

ارزیابی کارایی روش های محلی و غیر محلی در برآورد ماتریس کواریانس تداخل سنجی سری تصاویر راداری و تخمین ارتفاع مولفه های اصلی با بیشینه احتمال

رقیه زمانی^۱، مسعود مشهدی حسینعلی^{۲*}

^۱ دانشجوی کارشناسی ارشد ژئودزی - دانشکده مهندسی نقشه برداری - دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی
zamani@email.kntu.ac.ir

^۲ دانشیار گروه ژئودزی - دانشکده مهندسی نقشه برداری - دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی
hossainali@kntu.ac.ir

چکیده

امروزه تهیه مدل های ارتفاعی رقومی و اطلاعات دقیق از ساختار ارتفاعی، به عنوان یک عنصر اصلی در ارزیابی پارامتر های منطقه مورد مطالعه به شمار می آید. توصیف و شناسایی پراکنش گر های حجمی در مناطق شهری، همچون ساختمان ها و سایر عوارض دست ساز بشر، اهمیت ویژه ای در بحث درک ساختار، حوزه های مدیریتی، کاهش خسارات ناشی از سوانح طبیعی همچون زلزله و فرسایش عوارض و بررسی میزان تغییرات دارد. روش های تداخل سنجی که مبنای آن ها استفاده از سری تصاویر میکروویو راداری است دارای دقت به مراتب بالاتری نسبت به تداخل سنجی کلاسیک، در بحث تهیه مدل های ارتفاعی رقومی و بررسی تغییرات هستند. قابلیت اصلی این روش ها، تخمین دقیق ماتریس کواریانس بین داده های مشاهداتی می باشد که بر اساس انتخاب پیکسل های همسایه در روش های محلی همچون boxcar و انتخاب پیکسل های غیر همسایه در روش های غیر محلی همچون روش NLSAR که با استفاده از معیار فاصله Wishart، دارای ویژگی های مشابه با پیکسل مد نظر هستند، تخمین زده شده و نتایج حاصل از آن ها مورد آنالیز و مقایسه قرار می گیرند و به منظور بهبود مدل ارتفاعی رقومی تولید شده با دقت یک متر و شناسایی دقیق تر منطقه مورد مطالعه، حل مسئله Layover از طریق آنالیز مولفه های اصلی ماتریس کواریانس برآورد شده انجام می گیرد، سپس با حل یک مسئله کمینه سازی، ارتفاع با بیشینه احتمال برای مکانیزم های اصلی باز پراکنش تخمین زده می شود. استفاده از سری تصاویر میکروویو راداری، علاوه بر ارائه مدل ارتفاعی رقومی با دقت بالاتر، قابلیت کاهش پیچیدگی های موجود در پروسه تداخل سنجی تصاویر SAR، همچون بازبازی فاز^۱ را دارا هستند.

واژگان کلیدی: تداخل سنجی سری تصاویر راداری، مدل ارتفاعی رقومی، برآورد ماتریس کواریانس، پراکنش گر های پایدار، boxcar
NLSAR.

* نویسنده رابط

^۱ Phase Unwrapping

۱- مقدمه

امروزه تولید مدل های ارتفاعی رقومی با دقت بالا، اهمیت ویژه ای در حوزه های مدیریت شهری، پروژه های مهندسی و فعالیت های میدانی دارد. همچنین به منظور مقابله و کاهش خسارات ناشی از سوانح طبیعی همچون زلزله، فرسایش عوارض و مدیریت بحران سیل و شناسایی مناطق پر خطر، نیاز به مدل های ارتفاعی رقومی با دقت بالا کاملاً محسوس می باشد.

تکنیک تداخل سنجی تصاویر SAR^۱، به عنوان یک ابزار کارآمد در تولید نسل های مختلف مدل های ارتفاعی رقومی مورد استفاده قرار می گیرد. تداخل سنجی تصاویر SAR در حالت کلاسیک تنها از دو تصویر که با زوایای متفاوتی اخذ شده اند استفاده می کند، با استفاده از دو تصویر SAR یک تداخل نما تولید می شود و از اختلاف فاز تصاویر که فاز تداخل سنجی خوانده می شود [۱]، اطلاعات ارتفاعی استخراج می شوند. باید توجه داشت که تداخل سنجی تصاویر راداری علاوه بر استفاده به عنوان ابزاری قدرتمند جهت برآورد ارتفاع و تغییر شکل ها، دارای مشکلاتی اساسی همچون پیچیدگی عملیات بازیابی ابهام فاز^۲ و اعوجاجات ارتفاعی که به دلیل اثرات اتمسفری اتفاق می افتند، می باشد. این مشکلات منجر به محدود شدن کارایی های تداخل سنجی راداری (INSAR) و کاهش دقت نقشه های ارتفاعی رقومی می شوند، در حالیکه در چارچوب تداخل سنجی سری تصاویر راداری^۳ با توجه به این که در این قالب بیش از یک تداخل نما از منطقه ای یکسان قابل تولید است، این مشکلات قابل حل می باشند [۲، ۳]. تداخل سنجی سری تصاویر راداری از جهت انجام خودکار عملیات بازیابی ابهام فاز و بازسازی مدل ارتفاعی رقومی (DEM) منطقه با دقت بالا، منحصر به فرد می باشد.

تمرکز این مقاله بر به کار گیری دسته داده های تصاویر SAR به عنوان ورودی چارچوب تداخل سنجی سری تصاویر راداری، با هدف تولید مدل ارتفاعی رقومی با دقت بالا می باشد. برای این منظور تجزیه و تحلیل و مقایسه بین روش های مختلف پردازش تداخل سنجی سری تصاویر راداری با استفاده از داده های یکسان که از استادیوم

Gabon،Mondah موجود در قاره آفریقا تهیه شده اند، انجام می شود.

به منظور دستیابی به نتایج رضایت بخش در این روش ها، در گام اول برآورد ماتریس کووریانس سری داده های راداری انجام می گیرد. تخمین ماتریس کووریانس با روش های محلی و غیر محلی انجام می شود، در روش های محلی همچون Boxcar، یک پنجره با ابعاد ثابت به مرکزیت پیکسل انتخابی در نظر گرفته می شود ولی در این روش وضعیت همگون بودن منطقه در پیکسل های همسایگی بررسی نمی شود، لذا این روش در مناطق غیر همگون منجر به نتایج با دقت پایین می شود [۴].

در روش های غیر محلی^۴ برآورد ماتریس کووریانس همچون روش NLSAR، پیکسل های غیر همسایگی بر اساس میزان شباهت ویژگی های آماری به پیکسل انتخاب شده، از طریق معیار فاصله Wishart تعیین می شوند [5] و به هر پیکسل بر اساس میزان شباهت با پیکسل انتخابی، وزن خاصی تعلق می گیرد [۶].

از ماتریس های کووریانس برآورد شده، مقادیر دامنه و فاز تداخل نما ها قابل استخراج هستند، اگرچه در تداخل سنجی کلاسیک تنها از اطلاعات فاز تداخل نما جهت برآورد ارتفاع استفاده می شود ولی در تداخل سنجی سری تصاویر راداری تمرکز بر استفاده از تمامی اطلاعات موجود در ماتریس کووریانس، اعم از مقادیر دامنه و فاز تداخل نما ها می باشد. برآورد ارتفاع برای مناطق پیچیده، همچون منطقه مورد مطالعه که شامل استادیوم ورزشی Angondjé در حومه شهر لیبرویل می باشد، به دلیل وقوع پدیده Layover مسئولیتی پر چالش است. پدیده Layover یا هم پوشانی عوارض مربوط به پیکسل هایی می باشد که حاوی بازپراکنش ها از عوارضی با ارتفاع های متفاوت و فاصله های رنج مایل یکسان می باشد که بر یک پیکسل ثبت شده اند. جهت رفع این خطا، آنالیز مولفه های اصلی ماتریس کووریانس، با توجه به رویکرد CEASAR انجام می گیرد و با در اختیار داشتن اطلاعات دامنه و فاز ماتریس های کووریانس برآورد شده و به کارگیری تکنیک قدرتمند بیشینه احتمال^۵ اطلاعات ارتفاعی دقیق مکانیزم های اصلی بازپراکنش محاسبه می شوند.

⁴ Non-Local

⁵ Maximum Likelihood

¹ INSAR

² Phase Unwrapping

³ Multi-baseline SAR Interferometry

۲- اصول تداخل سنجی راداری

هر تصویر راداری با روزه ترکیبی (SAR) از دو بخش دامنه و فاز تشکیل شده است، به طوری که بخش دامنه بیانگر انرژی و شدت سیگنال های بازگشتی و بخش فاز بیانگر فاصله هدف تا سنجنده می باشد. در تداخل سنجی کلاسیک تصاویر SAR، دو تصویر با زوایای متفاوت از منطقه اخذ می شوند و هر تصویر با دو بخش حقیقی و موهومی می تواند به صورت زیر نوشته شود [۷]:

$$X_i = |x_i| \exp \left[j \left(\frac{4\pi R_i}{\lambda + \phi_0} \right) \right] \quad (1)$$

که در این رابطه؛ $|x_i|$ ، R_i ، λ و ϕ_0 به ترتیب مقادیر دامنه تصویر i ، فاصله رنج مایل، طول موج استفاده شده و فاز اولیه می باشند. پس از هم مرجع شدن دو تصویر، تداخل نما برای هر دو پیکسل نظیر در زوج تصویر به صورت زیر شکل می گیرد [۷]:

$$I = X_1 \cdot X_2^\dagger = |x_1 \cdot x_2| \exp \left[j \left(\frac{4\pi \Delta R}{\lambda} \right) \right] \quad (2)$$

$$= A \exp(j\phi_{int})$$

به طوریکه؛ I ، X_1 ، X_2^\dagger و ΔR به ترتیب برابر با تداخل نمایی ایجاد شده، تصویر یک که از رابطه (۱) می تواند به دست آید، مزدوج مختلط تصویر دوم، اختلاف در فاصله رنج مایل و فاز تداخل سنجی^۵ می باشند. پس از استخراج فاز تداخل نما و حذف عوامل موثر از آن، همچون اثر فاز زمین مسطح^۶، فاز ناشی از جابه جایی، نویز و اتمسفر، تنها از اطلاعات فاز تداخل نما جهت برآورد ارتفاع استفاده می شود.

۲-۱- مبانی تداخل سنجی سری تصاویر راداری

تداخل سنجی بر مبنای استفاده از سری تصاویر مایکروویو راداری راداری دقت به مراتب بالاتری نسبت به روش های کلاسیک تداخل سنجی هستند، همچنین با توجه به امکان ایجاد بیش از یک تداخل نما، قابلیت کاهش پیچیدگی های موجود در پروسه تداخل سنجی همچون بازیابی فاز را دارا می باشند و امکان بازسازی مدل های ارتفاعی رقومی با دقت بالا را فراهم می سازند [۲، ۳]. برای این منظور سری داده های تداخل سنجی جمع آوری می شوند، با فرض تهیه D تصویر از منطقه مورد مطالعه و هم مرجع نمودن آن ها، با انتخاب هر دو تصویر از بین D تصویر موجود یک تداخل نما قابل تولید است، لذا به تعداد $D(D-1)/2$ تداخل نما قابل تولید می باشد. به ازای هر پیکسل i یک بردار باز پراکنش $D \times 1$ بعدی با مقادیر مختلط شکل می گیرد [۸]:

$$y_i = \begin{bmatrix} y_i^{(1)}(r, x) \\ y_i^{(2)}(r, x) \\ \vdots \\ y_i^{(D)}(r, x) \end{bmatrix}_{D \times 1} \quad (3)$$

لازم به ذکر است که از مقادیر فاز هر پیکسل، اثر فاز زمین مسطح باید حذف شود. در تداخل سنجی سری تصاویر راداری به دلیل شکل گیری بیش از یک تداخل نما، به منظور ایجاد تمامی تداخل نماهای قابل تولید با استفاده از هر دو تصویر متفاوت برای هر پیکسل، ماتریس کووریانس متعلق به هر پیکسل شکل می گیرد به این ترتیب تمامی تداخل نما های قابل تولید برای هر پیکسل با استفاده از D تصویر، در ماتریس کووریانس مربوط به آن پیکسل قرار می گیرند، لذا ماتریس کووریانس پیکسل i ، ماتریسی $D \times D$ به فرم $\Sigma_i = E[y_i y_i^\dagger]$ خواهد بود، به طوری که E نشان دهنده امید ریاضی می باشد [۸]. این ماتریس کووریانس می تواند به صورت زیر تجزیه شود [۸، ۹]:

$$\Sigma_i = R_i^{1/2} \cdot \Gamma_i \cdot R_i^{1/2} \quad (4)$$

⁵ Interferometric Phase

⁶ Flat Earth

⁷ Scattering Vector

¹ Synthetic Aperture Radar

² Slant Range

³ Interferogram

⁴ Conjugate

رابطه، طول خطوط مبنای تداخل سنجی می باشد. با برآورد ماتریس کووریانس با استفاده از داده های جمع آوری شده و نرمال سازی آن در قالب ماتریس کوهرنسی و همچنین با تشکیل ماتریس کوهرنسی از طریق مدل، که با استفاده از رابطه (۴) تعیین می شود، به منظور برآورد ارتفاع با بیشینه احتمال از تمامی اطلاعات موجود در ماتریس کووریانس استفاده می شود. برای این منظور، مدل تخمین بیشینه احتمال به ماتریس کووریانس برازش داده شده و ارتفاع هر پیکسل با بیشینه احتمال محاسبه می شود. بر این اساس یک تابع هزینه^۴ با هدف تخمین ارتفاع با بیشینه احتمال و کمینه سازی تغییرات ارتفاعی ناشی از نویز موجود در داده ها به صورت زیر شکل می گیرد [۸]:

$$\text{Cost}_F = \text{tr} \left[\Gamma_i^{-1}(h_i) \cdot \hat{\Gamma}_i^{(WML)} \right] \quad (۸)$$

به طوری که $\Gamma_i^{-1}(h_i)$ ماتریس کوهرنسی مدل، به دست آمده از رابطه (۴) و $\hat{\Gamma}_i^{(WML)}$ ماتریس کوهرنسی برآورد شده با استفاده از داده ها می باشد. عبارت tr بیانگر محاسبه تریس^۵ ماتریس است. با کمینه سازی تابع هزینه تعریف شده ارتفاع پیکسل مد نظر با بیشینه احتمال به دست می آید:

$$\hat{h} = \arg \min_h (\text{Cost}_F) \quad (۹)$$

هدف در این بهینه سازی، یافتن پروفیل ارتفاعی می باشد که ارتفاع پیکسل ها با بیشینه احتمال محاسبه شود و همچنین تغییرات پروفیل ارتفاعی با هدف کمینه سازی خطاهای بین سری داده های تداخل سنجی و عبور از مسئله کلاسیک بازیابی ابهام فاز انجام شود. برای این منظور از میان پروفیل های مختلف ارتفاعی، پروفیلی انتخاب می شود که شرایط بالا را برقرار سازد [۸].

۲-۲- برآورد ماتریس کووریانس با روش های محلی Boxcar و غیر محلی NLSAR

که در این رابطه R_i یک ماتریس قطری می باشد به طوریکه درایه های روی قطر اصلی آن برابر با $[R_i]_{a,a} = r_a = E \left\{ |[g_i]_a|^2 \right\}$ می باشند که نشان دهنده شدت انرژی رسیده به پیکسل i در تصویر a ام هستند و Γ_i نیز ماتریس کوهرنسی^۱ پیکسل i می باشد که از رابطه زیر تعیین می شود [۸]:

$$\Gamma_i = \begin{pmatrix} 1 & s_{1,2} & \cdots & s_{1,D} \\ s_{1,2}^* & 1 & \cdots & s_{2,D} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ s_{1,D}^* & s_{2,D}^* & & 1 \end{pmatrix} \quad (۵)$$

به طوری که برای هر مولفه $s_{a,b}$ داریم:

$$s_{a,b} = \frac{E \left\{ [g_i]_a \cdot [g_i]_b^* \right\}}{\sqrt{r_a r_b}} \quad (۶)$$

$$= \gamma_{a,b} \exp(j\varphi_{a,b})$$

که $s_{a,b}$ نشان دهنده کوهرنسی بین هر دو تصویر a و b . $\gamma_{a,b}$ اندازه کوهرنسی و $\varphi_{a,b}$ بیانگر فاز تداخل سنجی می باشد [۸]. به عبارتی ماتریس کوهرنسی شامل مقادیر نرمالایز شده می باشد، همچنین این ماتریس متقارن می باشد. فاز تداخل سنجی $\varphi_{a,b}$ در قالب تابعی همچون $f_{a,b}$ ، مرتبط با ارتفاع h می باشد که این تابع با توجه به طول خطوط مبنای تداخل سنجی قابل محاسبه می باشد [8]:

$$\varphi_{a,b} = f_{a,b}(h) = \alpha_{a,b} \cdot h$$

$$= \frac{4\pi B \perp(a,b)}{\lambda \rho_0 \sin \theta} h \quad (۷)$$

که در این رابطه؛ $B \perp(a,b)$ مولفه ی عمود بر راستای رنج خط مبنای بین دو موقعیت تصویربرداری a و b . λ طول موج مورد استفاده، ρ_0 فاصله تا صحنه تصویر و θ زاویه دید می باشند [۸]. تنها کمیت متغیر در این

⁴ Cost-Function

⁵ Trace

¹ Coherence Matrix

² Baseline

³ Orthogonal baseline

تعیین پیکسل هایی با خواص مشابه با پیکسل مد نظر، در کل تصویر می گردد.

به طور دقیق تر، NLSAR با استفاده از پنجره ای مربعی با ابعاد ثابت به مرکزیت هر پیکسل x ، برای ماتریس های کووریانس موجود در آن پنجره میانگین گیری انجام می دهد و یک ماتریس کووریانس R_p برای پیکسل مرکزی x ، تعیین می کند. همچنین با در نظر گرفتن یک پنجره جستجو با ابعاد بزرگتر به مرکزیت پیکسل x ، و محاسبه ماتریس های کووریانس هر یک از پیکسل های موجود در پنجره جستجو، میزان شباهت خواص آماری هر یک از پیکسل های موجود در این پنجره با پیکسل مرکزی x را از طریق تابع شباهت Wishart، مورد بررسی قرار می دهد [۴]:

$$l_G(C'_1, C'_2) = \frac{|C'_1|^{L'} \cdot |C'_2|^{L'}}{\left| \frac{1}{2}(C'_1 + C'_2) \right|^{2L'}} \quad (11)$$

این رابطه میزان شباهت بین هر دو ماتریس کووریانس تجربی C'_1 و C'_2 را تعیین می کند و L' نیز بیانگر تعداد پیکسل هایی می باشد که برای محاسبه ماتریس کووریانس مورد استفاده قرار گرفته اند. مقادیر بزرگ برای فاکتور l_G نشان دهنده شباهت بالای توزیع این دو ماتریس کووریانس می باشد [۴]. شباهت هر پیکسل x' با پیکسل مرکزی x ، به مقدار وزن $w(x, x')$ برای هر پیکسل x' تبدیل می شود. پیکسل های دارای مقادیر وزن بزرگ پیکسل های دارای شباهت بالا با پیکسل مرکزی، و پیکسل های با مقادیر وزن ناچیز، پیکسل های با شباهت کم به پیکسل مرکزی می باشند [۹]. پس از تعیین پیکسل های مشابه، برای ماتریس های کووریانس این پیکسل ها یک میانگین گیری وزن دار (WSME) با استفاده از وزن اختصاص داده شده به هر پیکسل، انجام می شود و ماتریس کووریانس R_p برای پیکسل x ، با مقداری دقیق تر به روز و جایگزین می شود [۴، ۹]:

در تمامی روش های تداخل سنجی چند بعدی با استفاده از تصاویر راداری تهیه شده با روزه مصنوعی (SAR)، مرحله برآورد ماتریس کووریانس برای هر پیکسل، یکی از مراحل پیچیده و بسیار مهم می باشد. در این مقاله ماتریس کووریانس سری داده های تداخل سنجی راداری با روش های محلی و غیر محلی برآورد می شوند و به آنالیز این ماتریس ها و نتایج حاصل از آن ها پرداخته خواهد شد.

در روش های محلی همچون روش Boxcar، میانگین گیری مکانی^۱ در یک پنجره مربعی با ابعاد ثابت به مرکزیت پیکسل انتخابی^۲ از پیکسل های همسایگی انجام می گیرد [۶]. برای این منظور اگر منطقه همگون باشد، به این معنی که پیکسل i و پیکسل های همسایگی آن دارای خواص آماری و ویژگی های ارتفاعی مشابهی باشند، جهت تخمین ماتریس کووریانس پیکسل i ، می توان میان گیری محلی از مقادیر y_i, y_i^\dagger ، در پنجره همسایگی پیکسل مد نظر انجام داد [۶]:

$$\hat{\Sigma}_i^{(box)} = \frac{1}{N} \sum_{j \in w_i} y_j y_j^\dagger \quad (10)$$

به طوری که در این رابطه، $\hat{\Sigma}_i^{(box)}$ ، N به ترتیب برابر با ماتریس کووریانس برآورد شده برای پیکسل i به روش Boxcar و تعداد نمونه های موجود در پنجره w_i می باشند. باید توجه داشت در این روش تنها میانگین گیری مکانی از پیکسل های همسایگی، بدون در نظر گرفتن وضعیت همگونی منطقه و توزیع آماری پیکسل های همسایگی انجام می شود، لذا این روش در مناطق غیر همگون منجر به تولید نتایج با دقت پایین می گردد [۴، ۸].

روش های غیر محلی جهت برآورد ماتریس کووریانس حول محور شناسایی و یافتن پیکسل هایی با خواص آماری مشابه با پیکسل مد نظر فعالیت می کنند. در فیلترینگ غیر محلی، یکی از موثر ترین روش ها، رویکرد NLSAR می باشد که در [۴] معرفی شده است و در چارچوب این مقاله نیز، رویکرد NLSAR مورد توجه می باشد. ایده ی رویکرد NLSAR به این صورت می باشد که محاسبات را تنها محدود به پیکسل های همسایگی نمی کند بلکه به دنبال

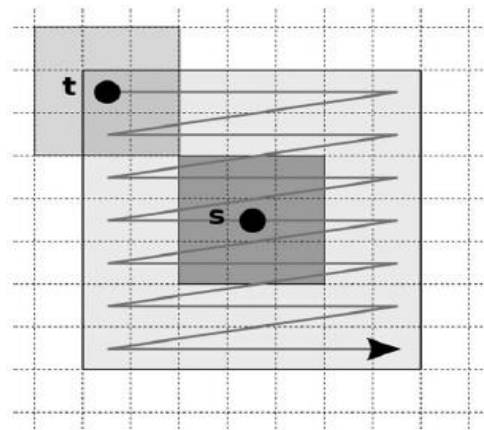
³ Weighted Sample Mean Estimator

¹ Spatial Filtering

² Homogenous

$$\hat{\Sigma}^{NL}(x) = \frac{\sum_{x'} w(x, x') C(x')}{\sum_{x'} w(x, x')} \quad (12)$$

که $\hat{\Sigma}^{NL}(x)$ ماتریس کووریانس برآورده شده برای پیکسل x با استفاده از روش NLSAR، $w(x, x')$ وزن اختصاص داده شده به هر پیکسل x' بر اساس میزان شباهت به پیکسل x و $C(x')$ ماتریس کووریانس پیکسل x' می باشد.



شکل ۱- عملکرد روش NLSAR؛ پنجره ای با ابعاد 3×3 و پنجره جستجو با ابعاد 7×7 برای پیکسل s در نظر گرفته شده است. پس از تعیین ماتریس کووریانس هر پیکسل موجود در پنجره جستجو، همچون پیکسل t ، میزان شباهت هر یک از پیکسل های موجود در این پنجره با پیکسل s ، از طریق تابع شباهت Wishart بررسی می شود و در نهایت از آن پیکسل ها جهت برآورد نهایی ماتریس کووریانس پیکسل s ، استفاده می گردد [۱۰].

۲-۲- آنالیز مولفه های اصلی (PCA)^۱

برآورد ماتریس کووریانس برای مناطق پیچیده همچون مناطق شهری و جنگلی مسئولیتی پر چالش می باشد [۵]. در حقیقت مناطق شهری و جنگلی به دلیل وقوع پدیده روی هم افتادگی آعوارض، مناطق پیچیده به شمار می آیند. پدیده روی هم افتادگی (Layover)، مربوط به پیکسل هایی می باشد که حاوی بازپراکنش ها از تارگت هایی با ارتفاع های متفاوت اما فاصله های رنج مایل یکسان هستند و ترکیبی از این باز پراکنش ها از نقاط با فاصله رنج های یکسان، بر روی یک پیکسل ثبت می شوند [۱۱]. در تداخل سنجی کلاسیک امکان رفع این خطا وجود ندارد و ارتفاع

برآورد شده برای هر پیکسل، میانگینی از ارتفاع عوارض تصویر شده در آن پیکسل می باشد لذا به حد کافی دارای اعتبار نیست. از آنجاییکه در مناطق شهری و جنگلی، پدیده Layover به دفعات اتفاق می افتد، لذا در چارچوب تداخل سنجی با سری تصاویر راداری به دنبال حذف خطای Layover و جداسازی مکانیزم بازپراکنش ها با ارتفاعات مختلف می باشیم. برای این منظور نیاز است ماتریس کووریانس برآورد شده برای هر پیکسل، به مولفه های اصلی تجزیه شود. بردار ها و راستاهای ویژه ماتریس کووریانس که دارای بیش ترین ضریب اهمیت می باشند، بیانگر توزیع بخش قابل توجهی از داده ها در آن راستاها هستند [۱۲]. ایده ی تجزیه ماتریس کووریانس به منظور بهبود پردازش تداخل سنجی سری تصاویر راداری، در قالب رویکرد CEASAR در [۱۱] مطرح شد که چارچوب این روش در این مقاله نیز دنبال شده است. در [۱۱] ماتریس کووریانس برآورده شده به روش Boxcar، به مولفه های اصلی تجزیه شده است. در این مقاله کارایی NLSAR در برآورد ماتریس کووریانس و تجزیه آن به مولفه های اصلی و برآورد ارتفاع مربوط به مکانیزم بازپراکنش های مختلف مورد بررسی قرار گرفته است.

به منظور آنالیز مولفه های اصلی (PCA)، بردار های ویژه متناظر با بزرگترین مقادیر ویژه ماتریس کووریانس برآورد شده، با استفاده از سری داده های راداری شناسایی می شوند. بردار های ویژه u_i ها، مولفه های اصلی خوانده می شوند که به وسیله مقادیر ویژه λ_i ها، وزن دار شده اند. لذا برای ماتریس کووریانس تخمین شده داریم [۱۱]:

$$\hat{C} = \sum_{i=1}^D \lambda_i u_i u_i^\dagger \quad (13)$$

به طوری که \hat{C} ماتریس کووریانس برآورد شده با اندازه $D \times D$ و D تعداد تصاویر SAR می باشد. تمامی مقادیر ویژه ماتریس کووریانس \hat{C} ، مقادیر حقیقی بوده و به ترتیب صعودی به صورت $\lambda_1 \geq \lambda_2 \geq \dots \geq \lambda_D$ می باشند و بردار های ویژه متناظر با مقادیر ویژه، متعامد و به صورت $\{u_1, u_2, \dots, u_D\}$ هستند [۱۱]. جهت انتخاب k مولفه اصلی، کافی است k بردار ویژه متناظر با مقادیر ویژه مرتب

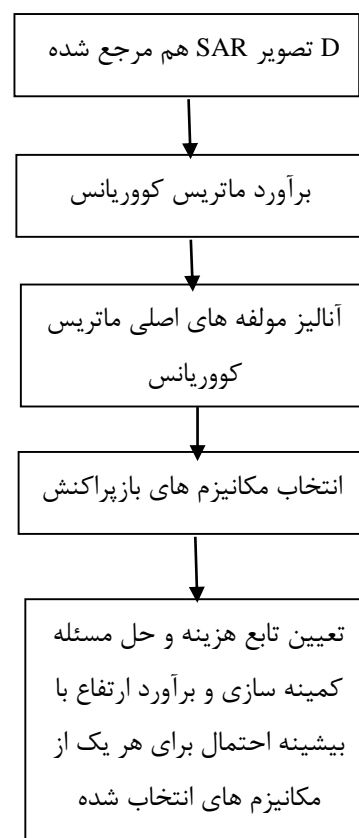
² Layover

¹ Principal Component Analysis

۱۱:۲۶:۰۸ تا ۱۱:۳۱:۳۸، با سرعت متوسط 220 m/s اخذ شده اند و از طریق وب سایت (<http://uavsar.jpl.nasa.gov>) در اختیار این پژوهش قرار گرفته است. این تصاویر راداری مختلط تک نگر^۴ (SLC) در باند L با طول موج $23/84$ سانتی متر و با پلاریزاسیون HH تهیه شده اند. همچنین این تصاویر دارای قدرت تفکیک مکانی یک متر می باشند ($1/67$ متر در راستای رنج و $0/6$ متر در راستای آزیموت). تصاویر پردازش شده در این مقاله، دارای 970 پیکسل در راستای آزیموت و 390 پیکسل در راستای رنج هستند. محدوده مورد مطالعه این مقاله، در طول جغرافیایی $0^{\circ}31'27''$ شمالی و عرض جغرافیایی $9^{\circ}23'52''$ ، شامل استادیوم ورزشی Angondjé در حومه شهر لیبرویل^۵ در کشور گابن قرار دارد. این استادیوم با ابعاد 36000 متر مربع، در سال 2011 توسط یک شرکت چینی ساخته شد. ارتفاع واقعی استادیوم برابر با $42/500$ متر می باشد که در ماموریت هواپرد AfriSAR در سال 2016 تعیین شد. پروژه AfriSAR با همکاری ناسا و آژانس فضایی اروپا و گابن با به کارگیری ابزارهای UAVSAR و LVIS انجام گرفت و ارتفاع تعیین شده از این ماموریت جهت ارزیابی مورد استفاده قرار می گیرد [13]. تصویر نوری گوگل ارث و بخش دامنه تصویر راداری محدوده مورد مطالعه، در شکل ۳ نمایش داده شده است. بنا به اخذ ۹ تصویر راداری مورد استفاده در یک روز، این تصاویر کمترین ناهمدوسی زمانی و مکانی را دارا می باشند و لذا برای ایجاد مدل ارتفاعی رقومی دقیق (یک متری) مناسب می باشند.

در بخش اول این پژوهش ارزیابی کارایی روش های Boxcar و NLSAR در برآورد ماتریس کووریانس بین داده های مشاهداتی و تاثیرات آن ها بر مدل های ارتفاعی برآورد شده، بررسی شده است. برای این منظور ابتدا با در اختیار داشتن ۹ تصویر SAR، ماتریس کووریانس 9×9 به روش Boxcar با در نظر گرفتن پنجره ای مربعی با مرکزیت پیکسل مد نظر، بر مبنای رابطه (۱۰) برآورد شده است. لذا به منظور بررسی حالت های مختلف، پنجره هایی با ابعاد 7×7 ، 11×11 ، 15×15 و 19×19 در نظر گرفته شد. به جهت بصری سازی، فاز تداخل نماهای ماتریس کووریانس

شده به صورت صعودی انتخاب شوند و با تشکیل ماتریس کووریانس هر یک از این مولفه ها از طریق رابطه (۱۳) و با استفاده از اطلاعات موجود در ماتریس های کووریانس مولفه ها، به استخراج اطلاعات ارتفاعی هر یک از مولفه ها پرداخت [۱۱].



شکل ۲- مراحل برآورد ارتفاع از طریق پردازش تداخل سنجی سری تصاویر راداری (SAR)

۳- داده های مورد استفاده و روش کار

در این مطالعه، سری تصاویر راداری هواپرد UAVSAR متعلق به آزمایشگاه JPL زیر نظر ناسا^۱، از منطقه مونداه در کشور گابن^۳ در قاره آفریقا، مورد استفاده قرار گرفته است. تصاویر از نوع راداری پهلونگر با دریچه مصنوعی و جهت پهلونگر به سمت چپ می باشد. از منطقه مطالعاتی مربوطه تعداد ۹ تصویر در دسترس می باشد که در تاریخ ششم مارچ 2016 ، از ساعت هماهنگ جهانی (UTC)

⁴ Single Look Complex

⁵ Libreville

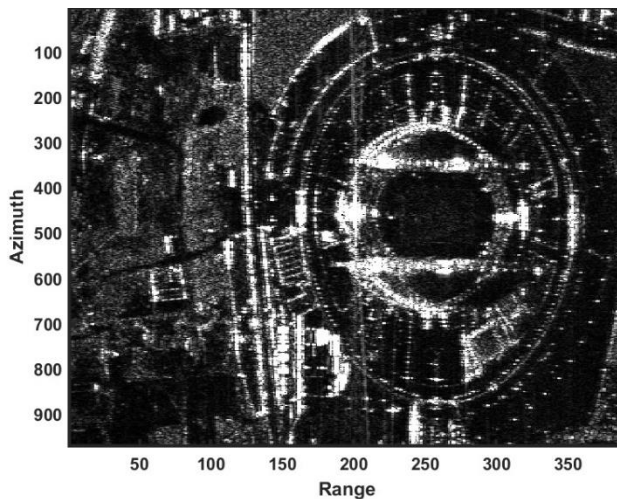
¹ Jet Propulsion Laboratory

² NASA

³ Mondah, Gabon

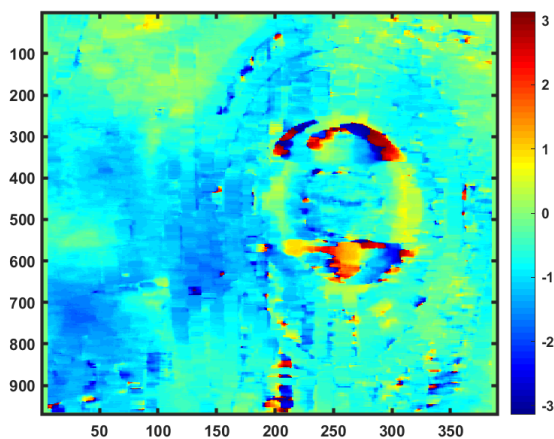


(ب)

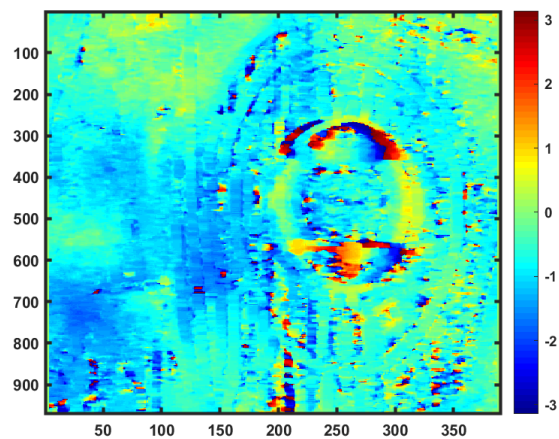


(الف)

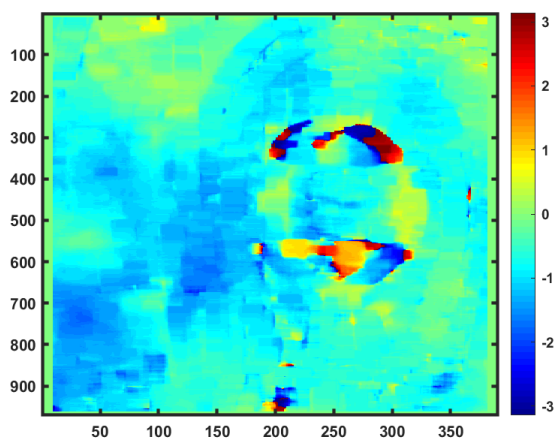
شکل ۳- منطقه مطالعاتی شامل محدوده استادیوم Angondjé؛ تصویر دامنه منطقه مورد مطالعه (الف)؛ تصویر نوری تهیه شده از گوگل ارث



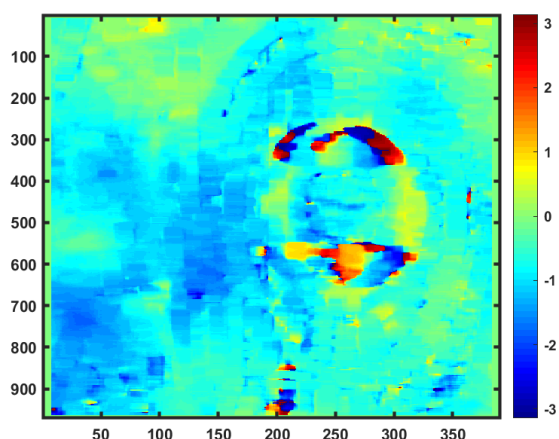
(ب)



(الف)



(د)



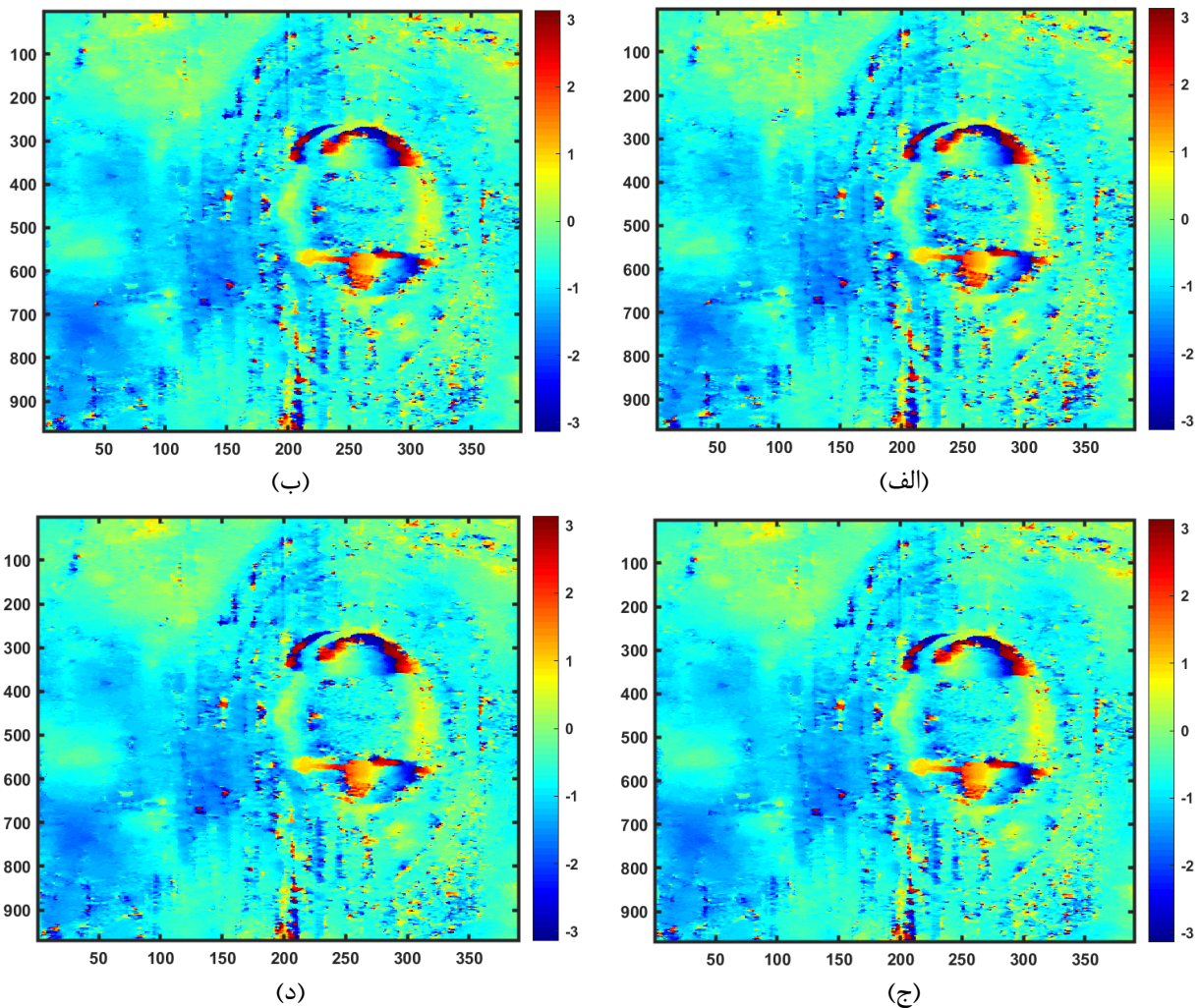
(ج)

شکل ۴- فاز تداخل نما برآورد شده بین یک جفت داده از منطقه مطالعاتی به روش Boxcar با استفاده از پنجره های با ابعاد 7×7 (الف)؛ 11×11

(ب) 11×11 ؛ (ج) 15×15 ؛ (د) 19×19

از منطقه مطالعاتی پیاده سازی گردید که با استفاده از دو پنجره، پیکسل های مشابه نه تنها در همسایگی پیکسل مد نظر، بلکه در کل تصویر جستجو شده و از طریق تابع شباهت Wishart، میزان شباهت هر پیکسل تعیین شده و بر اساس آن تمامی پیکسل ها وزن دار شده و در برآورد ماتریس کووریانس داده های مشاهداتی دخالت داده شده اند. در شکل ۵، فاز تداخل نماهای ماتریس کووریانس برآورد شده به روش NLSAR نمایش داده شده است که به ترتیب حالت های مختلف بیانگر اعمال پنجره هایی با ابعاد (۷ و ۱۳)، (۱۱ و ۲۱)، (۱۵ و ۳۱) و (۱۹ و ۳۵) برای هر یک از دو پنجره مورد استفاده در این روش می باشند. استفاده از روش NLSAR موجب حفظ ویژگی های تصویر می گردد در حالیکه در فیلترینگ به روش Boxcar، جزئیات مکانی به طور قابل توجهی کاهش می یابند.

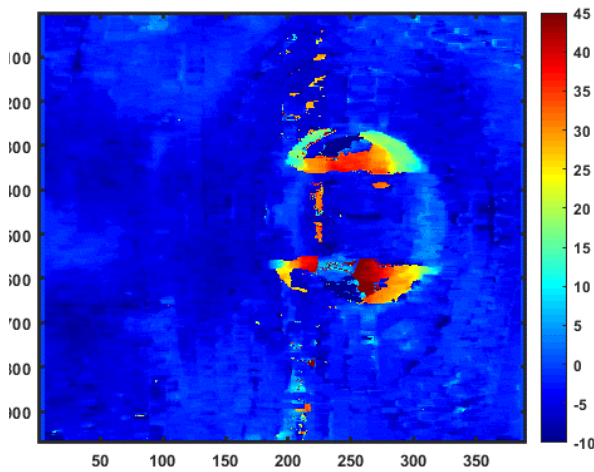
برآورد شده به روش Boxcar، بین یک جفت تصویر در شکل ۴ نمایش داده شده است. در حالت (الف) پنجره ای به ابعاد ۷×۷ به مرکزیت هر یک از پیکسل ها در نظر گرفته شده و بدون توجه به خواص آماری پیکسل های موجود در آن پنجره، تعداد ۴۹=۷×۷ پیکسل همسایگی انتخاب شده و میانگین مقادیر y_i, y_j نظیر پیکسل های موجود در این پنجره، به عنوان ماتریس کووریانس پیکسل مرکزی در نظر گرفته شده است. حالت های (ب) و (ج) و (د) نیز به طور مشابه، با ابعاد پنجره های متفاوت اجرا شده اند. افزایش سایز پنجره منجر به کاهش قدرت تفکیک مکانی و از دست رفتن جزئیات می شود. به منظور بررسی خواص آماری پیکسل های تصویر و یافتن پیکسل هایی با خواص مشابه جهت برآورد دقیق تر ماتریس کووریانس، فیلترینگ غیر محلی NLSAR نیز بر روی داده های موجود



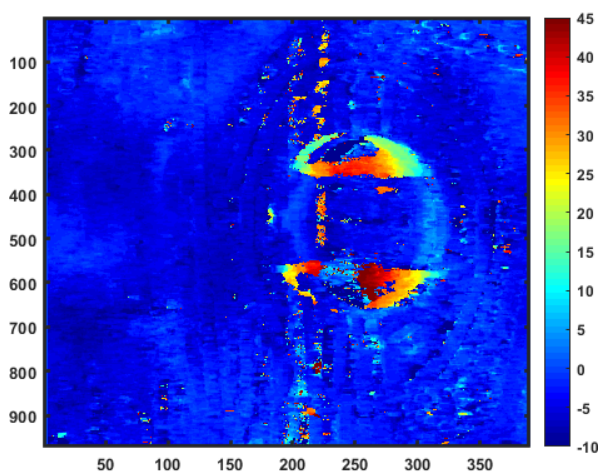
شکل ۵- فاز تداخل نما برآورد شده بین یک جفت داده از منطقه مطالعاتی به روش NLSAR با استفاده از پنجره هایی با ابعاد: (الف) (۷ و ۱۳)، (ب) (۱۱ و ۲۱)، (ج) (۱۵ و ۳۱)، (د) (۱۹ و ۳۵).

استفاده از این روش، انتخاب پنجره بهینه جهت میانگین گیری مکانی در تخمین تداخل نماها امری بسیار حساس می باشد. در برآورد ماتریس کواریانس با روش NLSAR، با توجه به آنالیز فاز تداخل نما در پنجره های مختلف و با توجه به شباهت چهار پنجره به هم، در شکل ۵، می توان حساسیت بسیار ناچیز این روش به ابعاد پنجره مورد استفاده، به دلیل انتخاب پیکسل های با بیش ترین میزان شباهت به طور غیر محلی، را نتیجه گرفت در حالی که یافتن پنجره بهینه در تخمین تداخل نما در روش Boxcar همواره امری حساس محسوب می شود، همچنین در روش NLSAR، ضمن تخمین تداخل نما با استفاده از پیکسل های دارای خواص آماری مشابه، جزویات تصویر حتی با افزایش سایز پنجره ها، حفظ شده و اطلاعات تصویر از دست نمی روند.

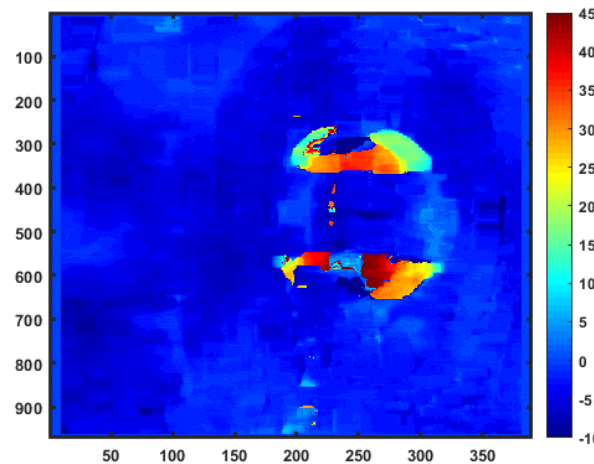
با به کارگیری ماتریس های کواریانس برآورد شده به دو روش Boxcar و NLSAR برای هر پیکسل تصویر، ارتفاع هر پیکسل با بیشینه احتمال با روش ML از طریق برازش مدل تخمین بیشینه احتمال به ماتریس های کواریانس و کمینه سازی تغییرات ارتفاعی ناشی از نویز موجود در داده ها، تخمین زده شد بطوریکه نقشه های ارتفاعی حاصله، با به کارگیری هر یک از ماتریس های کواریانس برآورد شده، در شکل ۶ و ۷ نمایش داده شده است. همانطور که در شکل ۴ مشخص است در برآورد ماتریس کواریانس با روش Boxcar، انتخاب ابعاد پنجره بسیار حائز اهمیت می باشد چراکه در صورت انتخاب پنجره با ابعاد کوچک (قسمت الف)، تداخل نماها تحت تاثیر فرکانس های بالا و نویز قرار دارند و در صورت انتخاب پنجره ای با ابعاد بزرگ (قسمت د)، تقریباً تمامی جزئیات از بین رفته اند، لذا در هنگام



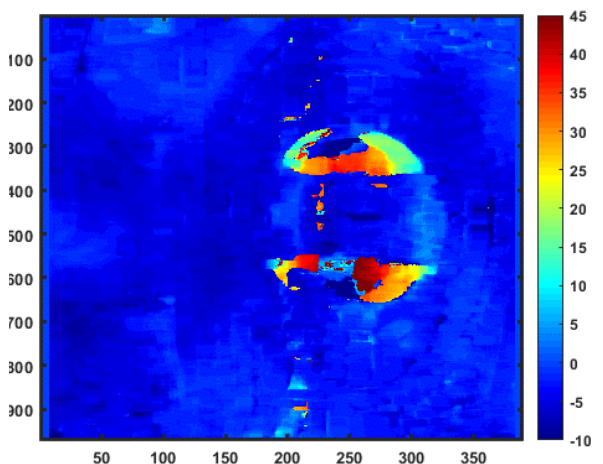
(ب)



(الف)



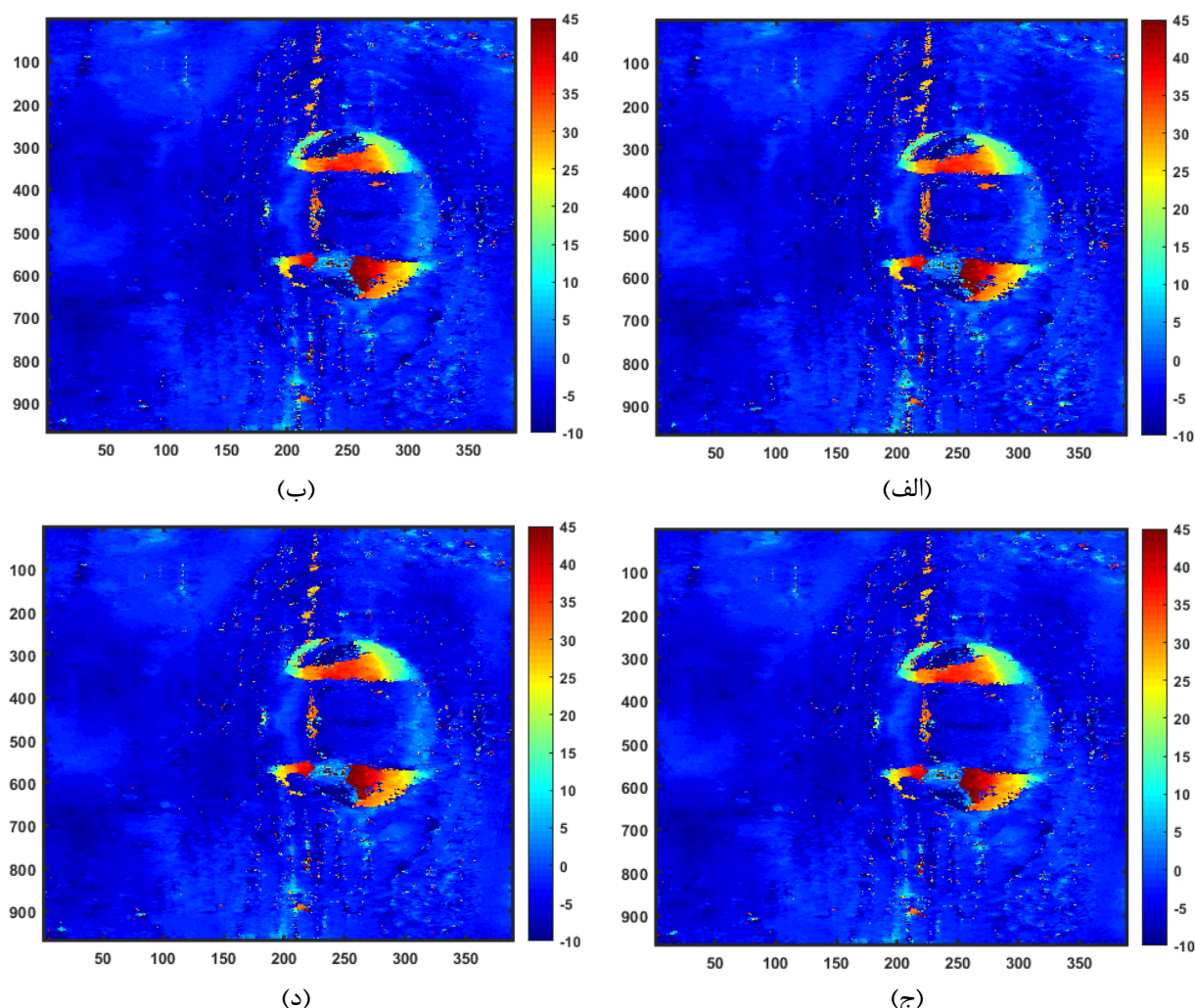
(د)



(ج)

¹ Maximum Likelihood

شکل ۶- نقشه های ارتفاعی به دست آمده با به کارگیری هر یک از ماتریس های کووریانس برآورد شده به روش Boxcar در هر یک از حالت های استفاده از پنجره های با ابعاد؛ (الف) 7×7؛ (ب) 11×11؛ (ج) 15×15؛ (د) 19×19



شکل ۷- نقشه های ارتفاعی به دست آمده با به کارگیری هر یک از ماتریس های کووریانس برآورد شده به روش NLSAR در هر یک از حالت های استفاده از پنجره هایی با ابعاد؛ (الف) (۷ و ۱۳)، (ب) (۱۱ و ۲۱)؛ (ج) (۱۵ و ۳۱)؛ (د) (۱۹ و ۳۵).

بررسی در جدول شماره ۱ قرار داده شده است، همانطور که پیداست ارتفاع میانگین به دست آمده از دو روش به اندازه ۱/۴۴ متر اختلاف دارند و شاخص پراکندگی با تعریف نسبت انحراف معیار مقادیر به میانگین، بیانگر پراکندگی کمتر در نتایج به دست آمده از روش NLSAR است و با توجه به اینکه ارتفاع تعیین شده برای استادیوم از این روش، به ارتفاع واقعی استادیوم که در پروژه AfriSAR با مقدار ۴۲/۵۰۰ متر تعیین گردیده [۱۳]، نزدیکی بیش تری دارد، لذا نتیجه ی تعیین شده با استفاده از روش NLSAR معتبر تر می باشد.

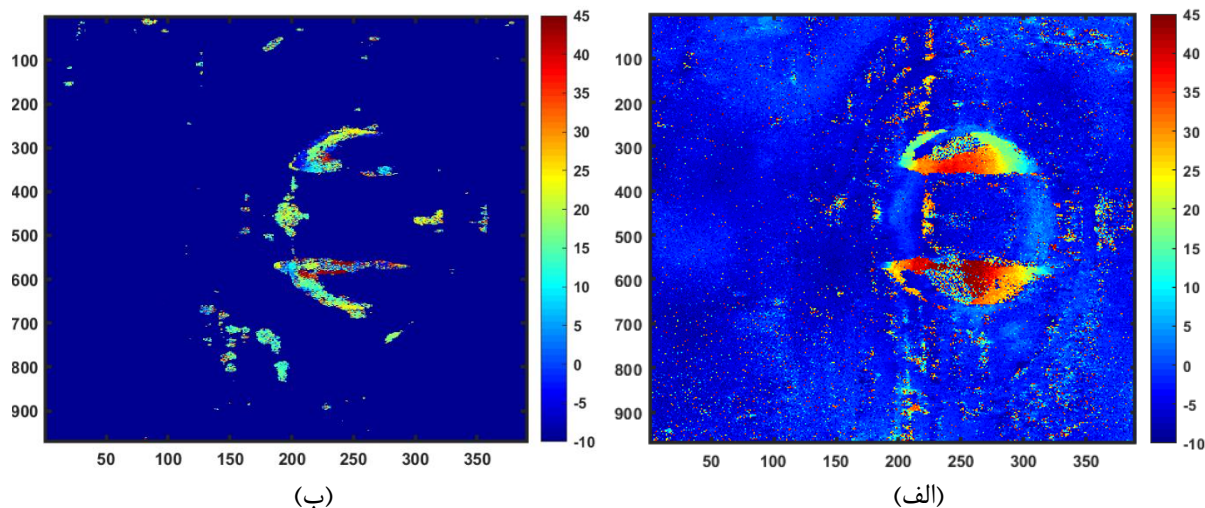
جهت ارزیابی و مقایسه ارتفاع های برآورد شده با به کار گیری دو روش Boxcar و NLSAR، به دلیل محدودیت دسترسی به داده، در هر یک از نقشه های ارتفاعی دو باکس از پیکسل ها، یکی بر روی زمین در قسمت وسط چمن استادیوم و دیگری در نقطه بالای سقف استادیوم در نظر گرفته شد. در هر یک از باکس ها میانگین ارتفاع پیکسل های مربوطه محاسبه گردید و از اختلاف این دو مقدار میانگین، ارتفاع استادیوم در هر یک از حالت ها محاسبه شد. لازم به ذکر است که هر مقدار در نقشه های ارتفاعی حاصله، بیانگر ارتفاع نسبی پیکسل ها می باشد. نتایج این

جدول ۱- مقایسه ارتفاع های تعیین شده با به کارگیری هر یک از دو روش Boxcar و NLSAR در هر یک از حالت ها

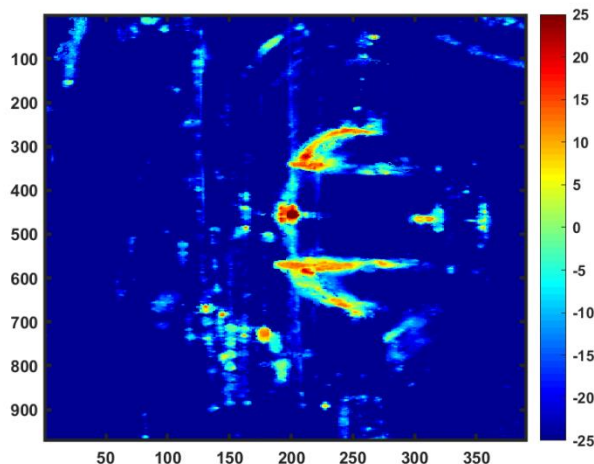
ابعاد پنجره های استفاده شده	روش Boxcar				روش NLSAR			
	۷×۷	۱۱×۱۱	۱۵×۱۵	۱۹×۱۹	(۷ و ۱۳)	(۱۱ و ۲۱)	(۱۵ و ۳۱)	(۱۹ و ۳۵)
ارتفاع استادیوم (متر)	۴۱/۲۴۰۰	۳۸/۸۰۰۰	۴۲/۲۴۰۰	۴۲/۱۲۰۰	۴۲/۴۸۰۰	۴۲/۸۰۰۰	۴۲/۴۴۰۰	۴۲/۴۴۰۰
میانگین ارتفاع های برآورد شده (متر)	۴۱/۱۰۰۰				۴۲/۵۴۰۰			
نسبت انحراف معیار به میانگین	۰/۰۳۸۹				۰/۰۰۴۱			

مسئله بیانگر این موضوع می باشد که در پیکسل مربوطه تنها یک مکانیزم پراکندگی غالب وجود دارد ولی در پیکسل هایی که Layover رخ داده است معمولا اولین و دومین مقدار ویژه مقادیر نزدیک به یکدیگر دارند، این مسئله به وضوح بیانگر حضور دو مولفه پراکندگی اصلی در آن پیکسل می باشد. برای این منظور، آنالیز مولفه های اصلی در منطقه مطالعاتی انجام شد و نقشه های ارتفاعی متناظر با نخستین و دومین مولفه های اصلی تعیین گردید که در شکل ۸ نمایش داده شده است. انتظار می رود پیکسل هایی که بازسازی ارتفاعی آن ها بر اثر پدیده Layover، به درستی انجام نشده، دارای دومین مقدار ویژه قابل توجهی باشند. برای این منظور نقشه دومین مقدار ویژه بررسی شده که در ۹ نمایش داده شده است. با بررسی نقشه ارتفاعی دومین مولفه اصلی (PC2) و نقشه مقدار ویژه دوم، همانطور که انتظار می رفت می توان دریافت بازسازی ارتفاعی پیکسل هایی که ارتفاع آن ها در نقشه ارتفاعی حاصل از نخستین مولفه اصلی (PC1) تعیین نشده، در نقشه ارتفاعی دومین مولفه اصلی انجام گرفته است که منجر به حل مسئله Layover گردید.

با دقت کردن در نقشه های ارتفاعی برآورد شده می توان دریافت بازسازی مدل های ارتفاعی در قسمت هایی از دو طرف سقف استادیوم انجام نشده و مدل های ارتفاعی تولیدی دارای نقص می باشند. دلیل این مشکل قرارگیری پراکنش گر هایی از زمین و سقف استادیوم در فاصله یکسان تا سنجنده می باشد. به طور دقیق تر، در هر یک از این دو نقطه، می توان یک بیضوی تعریف نمود که این دو در نمای قائم همپوشانی دارند. سیستم تصویر برداری رادار منجر به حرکت بیضوی بالایی به سمت رادار شده و نقطه تقاطع دو بیضوی ناحیه ای C شکل را می سازد [۱۱] که منجر به برابری فاصله دو پراکنش گر تا سنجنده می شود، لذا این دو پراکنش گر از زمین و سقف استادیوم بر روی یک پیکسل تصویر شده و به عبارتی دیگر، پدیده روی هم افتادگی عوارض یا Layover رخ داده است. جهت حل مسئله Layover، کارایی رویکرد CEASAR با جداسازی مولفه های اصلی بازپراکنش بر نقشه ارتفاعی برآورد شده با استفاده از ماتریس کووریانس تخمین زده شده با روش NLSAR، مورد بررسی قرار گرفت. برای این منظور آنالیز مولفه های اصلی ماتریس کووریانس برآورد شده به روش NLSAR انجام گرفت. بزرگترین مقادیر ویژه ماتریس کووریانس، مرتبط با مکانیزم های اصلی پراکندگی می باشند به طوری که نقشه های ارتفاعی مرتبط با نخستین و دومین مقادیر و بردار های ویژه ماتریس کووریانس، امکان شناسایی دقیق تر منطقه مورد مطالعه را فراهم می کنند. باید توجه داشت اگر برای پیکسلی، $\lambda_2 \gg \lambda_1$ باشد، این



شکل ۸- نقشه ارتفاعی متناظر با نخستین مولفه اصلی ماتریس کواریانس برآورد شده با روش NLSAR (الف)؛ نقشه ارتفاعی متناظر با دومین مولفه اصلی ماتریس کواریانس برآورد شده با روش NLSAR (ب)



شکل ۹- نقشه دومین مقادیر ویژه ماتریس کواریانس برآورد شده با روش NLSAR (در واحد دسی بل)

۴- نتیجه گیری

به ابعاد پنجره مورد استفاده حساس بود به طوریکه تغییر ابعاد پنجره منجر به نویزی شدن و یا از دست رفتن جزئیات تصویر می شد، در حالی که روش غیرمحلّی NLSAR جهت تخمین تداخل نما، ضمن به کارگیری پیکسل های با خواص آماری مشابه، توانایی حفظ جزئیات و اطلاعات تصویر را دارا بود. میانگین ارتفاع استادیوم با به کارگیری روش Boxcar، $41/100$ متر و با به کارگیری روش NLSAR، $42/5400$ متر برآورد شد که با توجه به ارتفاع واقعی استادیوم با مقدار $42/500$ متر که از اطلاعات به دست آمده از ماموریت AfriSAR تعیین شده است، نتایج حاصل از به کارگیری

در این مقاله، سری تصاویر راداری تهیه شده از استادیوم Angondjé در حومه شهر لیبرویل و کشورگابن راه، از طریق آنالیز تداخل سنّجی سری تصاویر راداری، تحت روش های محلّی و غیر محلّی مورد بررسی قرار دادیم. تصاویر راداری تهیه شده، تصاویر UAVSAR با قدرت تفکیک 1 متر راه، جهت تهیه مدل ارتفاعی رقومی منطقه با دقت یک متر مورد استفاده قرار دادیم و روش های محلّی و غیر محلّی Boxcar و NLSAR جهت برآورد ماتریس کواریانس و شکل گیری تداخل نما بین داده های مشاهداتی به کار گرفتیم. تخمین تداخل نما به روش محلّی Boxcar به شدت

مولفه اصلی، متناظر با مقدار ویژه دوم، برآورد کردیم و بهبود مدل ارتفاعی رقومی با حل مسئله Layover ممکن گردید و ارتفاع مکانیزم های اصلی بازپراکنش با بیشینه احتمال تخمین زده شد.

روش NLSAR، دارای دقت به مراتب بالاتری از نتایج حاصل از Boxcar داشت. در گام دوم از طریق آنالیز مولفه های اصلی، مشخص شد پیکسل هایی از تصویر تحت تاثیر پدیده Layover یا هم پوشانی عوارض قرار گرفته اند، لذا ارتفاع آن دسته از پیکسل ها را در نقشه ارتفاعی دومین

مراجع

- [1] Bamler, R. and P. Hartl, Synthetic aperture radar interferometry. *Inverse problems*, 1998. 14(4): p. R1.
- [2] Ferretti, A., et al. Multi-baseline interferometric techniques and applications. in *ERS SAR Interferometry*. 1997.
- [3] Fornaro, G., et al., Maximum likelihood multi-baseline SAR interferometry. *IEE Proceedings-Radar, Sonar and Navigation*, 2006. 153(3): p. 279-288.
- [4] Deledalle, C.-A., et al., NL-SAR: A unified nonlocal framework for resolution-preserving (Pol)(In) SAR denoising. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2015. 53(4): p. 2021-2038.
- [5] Schmitt, M., J.L. Schönberger, and U. Stilla, Adaptive covariance matrix estimation for multi-baseline InSAR data stacks. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2014. 52(11): p. 6807-6817.
- [6] Weissgerber, F., et al., *A Temporal Estimation of Entropy and Its Comparison With Spatial Estimations on PolSAR Images*. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2016. 9(8): p. 3809-3820.
- [7] Richards, M.A., A beginner's guide to interferometric SAR concepts and signal processing [aess tutorial iv]. *IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine*, 2007. 22(9): p. 5-29.
- [8] Ferraioli, G., et al., Parisar: Patch-based estimation and regularized inversion for multibaseline SAR interferometry. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2018. 56(3): p. 1626-163
- [9] Deledalle, C.-A., et al., Exploiting patch similarity for SAR image processing: the nonlocal paradigm. *IEEE Signal Processing Magazine*, 2014. 31(4): p. 69-78.
- [10] Deledalle, C.-A., L. Denis, and F. Tupin, NL-InSAR: Nonlocal interferogram estimation. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2010. 49(4): p. 1441-1452.
- [11] Fornaro, G., et al., CAESAR: An approach based on covariance matrix decomposition to improve multibaseline–multitemporal interferometric SAR processing. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2015. 53(4): p. 2050-2065.
- [12] Jackson, J.E., *A user's guide to principal components*. Vol. 587. 2005: John Wiley & Sons.
- [13] FATOYINBO, T., et al., AfriSAR: Mondah Forest Tree Species, Biophysical, and Biomass Data, Gabon, 2016. ORNL DAAC, 2018.

۱. Bamler, R. and P. Hartl, *Synthetic aperture radar interferometry*. Inverse problems, 1998. **14**(4): p. R1.
۲. Ferretti, A., et al. *Multi-baseline interferometric techniques and applications*. in *ERS SAR Interferometry*. 1997.
۳. *likelihood multi-baseline SAR interferometry*. IEE Proceedings- Fornaro, G., et al., *Maximum Radar, Sonar and Navigation*, 2006. **153**(3): p. 279-288.
۴. Deledalle, C.-A., et al., *NL-SAR: A unified nonlocal framework for resolution-preserving Geoscience and Remote Sensing*, 2015. **53**(4): *(Pol)(In) SAR denoising*. IEEE Transactions on p. 2021-2038.
۵. Schmitt, M., J.L. Schönberger, and U. Stilla, *Adaptive covariance matrix estimation for multi-baseline InSAR data stacks*. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2014. **52**(11): p. 68.
۶. Weissgerber, F., et al., *A Temporal Estimation of Entropy and Its Comparison With Spatial Estimations on PolSAR Images*. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 2016. **9**(8): p. 3809-3820.
۷. Richards, M.A., *A beginner's guide to interferometric SAR concepts and signal processing [aess tutorial iv]*. IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine, 2007. **22**(9): p. 5-29.
۸. Ferraioli, G., et al., *Parisar: Patch-based estimation and regularized inversion for multibaseline SAR interferometry*. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2018. **56**(3): p. 1626-1636.
۹. Deledalle, C.-A., et al., *Exploiting patch similarity for SAR image processing: the nonlocal paradigm*. IEEE Signal Processing Magazine, 2011. p. 69-78.
۱۰. Deledalle, C.-A., L. Denis, and F. Tupin, *NL-InSAR: Nonlocal interferogram estimation*. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2010. **49**(4): p. 1441-1452.
۱۱. Fornaro, G., et al., *CAESAR: An approach based on covariance matrix decomposition to improve multibaseline-multitemporal interferometric SAR processing*. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2015. **53**(4): p. 2050-2065.
۱۲. Jackson, J.E., *A user's guide to principal components*. Vol. 587. 2005: John Wiley & Sons.
۱۳. FATOYINBO, T., et al., *AfriSAR: Mondah Forest Tree Species, Biophysical, and Biomass Data, Gabon, 2016*. ORNL DAAC, 2018.