

بهبود شناسایی پراکنش‌کننده‌های دائمی با استفاده از قابلیت داده‌های پلاریمتری

تینا نیک‌آئین^۱، حسین عارفی^{۲*}، وحید اکبری^۳

^۱ دانشجوی کارشناسی ارشد سنجش‌ازدور - دانشکده مهندسی نقشه‌برداری و اطلاعات مکانی - پردیس دانشکده‌های
فنی - دانشگاه تهران
tina_nikaein@ut.ac.ir

^۲ استادیار دانشکده مهندسی نقشه‌برداری و اطلاعات مکانی - پردیس دانشکده‌های فنی - دانشگاه تهران
hossein.arefi@ut.ac.ir

^۳ پژوهشگر ارشد - دپارتمان فیزیک و تکنولوژی - دانشگاه ترومسو - نروژ
va2akbari@gmail.com

(تاریخ دریافت دی ۱۳۹۶، تاریخ تصویب مهر ۱۳۹۷)

چکیده

در دهه‌های اخیر، به منظور تخمین جابجایی سطح زمین با دقت بالا، تکنیک‌های تداخل‌سنجی راداری تفاضلی به‌کار گرفته شده‌اند. در این مقاله روشی برای افزایش تعداد پراکنش‌کننده‌های دائمی ارائه شده است، این پیکسل‌ها با استفاده از استخراج اطلاعات پلاریمتری برای پردازش در تداخل‌سنجی تفاضلی پیشرفته انتخاب می‌شوند. هدف از این تحقیق ارائه الگوریتمی برای ارزیابی سهم داده‌های پلاریمتری در بهبود شناسایی پراکنش‌کننده‌های دائمی است. این الگوریتم برای دو نوع معیار انتخاب مختلف فرمول‌بندی شده است: میانگین کوهرنسی بر روی پشته‌ای از تداخل‌نگارها و شاخص پراکندگی دامنه روی پشته‌ای از تصاویر راداری با درجه مصنوعی. به‌منظور بهینه‌سازی هر دو معیار از روش‌های مختلفی استفاده شده است و نتایج کلیه روش‌ها مورد مقایسه و ارزیابی قرار گرفته‌اند. نتایج تجربی استفاده از تصاویر هر چهار کانال پلاریمتری UAVSAR بر روی یک منطقه شهری در ایالت کالیفرنیا بهبود مورد انتظار را نشان داده است. مقایسه تعداد پراکنش‌کننده‌های دائمی به کمک اطلاعات هر چهار کانال با انتخاب پراکنش‌کننده‌های دائمی با استفاده از کانال‌های متداول نیز بهبود قابل توجهی را در هر دو معیار انتخاب (کوهرنس مینا و دامنه مینا) نشان می‌دهد. زمانی که از معیار میانگین کوهرنسی برای انتخاب پراکنش‌کننده‌های دائمی استفاده می‌شود، تعداد پیکسل‌های دائمی انتخاب شده برای یک حد آستانه دلخواه، ۶۳ درصد از تعداد بدست آمده با داده تک کانال HH بیشتر است و زمانی که شاخص پراکندگی دامنه مورد استفاده قرار می‌گیرد، افزایشی در حدود ۶ برابر ایجاد می‌گردد. در واقع بهبود تعداد و تراکم پراکنش‌کننده‌های دائمی باعث ایجاد نقشه‌های جابجایی با دقت بالاتر و متراکم‌تر می‌شود. نتایج حاصل از تحقیق نشان دهنده این است که استفاده از داده‌های پلاریمتری باعث افزایش تعداد پراکنش‌کننده‌های دائمی در مناطق مختلف می‌شود که این امر برای پردازش در مناطقی که بدلیل عدم همبستگی مکانی-زمانی دچار مشکل هستند، بسیار حائز اهمیت است.

واژگان کلیدی: پلاریمتری، تداخل‌سنجی رادار درجه مصنوعی، پراکنش‌کننده دائمی، شاخص دامنه، میانگین کوهرنس، UAVSAR

* نویسنده رابط

DInSAR مناسب نیستند [۱۵]. تعداد پیکسل‌های قابل اعتماد در منطقه مطالعاتی و کیفیت فاز آنها عوامل مهمی هستند که کارایی تکنیک‌های DInSAR را محدود می‌کنند. به منظور جلوگیری از اثرات عدم همبستگی و محدودیت‌های دیگر در پردازش DInSAR باید در ابتدا پیکسل‌های قابل اعتماد برای استفاده در روش DInSAR شناسایی و انتخاب شوند [۱۶]. بدین منظور برای آنالیز تغییرات در الگوی تغییر شکل سطح زمین در مکان و زمان نیاز است که آنالیزهای سری زمانی رادار دریاچه مصنوعی مانند: طول خط مبنای کوتاه^۸ و تداخل‌سنجی پراکنش کننده دائمی^۹ اعمال گردند. این روش‌ها با شناسایی و پردازش پیکسل‌هایی که اثر عدم همبستگی روی آنها قابل چشم‌پوشی است، به افزایش توانایی‌های تکنیک DInSAR کمک می‌کنند. [۱۷-۱۹]. هدف اصلی این تکنیک‌ها این است که پیکسل‌هایی را شناسایی کنند که اثر نویز اینترفرومتریک روی آنها کم بوده و در طول زمان به صورت پایدار باقی بمانند [۱۷، ۲۰، ۲۱]. این تکنیک‌های پیشرفته به منظور آنکه در رفع محدودیت‌های مختلف و منابع خطا در پردازش سری زمانی InSAR موثرتر عمل کنند به صورت مداوم توسعه داده می‌شوند [۲۲، ۲۳].

روش PSI حالت توسعه‌یافته‌ای از روش DInSAR متداول است و پیکسل‌هایی را که در کل دوره زمانی بدست آوردن داده SAR پایدار و ثابت باقی می‌مانند، انتخاب می‌کند. این پیکسل‌ها تحت عنوان پراکنش-کننده‌های دائمی یا پایا^{۱۰} مطرح می‌شوند [۱۷، ۱۸]. دو معیار برای تخمین پایداری فاز پیکسل‌ها یا به عبارت دیگر کیفیت فاز پیکسل‌ها در این روش وجود دارد: پایداری کوهرنس^{۱۱} [۲۴، ۲۵] و پراکنندگی دامنه [۲۶]. معیار اول همگنی مکانی^{۱۲} از فرایند پراکنشی را در نظر می‌گیرد و دقت فاز تداخل‌سنجی را از طریق تخمینگر کوهرنس ارزیابی می‌کند. تخمینگر کوهرنس بر روی هر جفت اینترفرومتریک از داده‌ها محاسبه می‌شود. در معیار دوم، کیفیت اطلاعات فاز در کل پشته^{۱۳} تصاویر به شاخص

رادارهای با روزه ترکیبی^۱ سنجنده‌های قدرتمندی برای بدست آوردن تصاویر با توان تفکیک بالا از منطقه مطالعاتی در فرکانس‌های مایکروویو هستند [۱]. تصاویر SAR مکمل تصاویر مرئی هستند و دارای این مزیت هستند که می‌توانند در هر شرایط آب و هوایی و در زمان شب نیز اندازه‌گیری انجام دهند. هم‌چنین امواج مایکروویو می‌توانند در بعضی از کلاس‌های عوارض نفوذ کنند و از این رو اطلاعاتی درباره ساختار داخلی عارضه فراهم سازند [۲]. با توجه به دلایل مطرح شده تصاویر SAR به صورت گسترده و وسیعی برای شناسایی و تشخیص عارضه ثابت^۲، بررسی تغییر عارضه^۳ و بازیابی پارامترهای بیوفیزیکی (به خصوص مربوط به پوشش گیاهی) بکار گرفته می‌شود. در نهایت، با استفاده از سری زمانی تصاویر پلاریزتری چندکاناله در شرایط پرواز تقریباً یکسان تعداد مشاهدات را افزایش داده و باعث توسعه روش‌های کارآمدتر می‌گردد [۳-۵].

جابجایی سطح زمین اغلب بدلیل زمین‌لغزش، فرونشست، زلزله و غیره رخ می‌دهد که این جابجایی را می‌توان با استفاده از تکنیک‌های تداخل‌سنجی راداری تفاضلی^۴ با دقت و توان تفکیک مکانی بالا در حد دقت میلی‌متری اندازه‌گیری کرد [۶، ۷]. روش‌های DInSAR از اطلاعات فاز تداخل‌نگارها^۵ استفاده می‌کنند. تداخل‌نگارها با استفاده از دو تصویر SAR که در دو زمان متفاوت بدست آمده‌اند تشکیل می‌شوند. بدین ترتیب نرخ جابجایی سطح زمین در راستای خط دید ماهواره^۶ اندازه‌گیری می‌شود و نقشه حرکت سطح زمین بدست می‌آید. در موارد مختلفی از DInSAR برای بررسی فعالیت آتشفشانی [۸، ۹]، پایش زمین لرزه و جابجایی تکتونیکی [۱۰، ۱۱]، پایش فرونشست مناطق [۱۲] و شناسایی تغییرات زمینی [۱۳]، استفاده شده است.

عدم همبستگی‌های مکانی-زمانی^۷ در تداخل‌نگارها، روی کیفیت فاز پیکسل‌ها و نتایج جابجایی زمین اثر می‌گذارد، بنابراین همه پیکسل‌های موجود برای پردازش

^۸ Small Baseline Subset (SBAS)

^۹ Persistent Scatterers Interferometry (PSI)

^{۱۰} Permanent/Persistent Scatterers (PS)

^{۱۱} Coherence

^{۱۲} Spatial homogeneity

^{۱۳} Stack

^۱ Synthetic Aperture Radar (SAR)

^۲ Stationary target detection

^۳ Target change detection

^۴ Differential Interferometry SAR (DInSAR)

^۵ Interferogram

^۶ Line-Of-Sight (LOS)

^۷ Spatiotemporal decorrelation

سنجنده‌های ماهواره‌ای و هوابرد با قابلیت پلاریمتری (مانند TerraSAR-X, ALOS-PALSAR, RADARSAT-2 و UAVSAR) امکان داشتن تصاویر SAR با بیشتر از یک کانال را فراهم کرده‌اند (دو و یا چهار کانال). در مطالعات قبلی روش‌های بهبود پلاریمتریک بررسی شده و توانایی آنها در افزایش تعداد PS ها مورد ارزیابی قرار گرفته است. همچنین بهبود عملکرد PSI در تهیه نقشه جابجایی سطح زمین بوسیله اطلاعات پلاریمتری نشان داده شده است.

تکنیک PSI که ابتدا توسط فرتی^۴ و همکاران ارائه شد برای غلبه بر عدم همبستگی‌های مکانی-زمانی فاز تداخل سنجی، از آنالیز سری زمانی تداخل‌نگارهای تک‌پایه^۵ استفاده می‌کند [۱۷، ۲۰]. این تکنیک، ADI را بعنوان شاخصی از پایداری فاز برای شناسایی پیکسل‌هایی که ویژگی‌های پراکنشی آنها بین تصاویر SAR بدست آمده با فاصله زمانی طولانی و زوایای دید مختلف کوهرنت هستند، پراکنش‌کننده دائمی، استفاده می‌کند. از آنجا که تمام تداخل‌نگارها با یک تصویر پایه مشترک تولید می‌شوند، PS ها محدود به پیکسل‌هایی می‌شوند که کوهرنس بالایی را نشان می‌دهند.

تکنیک PS جدیدی در سال ۲۰۰۴ توسط هوپر و همکاران پیشنهاد شد که هر دو معیار فاز و دامنه برای تعیین پایداری PS ها را بررسی می‌کند. در این تکنیک ابتدا یک مجموعه اولیه از پیکسل‌های کاندید بر مبنای آنالیز دامنه انتخاب شده و سپس در یک روند تکراری، احتمال PS بودن با استفاده از آنالیز فاز تصحیح می‌گردد. این روش برای شناسایی پیکسل‌های PS کم دامنه در زمین‌های طبیعی، مناسب‌تر است [۲۱].

همچنین در سال ۲۰۱۰ ناوارو سانچز و همکاران یک چهارچوب کلی برای استفاده از اطلاعات پلاریمتری موجود برای افزایش تعداد پیکسل‌های دائمی کاندید ارائه کردند. این روش شامل یک جستجو در فضای پلاریمتری موجود برای بهبود پارامترهای بکار گرفته شده در انتخاب پیکسل‌های دائمی است و نیز می‌تواند روی هر معیار انتخاب شناخته شده‌ای اعمال گردد، که آنها در تحقیق خود این روش را با استفاده از ۱۲ داده‌ی دوکاناله TerraSAR-X از منطقه بارسولونا بر روی دو معیار متداول

پراکنندگی دامنه وابسته است. کوهرنس تداخل‌سنجی بالاتر یا پراکنندگی دامنه کمتر بیان‌گر کیفیت فاز بهتر است و کیفیت فاز بهتر منجر به تولید نقشه‌های جابجایی قابل اعتمادتر می‌گردد [۱۶].

روش PSI با توجه به پوشش وسیع‌تر و هزینه کم‌تر آن در مقایسه با روش‌های سنتی که مبتنی بر استقرار دستگاه در محل هستند (مانند شبکه‌های سنجنده GPS)، یک ابزار قدرتمند برای بازیابی دقیق نقشه‌های جابجایی سطح زمین است. تکنیک‌های PSI پشته‌ای از تداخل‌نگار-های تفاضلی ساخته شده از یک مجموعه تصاویر SAR را آنالیز می‌کنند که عموماً این تصاویر با سنجنده‌های ماهواره‌ای که در ساختار تک‌کاناله هستند، بدست می‌آیند [۱۷، ۲۰، ۲۵، ۲۷، ۲۸].

کیفیت و تراکم پراکنش‌کننده‌های دائمی و پیکسل-های کوهرنت انتخاب شده در منطقه مطالعاتی عامل تعیین‌کننده‌ای برای دقت خروجی سیستم است، زیرا تنها این پیکسل‌ها برای بدست آوردن نرخ جابجایی، پردازش و تجزیه تحلیل خواهند شد.

کیفیت یک تداخل‌نگار از طریق کوهرنس آن توصیف می‌شود، که بزرگی ضریب همبستگی متقابل^۱ محاسبه شده برای یک جفت تصویر پایه-پیرو^۲ است. بعضی از عوامل از جمله: پوشش زمین، طول موج، خط مبنای عمودی و زاویه میل^۳ روی مقدار کوهرنس تاثیر می‌گذارند. در مناطق با پوشش گیاهی متراکم، کوهرنسی به صورت معمول کم است، که مانع از ایجاد یک تداخل‌نگار با کیفیت بالا می‌شود. فقدان کوهرنس در نتایج DInSAR تاثیر می‌گذارد و کیفیت تداخل‌نگار را کاهش می‌دهد. در این مناطق نیز از روش PSI استفاده می‌شود. همانطور که بیان شد این روش پیکسل‌هایی را انتخاب می‌کند که تحت معیار کیفیت مشخصی (شاخص پراکنندگی دامنه و میانگین کوهرنسی) به صورت پایدار در نظر گرفته شوند. اگر تعداد پیکسل‌های دائمی افزایش یابد، گام‌های پردازش DInSAR به صورت منظم‌تر عمل خواهند کرد. در مطالعاتی که تاکنون انجام گرفته، تکنیک PSI روی تصاویر SAR بدست آمده با سنجنده‌های تک کاناله بررسی شده است.

۴ Ferretti
۵ Single-master

۱ Cross-correlation
۲ Master-Slave
۳ Incidence angle

نمودند. آنها از ۱۷ داده دو کاناله سنجنده TerraSAR-X از سال ۲۰۱۳ تا ۲۰۱۴ در منطقه‌ای تحت فرونشست در ایران استفاده کردند [۳۳]. همچنین در مطالعه بعدی خود در سال ۲۰۱۷ نشان دادند که می‌توان از داده SAR پلاریمتری چندزمانه برای تخمین مکانیزم پراکنشی غالب عوارض در یک مجموعه از داده‌های SAR استفاده کرد که این باعث بهبود عملکرد روش‌های تداخل‌سنجی SAR برای مطالعات جابجایی می‌شود. علاوه بر آن اسماعیلی و همکاران یک شکل پلاریمتری از معیار پراکنشگی اختلاف دامنه^۴ برای آنالیز سری زمانی پیکسل‌ها در الگوریتم خط مبنای کوتاه توسعه دادند. شکل پلاریمتری ADD برای یافتن مکانیزم پراکنشی بهینه پیکسل‌ها بهبود داده شده و برای تولید تداخل‌نگارهای جدید با کیفیت بهتر از تداخل-نگارهای SAR تک کاناله استفاده می‌شود [۳۴].

روش دیگری برای انتخاب PS ها بر مبنای اختلاف فاز پلاریزاسیون^۵ توسط سمسونوف و همکاران در سال ۲۰۱۱ پیشنهاد شد که تنها از اطلاعات دو کانال استفاده می‌کند. آنها در این تحقیق اختلاف فاز پلاریزاسیون نرمالیزه شده بین کانال‌های HH و VV که روی یک مجموعه زمانی از تصاویر میانگین‌گیری شده است را آنالیز کردند و پیکسل‌هایی را که ویژگی‌های پراکنشی فرد (تک‌گانه)^۶ یا زوج (دوگانه)^۷ دارند انتخاب نمودند. نتایج حاصل را نیز با PS های انتخابی بوسیله اعمال حدآستانه پراکنشگی دامنه (بعنوان یک روش استاندارد PSI)، مقایسه کرده‌اند. این مقایسه نشان داده که هر دو روش مکمل یکدیگر هستند، با این تفاوت که روش PPD می‌تواند بر روی مجموعه داده‌های کم‌تر اعمال گردد. آنها برای تولید نقشه جابجایی با این روش از ۶ تصویر RADARSAT-2 منطقه سانفرانسیسکو استفاده کردند. نتایج حاصل نشان داده که پوشش و دقت نقشه جابجایی تولید شده با این روش در مقایسه با اعمال روش استاندارد PSI بیشتر است [۳۵]. همچنین، در سال ۲۰۱۳ کریستی تیمپو و همکاران تکنیک DInSAR مذکور را برای تولید یک نقشه جابجایی منطقه‌ای در امتداد گسل Hayward با استفاده از ۱۵ تصویر چهار کاناله RADARSAT-2، استفاده کردند [۳۶].

میانگین کوه‌رنسی و شاخص پراکنشگی دامنه اعمال و ارزیابی کردند [۲۹]. آنها در ادامه تحقیقاتشان در سال ۲۰۱۱ و ۲۰۱۲ به منظور ارزیابی کارایی روش پیشنهادی در بدست آوردن نقشه‌های جابجایی دقیق، این روش را بر روی تعداد تصاویر بیشتر، ۴۱ تصویر دو کاناله TerraSAR-X از منطقه شهری ماریسیا^۱ اسپانیا اعمال کردند. از آنجا که این روش تراکم بالایی از نقاط با اطلاعات جابجایی معتبر و درست در مقایسه با داده تک کاناله بدست می‌دهد، بنابراین بهبود مورد توقع را فراهم می‌سازد. آنها برای درک بصری بهتر از روند بهینه‌سازی، رفتار پلاریمتریک منطقه را آنالیز کرده و مکانیزم‌های پراکنشی‌ای را که الگوریتم به عنوان بهینه یا غالب انتخاب می‌کند، شناسایی نمودند [۳۰، ۳۱].

ناوارو سانچز و همکاران مجدداً در سال ۲۰۱۴ عملکرد الگوریتم‌های بهینه‌سازی پلاریمتریک را با استفاده از داده چهار کاناله پلاریمتری بدست آمده با ماهواره RADARSAT-2 بر روی منطقه شهری بارسلونا بررسی کردند. دو روش بهینه‌سازی پلاریمتریک کارآمد: میانگین شدت و قطری کردن توام^۲ را معرفی و بررسی کردند. همچنین یک مطالعه برای تعیین بهترین ترکیب داده‌های دو کاناله برای شرایطی که داده چهار کاناله موجود نباشد برای پلاریمتری PSI انجام دادند. نقشه فرونشست منطقه مطالعاتی را برای حالت تک کاناله، دو کاناله و داده چهار کاناله محاسبه کردند که افزایش تراکم پیکسلی با نتایج جابجایی معتبر را چنانچه که اطلاعات پلاریمتری بیشتری موجود باشد نشان می‌دهد [۳۲].

مطالعه دیگری توسط اسماعیلی و معتق در سال ۲۰۱۶ انجام شد که تنها از یک معیار انتخاب پیکسل، شاخص پراکنشگی دامنه، به منظور بررسی بهینه‌سازی پلاریمتری استفاده کردند. آنها با بکارگیری داده دو کاناله و ترکیب بهینه‌سازی شاخص پراکنشگی دامنه با معیار پایداری فاز، آنالیز PSI انجام دادند. در این مقاله برای افزایش تعداد PSها، شاخص پراکنشگی دامنه با استفاده از الگوریتم شبیه‌سازی تبرید تدریجی^۳ بهبود یافته است. سپس برای انتخاب پیکسل‌های نهایی در آنالیز جابجایی، پایداری فاز PS ها را به کمک همبستگی زمانی بررسی

^۴ Amplitude Difference Dispersion (ADD)

^۵ Polarization Phase Difference (PPD)

^۶ Odd bounce scattering

^۷ Even bounce scattering

^۱ Murica

^۲ Joint diagonalization

^۳ Simulated Annealing

پلاریمتریک تصاویر SAR یا به عبارتی شکل برداری تداخل‌سنجی ارائه کرد [۳۸]. در رادار پلاریمتری، برای هر سلول قابل تفکیک^۳، ماتریس پراکنشی^۴ 2×2 آن المان (S) را برداری می‌کنیم تا یک بردار پراکنشی^۵ \underline{k} بدست آید. نکته حائز اهمیت این است که، از پایه‌های مختلفی می‌توان برای برداری کردن ماتریس پراکنشی استفاده کرد. اما پایه پائولی^۶ به دلیل آنکه باعث می‌شود المان‌های بردار حاصل معنای فیزیکی واضح و قابل تفسیر داشته باشند، به صورت معمول مورد استفاده قرار می‌گیرد. برای هر سلول قابل تفکیک تصویر پلاریمتری در وضعیت چهار کاناله، ماتریس پراکنشی و بردار پراکنشی به صورت زیر بیان می‌گردند:

$$S_i = \begin{bmatrix} S_{hh,i} & S_{hv,i} \\ S_{hv,i} & S_{vv,i} \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$\underline{k}_i = \frac{1}{\sqrt{2}} [S_{hh,i} + S_{vv,i}, S_{hh,i} - S_{vv,i}, 2S_{hv,i}]^T \quad (2)$$

در این معادلات ایندکس i نشان دهنده تصاویر PolSAR در زمان‌های مختلف و T نشان‌دهنده عملگر ترانهاده است. S_{hh} و S_{vv} به ترتیب بیانگر کانال‌های افقی و عمودی "پلاریزه شده همسان"^۷ و S_{hv} مربوط به کانال "پلاریزه شده متقاطع"^۸ هستند. در نوشتن معادلات، فرض تئوری معکوس‌پذیری^۹ (با داشتن یک محیط انتشار دو جانبه برای موج) ($S_{hv} = S_{vh}$) در نظر گرفته شده است.

به منظور تولید یک تداخل‌نگار می‌توان هر بردار پراکنشی (\underline{k}) را بر روی یک بردار واحد ستونی مختلط (\underline{w}) تصویر کرد، که حاصل آن ضریب پراکنشی^{۱۰} (μ) است که به شکل $\mu_i = \underline{w}_i^\dagger \underline{k}_i$ تعریف می‌شود. علامت \dagger مخفف ترانهاده‌ی مزدوج^{۱۱} است. ضریب پراکنشی (μ) یک مقدار عددی مختلط است و به صورت ترکیب خطی از المانهای \underline{k} بدست می‌آید. به عنوان یک مقدار مختلط، این مقدار مشابه آنچه که از سیستم SAR تک کاناله برای

تام رونه لاکنز و همکاران (۲۰۰۷) نتایجی از شناسایی پراکنش‌کننده‌های کوه‌رنت در مناطق غیر شهری با استفاده از داده‌های پلاریمتری SAR از سنجنده هوابرد EMISAR و فضا‌برد ALOS PALSAR ارائه نمودند. آنها با اعمال یک تست نسبت سیگنال به نویز برای عوارض نقطه‌ای کوه‌رنت، نشان دادند که با استفاده از اطلاعات پلاریمتری در تجزیه پائولی^۱، تعداد عوارض شناسایی شده به دو برابر حالت داده‌های تک پلاریزه افزایش می‌یابد. آنها همچنین یک طبقه‌بندی اولیه روی مکانیزم‌های پراکنشی با استفاده از تجزیه کامرون^۲ انجام دادند. آنها در نتایج نشان می‌دهند که اگر از اطلاعات پلاریمتری استفاده شود عوارضی شناسایی می‌شوند که با استفاده از داده‌های تک کاناله قابل شناسایی نیستند [۳۷]. با توجه به کلیه مطالعات پیشین انجام شده مشخص است که استفاده از داده‌های پلاریمتری (دو کاناله یا چهار کاناله) اطلاعات مضاعفی را فراهم می‌آورد که موجب بهبود آنالیز سری زمانی InSAR می‌گردد.

در این تحقیق ما به بررسی روش‌های بهینه سازی پلاریمتری مبتنی بر هر دو معیار انتخاب پیکسلی و به کارگیری روش‌های جستجوی فرا ابتکاری رایج به منظور یافتن کانال بهینه با استفاده از داده‌های هوابرد چهار کاناله سنجنده UAVSAR می‌پردازیم.

در ادامه، ابتدا در بخش دوم روش تحقیق معرفی شده، در قسمت سوم داده‌ها، نتایج تجربی پردازش و تجزیه و تحلیل این نتایج ارائه خواهد گردید و در بخش آخر نتیجه گیری و پیشنهادات مطرح خواهد شد.

۲- روش پیشنهادی

در این پژوهش به بررسی روش‌های مختلف بهینه‌سازی پلاریمتریک به منظور افزایش تعداد پراکنش‌کننده‌های دائمی بر اساس دو تخمین‌گر میانگین کوه‌رنسی و شاخص پراکنندگی دامنه، در روش PSI می‌پردازیم. بدین منظور از داده‌های هوابرد UAVSAR از سال ۲۰۱۴ تا ۲۰۱۶ استفاده می‌کنیم.

کلاود در سال ۱۹۹۸ با استفاده از مزایای رادار پلاریمتری یک فرمول‌بندی کلی برای تداخل‌سنجی

۳ Resolution element
 ۴ Scattering matrix
 ۵ Scattering vector
 ۶ Pauli basis
 ۷ Copolar
 ۸ Crosspolar
 ۹ Reciprocity
 ۱۰ Scattering coefficient
 ۱۱ Conjugated transpose

۱ Pauli decomposition
 ۲ Cameron decomposition

انتخاب در نظر گرفته شده، تفسیر شود. این روش برای دوتا از رایج‌ترین معیارهای انتخاب فرمول‌بندی شده و مورد بررسی قرار گرفته است، بیشینه کردن میانگین بزرگی کوهرنس تداخل‌سنجی $|\gamma|$ (بر روی داده چندمنظر^۴ تخمین زده می‌شود) [۲۷، ۲۵] و کمینه‌سازی شاخص پراکنش دامنه که روی داده تک‌منظر مختلط^۵ [۲۰] محاسبه می‌شود.

از آنجا که قابلیت اعتماد محصولات نهایی PSI مستقیماً مربوط به کیفیت فاز تداخل‌نگارها است. بنابراین، یک انتخاب اولیه از پیکسل‌های کاندید به این منظور که از ورود داده‌های نویزی در پردازش جلوگیری شود، الزامی است. رایج‌ترین تخمین‌گرهای کیفیت فاز، کوهرنس تداخل‌سنجی [۲۴، ۲۵] و شاخص پراکنش دامنه [۲۶] هستند.

کوهرنس تداخل‌سنجی به صورت زیر بیان می‌شود:

$$\gamma = |\gamma| \cdot e^{j\phi} = \frac{E\{S_1 S_2^*\}}{\sqrt{E\{|S_1|^2\} E\{|S_2|^2\}}} \quad (۴)$$

S_1 و S_2 پیکسل‌های مختلط از هر تصویر SAR هستند، |ا| اپراتور قدرمطلق است و $E\{\cdot\}$ مخفف اپراتور امید ریاضی است. اندازه کوهرنسی مختلط $|\gamma|$ کیفیت فاز تداخل‌سنجی ϕ را نشان می‌دهد. به منظور آنکه حساسیت زمانی داشته باشیم، از کوهرنس میانگین می‌گردد. پیکسل‌هایی که میانگین کوهرنس بالاتر از یک حد آستانه دارند، پیکسل‌های موردنظر خواهند بود. این روش در اصل برای پراکنش‌کننده‌های توزیع شده^۶ مناسب‌تر است اما برای پراکنش‌کننده‌های قطعی^۷ هم استفاده می‌شود.

یک روش مناسب‌تر برای پراکنش‌کننده‌های قطعی، از قبیل آن‌هایی که در مناطق شهری هستند، تخمین‌گر شاخص پراکنش دامنه^۸ است که اجازه می‌دهد پراکنش‌کننده‌های دائمی (PS) را انتخاب کنیم [۱۷]. PS ها به صورت پراکنش‌کننده‌های نقطه‌ای^۹ در مجموعه تصاویر

یک المان بدست می‌آید خواهد بود. بنابراین، میتوان کلیه تکنیک‌های تداخل‌سنجی توسعه داده شده برای داده تک کاناله را مانند روش PSI، روی ضریب پراکنشی (μ) اعمال کرد.

در این بخش، مسئله این است که بردار تصویر^۱ \underline{w} را برای هر پیکسل از تصاویر SAR یا تداخل‌نگارها چگونه انتخاب کنیم به طوری که نتایج بهتری را نسبت به استفاده از داده تک کاناله بدست آوریم. برای حل این مسئله به صورت ساده، بردار تصویر به نحوی پارامتری می‌شود که دارای بزرگی واحد باشد، یعنی شرط $|\underline{w}| = 1$ را تضمین کرده و همه مقادیر غیر مبهم ممکن بردار \underline{w} را در نظر بگیرد. در حالت چهار کاناله پلاریزتری، بردار تصویر (\underline{w}) به صورت زیر پارامتری می‌شود [۳۸]:

$$\underline{w} = \begin{bmatrix} \cos \alpha \\ \sin \alpha \cos \beta e^{j\delta} \\ \sin \alpha \sin \beta e^{j\gamma} \end{bmatrix} \begin{cases} 0 \leq \alpha \leq \frac{\pi}{2} \\ 0 \leq \beta \leq \pi \\ 0 \leq \delta \leq \pi \\ -\pi \leq \gamma \leq \pi \end{cases} \quad (۳)$$

با این فرمول‌بندی، مسئله به یافتن چهار زاویه با مقادیر حقیقی $\alpha, \beta, \gamma, \delta$ با محدوده معین کاهش می‌یابد. که مقادیر آنها به ویژگی‌های هندسی و الکترومغناطیس عارضه وابسته است [۳، ۳۲]. در واقع، \underline{w} کانال بهینه است و نسبت به زمانی که فقط از داده تک کاناله استفاده شود منجر به افزایش تعداد پیکسل‌های منتخب و نتایج بهتر خواهد شد. در واقع هدف اصلی این گام، یافتن بردار تصویر بهینه برای هر پیکسل از تصاویر SAR بر مبنای معیار انتخابی در نظر گرفته شده است. به منظور جلوگیری از معرفی یک ترم فاز متغیر که ممکن است به اشتباه به عنوان جابجایی پراکنش‌کننده‌ها در راستای خط دید رادار^۲ تفسیر شود، بهینه \underline{w} بدست آمده برای هر پیکسل باید در کل مجموعه تصاویر یکسان باشد. این محدودیت معمولاً به عنوان مکانیزم‌های پراکنشی برابر^۳ معرفی می‌شوند [۳۹] و می‌تواند به عنوان انتخاب پایدارترین مکانیزم پراکنشی در زمان، مطابق بر معیار

^۴ Multilook

^۵ Single Look Complex (SLC)

^۶ Distributed

^۷ Deterministic

^۸ Amplitude Dispersion Index (ADI)

^۹ Pointlike

^۱ Projection vector

^۲ Line-Of-Sight (LOS)

^۳ Equal Scattering Mechanisms (ESM)

• Best: اولین روش برای بهبود کیفیت فاز تفاضلی شامل انتخاب کانال پلاریمتری است که بالاترین مقدار کوهرنس را برای هر تداخل‌نگار فراهم می‌کند. این روش بر اساس مقاله [۱۶] روش Best نام‌گذاری شده- است. برای این روش، اندازه کوهرنس بهبود یافته برای هر پیکسل با رابطه زیر نشان داده می‌شود:

$$|\gamma_{Best}| = \max\{|\gamma_{hh}|, |\gamma_{hv}|, |\gamma_{vv}|\} \quad (7)$$

در این روش فاز تداخل‌سنجی بهبود داده شده، فاز کانال انتخاب شده‌ای خواهد بود که بالاترین کوهرنس را فراهم می‌کند. در واقع، این انتخاب مربوط به انتخاب کانالی است که کمتر تحت تاثیر عوامل عدم همبستگی قرار می‌گیرد. در این روش، یک بهبود قابل توجهی در مقدار کوهرنس و بنابراین تعداد پیکسل‌های دائمی کاندید در مرحله انتخاب پیکسل ایجاد می‌شود. برای حالت داده-های چندخط مینا^۲، روش به انتخاب کانال پلاریمتری که بالاترین میانگین کوهرنسی زمانی را فراهم می‌کند، توسعه داده می‌شود(معادله ۸). این روش به عنوان Best-MB نامیده می‌شود. علیرغم بهبود قابل توجه در نتایج نهایی DInSAR، این روش به صورت کامل از پتانسیل پلاریمتری بهره نمی‌برد. روش‌های بعدی سعی دارند که داده PolSAR را به صورت موثرتر استفاده کنند.

$$|\overline{\gamma_{Best}}| = \max\{|\overline{\gamma_{hh}}|, |\overline{\gamma_{hv}}|, |\overline{\gamma_{vv}}|\} \quad (8)$$

• ESM^۲ اگر بهینه‌سازی کوهرنس به عنوان معیار انتخاب در نظر گرفته شود، بردار تصویر بهینه، برداری خواهد بود که میانگین مقدار کوهرنس تداخل‌سنجی را ماکزیمم کند. کوهرنس تداخل‌سنجی (γ) برای دو تصویر SAR در حالت عددی به صورت زیر نوشته می‌شود:

$$\gamma_k = \frac{\langle S_i S_j^* \rangle}{\sqrt{\langle S_i S_i^* \rangle \langle S_j S_j^* \rangle}}, \quad 0 \leq |\gamma| \leq 1 \quad (9)$$

در این معادله k نشان دهنده k امین تداخل‌نگار است که بین تصاویر i و j تولید شده و S_i و S_j ضرایب پراکنشی برای المانهای با توان تفکیک یکسان مربوط به

رفتار می‌کنند و در تئوری میتوان گفت تحت تاثیر عدم همبستگی مکانی قرار نمی‌گیرند. این پیکسل‌ها با پراکندگی دامنه زمانی مشخص می‌شوند:

$$D_A = \frac{\sigma_A}{m_A} = \frac{1}{\langle |S| \rangle} \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (|S_i| - \langle |S| \rangle)^2} \quad (5)$$

$$\langle |S| \rangle = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |S_i| \quad (6)$$

σ_A مخفف برای انحراف معیار دامنه، m_A میانگین دامنه سری زمانی پیکسل، N تعداد تصاویر و $S = [S_1, S_2, \dots, S_N]$ برداری است متشکل از بازتاب مختلط از هر S_i .

در واقع، انحراف معیار فاز تقریباً متناسب با مقدار پراکندگی دامنه برای مقادیر بالای سیگنال به نویز^۱ است [۱۷]. بنابراین شاخص پراکندگی دامنه D_A به عنوان یک تخمین از پایداری فاز برای پراکنش‌کننده‌هایی با مقادیر بالای SNR به کار گرفته می‌شود. در اصطلاح، PS ها بوسیله اندازه‌گیری D_A انتخاب می‌شوند، تنها پیکسل‌هایی که کمتر از یک حد آستانه هستند، معمولاً $D_A < 0.3$ ، مورد بررسی قرار می‌گیرند. بر خلاف تخمین‌گر کوهرنس تداخل‌سنجی که به تداخل‌نگارها وابسته است، تخمین شاخص پراکندگی دامنه به خود تصاویر SAR بستگی دارد. بنابراین وابستگی زمانی در تخمین‌گر D_A ذاتی است. در ادامه هر دو معیار استفاده شده برای بهینه‌سازی پلاریمتریک به صورت کامل بررسی خواهند شد.

۲-۱- بهینه سازی میانگین کوهرنسی

هدف این بخش بررسی روش‌های بهبود پلاریمتری مختلف در تخمین‌گر کوهرنس و ارتقا کیفیت فاز تداخل-نگارها با استفاده از اطلاعات موجود در داده‌های پلاریمتری است.

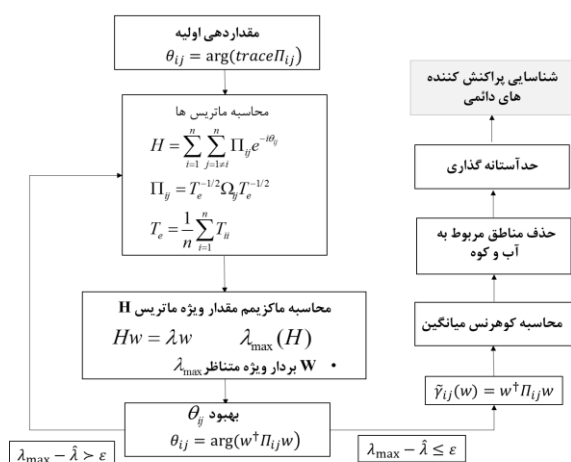
الگوریتم‌های مورد استفاده در روش‌های بهبود پلاریمتری در تخمین‌گر کوهرنس در ادامه به صورت کامل توضیح داده می‌شوند.

^۲ Multibaseline

^۳ Equal Scattering Mechanisms

^۱ Signal-to-Noise Ratio (SNR)

روش‌های متفاوتی برای بدست آوردن بردار تصویر بهینه وجود دارد اما رایج‌ترین استراتژی بهینه‌سازی پیدا کردن w ای است که معادله تعمیم یافته کوهرنس (معادله ۱۰) را بیشینه سازد. این روش تحت عنوان مکانیزم پراکنشی یکسان ESM شناخته می‌شود و محدودیت برابری بردار بهینه هر پیکسل در کل زمان تصویر برداری را اعمال می‌کند. راه حل ساده برای حل این معادله بهینه‌سازی پارامتری کردن بردار w مطابق با معادله (۳) است که در [۲۹-۳۱] از این روش برای داده‌های دو کاناله استفاده شده است. این نکته حائز اهمیت است که حل و جستجوی عددی در داده‌های چهار کاناله با این روش، پیچیدگی و حجم محاسباتی بالایی دارد. از این‌رو، برای غلبه بر این مشکل از حل تحلیلی مطرح شده در [۳۹] به کمک مسئله مقدار ویژه تعمیم داده شده استفاده می‌کنیم. این روش گسترش یافته روش ESM مطرح شده در [۴۰] است، که به جای بهینه‌سازی کوهرنس هر تداخل‌نگار به صورت جداگانه، کوهرنس میانگین زمانی را بهبود می‌دهد. در دیاگرام زیر (شکل ۱) روند اجرای این الگوریتم نشان داده شده است. پراکنش-کننده‌های دائمی انتخاب شده بر روی کانال بهینه با پراکنش‌کننده‌های دائمی انتخابی بر روی تک کاناله‌های متداول و پائولی مقایسه می‌شود. لازم به ذکر است که توان تفکیک مکانی به دلیل چندمنظرسازی در این روش کاهش میابد که یکی از معایب تخمین‌گر کوهرنس در مقایسه با شاخص پراکنندگی دامنه است. در قسمت بعدی روی تخمین‌گر مناسب‌تر با راه حل عددی برای یافتن کانال بهینه متمرکز خواهیم شد.



شکل ۱- دیاگرام کلی روش پیشنهادی برای بهبود میانگین کوهرنسی

در روش ESM

دو تصویر هستند. کوهرنس تداخل‌سنجی تعمیم داده شده برای حالت پلاریزتری با قرار دادن $\mu_i = w_i^\dagger k_i$ به جای S_i بدست می‌آید (با فرض ESM که در بخش قبل توضیح داده شد معادله به صورت زیر نوشته می‌شود).

$$\gamma_k = \frac{w^\dagger [\Omega_{12}] w}{\sqrt{w^\dagger [T_{11}] w} \sqrt{w^\dagger [T_{22}] w}} \quad (10)$$

$$\begin{aligned} T_{11} &= E [k_1 k_1^\dagger] \\ T_{22} &= E [k_2 k_2^\dagger] \\ \Omega_{12} &= E [k_1 k_2^\dagger] \end{aligned} \quad (11)$$

در این معادله Ω_{12} ماتریس همبستگی متقابل^۱ اینترفرومتریک پلاریزتریک بین دو تصویر است و T_{11} و T_{22} ماتریس‌های کوهرنسی هر تصویر PolSAR هستند. از این جهت که کوهرنسی بالا یک شاخص از کیفیت فاز است، روش‌های DInSAR وجود دارد که مستقیماً از کوهرنسی مجموعه تداخل‌نگارها به منظور ایجاد معیار انتخاب برای پیکسل‌های دائمی کاندید استفاده می‌کنند. ساده‌ترین راه برای انجام این کار استفاده از کوهرنسی میانگین $|\overline{\gamma}|$ محاسبه شده (معادله ۱۲) برای یک پشته‌ای از N تداخل‌نگار است.

$$|\overline{\gamma}| = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N |\gamma_k| \quad (12)$$

k نشان‌دهنده k امین تداخل‌نگار و $k = 1, 2, \dots, N$ است.

در واقع، مسئله در این قسمت این است که کل فضای پلاریزتری برای یافتن بردار w ای که ماکزیمم میانگین کوهرنس را فراهم می‌کند جستجو شود. بعد از تصویر کردن داده‌ها بر روی بردار بهینه هر پیکسل، با استفاده از رابطه $\mu_i = w_i^\dagger k_i$ ، کوهرنس میانگین محاسبه می‌شود. و بعد از محاسبه کوهرنس میانگین برای هر پیکسل، با اعمال حد آستانه، پیکسل‌هایی که بالاتر از حد آستانه مشخص هستند به عنوان پیکسل‌های دائمی کاندید برای پردازش‌های بعدی انتخاب می‌شوند.

^۱ Cross-correlation

۲-۲- شاخص پراکندگی دامنه

$$\langle |w^\dagger k| \rangle = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |w^\dagger k_i| \quad (15)$$

روش ESM در [۲۹-۳۱] اخیرا به منظور یافتن بردار تصویری که مقدار بهینه D_A را فراهم کند اعمال شده است. این روش شامل یک جستجو در کل فضای پلاریمتری است تا بردار تصویری (w) بدست بیاید که برای هر پیکسل معادله تعمیم یافته (۱۴) را بهینه می‌کند. مسئله بهینه‌سازی با پارامتری ساختن بردار تصویر w که در معادله (۳) توضیح داده شده، حل می‌شود. با پارامتری ساختن بردار تصویر، مسئله به یافتن چهار زاویه ($\alpha, \beta, \delta, \gamma$) کاهش پیدا می‌کند به طوری که D_A را روی فضای پلاریمتری بردارهای تصویر ممکن w حداقل سازد. زمانی که بردار تصویر بهینه $w_{opt, ESM}$ یافت شود، D_A بهبود داده شده مستقیما با معادله (۱۴) با بردار تصویر در نظر گرفته شده بدست می‌آید و پیکسل‌هایی با مقدار شاخص پراکندگی کمتر از حدآستانه (معمولا ۰,۳ یا ۰,۴) به عنوان پراکنش‌کننده‌های دائمی شناسایی می‌شوند. فاز تداخل‌سنجی یک پیکسل برای هر جفت تصویر i و j میتواند به صورت زیر بیان شود:

$$\phi_{ESM} = \arg\{(w_{opt, ESM}^\dagger \underline{k}_i)(w_{opt, ESM}^\dagger \underline{k}_j)^*\} \quad (16)$$

مانند شاخص کوه‌رنسی، مشکل اصلی این روش در پیدا کردن بردار تصویر بهینه، حجم محاسباتی آن است. برای بکارگیری گام نمونه برداری ۱ درجه برای جستجوی همه مقادیر ممکن $\alpha, \beta, \delta, \gamma$ حدود 10^{10} عملکرد برای هر پیکسل نیاز است. برای بهبود پردازش، یک نمونه برداری با گام ۱۵ درجه انجام می‌شود. بدین منظور که موقعیت مینیمم مطلق^۳ تقریبا تعیین گردد (اجتناب از قرار گرفتن جواب‌های اولیه در مینیمم محلی) و سپس از سه روش جستجوی فراابتکاری^۴ رایج از جمله الگوریتم ژنتیک^۵، روش شبیه‌سازی تبرید^۶ و بهینه سازی انبوه ذرات^۷ برای بدست آوردن مقادیر بهینه استفاده می‌گردد. علت استفاده از جستجوی عددی در این شاخص عدم

در این بخش، تکنیک‌های بهبود پلاریمتری دیده شده برای شاخص میانگین کوه‌رنس بر روی تخمین‌گر D_A اعمال شده است. کارهای اخیر در این زمینه با استفاده از روش ESM انجام گرفته است [۲۹-۳۱].

اکنون هدف این است که بهترین کانال پلاریمتری (Best) و ضریب پراکنشی بهینه (ESM) روی کل مجموعه داده‌های PolSAR به نحوی اعمال گردد که حداقل D_A را فراهم کند. بدلیل آنکه، برای این شاخص، خط مبنا مکانی در تخمین کیفیت فاز نقشی ندارد از این رو تفاوتی در کارکرد با داده خط‌مبنای صفر^۱ و خط‌مبنای چندگانه^۲ وجود ندارد.

در ادامه الگوریتم‌های مورد استفاده در روش‌های بهبود پلاریمتری در تخمین‌گر پراکندگی دامنه به صورت کامل شرح داده می‌شوند.

• Best: راه اول برای بهبود D_A و در نتیجه کیفیت فاز تفاضلی شامل انتخاب فازهای تداخل‌سنجی از کانال پلاریمتری است که حداقل D_A را در مجموعه داده های PolSAR فراهم می‌کند. این روش مانند حالت کوه‌رنس به عنوان روش Best نام گذاری می‌شود [۱۶]. شاخص پراکندگی دامنه بهبود داده شده در این روش برای هر پیکسل با رابطه زیر بدست می‌آید:

$$D_{A, Best} = \min\{D_{A, hh}, D_{A, hv}, D_{A, vv}\} \quad (13)$$

و فاز تداخل‌سنجی از کانالی که حداقل مقدار D_A را فراهم می‌کند، بدست می‌آید.

• ESM: شاخص پراکندگی دامنه (D_A) تعمیم داده شده برای حالت پلاریمتری با قرار دادن $\mu_i = w_i^\dagger k_i$ در معادله ۵ و ۶ به جای S_i بدست می‌آید.

$$D_A = \frac{\sigma_A}{m_A} = \frac{1}{\langle |w^\dagger k| \rangle} \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\langle |w^\dagger k_i| \rangle - \langle |w^\dagger k| \rangle)^2} \quad (14)$$

^۳ Absolute Minimum

^۴ Metaheuristics

^۵ Genetic Algorithm (GA)

^۶ Simulated Annealing (SA)

^۷ Particle Swarm Optimization (PSO)

^۱ Zero baseline

^۲ Multibaseline

برای کوهرنس میانگین در روش ESM_MB مشاهده می-کنیم. برای مقایسه، شکل ۳ (الف) (ج) پیکسل‌های انتخاب شده بر اساس $|\gamma| > 0.6$ را برای کانال HH و روش‌های بهبود پلاریمتری مختلف، بر روی تصویر RGB پائولی نشان می‌دهد. نقاط قرمز پراکنش کننده‌های دائمی انتخاب شده هر روش است. همانطور که انتظار می‌رود، بیشتر پیکسل‌های انتخابی در مناطق شهری قرار دارند. شکل ۳_د) هیستوگرام مربوط به کوهرنس میانگین مربوط به تک کاناله‌ها در مقایسه با کوهرنس میانگین بعد از اعمال روش‌های بهبود پلاریمتری را نشان می‌دهد. که با توجه به نقشه‌های بدست آمده کاملاً مشخص است که کوهرنس میانگین بدست آمده با روش‌های مورد استفاده بهبود قابل توجهی داشتند. این بهبود در افزایش تعداد پیکسل‌های دائمی کاندید قابل ملاحظه است. در شکل ۴ تعداد PS های انتخاب شده خلاصه شده اند. در جدول (۲) و (۳) درصد پیکسل‌های انتخابی نسبت به تعداد کل پیکسل‌های تصویر، برای کانال‌های متداول و داده‌های بهبود یافته، برای کوهرنس میانگین بالای ۰.۶، نشان داده شده است.

جدول ۲- درصد پیکسل‌های انتخاب شده برای کانال‌های مختلف، معیار کوهرنس مینا، با در نظر گرفتن حدآستانه ۰.۶

کانال	درصد پیکسل‌ها
HH	٪۱۴،۴۲
HV	٪۹،۱۶
VV	٪۱۴،۱۳
HH-VV	٪۱۳،۳
HH+VV	٪۱۴،۱۴

جدول ۳- درصد پیکسل‌های انتخاب شده برای داده‌های بهبود یافته، معیار کوهرنس مینا، با در نظر گرفتن حدآستانه ۰.۶

روش	درصد پیکسل‌ها
BEST	٪۱۹،۱۸
ESM	٪۲۳،۵۲

همانطور که در جداول مشاهده می‌شود، در بین کانال‌های متداول کانال HH درصد بیشتری از نقاط دائمی را با اعمال حد آستانه ۰.۶ شناسایی کرده است. با استفاده از روش Best افزایشی در حدود ۳۳٪ نسبت به استفاده از داده‌های تک کانال HH داشته‌ایم. روش ESM_MB بهبود قابل توجهی را نسبت به روش Best نشان داده است و در مقایسه با کانال HH افزایش ۶۵٪ را مشاهده می‌کنیم.

وجود راه حل تحلیلی است. هم چنین با جستجوی شبکه^۱ حجم محاسبات کاهش یافته و عملکرد روش‌های جستجو از نقطه نظر زمان لازم و افزایش تعداد PS ها مورد بررسی قرار می‌گیرند.

۳- نتایج

در این بخش نتایج حاصل از بررسی روش‌های بهینه سازی پلاریزاسیون مختلف بر روی هر دو معیار انتخاب پیکسلی (پایداری کوهرنسی و شاخص پراکنش دامنه) نشان داده شده است.

۳-۱- داده‌های راداری

در این تحقیق از تصاویر تک‌منظر مختلط UAVSAR^۲ استفاده شده است که یک سیستم تداخل-سنجی راداری دو عبوره^۳ پلاریمتریک هواپرد در باند L است. بازه زمانی مربوط به اخذ داده‌ها از سال ۲۰۱۴ تا ۲۰۱۶ بوده و منطقه مطالعاتی ساکرامنتو سان جویکین دلتا^۴ در کالیفرنیا است.

جدول ۱- خلاصه‌ای از مشخصات داده‌های مورد استفاده UAVSAR

پارامتر	مقدار
فرکانس	L باند، ۱،۲۶ گیگاهرتز (طول موج ۲۳،۸۴ سانتیمتر)
پهنای باند	۸۰ مگاهرتز
فاصله پیکسلی	۱،۶ متر در راستای رنج، ۰،۶ در راستای آزیموت
پلاریزاسیون	VV، VH، HV، HH
ارتفاع	۲۰۰۰-۱۸۰۰۰ متر

۳-۲- نتایج بهینه سازی میانگین کوهرنسی

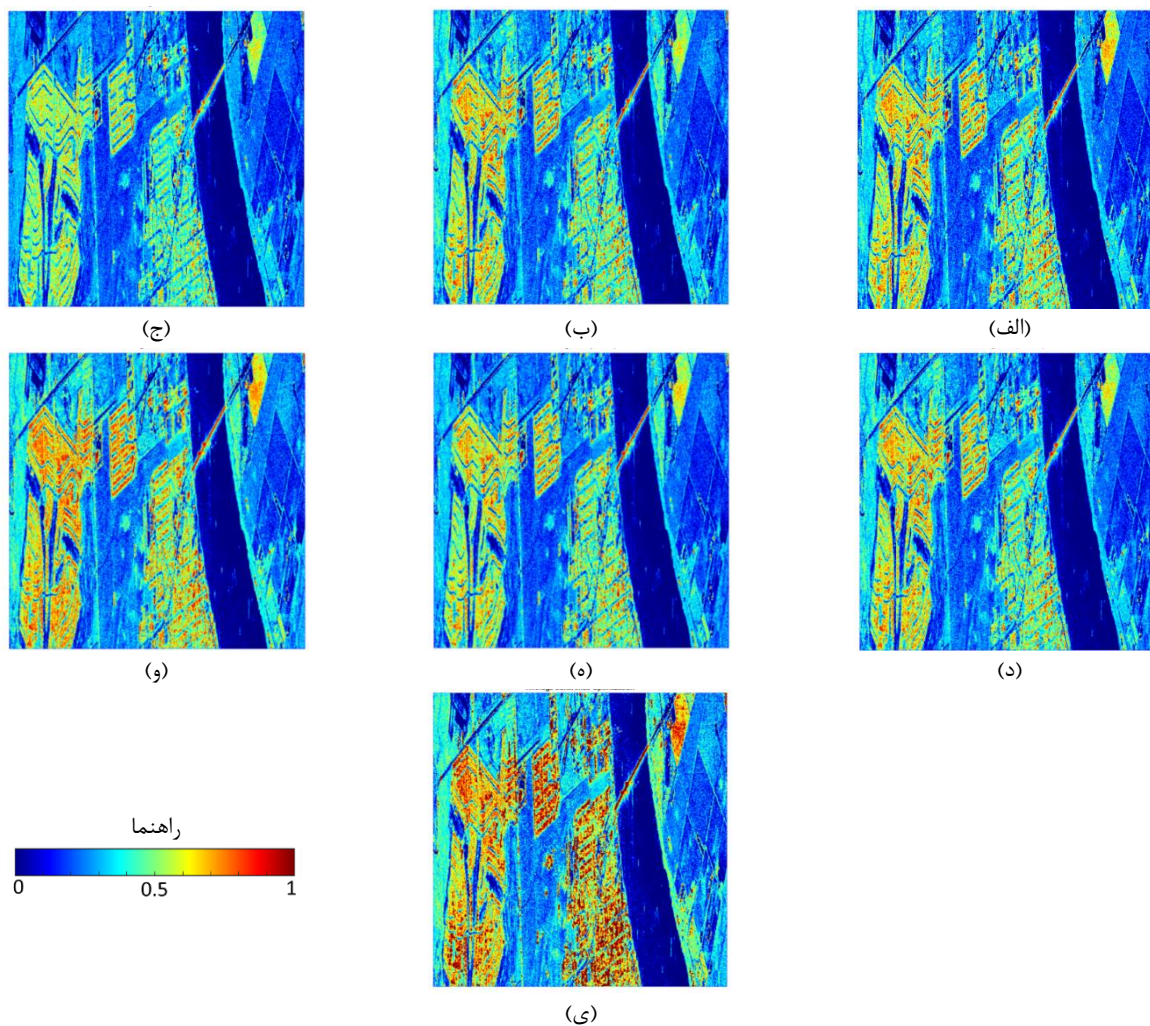
در این بخش، عملکرد روش‌های مختلف برای بهینه سازی کوهرنس میانگین از نقطه نظر تراکم PS را مورد مقایسه قرار می‌دهیم. برای برآورد کوهرنس، یک پنجره ۵×۵ پیکسل روی داده اعمال شده است. شکل ۲ نقشه-های کوهرنس میانگین مربوط به هر حالت را نشان می‌دهد، که نشان‌دهنده افزایش کوهرنسی به دلیل بهینه-سازی پلاریمتری است. در شکل ۲ بهبود قابل ملاحظه‌ای

^۱ Grid search

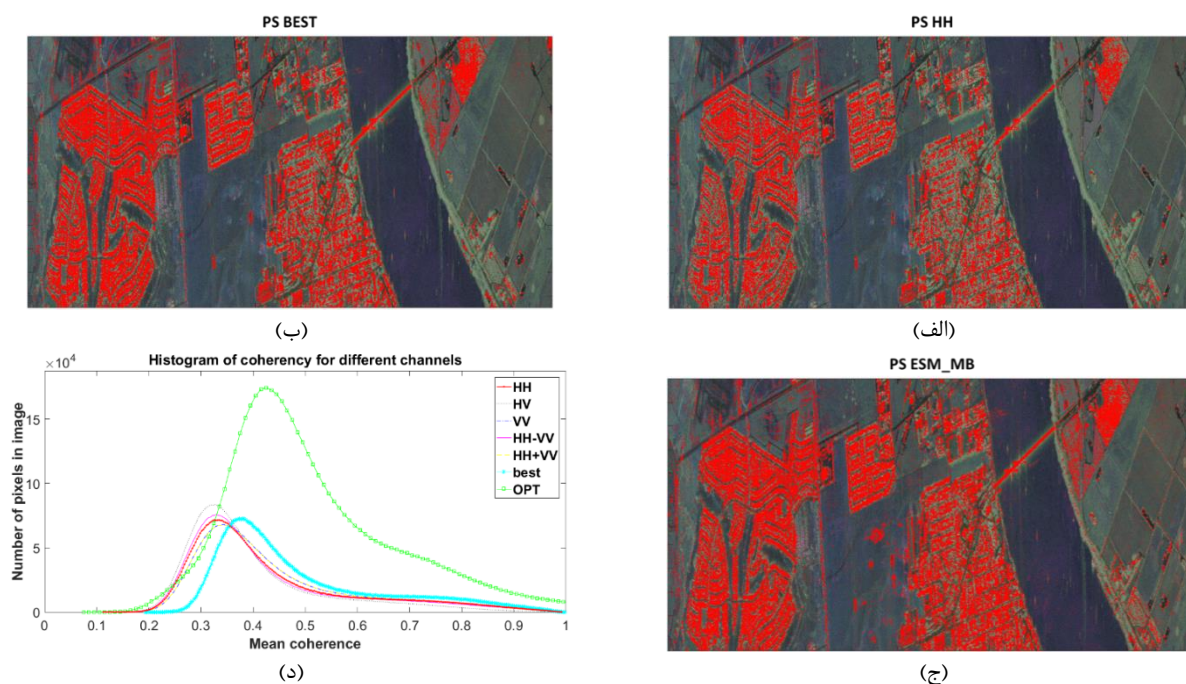
^۲ Uninhabited Aerial Vehicle Synthetic Aperture Radar

^۳ Repeat pass

^۴ Sacramento-San Joaquin Delta region, CA



شکل ۲- کوهرنس میانگین برای کانال‌های متفاوت. (الف) HH (ب) VV (ج) HV (د) HH+VV (و) Best (ی) ESM_MB



شکل ۳- تراکم پراکنش کننده‌های دائمی انتخاب شده در منطقه مطالعاتی بر روی تصویر پائولی برای کانال‌های متفاوت. (الف) HH (ب) Best (ج) ESM_MB و (د) هیستوگرام $|\gamma|$ برای کانال‌های HH, HV, VV, پائولی و روش‌های بهینه‌سازی پلاریمتری کوهرنس مبنا

پارامترهای اولیه در هر الگوریتم بر اساس بررسی تکرارهای مختلف و سعی و خطا بدست آمده است. همانطور که در جدول ۵ نشان داده شده است، روش PSO در زمان کوتاه‌تری پراکنش کننده‌های دائمی بیشتری را در مقایسه با روش‌های دیگر شناسایی می‌کند. بنابراین، از PSO برای یافتن کانال بهینه در حالت چهار کاناله روش ESM_MB استفاده می‌کنیم. جدول ۶ نتایج انتخاب PS را روی داده بهبود یافته بدست آمده با روش‌های مختلف از داده چهار کاناله نشان می‌دهد.

جدول ۵- درصد پراکنش کننده‌های دائمی شناسایی شده و زمان لازم برای محاسبه داده بهبود یافته از داده‌های دوکاناله، در نظر گرفتن روشهای جستجوی فرا ابتکاری مختلف

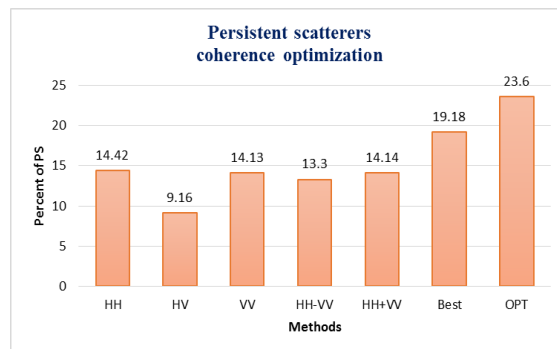
	تعداد PS	زمان (ثانیه)
PSO	٪۱۸،۹۰	۱۸۲۲۶۴،۱۰۲۱۷
SA	٪۱۸،۸۰	۴۶۴۶۵۲،۱۰۹۵۴
GA	٪۱۸،۷۷	۲۳۸۳۴۱،۷۵۴۶۷

جدول ۶- درصد پیکسل‌های انتخاب شده برای داده‌های بهبود یافته، معیار دامنه مینا، با در نظر گرفتن حدآستانه ۰،۳ برای D_A

روش	درصد پیکسل‌ها
BEST	٪۹،۹۹
ESM_Quad(PSO)	٪۲۳،۸۵

جدول ۶ نشان می‌دهد که روش ESM_MB بر مبنای کانال بهبود یافته بدست آمده از متد جستجوی PSO بهترین عملکرد را به لحاظ تعداد PS در مقایسه با روش دیگر دارد. برای مجموعه چهار کاناله، الگوریتم Best افزایش ۱۳۰٪ را نسبت به تک کانال HH بدست آورده است. برای روش ESM_MB افزایش قابل توجهی در حدود ۴۵۰٪ را مشاهده می‌کنیم (حدود ۶ برابر PS بیشتر).

شکل ۵ پراکنش کننده‌های دائمی بدست آمده برای تک کانال HH، روش Best و کانال بهینه بدست آمده از روش ESM_MB برای داده دو کاناله و چهار کاناله با استفاده از روش PSO را بر روی تصویر پائولی منطقه مورد مطالعه نشان می‌دهد. نقاط قرمز پراکنش کننده‌های دائمی انتخاب شده هر روش است. شکل ۶ (الف) هیستوگرام مربوط به شاخص پراکنندگی دامنه بدست آمده برای داده دو کاناله در روش ESM_MB با در نظر گرفتن روش‌های جستجوی فراابتکاری مختلف است، که نشان می‌دهد عملکرد الگوریتم PSO برای یافتن کانال بهینه نسبت به دو روش جستجو دیگر (SA و GA) بهتر است. از



شکل ۴- پراکنش کننده‌های دائمی شناسایی شده با استفاده از کانال‌های مختلف در تخمین گر کوهرنس میانگین $|\overline{\gamma}| > 0.6$

۳-۳- نتایج شاخص پراکنندگی دامنه

در این بخش، کارایی روش‌های مختلفی را که در بخش قبلی برای بهبود ثبات دامنه از نظر تراکم PS دیده شد مقایسه می‌کنیم.

جدول ۴ درصد پراکنش کننده‌های دائمی انتخاب شده براساس کانال‌های متداول و پائولی را نشان می‌دهد. به منظور انتخاب PSها، فقط پیکسل‌هایی که مقدار پراکنندگی دامنه آنها کمتر از ۰،۳ است ($D_A < 0.3$) انتخاب شده‌اند.

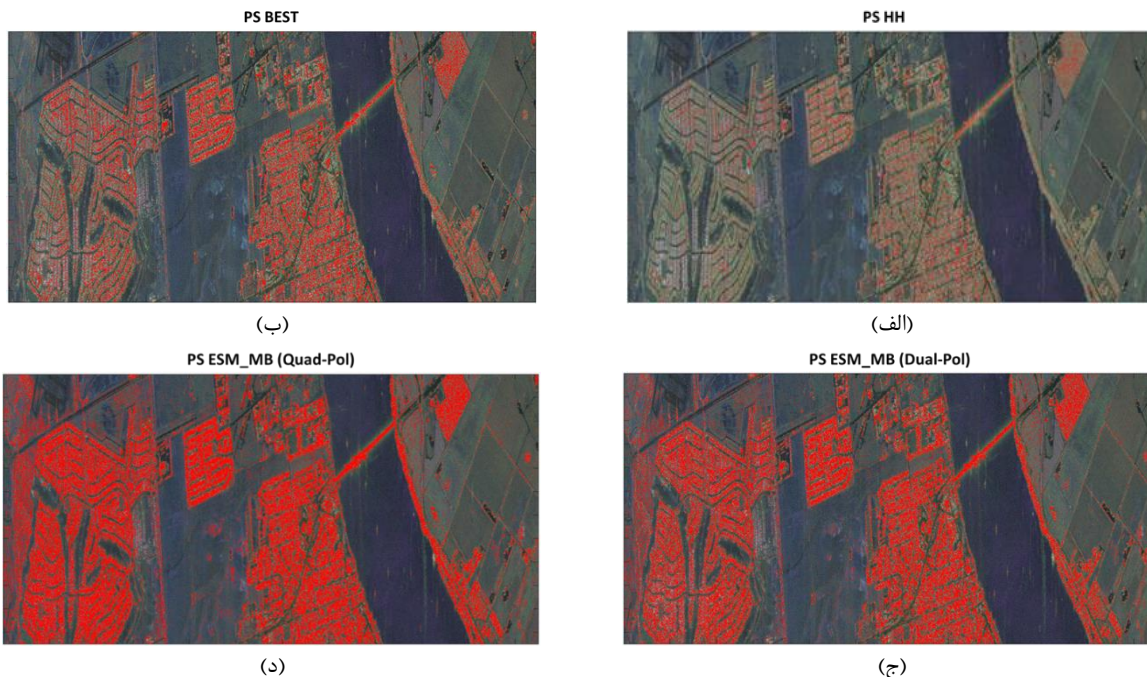
جدول ۴- درصد پیکسل‌های انتخاب شده برای کانال‌های مختلف، معیار دامنه مینا، با در نظر گرفتن حدآستانه ۰،۳ برای D_A

کانال	درصد پیکسل‌ها
HH	٪۴،۳۱۷۹
HV	٪۴،۵۱۶۴
VV	٪۴،۵۱۳
HH-VV	٪۴،۲۸۷
HH+VV	٪۴،۵۳۵۶

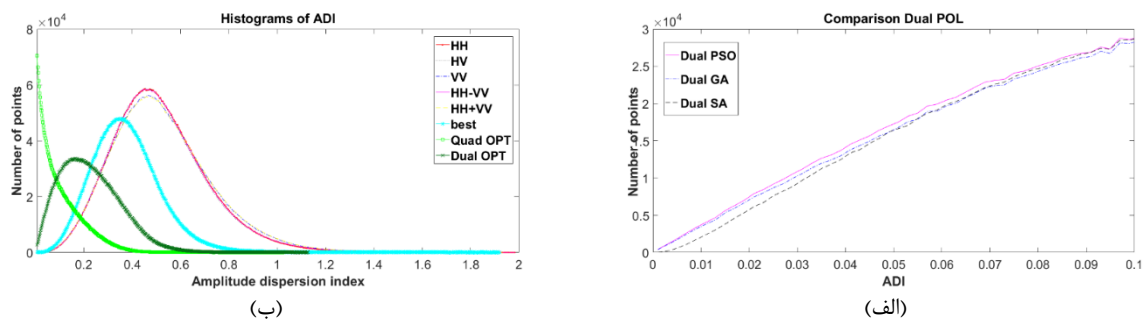
به منظور شناسایی و تعیین روش جستجو مناسب برای روش ESM_MB، با استفاده از داده دوکاناله مربوط (پائولی ۱ و ۲)، سه روش جستجو فرا ابتکاری رایج (الگوریتم شبیه سازی تبرید، الگوریتم ژنتیک و الگوریتم بهینه سازی توده ذرات) را در کمینه کردن شاخص پراکنندگی دامنه تست و بررسی کردیم. و نتایج حاصل از آنها را از نقطه نظر زمان محاسباتی و بهبود در تعداد PS های انتخابی مورد مقایسه قرار دادیم. الگوریتم های GA، SA و PSO با استفاده از محیط برنامه نویسی MATLAB مورد استفاده قرار گرفتند. مقادیر بهینه

نشان می‌دهد. همچنین بهترین مقدار برای این دو پارامتر با استفاده از الگوریتم ازدحام جمعی برای کمینه سازی معادله شاخص پراکندگی دامنه در حالت دو کاناله مشخص شده و بر روی طیف آنها نمایش داده شده است. شکل ۸ تعداد PS های انتخاب شده را برای هر روش نشان می‌دهد.

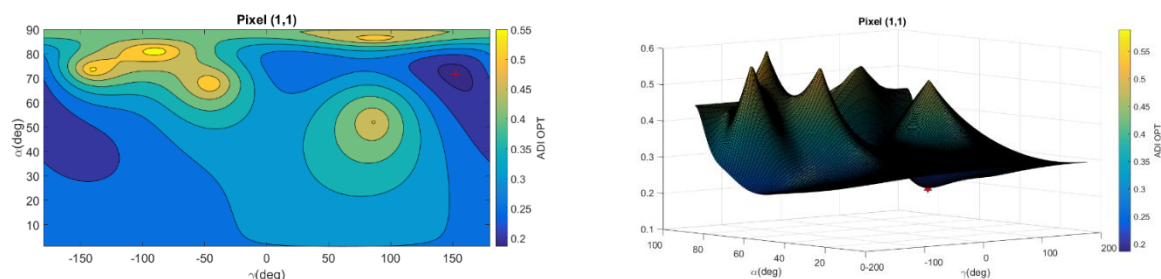
این رو برای بدست آوردن کانال بهینه در روش ESM_MB برای داده چهار کاناله از روش جستجوی PSO استفاده می‌شود. شکل ۶ (ب) هیستوگرام شاخص پراکندگی دامنه بدست آمده برای کانال‌های پلاریمتری مختلف را نشان می‌دهد (HH, HV, VV, پائولی و کانال‌های بهینه). شکل ۷ کلیه مقادیر پراکندگی دامنه ممکن برای یک پیکسل دلخواه را به صورت تابعی از دو زاویه α و ψ



شکل ۵- تراکم پراکنش کننده‌های دائمی انتخاب شده در منطقه مطالعاتی بر روی تصویر پائولی برای کانال‌های متفاوت (الف) HH (ب) Best ESM_MB(Dual-Pol) (ج) ESM_MB(Quad-Pol) (د)



شکل ۶- (الف) هیستوگرام مربوط به شاخص پراکندگی دامنه داده دو کاناله در روش ESM_MB با در نظر گرفتن روش‌های جستجوی فرا ابتکاری مختلف، (ب) هیستوگرام D_A برای کانال‌های HH, HV, VV, پائولی و روش‌های بهینه سازی پلاریمتری دامنه مینا



شکل ۷- مقادیر شاخص پراکندگی دامنه D_A بدست آمده برای یک پیکسل رندم بصورت تابعی از α و ψ

سازی دیگر در برابر مشکل بهینه محلی انعطاف بیشتری دارد.

■ **راحتی پیاده‌سازی و اجرا:** الگوریتم PSO از الگوریتم‌های دیگر از جمله ژنتیک و کلونی مورچه ساده‌تر است. اندازه جمعیت الگوریتم بهینه‌سازی PSO کمتر از GA بوده و از این جهت مقاردهی اولیه جمعیت در بکارگیری الگوریتم PSO ساده‌تر از سایر الگوریتم‌های بهینه‌سازی هوشمند است.

علیرغم وجود یکسری محدودیت و معایبی که الگوریتم PSO دارد، به دلیل مزایایی مانند مفهوم ساده و قابل درک، پیاده‌سازی آسان و همگرایی سریع نسبت به دیگر الگوریتم‌ها، PSO توجه زیادی را به خود جلب کرده است و کاربردهای زیادی در زمینه‌های مختلف دارد.

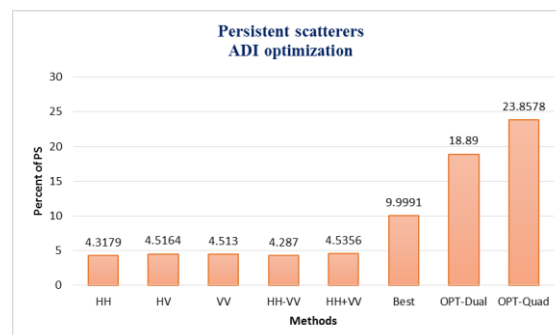
۵- نتیجه‌گیری و پیشنهادات

در این مقاله کاربرد روش‌های بهینه‌سازی پلاریمتری متداول در پردازش DInSAR ارزیابی شده‌اند. هدف این است که کیفیت فاز تداخل‌نگارها را با ترکیب مناسب از کانال‌های پلاریمتری موجود افزایش دهیم تا بوسیله الگوریتم‌های DInSAR موجود پردازش شوند. پشته‌ای از تداخل‌نگارهای بهبود داده شده اجازه می‌دهد که تعداد بیشتری از پیکسل‌ها را انتخاب کنیم. بنابراین، کیفیت فاز کلی پیکسل‌ها بهبود داده می‌شود، و در نتیجه باعث می‌شود نقشه‌های جابجایی مترکم‌تر و دقیق‌تر بدست آید.

روش‌های بهینه‌سازی پلاریمتری مختلف موجود در مطالعات پیشین تست شده است. ساده‌ترین روش توصیف شده در این مقاله به نام روش Best نام‌گذاری شده است که در این روش برای هر پیکسل تصویر، کانال پلاریمتری با بهترین مقدار در تخمین‌گر انتخاب می‌شود. علی‌رغم بهبود قابل توجه بدست آمده، این روش به صورت کامل از ظرفیت پلاریمتری استفاده نمی‌کند.

در این مطالعه همچنین به بررسی روش‌های پیشرفته‌تر نیز پرداخته شده است. روش ESM_MB قادر به دستیابی به بهترین مقادیر بهبود داده شده است. چون که این روش فضای کامل راه‌حل‌های احتمالی را مورد جستجو قرار می‌دهد، اما زمان محاسباتی بالایی دارد.

به صورت کلی ضعف اصلی استفاده از روش ESM_MB حجم محاسباتی بالای آن است. این



شکل ۸- پراکنش کننده‌های دائمی شناسایی شده با استفاده از کانال‌های مختلف در تخمین‌گر پراکنندگی دامنه $Da < 0.3$

۴- مقایسه و ارزیابی

به منظور مقایسه الگوریتم‌های مطرح شده برای کمینه‌سازی تابع هدف پراکنندگی دامنه (معادله ۱۴) از پارامترهای همگرایی، پایداری و زمان اجرای الگوریتم‌ها و... استفاده کرده‌ایم. نتایج حاصل در ادامه مطرح می‌شوند. الگوریتمی که در بهینه‌سازی ESM_MB مربوط به دو کاناله بهترین عملکرد را از خود نشان داده است، در داده‌های چهار کاناله مورد استفاده قرار گرفته است.

■ **بهره‌مندی از حافظه:** الگوریتم PSO دارای حافظه است. علی‌رغم آنکه چنین رفتار و عملکردی در دیگر الگوریتم‌های تکاملی مانند الگوریتم ژنتیک وجود ندارد و دانش قبلی مسئله یکباره با تغییر جمعیت از بین می‌رود، در این الگوریتم هر ذره از اطلاعات گذشته خود استفاده می‌کند.

■ **همگرایی:** سرعت همگرایی یک الگوریتم، برتری آن الگوریتم را نسبت به الگوریتم دیگر نشان می‌دهد. هر سه الگوریتم در نهایت همگرا شدند. نتایج نشان می‌دهد که الگوریتم PSO سرعت همگرایی بالاتری نسبت به دو الگوریتم دیگر دارد. در الگوریتم PSO، اعضای جمعیت با هم ارتباط دارند و از طریق تبادل اطلاعات، به حل مسئله می‌رسند از سرعت همگرایی بالایی برخوردار می‌باشد. PSO یک تکنیک بهینه‌سازی است که هر یک از ذرات سعی می‌کنند به سمتی حرکت کنند که بهترین تجربه‌های شخصی و گروهی در آن نقاط روی داده است.

■ **انعطاف پذیری در حل مشکل بهینه محلی:** الگوریتم PSO با توجه به بهره‌گیری از تعداد فراوان ذرات ازدحام کننده نسبت به استراتژی‌های بهینه-

MB_ بیشترین بهبود را با افزایشی در حدود ۶۳ درصد نسبت به داده تک کاناله فراهم می‌کند. همچنین الگوریتم Best یک بهبود خوبی را فراهم کرده و نسبت به روش ESM_MB حجم و زمان محاسباتی کمتری دارد. در روش‌هایی که بر مبنای شاخص پراکندگی دامنه هستند (full resolution)، روش ESM_MB بهترین روش اجرایی با افزایش تراکم PS در حدود ۴/۳ برابر، برای مجموعه دو کاناله و افزایش ۶ برابری برای چهار کاناله نسبت به داده تک کاناله HH است.

محدودیت تا حد زیادی در معیار کوهرنس مبنا با استفاده از راه حل تحلیلی و در معیار دامنه مبنا با ترکیب یک coarse grid از کمینه سراسری و الگوریتم PSO بهبود می‌یابد. در نتیجه بردارهای تصویر بهینه بسیار سریع‌تر پیدا می‌شوند. برای کلیه حالات نتایج نشان دهنده بهبود قابل ملاحظه ای در تعداد پیکسل‌های دائمی انتخاب شده نسبت به حالت تک پلاریمتری هستند. در تکنیک‌هایی که بر اساس انتخاب بوسیله میانگین کوهرنسی (توان تفکیک کاهش یافته) هستند، روش ESM-

مراجع

- [1] G. Franceschetti and R. Lanari, Synthetic aperture radar processing. CRC press, 1999.
- [2] I. H. Woodhouse, Introduction to microwave remote sensing. CRC press, 2005.
- [3] S. Cloude, Polarisation: applications in remote sensing. Oxford University Press, 2010.
- [4] J.-S. Lee and E. Pottier, Polarimetric radar imaging: from basics to applications. CRC press, 2009.
- [5] A. Marino, "Trace Coherence: A New Operator for Polarimetric and Interferometric SAR images," IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, vol. 55, no. 4, pp. 2326-2339, 2017.
- [6] Z. Li, W. Feng, Z. Xu, P. Cross, and J. Zhang, "The 1998 Mw 5.7 Zhangbei-Shangyi (China) earthquake revisited: A buried thrust fault revealed with interferometric synthetic aperture radar," Geochemistry, Geophysics, Geosystems, vol. 9, no. 4, 2008.
- [7] Z. Lu, T. Masterlark, and D. Dzurisin, "Interferometric synthetic aperture radar study of Okmok volcano, Alaska, 1992–2003: Magma supply dynamics and postemplacement lava flow deformation," Journal of Geophysical Research: Solid Earth, vol. 110, no. B2, 2005.
- [8] J. Fernández et al., "Detection of displacements on Tenerife Island, Canaries, using radar interferometry," Geophysical Journal International, vol. 160, no. 1, pp. 33-45, 2005.
- [9] O.-I. Kwoun, Z. Lu, C. Neal, and C. Wicks, "Quiescent deformation of the Aniakchak Caldera, Alaska, mapped by InSAR," Geology, vol. 34, no. 1, pp. 5-8, 2006.
- [10] Y. Fialko, "Interseismic strain accumulation and the earthquake potential on the southern San Andreas fault system," Nature, vol. 441, no. 7096, p. 968, 2006.
- [11] S. Samsonov, K. F. Tiampo, and J. B. Rundle, "Application of DInSAR-GPS optimization for derivation of three-dimensional surface motion of the southern California region along the San Andreas fault," Computers & Geosciences, vol. 34, no. 5, pp. 503-514, 2008.
- [12] V. Akbari and M. Motagh, "Improved ground subsidence monitoring using small baseline SAR interferograms and a weighted least squares inversion algorithm," IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, vol. 9, no. 3, pp. 437-441, 2012.
- [13] V. Akbari, "Multitemporal analysis of multipolarization synthetic aperture radar images for robust surface change detection," Ph.D. dissertation, Dept. Phys. Technol, Univ. Tromsø. Norway, Jun.2013.
- [14] M. Ghanbari, V. Akbari, A. A. Abkar, and M. R. Sahebi, "Minimum-Error thresholding for unsupervised change detection in multilook polarimetric SAR images," Journal of Geomatics Science and Technology, vol. 5, no. 2, pp. 17-29, 2015.
- [15] H. A. Zebker and J. Villasenor, "Decorrelation in interferometric radar echoes," IEEE Transactions on geoscience and remote sensing, vol. 30, no. 5, pp. 950-959, 1992.
- [16] R. Iglesias, D. Monells, X. Fabregas, J. J. Mallorqui, A. Aguasca, and C. Lopez-Martinez, "Phase quality optimization in polarimetric differential SAR interferometry," IEEE transactions on geoscience and remote sensing, vol. 52, no. 5, pp. 2875-2888, 2014.
- [17] A. Ferretti, C. Prati, and F. Rocca, "Permanent scatterers in SAR interferometry," IEEE Transactions on geoscience and remote sensing, vol. 39, no. 1, pp. 8-20, 2001.
- [18] A. Hooper, P. Segall, and H. Zebker, "Persistent scatterer interferometric synthetic aperture radar for crustal deformation analysis, with application to Volcán Alcedo, Galápagos," Journal of Geophysical Research: Solid Earth, vol. 112, no. B7, 2007.

- [19] O. Mora, R. Lanari, J. Mallorquí, P. Berardino, and E. Sansosti, "A new algorithm for monitoring localized deformation phenomena based on small baseline differential SAR interferograms," in Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2002. IGARSS'02. 2002 IEEE International, 2002, vol. 2, pp. 1237-1239: IEEE.
- [20] A. Ferretti, C. Prati, and F. Rocca, "Nonlinear subsidence rate estimation using permanent scatterers in differential SAR interferometry," IEEE Transactions on geoscience and remote sensing, vol. 38, no. 5, pp. 2202-2212, 2000.
- [21] A. Hooper, H. Zebker, P. Segall, and B. Kampes, "A new method for measuring deformation on volcanoes and other natural terrains using InSAR persistent scatterers," Geophysical research letters, vol. 31, no. 23, 2004.
- [22] A. Sowter, L. Bateson, P. Strange, K. Ambrose, and M. F. Syafiudin, "DInSAR estimation of land motion using intermittent coherence with application to the South Derbyshire and Leicestershire coalfields," Remote Sensing Letters, vol. 4, no. 10, pp. 979-987, 2013.
- [23] S. Vajedian, M. Motagh, and F. Nilfouroushan, "StaMPS improvement for deformation analysis in mountainous regions: Implications for the Damavand volcano and Mosha fault in Alborz," Remote Sensing, vol. 7, no. 7, pp. 8323-8347, 2015.
- [24] R. Lanari, O. Mora, M. Manunta, J. J. Mallorquí, P. Berardino, and E. Sansosti, "A small-baseline approach for investigating deformations on full-resolution differential SAR interferograms," IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, vol. 42, no. 7, pp. 1377-1386, 2004.
- [25] O. Mora, J. J. Mallorqui, and A. Broquetas, "Linear and nonlinear terrain deformation maps from a reduced set of interferometric SAR images," IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, vol. 41, no. 10, pp. 2243-2253, 2003.
- [26] A. Ferretti, C. Prati, and F. Rocca, "Permanent scatterers in SAR interferometry," in Geoscience and Remote Sensing Symposium, 1999. IGARSS'99 Proceedings. IEEE 1999 International, 1999, vol. 3, pp. 1528-1530: IEEE.
- [27] P. Berardino, G. Fornaro, R. Lanari, and E. Sansosti, "A new algorithm for surface deformation monitoring based on small baseline differential SAR interferograms," IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, vol. 40, no. 11, pp. 2375-2383, 2002.
- [28] A. Ferretti, A. Fumagalli, F. Novali, C. Prati, F. Rocca, and A. Rucci, "A new algorithm for processing interferometric data-stacks: SqueeSAR," IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, vol. 49, no. 9, pp. 3460-3470, 2011.
- [29] V. D. Navarro-Sanchez, J. M. Lopez-Sanchez, and F. Vicente-Guijalba, "A contribution of polarimetry to satellite differential SAR interferometry: Increasing the number of pixel candidates," IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, vol. 7, no. 2, pp. 276-280, 2010.
- [30] V. D. Navarro-Sanchez and J. M. Lopez-Sanchez, "Subsidence monitoring using polarimetric persistent scatterers interferometry," in Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS), 2011 IEEE International, 2011, pp. 1083-1086: IEEE.
- [31] V. D. Navarro-Sanchez and J. M. Lopez-Sanchez, "Improvement of persistent-scatterer interferometry performance by means of a polarimetric optimization," IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, vol. 9, no. 4, pp. 609-613, 2012.
- [32] V. D. Navarro-Sanchez, J. M. Lopez-Sanchez, and L. Ferro-Famil, "Polarimetric approaches for persistent scatterers interferometry," IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, vol. 52, no. 3, pp. 1667-1676, 2014.
- [33] M. Esmaeili and M. Motagh, "Improved Persistent Scatterer analysis using Amplitude Dispersion Index optimization of dual polarimetry data," ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, vol. 117, pp. 108-114, 2016.
- [34] M. Esmaeili, M. Motagh, and A. Hooper, "Application of Dual-Polarimetry SAR Images in Multitemporal InSAR Processing," IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, vol. 14, no. 9, pp. 1489-1493, 2017.
- [35] S. Samsonov and K. Tiampo, "Polarization phase difference analysis for selection of persistent scatterers in SAR interferometry," IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, vol. 8, no. 2, pp. 331-335, 2011.
- [36] K. F. Tiampo, P. J. Gonzalez, and S. S. Samsonov, "Results for aseismic creep on the Hayward fault using polarization persistent scatterer InSAR," Earth and Planetary Science Letters, vol. 367, pp. 157-165, 2013.
- [37] T. R. Lauknes, Y. Larsen, H. Johnsen, and T. Eltoft, "Characterization of coherent scatterers in natural terrain using SAR polarimetry," in Science and Applications of SAR Polarimetry and Polarimetric Interferometry, 2007, vol. 644.
- [38] S. R. Cloude and K. P. Papathanassiou, "Polarimetric SAR interferometry," IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, vol. 36, no. 5, pp. 1551-1565, 1998.
- [39] M. Neumann, L. Ferro-Famil, and A. Reigber, "Multibaseline polarimetric SAR interferometry coherence optimization," IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, vol. 5, no. 1, pp. 93-97, 2008.
- [40] E. Colin, C. Titin-Schnaider, and W. Tabbara, "An interferometric coherence optimization method in radar polarimetry for high-resolution imagery," IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, vol. 44, no. 1, pp. 167-175, 2006.