

پایش پویای سطح زمین با تشکیل ویدیوی رنگی با استفاده از ویژگی قطبش در داده رادار روزنه مصنوعی

احمد رضا ترکی زاده^۱، دانشجوی کارشناسی ارشد، سید روح الله ثمره هاشمی^۲، عضو هیأت علمی

۱- گروه آموزشی مخابرات و الکترونیک - دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر - دانشگاه تحصیلات تکمیلی صنعتی و فناوری پیشرفته - کرمان -

ایران - a.torkizadeh@student.kgut.ac.ir

۲- گروه پژوهشی فیبر نوری - پژوهشگاه علوم و تکنولوژی پیشرفته و علوم محیطی - دانشگاه تحصیلات تکمیلی صنعتی و فناوری پیشرفته -

کرمان - ایران - sr.hashemi@kgut.ac.ir

چکیده: یکی از ویژگی‌های امواج مورد استفاده در رادار روزنه مصنوعی (SAR)، قطبش این امواج است. در فرایند بازتابش امواج از اشیای مختلف، ویژگی قطبش موج برخوردی و بازتابی، می‌تواند آشکارکننده برخی ویژگی‌های هندسی و فیزیکی اشیاء باشد؛ لذا در رادار روزنه مصنوعی قطبش‌سنجی (PolSAR)، این ویژگی به کار گرفته می‌شود. این پژوهش یک رویکرد جدید برای تولید تصاویر و ویدیوی رنگی با رنگ کاذب با استفاده از ویژگی قطبش امواج ارائه می‌دهد. در روش پیشنهادی، در ابتدا با استفاده از داده واقعی یک سامانه SAR در سه قطبش مختلف و به‌کارگیری الگوریتم تشکیل تصویر قالب قطبی (PFA)، سه تصویر جداگانه از صحنه تشکیل می‌شود. سپس با تخصیص رنگ با استفاده از روش‌های مختلف تجزیه ماتریس پراکنش یک تصویر رنگی حاصل شده و به منظور تنظیم سطح روشنایی و کنتراست مناسب، روش اصلاح گاما و نیز متعادل‌سازی هیستوگرام تطبیقی با کنتراست محدود (CLAHE) به کار گرفته می‌شود. در ادامه با استفاده از تصاویر رنگی متوالی، یک ویدیوی رنگی حاصل می‌شود که در آن تغییرات رنگ اشیاء و نواحی منعکس‌کننده تغییرات فیزیکی یا هندسی پراکنده‌سازهای صحنه در طول زمان می‌باشد. این رویکرد تلفیقی، ابزاری برای تجزیه و تحلیل داده‌های SAR است و می‌تواند در کاربردهای مختلف از جمله پایش شهری، محیط‌زیست و کشاورزی مورد استفاده قرار گیرد. در این مقاله قابلیت روش پیشنهادی در تولید تصاویر و ویدیوهای رنگی و تغییرات آن تحت زوایای تابش مختلف با استفاده از داده واقعی و نیز بهبود کیفیت تصاویر و ویدیو نهایی به صورت بصری و کمی با بهبود معیار ENL به میزان حدود 30dB ارائه شده است.

واژه‌های کلیدی: رادار روزنه مصنوعی، الگوریتم تشکیل تصویر، قطبش، الگوریتم قالب قطبی، ویدیو رادار روزنه مصنوعی.

تاریخ ارسال مقاله: ۱۴۰۳/۱۲/۲۹

تاریخ اصلاح مقاله: ۱۴۰۴/۰۵/۳۰

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۴/۰۶/۱۵

نام نویسنده مسئول: سید روح الله ثمره هاشمی

نشانی نویسنده مسئول: ایران - کرمان - دانشگاه تحصیلات تکمیلی صنعتی و فناوری پیشرفته - پژوهشگاه فوتونیک - گروه پژوهشی فیبر نوری.

Dynamic monitoring of the Earth's surface through colored video formation utilizing the polarization feature of synthetic aperture radar data

Ahmadreza Torkizadeh, M.sc. student¹, Seyed Rouhollah Samareh Hashemi, Faculty member^{2*}

1- Department of Electrical and Computer Engineering, Graduate University of Advanced Technology, Kerman, Iran,
a.torkizadeh@student.kgut.ac.ir

2- Fiber Optics Group, Institute of Science and High Technology and Environmental Sciences, Graduate University of Advanced Technology,
Kerman, Iran, sr.hashemi@kgut.ac.ir

Abstract: One of the distinctive properties of the electromagnetic waves employed in Synthetic Aperture Radar (SAR) is their polarization. During the scattering process, the polarization characteristics of the incident and reflected waves can reveal specific geometric and physical properties of objects. Polarimetric SAR (PolSAR) exploits this property for enhanced scene interpretation. This study introduces a novel approach for processing SAR data and generating false-color video by leveraging wave polarization information. In the proposed method, real SAR data in three polarization channels are first processed using the Polar Format Algorithm (PFA) to form three separate images of the scene. A color image is then produced through color assignment based on various scattering matrix decomposition techniques. To achieve suitable brightness and contrast levels, gamma correction and Contrast Limited Adaptive Histogram Equalization (CLAHE) are applied. Subsequently, by combining sequential overlapping color images, a false-color video is generated to monitor the scene. The resulting video, along with color variations in objects and regions, reflects temporal physical or geometric changes in the scatterers. This integrated approach provides a powerful tool for SAR data analysis and can be applied to diverse fields such as urban monitoring, environmental studies, and agriculture. The effectiveness of the proposed method is demonstrated through real SAR data, showcasing its capability in producing color images and videos and their temporal variations under varying incidence angles, as well as enhancing the visual quality of the final imagery and video products by increasing the ENL about 30dB.

Keywords: Synthetic Aperture Radar, Image Formation Algorithm, Polarization, Polar Format Algorithm, VideoSAR.

۱- مقدمه

رادار روزنه مصنوعی^۱ (SAR) سامانه ای است که برای تصویربرداری از سطح زمین با استفاده از ریزموج^۲ طراحی شده است. برای اولین بار کارل وایلی این تکنیک تصویربرداری راداری را برای بهبود قدرت تفکیک در سمت^۳ پیشنهاد کرد [۱]. اساس کار این سامانه استفاده از حرکت سکوی حامل رادار برای شبیه سازی یک آنتن مجازی بزرگتر است. در این روش، امواج الکترومغناطیسی به صورت متوالی از آنتن رادار ارسال می شوند و پژواک های بازتابیده از سطح زمین یا هدف مورد نظر، توسط آنتن گیرنده دریافت می گردند. سپس، با پردازش سیگنال های دریافتی، تصویری با وضوح بالا از منطقه مورد نظر تولید می شود. از مزایای این سامانه می توان به قابلیت تصویربرداری در شرایط جوی نامساعد و حتی در شب، تولید تصاویر با وضوح بالا، و امکان استخراج اطلاعات فاز برای کاربردهایی مانند تداخل سنجی راداری^۴ اشاره کرد. برای تهیه تصویر از داده دریافتی، الگوریتم های تشکیل تصویر مختلفی به کار گرفته می شود. این الگوریتم ها بسته به هندسه تصویربرداری و پارامترهای مورد نظر در تصویر خروجی انتخاب می شوند.

یکی از ویژگی های امواج رادیویی قطبش^۵ این امواج است. در حوزه رادار و بازتابش امواج رادیویی از اشیای مختلف، ویژگی قطبش موج برخوردی و بازتابی، می تواند آشکارکننده برخی ویژگی های هندسی و فیزیکی اشیاء باشد، لذا با ترکیب تصاویر قطبش های مختلف می توان تصاویر رنگی با امکان تمایز اهدافی که نحوه پراکنش^۶ متفاوتی در قطبش های مختلف دارند، فراهم نمود. امروزه قطبش سنجی راداری^۷ به عنوان یک ابزار قدرتمند در تحلیل داده های راداری و بهبود عملکرد سیستم های راداری شناخته می شود و در طیف گسترده ای از کاربردها از نظارت بر محیط زیست گرفته تا کاربردهای دفاعی و امنیتی مورد استفاده قرار می گیرد. با ترکیب تصاویر حاصل از قطبش های مختلف، می توان تصاویر رنگی با قابلیت تفکیک بالا تولید کرد. این تصاویر رنگی امکان تمایز اهدافی که نحوه پراکنش متفاوتی در قطبش های مختلف دارند، فراهم می نماید. به عنوان مثال، در برخی مطالعات از ترکیب داده های چهار کانال قطبش HH، VV، HV و VH برای تولید تصاویر رنگی استفاده شده است که امکان تشخیص و تمایز بهتر انواع مختلف اهداف و سطوح را فراهم می کند [۲] - [۴]. در اینجا مثلاً قطبش HV به معنای ارسال موج با قطبش افقی (H) و دریافت با قطبش عمودی (V) است. لازم به ذکر است رنگ های تولید شده، رنگ مجازی بوده و هر رنگ نشان دهنده ویژگی های قطبشی اشیاء می باشند. علاوه بر این قطبش سنجی راداری می تواند در تمایز بین انواع مختلف اهداف و سطوح کمک کند؛ به عنوان نمونه در [۲] تشخیص بین سطوح طبیعی و مصنوعی یا تمایز انواع مختلف پوشش گیاهی با استفاده از این قابلیت انجام شده است.

یکی از عواملی که در تغییر پاسخ نواحی به قطبش های مختلف موثر است، زاویه دید رادار می باشد. لذا ایجاد یک توالی از تصاویر

قطبش سنجی که از زوایای مختلف گرفته شده اند، می تواند در مطالعه این پدیده موثر باشد. یکی از روش های ایجاد یک توالی از تصاویر SAR استفاده از تکنیک ویدیوی رادار روزنه مصنوعی یا video-SAR است.

video-SAR یا ویدیوی رادار روزنه مصنوعی روشی برای نمایش داده های SAR است که برای مشاهده تغییرات زمانی و مکانی در صحنه مورد مطالعه به کار گرفته شد [۵]. این تکنیک پیشرفته امکان تولید ویدیو با استفاده از تصاویر راداری با نرخ قاب^۸ بالا را فراهم می کند، به طوری که می توان تغییرات صحنه را به صورت پیوسته و تقریباً بلادرنگ مشاهده کرد. این روش برای کاربردهایی مانند ردیابی اهداف متحرک، نظارت بر مناطق وسیع، ارزیابی سریع تغییرات محیطی، نظارت بر ترافیک، ارزیابی خسارات در مناطق بحران زده، و مطالعات زیست محیطی بسیار مفید و ارزشمند است. اگرچه این روش با چالش هایی مانند حجم بالای داده و نیاز به پردازش سریع روبرو است، اما پیشرفت های اخیر در الگوریتم های پردازش سیگنال و سخت افزارهای محاسباتی، استفاده از آن را در کاربردهای عملی امکان پذیر ساخته است.

آنچه تا کنون از خروجی video-SAR ارائه شده است، تولید ویدیو با استفاده از توالی تصاویر تک رنگ (سطح خاکستری^۹) بوده است. ایده اصلی در این مقاله تلفیق دو تکنیک قطبش سنجی راداری و video-SAR است، به این صورت که با ایجاد یک توالی از تصاویر رنگی قطبش سنجی دارای همپوشانی یک ویدیوی رنگی ایجاد کرد که در این ویدیو می توان اطلاعات جدیدی از هندسه و خواص فیزیکی صحنه مورد تصویربرداری و تغییرات آن در زمان به ویژه از زوایای دید مختلف به دست آورد. این رویکرد امکان مشاهده تغییرات پیوسته در ویژگی های اهداف را در طول زمان و از زوایای مختلف فراهم می کند. بدین منظور در روش پیشنهادی در این مقاله، ابتدا با استفاده از داده خام واقعی SAR در قطبش های مختلف HH، VV و HV سه تصویر تک رنگ با استفاده از الگوریتم تشکیل تصویر قالب قطبی^{۱۰} (PFA) ایجاد می شود. سپس با استفاده از روش های مختلف تجزیه ماتریس پراکنش، سه تصویر جدید از تصاویر اولیه ایجاد شده و با تخصیص رنگ های قرمز، سبز و آبی به این سه تصویر، یک تصویر رنگی RGB با رنگ مجازی ساخته می شود. این تصویر به منظور تنظیم سطح روشنایی و کنتراست^{۱۱} مناسب، با استفاده از روش اصلاح گاما^{۱۲} و نیز متعادل سازی هیستوگرام تطبیقی با کنتراست محدود^{۱۳} (CLAHE) [۶] مورد پردازش قرار می گیرد. برای تهیه ویدیو، باید با استفاده از داده SAR و در نظر گرفتن یک همپوشانی مناسب، تصاویر رنگی متوالی به روش پیش گفته از صحنه تهیه شده و با نرخ قاب مناسب ویدیوی نهایی را تشکیل دهند.

این روش می تواند به عنوان پایه ای برای تحقیقات آینده در زمینه تلفیق داده های قطبش سنجی و تصویربرداری پویا در SAR مورد استفاده قرار گیرد.

۲- پیشینه پژوهش

از زمان ابداع رادار روزنه مصنوعی تا کنون پژوهش‌های بسیاری در حوزه قابلیت‌ها، پردازش داده و کاربردهای این سامانه منتشر شده است که در برخی مقالات این مباحث مرور شده است [۷]-[۱۰]. در جدیدترین تحقیقات حوزه SAR، استفاده از هوش مصنوعی برای پردازش داده و تفسیر نتایج به کار گرفته شده است. به عنوان مثال در [۱۱] تعامل بین تصاویر SAR و هوش مصنوعی مولد به صورت جامع بررسی شده است. نویسندگان با مرور مدل‌های پیشرفته GenAI و کاربردهای آن در حوزه تولید داده‌های SAR، به تحلیل شباهت‌ها، تفاوت‌ها و چالش‌های موجود میان حوزه بینایی ماشین و SAR پرداخته‌اند. این تعامل شامل استفاده از GenAI برای تولید داده‌های مصنوعی SAR، بهبود کیفیت داده‌ها، شبیه‌سازی مبتنی بر مدل‌های فیزیکی و ترکیب روش‌های قابل تفسیر با یادگیری عمیق است. همچنین کاربردهای GenAI در حل چالش‌های بینایی ماشین در تصاویر SAR مانند کمبود داده، کیفیت پایین و نویز بررسی و دسته‌بندی شده‌اند و همچنین چالش‌ها و چشم‌اندازهای آینده این هم‌گرایی تحلیل شده است.

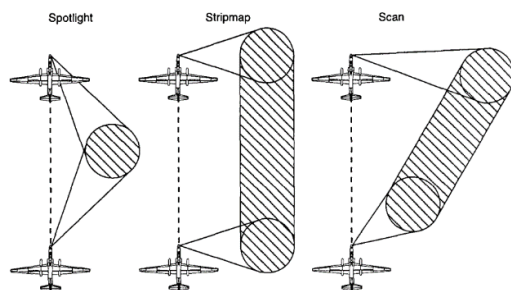
آنچه در ادامه به عنوان پیشینه پژوهش بدان اشاره می‌شود، پژوهش‌هایی در موضوع اصلی که این مقاله از آن ایده گرفته است، یعنی video-SAR و قطبش‌سنجی راداری، می‌باشد.

مباحث مطرح شده در موضوع video-SAR متنوع و شامل طیف گسترده‌ای از موضوعات می‌باشد. به عنوان مثال در [۱۲] Video-SAR به عنوان یک الگوی نوین تصویربرداری معرفی شده که امکان نظارت پیوسته بر منطقه موردنظر را فراهم می‌کند و در مقایسه با سامانه‌های تصویربرداری SAR هواپایه و ویدیویی نور مرئی، مزایای ویژه‌ای دارد. در پژوهش فوق، اصول عملکرد، الگوریتم تصویربرداری و روش‌های کاربرد Video-SAR فضاپایه بررسی شده است. همچنین، یک الگوریتم تصویربرداری به‌منظور پردازش داده‌های SAR ویدیویی فضاپایه ارائه شده است. همچنین در [۱۳] یک روش بهبودیافته برای تشکیل تصاویر ویدیویی SAR با استفاده از الگوریتم PFA ارائه شده است که زمان تشکیل تصاویر را کاهش می‌دهد. در [۱۴] از ویژگی افزونگی داده‌های SAR ویدیویی چند قابی برای بهبود کیفیت تصویر و کاهش حجم داده استفاده شده است. در [۱۵] یک الگوریتم جدید برای video-SAR معرفی شده است که با هدف تسریع پردازش حوزه زمان و تولید ویدیوهای SAR بدون تغییر زاویه دید طراحی شده است. این الگوریتم از روش جدیدی برای افزایش سرعت بدون نیاز به درون یابی بهره می‌برد. نتایج پردازش روی داده‌های واقعی یک رادار باند W نشان می‌دهد که این روش با بار محاسباتی کمتر، ویدیوهای SAR را با نرخ قاب بالا و زاویه دید ثابت ارائه می‌دهد. علاوه بر این، در [۱۶] یک چارچوب تصویربرداری SAR ویدیویی بر اساس استراتژی آموزشی بدون نظارت جدیدی به نام DualNoise2Noise ارائه شده که به حذف نویز لکه‌ای^{۱۴} در تصاویر کمک می‌کند. در [۵] برنامه دارپا^{۱۵} برای غلبه

بر چالش‌های موجود درزمینه‌ی تصویربرداری برای مأموریت پشتیبانی هوایی نزدیک شرح داده شده است. دارپا درحال توسعه یک سیستم رادار روزنه مصنوعی ویدئویی است که برای ارتقای قابلیت هدف‌گیری هواپیمای AC-130 در شرایطی که سامانه‌های الکترواپتیک فعلی کارایی ندارند طراحی شده است. استفاده از این سامانه، شناسایی و رهگیری یک کشتی به عنوان هدف را از ۳۵ درصد به ۷۲ درصد افزایش می‌دهد، زیرا برخلاف دوربین‌های EO/IR، ابرها و عوامل محیطی مانع دید رادار نمی‌شوند.

تصویربرداری با وضوح بالا در video-SAR مستعد جابجایی بین قاب‌ها به دلیل خطا در مسیر حرکتی است که به صورت جدی بر پایداری ویدیو تاثیر می‌گذارد، همچنین الگوریتم‌های تشکیل تصویر نیز تحت تاثیر نویز لکه‌ای قرار می‌گیرند که منجر به اعوجاج در تصاویر SAR می‌شوند. در [۱۷] روشی نوین برای تصویربرداری سریع و پایدار چندقابی در video-SAR ارائه شده است که شامل دو بخش جبران جابجایی بین قاب‌ها با استفاده از تخمین دقیق خطای حرکتی و الگوریتم تشکیل تصویر SCFBP^{۱۶} می‌باشد و نشان می‌دهد که روش پیشنهادی به‌طور مؤثر پایداری بین قاب‌ها را بهبود داده و فرآیند تشکیل تصویر در سامانه‌های video-SAR را تسریع می‌کند.

در حوزه موضوعات مربوط به قطبش‌سنجی و تولید تصاویر رنگی، برخی پژوهش‌ها به مسائل اصلی و پایه‌ای این موضوع پرداخته‌اند [۲]. [۱۸]. در [۱۹] کارایی روش‌های مختلف تجزیه ماتریس پراکنش و سیستم‌های تخصیص رنگ در رادار روزنه مصنوعی مورد تحلیل قرار گرفته و از داده واقعی Gotcha برای نتایج نمایش استفاده شده است. موضوعات جدید در حوزه کاربردی قطبش‌سنجی راداری شامل طیف متنوعی از پژوهش‌ها می‌شود، از جمله در [۲۰] با استفاده از قطبش‌سنجی در SAR و مدل‌های تجزیه قطبش‌سنجی مختلف توانسته‌اند تشخیص خودکار کشتی در تصاویر SAR را به گونه‌ای انجام دهند که کشتی‌ها با پراکنش بازتاب دوگانه^{۱۷} به عنوان هدف و دریا با پراکنش بازتاب تکی^{۱۸} به عنوان کلاتر تعریف می‌شود و کلاس بندی اهداف در تصاویر SAR انجام شده است. یکی از چالش‌های تشکیل تصویر قطبش‌سنجی در مناطق شهری خطا در تخمین شدت پراکندگی حجمی می‌باشد. در [۲۱] برای رفع مشکل تخمین بیش از حد پراکندگی حجمی در تشکیل تصویر قطبش‌سنجی در مناطق شهری متراکم، از روش PolInSAR^{۱۹} در فرآیند تجزیه هدف در تصاویر قطبش‌سنجی استفاده شده است. با تعریف یک شاخص ساختمانی و به‌کارگیری مدل‌های پراکندگی متفاوت برای مناطق طبیعی و ساختمانی، دقت تجزیه به‌طور چشمگیری بهبود یافته است. نتایج آزمایش‌ها نشان می‌دهد که روش پیشنهادی در کاهش نویز و افزایش دقت طبقه‌بندی در داده‌های چندزمانه عملکرد قابل توجهی دارد.



شکل ۲- شیوه‌های تصویربرداری SAR [۲۵]



شکل ۳- روندنمای الگوریتم PFA [۲۳]

در این پژوهش از الگوریتم PFA برای تشکیل تصویر از داده واقعی استفاده شده است. از آنجا که هدف تهیه تصاویر رنگی با استفاده از قطبش‌های مختلف بوده است، لذا از داده با قطبش‌های مختلف برای تشکیل تصاویر مجزا استفاده شده است. لازم به ذکر است خواص اشیاء توسط ماهیت پراکندگی آن‌ها مشخص می‌شود و به صورت ریاضی به عنوان ماتریس پراکندگی برای هر پیکسل از تصویر هدف نمایش داده می‌شود و معادله ریاضی آن به شرح زیر می‌باشد:

$$\begin{pmatrix} E'_H \\ E'_V \end{pmatrix} = [S] \begin{pmatrix} E'_H \\ E'_V \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} S_{HH} & S_{HV} \\ S_{VH} & S_{VV} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} E'_H \\ E'_V \end{pmatrix} \quad (1)$$

در رابطه ۱، S نشان‌دهنده ماتریس پراکندگی و E بیانگر سیگنال‌های (میدان الکتریکی) ارسالی و دریافتی در قطبش‌های افقی (H) و عمودی (V) است. هر کدام از درایه‌های ماتریس پراکندگی نشانه اندازه پاسخ هدف به قطبش‌های متناظر در ارسال و دریافت می‌باشد. با ارسال و دریافت سیگنال در قطبش‌های مختلف و تشکیل تصویر، می‌توان به تخمینی از درایه‌های ماتریس پراکندگی هدف به صورت تصاویر HH، VV، HV و VH دست یافت. در محیط‌های متقارن^{۲۵}، (که بیشتر محیط‌های طبیعی چنین هستند) ماتریس پراکنش متقارن است، یعنی $S_{HV} = S_{VH}$. در نهایت برای تخصیص رنگ‌های RGB و ساخت یک تصویر رنگی از روش‌های مختلف تجزیه ماتریس پراکندگی استفاده می‌شود. در ادامه به دو روش از روش‌های

۳- مبانی نظری و روش پیشنهادی

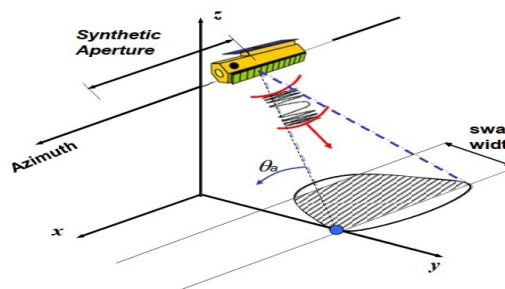
۳-۱- مبانی نظری

رادار روزنه مصنوعی از یک سکوی متحرک مانند هواپیما، ماهواره و یا خودرو برای جمع‌آوری داده‌ها استفاده می‌کند. رادار در جهت برد^{۲۰} پالس‌هایی را با فاصله زمانی ثابت ارسال و دریافت می‌کند، در حالی که سکو در جهت عمود بر برد (جهت سمت) حرکت می‌کند تا یک روزنه مصنوعی ایجاد شود [۲۲]. هندسه حرکت و تصویربرداری در SAR در شکل ۱ قابل مشاهده می‌باشد.

سه شیوه رایج تصویربرداری SAR حالت نواری^{۲۱}، نورافکنی^{۲۲} و پایش^{۲۳} می‌باشد. در حالت نواری جهت‌گیری آنتن نسبت به مسیر پرواز ثابت بوده و در نتیجه، ردپای آنتن در حین حرکت، نواری از زمین را که موازی با مسیر حرکت است، پوشش می‌دهد. در حالت نورافکنی حسگر با هدایت پرتو آنتن، به‌طور مداوم ناحیه مشخصی از زمین را روشن کرده و تصویربرداری می‌کند و در حالت پایش حسگر با هدایت پرتو آنتن، عرض نوار وسیع‌تری را نسبت به حالت نواری (البته با دقت برد کمتر) پوشش می‌دهد. شکل ۲ سه حالت رایج تصویربرداری SAR را نشان می‌دهد.

یکی از پردازش‌های اساسی در پردازش داده رادار روزنه مصنوعی، تشکیل تصویر از داده خام^{۲۴} دریافتی است که به وسیله الگوریتم‌های تشکیل تصویر صورت می‌گیرد. اساس کار این الگوریتم‌ها، فشرده‌سازی سیگنال در برد و سمت است. این فشرده‌سازی می‌تواند در حوزه زمان یا فرکانس (یا به صورت ترکیبی) صورت گیرد.

یکی از الگوریتم‌های پرکاربرد تشکیل تصویر رادار روزنه مصنوعی، الگوریتم PFA است که مرجع [۲۳] مروری بر اصول و کاربردهای این الگوریتم داشته است. این الگوریتم دقت و کارایی بالایی در بازسازی تصاویر با وضوح بالا دارد و با استفاده از درون‌یابی، داده را از مختصات قطبی به مختصات مستطیلی منتقل می‌کند. در شکل ۳ فرآیند پردازش داده‌های SAR با استفاده از الگوریتم PFA نمایش داده‌شده است.



شکل ۱- هندسه تصویربرداری رادار روزنه مصنوعی [۲۴]

تجزیه اشاره می‌شود.

تجزیه خطی: تجزیه خطی به عنوان تکنیک تجزیه پایه در نظر گرفته می‌شود و اطلاعات مربوط به پراکندگی مطابق با رابطه زیر ارائه می‌گردد [۵].

$$\overline{K}_L = \begin{pmatrix} k_1 \\ k_2 \\ k_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} S_{HH} \\ \sqrt{2} S_{HV} \\ S_{VV} \end{pmatrix} \quad (2)$$

در رابطه ۲، K_L نشان دهنده بردار تجزیه به روش خطی و k_1 پراکنش افقی-افقی، k_2 پراکنش متقاطع و k_3 پراکنش عمودی-عمودی است که برای تهیه تصویر رنگی نهایی به آنها به ترتیب رنگ های R، G و B تخصیص داده می‌شود.

تجزیه پائولی^{۲۶}: در تجزیه پائولی از ماتریس پائولی برای گسترش ماتریس پراکندگی استفاده می‌شود. نتیجه این تجزیه برداری است که شامل سه شیوه پراکندگی می‌باشد که در رابطه زیر به آن اشاره شده است:

$$\overline{K}_P = \begin{pmatrix} k_1 \\ k_2 \\ k_3 \end{pmatrix} = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} S_{VV} - S_{HH} \\ 2S_{HV} \\ S_{VV} + S_{HH} \end{pmatrix} \quad (3)$$

در فرمول ۳، K_P بردار تجزیه به روش پائولی است که ماهیت درایه‌های آن نشان‌دهنده سه نحوه پراکندگی است: پارامتر اول نشان دهنده پراکنش بازتاب دوگانه، پارامتر دوم پراکنش حجمی و پارامتر سوم پراکنش بازتاب تکی می‌باشند. این سه درایه به ترتیب رنگ‌های R، G و B را به خود اختصاص می‌دهند. خلاصه تجزیه به این دو روش و رنگ تخصیص داده شده در ساخت تصویر رنگی نهایی در جدول ۱ آورده شده است.

جدول ۱- مدل های تجزیه قطبش‌سنجی

تجزیه	مفهوم بردار هدف		
	K1	K2	K3
قطبش‌سنجی			
تجزیه خطی	جهت گیری افقی	قطبش متقاطع	جهت گیری عمودی
تجزیه پائولی	پراکنش بازتاب دوگانه	پراکنش حجمی	پراکنش بازتاب تکی
رنگ تخصیصی	R	G	B

۳-۲- روش پیشنهادی

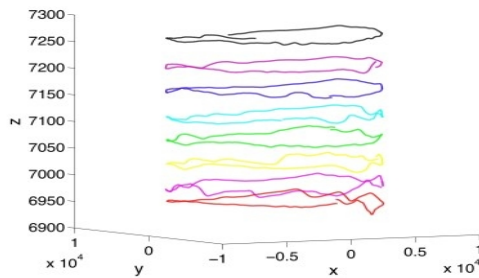
الگوریتم کامل روش پیشنهادی در این مقاله در شکل ۴ نشان داده شده است. در روش پیشنهادی، ابتدا با استفاده از داده واقعی تهیه شده در قطبش‌های مختلف HH، VH، VV و HV داده خام مورد نیاز برای تشکیل تصویر مربوط به قاب فعلی ویدئو برداشت می‌شود. همانطور که قبلاً گفته شد، چون بین داده قطبش HV و VH شباهت بسیاری وجود دارد، لذا از یکی از این دو قطبش در فرایند تشکیل تصویر استفاده می‌شود. لازم به ذکر است تعداد پالس لازم برای تشکیل یک قاب از ویدئو به حد تفکیک مورد نظر در سمت بستگی

دارد و هرچه این تعداد پالس بیشتر باشد، حد تفکیک بهتر است اما الگوریتم تشکیل تصویر PFA خطای بیشتری در انجام درون‌یابی خواهد داشت. در ادامه با کاربرد الگوریتم تشکیل تصویر PFA، سه تصویر تهیه می‌شود این تصاویر با استفاده از یکی از دو روش تجزیه مندرج در جدول ۱، سه تصویر جدید متناظر با درایه‌های بردار K می‌سازند که با تخصیص رنگ‌های قرمز، سبز و آبی به آنها، یک تصویر رنگی RGB ساخته می‌شود به طوری که در آن رنگ‌های نمایش داده شده نمایانگر نوع پراکنش برگشتی از هدف می‌باشند. به منظور بهبود کنتراست و سطح روشنایی اهداف ضعیف، از روش‌های اصلاح گاما و نیز الگوریتم CLAHE استفاده می‌شود و بدین ترتیب یک تصویر رنگی مربوط به قاب فعلی ویدئو به دست می‌آید. در نهایت با پشت سر هم قرار دادن تصاویر رنگی متوالی که از داده اسکن ۳۶۰ درجه صحنه تشکیل می‌شوند، یک ویدئوی رنگی تهیه می‌شود که با تغییر پارامترهای تشکیل دهنده ویدئو مانند میزان همپوشانی، اندازه و نرخ قاب‌ها می‌توان ویژگی‌های ویدئو نهایی را تنظیم نمود. هر قدر میزان همپوشانی بین قاب‌های ویدئو بیشتر باشد سرعت تغییرات ویدئو کند تر خواهد بود. ویدئوی نهایی نه تنها نشان‌دهنده چرخش سکوی رادار است، بلکه با تغییر رنگ اهداف در زوایای مختلف، اطلاعات هندسی و پراکنشی صحنه را نیز به صورت بصری قابل تحلیل می‌کند. از مزایای روش پیشنهادی می‌توان به استخراج اطلاعات فیزیکی و هندسی اهداف در طول زمان و از زوایای مختلف و قابلیت نمایش تغییرات جزئی در صحنه اشاره کرد. همچنین روش ارائه شده با داده‌های واقعی SAR آزمایش شده و به صورت قابل اجرا روی سیستم‌های رایانه‌ای معمولی پیاده‌سازی شده است که نشان از کاربردی بودن آن در شرایط واقعی دارد.

روش پیشنهادی ارائه‌شده در این مقاله بر چند فرض کلیدی استوار است؛ از جمله اینکه داده‌های قطبش‌سنجی SAR در قطبش‌های مختلف حاوی اطلاعات مکملی درباره نحوه پراکنش اهداف هستند و ترکیب این اطلاعات به روش‌های تجزیه‌ای (خطی یا پائولی) می‌تواند منجر به استخراج ویژگی‌های هندسی و فیزیکی قابل تفکیک شود. همچنین فرض بر این است که تغییر زاویه دید سکوی رادار در مسیر چرخشی باعث آشکارسازی ابعاد جدیدی از پاسخ پراکنشی اهداف می‌شود که در تصاویر ساکن یا تک‌زاویه‌ای قابل مشاهده نیستند. از سوی دیگر، به‌کارگیری اصلاح گاما و CLAHE باعث بهبود کیفیت بصری و نمایان شدن بهتر اهداف با شدت پراکنش ضعیف می‌گردد.

تفاوت اساسی این روش با کارهای پیشین در آن است که برخلاف پژوهش‌های گذشته که به تولید تصاویر رنگی قطبشی از یک زاویه خاص یا ویدئوهای سیاه و سفید محدود می‌شوند، در اینجا تشکیل ویدئو از تصاویر رنگی قطبشی حاصل از مسیر چرخشی حول صحنه را داریم که به آشکارسازی اطلاعات فیزیکی و پراکنشی اهداف از زوایای مختلف حین پایش و در طول زمان منجر می‌شود.

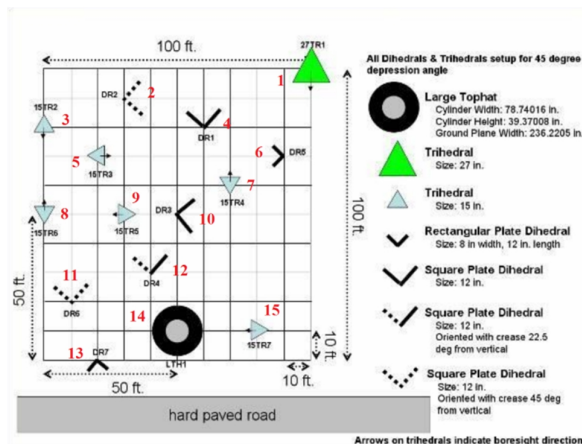
درختان و نیز و اهداف از پیش تعبیه شده‌ای مانند یک بازتاب‌دهنده کلاهک^{۲۰}، چندین بازتاب‌دهنده دو وجهی و سه وجهی است. شکل ۶ ناحیه عمومی پارکینگ و شکل ۷ اهداف تعبیه شده کالیبراسیون (بازتاب‌دهنده‌های مختلف) را نشان می‌دهد. در این شکل مکان و نوع ۱۵ هدف بازتاب‌دهنده از انواع مختلف با شماره‌های قرمز رنگ نشان داده شده است.



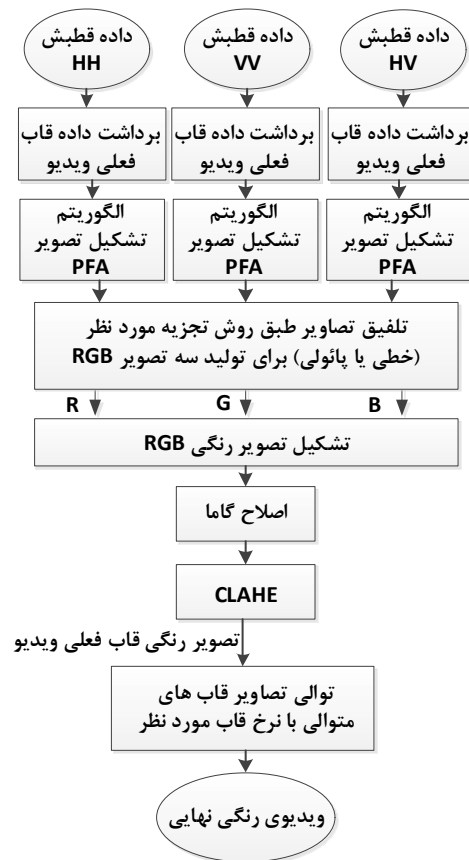
شکل ۵- گذرهای داده Gotcha به صورت واقعی (مقیاس بر حسب متر [۲۵])



شکل ۶- صحنه هدف [۲۷]



شکل ۷- بازتاب‌دهنده‌های تعبیه شده در صحنه [۲۸]



شکل ۴- الگوریتم کلی روش پیشنهادی

۴- شبیه سازی و نتایج

۴-۱- داده مورد استفاده

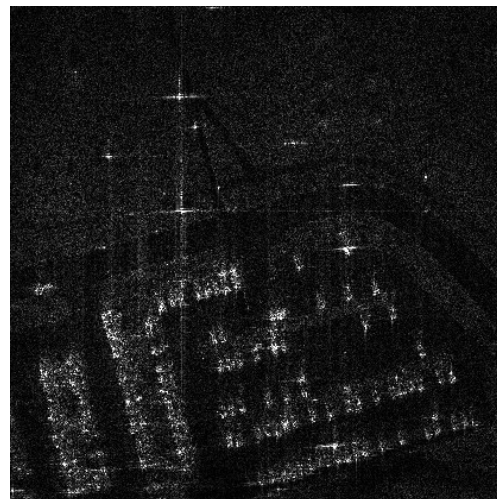
در این مطالعه به منظور استفاده از داده واقعی، از مجموعه داده‌های SAR به نام Gotcha Volumetric SAR Data Set, Version 1.0 که توسط AFIT^{۲۷} به صورت عمومی منتشر شده است، استفاده شده و تصاویری با اطلاعات چهار کانال قطبش موجود در این مجموعه داده قابل تشکیل است. این مجموعه داده توسط یک سیستم SAR کاملاً قطبشی^{۲۸} نصب شده بر روی یک سکوی هواپرد، تولید شده و دارای فرکانس شروع ۹/۲۸۸، فرکانس پایانی ۹/۹۱۰ و فرکانس مرکزی ۹/۶ گیگاهرتز با پهنای باند ۶۴۰ مگاهرتز است که دارای مدولاسیون فرکانس خطی^{۲۹} (LFM) است.

داده‌ها در هشت گذر دایره‌ای در ارتفاع‌های مختلف گرفته شده که در هر ارتفاع سکوی حامل رادار در یک مسیر ۳۶۰ درجه دایروی چرخش کرده و داده‌ها جمع‌آوری شده است. نحوه حرکت سکو و ارتفاع آن در هر گذر در شکل ۵ قابل مشاهده است.

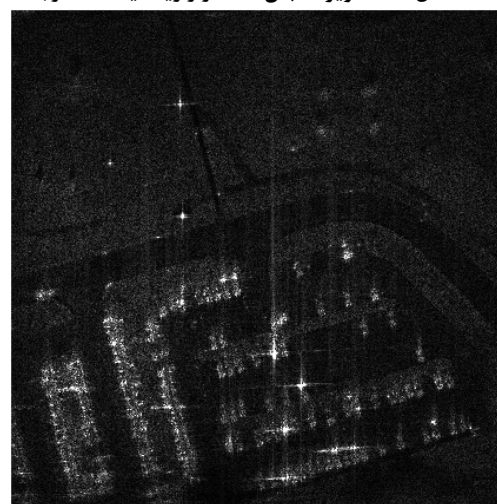
داده‌ها در قالب فایل MATLAB (matfile) بوده و هر فایل شامل سابقه فاز جمع‌آوری شده برای هر زاویه سمت هر گذر با در نظر گرفتن چهار قطبش مختلف است. منطقه هدف برای جمع‌آوری داده‌های Gotcha یک پارکینگ است که شامل مدل‌های مختلفی از خودروها،

۲-۴- تشکیل تصویر

مطابق الگوریتم شکل ۴، برای هر قاب ویدئو، تشکیل تصویر از داده‌های قطبش‌سنجی SAR برای سه قطبش HH، VV و HV انجام می‌شود. ابتدا با انتخاب داده مربوط به یک قاب و استفاده از الگوریتم تشکیل تصویر PFA برای هر قطبش یک تصویر سطح خاکستری ساخته می‌شود. به عنوان مثال در شکل‌های ۸، ۹ و ۱۰ تصاویر سه قطبش در زاویه دید ۲۵۰ درجه قابل مشاهده است. لازم به ذکر است به دلیل چرخش سکو حول صحنه حین داده‌برداری، زاویه شروع چرخش زاویه ۱ و زاویه اتمام چرخش زاویه ۳۶۰ فرض شده است. با دقت در تصاویر فوق می‌توان تفاوت‌هایی مشاهده نمود که این تفاوت‌ها به دلیل تفاوت بازتاب‌پذیری اهداف در قطبش‌های متفاوت است. با ترکیب این تصاویر و تخصیص رنگ، می‌توان این تفاوت‌ها را به صورت رنگ‌های مختلف مشاهده نمود. لذا در مرحله بعد با استفاده از روش‌های مختلف تجزیه ماتریس پراکندگی، یک بردار (روابط ۲ و ۳) نماینده سه تصویر ایجاد شده و برای ایجاد یک تصویر رنگی به هر یک رنگ‌های R، G و B تخصیص داده می‌شود.



شکل ۸- تصویر قطبش HH در زاویه دید ۲۵۰ درجه

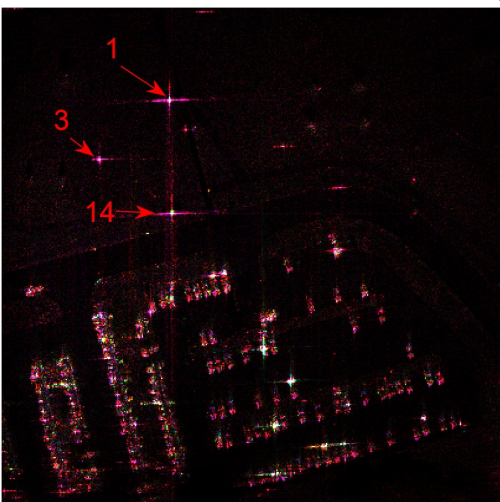


شکل ۹- تصویر قطبش HV در زاویه دید ۲۵۰ درجه



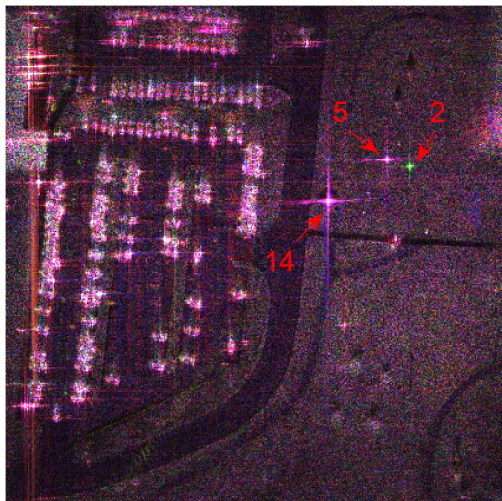
شکل ۱۰- تصویر قطبش VV در زاویه دید ۲۵۰ درجه

به عنوان نمونه در شکل ۱۱ تصویر رنگی حاصل از تجزیه خطی قبل از اصلاح گاما و الگوریتم CLAHE نشان داده شده است. رنگ‌های R، G و B در این تصویر در واقع مجذور اندازه درایه‌های بردار $\vec{K}_L$ در رابطه (۲) هستند. در شکل ۱۱ سه بازتاب‌دهنده شماره ۱، ۳ و ۱۴ در نیمه بالا و سمت چپ تصویر مشاهده می‌شود. شماره‌گذاری این اهداف بر اساس شماره بازتاب‌دهنده‌های مندرج در شکل ۷ می‌باشد. این سه هدف با رنگ ارغوانی (ترکیب آبی و قرمز) ظاهر شده‌اند و این بدان معنی است که این بازتاب‌دهنده‌ها به قطبش‌های HH و VV پاسخ قوی‌تری داده‌اند. چون جهت تابش موج از سمت پایین به بالای تصویر بوده است، سایر بازتاب‌دهنده‌ها که دهانه آنها در جهت تابش نبوده است، در تصویر ظاهر نشده یا ضعیف ظاهر شده‌اند (جهت دهانه بازتاب‌دهنده‌ها در شکل ۷ نشان داده شده است). از طرف دیگر در این شکل درختان لابلای خودروها بیشتر با رنگ سبز ظاهر شده‌اند که نشانه بازتاب بهتر شاخ و برگ درختان (کلاتر حجمی) در قطبش متقاطع HV است.



شکل ۱۱- تصویر رنگی به روش خطی در زاویه دید ۲۵۰ درجه قبل از اصلاح گاما و CLAHE

جهت مقایسه تصاویر قطبش‌سنجی در زوایای دید مختلف، تصویر رنگی حاصل از تجزیه خطی صحنه در زاویه دید شروع پایش (۱) درجه) در شکل ۱۳ نشان داده شده است. همانطور که مشخص است، با توجه به جهت تابش موج (از پایین به بالای تصویر) و جهت دهانه بازتاب‌دهنده‌ها که در شکل ۷ نشان داده شده، در شکل ۱۳ اهداف شماره ۱۴، ۵ و ۲ به صورت برجسته تری ظاهر شده‌اند. نکته جالب اینکه هدف ۲ که یک بازتاب‌دهنده دو وجهی است، در اینجا با رنگ سبز ظاهر شده است؛ یعنی در این زاویه دید بازتاب‌پذیری این هدف در قطبش متقاطع (HV) قوی‌تر بوده است.



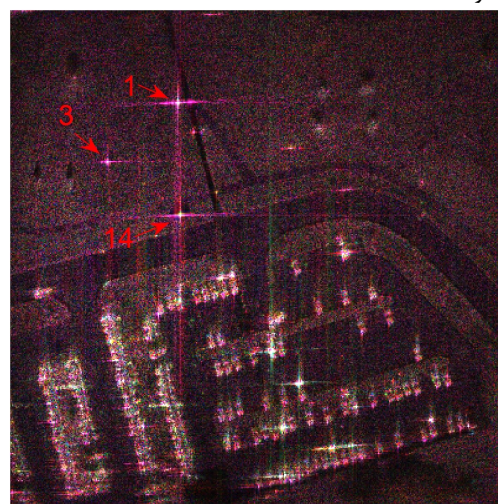
شکل ۱۳- تصویر رنگی به روش خطی در زاویه دید ۱ درجه

در ادامه به دلیل اینکه تجزیه قطبش‌سنجی به روش پائولی خصوصیات فیزیکی متفاوتی از اهداف را آشکار می‌کند، چند تصویر رنگی حاصل از این روش نیز نمایش داده می‌شود. در این روش، بردار حاصل از تجزیه ماتریس پراکنش بیان شده در رابطه ۳ ملاک تخصیص سه رنگ R، G و B قرار می‌گیرد. با توجه خصوصیات این روش تجزیه، رنگ قرمز نشان‌دهنده بازتاب دوگانه، رنگ سبز نشان‌دهنده بازتاب حجمی و رنگ آبی نشان‌دهنده بازتاب تکی است. شکل‌های ۱۴ و ۱۵ به ترتیب تصویر رنگی حاصل از تجزیه خطی و پائولی در زاویه دید یکسان (۱۲۰ درجه) را نشان می‌دهد. در این دو شکل به دلیل جهت تابش موج و زاویه دهانه بازتاب‌دهنده‌ها، اهداف شماره ۱۴، ۷، ۸ و ۴ به صورت برجسته‌تر ظاهر شده‌اند. در شکل ۱۴ اهداف شماره ۱۴، ۷ و ۸ به یک رنگ (ارغوانی) ظاهر شده‌اند و بنابراین مشخص می‌شود که قطبش‌های VV و HH پاسخ قوی‌تری داشته‌اند. اما در شکل ۱۵، اهداف شماره ۷ و ۸ تقریباً به رنگ قرمز و هدف ۱۴ به رنگ آبی ظاهر شده است. این بدان معنی است که در مورد هدف ۱۴ نحوه پراکنش از نوع بازتاب تکی و در مورد اهداف ۷ و ۸ از نوع بازتاب دوگانه بوده است. ضمناً در ناحیه بین ماشین‌ها اهداف سبز رنگ نسبتاً قوی وجود دارد که مربوط به اهدافی با پراکنش حجمی است. از مقایسه شکل‌های ۱۴ و ۱۵ می‌توان به اطلاعات جدیدی که تجزیه پائولی در اختیار می‌گذارد پی برد.

همان‌طور که در شکل ۱۱ مشخص است، به دلیل برد پویای^{۳۱} بالای تصویر SAR، اهداف ضعیف در این تصویر به خوبی مشخص نیستند. برای بهبود سطح روشنایی، از اصلاح گاما و برای بهبود کنتراست از CLAHE استفاده شده است. در شکل ۱۲ تصویر شکل ۱۱ پس از اصلاح گاما با $\gamma = 0.5$ و الگوریتم CLAHE با پارامتر $Clip Limit = 0.002$ نشان داده شده است. آنچه در تنظیم این پارامترها مد نظر بوده، بهبود کیفیت بصری تصویر بوده است. لازم به ذکر است در مراجع معیارهایی کمی برای بهبود تصاویر SAR نیز تعریف شده است [۲۹]، [۳۰]؛ اما به کارگیری این معیارها بستگی به نوع تصویر و کاربرد آن دارد و بهبود یک معیار نمی‌تواند به تنهایی ملاک عمل قرار گیرد. به عنوان مثال معیار «تعداد نمای معادل»^{۳۲} (ENL) به عنوان یک معیار پرکاربرد در بهبود کیفیت تصاویر SAR در «پردازش چند نما»^{۳۳} یا سایر پردازش‌هایی که به منظور کاهش نویز لکه‌ای و بهبود تصویر استفاده می‌شوند، کاربرد دارد. این معیار به صورت زیر تعریف می‌شود:

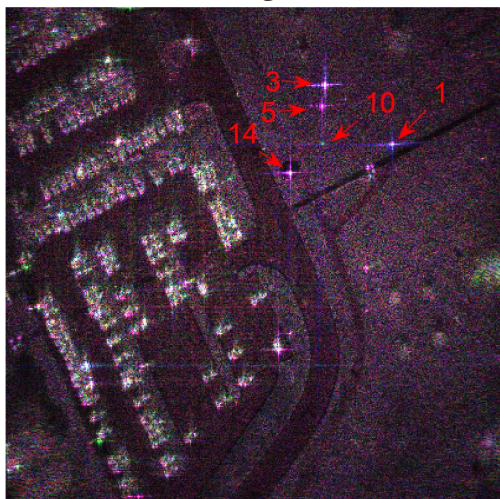
$$ENL = \frac{\mu^2}{\sigma^2} \quad (۴)$$

که μ و σ^2 به ترتیب مقدار میانگین و واریانس مقدار شدت تصویر^{۳۴} می‌باشند. نکته جالب این است که معیار ENL در واقع مجذور معیار «نسبت میانگین به انحراف استاندارد»^{۳۵} (MSR) است که به عنوان یک معیار بهبود تصویر به کار برده شده است [۳۱] و با توجه به ماهیت آن، معیار مناسبی برای کاهش برد پویای تصویر و دیده شدن اهداف ضعیف می‌باشد، زیرا با کاهش برد پویا و یکنواختی بیشتر شدت پیکسل‌ها، مقدار واریانس کاهش و در نتیجه مقدار MSR افزایش می‌یابد. لازم به ذکر است که معیار ENL برای شکل ۱۱ برابر با 3.52×10^{-4} و پس از اصلاحات پیشنهادی در شکل ۱۲ برابر با ۲.۵۶ شده است که نشان از افزایش این معیار به اندازه ۳۸dB دارد. در جدول ۲ مقدار شاخص‌های ENL و MSR قبل و بعد از اصلاحات پیشنهادی در این مقاله برای تصاویر ۱۲ تا ۱۶ ذکر شده است. ضمناً از این پس تصاویر رنگی پس از انجام اصلاحات (اصلاح گاما و CLAHE) نمایش داده می‌شوند.

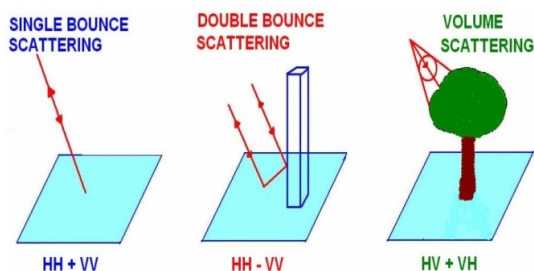


شکل ۱۲- تصویر رنگی به روش خطی در زاویه دید ۲۵۰ درجه

مانند سطوح هموار می‌باشد. نحوه کلاس بندی اهداف در روش تجزیه پائولی در شکل ۱۷ قابل مشاهده می‌باشد.



شکل ۱۶- تصویر رنگی به روش پائولی در زاویه دید ۳۳۰ درجه



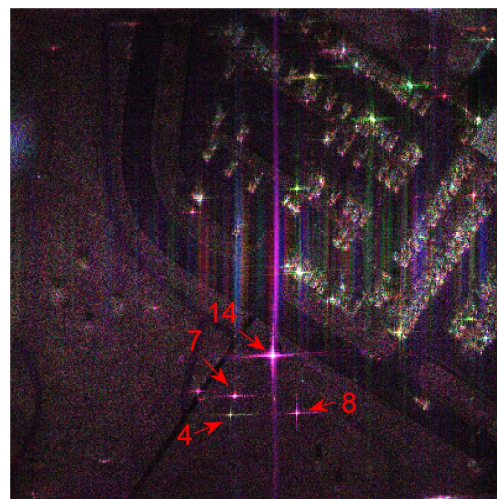
شکل ۱۷- نحوه طبقه‌بندی اهداف در تجزیه قطبش‌سنجی پائولی

جدول ۲- معیارهای ENL و MSR قبل و بعد از اصلاحات تصویر

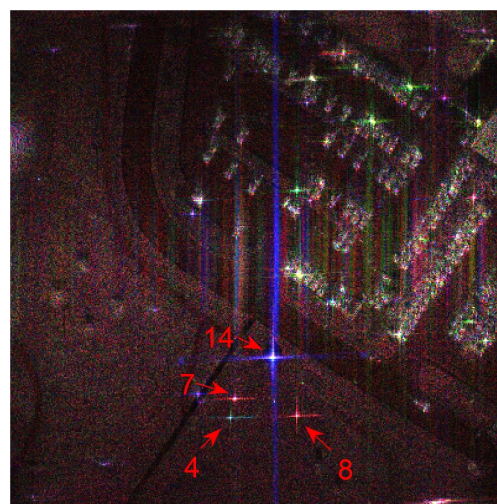
شماره شکل	معیار قبل از اصلاح		معیار بعد از اصلاح	
	ENL (dB)	افزایش	MSR	ENL
۱۲	38.6 dB	1.60	2.56	1.88×10^{-2}
۱۳	34.7 dB	1.61	2.59	2.97×10^{-2}
۱۴	36.5 dB	1.57	2.45	2.33×10^{-2}
۱۵	36.6 dB	1.58	2.50	2.33×10^{-2}
۱۶	27.7 dB	1.68	2.82	6.95×10^{-2}

۴-۳- تشکیل ویدیو با استفاده از تصاویر قطبش‌سنجی

در این مقاله برای پایش پویا و پیوسته یک صحنه با استفاده از تصاویر رنگی قطبش‌سنجی، از ایده ویدیوی رنگی استفاده شده است. با تبدیل تصاویر متوالی SAR به ویدیو، امکان مشاهده تغییرات زمانی و مکانی در صحنه فراهم می‌گردد. ویدیوهای پویا با نمایش صحنه از زوایای مختلف، اطلاعات بیشتری در مورد خواص انعکاسی و پراکنشی سطوح و اجسام را در اختیار بیننده می‌گذارند.

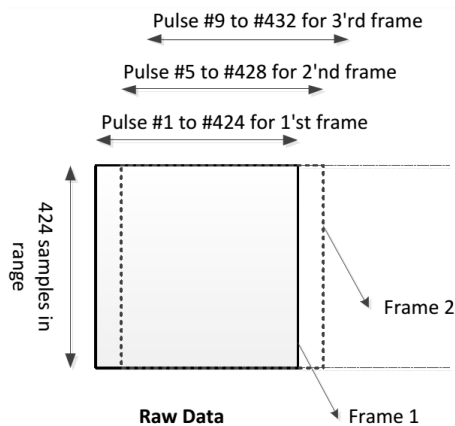


شکل ۱۴- تصویر رنگی به روش خطی در زاویه دید ۱۲۰ درجه

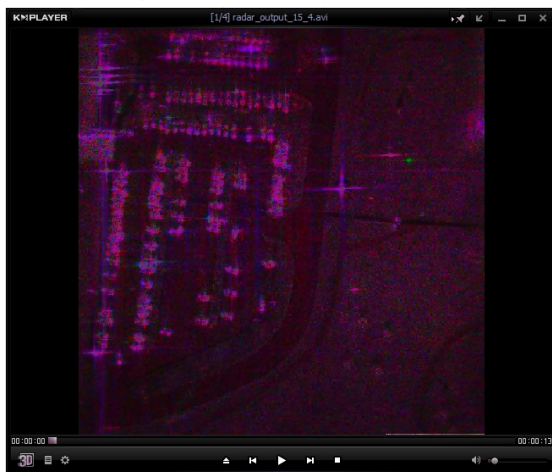


شکل ۱۵- تصویر رنگی به روش پائولی در زاویه دید ۱۲۰ درجه

در ادامه تصویر رنگی حاصل از تجزیه پائولی در زاویه دید ۳۳۰ درجه در شکل ۱۶ نشان داده شده است. در این شکل اهداف شماره ۱، ۳، ۵، ۱۰ و ۱۴ به صورت آشکارتری ظاهر شده‌اند. با مقایسه رنگ ارغوانی هدف شماره ۱۴ در این شکل با رنگ آبی آن در شکل شماره ۱۵ مشخص است که نحوه پراکنش با تغییر زاویه دید رادار، تغییر کرده است. این تغییر می‌تواند نمایانگر تغییر خواص پراکنشی یا جهت‌گیری اهداف در زوایای دید گوناگون باشد که با پایش این تغییرات رنگ در زوایای دید گوناگون به صورت پیوسته می‌توان به برخی ویژگی‌های فیزیکی اشیاء پی برد که در تصاویر اپتیکی یا SAR سیاه و سفید قابل دستیابی نیست. ضمناً همانطور که در تصاویر فوق مشاهده می‌شود امکان طبقه‌بندی بین اهداف موجود در صحنه با استفاده از این روش وجود دارد به گونه‌ای که رنگ قرمز مربوط به اهداف با پراکنش بازتاب دوگانه مانند دیواره ساختمان و ماشین‌ها، رنگ سبز مربوط به اهداف با پراکنش حجمی مانند شاخ و برگ درختان و چمن‌ها و رنگ آبی مربوط به اهداف با پراکنش بازتاب تکی



شکل ۱۸- نحوه تشکیل قاب های متوالی ویدئو



شکل ۱۹- تصویری از ویدیوی نهایی

۶- نتیجه گیری

در این مقاله روشی برای تشکیل تصویر و ویدئوی رنگی با استفاده از داده رادار روزنه مصنوعی قطبش‌سنجی ارائه شد. در روش پیشنهادی ابتدا با استفاده از داده واقعی یک رادار روزنه مصنوعی در چهار قطبش مختلف و اعمال الگوریتم تشکیل تصویر PFA، سه تصویر تک رنگ تهیه گردید. سپس این تصاویر با دو روش تجزیه ماتریس پراکندگی تخصیص رنگ داده شد و پس از تنظیم سطح روشنایی و کنتراست با یکدیگر ترکیب شده و یک تصویر رنگی RGB ایجاد شد. هر رنگ در این تصویر نشانه نوع پراکنش خاصی است که نشان‌دهنده ویژگی‌های فیزیکی و هندسی خاص آن هدف می‌باشد. سپس برای پایش مداوم و پویای سطح زمین، با استفاده از تصاویر متوالی رنگی تولید شده، ویدئوی رنگی تولید شد که می‌تواند آشکارکننده تغییرات پراکنشی اهداف ناشی از تغییر مداوم زاویه دید باشد. با تنظیم میزان همپوشانی بین قاب‌های مختلف و تعداد قاب در ثانیه می‌توان آهنگ پایش صحنه را کنترل نمود. تشکیل تصویر و ویدئوی رنگی با استفاده از داده واقعی نشان داد این روش می‌تواند به عنوان یک روش کارا در پایش مداوم و پویای سطح زمین جهت کاربردهای مختلف از جمله تفکیک نواحی در اراضی کشاورزی، شهری، جنگل‌ها و مراتع و ... به کار رود.

برای تشکیل ویدئو، باید تصاویر رنگی حاصل از مرحله قبل، به صورت قاب های متوالی ویدئو قرار داده شوند. از آنجا که هر درجه اسکن سکوی حامل رادار شامل ۱۱۷ پالس و هر پالس دارای ۴۲۴ نمونه می باشد، لذا با انتخاب ۴۲۴ پالس متوالی و تشکیل تصویر، می‌توان یک قاب تصویر مربعی با ابعاد 424×424 داشت. لازم به ذکر است که این ۴۲۴ پالس هنگام حرکت سکو به میزان $3/62$ درجه حول صحنه ارسال و دریافت شده‌اند. برای تشکیل قاب بعدی ویدئو، ۴۲۴ پالس دیگر انتخاب می‌شود. از آنجا که ایجاد پیوستگی در قاب‌های ویدئو یک پارامتر مهم است، لذا تعداد زیادی از پالس‌های استفاده شده برای تشکیل تصویر مربوط به دو قاب متوالی ویدئو باید همپوشانی داشته باشند. در اینجا میزان پیشروی بین دو قاب متوالی ۴ پالس در نظر گرفته شده است. یعنی از ۴۲۴ پالس مربوط به قاب بعدی، ۴۲۰ پالس با قاب قبلی همپوشانی دارند. هر چه میزان همپوشانی بیشتر باشد، پیوستگی تصاویر در ویدیوی نهایی بیشتر و در عوض حجم آن (تعداد قاب) نیز بیشتر خواهد بود. شکل ۱۸ نحوه انتخاب پالس‌ها برای تشکیل قاب‌های ویدئو را نشان می‌دهد. نرخ قاب در ویدئو نهایی ۲۴ قاب در ثانیه انتخاب شده است، لذا در هر ثانیه از ویدئو به اندازه ۹۶ پالس جلو می‌رویم که معادل مشاهده $0/82$ درجه چرخش حول صحنه است. در نهایت در یک ویدیوی ۲۰ ثانیه ای تهیه شده از صحنه، چرخش سکو به اندازه حدود ۱۶ درجه حول صحنه مشاهده می‌شود. در شکل ۱۹ تصویری از ویدیوی نهایی که تصویر رنگی قاب‌های آن به روش تجزیه پائولی تهیه شده است، قابل مشاهده می‌باشد. در این ویدئو چرخش سکو حول صحنه مورد تصویربرداری قابل مشاهده است و ضمناً رنگ اشیای مختلف و نیز تغییر آن در زوایای مختلف نشان دهنده نوع پراکنش بازگشتی از هدف و گویای اطلاعاتی از هندسه و کیفیت پراکنده سازهای حاضر در صحنه می‌باشد.

۵- مشخصات سیستم و زمان اجرا

برای ارزیابی عملکرد الگوریتم پیشنهادی و تولید نتایج، کد MATLAB بر روی یک سیستم با پردازنده Intel Core i7-6500U و حافظه رم ۱۶ گیگابایت اجرا شده است. زمان اجرای کل فرآیند، برای تشکیل یک ویدئوی ۲۰ ثانیه ای از خواندن داده‌های خام مربوط به چهار قطبش تا تولید ویدیوهای نهایی، حدود ۵۱۰ ثانیه به طول انجامید. این زمان شامل خواندن داده از چهار کانال، پیش‌پردازش داده‌ها، تشکیل تصاویر SAR برای هر قطبش، ترکیب کانال‌های قطبش برای تولید تصاویر رنگی، و در نهایت ساخت ویدیو از توالی قاب‌ها است. این زمان اجرا نشان دهنده این است که با یک سیستم پردازشی مناسب به راحتی می‌توان یک سامانه پردازشی زمان واقعی^{۳۴} داشت که قادر است در یک سامانه SAR واقعی حین اسکن سکو، ویدیوی خروجی را به صورت زمان واقعی در اختیار کاربر قرار دهد.

۷- مراجع

- [16] X. Huang, Z. Xu, and J. Ding, "Video SAR image despeckling by unsupervised learning," *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 59, no. 12, pp. 10151-10160, 2020.
- [17] S. Wang, G. Wang, Y. Wang, R. Zhou, M. Zhao, and Y. Wang, "An Integrated Inter-Frame Stabilization and Fast Imaging Method for Video Synthetic Aperture Radar," *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2025.
- [18] C. López-Martínez and E. Pottier, "Basic principles of SAR polarimetry," in *Polarimetric synthetic aperture radar: Principles and application*, ed: Springer, 2021, pp. 1-58.
- [19] M. E. Arriagada, "Performance of Scattering Matrix Decomposition and Color Spaces for Synthetic Aperture Radar Imagery," 2010.
- [20] K. Karachristos and V. Anastassopoulos, "Automatic Ship Detection Using PolSAR Imagery and the Double Scatterer Model," *Geomatics*, vol. 3, no. 1, pp. 174-187, 2023.
- [21] D. Zhuang, L. Zhang, and B. Zou, "Model-based polarimetric sar target decomposition: A scheme to introduce repeat-pass polinsar coherence," *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 62, pp. 1-16, 2024.
- [22] L. Nguyen and J. Sichina, "SAR image formation using phase-history data from nonuniform aperture," in *Radar Sensor Technology XI*, 2007, vol. 6547: SPIE, pp. 141-150.
- [23] A. W. Doerry, "Basics of Polar-Format algorithm for processing Synthetic Aperture Radar images," Sandia National Laboratories (SNL), Albuquerque, NM, and Livermore, CA ..., 2012.
- [24] A. Moreira, "Synthetic aperture radar (SAR): Principles and applications," ed, 2013.
- [25] I. G. Cumming and F. H. Wong, "Digital processing of synthetic aperture radar data," *Artech house*, vol. 1, no. 3, pp. 108-110, 2005.
- [26] C. D. Austin, E. Ertin, and R. L. Moses, "Sparse multipass 3D SAR imaging: Applications to the GOTCHA data set," in *Algorithms for Synthetic Aperture Radar Imagery XVI*, 2009, vol. 7337: SPIE, pp. 19-30.
- [27] M. E. Arriagada, "Performance of Scattering Matrix Decomposition and Color Spaces for Synthetic Aperture Radar Imagery," 2010.
- [28] C. H. Casteel Jr, L. A. Gorham, M. J. Minardi, S. M. Scarborough, K. D. Naidu, and U. K. Majumder, "A challenge problem for 2D/3D imaging of targets from a volumetric data set in an urban environment," in *Algorithms for Synthetic Aperture Radar Imagery XIV*, 2007, pp. 97-103.
- [29] F. Guo, C. Sun, N. Sun, X. Ma, and W. Liu, "Integrated quantitative evaluation method of SAR filters," *Remote Sensing*, vol. 15, p. 1409, 2023.
- [30] R. K. Painam and S. Manikandan, "A comprehensive review of SAR image filtering techniques: systematic survey and future directions," *Arabian Journal of Geosciences*, vol. 14, p. 37, 2021.
- [31] A. Abbasi, A. Monadjemi, L. Fang, and H. Rabbani, "Optical coherence tomography retinal image reconstruction via nonlocal weighted sparse representation," *Journal of biomedical optics*, vol. 23, pp. 036011-036011, 2018.
- [1] C. A. Wiley, "Synthetic aperture radars," *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, no. 3, pp. 440-443, 1985.
- [2] W.-M. Boerner, "Basics of sar polarimetry i," *Radar Polarimetry and Interferometry. Educational Notes RTO-EN-SET-081bis, Paper*, vol. 3, pp. 3-40, 2007.
- [3] H. Lin, H. Wang, F. Xu, and Y.-Q. Jin, "Target recognition for SAR images enhanced by polarimetric information," *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 62, pp. 1-16, 2024.
- [4] T. Fromenteze, O. Yurduseven, M. Boyarsky, J. Gollub, D. L. Marks, and D. R. Smith, "Computational polarimetric microwave imaging," *Optics express*, vol. 25, no. 22, pp. 27488-27505, 2017.
- [5] H. B. Wallace, "Development of a video SAR for FMV through clouds," in *Open Architecture/Open Business Model Net-Centric Systems and Defense Transformation 2015*, 2015, vol. 9479: SPIE, pp. 64-65.
- [6] Sharma, Richa, and Amit Kamra. "A review on CLAHE based enhancement techniques." *2023 6th International Conference on Contemporary Computing and Informatics (IC3I)*. Vol. 6. IEEE, 2023.
- [7] H. Cruz, M. Véstias, J. Monteiro, H. Neto, and R. P. Duarte, "A review of synthetic-aperture radar image formation algorithms and implementations: A computational perspective," *Remote Sensing*, vol. 14, p. 1258, 2022.
- [8] A. Javali, J. Gupta, and A. Sahoo, "A review on synthetic aperture radar for earth remote sensing: Challenges and opportunities," in *2021 Second international conference on electronics and sustainable communication systems (ICESC)*, 2021, pp. 596-601.
- [9] A. Tsokas, M. Rysz, P. M. Pardalos, and K. Dipple, "SAR data applications in earth observation: An overview," *Expert Systems with Applications*, vol. 205, p. 117342, 2022.
- [10] X. Chen, Z. Dong, Z. Zhang, C. Tu, T. Yi, and Z. He, "Very high resolution synthetic aperture radar systems and imaging: A review," *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, vol. 17, pp. 7104-7123, 2024.
- [11] Z. Huang, X. Zhang, Z. Tang, F. Xu, M. Datcu, and J. Han, "Generative artificial intelligence meets synthetic aperture radar: A survey," *IEEE Geoscience and Remote Sensing Magazine*, 2024.
- [12] J. Liang and L. An, "Spaceborne Video Synthetic Aperture Radar (SAR): A New Microwave Remote Sensing Mode," in *Intelligent Video Surveillance-New Perspectives*: IntechOpen, 2022.
- [13] F. Zuo, R. Min, Y. Pi, J. Li, and R. Hu, "Improved method of video synthetic aperture radar imaging algorithm," *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, vol. 16, no. 6, pp. 897-901, 2018.
- [14] W. Pu, X. Wang, J. Wu, Y. Huang, and J. Yang, "Video SAR imaging based on low-rank tensor recovery," *IEEE transactions on neural networks and learning systems*, vol. 32, no. 1, pp. 188-202, 2020.
- [15] Y. Cheng, J. Ding, Z. Sun, and C. Zhong, "Processing of airborne video SAR data using the modified back projection algorithm," *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 60, pp. 1-13, 2022.

زیرنویس‌ها

- ¹ Synthetic Aperture Radar
- ² Microwave
- ³ Azimuth
- ⁴ Radar Interferometry
- ⁵ polarization
- ⁶ Scattering
- ⁷ Radar Polarimetry
- ⁸ Frame rate
- ⁹ Gray Level
- ¹⁰ Polar-Format Algorithm
- ¹¹ Contrast
- ¹² Gamma Correction
- ¹³ Contrast Limited Adaptive Histogram Equalization
- ¹⁴ Speckle Noise
- ¹⁵ Defense Advanced Research Projects Agency
- ¹⁶ Subaperture Complex-Weighted Fast BackProjection
- ¹⁷ Double-Bounce Scattering
- ¹⁸ Single-Bounce Scattering
- ¹⁹ Polarimetric Interferometric Synthetic Aperture Radar
- ²⁰ Range
- ²¹ Stripmap
- ²² spotlight
- ²³ Scan
- ²⁴ Raw Data
- ²⁵ Reciprocal Medium
- ²⁶ Pauli Decomposition
- ²⁷ Air Force Institute of Technology
- ²⁸ Fully Polarimetric
- ²⁹ Linear Frequency Modulation
- ³⁰ Top hat
- ³¹ Dynamic Range
- ³² Equivalent Number of Looks
- ³³ Multi-Look Processing
- ³⁴ Image Intensity
- ³⁵ Mean to Standard deviation Ratio
- ³⁶ Real-time