نشریه علمی پژوهشی مهندسی فناوری اطلاعات مکانی

سال هفتم، شماره نخست، بهار ۱۳۹۸

Vol.7, No.1, Spring 2019

۱۰۷-۱۱۹

مقاله پژوهشی

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

بازیابی فاز تداخل‌سنجی راداری به کمک انتقال داده‌های نامنظم به فضای منظم

امین توکلی اصطهباناتی[1*]،مریم دهقانی[2]

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 تداخل‌سنجی رادار با روزنه‌ی مصنوعی، فرآیند بازیابی فازهای تداخل نما می‌باشد. مقدار فازهای تداخل‌سنجی در یک تداخل‌نما در بازه‌ی ۰ تا 2π مدوله‌شده‌اند که به‌منظور برآورد میزان جابجایی بایستی بازیابی شوند. در مرحله‌ی بازیابی فاز بسته به اینکه از روش متداول یا روش پراکنش کننده‌های پایدار استفاده‌شده باشد، داده‌ها به ترتیب به‌صورت 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 درون‌یابی نزدیک‌ترین همسایگی است. در این مقاله الگوریتم کم‌هزینه‌ترین جریان به‌عنوان یک الگوریتم سراسری بازیابی فاز، سه الگوریتم بازیابی فاز به‌صورت موضعی در فضای منظم: حذف شاخه‌ها، واریانس مشتق فازها و حذف شاخه‌ها واریانس مشتق فازها معرفی‌شده‌اند. این الگوریتم‌ها بر روی داده‌های نامنظم واقعی ماهواره سنتینل۱ مربوط به منطقه دشت سیرجان اعمال‌شده‌اند و نتایج آن‌ها با یکدیگر مقایسه شده است..

کلیدواژه‌ها: تداخل‌سنجی راداری، بازیابی فاز، سنتینل۱.

*نویسنده مکاتبه کننده: شیراز- میدان نمازی- دانشکده فنی و مهندسی۱- بخش راه ساختمان و محیط زیست

تلفن: ۰۹۱۷۱۰۱۸۹۷۵

Email: AminTavakkoli.est@gmail.com

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-13]

[DOI: 10.29252/jgit.7.1.107]

۱- مقدمه

تداخل سنجی راداری بر اساس ترکیب دو یا چند تصویر مختلط راداری که توسط آنتن‌ها در موقعیت‌ها یا زمان‌های مختلف اخذشده‌اند، می‌باشد. از کاربردهای تکنیک تداخل‌سنجی 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[1] را تشکیل می‌دهند. مشاهدات تداخل‌سنجی مجموعه‌ای از فازها می‌باشد که بسته به اینکه از روش‌های تداخل سنجی متداول[2] یا پراکنش کننده‌های پایدار[3] (PS) استفاده‌شده باشد به ترتیب به‌صورت منظم یا نامنظم[4] در سطح تصویر پراکنده‌شده‌اند. فازهای یک تداخل نما مقداری بین صفر و 2π دارند که به این صورت قابل‌استفاده نمی‌باشند[۱].

بازیابی فاز[5] که یکی از مراحل روش تداخل سنجی راداری است، فرآیندی است به‌منظور برآورد فازهای بدون ابهام[6] از آرایه‌ای دو بعدی از مقدار فازهایی که بین صفر تا 2π مدوله‌شده‌اند [۲]. در تمامی کاربردهای ذکرشده مقدار این فازهای بازیابی نشده[7] (دارای ابهام) باید بازیابی شوند. تمامی الگوریتم‌های بازیابی فاز معمولاً بر این فرض استوار هستند که فازهای بازیابی شده صحیح در بیشتر مکان‌ها به‌آرامی تغییر می‌کنند یعنی مقادیر پیکسل‌های همسایه باید اختلاف‌فازی کمتر از نیم سیکل (π رادیان) داشته باشند (شرط نایکوئیست[8]) [۳]. لیکن در اکثر تداخل نما ها نقاطی وجود دارند که اختلاف‌فاز 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 به‌صورت دقیق یک مسأله‌ی غیرممکن می‌باشد [۴]. با این‌وجود الگوریتم‌های متفاوتی تاکنون ارائه‌شده‌اند 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 معرفی‌شده بر روی داده‌های نامنظم استخراجی از داده‌های ماهواره سنتینل۱[9] ارائه‌شده‌اند. در بخش چهار به‌منظور برآورد صحت فازهای بازیابی شده در نقاط انتخابی، مقادیر آن‌ها با مقادیر متناظر حاصل از روش تداخل‌سنجی متداول مقایسه شده است و در انتها، بخش پنجم به جمع‌بندی مباحث ارائه‌شده اختصاص داده‌شده است.

۲- بازیابی فاز

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

[1] Interferogram
[2] Conventional
[3] Persistent Scatterer (PS)
[4] Sparse
[5] Unwrapping
[6] Unwrapped
[7] Wrap
[8] Nyquist Theorem
[9] Sentinel 1

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-13]
[DOI: 10.29252/jgit.7.1.107]

۲-۱- بازیابی فاز بازیابی فاز به‌صورت موضعی در فضای منظم

برخلاف روش‌های مبتنی بر پراکنش کننده‌های 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 ارائه‌شده است و در اینجا تنها به معرفی سه مورد از کاربردی‌ترین روش‌های بازیابی فاز به‌صورت موضعی خواهیم پرداخت.

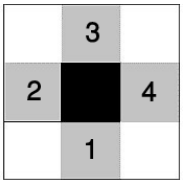
روش‌های بازیابی فاز به‌صورت موضعی از ایده‌ی دنبال کننده مسیر[1] برای بازیابی فاز استفاده می‌کند. بدین‌صورت که، در طول مسیر بازیابی فاز نقاط ناپیوستگی به‌سرعت شناسایی و اصلاح می‌شوند. چنین رویکردهایی را محلی یا موضعی می‌نامند. زیرا همان‌طور که در ادامه بیان خواهد شد این الگوریتم‌ها برای رسیدن به جوابی که به‌صورت کلی بهینه باشد در هر مرحله از داده‌ها و اطلاعات محلی آن مرحله استفاده می‌کنند.

۲-۱-۱- واریانس مشتق فازها[2]

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 و۷] 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.

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

که در آن σ_x^2 و σ_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 داده‌شده است.



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

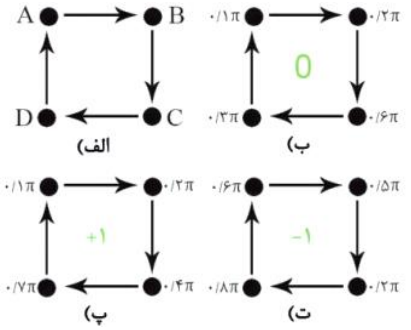
۲-۱-۲- حذف شاخه‌ها (حذف باقی‌مانده‌ها)[3]

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[4] 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 ۲π مدوله خواهند شد و این باعث می‌شود که مقدارِ مجموعِ اختلاف فازهای حول یک لوپ بسته برابر صفر نباشد. این ویژگی توسط گلدستین و همکارانش برای تعیین محل ناپیوستگی‌ها و جهش فازها استفاده‌شده است. حاصل جمع اختلاف فازهای تبدیل‌شده حول یک لوپ، یا چرخه‌ی بسته، اطراف یک مربع ۲×۲ از پیکسل‌های یک تداخل‌ما، نتیجه‌ای برابر با صفر یا یک یا منفی یک خواهد داشت (شکل **Error! Reference source not found.**(۲)). نحوه

[1] Path following
[2] Phase Derivative Variance (PDV)
[3] Branch-cut (residue-cut)
[4] Residue

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-13]
[DOI: 10.29252/jgit.7.1.107]

تعیین باقی‌مانده در شکل (۲) نشان داده‌شده است. جواب‌های غیر صفر بار یا باقی‌مانده نامیده می‌شوند بر اساس این فرض که تفاضل فازهای بازیابی نشده کمتر از نیم سیکل است، این جواب‌های غیر صفر نشان‌دهنده‌ی آشفتگی و گسیختگی بین داده‌ها



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

(الف) 0.1 + 0.4 - 0.3 – 0.2

(ب) 0.1 + 0.2 + 0.3 + (0.1 – 0.7 + 1)

(پ) 0.1 + 0.2 + 0.3 + (0.1 – 0.7 + 1)

(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 تداخل‌نما نمایش داده‌شده است. در تصاویر (ب) و (پ) و (ت) به ترتیب مثال‌هایی برای باقی‌مانده‌های صفر، یک و منفی یک آورده شده است.

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، صرف‌نظر 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 به‌عنوان ریشه‌ی یک درخت جدید در نظر گرفته می‌شود (شکل (۳)). هنگامی‌که تمامی بارها بر روی درخت‌های خنثی قرار گرفتند، با استفاده از الگوریتم پر کردن طوفانی[1] فازها به نحوی با یکدیگر جمع می‌شوند که در طول مسیر بازیابی فاز از هیچ‌یک از شاخه‌های درخت‌ها عبور نکنند.

این الگوریتم عموماً در مناطقی از تداخل نما که همبستگی خوبی دارند، دقیق است. حال‌آنکه در مناطقی با شباهت کم، تراکم و چگالی زیاد نقاط باقی‌مانده شاخه‌هایی را ایجاد می‌کند که بر روی یکدیگر بسته‌شده‌اند و مانع حرکت و بازیابی فاز در کل مناطق تداخل نما می‌شود. نتیجه این اتفاق به‌وجود آمدن مناطق مجزایی[2] در سطح تداخل نما است.

۲-۱-۳- واریانس مشتق فازها-حذف شاخه‌ها[3]

در الگوریتم حذف شاخه‌ها اگر شاخه‌ها به‌درستی 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

[1] Flood-fill

[2] Isolated

[3] Phase derivative values – Branch cut

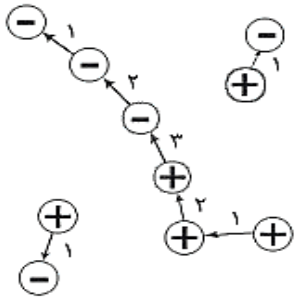
[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-13]

[DOI: 10.29252/jgit.7.1.107]

استفاده می‌شود. الگوریتم ارائه‌شده در اینجا ترکیبی از دو روش واریانس مشتق فازها و روش حذف شاخه‌ها می‌باشد[۵]. مراحل انجام الگوریتم به‌شرح 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 برداشته‌شده است، تعیین می‌شود.

۲-۲- بازیابی فاز به‌صورت سراسری و کلی در فضای منظم

در روش‌های بازیابی فاز به‌صورت 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 آزیموت در 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 آزیموت 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.

رابطه (۲)

$$\text{minimize}\left\{\sum_i\sum_j h^r_{i,j}\left(\Delta\varphi^r_{i,j}-\Delta\Psi^r_{i,j}\right)+\sum_i\sum_j h^a_{i,j}\left(\Delta\varphi^a_{i,j}-\Delta\Psi^a_{i,j}\right)\right\}$$

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

۲-۲-۱- کم‌هزینه‌ترین جریان[1] (MCF)

الگوریتم بازیابی فاز کم‌هزینه‌ترین جریان سعی بر بیان مساله‌ی بازیابی فاز به‌صورت کمینه‌سازیِ هزینه کلیِ جریانِ بینِ باقی‌مانده‌هایی که حول یک لوپ بسته تشکیل‌شده‌اند[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:

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

۲- استفاده از الگوریتم دایجسترا[2] 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 مسأله MCF مورداستفاده قرار می‌گیرند.

[1] Minimum Cost Flow

[2] Dijkstra

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-13]

[DOI: 10.29252/jgit.7.1.107]

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

علی‌رغم پیچیدگی محاسباتی در مسأله کمینه‌سازی با متغیرهای صحیح، بهره جستن از ساختار شبکه[1] یک استراتژی مؤثر برای دست‌یابی به یک جواب بهینه خواهد بود. در اصل با انتخاب نُرم $L1$ وزن‌دار به‌عنوان 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[2] و MCF برای فرموله کردن مسأله بازیابی فاز در قالب یک مسأله شبکه استفاده‌شده است [۴].

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

$$\underset{\text{minimize}}{\sum_{\forall(i,j)\in E} C_{i,j} \cdot \left\| K_{i,j} \right\|}$$

رابطه (۳)

مقید به:

رابطه (۴)

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

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

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

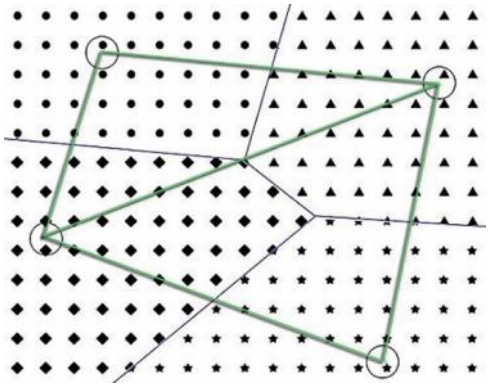
۲-۳- تبدیل به فضای نامنظم به یک فضای منظم

خروجی روش‌های بر اساس پراکنش کننده‌های 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 به‌وسیله‌ی 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 ورونوی[3] یکسان است [۱۴].

[1] Network structure
[2] Minimum Spanning Tree (MST)
[3] Voronoi diagram

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-13]
[DOI: 10.29252/jgit.7.1.107]

نحوه‌ی انتقال داده‌های یک فضای نامنظم به یک فضای منظم در شکل (۴) نمایش داده‌شده است. بنابراین داده‌ها در یک گرید کارتزین 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[1] 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 داده‌شده است. در ادامه تمامی حالات تشکیل یک لوپ توضیح داده‌شده است.

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

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

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[2] 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

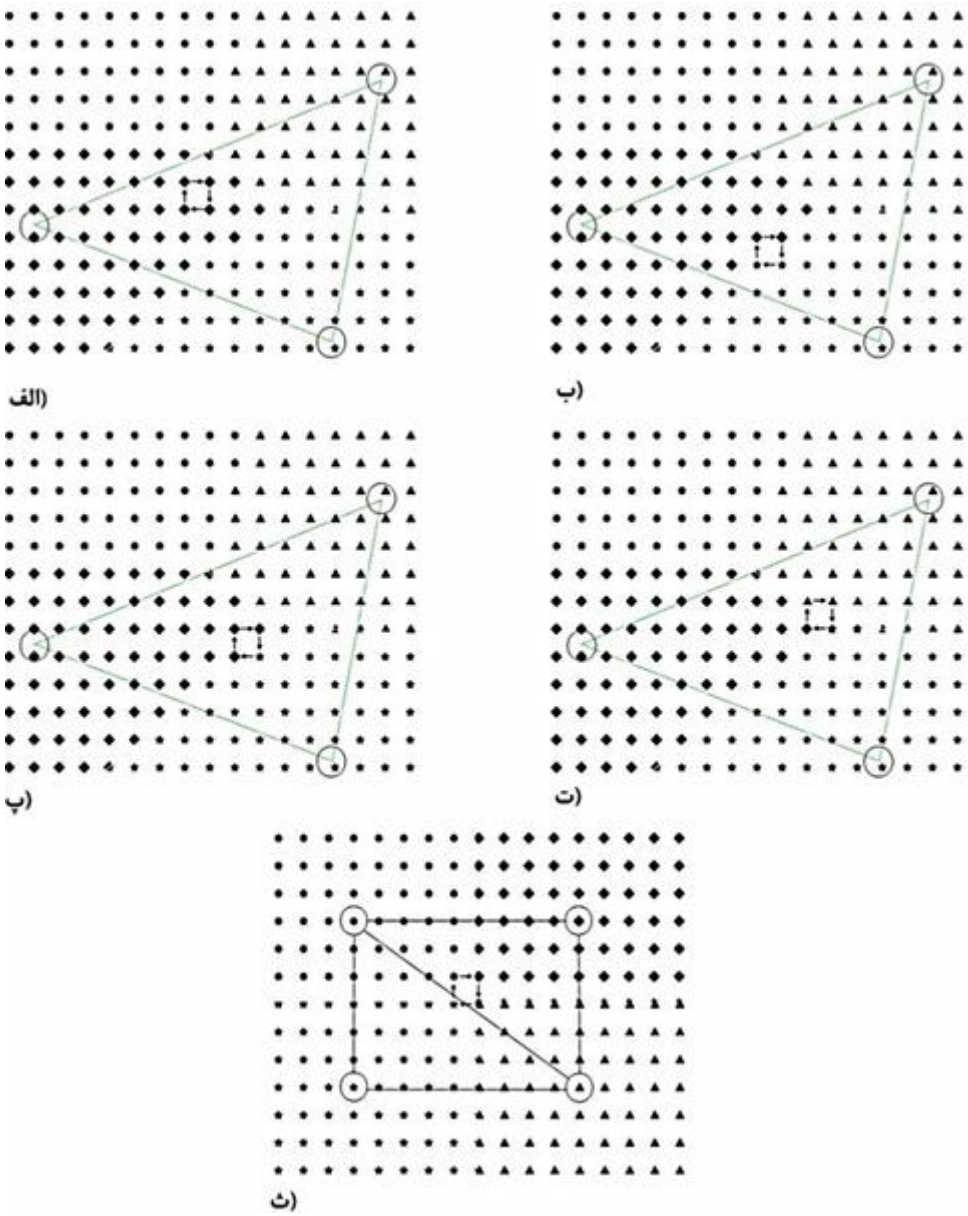
در راستای ایجاد یک فضای نامنظم از داده‌های واقعی، میزان یک درصد از نقاط موجود در تداخل نما شکل (۶-الف) که با استفاده از تصاویر ماهواره سنتینل ۱ ایجادشده است، انتخاب‌شده‌اند. شکل (۶-ب) یک تداخل نما در فضای نامنظم از منطقه سیرجان کرمان را نمایش می‌دهد. باید به این نکته توجه داشت که در عمل نقاطی که ویژگی‌های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

[1] Delaunay

[2] Delaunay triangulation

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-13]

[DOI: 10.29252/jgit.7.1.107]

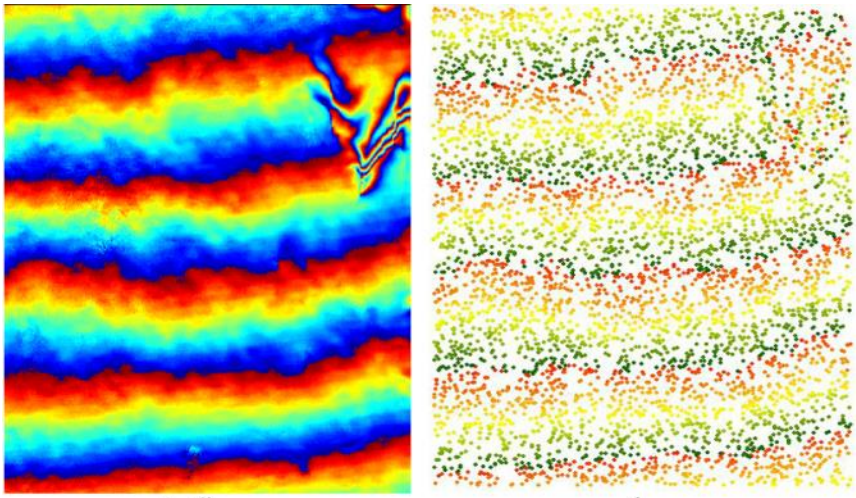


شکل ۵: تمامی حالات تشکیل یک لوپ در این تصویر نمایش داده‌شده است . نمادهای مختلف نشانگر داده‌های نامنظم متفاوت می‌باشد. تنها تصاویر(ت) و (ث) تشکیل باقی‌مانده می‌دهند.

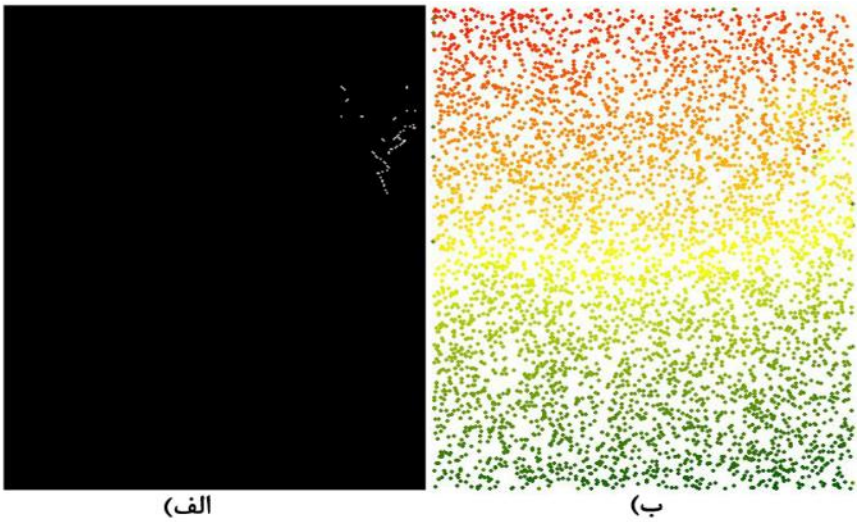
اگرچه در فضای گسسته نیز می‌توان تعریفی مشابه با فضای پیوسته برای باقی‌مانده ارائه داد، اما باید به این نکته توجه داشت که در فضای گسسته نمی‌توان تمامی نقاط باقی‌مانده را در نظر گرفت. این عدم توانایی در تعیین مکان دقیق نقاط باقی‌مانده باعث افزایش وابستگی به مسیر بازیابی فاز و کاهش دقت عملکرد الگوریتم حذف شاخه‌ها می‌شود. در شکل (۷-الف)) شاخه‌ها که معادل با محل‌های ناپیوستگی است، نمایش داده‌شده 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[1] در آن فشرده‌تر هستند را مشاهده کرد.

[1] Fringes

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-13]
[DOI: 10.29252/jgit.7.1.107]



شکل۶: تداخل نما ایجادشده با استفاده از تصاویر سنتینل۱ در منطقه سیرجان. الف) فضای منظم از تداخل نما واقعی، ب) فضای نامنظم ایجادشده از داده‌های منظم.

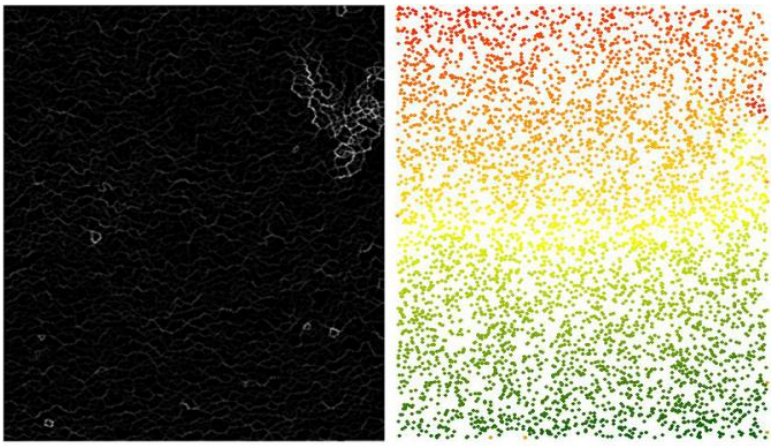


شکل۷: الف) محل قرارگیری شاخه‌ها در سطح تداخل‌نما. ب) نتیجه اعمال الگوریتم بازیابی فاز حذف شاخه‌ها بر روی داده‌های نامنظم

با معرفی یک نقشه هزینه‌بر اساس واریانس مشتق فازها و ترکیب آن با الگوریتم‌های مناطق رشد کننده[1] 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 ارائه‌شده است و می‌توان دید که همچنان در مناطقی با فشردگی فرینج‌ها عملکرد مناسبی دارد.

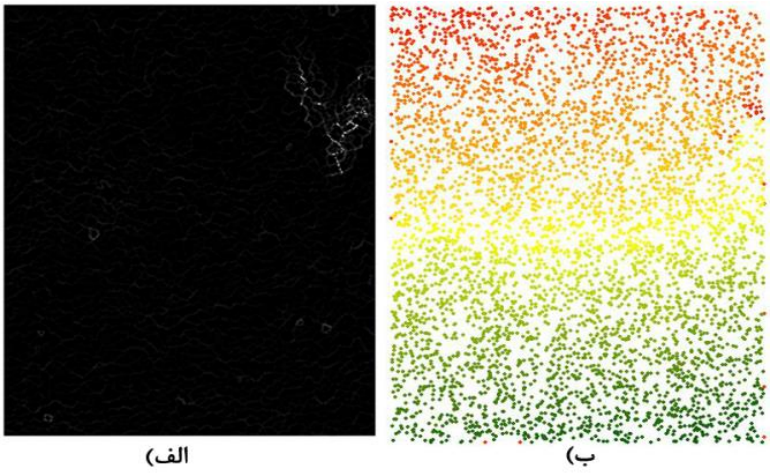
[1] Region Growing

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-13]
[DOI: 10.29252/jgit.7.1.107]



شکل۸: الف) نقشه هزینه ایجادشده بر اساس واریانس مشتق فازها. ب) فازهای تداخل‌سنجی بازیابی شده با استفاده از روش واریانس مشتق فازها

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 استفاده شده است. شکل (۹-الف) نقشه هزینه‌ی واریانس مشتق فازها است که با استفاده از محل قرارگیری شاخه‌ها بهبودیافته 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



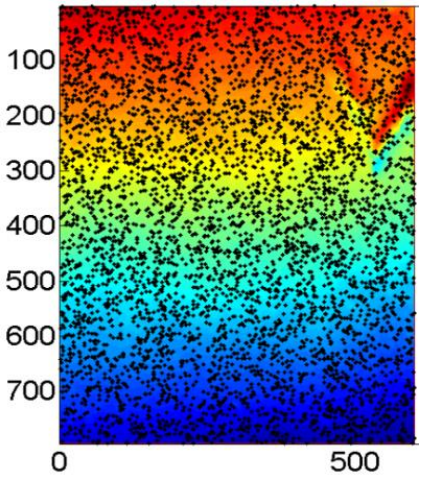
شکل ۹: خروجی روش واریانس مشتق فاز-حذف شاخه‌ها. الف) نقشه هزینه، نقاط روشن پرهزینه‌ترین و نقاط تیره کم‌هزینه‌ترین. تأثیر شاخه‌ها را می‌توان در افزایش هزینه پیکسل‌های معادل آن دید. ب) فازهای بازیابی شده توسط واریانس مشتق فازحذف شاخه‌ها

۴- ارزیابی

همان‌گونه که بیان شد برای ارزیابی صحت نتایج، خروجی‌های روش‌های معرفی‌شده در بخش ۳ با خروجی روش تداخل سنجی متداول، به‌صورت 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

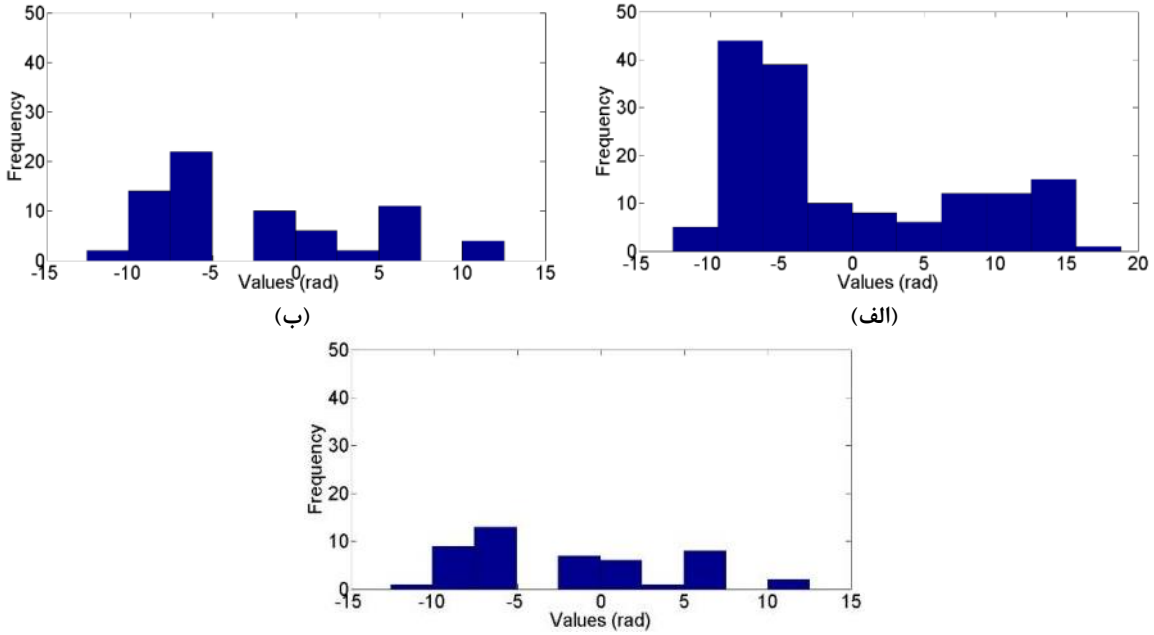
[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-13]
[DOI: 10.29252/jgit.7.1.107]

بین جواب‌های دو روش برابر با ۱ رادیان که در تصاویر سنتیل۱ معادل با مقدار ۴.۴ میلی‌متر می‌باشد، در نظر گرفته‌شده است. در شکل (۱۰) نتیجه بازیابی فازها در تداخل‌سنجی متداول با استفاده از الگوریتم MCF در فضای منظم نمایش داده‌شده است. همچنین، موقعیت نقاط پراکنش کننده‌ی انتخابی نیز با استفاده از نقاط مشکی بر روی تداخل نما نمایش داده‌شده است



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

در این بخش به‌منظور مقایسه‌ی کمی سه روش معرفی‌شده در بخش ۳ با خروجی روش MCF معیار هیستوگرام خطاها برای پیکسل‌هایی که به‌عنوان پراکنش کننده‌ی پایدار انتخاب‌شده‌اند، در نظر گرفته‌شده است. در شکل (۱۱) هیستوگرام‌های خطای هر سه روش نمایش داده‌شده‌اند.



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.

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-13]
[DOI: 10.29252/jgit.7.1.107]

با مقایسه‌ی هیستوگرام‌های شکل (۱۱) می‌توان دید که الگوریتم واریانس مشتق فازها- حذف شاخه‌ها عملکرد بسیار مناسب‌تری را در مقایسه با دیگر روش‌ها داشته است. همچنین، در جدول (۱) تعداد پیکسل‌هایی که فازهای آن‌ها اشتباه برآورد شده‌اند، بیان‌شده‌اند.

جدول ۱: تعداد پیکسل‌هایی که به‌اشتباه برآورد شده‌اند

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

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 به‌دلیل کمبود اطلاعات در شناسایی محل تمامی باقی‌مانده‌ها، عملکرد به‌مراتب 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 روزنه 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 پراکنش کننده‌های پایدار به دنبال انتخاب پیکسل‌های با کمترین احتمال آغشتگی به نویز 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 به‌مراتب 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 به‌مراتب 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 پراکنش کننده‌های پایدار اعمال کرد. همان‌طور که در بخش قبل مشاهده شد،

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

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-

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-13]

[DOI: 10.29252/jgit.7.1.107]

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 apploaches 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 Diffrences," *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 fot 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.

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-13]

[DOI: 10.29252/jgit.7.1.107]

K. N. TOOSI UNIVERSITY OF TECHNOLOGY
FACULTY OF GEODESY AND GEOMATICS ENGINEERING

Journal of Geospatial Information Technology
Vol.7 No.1, Spring 2019

Research Paper

InSAR Phase Unwrapping by Transforming Sparce Data into a Regular Space

Amin Tavakkoli Estahbanati*[*1], Maryam Dehghani[2]

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 grand surface displacements, interferomtric phases modulated between 0 to 2π 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 continues grid with neatest 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 approached are implemented on an irregular interferogram processed from Sentinal1A satellite images acquired over the Sirjan basin. At the end, the results of these approaches are assesed with unwraped phase which is resulted in a conventional interferogram unwrapped with MCF method.

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

Correspondence Address: *Department of Civil and Environmental Engineering, School of Engineering, Shiraz University, Shiraz, Iran..*
Tel:*. +98 9171018975..*
Email: *amintavakkoli.est@gmail.com*

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-13]

[DOI: 10.29252/jgit.7.1.107]