

ارزیابی روش‌های ارائه‌شده به منظور بازیابی فاز در روش تداخل‌سنجی راداری متداول

امین توکلی اصطهباناتی^۱، مریم دهقانی^{۲*}، علیرضا امیری سیمکویی^۳

۱- دانشجوی کارشناس ارشد، ۲- استادیار، بخش مهندسی راه، ساختمان و محیط زیست، دانشکده مهندسی، دانشگاه شیراز ۳- دانشیار، دانشگاه اصفهان (دریافت: ۹۵/۱۰/۱۰؛ پذیرش: ۹۶/۰۶/۰۶)

چکیده

از روش تداخل‌سنجی رادار با روزه مصنوعی می‌توان برای استخراج توپوگرافی یا برآورد جابه‌جایی سطح زمین استفاده کرد. یکی از مهمترین مراحل تخمین جابه‌جایی از یک تداخل‌نگاشت، بازیابی فاز می‌باشد که نتایج را به شدت تحت تأثیر قرار می‌دهد. به دلیل ماهیت مسأله بازیابی فاز، پیدا کردن تعداد سیکل‌های صحیح فاز از دست‌رفته یک مسأله بحرانی و سخت است. اگر در بحث تداخل‌سنجی از روش تداخل‌سنجی راداری متداول استفاده شده باشد، فازها به صورت منظم در سطح تداخل‌نگاشت پراکنده می‌شوند. در طی سالیان اخیر، روش‌های متعددی برای بازیابی فاز در فضای منظم ارائه شده است. از آن‌جا که تاکنون تحقیقی جامع در خصوص ارزیابی روش‌های مختلف بازیابی فاز صورت نگرفته، این مقاله به معرفی مهم‌ترین روش‌های بازیابی فاز در فضای منظم و بررسی نقاط قوت و ضعف هر یک پرداخته است. از آن‌جا که در بیشتر مواقع به منظور بازیابی فاز از روش‌های بازیابی فاز در فضای منظم استفاده می‌شود، تعدادی از روش‌های با عملکرد بهینه‌تر بر روی داده‌های واقعی ماهواره ENVISAT ASAR مربوط به منطقه دشت تهران اعمال و مورد ارزیابی قرار گرفت.

واژگان کلیدی

تداخل‌نگاشت، بازیابی فاز، فضای منظم، تداخل‌سنجی متداول

۱- مقدمه

ذکر شده، مقدار این فازهای بازیابی نشده^۴ (دارای ابهام) باید بازیابی شوند و از آن‌جایی که خطای اندازه‌گیری یکی از مهم‌ترین منابع خطایی است که منجر به بروز اشتباه در بازیابی فاز می‌شود، تلاش‌های زیادی در جهت افزایش اطمینان کلی الگوریتم‌های بازیابی فاز صورت گرفته است.

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 (π رادیان) داشته باشند (شرط نایکوئیست). اگر این فرض در تمام مناطق تصویر برقرار بود، می‌توان به سادگی درون تداخل‌نگاشت در امتداد هر مسیری از یک پیکسل به پیکسل دیگر فاز پیکسل‌ها را بازیابی کرد. لیکن در اکثر تداخل‌نگاشت‌ها نقاطی وجود دارند که اختلاف فاز آن‌ها بیشتر از نیم سیکل است. با این وجود، فرض قراردادن اختلاف فاز پیکسل‌های همسایه در محدوده نیم سیکل در اکثر مناطق تداخل‌نگاشت تقریباً صحیح در نظر گرفته می‌شود. با این حال، چون در بازیابی فاز از یک پیکسل به پیکسل بعدی حرکت می‌کنیم، وجود خطا در یکی از اختلاف فازها باعث ایجاد خطا در

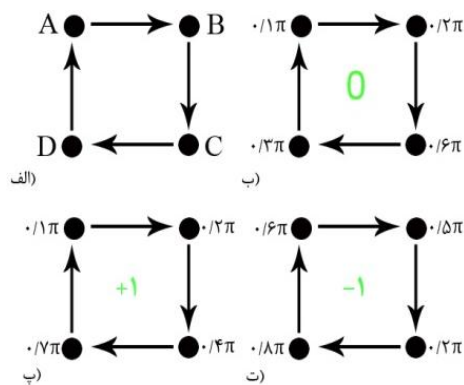
روش تداخل‌سنجی راداری^۱ (InSAR) یکی از روش‌های برآورد جابه‌جایی یا توپوگرافی سطح زمین است. در این روش، تصاویر مختلط راداری که شامل دامنه و فاز موج برگشتی از عارضه به سمت سنجنده هستند، با یکدیگر تلفیق شده و یک تداخل‌نگاشت^۲ را تشکیل می‌دهند. آنچه در یک تداخل‌نگاشت به عنوان مشاهده در اختیار است مجموعه‌ای از فازها می‌باشد که بسته به این که از روش‌های تداخل‌سنجی متداول^۳ یا از پراکنش‌کننده‌های پایدار^۴ استفاده کنیم به ترتیب به صورت منظم یا نامنظم در سطح تصویر پراکنده شده‌اند. فازهای یک تداخل‌نگاشت، مقداری بین صفر و 2π دارند که به این صورت قابل استفاده نمی‌باشند. بازیابی فاز^۵ که یکی از مراحل روش تداخل‌سنجی راداری است، فرآیندی است به منظور برآورد فازهای بدون ابهام از آرایه‌ای دو بعدی از مقدار فازهایی که بین صفر تا 2π مدوله شده‌اند. در تمامی کاربردهای

* نویسنده مسئول: dehghani_rsgsi@yahoo.com

- 1- SAR Interferometry (InSAR)
- 2- Interferogram
- 3- Conventional
- 4- Persistent Scatterer (PS)
- 5- Unwrapping

حول یک لوب، یا چرخه بسته، اطراف یک مربع 2×2 از پیکسل‌های یک تداخل‌نگاشت، نتیجه‌ای برابر با ۰ یا ۱ یا -۱ خواهد داشت (شکل ۱). این شکل، نحوه تعیین باقی‌مانده را نشان می‌دهد. جواب‌های غیر صفر بار یا باقی‌مانده نامیده می‌شوند و براساس این فرض که تفاضل فازهای بازبایی نشده کمتر از نیم سیکل است، این جواب‌های غیر صفر نشان‌دهنده آشفتگی و گسیختگی بین داده‌ها می‌باشد.

خروجی روش‌های تداخل‌سنجی متداول دسته‌ای از فازهای دارای ابهام (بازبایی نشده) می‌باشند که به‌صورت منظم در کنار یکدیگر توزیع شده‌اند. همان‌طور که بیان شد، دو رویکرد به‌منظور به‌دست آوردن فازهای بازبایی شده (بدون ابهام) وجود دارد. به سبب پیشینه و قدمت روش‌های تداخل‌سنجی متداول، الگوریتم‌های بازبایی فازی که بر مبنای آن‌ها تعریف شده‌اند، تنوع زیادی دارند.



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

باقی‌مانده =

$$0/1 + 0/4 - 0/3 - 0/2 \quad (ب)$$

$$0/1 + 0/2 + 0/3 + (0/1 - 0/7 + 1) \quad (پ)$$

$$-0/1 - 0/3 + (0/8 - 0/2 - 1) - 0/2 \quad (ت)$$

شکل (۱): نحوه تعیین باقی‌مانده. در تصویر (الف) نحوه قرارگیری یک مربع 2×2 بر روی مشاهدات یک تداخل‌نگاشت نمایش داده شده است. در تصاویر (ب، پ و ت) به ترتیب مثال‌هایی برای باقی‌مانده‌های ۰، ۱ و -۱ آورده شده است.

۲-۱- بازبایی فاز به‌صورت عمومی یا سراسری

رویکرد اول بدین‌گونه است که کل مسأله به‌صورت بهینه‌سازی یک تابع هدف و یک تابع هزینه در کنار قیودی که اعتبار مسأله را تأیید می‌کند، تعریف می‌شود. این تابع هدف می‌تواند تابعی از حاصل جمع تمام فازها یا تابعی از حاصل جمع تمام اختلاف فازها باشد [۱۰]. به منظور افزایش بازده محاسباتی فرض می‌شود که

پیکسل بعدی می‌شود. بنابراین، اگر به‌صورت مناسبی با این مسأله برخورد نشود، اختلاف فازهای بزرگ‌تر از نیم سیکل ممکن است باعث ایجاد خطاهای بزرگ‌تری شوند که کل مناطق تداخل‌نگاشت را تحت تأثیر قرار خواهند داد.

مجموعه‌ای از فازهای بازبایی شده حاوی اطلاعاتی هستند که پس از مدوله‌شدن فازها در بازه صفر تا 2π ، در مجموعه فازهای بازبایی نشده وجود ندارند. بنابراین، بازبایی فاز به‌صورت دقیق یک مسأله غیرممکن می‌باشد. با این وجود، الگوریتم‌های متفاوتی بسته به نحوه توزیع مشاهدات تاکنون ارائه شده‌اند که در این‌جا مروری کلی بر روی آن‌ها خواهیم داشت. روش‌های بازبایی فازی که بر مبنای تداخل‌سنجی متداول هستند، به سبب تاریخچه آن‌ها، تنوع و گستردگی فراوانی دارند. به سبب نحوه مدل‌سازی و برخورد با مسأله بازبایی فاز، می‌توان آن‌ها را به دو دسته تقسیم کرد. دسته اول، روش‌هایی هستند که یک حل کلی از مسأله ارائه می‌دهند^۱ که از نمونه‌های آن‌ها می‌توان به [۳، ۲، ۱] اشاره کرد. دسته دوم، الگوریتم‌هایی هستند که به‌صورت موضعی و محلی^۲ مسأله را حل می‌کنند. از نمونه‌های این روش‌ها می‌توان [۹ و ۸، ۷، ۶، ۵، ۱] را نام برد. در طرف دیگر الگوریتم‌هایی وجود دارند که مبنای کار آن‌ها براساس پراکنش‌کننده‌های پایدار است. روش‌های حل آن را نیز می‌توان به دو دسته تقسیم کرد که معرفی این روش‌ها را به مقالات بعدی واگذار می‌کنیم.

به‌طور کلی، در مبحث بازبایی فاز در یک تداخل‌نگاشت، دو رویکرد وجود دارد: دسته‌ای که سعی بر بازبایی فاز تمام پیکسل‌ها به‌صورت کلی و یکجا دارند و دسته دوم که سعی بر حل مسأله به‌صورت محلی و موضعی دارند. روش‌های متعددی براساس هریک از رویکردها ارائه شده‌اند که نسبت به یکدیگر معایب و مزایایی دارند. در ادامه به بررسی آن‌ها خواهیم پرداخت.

۲- روش‌های بازبایی فاز در فضای منظم

یکی از مهم‌ترین مفاهیم در بحث بازبایی فاز مفهوم باقی‌مانده^۳ است. در مجموعه‌ای از فازهای بازبایی شده صحیح، مقدار اختلاف فازها حول یک لوب بسته همیشه باید برابر صفر باشد. در مجموعه‌ای از فازهای بازبایی نشده، مقدار حقیقی اختلاف فازهای بزرگ‌تر از نیم سیکل به مقادیر مختلفی در بازه صفر تا 2π مدوله خواهند شد و این باعث می‌شود که مقدار مجموع اختلاف فازها حول یک لوب بسته برابر صفر نباشد. این ویژگی توسط گلدشتین^۴ و همکارانش برای تعیین محل ناپیوستگی‌ها و جهش فازها استفاده شده است [۵]. حاصل جمع اختلاف فازهای تبدیل‌شده

1- Global (Path-Independent)

2- Local (Path following)

3- Residue

4- Goldstein

کمترین مربعات وزن دار خروجی مناسب تر و دقیق تری نسبت به کمترین مربعات عادی دارد.

۲-۱-۲- کم هزینه ترین جریان^۵ (MCF)

الگوریتم بازیابی فاز کم هزینه ترین جریان مسأله کمینه سازی هزینه کلی جریان بین باقی مانده هایی که حول یک لوپ بسته تشکیل شده اند را بیان می کند. این الگوریتم را می توان ادغامی از الگوریتم حذف شاخه ها [۵] با تئوری شبکه ها 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^۶ جهت یافتن چرخه های منفی
- ۳- حذف این چرخه های منفی با القاکردن جریان بر روی آن ها
- ۴- حذف این چرخه های منفی تا زمانی که دیگر هیچ چرخه منفی در شبکه باقی نمانده باشد. اجرا و بیان الگوریتم MCF بدین سان ساده است، اما در عمل، روش های دیگر برای حل مسأله MCF سریع تر هستند.

همان طور که در ابتدا اشاره شد، استفاده از نرم های کوچک تر منجر به حلی کارآمدتر خواهد شد. روش های کمترین مربعات عادی باعث پخش شدن خطا بین نقاط می شوند و دقت خوبی ندارند. روش کمترین مربعات وزن دار نیز از یک الگوریتم تکراری استفاده می کند و همانند کمترین مربعات عادی کارایی چندانی ندارد. همچنین، نتیجه حاصله وابسته به وزن های تخصیص داده شده به آن ها می باشد [۷]. این دلایل باعث می شود که مسأله بازیابی فاز به صورت یک مسأله کلی کمینه سازی متغیرهای صحیح مطرح شود.

مسأله کمینه سازی با متغیرهای صحیح معمولاً از نظر محاسباتی پیچیده است. با این حال، بهره بردن از ساختار شبکه^۷ یک استراتژی مؤثر برای حل مسأله کمینه سازی است. در اصل با انتخاب نرم 1 و وزن دار به عنوان معیار خطا، مسأله بازیابی فاز می تواند با مسأله پیدا کردن کمترین جریان بر روی شبکه که برای آن راه حل مؤثری وجود دارد، هم ارز و برابر در نظر گرفته شود.

کستانتینی^۸ [۲] از هم ارزی بین مسأله مقید درخت پوشای کمینه^۹ و MCF برای فرموله کردن مسأله در قالب یک مسأله شبکه استفاده کرد. فرمول بندی روش MCF این امکان را می دهد که یک معیار کیفیت را در قالب توابع هزینه برای جانمایی خودکار محل حذف شاخه ها^{۱۰} داشته باشیم. MCF این امکان را

حل نرم LP به معادله پوآسن^۱ زیر کاهش می یابد:

$$\nabla^2 \hat{\phi} = \nabla^2 \varphi \quad (8)$$

که در آن، ∇^2 بیان کننده اپراتور لاپلاسیان و $\hat{\phi}$ فاز بازیابی شده تخمینی است. سمت راست معادله بالا را می توان مستقیماً از روی مشاهدات محاسبه کرد. همان طور که مشاهده می شود، معادله (۷) بیان کننده تجزیه هلمهولتز است. پس حل این مسأله، کمترین مربعات بدون وزن معادل با حل مسأله پوآسن با شرط مرزی نیومن می باشد. شرط مرزی نیومن بیان می کند که شیب فازهای بازیابی شده و شیب فازهای بازیابی نشده با یکدیگر برابر هستند. در معادله (۸) با استفاده از ارتباط بین کانولووشن در فضای مکان و ضرب در فضای فرکانس، می توان اپراتور لاپلاسیان را دی کانوالو کرد. بنابراین، با استفاده از تبدیل کساین گسسته یا تبدیل فوریه گسسته^۲ می توان به جواب مناسبی رسید.

اگر تعدادی نقطه در تداخل نگاشت وجود داشته باشند که نسبت به بقیه مورد اعتمادتر باشند، به عنوان مثال، دارای همبستگی بیشتری باشند، بایستی از الگوریتم کمترین مربعات وزن دار استفاده کرد. با اضافه کردن جذر ماتریس وزن برای هر نقطه به معادله (۳) داریم:

$$Ws = WP\phi + n \quad (9)$$

که در آن، W جذر ماتریس وزن است. بنابراین، معادله نرمال برای کمترین مربعات وزن دار به صورت زیر بیان می شود:

$$\phi = (P^T W^T W P)^{-1} P^T W^T W s \quad (10)$$

متأسفانه کمترین مربعات وزن دار منجر به همان معادله پوآسن نمی شود. بنابراین، تبدیل گسسته کساین را نمی توان به صورت مستقیم اعمال کرد. با این وجود، فیگلیا و رومرو نشان دادند که برخی از روش های تکراری که از تبدیل کساین استفاده می کنند، جواب های مطلوبی دارند. یک روش دیگر برای یافتن جواب بهینه، استفاده از گرادیان مزدوج^۳ می باشد [۱۲]. دقت حل مسأله به وزن های در نظر گرفته شده برای هر نقطه وابسته می باشد. دو گزینه عادی برای انتخاب وزن ها همبستگی مشاهدات تداخل سنجی یا نسبت سیگنال به نویز می باشد. روش های متعدد دیگری نیز برای انتخاب وزن ها توسط پری^۴ [۱۳] ارائه شده است. وزن ها باید به گونه ای انتخاب شوند که محل هایی که احتمال گسیختگی و آشفستگی در آن ها بیشتر است، تأثیر کمتری در تابع هدف داشته باشند. به همین علت است که

5- Minimum Cost Flow (Mcf)

6- Dijkstra

7- Network Structure

8- Costantini

9- Minimum Spanning Tree (Mst)

10- Brach- Cuts

1- Poisson

2- Discrete Fourier Transform

3- Conjugate Gradient

4- Pritt

محاسبات کارایی مهمی دارند.

۲-۱-۳ SNAPHU

هدف این الگوریتم به دست آوردن فازهای بازیابی‌شده با استفاده از توابع هزینه- آماری در فضای شبکه- جریان^۲، است. چن^۳ و زبکر^۴ [۷] براساس فرم ساده توابع هدف کمینه نرُم LP مینیمم، تابع هدفی را ارائه دادند که مسأله بازیابی فاز را به شکل یک مسأله تخمین آماری بیان می‌کند. این تابع هدف به شکل زیر می‌باشد:

$$\text{minimize} \left\{ \sum_k g_k(\Delta\phi_k, \Delta\psi_k) \right\} \quad (13)$$

که در آن، $\Delta\psi$ و $\Delta\phi$ به ترتیب اختلاف فازهای بازیابی‌شده و بازیابی‌نشده می‌باشد. به هر شیب فاز، یا هر کمان در مدل شبکه، یک تابع هزینه دلخواه مستقل $g(\cdot)$ که جریان کمان، $\frac{(\Delta\phi - \Delta\psi)}{2\pi}$ را در یک هزینه اسکالر تصویر می‌کند، اختصاص داده شده است. اندیس k شامل تمامی گرادیان‌های سطری و ستونی می‌باشد. بنابراین، هزینه کلی تابع هدف برابر با حاصل جمع هزینه تمامی کمان‌ها می‌باشد.

چن و زبکر در تعریف توابع هزینه از چهارچوب تخمینی بیشینه‌گر احتمال پسین^۵ استفاده کردند. توابع هزینه کمان‌ها به نحوی تعیین شده است که کمینه‌کردن هزینه کلی تقریباً احتمال بازیابی فاز از داده‌های مشاهداتی را بیشینه کند. این توابع هزینه متشکل از لگاریتم‌های منفی از توابع چگالی احتمال گرادیان‌های بازیابی‌شده، هستند.

$$g_k(\Delta\phi_k, \Delta\psi_k) = -\log f(\Delta\phi_k | \Delta\psi_k, I, \rho) \quad (14)$$

که در این جا، $f(\cdot)$ بیانگر تابع احتمال شرطی از فازهای بازیابی‌شده براساس شیب مشاهدات بازیابی‌نشده $\Delta\psi$ ، I مؤلفه شدت تصویر و ρ همبستگی مشاهدات تداخل‌سنجی می‌باشد. بنابراین، تابع هزینه $g(\cdot)$ وابسته به مقادیر محلی مشاهدات است و شکل آن در طول تداخل‌نگاشت تغییر می‌کند. شکل واقعی این توابع با توجه به کاربردهای مختلف تداخل‌سنجی راداری متفاوت است.

متأسفانه شکل پیچیده این توابع هزینه آماری مسأله بازیابی فاز را به یک مسأله بهینه‌سازی واگرا و سخت تبدیل می‌کند. با این وجود، می‌توان این مسأله را با بهره جستن از روش‌های غیرخطی شبکه- جریان حل کرد. راه حل SNAPHU برای ایجاد بهبود در حل جریان- میسر از یک الگوریتم تکراری حذف

می‌دهد که مسأله را برای مقادیر صحیح سیکل فازی، $K_{i,j}$ ، که نیاز است به هر لبه از گرید بازیابی فاز اضافه شود، حل شود.

هرگاه تابع هزینه غیرصفر $C_{i,j}$ معرفی شود که همراه با اضافه کردن یک واحد سیکل فاز بر روی هر کدام از لبه‌ها باشد، مسأله بازیابی فاز دوبعدی را می‌توان به صورت یک مسأله کمینه‌سازی خطی همراه با متغیرهای حقیقی بیان کرد. همچنین، این موضوع بیان‌کننده یک مسأله MCF بر روی شبکه می‌باشد.

$$\text{minimize} \sum_{\forall (i,j) \in E} C_{i,j} \cdot \|K_{i,j}\| \quad (11)$$

مقید به:

$$\begin{aligned} K_{AB} + K_{BC} + K_{CD} + K_{DA} \\ = \left[\frac{\psi_A - \psi_B}{2\pi} \right] + \left[\frac{\psi_B - \psi_C}{2\pi} \right] \\ + \left[\frac{\psi_C - \psi_D}{2\pi} \right] + \left[\frac{\psi_D - \psi_A}{2\pi} \right] \end{aligned} \quad (12)$$

که در آن، K همان سیکل صحیحی است که از مسأله بهینه‌سازی به دست می‌آید.

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

سمت راست معادله (۱۲) نشانگر باقی‌مانده‌هایی است که در هر لوپ بسته محاسبه می‌شوند، شکل (۱) و $\| \cdot \|$ بیانگر نرُم $L1$ و E بیانگر تمامی لبه‌های موجود در یک گرید مربعی می‌باشد. مقدار سیکل صحیح فازی که نیاز است به مسأله اضافه شود 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 متعدد و متفاوتی برای حل مسأله MCF وجود دارند که توضیح آن‌ها از حوصله این بحث خارج است [۱۵]. آنچه اهمیت دارد استفاده از کارآمدترین الگوریتم MCF برای حل مسأله بازیابی فاز است.

اضافه کردن یک سری از ویژگی‌ها و پارامترها عملکرد محاسباتی را بهبود می‌بخشد. فرض کنید که b_1 و b_2 حداکثر مقادیر صحیح نامنفی جهش فاز باشند. این فرض باعث می‌شود تا دو معادله زیر به مجموعه معادلات اضافه شود:

$$|k_1(i,j)| \leq b_1(i,j) \quad \text{و} \quad (i,j) \in S_1$$

$$|k_2(i,j)| \leq b_2(i,j) \quad \text{و} \quad (i,j) \in S_2$$

که در آن، S_1 و S_2 کلیه نقاط شبکه، k_1 و k_2 به ترتیب کلیه لبه‌های افقی و عمودی می‌باشند. این قیود که براساس فرض‌های اولیه نسبت به شبکه استوار می‌باشند برای افزایش دقت و سرعت

1-Statistical-cost Network-flow Algorithm for Phase Unwrapping

2- Network-flow

3- Chen

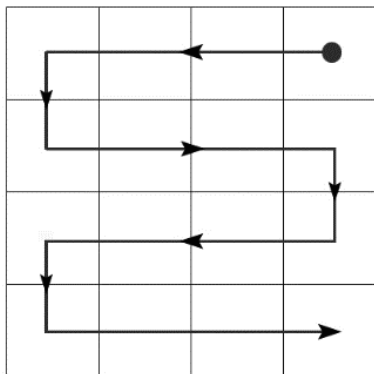
4- Zebker

5- Maximum a Posteriori (MAP)

الگوریتم‌ها را می‌توان به‌وسیله خم‌های پرکننده فضا^۳ حل کرد. دسته دیگری از الگوریتم‌های بازیابی فاز وجود دارند که ابتدا با استفاده از یک نقشه کیفیت یا یک نقشه هزینه مسیرهای مناسب معرفی می‌گردد. سپس با استفاده از الگوریتم مناطق رشدکننده^۴ پیکسل بعدی انتخاب می‌شود و براساس تابع بازیابی فاز، فازها بازیابی می‌شوند. در این روش‌ها، ابتدا پیکسل‌های با کیفیت بالا یا هزینه پایین، در دسترس قرار می‌گیرند و سپس پیکسل‌های با کیفیت پایین یا هزینه بالا در دسترس قرار می‌گیرند.

۲-۲-۱- بررسی خطی^۵

این الگوریتم جزء روش‌هایی است که از مسیرهای متوالی و پی‌درپی استفاده می‌کند (شکل ۲). در این روش، خطاهای موجود در مشاهدات از جمله سایه راداری^۶ و Aliasing در بین داده انتقال می‌یابد. این الگوریتم به همراه برخی فیلترها نیز مورد استفاده قرار می‌گیرد. این فیلترها از اطلاعات قبلی یا فرض‌های خاصی در مسأله استفاده می‌کنند تا سطح اطمینان جواب را بالا ببرند.



شکل (۲): استفاده از مسیرهای متوالی و پی‌درپی در بازیابی فاز

۲-۲-۲- بیشترین همبستگی^۷

مقدار همبستگی تداخل‌نگاشت را می‌توان به‌عنوان یک نقشه کیفیت در نظر گرفت، به‌طوری‌که نقاط با میزان شباهت بالا از کیفیت بالاتری جهت بازیابی فاز برخوردار خواهند بود. مقدار مختلط همبستگی یک تداخل‌نگاشت را می‌توان به‌صورت زیر محاسبه کرد [۱۳]:

$$\gamma = \frac{E[MS^*]}{\sqrt{E[MM^*] E[SS^*]}} \quad (15)$$

که در آن، E امید ریاضی، * مزدوج مختلط، M تصویر پایه و

دینامیک سیکل‌های منفی^۱ [۵] استفاده می‌کند. در این الگوریتم برای مقداردهی اولیه جریان‌ها از الگوریتم درخت پوشای کمینه [۷] استفاده می‌شود. در هر تکرار راه‌حل MCF هزینه‌های افزایشی ارسال مقادیر گسسته جریان بر روی هر کمان در هر جهتی را محاسبه می‌کند. سپس حل MCF جریان را بر روی لوب‌های بسته، چرخه‌های جهت‌داری که در شبکه هزینه افزایشی منفی دارند، القاء می‌کند. بنابراین، مراحل MCF از یک حل تا حل مسیر بعدی مقدار هزینه کلی را کاهش می‌دهد.

۲-۲-۲- بازیابی فاز به‌صورت موضعی یا محلی

رویکرد دوم که به‌نوعی می‌توان آن را زیر مجموعه و حالت خاصی از رویکرد اول دانست، از ایده دنبال‌کننده مسیر^۲ 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. شباهت این روش‌ها به رویکرد اول از آن جهت می‌باشد که اگر در تابع هدف معادله (۲)، p برابر صفر باشد، هدف کمینه‌کردن تعداد محل‌های وزن‌داری است که در آن شیب فازهای بازیابی شده و فازهای بازیابی نشده تفاوت دارد [۳].

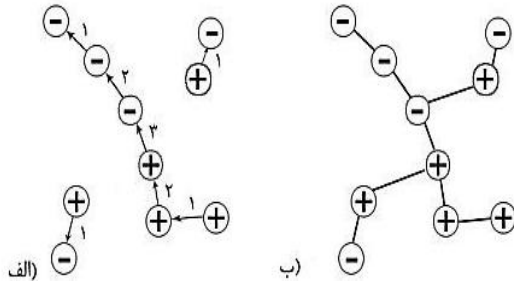
صرف‌نظر از نحوه انتخاب مسیر مورد نظر، روند کلی بازیابی فاز به دو بخش تقسیم می‌شود: ۱- انتخاب یا پیداکردن پیکسل بعدی، ۲- استفاده از یک تابع برای بازیابی فاز. برخی از روش‌ها با در نظر گرفتن یک تابع بازیابی فاز ساده، برقراری شرط نمونه‌برداری نایکویست، سعی بر بازیابی فاز دارند. اما دسته دیگری از الگوریتم‌ها این تابع را با یک فیلتر جایگزین می‌کنند.

از آن‌جایی که در روش‌های نرم LP مسأله به‌صورت کلی حل می‌شود، در برخی نقاط دقت جواب‌ها پایین است. به همین دلیل، سعی بر استفاده از روش‌هایی است که مقدار فاز بازیابی‌شده را به‌صورت محلی به‌دست آورند. در روش‌های بازیابی موضعی فاز ابتدا یک مسیر مناسب که در آن احتمال وقوع ناپیوستگی‌ها یا جهش فازهای ناگهانی کمتر است، در نظر گرفته می‌شود. سپس در طی مسیر با استفاده از یک تابع، فاز پیکسل مورد نظر با استفاده از پیکسل قبلی بازیابی می‌شود و به همین ترتیب، مسیر بعدی شناسایی و فاز آن بازیابی می‌شود. این روش‌ها از مسیرهای متوالی و پشت سر هم استفاده می‌کنند. در فضای دوبعدی این

3- Space-fill-curves
4- Region growing
5- Line Scan
6- Radar shadow
7- Maximum Coherence (MC)

1- Dynamic Cycle Canceling (DCC)
2- Path following

طول مسیر بازیابی فاز از هیچ‌یک از شاخه‌های درخت‌ها عبور نکنند. این الگوریتم عموماً در مناطقی از تداخل‌نگاشت 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 تداخل‌نگاشت می‌شود. نتیجه این اتفاق به وجود آمدن مناطق مجزایی^۴ در سطح تداخل‌نگاشت است.



شکل (۴): درخت پوشای کمینه تمامی باقی‌مانده‌ها را در بر می‌گیرد، (الف) در الگوریتم حذف شاخه‌ها، احتمال رخ دادن گسیختگی در درخت‌های خنثی است، عددها بیانگر اندازه جریان می‌باشند. (ب) اتصال باقی‌مانده‌ها در درخت پوشای کمینه.

۲-۲-۵- درخت پوشای کمینه

الگوریتم درخت پوشای کمینه یک بازنگری بر روی الگوریتم حذف شاخه‌ها می‌باشد. بنابراین، بسیاری از تعاریف از جمله باقی‌مانده و شاخه در هر دو یکسان می‌باشد. از آنجایی که شاخه‌ها به‌عنوان محل‌هایی با احتمال وقوع گسیختگی و جهش فاز به‌کار برده می‌شوند، طول کل درخت حد بالای طول گسیختگی‌ها می‌باشد. از این‌رو، کمینه‌کردن طول درخت یک هدف معقول و مناسب است، اما پیدا کردن مقدار دقیق کمینه آن یک مسأله سخت است [۷]. چون افزایش طول درخت الزاماً طول گسیختگی‌ها را افزایش نمی‌دهد، بسیاری از شاخه‌های درخت بیانگر گسیختگی نخواهند بود. بدین سبب، تغییراتی در الگوریتم حذف شاخه‌ها ایجاد شده است. هنگامی که یک درخت خنثی شد، درخت بعدی از نزدیک‌ترین باقی‌مانده به این درخت آغاز می‌شود و عملاً این درخت با یک شاخه به درخت بعدی وصل می‌شود. به عبارت دیگر، درخت واحدی تشکیل می‌گردد که تمامی بارها را در بر می‌گیرد (۴- الف). انتخاب نزدیک‌ترین باقی‌مانده با توجه به فواصل وزن‌دار صورت می‌گیرد [۷]. به‌طور کلی، این درخت یک درخت اشتاینر کمینه^۵ خواهد بود، اما این فرآیند درخت پوشای کمینه‌ای را ایجاد می‌کند که تقریبی از درخت اشتاینر کمینه است. در یک درخت اشتاینر کمینه محل اتصال شاخه‌ها تنها محدود به نقاط باقی‌مانده نیست (شکل ۵).

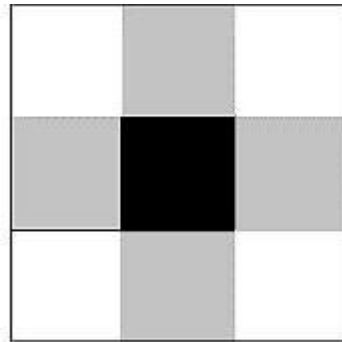
S تصویر پیرو می‌باشند. پیکسلی که دارای بالاترین میزان همبستگی است به‌عنوان پیکسل اولیه برای شروع فرآیند بازیابی فاز در نظر گرفته می‌شود.

۲-۲-۳- واریانس مشتق فازها^۱

استفاده از واریانس مشتق فازها [۸ و ۱] یکی از اولین روش‌ها برای تعیین مسیر بازیابی فاز می‌باشد. از این روش برای ساخت یک نقشه کیفیت به منظور هدایت مسیر بازیابی فاز استفاده می‌شود. واریانس اختلاف فازها برای چهار پیکسل کناری محاسبه می‌گردد و سپس تمامی آن‌ها با هم جمع می‌شوند.

$$PDV^k = \sum_{n=0}^N \sigma_x^2(n) + \sigma_y^2(n) \quad (16)$$

که در آن، N شامل چهار پیکسل کناری و k اندیس پیکسل مرکزی می‌باشد. نحوه قرارگیری چهار پیکسل کناری به همراه پیکسل مرکزی در شکل (۳) نمایش داده شده است.



شکل (۳): نحوه قرارگیری پیکسل‌ها. پیکسل مرکزی به رنگ سیاه و پیکسل‌های کناری به رنگ خاکستری نمایش داده شده‌اند.

۲-۲-۴- حذف شاخه‌ها (حذف باقی‌مانده‌ها)^۲

سرعت و دقت الگوریتم حذف شاخه‌ها [۵]، صرف‌نظر از عدم توانایی آن در ارائه یک راه‌حل کامل، آن را بسیار محبوب کرده است. در این الگوریتم یک باقی‌مانده غیرصفر یا بار با استفاده از فازهای بازیابی‌نشده شناسایی می‌شود. 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 باقی‌مانده دیگر به‌عنوان ریشه یک درخت جدید در نظر گرفته می‌شود (شکل ۴- الف). هنگامی که تمامی بارها بر روی درخت‌های خنثی قرار گرفتند، با استفاده از الگوریتم پرکردن سیلابی^۳ فازها به نحوی با یکدیگر جمع می‌شوند که در

4- Isolated

5- Minimum Steiner tree

1- Phase Derivative Variance (PDV)

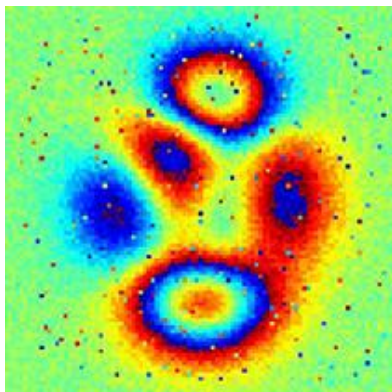
2-Branch-cut (residue-cut)

3- Flood-fill

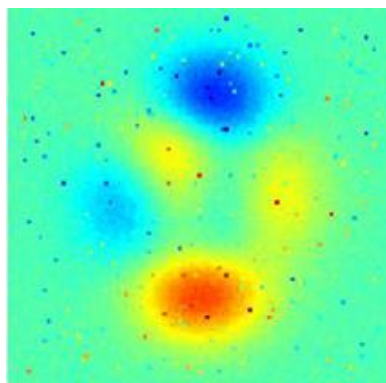
SNAPHU [۱۵] به عنوان یکی دیگر از مناسب ترین و دقیق ترین روش های بازیابی فاز به صورت عمومی و سراسری، در کنار سه روش دیگر ارزیابی شده است.

۳-۱- داده های شبیه سازی شده

چهار الگوریتم انتخاب شده بر روی یک تداخل نگاشت شبیه سازی شده اعمال شده اند و نتایج آن ها با نتایج فازهای بازیابی شده حقیقی مقایسه شده است. شکل (۶-الف) تداخل نگاشت با فازهای بازیابی نشده شبیه سازی شده که آغشته به نویز ضربه ای می باشد را نمایش می دهد. برای افزایش پیچیدگی در داده های شبیه سازی شده، فرض شده است که تداخل نگاشت شبیه سازی شده شامل ترکیب چند سیگنال جابه جایی باشد. شکل (۶-الف) یک تداخل نگاشت شامل فازهای بازیابی نشده است که نتیجه مدوله کردن فازهای بازیابی شده شبیه سازی شده می باشد (شکل ۶-ب).



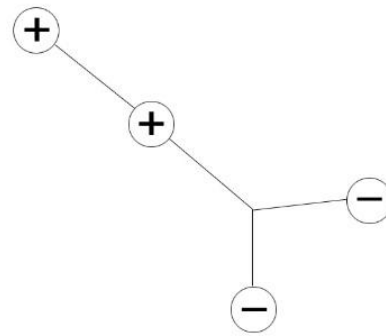
(الف)



(ب)

شکل (۶): الف) تداخل نگاشت شبیه سازی شده حاصل از مدوله شدن فازهای بازیابی شده شبیه سازی شده. ب) فازهای بازیابی شده شبیه سازی شده.

نتایج حاصل از اعمال چهار الگوریتم مورد نظر بر روی تداخل نگاشت شبیه سازی شده در شکل (۶-الف) را می توان در شکل (۷) مشاهده کرد.



شکل (۵): نمایش یک درخت اشتاینر کمینه.

۲-۲-۶- واریانس مشتق فازها - حذف شاخه ها^۱

در الگوریتم حذف شاخه ها اگر شاخه ها به درستی تعیین گردند، جواب مسأله یکتا خواهد بود. بنابراین، فرآیند بازیابی فاز مستقل از مسیر خواهد شد. از این ویژگی برای بهبود کارایی دیگر الگوریتم ها استفاده می شود. الگوریتم ارائه شده در این جا ترکیبی از دو روش واریانس مشتق فازها و روش حذف شاخه ها می باشد [۹]. مراحل انجام الگوریتم به شرح ذیل می باشد: ۱- ابتدا محل قرارگیری باقی مانده ها مشخص می شود. ۲- شاخه ها و درخت ها تشکیل و جانمایی می شوند. ۳- شاخه ها و درخت ها کنار گذاشته می شوند. ۴- در انتها توسط واریانس مشتق فازها نقشه کیفیتی که اثر گسیختگی ها از روی آن برداشته شده است، تعیین می شود.

۲-۲-۷- کمترین مربعات وزن دار - حذف شاخه ها^۲

از دیگر نمونه های ترکیب روش حذف شاخه ها با دیگر الگوریتم ها جهت بهبود فرآیند بازیابی فاز می توان به روش کمترین مربعات وزن دار - حذف شاخه ها [۵] اشاره کرد. در این روش، مقادیر وزن باقی مانده ها و شاخه ها در ماتریس وزن، به نحوی تعیین می شوند که کمترین تأثیر را در تابع هدف داشته باشند.

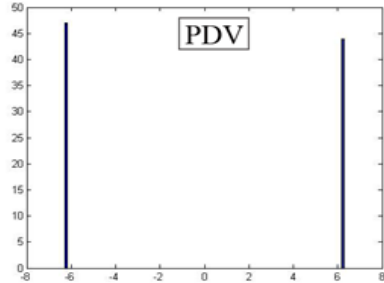
۳- مقایسه عملکرد الگوریتم ها

در این بخش چهار روش از مناسب ترین الگوریتم های بازیابی فاز بر روی تداخل نگاشت های شبیه سازی شده و واقعی اعمال شده اند. به منظور مقایسه عملکرد روش های بازیابی فاز از میان الگوریتم های بازیابی فاز به صورت موضعی الگوریتم حذف شاخه ها به عنوان یک نمونه از پرکاربردترین روش های براساس مسیره های دنبال شونده و روش واریانس مشتق فازها به عنوان نمونه ای از پرکاربردترین روش های بر مبنای نقشه های هزینه پیاده سازی شده اند. در مقابل، روش کم هزینه ترین جریان به عنوان نمونه ای از بهترین روش های بازیابی فاز به صورت عمومی یا سراسری پیاده سازی شده است. علاوه بر این، نتیجه اعمال الگوریتم

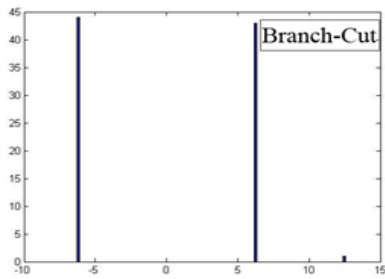
1- Phase derivative values-Branch cut

2- Weighted least squares-Branch cut

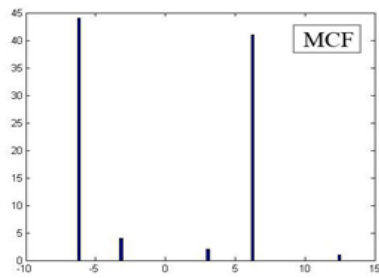
الگوریتم‌ها، نتایج هر چهار روش با مقدار فازهای بازیابی‌شده حقیقی شکل (۶-ب) مقایسه شده‌اند. هیستوگرام خطای آن‌ها ترسیم شده است. شکل (۸) هیستوگرام خطای هر یک از روش‌ها را نمایش می‌دهد.



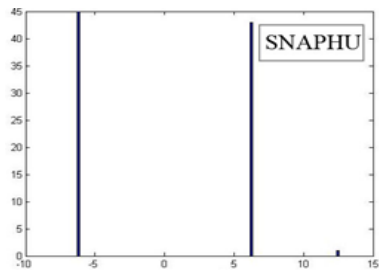
(الف)



(ب)

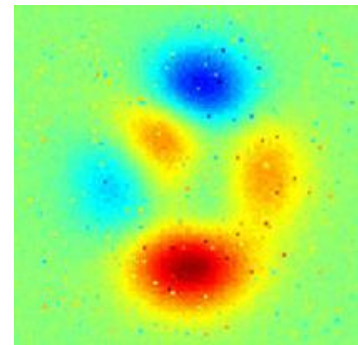


(پ)

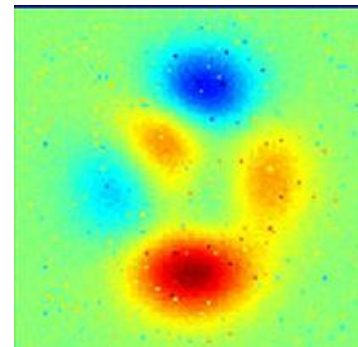


(ت)

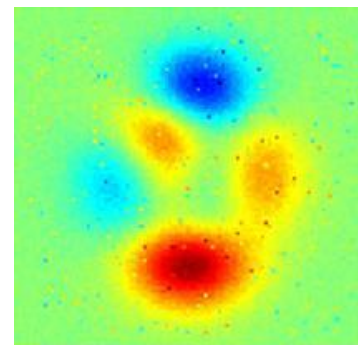
شکل (۸): هیستوگرام خطاها. اشکال الف، ب، پ، ت به ترتیب هیستوگرام تفاضل فازهای بازیابی‌شده حقیقی از نتایج الگوریتم‌های واریانس مشتق فازها (PDV)، حذف شاخه‌ها (Branch-Cut)، کم‌هزینه‌ترین جریان (MCF) و SNAPHU می‌باشند. محور افقی مقدار خطای بازیابی فاز برحسب رادیان و محور عمودی فراوانی می‌باشد. در بین هیستوگرام‌های نمایش داده شده در شکل (۸)، فراوانی خطا در روش واریانس مشتق فازها و کم‌هزینه‌ترین



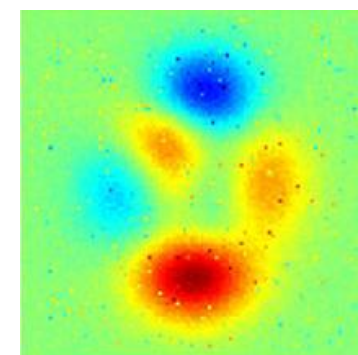
(الف)



(ب)



(پ)



(ت)

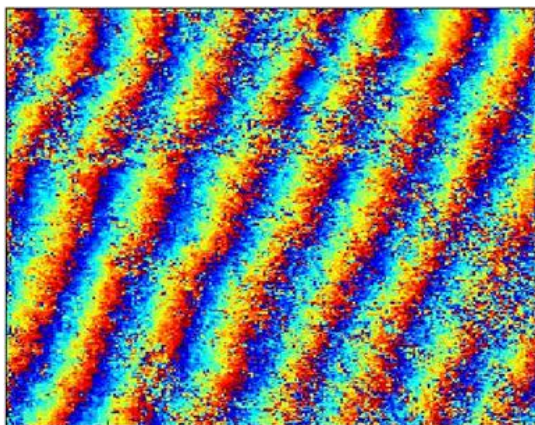
شکل (۷): فازهای بازیابی‌شده تداخل‌نگاشت شبیه‌سازی‌شده. اشکال الف، ب، پ و ت به ترتیب نتیجه فازهای بازیابی‌شده توسط الگوریتم‌های واریانس مشتق فازها، حذف شاخه‌ها، کم‌هزینه‌ترین جریان و SNAPHU می‌باشند.

برای ارائه یک معیار کمی مناسب از صحت عملکرد



شکل (۹): منطقه تحت پوشش تصویر ENVISAT ASAR که با مستطیل قرمز رنگ نمایش داده شده است و منطقه مطالعاتی دشت تهران که با رنگ سفید نسبت به دیگر مناطق مجزا شده است.

شکل (۱۰) تداخل نگاشت ایجاد شده مربوط به بخشی از منطقه دشت شهریار - تهران را نمایش می‌دهد که در آن فرینج‌ها کاملاً مشهود هستند. همچنین، در برخی مناطق می‌توان مشاهدات نویزی را دید که باعث ایجاد خطا در روند بازیابی فاز می‌شوند.



شکل (۱۰): تداخل نگاشت ایجاد شده براساس داده‌های واقعی.

یکی از مهم‌ترین و پرکاربردترین الگوریتم‌هایی که فازها را به صورت موضعی و با استفاده از مسیرهای دنبال شونده بازیابی می‌کند، الگوریتم حذف شاخه‌ها می‌باشد. شکل (۱۰) نتیجه اعمال این الگوریتم بر روی تداخل نگاشت شکل (۱۰) می‌باشد. همان‌طور که در بخش قبل به آن اشاره شد، این روش به دنبال جانمایی و به دنبال آن دوری از نقاط و مناطقی است که احتمال گسیختگی در آن‌ها بیشتر از دیگر نقاط در سطح تداخل نگاشت است. در شکل (۱۱) می‌توان مشاهده کرد که این مرزهای گسیختگی جهش‌های

جریان تقریباً بیشتر از دو روش دیگر می‌باشد. همچنین، با مقایسه هیستوگرام خطای دو روش حذف-شاخه‌ها و SNAPHU می‌توان دید که فراوانی خطا در نتایج حاصل از الگوریتم حذف شاخه‌ها کمتر است. به علاوه، برای مقایسه بهتر نتایج چهار روش، تعداد پیکسل‌هایی که اشتباه بازیابی شده‌اند و میانگین قدر مطلق خطای نسبی^۱ نیز به عنوان معیاری عددی از دقت عملکرد روش‌ها در جدول (۱) بیان شده است.

جدول (۱): مقایسه عملکرد چهار روش بازیابی فاز.

| روش‌های بازیابی فاز | PDV | Branch-Cut | MCF | SNAPHU |
|-------------------------------------|--------|------------|--------|--------|
| میانگین قدر مطلق خطای نسبی (radian) | ۰/۰۶۰۱ | ۰/۰۵۰۱ | ۰/۰۵۷۱ | ۰/۰۵۷۱ |
| تعداد خطا | ۹۱ | ۸۸ | ۹۲ | ۸۹ |

با توجه به جدول (۱) و مقایسه نتایج می‌توان دید که در تداخل نگاشت شبیه‌سازی شده، الگوریتم حذف شاخه‌ها به سبب کمتر بودن تعداد خطا در بازیابی فازها و همچنین کمتر بودن معیار میانگین قدر مطلق خطای نسبی عملکرد به مراتب بهتری نسبت به سه الگوریتم دیگر دارد.

۳-۲- داده‌های واقعی

در این بخش عملکرد الگوریتم‌های انتخابی بر روی داده‌های واقعی نیز بررسی شده است. همچنین به دلیل عدم وجود مقادیر حقیقی فازهای بازیابی شده به عنوان مبنای برای ارزیابی نتایج، نتایج چهار روش از نظر کیفی با یکدیگر مقایسه شده‌اند. علاوه بر این، چهار الگوریتم پیشنهادی از نقطه نظر زمان اجرا و پیچیدگی محاسباتی با یکدیگر مقایسه شده‌اند. در این تحقیق دو عدد تصویر راداری ماهواره ENVISAT ASAR که منطقه دشت شهریار - تهران را تحت پوشش قرار می‌دهند استفاده شده است. اطلاعات تصاویر استفاده شده را می‌توان در جدول (۲) مشاهده کرد.

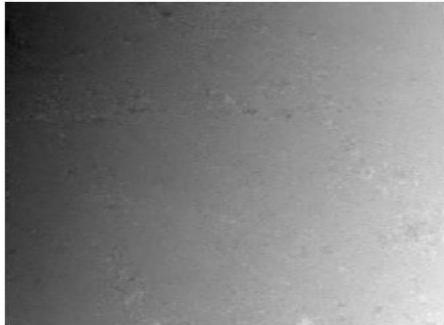
جدول (۲): مشخصات تصاویر پایه و پیرو

| سنسور | مسیر | گذر | تصویر پایه | تصویر پیرو |
|-------|------|-----------|-------------|-------------|
| ASAR | ۱۴۹ | گذر پایین | 2004-Oct-15 | 2004-Dec-24 |

همچنین، موقعیت جغرافیایی منطقه مطالعاتی و منطقه تحت پوشش تصویر راداری در شکل (۹) نمایش داده شده است. در تصویر کل محدوده فرونشست در دشت شهریار - تهران با رنگ سفید نسبت به دیگر مناطق تمیز داده شده است و کل محدوده تحت پوشش تصویر راداری نیز با مستطیل قرمز رنگ مشخص شده است.

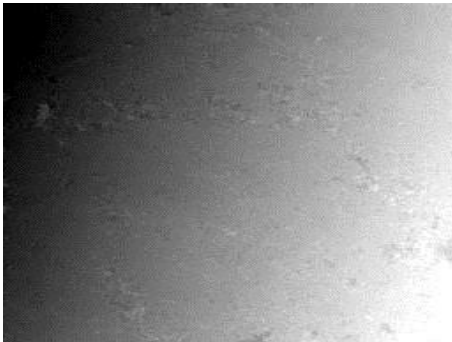
به‌شدت به کیفیت نقشه هزینه‌ای که وظیفه هدایت مسیر بازیابی فاز را به عهده دارد وابسته است و تعیین نامناسب آن جهش‌های فاز را در سطح تداخل‌نگاشت ایجاد می‌کند.

همان‌گونه که اشاره شد در مقابل روش‌های محلی بازیابی فاز، روش‌های بازیابی فاز به‌صورت سراسری و عمومی قرار دارند. شکل (۱۳) نتیجه اعمال الگوریتم کم‌هزینه‌ترین جریان بر روی داده‌های واقعی را نمایش می‌دهد. مطابق با آنچه در قبل به آن اشاره شد، الگوریتم‌های بازیابی فاز به‌صورت سراسری یک حل کلی از جواب‌های ارائه می‌دهند که موجب نرم‌بودن جواب‌ها می‌شود. اما به سبب ارائه یک حل کلی، امکان دارد که در مناطق نویزی مقدار فازهای بازیابی شده را اشتباه تخمین بزنند.



شکل (۱۳): نتیجه اعمال الگوریتم کم‌هزینه‌ترین جریان.

یکی از جامع‌ترین و کاربردی‌ترین روش‌های بازیابی فاز به‌صورت عمومی و سراسری الگوریتم SNAPHU می‌باشد که شکل (۱۴) نتیجه اعمال آن بر داده‌های تداخل‌سنجی را نمایش می‌دهد. مشابه با آنچه برای نتایج روش کم‌هزینه‌ترین جریان بیان شد، جواب‌های الگوریتم SNAPHU به‌دلیل ارائه یک حل کلی از مسئله بسیار یکنواخت و عاری از جهش‌های فاز می‌باشد. اما به‌علت ارائه یک حل کلی ممکن است گاهی اوقات در برخی مناطق نویزی مقدار فازهای بازیابی شده را کم‌تر از میزان واقعی آن‌ها تخمین بزند.



شکل (۱۴): خروجی الگوریتم SNAPHU.

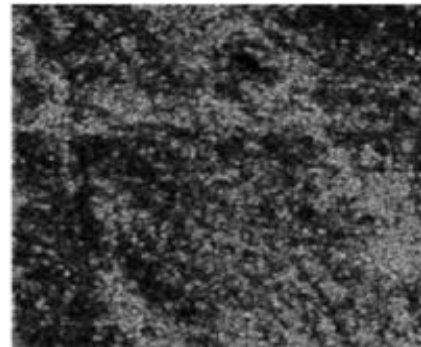
در بحث مقایسه عملکرد الگوریتم‌های بازیابی فاز در فضای

فازی را در سطح تداخل‌نگاشت ایجاد می‌کنند که به‌عنوان خطای بازیابی فاز در نظر گرفته می‌شود. همچنین، در مناطقی که چگالی نقاط باقی‌مانده زیاد است، مناطق ایزوله‌ای (مناطق به رنگ مشکی) ایجاد می‌شود که مقدار فاز آن‌ها بازیابی نمی‌شود.

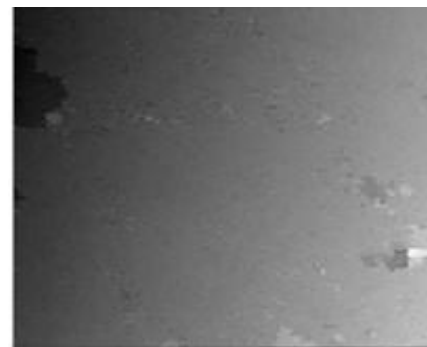


شکل (۱۱): نتیجه اعمال الگوریتم حذف شاخه‌ها. مناطق ایزوله به رنگ سیاه نمایش داده شده‌اند.

شکل (۱۲-الف) نقشه هزینه تشکیل شده بر مبنای واریانس مشتق فازها و شکل (۱۲-ب) خروجی اعمال الگوریتم واریانس مشتق فازها بر روی آن را نمایش می‌دهد.



(الف)



(ب)

شکل (۱۲): (الف) نقشه هزینه ایجاد شده به کمک اطلاعات فاز. مناطق تیره بالاترین کیفیت و مناطق روشن دارای کمترین کیفیت هستند. (ب) نتیجه اعمال روش بازیابی فاز واریانس مشتق فازها.

همان‌گونه که مشاهده می‌شود این روش مشکل مناطق ممنوعه را ندارد، اما باید به این نکته توجه داشت که این الگوریتم

روش‌های تداخل‌سنجی متداول است.

صرف‌نظر از نحوه توزیع نقاط در سطح یک تداخل‌نگاشت، بازیابی فاز در یک تداخل‌نگاشت دو رویکرد دارد: دسته اول روش‌هایی است که مسأله بازیابی فاز را به یک مسأله بهینه‌یابی کلی تبدیل می‌کنند و دسته دوم که سعی بر حل مسأله به‌صورت محلی موضعی دارند. هرکدام از این روش‌ها نسبت به یکدیگر معایب و مزایایی دارند. به‌عنوان مثال، روش‌هایی که مسأله را به‌صورت محلی و موضعی حل می‌کنند، در تقابل با دسته اول دقت و صحت بیشتری دارند. از معایب این روش‌ها می‌توان به حساسیت بالای آن‌ها به مسیر بازیابی فاز و تابع بازیابی فاز اشاره کرد.

۵- مراجع

- [1] D. C. Ghiglia and M. D. Pritt, "Two-Dimensional Phase Unwrapping: Theory, Algorithms and Software," Wiley Blackwell, New York, 1998.
- [2] 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.
- [3] C. W. Chen and H. A. Zebker, "Two-dimensional phase unwrapping with use of statistical models for cost function in nonlinear optimization," The Optical Society America A, vol. 18, no. 2, pp. 338-351, 2001.
- [4] 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.
- [5] R. M. Goldstone, H. A. Zebker, and C. L. Werner, "Sattelite radar Interferometry : Two-dimensional phase unwrapping," Radio Science, vol. 23, no. 4, pp. 713-720, 1988.
- [6] D. C. Ghiglia and L. A. Romero, "Minimum Lp-norm two-dimensional phase unwrapping," The Optical Society of America A, vol. 13, no. 10, pp. 1999-2013, 1996.
- [7] C. W. Chen and H. A. Zebker, "Network approaches to two-dimensional phase unwrapping intractability and two new algorithm," The Optical Society of America A, vol. 18, no. 3, pp. 401-414, 2000.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] H. A. Zebker and Y. 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.
- [11] M. D. Pritt, "Phase unwrapping by means of multigrid techniques for interferometric SAR," IEEE Transactions on Geoscience Remote Sensing, vol. 34, no. 3, pp. 728-738, 1996.
- [12] R. K. Ahuja, T. L. Magnanti and J. B. Orlin, "Network Flows: Theory, Algorithms, and Applications," Prentice-Hall, Englewood Cliff, New Jersey, 1993.
- [13] H. A. Zebker and J. Villasenor, "Decorrelation in interferometric radar echoes," IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, vol. 30, no. 5, pp. 950-959, 1992.

منظم به‌طور کلی می‌توان گفت که در تداخل‌نگاشت‌هایی که چگالی نقاط باقی‌مانده کم است، جواب الگوریتم‌های حذف شاخه‌ها و واریانس مشتق فازها بسیار قابل اطمینان می‌باشد. اما با افزایش چگالی نقاط باقی‌مانده و افزایش مقدار نویز در سطح تداخل‌نگاشت، جهش‌های فاز و مناطق ایزوله‌ای در خروجی روش حذف شاخه‌ها ایجاد می‌شوند. با افزایش چگالی نقاط باقی‌مانده، الگوریتم‌هایی که براساس تئوری شبکه‌ها ایجاد شده‌اند مثل SNAPHU حل کارآمدتر و مناسب‌تری را ارائه می‌دهند. علاوه‌بر این، در این مواقع با استفاده از الگوریتم واریانس مشتق فازها- حذف شاخه‌ها می‌توان به پاسخی هم‌ارز با پاسخ الگوریتم SNAPHU دست یافت [۱۴].

همچنین مدت زمان اجرای چهار الگوریتم پیشنهادی در سطح منطقه مطالعاتی را می‌توان در جدول (۳) مشاهده کرد.

جدول (۳): مقایسه مدت زمان اجرای الگوریتم‌های استفاده‌شده.

| روش بازیابی فاز | PDV | Branch-Cut | MCF | SNAPHU |
|-------------------|-------|------------|------|--------|
| زمان اجرا (ثانیه) | ۱۴/۷۷ | ۲۰/۲۳ | ۸/۱۵ | ۶/۹۸ |

با مقایسه مدت زمان اجرای الگوریتم‌ها می‌توان مشاهده کرد که روش‌های بازیابی فاز به‌صورت محلی به‌دلیل پیچیدگی محاسباتی مدت‌زمان پردازش بیشتری نسبت به روش‌های بازیابی فاز به‌صورت سراسری دارند. الگوریتم حذف شاخه‌ها به‌دلیل استفاده از روش دایجسترا برای تعیین محل ناپیوستگی‌ها دارای پیچیدگی محاسباتی از درجه $O(n^2)$ می‌باشد که با افزایش محدوده منطقه مطالعاتی پیچیدگی محاسباتی به‌مراتب بیشتر خواهد شد و به دنبال آن، زمان پردازش افزایش خواهد یافت. اما با کاهش محدوده منطقه مطالعاتی سرعت عملکرد روش‌ها تقریباً یکسان خواهد بود.

۴- نتیجه‌گیری

کاربرد اصلی تداخل‌سنجی راداری اندازه‌گیری جابه‌جایی سطح زمین ناشی از رخ‌دادن پدیده‌هایی مثل زمین‌لغزش، فرونشست، زلزله یا گسل است. فازهای موجود در یک تداخل‌نگاشت در محدوده صفر تا 2π مدوله شده‌اند که برای استخراج اطلاعات توپوگرافی یا جابه‌جایی باید بازیابی شوند. بازیابی فاز فرآیندی است به منظور برآورد فازهای بدون ابهام از آرایه‌ای دو بعدی از فازهایی که بین صفر تا 2π مدوله شده‌اند. حال بسته به این‌که از روش‌های تداخل‌سنجی متداول یا از پراکنش‌کننده‌های پایدار استفاده شود به‌ترتیب داده‌ها به‌صورت منظم یا نامنظم در سطح تصویر پراکنده می‌شوند. آنچه در این جا ارزیابی شد دسته‌ای از الگوریتم‌های بازیابی فاز است که عملکرد آن‌ها براساس خروجی

- [14] 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.
- [15] C. W. Chen and H. A. Zebker, "Stanford Radar Interferometry Research Group," 1 February 2003. [Online]. Available: <https://web.stanford.edu/group/radar/softwareandlinks/sw/snaphu/>.
- [16] J. J. Martinez-Espla and T. Martinez-Marin, "An optimized algorithm for InSAR phase unwrapping based on particle filtering, matrix pencil, and region-growing techniques," *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, vol. 6, no. 4, pp. 835-839, 2009.

Assessment of Conventional Unwrapping Methods Presented to Unwrap Interferometric Phases

A. Tavakkoli-Estahbanati, M. Dehghani*, A. R. Amiri-Simkooei

Shiraz University

(Received: 30/12/2016, Accepted: 28/08/2017)

Abstract

InSAR technique can be used for extracting topography and estimating ground surface displacements. Phase unwrapping is one of the most important parts of displacement estimation from an interferogram affecting the results. Because of the nature of the phase unwrapping problem, finding the number of missed integer cycles is critical and demanding. If the conventional method is considered for interferometry, phases will spread regularly. In recent years, several algorithms have been presented to unwrap data in regular spaces. Since a comprehensive study has not been done for unwrapping methods evaluation yet, the main goal of this paper is to introduce and investigate the performance of the most important unwrapping algorithms. Moreover, unwrapping methods presented in regular space are thus investigated. Moreover, their advantages and disadvantages are fully discussed. Because regular-space methods are usually considered to unwrap phases, a number of efficient conventional unwrapping approaches have been implemented on an interferogram processed from ENVISAT ASAR satellite images acquired over the Tehran basin northeast.

Keywords: Interferogram, Phase Unwrapping, Regular Space, Conventional Interferometry

* Corresponding author E-mail: dehghani_rgsi@yahoo.com