای تصویربرداری سه بعدی، الگوریتم BPA نسبت به الگوریتم^{۲۸} RMA بهتر عمل می‌کند زیرا محاسبات را در حوزه‌ی فضایی به طور مستقیم اجرا می‌کند و عملیات درون‌یابی و FFT وجود ندارد پس ممکن است در عمل خطاهای عددی ایجاد کند. همچنین BPA در برد نیز تفکیک پذیری بهتری نسبت به RMA دارد، اما یکی از مشکلات BPA حجم محاسباتی بالای آن است و نیز در پردازش سمت نسبت به روش RMA دارای عملکرد ضعیفی است. در [17] یک الگوریتم^{۲۹} FBBP برای بازسازی تصویربرداری SAR ارائه شده است. چالش اصلی سرعت بخشیدن به محاسبات الگوریتم BP برای پردازش تصویر SAR است. راه حل پیشنهادی مبتنی بر روش پایه‌ی الگوریتم^{۳۰} BP، سیستم پردازش سیگنال را قادر می‌سازد تا کیفیت تصویربرداری پردازش شده را با توجه به زمان مورد نیاز برای محاسبات کنترل کند. در [18] الگوریتم^{۳۱} HS-AFBP پیشنهاد شده است، که برای SAR با زاویه‌ی کجی زیاد مناسب است و به بهبود کارایی و دقت الگوریتم‌های تصویربرداری حوزه زمان کمک می‌کند. الگوریتم^{۳۲} AFBP معمولی به حالت پهلویی^{۳۳} محدود می‌شود و شکاف‌ها و همپوشانی‌های طیفی را برای ادغام تصویر ارائه می‌کند که کیفیت متمرکز سازی را به طور چشمگیری کاهش می‌دهد. برای دستیابی به ادغام تصویر HS-AFBP^{۳۴} بر مشکل الگوریتم AFBP غلبه می‌کند و دو تابع تصحیح مرکز طیف را پیشنهاد می‌کند. اولین تابع تصحیح مرکز توسط زاویه‌ی کجی ایجاد می‌شود و تابع دوم توسط ضریب فاز متغیر سمت ناشی از خطای حرکت به روز می‌گردد. این دو عملکرد اصلاح مرکز طیف بهبود یافته، دقت در طیف تصاویر فرعی را تضمین می‌کنند همچنین HS-AFBP از مسیرهای خطی و غیرخطی پشتیبانی می‌کند. در [19] مشکل عملی خطاهای حرکتی سکوی هوا برد توسط الگوریتم FFBP برای فرآیند عمومی BiSAR تجزیه و تحلیل می‌شود و یک الگوریتم منسجم جبران حرکت مبتنی بر داده MOCO یکپارچه با FFBP پیشنهاد می‌شود. با استفاده از تجزیه عدد موج طیف تحلیلی تصویر در مختصات قطبی به دست می‌آید که در آن خطای حرکت را می‌توان به راحتی بررسی کرد و انسجام بین خطای فاز سمت^{۳۵} (APE) و مهاجرت برد غیر سیستماتیک سلولی ناشی از حرکت (NsRCM) را می‌توان کاملاً آشکار کرد. در [20] روش^{۳۶} HSHD-AFBP برای تصویربرداری SAR با زاویه کجی بالا استفاده شده، که برای مسیر حرکت غیرخطی سکوه‌ای مانور بالا مناسب است. روش HSHD-AFBP می‌تواند جابجایی طیف تعداد موج اهداف را در زوایای مختلف محاسبه کند، در حالی که HS-AFBP فقط می‌تواند جابجایی طیف هدف واقع در مرکز زاویه را تخمین بزند. بنابراین، HSHD-AFBP می‌

سریع t است (به عنوان یک نتیجه از حرکت پلت فرم در طول یک پالس)، اما برای سادگی این مورد در نمادگذاری گنجانده نشده است. از رابطه (۱)، سیگنال دریافتی پراکنده ساز، یک رونوشت با تعدیل دامنه و با تأخیر زمانی از سیگنال ارسالی است.

$$s_1(t, \eta) = A_n(t - \tau) G_n(t - \tau) w(t - \tau) w_a(\eta - \eta_0) \exp(j2\pi f_0(t - \tau) + j\pi k_r(t - \tau)^2) + n \quad (2)$$

در اینجا A_n یک دامنه وابسته به هدف (RCS)، اثرات جوی و... است. G_n یک دامنه است که به بهره آنتن، تلفات انتشار، فیلترهای سیستم و... بستگی دارد و n نویز جمع شونده است. حال هنگامی که سیگنال دریافتی به باند پایه آورده می شود، خواهیم داشت:

$$s_3(t, \eta) = A_n(t - \tau) G_n(t - \tau) w(t - \tau) w_a(\eta - \eta_0) \exp\left(-j4\pi \frac{R(\eta)}{\lambda} + j\pi k_r(t - \tau)^2\right) + n \quad (3)$$

۳- ارائه روش پیشنهادی برای جبران سازی خطای حرکتی:

با توجه به مسیر حرکتی رادار که در محاسبات یک مسیر ایدئال در نظر گرفته شده و از آنجایی که در شرایط عملیاتی مسیر ایدئال در نظر گرفته شده با مسیر واقعی تفاوت دارد، این تفاوت منجر به ایجاد خطای حرکتی می شود در این بخش به ارائه یک رابطه مناسب جهت به دست آوردن تفاوت مسیر واقعی از مسیر ایدئال خواهیم پرداخت سپس در مرحله آخر با جایگذاری این روابط در روابط الگوریتم مربوطه جبران سازی خطای حرکتی انجام خواهد شد. مقدار خطای ناشی از انحراف حرکت مطابق رابطه زیر به دو مؤلفه خطای عمده و خطای تفاضلی تقسیم می شود، بنابراین خواهیم داشت:

$$R(\eta) - R_0(\eta) = \Delta R(\eta) = \Delta R_B(\eta) + \Delta R_d(\eta) \quad (4)$$

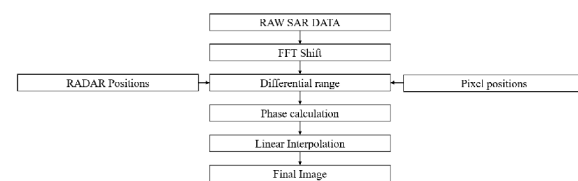
در روش دومرحله ای، چون تأثیر خطای حرکت فقط در فاز سیگنال دریافتی در نظر گرفته می شود، در مرحله اول با ضرب فاز $\exp\left(\frac{j4\pi}{\lambda} \Delta R_B(\eta)\right)$ در سیگنال دریافتی بخش عمده خطا از بین می رود و مقدار خطای باقی مانده نیز با ضرب فاز $\exp\left(\frac{j4\pi}{\lambda} \Delta R_d(\eta)\right)$ پس از اصلاح مهاجرت سلول برد، جبران می شود. از آنجاکه خطای باقی مانده تابعی از زمان برد است و در مرحله فشرده سازی برد، تبدیل فوریه بر حسب زمان برد گرفته می شود، باید فشرده فشرده سازی برد با در نظر گرفتن خطای باقی مانده انجام می شود. اما در روش جبران سازی مرسوم این موضوع در نظر گرفته نشده است. همان طور که مشاهده می شود خطای حرکتی شامل دو بخش خطای حرکتی عمده و خطای حرکتی تفاضلی هست که در ابتدا به جبران خطای حرکتی عمده می پردازیم سپس به جبران خطای حرکتی تفاضلی خواهیم پرداخت. به منظور در نظر گرفتن خطای باقی مانده در مرحله فشرده سازی برد، لازم است که معادله دقیق سیگنال دریافتی در حالت وجود خطا در نظر گرفته شود. پس در رابطه (۵) خواهیم داشت:

تواند نرخ نمونه برداری بیش از حد مورد نیاز برای متمرکز سازی SAR زیر دهانه را به دقت محاسبه کند و از تاری طیف زیر دهانه جلوگیری کند. علاوه بر این روش پیشنهادی کیفیت متمرکز سازی SAR را بهبود می بخشد و عرض نوار تصویربرداری را بزرگ تر می کند. در این مقاله ابتدا مروری بر الگوریتم پس تابش خواهیم داشت سپس به ارائه روش پیشنهادی جبران سازی خطای حرکتی حرکات سکو خواهیم پرداخت و در ادامه الگوریتم جدید پس تابش بهبود یافته Imp-BP به عنوان نوآوری در بهبود پارامترهای مهم نظیر تفکیک پذیری و PSLR^{TV} معرفی می شود، می پردازیم و در نهایت نتایج شبیه سازی را بر اساس یک محیط عملیاتی و یک سناریو نزدیک به حالت واقعی در ۴ حالت بررسی خواهیم کرد.

در الگوریتم پیشنهادی با در نظر گرفتن جبران سازی خطاهای حرکتی^۱ برای متمرکز کردن داده های ارائه شده است. این الگوریتم علاوه بر تصحیح RCM، می تواند ارتباط برد-سمت را کنترل کند. همچنین در حالت زوایای کجی بالا می تواند تفکیک پذیری بسیار بهتری را نسبت به سایر الگوریتم ها به ارمغان آورد.

۱-۱- الگوریتم پس تابش:

یکی از الگوریتم های معمول در حوزه زمان، الگوریتم پس تابش است که به طور گسترده به عنوان یک الگوریتم دقیق برای تمام بازسازی های SAR پذیرفته شده است. در اصل الگوریتم BP یک فرآیند پالس به پالس و پیکسل به پیکسل است. بنابراین می توان در هر حالت SAR آن را پیگیری نمود. یک بلوک دیاگرام از یک الگوریتم پس تابش در شکل ۱ نشان داده شده است.



شکل ۱: بلوک دیاگرام الگوریتم پس تابش

۲- مدل سیگنال:

در ابتدا با یک سیگنال مدوله شده با فرکانس خطی (LFM) شروع خواهیم کرد، در نتیجه خواهیم داشت:

$$s(t, \eta) = w(t) \exp(j2\pi\phi(t)) = w(t) \exp(j2\pi f_0 t + j\pi k_r t^2) \quad (1)$$

که در آن $\phi(t)$ فاز LFM، t زمان سریع، f_0 فرکانس مرکزی و k_r نرخ شیب مدولاسیون فرکانس (FM) بر حسب هرتز بر ثانیه است و $w(t)$ پوش پالس (به عنوان مثال $w(t) = \text{rect}(t/T) = 1$) هست. یک پراکنده ساز ثابت و همسانگرد در فضا در نظر بگیرید. تأخیر انتشار رفت و برگشت از فرستنده به پراکنده ساز به گیرنده τ است که n پالس زمان آهسته هست. توجه داشته باشید که τ به طور ضمنی تابعی از زمان

¹ Motion Errors Compensation

تمامی نقاط زمان برد، در هر زمان سمت محاسبه کنیم، عبارت $\frac{ct}{2}$ را به جای $\sqrt{(z)^2 + (x)^2 + (v(\eta - \eta_0))^2}$ در رابطه (۴) قرار می دهیم:

$$\Delta R(t, \eta) = \frac{ct}{2} \left[\sqrt{1 + \frac{2zd(\eta) + d^2(\eta)}{\left(\frac{ct}{2}\right)^2}} - 1 \right] \quad (۸)$$

اگر بخواهیم از یک الگوریتم تشکیل تصویر استفاده کنیم، برای انجام عملیاتی مانند FFT. نیاز به تابعی داریم که تقریب خوبی از خطای باقی مانده بوده، به علاوه با جایگزینی آن می توان عملیات پردازشی را انجام دهیم. به نظر می رسد با توجه به ظاهر شدن خطا در فاز سیگنال، اگر این خطا به صورت خطی تقریب زده شود محاسبات بعدی ساده خواهد شد. با استفاده از بسط مک لورن و تقریب های به کار رفته $\Delta R(t, \eta)$ به صورت تابعی خطی از t به صورت زیر بیان شده است. در نتیجه خواهیم داشت:

$$\Delta R(t, \eta) \approx \Delta R_B(\eta) + a(\eta)(t - t_0) \quad (۹)$$

که داریم:

$$\Delta R_B(\eta) = 0.5[2zd(\eta) + d^2(\eta)] \left(\frac{2}{c} \right) \left(\frac{1}{t_0} \right) - 0.125[2zd(\eta) + d^2(\eta)]^2 \left(\frac{2}{c} \right)^3 \left(\frac{1}{t_0} \right)^3 \quad (۱۰)$$

$$\Delta R_B(\eta) = -0.5[2zd(\eta) + d^2(\eta)] \left(\frac{2}{c} \right) \left(\frac{1}{t_0^2} \right) + 0.125[2zd(\eta) + d^2(\eta)]^2 \left(\frac{2}{c} \right)^3 \left(\frac{1}{t_0} \right)^4 \quad (۱۱)$$

اکنون می توان رابطه را به عنوان خطا در معادله سیگنال دریافتی قرار داده و پردازش های لازم را روی آن انجام داد.

۴- استفاده از روش پیشنهادی در الگوریتم پس تابش:

با در نظر گرفتن خطا به صورت رابطه (۹) و همچنین مطابق توضیحات ذکر شده در رابطه (۳) A_n یک دامنه وابسته به هدف RCS، اثرات جوی و ... است. G_n یک دامنه است که به بهره آنتن، تلفات انتشار، فیلترهای سیستم و ... بستگی دارد و n نویز جمع شونده است لذا از آنجایی که این حاصل این دو پارامتر عددی ثابت است، عبارت $A_n(t - \tau)G_n(t - \tau)$ را می توان برابر A_0 فرض کرد، سیگنال دریافتی چنین خواهد شد:

$$s_3(t, \eta) \approx A_0 w \left(t - \frac{2R(\eta)}{c} - \frac{2(\Delta R_c(\eta) + a(\eta)(t - t_0))}{c} \right) w_a(\eta - \eta_0) \exp \left(-\frac{j4\pi}{\lambda} (R(\eta) + \Delta R_c(\eta) + a(\eta)(t - t_0)) \right) \quad (۱۲)$$

در ادامه با ضرب فاز $\exp \left(\frac{j4\pi}{\lambda} \Delta R_c(\eta) \right)$ در معادله سیگنال دریافتی مطابق رابطه (۱۳)، بخش عمده خطایی که در فاز سیگنال دریافتی وجود داشت از بین می رود، بنابراین خواهیم داشت:

$$s_3(t, \eta) = A_n(t - \tau)G_n(t - \tau) w \left(t - \frac{2R(\eta)}{c} - \frac{2\Delta R(t, \eta)}{c} \right) w_a(\eta - \eta_0) \quad (۵)$$

در این رابطه $\Delta R(t, \eta)$ که بیانگر خطا هست، پس از اعمال مرحله جبران سازی عمده و حذف خطای $\Delta R_B(t, \eta)$ ، رابطه (۵) به صورت زیر خواهد شد:

(۶)

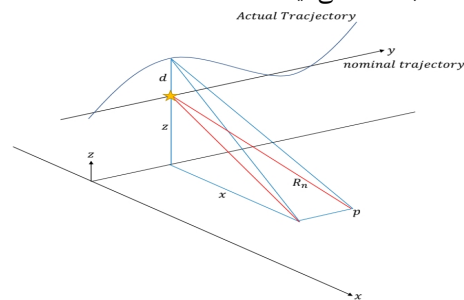
$$s_4(t, \eta) = A_n(t - \tau)G_n(t - \tau) w \left(t - \frac{2R(\eta)}{c} - \frac{2\Delta R(t, \eta)}{c} \right) w_a(\eta - \eta_0) \exp \left(-\frac{j4\pi}{\lambda} (R(\eta) + \Delta R_d(t, \eta)) + j\pi k_r(t - \tau)^2 \right) + n$$

به دلیل این که الگوریتم های پردازش داده های خام روی زمان برد و زمان سمت پردازش انجام می دهند و خطای باقی مانده هم تابعی از هر دو زمان برد و سمت هست، برای این که بتوانیم تصاویر با کیفیت خوبی داشته باشیم، باید تأثیر خطا را در قسمت های مختلف پردازشی الگوریتم لحاظ کنیم. برای این کار در ابتدا نیاز داریم تا مقدار دقیق خطا را به دست آوریم. با توجه به فاصله رادار تا هدف نقطه ای P در حالت ایدئال $(R_0(\eta))$ و در حالت وجود خطا $(R(\eta))$ از روابط زیر به دست می آید:

$$R_0 = \sqrt{(z)^2 + (x)^2 + (v(\eta - \eta_0))^2} \quad (۷)$$

$$R = \sqrt{(z + d(\eta))^2 + (x)^2 + (v(\eta - \eta_0))^2}$$

هدف نقطه ای p در عرض x قرار دارد. در شکل ۲، فرض بر این است که رادار در زمان سمت η و هدف در زمان سمت متناظر با η_0 باشد. مقدار خطا در تعیین فاصله از تفاضل واقعی و فاصله ایدئال مطابق رابطه (۴) به دست می آید:



شکل ۲: فاصله رادار از هدف در حالت های ایدئال و غیر ایدئال

در رابطه (۴)، مقدار خطا، متناظر با نقطه مشخص P هست. برای به دست آوردن خطای سایر نقاط، x می تواند از مقدار x متناظر با نزدیک ترین هدف تا x متناظر با دورترین هدف تغییر کند. برای این که بتوان مقدار خطا در تعیین فاصله را برای تمامی نقاط ناحیه مشاهده در نظر گرفت، از رابطه $R_0 = \frac{ct}{2}$ که فاصله را بر حسب زمان برد تعیین می کند استفاده می کنیم. در این رابطه t (زمان برد) زمانی است که طول می کشد تا سیگنال ارسالی از رادار به هدف برخورد کرده و توسط رادار دریافت شود. بنابراین برای این که بتوانیم مقدار خطا را برای

است در چنین شرایطی حاصل ضرب دو تابع مستطیلی یک تابع مستطیلی با پهنای کمتر هست که بیشترین قسمت آن، در جهت منفی محور f می باشد. بنابراین تابع مستطیلی به دست آمده، از دو تابع مستطیلی قبلی پهنای کمتری دارد و کمی هم به سمت چپ جابجا شده است. با فرض $B_0 = \frac{k_r T_r}{2}$ پهنای و جابجایی مستطیل حاصل به ترتیب از روابط زیر به دست می آید:

$$\begin{aligned} B_{02} &= 2 \left[B_0 - \frac{a}{c} (f_0 + B_0) \right] \\ D_2 &= \left[\frac{a}{c} (f_0 - B_0) \right] \end{aligned} \quad (16)$$

همان طور که می بینیم مقدار جابجایی مستطیل جدید برای هر دو حالت یکسان است، اما پهنای مستطیل حاصل ضرب در دو حالت با هم فرق می کند. چون در اینجا مقدار پهنای مستطیل اهمیت چندانی ندارد. از نماد E به جای آن استفاده می کنیم که می تواند هر یک از مقادیر B_{02} یا B_{01} باشد. با جایگذاری تابع مستطیل حاصل ضرب در رابطه (۱۴) خواهیم داشت:

$$\begin{aligned} s_6(f, \eta) &\approx A_0 \text{rect} \left(\frac{f + \frac{a(\eta)}{c} (f_0 - B_0)}{E} \right) w_a(\eta - \eta_0) \\ &\exp \left(-\frac{j4\pi}{c} (f_0(R(\eta) - a(\eta)t_0) \right. \\ &\left. + \left(\frac{f + \frac{2a(\eta)}{c} f_0}{1 - \frac{2a(\eta)}{c}} \right) (R(\eta) + \Delta R_c(\eta) - a(\eta)t_0) \right) \end{aligned} \quad (17)$$

با توجه به این که $1 - \frac{2a(\eta)}{c} \approx 1$ ، می توان از مقدار این عبارت در مخرج جمله نمایی آخر صرف نظر کرد. با صرف نظر کردن از $1 - \frac{2a(\eta)}{c} \approx 1$ و جداسازی جملات نمایی در رابطه (۱۷) و در مرحله آخر بازگرداندن سیگنال به حوزه زمان با IFFT است در نتیجه خواهیم داشت:

$$\begin{aligned} s_6(t, \eta) &\approx \frac{E A_0}{k_r T_r} R_x \left\{ \frac{E}{k_r T_r} \left(t - \frac{2}{c} (R(\eta) + \Delta R_c(\eta) - a(\eta)t_0) \right) \right\} \\ &w_a(\eta - \eta_0) \exp \left(-\frac{j4\pi}{\lambda} ((R(\eta) - a(\eta)t_0)) \right) \\ &\exp \left(-\frac{j4\pi}{c} \frac{a(\eta)t}{2} (f_0 - B_0) \right) \\ &\exp \left(-\frac{j4\pi}{c} \left(\frac{a(\eta)}{c} (f_0) (R(\eta) + \Delta R_c(\eta) - a(\eta)t_0) \right) \right) \\ &\exp \left(-\frac{j4\pi}{c} \left(\frac{a(\eta)}{c} (B_0) (R(\eta) + \Delta R_c(\eta) - a(\eta)t_0) \right) \right) \end{aligned} \quad (18)$$

$R_x(t)$ همان تبدیل فوریه معکوس تابع مستطیلی یا به عبارت دیگر همان sinc است. با در نظر گرفتن $R = \frac{c}{2}$ و پس از ساده سازی خواهیم داشت:

$$s_4(t, \eta) \approx A_0 w \left(t - \frac{2R(\eta)}{c} - \frac{2(\Delta R_c(\eta) + a(\eta)(t - t_0))}{c} \right) \quad (13)$$

$$w_a(\eta - \eta_0) \exp \left(-\frac{j4\pi}{\lambda} (R(\eta) + a(\eta)(t - t_0)) \right)$$

در مرحله ی بعد با گرفتن تبدیل فوریه از رابطه (۱۳) سیگنال از حوزه زمان-برد، مطابق رابطه (۱۴) به حوزه فرکانس-بردوزمان-سمت برده می شود. سپس با ضرب در فیلتر منطبق، فشرده سازی برد انجام می شود. همچنین با ساده سازی برخی از جملات نمایی موجود در رابطه (۱۴)، خروجی فشرده سازی برد به صورت زیر می شود:

$$\begin{aligned} s_6(f, \eta) &\approx A_0 \frac{1}{\left| 1 - \frac{2a(\eta)}{c} \right|} \text{rect} \left(\frac{f}{k_r T_r} \right) \text{rect} \left(\frac{f + \frac{2a(\eta)}{c} f_0}{\left(1 - \frac{2a(\eta)}{c} \right) (k_r T_r)} \right) \\ &w_a(\eta - \eta_0) \exp \left(-\frac{j4\pi}{c} (f_0(R(\eta) - a(\eta)t_0) \right. \\ &\left. + \left(\frac{f + \frac{2a(\eta)}{c} f_0}{1 - \frac{2a(\eta)}{c}} \right) (R(\eta) + \Delta R_c(\eta) - a(\eta)t_0) \right) \end{aligned}$$

می توان مقدار $1 - \frac{2a(\eta)}{c}$ در مخرج ضرب رابطه (۱۴) را به دلیل این که $\frac{2a(\eta)}{c} \ll 1$ است، برابر ۱ در نظر گرفت و از آن صرف نظر کرد. همچنین در عبارت بالا دو تابع مستطیلی در هم ضرب شده اند. در رابطه (۱۴) در تابع مستطیلی دوم به دلیل وجود خطا، شیفیت به مقدار $\frac{2a(\eta)}{c} f_0$ و تغییر مقیاس به اندازه $1 - \frac{2a(\eta)}{c}$ مشاهده می کنیم. جهت جابجایی و کوچک یا بزرگ شدن پهنای تابع مستطیلی بستگی به علامت a دارد.

حالت اول: $a < 0$

در صورتی که $a < 0$ باشد (این حالت معادل انحراف هواپیما به سمت بالا است یا $d > 0$)، تابع مستطیلی دوم عریض تر از تابع مستطیلی اول شده و به جهت راست جابجا می شود. بدیهی است در چنین شرایطی حاصل ضرب دو تابع مستطیلی یک تابع مستطیلی با پهنای کمتر است که بیشترین قسمت آن، در جهت مثبت محور f می باشد. بنابراین تابع مستطیلی به دست آمده، از دو تابع مستطیلی قبلی پهنای کمتری دارد و کمی هم به سمت راست جابجا شده است. با فرض $B_0 = \frac{k_r T_r}{2}$ پهنای و جابجایی مستطیل حاصل به ترتیب از روابط زیر به دست می آید:

$$\begin{aligned} B_{01} &= 2 \left[B_0 + \frac{a}{c} (f_0 - B_0) \right] \\ D_1 &= \left[\frac{a}{c} (f_0 - B_0) \right] \end{aligned} \quad (15)$$

حالت دوم: $a > 0$

در صورتی که $a > 0$ باشد (این حالت معادل انحراف هواپیما به سمت پایین است یا $d < 0$)، پهنای تابع مستطیلی دوم از تابع مستطیلی اول کمتر شده و به اندازه $\frac{2a}{c} f_0$ به جهت راست جابجا می شود. بدیهی

همان طور که مشاهده می شود تنها عبارت فازی در این قسمت مربوط به عبارت $\exp\left(-\frac{j4\pi}{\lambda}R(\eta)\right)$ است. پس در قسمت بعدی باید فیلتر منطبق طوری طراحی شود که هنگام فشرده سازی عبارت فازی باقی مانده از بین برود.

فشرده سازی سمت:

با توجه به این که $w_a(\eta - \eta_0) = \text{rect}\left(\frac{\eta - \eta_0}{T_{SAR}}\right)$ است. حال برای فشرده سازی سمت کافی است با ضرب یک فیلتر منطبق در رابطه (۲۱) این فشرده سازی صورت گیرد، بنابراین فیلتر منطقی به صورت زیر خواهیم داشت:

$$h(\eta) = w(\eta) \exp\left(-\frac{j4\pi}{\lambda}R(\eta)\right) \quad (22)$$

مشابه روشی که در فشرده سازی برد داشتیم، با اعمال فیلتر منطبق داریم:

$$s_8(t, \eta) \approx \frac{E A_0}{k_r T_r} R_x \left\{ \frac{E}{k_r T_r} \left[t - \frac{2}{c} (R(\eta) + \Delta R_c(\eta)) \right] \right\} \quad (23)$$

$$T_{SAR} \left(\text{sinc}(k_a T_{SAR} (\eta - \eta_0)) \right)$$

علیرغم این که مراحل فشرده سازی برد و سمت به صورت جداگانه انجام شد، به عنوان یک دستاورد که در پیاده سازی اهمیت خاصی دارد، علاوه بر حفظ قدرت تفکیک پذیری حجم محاسباتی در روش متعارف از $O(N^4)$ به $O(N^3)$ کاهش یافته است.

۵- بررسی نتایج شبیه سازی:

سناریو طراحی به این صورت است که در شبیه سازی ها فرض شده است که حرکت هواپیما روی محور $\mathcal{Y}$ و نقطه آغاز -100 و نقطه پایان حرکت 100 است. چون هواپیما در مود نواری تصویربرداری می کند، ناحیه تصویربرداری یک سطح مستطیلی است که طول آن در جهت محور $\mathcal{Y}$ و به موازات حرکت هواپیما بوده و عرض آن در جهت محور $\mathcal{X}$ می باشد. این شبیه سازی سازی با پهنای باند 50 مگاهرتز و عرض پالس 2.5 میکروثانیه در نظر گرفته شده است. همچنین جهت بررسی اثر اهداف بر روی همدیگر و تست الگوریتم پیشنهادی در مواردی نظیر قدرت جبران سازی و تفکیک پذیری اهداف، دو هدف در برد یکسان و دو هدف در سمت یکسان انتخاب شده است.

جبران سازی به صورت ایدئال امکان پذیر است اما چون بار محاسباتی زیادی دارد، در عمل انجام نمی شود. به همین دلیل، با در نظر گرفتن فرض هایی ساده کننده اعم از در نظر گرفتن یک مسیر ساده، در نظر نگرفتن خطای GPS و INS، در نظر گرفتن سرعت ثابت و ...، سعی می شود الگوریتم های تشکیل تصویر همراه با بلوک های جبران حرکت پیاده سازی شوند.

$$s_6(t, \eta) \approx \frac{E A_0}{k_r T_r} R_x \left\{ \frac{E}{k_r T_r} \left[t - \frac{2}{c} (R(\eta) + \Delta R_c(\eta)) \right] \right\}$$

$$w_a(\eta - \eta_0) \exp\left(-\frac{j4\pi}{\lambda}((R(\eta) - a(\eta)t_0))\right)$$

$$\exp\left(-\frac{j4\pi}{\lambda}a(\eta)t\right) \quad (19)$$

$$\exp\left(-\frac{j4\pi}{\lambda}a(\eta)\left(\frac{\Delta R_c(\eta) - a(\eta)t_0}{c}\right)\right)$$

$$\exp\left(-\frac{j4\pi}{c}(B_0)\left(a(\eta)\frac{\Delta R_c(\eta) - a(\eta)t_0}{c}\right)\right)$$

در رابطه ی (۱۹) با ضرب جملات نمایی اول و دوم، طبق رابطه ی (۲۰) مشاهده خواهیم کرد که جمله نمایی دوم، همان جمله ای است که در روش جبران سازی مرسوم با در نظر گرفتن خطا به صورت خطی، در مرحله دوم جبران سازی حذف می شود و جملات نمایی سوم و چهارم، جملاتی هستند که به دلیل فشرده سازی برد همراه با در نظر گرفتن خطا به وجود آمده اند و باید همراه با جمله ی نمایی دوم جبران یا حذف شوند.

$$s_6(t, \eta) \approx \frac{E A_0}{k_r T_r} R_x \left\{ \frac{E}{k_r T_r} \left[t - \frac{2}{c} (R(\eta) + \Delta R_c(\eta)) \right] \right\}$$

$$w_a(\eta - \eta_0) \exp\left(-\frac{j4\pi}{\lambda}R(\eta)\right)$$

$$\exp\left(-\frac{j4\pi}{\lambda}a(\eta)(t - t_0)\right) \quad (20)$$

$$\exp\left(-\frac{j4\pi}{\lambda}a(\eta)\left(\frac{\Delta R_c(\eta) - a(\eta)t_0}{c}\right)\right)$$

$$\exp\left(-\frac{j4\pi}{c}(B_0)\left(a(\eta)\frac{\Delta R_c(\eta) - a(\eta)t_0}{c}\right)\right)$$

از آنجایی که معمولاً B_0 از f_0 بسیار کوچک تر است، می توان از جمله نمایی آخر در رابطه ی (۲۰) صرف نظر کرد و از عبارت نمایی $\exp\left(\frac{j4\pi}{\lambda}a(\eta)(t - t_0 + t_1)\right)$ در مرحله ی جبران سازی تفاضلی استفاده کرد که در آن $t_1 = \Delta R_c(\eta) - a(\eta)t_0/c$ است.

مهاجرت سلول برد:

در این قسمت با ایجاد یک حلقه for در شبیه سازی و نیز با استفاده از یک دستور شرطی if مدام در حالت های مختلف به بررسی پیکسل ها با سیگنال مرجع پرداخته و RCM را حذف می کنیم.

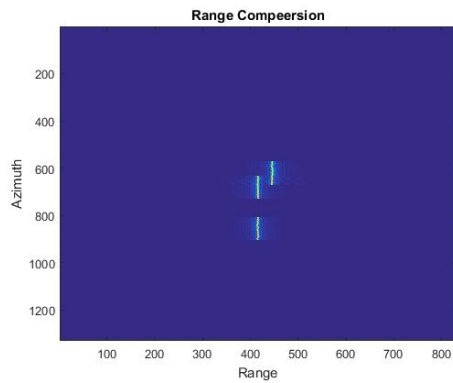
جبران سازی مرحله دوم (ثانویه):

با توجه به توضیحات بالا و به منظور جبران سازی تفاضلی عبارت فوق الذکر در رابطه ی (۲۰) ضرب می شود و نتیجه زیر به دست می آید:

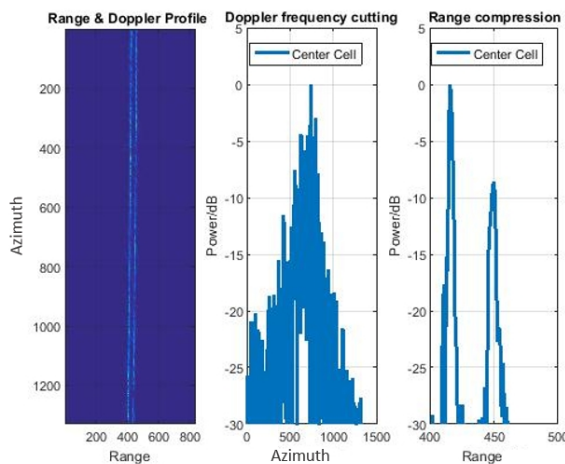
$$s_7(t, \eta) \approx \frac{E A_0}{k_r T_r} R_x \left\{ \frac{E}{k_r T_r} \left[t - \frac{2}{c} (R(\eta) + \Delta R_c(\eta) - a(\eta)t_0) \right] \right\} \quad (21)$$

$$w_a(\eta - \eta_0) \exp\left(-\frac{j4\pi}{\lambda}R(\eta)\right)$$

محاسبه فاز:



(ب)



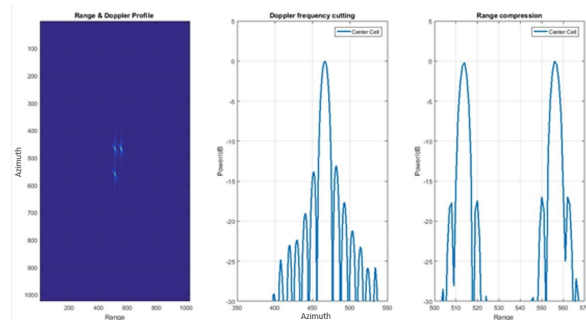
(ج)

شکل ۴: تصاویر شبیه‌سازی در حالت وجود خطای سینوسی و بدون جبران سازی (الف) ماتریس داده‌های خام (ب) خروجی فشرده‌سازی برد (ج) خروجی نهایی

وجود خطا باعث می‌شود که تصویر در جهت سمت کشیده شود. به عبارت دیگر با وجود خطا قادر به تشخیص موقعیت هدف در جهت سمت نخواهیم بود، اما کشیدگی تصویر در جهت برد کمتر هست. همچنین می‌توان گفت در صورت وجود خطای زیاد، تصویر نهایی به مقدار زیادی در جهت برد کشیده می‌شود اما برخلاف جهت سمت، در کل برد کشیده نمی‌شود. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که تأثیر خطا در اشتباه تشخیص دادن موقعیت هدف در جهت سمت بیشتر از جهت برد است. از طرف دیگر نیز به ازای خطاهای کوچک نیز تصویر در جهت سمت کشیده می‌شود. در کل می‌توان نتیجه گرفت که با وجود خطا، پس از فشرده‌سازی برد و اصلاح مهاجرت برد، داده‌ها در هر دو جهت برد و سمت پخش می‌شوند، به همین دلیل نمی‌توان مانند حالت ایدئال فشرده‌سازی سمت را به درستی انجام داد. بنابراین باید جبران سازی قبل از فشرده‌سازی سمت صورت گیرد. با توجه به شکل ۴ می‌توان گفت وجود خطای حرکتی تأثیر زیادی در PSLR و ISLR سمت می‌گذارد و این تأثیر در برد کمتر است، به گونه‌ای که اندازه‌ی گلبرگ‌های جانبی در جهت سمت به قدری زیاد می‌شود که ISLR مثبت

۵-۱- شبیه‌سازی در حالت بدون خطا (ایدئال)

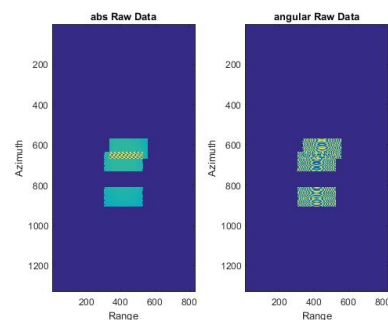
در حالت ایدئال تصویر فشرده‌شده نهایی توسط الگوریتم پس‌تابش پیشنهادی برای سه هدف در شکل ۳ مشاهده می‌شود. معیار PSLR در جهت برد و در جهت سمت در این حالت به ترتیب -17dB و -13dB است. همچنین تفکیک‌پذیری در جهت برد برابر ۳ پیکسل و در جهت سمت هم برابر ۱۱ پیکسل هست. در نهایت نمودار برد و سمت برای یکی از اهداف در شکل ۳ نشان داده شده است.



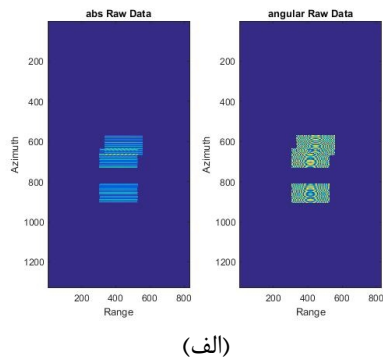
شکل ۳: نتایج شبیه‌سازی برای الگوریتم Imp-BP در حالت ایدئال

۵-۲- شبیه‌سازی در حالت وجود خطای سینوسی و بدون جبران سازی

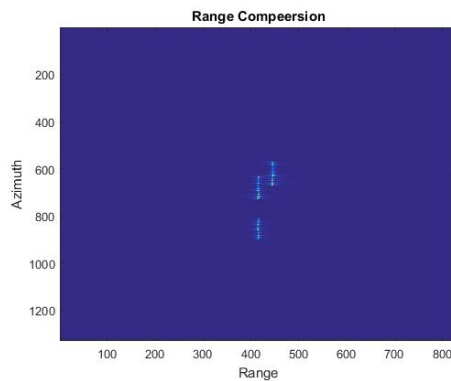
در این قسمت فرض می‌کنیم که حرکت هواپیما همراه با انحراف از مسیر مستقیم در جهت ارتفاع باشد. انحراف حرکت هواپیما را به صورت سینوسی در نظر می‌گیریم. در شکل ۴ تصاویر ماتریس داده خام، خروجی فشرده‌سازی برد و خروجی تصویر نهایی آورده شده است.



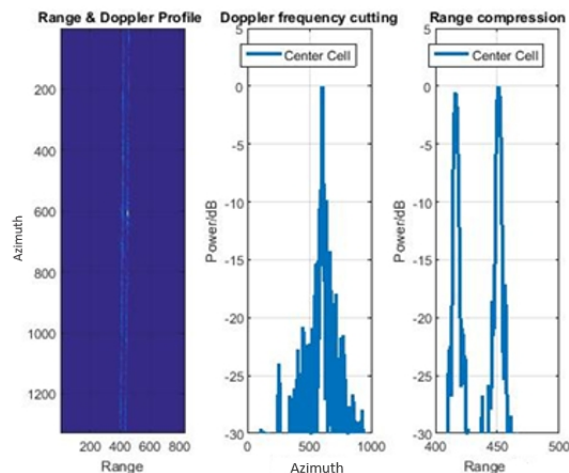
(الف)



(الف)



(ب)



(ج)

شکل ۵: تصاویر شبیه‌سازی در حالت وجود خطای سینوسی همراه با جبران سازی (الف) ماتریس داده‌های خام (ب) خروجی فشرده‌سازی برد (ج) خروجی نهایی

۴-۵- شبیه‌سازی در حالت وجود خطای سینوسی به همراه

نویز

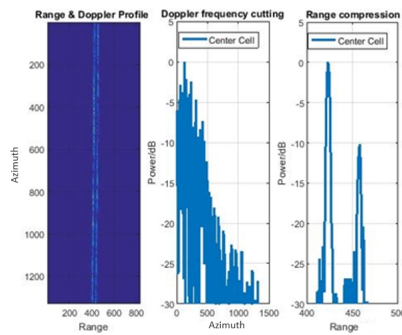
در این قسمت علاوه بر وجود خطای سینوسی، نویز را هم اضافه می‌کنیم. در قسمت وجود خطای سینوسی و بدون جبران سازی

می‌شود و این امر باعث می‌شود هدف به‌درستی در جهت سمت تشخیص داده نشود. مقدار PSLR نیز به‌شدت افت می‌کند تا عددی نزدیک صفر شود. اما در جهت برد PSLR و ISLR افت کمتری دارند. در جهت برد مقدار IRW نیز با کاهش روبه‌رو نمی‌شود، به عبارت دیگر این مقدار یا افزایش پیدا می‌کند یا اینکه تغییری نمی‌کند. اما در جهت سمت این مقدار به‌شدت کاهش پیدا می‌کند. با وجود اینکه در نگاه اول به نظر می‌رسد این کاهش به معنای بهبود IRW در جهت سمت است، اما واقعیت این است که با وجود خطا، آن‌قدر گلب‌رگ‌های جانبی بزرگ‌شده‌اند که دیگر سینک نخواهیم داشت تا IRW مهم باشد. این مقدار تنها پهنای گلب‌رگ اصلی را نشان می‌دهد که به دلیل وجود خطا اندازه‌ی تمامی گلب‌رگ‌های جانبی افزایش پیدا می‌کند و نمی‌توان گلب‌رگ اصلی را از بقیه گلب‌رگ‌ها جدا کرد. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت IRW، تنها زمانی اهمیت دارد که مقادیر PSLR و ISLR قابل قبول باشند. با توجه به موارد ذکر شده و شکل ۴ می‌توان گفت تفکیک‌پذیری در جهت برد و با شدت بیشتر در جهت سمت تضعیف‌شده به‌طوری‌که در جهت برد تفکیک‌پذیری به ۶ پیکسل رسیده و در جهت سمت نیز می‌توان گفت تقریباً تفکیک‌پذیری از بین رفته است. همچنین مقدار PSLR در جهت برد در این حالت به ۱۵- کاهش پیدا کرده و PSLR سمت می‌توان گفت با توجه به شرایط ذکر شده به هم‌ریخته و به صفر نزدیک شده است.

۵-۳- شبیه‌سازی در حالت وجود خطای سینوسی و همراه با

جبران سازی

با توجه به این‌که در قسمت قبل به دلیل وجود خطای سینوسی در بخش قبل که منجر به کشیدگی تصویر در جهت برد و سمت می‌شود که عدم تشخیص درست هدف را به همراه دارد و از طرفی با وجود این خطا، فشرده‌سازی سمت به‌درستی فشرده‌سازی سمت در حالت ایدئال انجام نمی‌شود، به همین دلیل انجام جبران سازی برای بهبود شرایط ذکر شده ضروری است. در این قسمت به جبران سازی در شرایط وجود خطای سینوسی می‌پردازیم. پرواضح است که با توجه به شکل ۵ چه در مرحله‌ی خروجی فشرده‌سازی برد و چه در مرحله‌ی خروجی نهایی مقادیر تفکیک‌پذیری و PSLR نسبت به شکل ۴ به‌شدت بهبود یافته‌اند. با توجه به شکل ۵ مقادیر PSLR در برد و سمت به ترتیب برابر ۱۷dB و ۱۰dB است و همچنین مقادیر تفکیک‌پذیری در جهت برد و سمت به ترتیب برابر ۴ و ۱۲ پیکسل می‌باشد که نسبت به حالت وجود خطای سینوسی و بدون جبران سازی بهبود انجام‌شده را به‌طور ملموسی به نمایش می‌گذارد.



(ج)

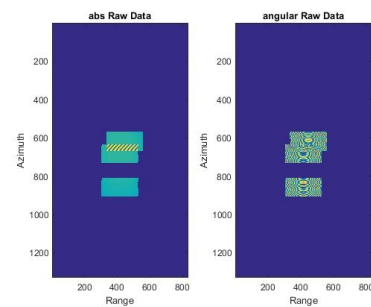
شکل ۶: تصاویر شبیه‌سازی در حالت وجود خطای سینوسی به همراه نویز (الف) ماتریس داده‌های خام (ب) خروجی فشرده‌سازی برد (ج) خروجی نهایی

همان‌طوری که انتظار می‌رفت با توجه به نتایج شبیه‌سازی نشان داده‌شده در شکل ۶، خروجی‌های نمایش داده‌شده تقریباً در وضعیت بدتری نسبت به حالت وجود خطای سینوسی و بدون جبران سازی (شکل ۴) قرار گرفته‌اند.

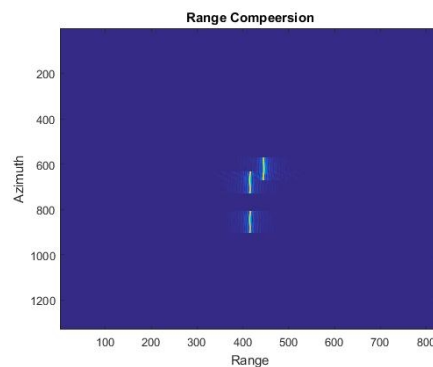
۵-۵- شبیه‌سازی در حالت وجود خطای سینوسی به همراه نویز همراه با جبران سازی

همان‌طور که در بخش شبیه‌سازی در حالت وجود خطای سینوسی به همراه نویز و بدون جبران سازی ذکر شد وجود خطای سینوسی و در کنار آن وجود نویز موجب کشیدگی تصویر در جهت برد و سمت می‌شود و که عدم تشخیص درست هدف را به همراه داشت و مشکل دیگری که خطاهای نامبرده ایجاد می‌کردند، عدم انجام درست فشرده‌سازی سمت بود به همین دلیل انجام دادن جبران سازی بیش‌ازپیش احساس می‌شود که بتواند شرایط را در حضور چنین خطاهایی بهبود ببخشد. با توجه به نتایج شبیه‌سازی نشان داده‌شده در شکل ۷، مقدار PSLR در جهت برد و سمت به ترتیب برابر ۱۷dB و -۹dB است و نیز تفکیک‌پذیری در جهت برد و در جهت سمت به ترتیب برابر ۴،۵ و ۱۲ پیکسل می‌باشد که شرایط بسیار مطلوبی را نسبت به حالت‌های وجود خطا و نویز و بدون جبران سازی برای ما رقم می‌زند.

همان‌طور که مشاهده شد وجود خطای سینوسی، ایجاد کشیدگی تصویر در جهت برد و سمت را به همراه داشت و از طرفی به‌موجب این کشیدگی که در جهت سمت به‌مراتب بیشتر بود، عدم تشخیص درست هدف را به همراه داشت و علاوه بر این مشکل دیگری که در حالت وجود خطای سینوسی بود عدم انجام درست فشرده‌سازی در سمت بود حال با توجه به موارد ذکر شده اگر به چنین حالتی نویز هم اضافه شود انتظار می‌رود که شرایط به‌مراتب بدتر شده و مواردی مانند تفکیک‌پذیری و PSLR نسبت به حالت وجود خطای سینوسی تضعیف شود. بنابراین مطابق آنچه در این قسمت شرح داده شد و نیز انتظاری که از نتایج شبیه‌سازی با توجه به حالت‌های قبل می‌رود، در شکل ۶ مشاهده می‌شود که تفکیک‌پذیری در جهت برد به‌شدت کاهش یافته و گلبرگ اصلی دچار پهن‌شدگی شده است و در جهت سمت، نمودار سینک در حالت ایدئال از دست می‌رود. مقدار PSLR در جهت برد برابر ۱۰dB و در جهت سمت می‌توان گفت عملاً با توجه به شرایط نامساعد که روی آن تأثیر گذاشته که دلایل آن در بالا ذکر شد، می‌توان گفت PSLR به صفر نزدیک شده است. همچنین تفکیک‌پذیری در جهت برد برابر ۷ پیکسل و در جهت سمت کاملاً به‌هم‌ریخته است.



(الف)



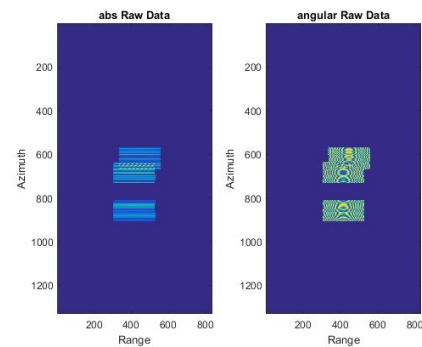
(ب)

سمت به درستی صورت نگیرد و به همین دلیل از جبران سازی خطای حرکتی استفاده می‌گردد تا بتوان مشکلاتی که در شرایط خطا به وجود می‌آید را بهبود بخشید. مشاهده می‌شود که الگوریتم نامبرده نسبت به الگوریتم‌های پیشین تفکیک پذیری و PSLR را حدود ۴۰ درصد بهبود داده است. پیشنهاد می‌شود کار بعدی در عین حفظ تفکیک پذیری بر روی کاهش حجم محاسباتی این الگوریتم ادامه یابد. به عبارتی دیگر الگوریتم پیشنهادی در این مقاله به منظور متمرکز کردن داده‌های ارائه شده، از جبران سازی خطاهای حرکتی (RCM) استفاده می‌کند. این الگوریتم علاوه بر تصحیح RCM، می‌تواند ارتباط برد-سمت را هم کنترل کند. همچنین در حالت زوایای کجی بالا می‌تواند تفکیک پذیری بسیار بهتری را نسبت به سایر الگوریتم‌ها به ارمغان آورد.

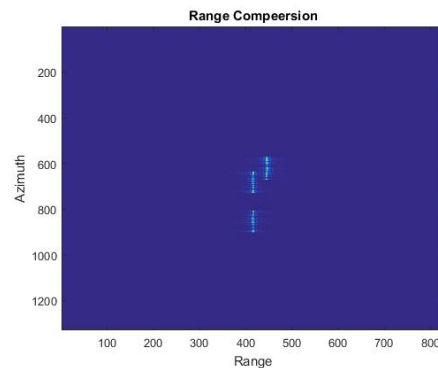
بهبود و نوآوری کار بر روی حجم محاسباتی و رزولوشن می‌باشد. حجم محاسباتی بر اساس مستندات علمی مراجع زیر حجم محاسباتی در $BP (N^4)$ ، الگوریتم $FBP (N^3 \log_e N)$ می‌باشد که در N معرف تعداد پیکسل‌های تصویر است. اما در مقاله ارائه شده حجم محاسباتی الگوریتم پیشنهادی از مرتبه (N^3) می‌باشد. [21] [22]

۷- مراجع:

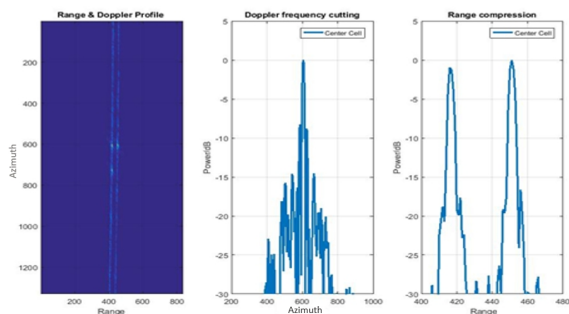
- [1] Helena Cruz, Mário Véstias, José Monteiro, Horácio Neto, Rui Policarpo Duarte, "A Review of Synthetic-Aperture Radar Image Formation Algorithms and Implementations: A Computational Perspective," *remote sensing*, 2022.
- [2] J. R. Bennett, I. G. Cumming, R. A. Deane, P. Widmer, R. Fielding and P. McConnell., "SEASAT Imagery Shows St. Lawrence.," *Aviation Week and Space Technology*, p. 19 and front cover, February 26, 1979.
- [3] Ian. G. Cumming and Frank H. Wong, *Digital Processing of Synthetic Aperture RADAR Data Algorithms and Implementation*, LONDON: ARTECH HOUSE, 2004.
- [4] Isernia, T., Pascazio, V., Pierri, R., Schirinzi, G., "Synthetic aperture radar imaging from phase corrupted data," *IEEE proceedings radar, Sonar and Navigation*, vol. 143, pp. 268-274, 1996.
- [5] Wahl, D.E., Eichel, P.H., Ghiglia, D.C., Jakowatz, C.V., "Phase gradient autofocus: A robust tool for high resolution SAR phase correction," *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic System*, vol. 30, pp. 827-835, 1995.
- [6] F. Impagnatiello, "A precision chirp scaling SAR processor extension to sub-aperture implementation on massively parallel supercomputers," in *International Geoscience and Remote Sensing Symposium, IGARSS '95. Quantitative Remote Sensing for Science and Applications*, 1995.
- [7] Muffi, R., "recent development in seismic migration in time series analysis theory and practice," in *elsevier science publisher*, 1985.



(الف)



(ب)



(ج)

شکل ۷: تصاویر شبیه‌سازی در حالت وجود خطای سینوسی به همراه نویز همراه با جبران سازی (الف) ماتریس داده‌های خام (ب) خروجی فشرده‌سازی برد (ج) خروجی نهایی

همان‌طور که مشاهده می‌شود مواردی نظیر PSLR و تفکیک پذیری نسبت به حالت قبل بهبود قابل توجهی داشته‌اند.

۶- نتیجه‌گیری:

نتایج شبیه‌سازی در این مقاله نشان دادند که وجود خطا باعث ایجاد کشیدگی تصویر در جهت برد و سمت می‌شود. این مقدار در جهت سمت به مراتب بیشتر است و از طرفی باعث عدم تشخیص درست هدف خواهد شد. علاوه بر آن وجود خطا باعث می‌شود فشرده‌سازی در

- and Remote Sensing*, vol. 14, pp. 1728 - 1740, 15 June 2020.
- [20] Yuan Guo; Zhiyong Suo; Penghui Jiang; Han Li, "A Fast Back-Projection SAR Imaging Algorithm Based on Wavenumber Spectrum Fusion for High Maneuvering Platforms," *remote sensing*, vol. 13, no. 9, 23 April 2021.
- [21] L. M. H. Ulander, H. Hellsten, G. Stenstrom, "Synthetic-Aperture Radar Processing Using Fast Factorized Back-Projection," *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, vol. 39, no. 3, pp. 1557-9603, July 2003.
- [22] Michael I Duersch and David G Long, "Analysis of time-domain back-projection for stripmap SAR," *International Journal of Remote Sensing*, 2015.
- [8] Hongtu Xie; Daoxiang An; Xiaotao Huang; Zhimin Zhou, "Fast Time-Domain Imaging in Elliptical Polar Coordinate for General Bistatic VHF/UHF Ultra-Wideband SAR With Arbitrary Motion," *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, vol. 8, no. 2, pp. 879 - 895, 12 September 2014.
- [9] Lei Ran; Zheng Liu; Tao Li; Rong Xie; Lei Zhang, "An Adaptive Fast Factorized Back-Projection Algorithm With Integrated Target Detection Technique for High-Resolution and High-Squint Spotlight SAR Imagery," *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, vol. 11, no. 1, pp. 171 - 183, 07 December 2017.
- [10] Dadi Meng; Donghui Hu; Chibiao Ding, "Precise Focusing of Airborne SAR Data With Wide Apertures Large Trajectory Deviations: A Chirp Modulated Back-Projection Approach," *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 53, no. 5, pp. 2510-2519, 17 October 2014.
- [11] Leping Chen; Daoxiang An; Xiaotao Huang, "A Backprojection-Based Imaging for Circular Synthetic Aperture Radar," *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, vol. 10, no. 8, pp. 3547 - 3555, 03 April 2017.
- [12] Song Zhou; Lei Yang; Lifan Zhao; Guoan B, "Quasi-Polar-Based FFBP Algorithm for Miniature UAV SAR Imaging Without Navigational Data," *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 55, no. 12, pp. 7053 - 7065, 01 September 2017.
- [13] Lei Ran; Rong Xie; Zheng Liu; Lei Zhang; Tao Li; Jingjing Wang, "Simultaneous Range and Cross-Range Variant Phase Error Estimation and Compensation for Highly Squinted SAR Imaging," *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 56, no. 8, pp. 4448 - 4463, 18 April 2018.
- [14] Dong Feng; Daoxiang An; Xiaotao Huang, "An Extended Fast Factorized Back Projection Algorithm for Missile-Borne Bistatic Forward-Looking SAR Imaging," *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, vol. 54, no. 6, pp. 2724 - 2734, 18 April 2018.
- [15] Dadi Meng; Chibiao Ding; Donghui Hu; Xiaolan Qiu; Lijia Huang; Bing Han; Jiayin Liu; Ning Xu, "On the Processing of Very High Resolution Spaceborne SAR Data: A Chirp-Modulated Back Projection Approach," *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 56, no. 1, pp. 191 - 201, 15 September 2017.
- [16] Guanwen Wang; Feng Qi; Zhi Liu; Cuiling Liu; Chungui Xing; Wei Ning, "Comparison Between Back Projection Algorithm and Range Migration Algorithm in Terahertz Imaging," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 18772 - 18777, 20 January 2020.
- [17] Krzysztof Radecki; Piotr Samczyński; Damian Gromek, "Fast Barycentric-based Back Projection Algorithm for SAR Imaging," *IEEE Sensors Journal*, vol. 19, no. 22, pp. 10635 - 10643, 31 July 2019.
- [18] Lei Ran; Zheng Liu; Rong Xie; Lei Zhang, "Focusing High-Squint Synthetic Aperture Radar Data Based on Factorized Back-Projection and Precise Spectrum Fusion," *remote sensing*, vol. 11, no. 24, 4 December 2019.
- [19] Min Bao; Song Zhou; Lei Yang; Mengdao Xing; Lifan Zhao, "Data-Driven Motion Compensation for Airborne Bistatic SAR Imagery Under Fast Factorized Back Projection Framework," *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations*

زیر نویس ها

¹ Azimuth Resolution

² Range Resolution

³ Synthetic aperture radar

⁴ Time Domain Correlation

⁵ Squint angle

⁶ Improved Back Projection Algorithm

⁷ Stripmap

⁸ Spotlight

⁹ Chirp Scaling Algorithm

¹⁰ Stretch

¹¹ Bistatic Fast Factorized Back Projection

¹² Motion Errors Compensation

¹³ Range cell migration

¹⁴ Sub image

¹⁵ Phase Error Correction

¹⁶ Direct MOCO Algorithm

¹⁷ Topography and Aperture Dependent

¹⁸ Circular Synthetic Aperture Radar

¹⁹ Back Projection Integrated

²⁰ Autofocus Back Projection

²¹ Adaptive Fast Factorized Back Projection Algorithm

²² Wave number

²³ Nonsystematic Range Cell Migration

²⁴ Bistatic forward-looking synthetic aperture radar

²⁵ Direct Back Projection

²⁶ Stolt

²⁷ Offset

²⁸ Range Migration Algorithm

²⁹ Fast Barycentric Back-Projection Algorithm

³⁰ Barycentric of Back Projection Algorithm

³¹ High-Squint Accelerated Factorized Back-Projection

³² Accelerated Factorized Back Projection

³³ Broadside

³⁴ High squint adaptive fast back projection

³⁵ Azimuthal Phase Error

³⁶ High-Squint and High-Dive Accelerated Factorized Back-Projection

³⁷ Peak to sidelobe level ratio