

این مقاله در دومین کنفرانس ملی مهندسی فناوری اطلاعات مکانی به عنوان مقاله برگزیده انتخاب شده است که پس از تکمیل، داوری مجدد و اخذ پذیرش در این شماره از نشریه به چاپ می‌رسد.

## بازیابی فاز تداخل سنجی راداری به کمک انتقال داده‌های نامنظم به فضای منظم

امین توکلی اصطهباناتی<sup>۱\*</sup>، مریم دهقانی<sup>۲</sup>

۱- کارشناسی ارشد، سنجش از دور، بخش مهندسی راه، ساختمان و محیط زیست، دانشکده مهندسی، دانشگاه شیراز، شیراز، ایران

۲- دانشیار، بخش مهندسی راه، ساختمان و محیط زیست، دانشکده مهندسی، دانشگاه شیراز، شیراز، ایران

تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۶/۰۸/۱۰ تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۷/۱۱/۱۹

### چکیده

یکی از مهم‌ترین و حساس‌ترین بخش‌های تکنیک تداخل سنجی رادار با روزهی مصنوعی، فرآیند بازیابی فازهای تداخل نما می‌باشد. مقدار فازهای تداخل سنجی در یک تداخل نما در بازه‌ی  $0$  تا  $2\pi$  مدوله شده‌اند که به منظور برآورد میزان جابجایی بایستی بازیابی شوند. در مرحله‌ی بازیابی فاز بسته به اینکه از روش متداول یا روش پراکنش کننده‌های پایدار استفاده شده باشد، داده‌ها به ترتیب به صورت منظم یا نامنظم در سطح تداخل نما پراکنده می‌شوند. یکی از راهکارهای بازیابی فاز در فضای نامنظم تبدیل فضای نامنظم به یک فضای منظم با استفاده از روش درونی‌یابی نزدیک‌ترین همسایگی است. در این مقاله الگوریتم کم‌هزینه‌ترین جریان به‌عنوان یک الگوریتم سراسری بازیابی فاز، سه الگوریتم بازیابی فاز به صورت موضعی در فضای منظم: حذف شاخه‌ها، واریانس مشتق فازها و حذف شاخه‌ها واریانس مشتق فازها معرفی شده‌اند. این الگوریتم‌ها بر روی داده‌های نامنظم واقعی ماهواره سنتینل ۱ مربوط به منطقه دشت سیرجان اعمال شده‌اند و نتایج آن‌ها با یکدیگر مقایسه شده است.

**کلیدواژه‌ها:** تداخل سنجی راداری، بازیابی فاز، سنتینل ۱.

\*نویسنده مکاتبه کننده: شیراز- میدان نمازی- دانشکده فنی و مهندسی ۱- بخش راه ساختمان و محیط زیست

تلفن: ۰۹۱۷۱۰۱۸۹۷۵

Email: AminTavakkoli.est@gmail.com

## ۱- مقدمه

تداخل سنجی راداری بر اساس ترکیب دو یا چند تصویر مختلط راداری که توسط آنتن‌ها در موقعیت‌ها یا زمان‌های مختلف اخذ شده‌اند، می‌باشد. از کاربردهای تکنیک تداخل سنجی راداری می‌توان به به‌دست آوردن توپوگرافی یا میزان جابجایی ناشی از فرونشست، زمین‌لغزش یا بلایای طبیعی اشاره کرد. در تکنیک تداخل سنجی تصاویر مختلط راداری که شامل دامنه و فاز موج برگشتی از عارضه به سمت سنجنده هستند با یکدیگر تلفیق می‌شوند و یک تداخل نما<sup>۱</sup> را تشکیل می‌دهند. مشاهدات تداخل سنجی مجموعه‌ای از فازها می‌باشد که بسته به اینکه از روش‌های تداخل سنجی متداول<sup>۲</sup> یا پراکنش‌کننده‌های پایدار<sup>۳</sup> (PS) استفاده شده باشد به ترتیب به صورت منظم یا نامنظم<sup>۴</sup> در سطح تصویر پراکنده شده‌اند. فازهای یک تداخل نما مقداری بین صفر و  $2\pi$  دارند که به این صورت قابل استفاده نمی‌باشند [۱].

بازیابی فاز<sup>۵</sup> که یکی از مراحل روش تداخل سنجی راداری است، فرآیندی است به منظور برآورد فازهای بدون ابهام<sup>۶</sup> از آرایه‌ای دو بعدی از مقدار فازهایی که بین صفر تا  $2\pi$  مدوله شده‌اند [۲]. در تمامی کاربردهای ذکر شده مقدار این فازهای بازیابی نشده<sup>۷</sup> (دارای ابهام) باید بازیابی شوند. تمامی الگوریتم‌های بازیابی فاز معمولاً بر این فرض استوار هستند که فازهای بازیابی شده صحیح در بیشتر مکان‌ها به آرامی تغییر می‌کنند یعنی مقادیر پیکسل‌های همسایه باید اختلاف فازی کمتر از نیم سیکل ( $\pi$  رادیان) داشته باشند (شرط نایکوئیست<sup>۸</sup>) [۳]. لیکن در اکثر

<sup>1</sup> Interferogram

<sup>2</sup> Conventional

<sup>3</sup> Persistent Scatterer (PS)

<sup>4</sup> Sparse

<sup>5</sup> Unwrapping

<sup>6</sup> Unwrapped

<sup>7</sup> Wrap

<sup>8</sup> Nyquist Theorem

تداخل نماها نقاطی وجود دارند که اختلاف فاز آن‌ها بیشتر از نیم سیکل است. هدف اصلی الگوریتم‌های بازیابی فاز شناسایی و تعیین دقیق محل این نقاط است.

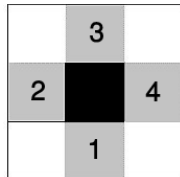
مجموعه‌ای از فازهای بازیابی شده حاوی اطلاعاتی هستند که در مجموعه فازهای بازیابی نشده وجود ندارند. بنابراین بازیابی فاز به صورت دقیق یک مسأله‌ی غیرممکن می‌باشد [۴]. با این وجود الگوریتم‌های متفاوتی تاکنون ارائه شده‌اند که در ادامه به معرفی و ارزیابی برخی از آن‌ها خواهیم پرداخت. در بخش دوم تعدادی از مهم‌ترین و کاربردی‌ترین روش‌های بازیابی فاز در فضای منظم و نحوه اعمال آن‌ها بر روی فضای نامنظم بیان خواهد شد. در بخش سوم نتایج اعمال الگوریتم‌های معرفی شده بر روی داده‌های نامنظم استخراجی از داده‌های ماهواره سنتینل<sup>۹</sup> ارائه شده‌اند. در بخش چهارم به منظور برآورد صحت فازهای بازیابی شده در نقاط انتخابی، مقادیر آن‌ها با مقادیر متناظر حاصل از روش تداخل سنجی متداول مقایسه شده است و در انتها، بخش پنجم به جمع‌بندی مباحث ارائه شده اختصاص داده شده است.

## ۲- بازیابی فاز

به‌طور کلی صرف‌نظر از نحوه‌ی توزیع نقاط، فازهای تداخل نما را می‌توان با دو رویکرد متفاوت بازیابی کرد: دسته‌ای که سعی بر بازیابی فاز تمام پیکسل‌ها به صورت کلی و یکجا دارند و دسته‌ی دوم که سعی بر حل مسأله به صورت محلی و موضعی دارند [۵]. در این بخش ابتدا سه مورد از روش‌های بازیابی موضعی فاز در فضای منظم معرفی شده‌اند. در ادامه به معرفی یکی از متداول‌ترین روش‌های بازیابی فاز به صورت کلی و یکجا می‌پردازیم و در انتها نحوه تبدیل یک فضای نامنظم به یک فضای منظم معرفی خواهد شد.

<sup>9</sup> Sentinel 1

که در آن  $\sigma_x^2$  و  $\sigma_y^2$  به ترتیب واریانس در جهت‌های آزیموت و رنج می‌باشد،  $N$  شامل چهار پیکسل کناری و  $k$  اندیس پیکسل مرکزی می‌باشد. قرارگیری چهار پیکسل کناری به همراه پیکسل مرکزی در شکل (۱) نمایش داده شده است.



شکل ۱: نحوه‌ی قرارگیری پیکسل‌ها. پیکسل مرکزی به رنگ سیاه و پیکسل‌های کناری به رنگ خاکستری نمایش داده شده‌اند.

### ۲-۱-۲- حذف شاخه‌ها (حذف باقی‌مانده‌ها)<sup>۳</sup>

سرعت و دقت الگوریتم حذف شاخه‌ها [۳] صرف‌نظر از عدم توانایی‌اش در ارائه یک راه‌حل کامل، آن را بسیار محبوب کرده است. یکی از مهم‌ترین مفاهیم در بحث بازیابی فاز چه در فضای منظم و چه در فضای نامنظم مفهوم باقی‌مانده<sup>۴</sup> می‌باشد. در مجموعه‌ای از فازهای بازیابی شده‌ی صحیح، مقدار اختلاف فازهای حول یک لوپ بسته همیشه باید برابر صفر باشد. در مجموعه‌ای از فازهای بازیابی نشده، مقدار حقیقی اختلاف فازهای بزرگ‌تر از نیم سیکل به مقادیر مختلفی در بازه صفر تا  $2\pi$  مدوله خواهند شد و این باعث می‌شود که مقدار مجموع اختلاف فازهای حول یک لوپ بسته برابر صفر نباشد. این ویژگی توسط گلدستین و همکارانش برای تعیین محل ناپیوستگی‌ها و جهش فازها استفاده شده است. حاصل جمع اختلاف فازهای تبدیل شده حول یک لوپ، یا چرخه‌ی بسته، اطراف یک مربع  $2 \times 2$  از پیکسل‌های یک تداخل‌ما، نتیجه‌ای برابر با صفر یا یک یا منفی یک خواهد داشت (شکل نحوه (۲). **(Error! Reference source not found.)**

<sup>3</sup> Branch-cut (residue-cut)

<sup>4</sup> Residue

### ۲-۱- بازیابی فاز بازیابی فاز به صورت موضعی در فضای منظم

برخلاف روش‌های مبتنی بر پراکنش‌کننده‌های پایدار، خروجی روش‌های تداخل‌سنجی متداول یک فضای منظم و پیوسته را ایجاد می‌کنند. به دلیل پیشینه بلند مدت روش‌های تداخل‌سنجی متداول، تاکنون روش‌های متعددی برای بازیابی فاز بر اساس آن‌ها ارائه شده است و در اینجا تنها به معرفی سه مورد از کاربردی‌ترین روش‌های بازیابی فاز به صورت موضعی خواهیم پرداخت.

روش‌های بازیابی فاز به صورت موضعی از ایده‌ی دنبال‌کننده مسیر<sup>۱</sup> برای بازیابی فاز استفاده می‌کند. بدین صورت که، در طول مسیر بازیابی فاز نقاط ناپیوستگی به سرعت شناسایی و اصلاح می‌شوند. چنین رویکردهایی را محلی یا موضعی می‌نامند. زیرا همان‌طور که در ادامه بیان خواهد شد این الگوریتم‌ها برای رسیدن به جوابی که به صورت کلی بهینه باشد در هر مرحله از داده‌ها و اطلاعات محلی آن مرحله استفاده می‌کنند.

### ۲-۱-۱- واریانس مشتق فازها<sup>۲</sup>

همان‌طور که بیان شد الگوریتم‌های بازیابی موضعی فاز با دنبال کردن یک مسیر مناسب فازهای تداخل‌نما را بازیابی می‌کنند. یکی از ساده‌ترین روش‌های تعیین مسیر بازیابی فاز استفاده از واریانس مشتق فازها [۶ و ۷] است. از این روش برای ساخت یک نقشه کیفیت به‌منظور هدایت مسیر بازیابی فاز استفاده می‌شود. واریانس اختلاف فازها برای چهار پیکسل کناری محاسبه می‌گردد و سپس تمامی آن‌ها با هم جمع می‌شوند.

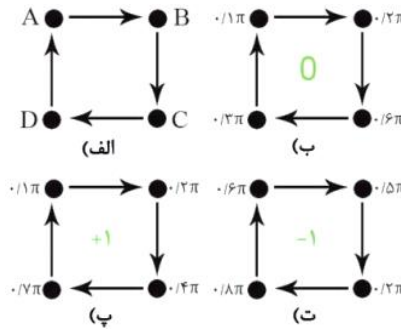
$$PDV^k = \sum_{n=1}^N \sigma_x^2(n) + \sigma_y^2(n) \quad \text{رابطه (۱)}$$

<sup>1</sup> Path following

<sup>2</sup> Phase Derivative Variance (PDV)

کمتر از نیم سیکل است، این جوابهای غیر صفر نشان‌دهنده‌ی آشفتگی و گسیختگی بین داده‌ها

تعیین باقی‌مانده در شکل (۲) نشان داده شده است. جوابهای غیر صفر بار یا باقی‌مانده نامیده می‌شوند بر اساس این فرض که تفاضل فازهای بازیابی نشده



$$\left[ \frac{\Psi_B - \Psi_A}{\pi} \right] + \left[ \frac{\Psi_C - \Psi_B}{\pi} \right] + \left[ \frac{\Psi_D - \Psi_C}{\pi} \right] + \left[ \frac{\Psi_A - \Psi_D}{\pi} \right] = \text{باقی مانده}$$

$$\text{الف) } 0.1 + 0.4 - 0.3 - 0.2$$

$$\text{ب) } 0.1 + 0.2 + 0.3 + (0.1 - 0.7 + 1)$$

$$\text{پ) } 0.1 + 0.2 + 0.3 + (0.1 - 0.7 + 1)$$

$$\text{ت) } -0.1 - 0.3 + (0.8 - 0.2 - 1) - 0.2$$

شکل ۲: نحوه‌ی تعیین باقی‌مانده. در تصویر (الف) نحوه‌ی یک مربع ۲×۲ بر روی مشاهدات یک تداخل‌نا نمایش داده شده است. در تصاویر (ب) و (پ) و (ت) به ترتیب مثال‌هایی برای باقی‌مانده‌های صفر، یک و منفی یک آورده شده است.

این الگوریتم عموماً در مناطقی از تداخل‌نا که همبستگی خوبی دارند، دقیق است. حال آنکه در مناطقی با شباهت کم، تراکم و چگالی زیاد نقاط باقی‌مانده شاخه‌هایی را ایجاد می‌کند که بر روی یکدیگر بسته شده‌اند و مانع حرکت و بازیابی فاز در کل مناطق تداخل‌نا می‌شود. نتیجه این اتفاق به وجود آمدن مناطق مجزایی<sup>۲</sup> در سطح تداخل‌نا است.

### ۲-۱-۳- واریانس مشتق فازها- حذف شاخه‌ها<sup>۳</sup>

در الگوریتم حذف شاخه‌ها اگر شاخه‌ها به درستی تعیین گردند، مسأله حل یکتایی را ارائه می‌دهد. بنابراین فرآیند بازیابی فاز مستقل از مسیر خواهد بود. از این ویژگی برای بهبود کارایی دیگر الگوریتم‌ها

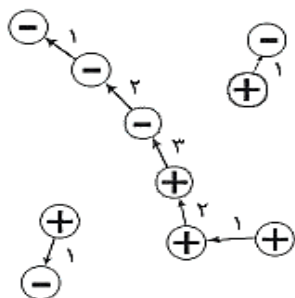
در این الگوریتم باقی‌مانده‌های غیر صفر، یا بارها، با استفاده از فازهای بازیابی نشده شناسایی می‌شوند. یک شاخه بین این باقی‌مانده و نزدیک‌ترین باقی‌مانده بعدی، صرف نظر از علامت آن (مثبت یا منفی بودن) رسم می‌گردد. این سرآغاز یک درخت را تشکیل می‌دهد. اگر این درخت خنثی نباشد، نزدیک‌ترین باقی‌مانده بعدی به آن وصل می‌شود. این روند تا زمانی ادامه می‌یابد که این درخت خنثی شود. در این هنگام یک بار، باقی‌مانده، غیر صفر دیگر به عنوان ریشه‌ی یک درخت جدید در نظر گرفته می‌شود (شکل (۳)). هنگامی که تمامی بارها بر روی درخت‌های خنثی قرار گرفتند، با استفاده از الگوریتم پر کردن طوفانی<sup>۱</sup> فازها به نحوی با یکدیگر جمع می‌شوند که در طول مسیر بازیابی فاز از هیچ‌یک از شاخه‌های درخت‌ها عبور نکنند.

<sup>2</sup> Isolated

<sup>3</sup> Phase derivative values – Branch cut

<sup>1</sup> Flood-fill

کنار توابع هزینه یا قیودی که اعتبار مساله را تأیید می‌کنند، تعریف می‌شود. همچنین برای افزایش بازده محاسباتی، تابع هدف را می‌توان در جهت‌های رنج و آزمون جدایی‌پذیر در نظر گرفت [۹].



شکل ۳: در الگوریتم حذف شاخه‌ها، احتمال رخ دادن گسیختگی در درخت‌های خنثی است، عددها بیانگر اندازه‌ی بار هر شاخه می‌باشند.

$$\text{minimize} \left\{ \sum_i \sum_j h_{i,j}^r (\Delta \varphi_{i,j}^r - \Delta \Psi_{i,j}^r) + \sum_i \sum_j h_{i,j}^a (\Delta \varphi_{i,j}^a - \Delta \Psi_{i,j}^a) \right\} \quad \text{رابطه (۲)}$$

۱- مقداردهی اولیه شبکه با استفاده از یک جریان مناسب،

۲- استفاده از الگوریتم دایجسترا<sup>۲</sup> جهت یافتن چرخه‌های منفی،

۳- القا کردن جریان بر روی آن‌ها برای حذف این چرخه‌های منفی،

۴- حذف این چرخه‌های منفی تا اتمام تمامی چرخه منفی‌ای که در شبکه وجود دارند. اگرچه اجرا و بیان الگوریتم MCF بدین‌سان ساده است، اما در عمل روش‌های دیگری برای حل سریع‌تر مساله MCF مورد استفاده قرار می‌گیرند.

استفاده می‌شود. الگوریتم ارائه‌شده در اینجا ترکیبی از دو روش واریانس مشتق فازها و روش حذف شاخه‌ها می‌باشد [۵]. مراحل انجام الگوریتم به شرح ذیل می‌باشد: (۱) ابتدا محل قرارگیری باقی‌مانده‌ها مشخص می‌شود، (۲) شاخه‌ها و درخت‌ها تشکیل و جانمایی می‌شوند، (۳) شاخه‌ها و درخت‌ها کنار گذاشته می‌شوند و (۴) در انتها توسط واریانس مشتق فازها نقشه کیفیتی که اثر گسیختگی‌ها از روی آن برداشته شده است، تعیین می‌شود.

## ۲-۲ بازیابی فاز به صورت سراسری و کلی در فضای منظم

در روش‌های بازیابی فاز به صورت سراسری، هدف تبدیل مساله‌ی بازیابی فاز به یک مساله کمینه‌سازی می‌باشد [۸]. بدین منظور، مساله‌ی بازیابی فاز با تعریف تابع هدفی که حاصل از مجموع اختلاف فازها در جهت‌های رنج و آزمون در

که  $\Delta \varphi_{i,j}$  و  $\Delta \Psi_{i,j}$  به ترتیب اختلاف فازهای بدون ابهام و اختلاف فازهای دارای ابهام.  $a$  و  $r$  به ترتیب بیانگر جهت‌های رنج و آزمون می‌باشند.  $h$  نیز تابع هزینه نامیده می‌شود که سعی بر کمینه کردن هزینه‌ی کلی حل مساله دارد.

### ۲-۲-۱ کم‌هزینه‌ترین جریان<sup>۱</sup> (MCF)

الگوریتم بازیابی فاز کم‌هزینه‌ترین جریان سعی بر بیان مساله‌ی بازیابی فاز به صورت کمینه‌سازی هزینه کلی جریان بین باقی‌مانده‌هایی که حول یک لوپ بسته تشکیل شده‌اند [۱۰]، دارد. این الگوریتم را می‌توان ادغامی از الگوریتم حذف شاخه‌ها [۳] با تئوری شبکه‌ها دانست. یک الگوریتم MCF ساده اما دقیق باید مراحل زیر را دنبال کند:

<sup>2</sup> Dijkstra

<sup>1</sup> Minimum Cost Flow

که در آن  $K$  همان سیکل صحیحی است که از مسأله بهینه‌سازی به دست می‌آید. سمت راست رابطه (۴) نشانگر باقی‌مانده‌هایی است که در هر لوپ بسته محاسبه می‌شوند، شکل (۲) و  $\| \cdot \|$  بیانگر نرم  $L1$  و  $E$  بیانگر تمامی لبه‌های موجود در یک گرید مربعی می‌باشد. مقدار سیکل صحیح فازی که نیاز است به مسأله اضافه شده به عنوان مقدار جریان صحیح بر روی هر لبه در نظر گرفته می‌شود. به منظور هدایت کردن محل قرارگیری جهش فازها، تابع هزینه  $C_{i,j}$  با استفاده از معیار کیفیتی که از خود داده‌ها استخراج شده است، معرفی می‌شود. الگوریتم‌های متعددی برای حل مسأله MCF وجود دارند [۱۲]. هدف حل مسأله بازیابی فاز با استفاده از کارآمدترین الگوریتم MCF می‌باشد.

## ۲-۳- تبدیل به فضای نامنظم به یک فضای منظم

خروجی روش‌های بر اساس پراکنش‌کننده‌های پایدار منجر به یک فضای گسسته و نامنظم می‌شود [۱۳]. با استفاده از الگوریتم نزدیک‌ترین همسایگی، مسأله‌ی بازیابی فازهای نامنظم را می‌توان به یک مسأله‌ی بازیابی فازهای منظم دو بعدی کاهش داد [۱۴]. در این روش به وسیله‌ی کمترین فاصله‌ی اقلیدسی داده‌ها بر روی گرید درونیابی می‌شوند. بررسی‌ها نشان داده است که مرز داده‌های درونیابی شده با استفاده از روش نزدیک‌ترین همسایگی تقریباً با دیاگرام ورونو<sup>۳</sup> یکسان است [۱۴].

استفاده از نرم‌های کوچک‌تر منجر به حلی کارآمدتر خواهد شد [۴]. به دلیل پخش شدن خطا بین نقاط، روش کم‌ترین مربعات عادی دقت خوبی ندارد. همچنین، روش کم‌ترین مربعات وزن‌دار به دلیل وابسته بودن نتیجه حاصله به وزن‌های تخصیص داده شده به آن‌ها، کاربرد مناسبی ندارند [۴]. با توجه به دلیل ذکر شده، انتظار می‌رود که مسأله کمینه‌سازی متغیرهای صحیح، نتایج بهتری را در مسأله‌ی بازیابی ارائه دهد.

علی‌رغم پیچیدگی محاسباتی در مسأله کمینه‌سازی با متغیرهای صحیح، بهره جستن از ساختار شبکه<sup>۱</sup> یک استراتژی مؤثر برای دست‌یابی به یک جواب بهینه خواهد بود. در اصل با انتخاب نرم  $L1$  وزن‌دار به عنوان خطا، مسأله بازیابی فاز را می‌توان هم‌ارز با مسأله‌ی پیدا کردن کمترین جریان بر روی شبکه در نظر گرفت.

از هم ارزی بین مسأله مقید درخت پوشای کمینه<sup>۲</sup> و MCF برای فرموله کردن مسأله بازیابی فاز در قالب یک مسأله شبکه استفاده شده است [۴].

با تعریف تابع هزینه غیر صفر  $C_{i,j}$  به همراه یک واحد سیکل فاز بر روی هر کدام از لبه‌ها، مسأله‌ی بازیابی فاز دو بعدی را می‌توان به صورت یک مسأله‌ی MCF بر روی شبکه بیان کرد [۱۱]:

$$\text{minimize } \sum_{\forall (i,j) \in E} C_{i,j} \cdot \|K_{i,j}\| \quad \text{رابطه (۳)}$$

مقید به:

$$\text{رابطه (۴)}$$

$$K_{AB} + K_{BC} + K_{CD} + K_{DA} = \left[ \frac{\Psi_A - \Psi_B}{2\pi} \right] + \left[ \frac{\Psi_B - \Psi_C}{2\pi} \right] + \left[ \frac{\Psi_C - \Psi_D}{2\pi} \right] + \left[ \frac{\Psi_D - \Psi_A}{2\pi} \right]$$

$$K_{i,j} : \quad \text{مقدار صحیح} \quad \forall (i,j) \in E$$

<sup>3</sup> Voronoi diagram

<sup>1</sup> Network structure

<sup>2</sup> Minimum Spanning Tree (MST)

باقی‌مانده نمی‌دهند. چون یک بار در جهت رفت و یک بار در جهت برگشت از روی مرزها عبور می‌کنیم (شکل (۵-ب)).

۴. محل تقاطع عمودمنصف‌های مثلث، جایی که حداقل یک مقدار متناسب با مقدار هر یک از رئوس وجود دارد، می‌تواند یک باقی‌مانده باشد (شکل (۵-ت)). چون هر مثلث تنها یک مرکز جرم دارد، تنها می‌تواند یک باقی‌مانده در آن وجود داشته باشد.

۵. گاهی اوقات به دلیل مستطیلی بودن توزیع نقاط، دیاگرام ورونی باقی‌مانده بر روی قطر مثلث دلونی<sup>۲</sup> قرار می‌گیرد (شکل (۵-ث)). برای رفع این مشکل می‌توان شکل‌ها را ادغام کرد، یعنی حاصل جمع فازهای رئوس مستطیل را به‌عنوان باقی‌مانده در نظر گرفت.

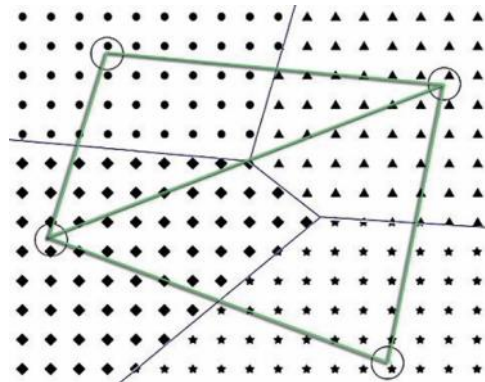
۶. بنابراین باقی‌مانده‌های موجود در داده‌های نامنظم حفظ می‌شوند و در محل تقاطع عمودمنصف‌های مثلث‌ها قرار می‌گیرند

### ۳- نتایج

در راستای ایجاد یک فضای نامنظم از داده‌های واقعی، میزان یک درصد از نقاط موجود در تداخل نما شکل (۶-الف) که با استفاده از تصاویر ماهواره سنتینل ۱ ایجاد شده است، انتخاب شده‌اند. شکل (۶-ب) یک تداخل نما در فضای نامنظم از منطقه سیرجان کرمان را نمایش می‌دهد. باید به این نکته توجه داشت که در عمل نقاطی که ویژگی‌های فاز پراکنشی ثابتی دارند به‌عنوان پراکنش‌کننده‌ی پایدار شناخته می‌شوند و یک فضای نامنظم را تشکیل می‌دهند. بنابراین می‌توان گفت که نقاط پراکنش‌کننده تقریباً نقاطی عاری از نویز هستند. در این مقاله نیز سعی شده که منطقه مطالعاتی تا حد امکان عاری از نویز باشد

<sup>2</sup> Delaunay triangulation

نحوه‌ی انتقال داده‌های یک فضای نامنظم به یک فضای منظم در شکل (۴) نمایش داده شده است. بنابراین داده‌ها در یک گرید کارتیزین منظم تصویر می‌شوند و با استفاده از راه‌حل‌های موجود بازیابی می‌شوند.



شکل ۴: استفاده از پلی‌گون‌های ورونی برای تبدیل فضای نامنظم به فضای منظم. خطوط آبی مرزهای پلی‌گون ورونی و خطوط سبز مثلث‌های دلونی<sup>۱</sup> را نمایش می‌دهند. دایره‌های توخالی بیان‌کننده فازهای فضای نامنظم هستند.

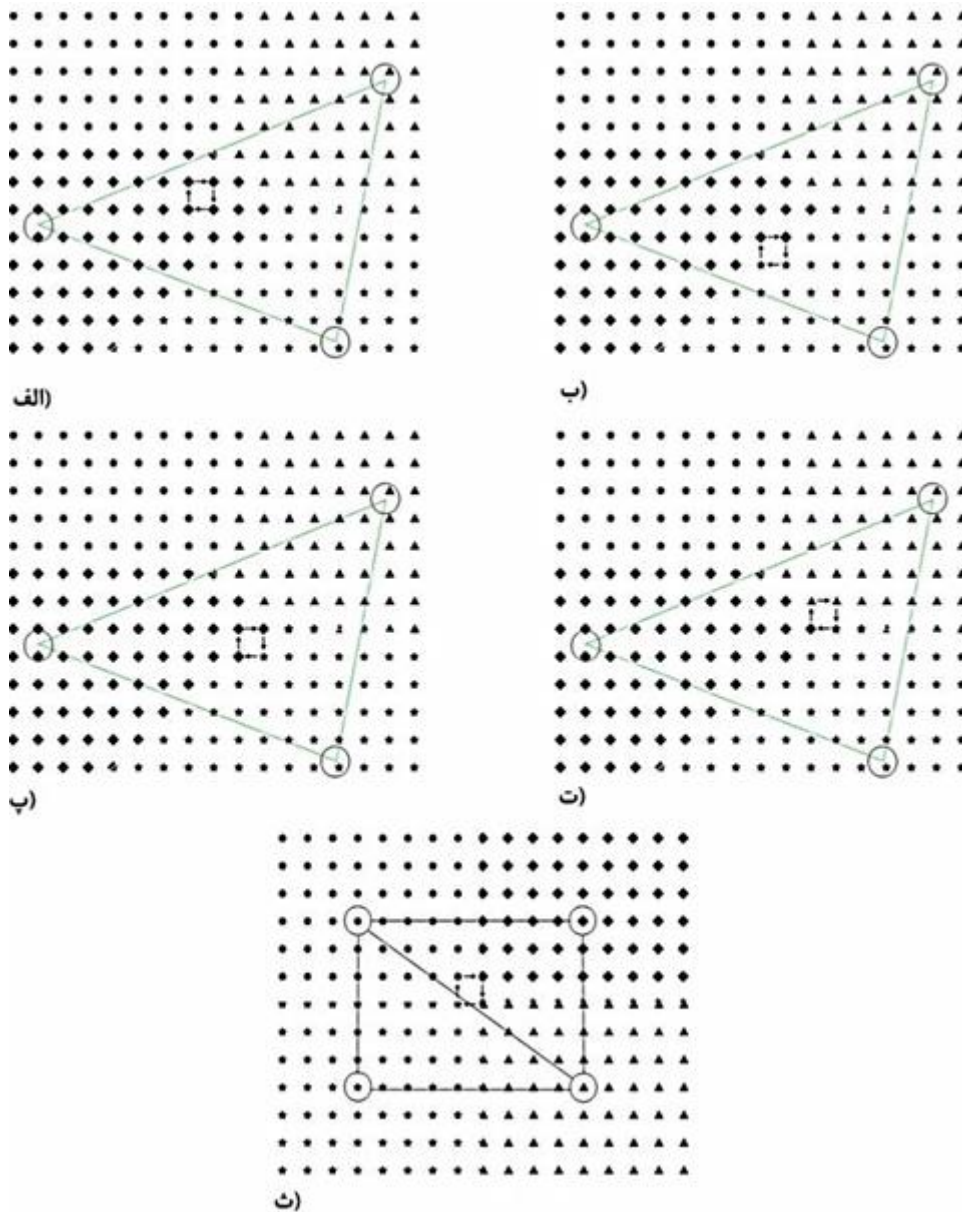
می‌توان نشان داد که باقی‌مانده‌ها در تبدیل داده‌ها بر روی گرید منظم حفظ می‌شوند [۱۴]. به همین منظور در شکل (۵) تمامی حالات تشکیل لوپ‌ها در یک گرید منظم درونیابی شده نمایش داده شده است. در ادامه تمامی حالات تشکیل یک لوپ توضیح داده شده است.

۱. لوپ‌هایی که شامل مقادیر یکسان فاز هستند، باقی‌مانده‌ای را ایجاد نمی‌کنند (شکل (۵-الف)).

۲. لوپ‌های تشکیل شده بر روی مرزهایی با دو نقطه از دو نوع متفاوت، چون یک بار در جهت رفت و یک بار در جهت برگشت از روی مرزها عبور می‌کنیم، تشکیل باقی‌مانده نمی‌دهند (شکل (۵-ب)).

۳. لوپ‌هایی که سه نقطه یکسان و یک نقطه متفاوت در تشکیل آن‌ها نقش داشته باشند نیز تشکیل

<sup>1</sup> Delaunay

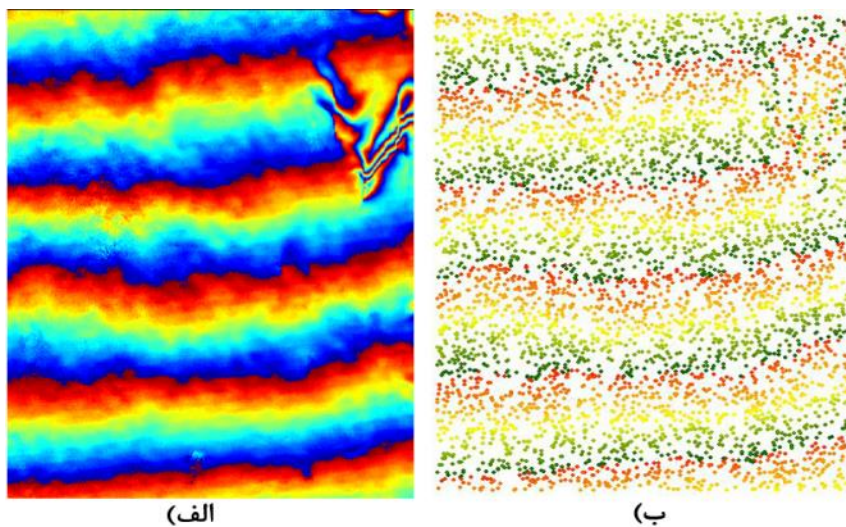


شکل ۵: تمامی حالات تشکیل یک لوپ در این تصویر نمایش داده شده است. نمادهای مختلف نشانگر داده‌های نامنظم متفاوت می‌باشد. تنها تصاویر (ت) و (ث) تشکیل باقی‌مانده می‌دهند.

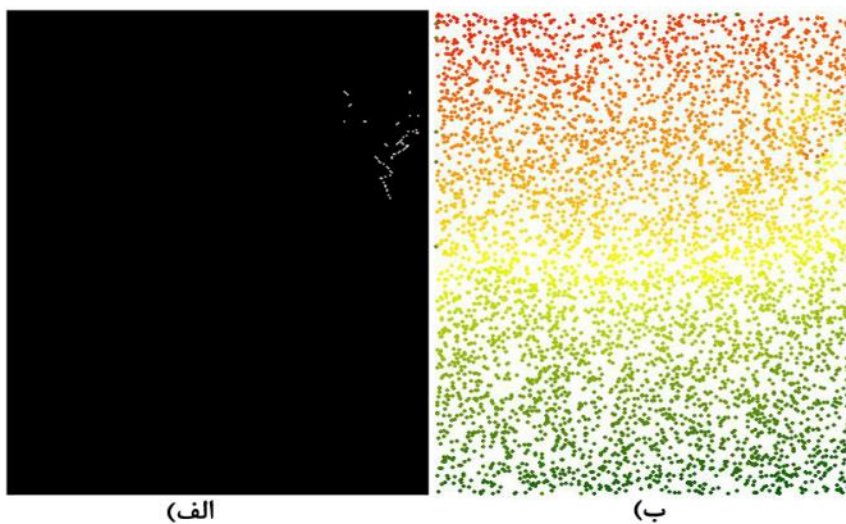
نمایش داده شده است. همچنین در شکل (۷-ب) خروجی اعمال الگوریتم حذف شاخه‌ها بر روی فضای نامنظم را می‌توان مشاهده کرد و با توجه به نتایج می‌توان ضعف الگوریتم در بازیابی فاز مناطقی که فرینجها<sup>۱</sup> در آن فشرده‌تر هستند را مشاهده کرد.

اگرچه در فضای گسسته نیز می‌توان تعریفی مشابه با فضای پیوسته برای باقی‌مانده ارائه داد، اما باید به این نکته توجه داشت که در فضای گسسته نمی‌توان تمامی نقاط باقی‌مانده را در نظر گرفت. این عدم توانایی در تعیین مکان دقیق نقاط باقی‌مانده باعث افزایش وابستگی به مسیر بازیابی فاز و کاهش دقت عملکرد الگوریتم حذف شاخه‌ها می‌شود. در شکل (۷-الف)) شاخه‌ها که معادل با محل‌های ناپیوستگی است،

<sup>1</sup> Fringes



شکل ۶: تداخل نما ایجادشده با استفاده از تصاویر سنتینل ۱ در منطقه سیرجان. الف) فضای منظم از تداخل نما واقعی، ب) فضای نامنظم ایجادشده از داده‌های منظم.

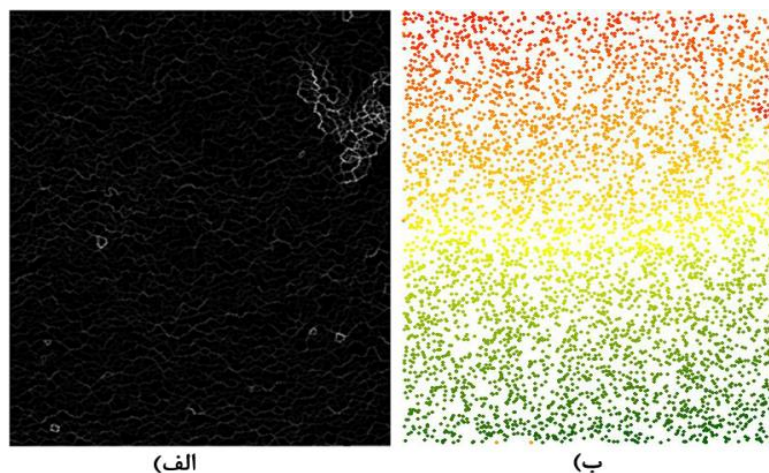


شکل ۷: الف) محل قرارگیری شاخه‌ها در سطح تداخل‌نما. ب) نتیجه اعمال الگوریتم بازیابی فاز حذف شاخه‌ها بر روی داده‌های نامنظم

همچنان در مناطقی با فشردگی فرینج‌ها عملکرد مناسبی دارد.

با معرفی یک نقشه هزینه بر اساس واریانس مشتق فازها و ترکیب آن با الگوریتم‌های مناطق رشد کننده<sup>۱</sup> می‌توان الگوریتم واریانس مشتق فازها را بر روی فازهای تداخل‌سنجی اعمال کرد. شکل (۸-الف) نقشه هزینه ایجادشده بر اساس واریانس مشتق فاز را نمایش می‌دهد. در شکل (۸-ب) خروجی این روش بر روی داده‌های نامنظم ارائه شده است و می‌توان دید که

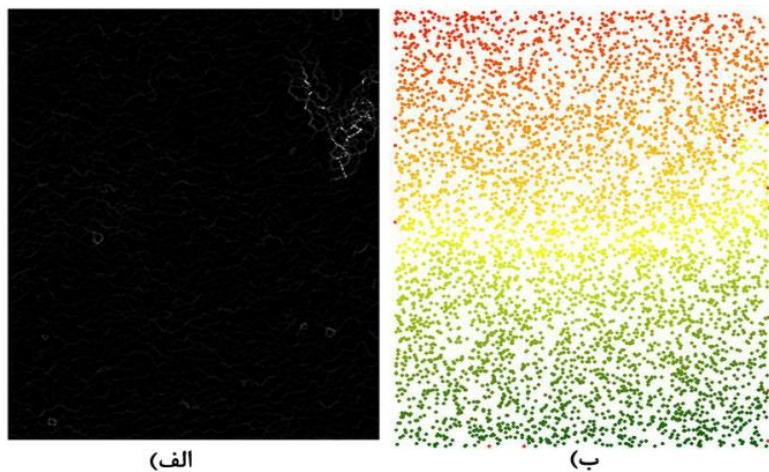
<sup>۱</sup> Region Growing



شکل ۸: الف) نقشه هزینه ایجادشده بر اساس واریانس مشتق فازها. ب) فازهای تداخل سنجی بازیابی شده با استفاده از روش واریانس مشتق فازها

استفاده شده است. شکل (۹-الف) نقشه هزینه‌ی واریانس مشتق فازها است که با استفاده از محل قرارگیری شاخه‌ها بهبود یافته است. مطابق آنچه در شکل (۹-ب) می‌بینید، به دلیل اضافه شدن اطلاعات مکانی و بهبود نقشه هزینه، این روش نسبت به دو روش قبل عملکرد بهتری دارد

همان‌طور که مشاهده شد روش حذف شاخه‌ها برخلاف فضای منظم، در فضای نامنظم عملکرد مناسبی ندارد. همچنین دیده شد که بهره‌گیری از واریانس مشتق فازها در فضای نامنظم نتیجه بهتری نسبت به روش حذف شاخه‌ها داشت. در ادامه باهدف بهبود نتایج بازیابی فاز از روش واریانس مشتق فازها-حذف شاخه‌ها



شکل ۹: خروجی روش واریانس مشتق فاز-حذف شاخه‌ها. الف) نقشه هزینه، نقاط روشن پر هزینه‌ترین و نقاط تیره کم‌هزینه‌ترین. تأثیر شاخه‌ها را می‌توان در افزایش هزینه پیکسل‌های معادل آن دید. ب) فازهای بازیابی شده توسط واریانس مشتق فاز حذف شاخه‌ها

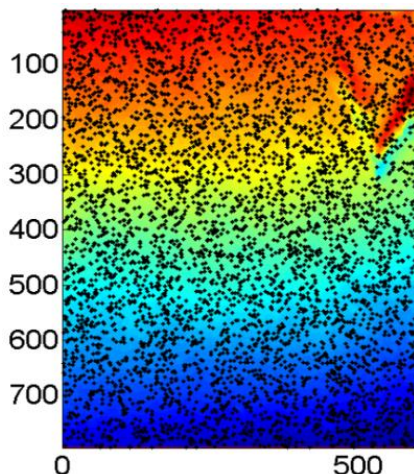
نظیر به نظیر برای نقاط نمونه‌برداری شده، با فازهای بازیابی شده با روش کمتر هزینه‌ترین جریان که یکی از بهترین روش‌های بازیابی فاز در فضای منظم می‌باشد، مقایسه شده است. در اینجا میزان حد آستانه‌ی خطا

#### ۴- ارزیابی

همان‌گونه که بیان شد برای ارزیابی صحت نتایج، خروجی‌های روش‌های معرفی شده در بخش ۳ با خروجی روش تداخل سنجی متداول، به صورت

MCF در فضای منظم نمایش داده شده است. همچنین، موقعیت نقاط پراکنش کننده‌ی انتخابی نیز با استفاده از نقاط مشکلی بر روی تداخل نما نمایش داده شده است

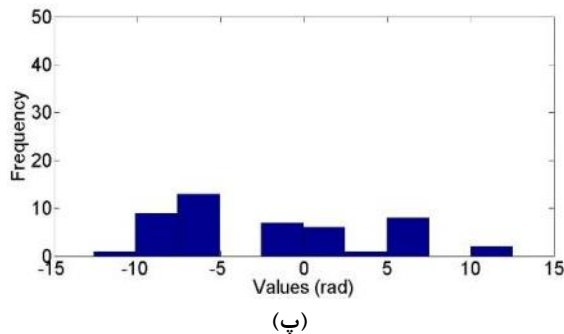
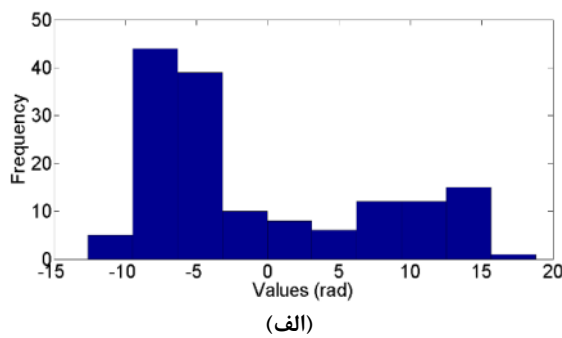
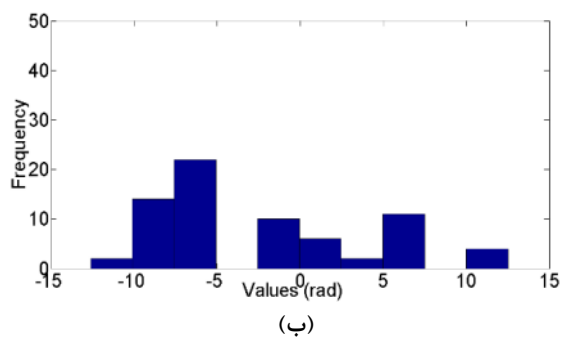
بین جواب‌های دو روش برابر با ۱ رادیان که در تصاویر سنتیل ۱ معادل با مقدار ۴.۴ میلی‌متر می‌باشد، در نظر گرفته شده است. در شکل (۱۰) نتیجه بازیابی فازها در تداخل‌سنجی متداول با استفاده از الگوریتم



شکل ۱۰: تداخل نما بازیابی شده توسط الگوریتم MCF. نقاط مشکلی نشان‌دهنده موقعیت پیکسل‌های انتخابی به عنوان پراکنش کننده‌ی پایدار می‌باشد.

پراکنش کننده‌ی پایدار انتخاب شده‌اند، در نظر گرفته شده است. در شکل (۱۱) هیستوگرام‌های خطای هر سه روش نمایش داده شده‌اند.

در این بخش به منظور مقایسه‌ی کمی سه روش معرفی شده در بخش ۳ با خروجی روش MCF معیار هیستوگرام خطاها برای پیکسل‌هایی که به عنوان



شکل ۱۱: هیستوگرام مقادیر فازهایی که اختلاف آن‌ها با خروجی روش تداخل‌سنجی متداول بیشتر از حد آستانه می‌باشد. الف، ب و پ به ترتیب نتایج الگوریتم‌های حذف شاخه‌ها، واریانس مشتق فازها و واریانس مشتق فازها حذف شاخه‌ها می‌باشد.

داشته است. همچنین، در جدول (۱) تعداد پیکسل‌هایی که فازهای آن‌ها اشتباه برآورد شده‌اند، بیان شده‌اند.

با مقایسه‌ی هیستوگرام‌های شکل (۱۱) می‌توان دید که الگوریتم واریانس مشتق فازها- حذف شاخه‌ها عملکرد بسیار مناسب‌تری را در مقایسه با دیگر روش‌ها

جدول ۱: تعداد پیکسل‌هایی که به اشتباه برآورد شده‌اند

حذف شاخه‌ها - واریانس مشتق فازها	واریانس مشتق فازها	حذف شاخه‌ها	تعداد
۴۷	۷۱	۱۵۲	

هستند که نتیجه این روش‌ها یک فضای نامنظم از پیکسل‌هایی با فازهای بازیابی نشده است. یافتن اطلاعات جابجایی از فازهای بازیابی نشده در یک فضای نامنظم به مراتب پیچیده‌تر و سخت‌تر از یک فضای منظم می‌باشد.

یک روش پیشنهادی برای بازیابی فاز در فضای نامنظم تبدیل این فضای نامنظم به یک فضای منظم کمکی که به مراتب اطلاعات فاز آن از اطلاعات فاز فضای منظم اصلی قابل اطمینان‌تر است، می‌باشد. یکی از مناسب‌ترین روش‌ها برای رسیدن به فضای منظم ثانویه، استفاده از مثلث‌بندی دلونی برای درون‌یابی فازها است. مزیت این روش درون‌یابی حفظ ماهیت فازها است. پس از انتقال به فضای منظم کمکی می‌توان روش‌های بازیابی فاز در فضای منظم را بر روی فضای منظم حاصل‌شده از پراکنش‌کننده‌های پایدار اعمال کرد. همان‌طور که در بخش قبل مشاهده شد،

برخلاف فضای منظم، به دلیل از دست رفتن اطلاعات مربوط به برخی از باقی‌مانده‌ها، الگوریتم واریانس مشتق فازها در فضای نامنظم نسبت به الگوریتم حذف شاخه‌ها کارایی بهتری دارد.

با توجه به جدول (۱) و شکل (۱۱) می‌توان دید که الگوریتم واریانس مشتق فازها- حذف شاخه‌ها نسبت به دو روش دیگر نتایج بهتری را آرایه می‌کند. همچنین، می‌توان دید که برخلاف فضای منظم، در فضای نامنظم الگوریتم حذف شاخه به دلیل کمبود اطلاعات در شناسایی محل تمامی باقی‌مانده‌ها، عملکرد به مراتب ضعیف‌تری نسبت به الگوریتم واریانس مشتق فازها دارد.

##### ۵- نتیجه‌گیری

در سالیان اخیر به سبب افزایش استفاده از تصاویر ماهواره‌ای بخصوص تصاویر راداری، تکنیک‌های تداخل‌سنجی رادار با روزه مصنوعی نقش ویژه‌ای در بخش‌های مدیریت بحران ایفا می‌کنند. پایش جابجایی‌های سطح زمین با استفاده از تکنیک تداخل‌سنجی راداری و برنامه‌ریزی در راستای جلوگیری و کاهش خسارات ناشی از جابجایی‌ها مهم‌ترین کاربرد این تکنیک می‌باشد. برای استخراج اطلاعات جابجایی از فازهای تداخل‌سنجی بایستی فازهای تداخل‌نما بازیابی شوند. به دلیل وجود نقاط نویزی در سطح تداخل نما روش‌های بر مبنای پراکنش‌کننده‌های پایدار به دنبال انتخاب پیکسل‌های با کمترین احتمال آغستگی به نوبز

##### مراجع

[1] C W Chen and H A Zebker, "Phase Unwrapping for Large SAR Interferograms: Statistical Segmentation and Generalized Network Models," *IEEE Transactions on*

*Geoscience and Remote Sensing*, vol. 40, no. 8, pp. 1709-1719, 2002.

[2] D C Ghiglia and L A Romero, "Robust two-

- dimensional weighted and unweighted phase unwrapping that uses fast transforms and iterative methods," *The Optical Society of America A*, vol. 11, no. 1, pp. 107-117, 1994.
- [3] R M Goldstein, H A Zebker, and C L Werner, "Satelite radar interferometry : Two-dimentional phase unwrapping," *Radio Science*, vol. 23, no. 4, pp. 713-720, 1988.
- [4] C W Chen and H A Zebker, "Network approaches to two-dimentional phase unwrapping intractability and two new algorithm," *The Optical Society of America*, vol. 18, no. 3, pp. 401-414, 2000.
- [5] B Osmanoglu, T H Dixon, S Wdowinski, and E Cabral-Cano, "On the importance of path for phase unwrapping in synthetic aperture radar interferometry," *Applied Optics*, vol. 50, no. 19, pp. 3205-3220, 2011.
- [6] B R Hunt, "Matrix Formulation of the Reconstruction of Phase Values from Phase Differences," *The Optical Society of America A*, vol. 69, no. 3, pp. 393-399, 1979.
- [7] D C Ghiglia and M D Pritt, *Two-Dimentional Phase Unwrapping: Theory, Algorithms and Software.*: WileyBlackwell, 1998.
- [8] Howard A Zebker and Yanping Lu, "Phase unwrapping algorithms for radar interferometry: residue-cut, least-squares, and synthesis algorithms," *The Optical Society of America A*, vol. 5, no. 3, pp. 586-598, 1998.
- [9] D C Ghiglia and Louis A Romero, "Minimum Lp-norm two-dimensional phase unwrapping," *The Optical Society of America A*, vol. 13, no. 10, pp. 1999-2013, 1996.
- [10] M Costantini, "A novel phase unwrapping method based on network programming," *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 36, no. 3, pp. 813-821, 1998.
- [11] Piyush Agram and Howard Zebker, "Edgelist Phase Unwrapping Alghorithm for Time Series," in *Fringe Workshop*, Frascati, Italy, 2009.
- [12] R K Ahuja, T L Magnanti, and J B Orlin, *Network Flows: Theory, Algorithms, and Applications.*: Englewood Cliff-New Jersey, 1993.
- [13] Andrew Hooper, "A multi-temporal InSAR method incorporating both persistent scatterer and small baseline approaches," *Geospatial Research Letters*, vol. 35, no. 16, 2008.
- [14] Piyush Shanker Agram and Howard A Zebker, "Sparse Two-Dimensional Phase Unwrapping Using Regular-Grid Methods," *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, vol. 6, no. 2, pp. 327-331, 2009.



## *InSAR Phase Unwrapping by Transforming Sparse Data into a Regular Space*

Amin Tavakkoli Estahbanati<sup>\*1</sup>, Maryam Deghani<sup>2</sup>

1- M.Sc. of remote sensing in Department of Civil and Environmental Engineering, School of Engineering, Shiraz University

2- Associate professor in Department of Civil and Environmental Engineering, School of Engineering, Shiraz University

### **Abstract**

Phase unwrapping is one of the most important parts of InSAR techniques. In order to estimate the ground surface displacements, interferometric phases modulated between 0 to  $2\pi$  must be unwrapped. Based on the use of either the conventional method or persistent scatterer (PS), phases will be spread both regularly and irregularly. The phases of PSs can be unwrapped by reducing phases into a regular and continuous grid with nearest neighbor interpolation method. In this paper, beside Minimum Cost Flow (MCF) as a global unwrapping method, three local unwrapping methods (Branch-cut, Phase Derivative Variance and Branch cut-Phase Derivative Variance) are introduced as well. These conventional unwrapping approaches are implemented on an irregular interferogram processed from Sentinel1A satellite images acquired over the Sirjan basin. At the end, the results of these approaches are assessed with unwrapped phase which is resulted in a conventional interferogram unwrapped with MCF method.

**Key words:** Interferometry, Phase unwrapping, Sentinel1A.