

بهبود الگوریتم تداخل سنجی راداری مبتنی بر پراکنش کننده‌ی دائمی (Stamps) جهت برآورد جابه‌جایی با استفاده از روش پریودوگرام

زهرا صادقی^{۱*}، محمدجواد ولدان زوج^۲، مریم دهقانی^۳

۱- دانشجوی دکتری، گروه فتوگرامتری و سنجش از دور، دانشگاه خواجه نصیرالدین طوسی
۲- دانشیار، گروه فتوگرامتری و سنجش از دور، پژوهشکده سنجش از دور، دانشکده نقشه‌برداری، دانشگاه خواجه نصیرالدین طوسی
۳- استادیار، گروه مهندسی عمران دانشگاه شیراز

تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۲/۰۶/۲۵ تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۳/۰۲/۳۱

چکیده

تکنیک Persistent Scatterer Interferometry (PSI) برای اولین بار بر مبنای انتخاب پیکسل‌های پراکنش کننده‌ی دائمی^۱ با رفتار پراکنشی ثابت^۲ در زمان و با استفاده از مدل جابه‌جایی از پیش تعیین شده، جهت از بین بردن محدودیت‌های روش سنتی ارائه شد. این تکنیک در سال ۲۰۰۶ تحت عنوان StaMPS^۳، بهبود پیدا کرد به‌صورتی که بر خلاف تمام الگوریتم‌های PSI ارائه شده تا قبل از آن، قابلیت انتخاب پراکنش کننده‌های دائمی را بدون نیاز به دانش اولیه مدل جابه‌جایی آن‌ها و حتی در مناطق خارج شهری دارد. در این روش برای انجام عملیات بازیابی فاز^۴ نیاز به برقراری شرط نمونه‌برداری نایکوئیست^۵ است که در مناطق با نرخ جابه‌جایی بالا این شرط مورد نیاز نقض می‌شود و به‌علت خطای بازیابی فاز نرخ جابه‌جایی بسیار کمتر از واقعیت برآورد می‌شود. در این مقاله یک روش کارا برای بهبود الگوریتم StaMPS جهت برآورد میزان جابه‌جایی در مناطق با نرخ بالای جابه‌جایی و با رفتار تقریباً خطی در زمان ارائه می‌شود. در روش پیشنهادی یک شبکه‌ی مکانی از پیکسل‌های پراکنش کننده‌ی دائمی شکل می‌گیرد و بخش خطی جابه‌جایی به روش پریودوگرام^۶ برای هر کمان متصل کننده‌ی دو پراکنش کننده‌ی دائمی برآورد می‌شود و با علم به این که بخش قابل توجه جابه‌جایی در منطقه رفتار خطی در زمان دارد، پس از تقریب بخش خطی جابه‌جایی برای هر پراکنش کننده‌ی دائمی نسبت به یک نقطه‌ی مرجع سهم فاز ناشی از آن از فاز اولیه کم و پس از بازیابی فاز به فاز بازیابی شده اضافه می‌شود. روش پیشنهادی در منطقه‌ی جنوب غربی دشت تهران با استفاده از تصاویر ENVI-SAT اجرا شد و نرخ جابه‌جایی برآوردی با نرخ استخراجی از تصاویر مسیر^۷ مجاور و با روش SBAS^۸ مقایسه شد که مقدار $22/9 \text{ mm/year}$ به‌عنوان انحراف از معیار موفقیت روش پیشنهادی در بهبود الگوریتم StaMPS را نشان می‌دهد.

واژه‌های کلیدی: Persistent Scatterer Interferometry، پراکنش کننده‌های دائمی، StaMPS، پریودوگرام.

* نویسنده مکاتبه کننده: زهرا صادقی، خیابان ولیعصر، بالاتر از تقاطع میرداماد، دانشکده ژئودزی و ژئوماتیک دانشگاه خواجه نصیرالدین طوسی، ۰۹۱۲۶۴۶۰۹۷۰

Email: atena_sadeghi_ak@yahoo.com

- 2 Coherent
- 3 Stanford Method for Persistent Scatterer
- 4 Phase Unwrapping
- 5 Nyquist Sampling Assumption
- 6 Periodogram
- 7 Track
- 8 Small Baseline Subset

۱- مقدمه

عدم همبستگی مکانی و زمانی اغلب مانع می شود که روش متداول سار اینترفرومتری^۱ یک ابزار اجرایی برای پایش جابه‌جایی شود. عدم همبستگی زمانی به‌عنوان نمونه در مناطقی با پوشش گیاهی متراکم ایجاد می‌شود و عدم همبستگی مکانی تعداد جفت تصویرهای مناسب برای کاربردهای اینترفرومتری را محدود می‌کند. همچنین تأثیرات اتمسفر به‌شدت دقت نتایج را کاهش می‌دهد [۱]. تکنیک تداخل سنجی راداری مبتنی بر پراکنش کننده‌های دائمی (PSI)^۲ اولین بار توسط فرتی^۳ و همکاران در سال ۲۰۰۰ و ۲۰۰۱ ارائه شد که ایده‌ی اصلی این روش انتخاب پیکسل‌های پراکنش کننده‌ی دائمی با رفتار پراکنشی ثابت در زمان، جهت از بین بردن محدودیت‌های نامبرده می‌باشد. بعد پیکسل‌های پراکنش کننده‌ی دائمی اغلب از بعد یک پیکسل کوچکتر است و با وجود فواصل زمانی طولانی و خط مبنای مکانی بزرگتر از حدی که عدم همبستگی اتفاق بیفتد، کورنسی بالایی دارند.

تکنیک ارائه شده توسط فرتی که امکان اندازه‌گیری مقدار جابه‌جایی سطح زمین را حتی به میزان چند میلی‌متر داشت، توسط کلسانتی^۴ و همکاران توسعه یافت [۱،۲،۳]. پس از آن سیستم‌های دیگر پردازشی پراکنش کننده‌های دائمی توسط اشخاص دیگر ارائه شد. در تمامی این روش‌ها پراکنش کننده‌های دائمی بازتابنده‌های گوشه‌ای^۵ یا عوارض طبیعی با ویژگی‌های پراکنشی ثابت در طول زمان هستند که رفتار جابه‌جایی آن‌ها مشابه با مدل فرضی جابه‌جایی باشد. به‌همین جهت هوپر^۶ در سال ۲۰۰۶ یک روش

جدید PSI، StaMPS، با قابلیت انتخاب پراکنش کننده‌های دائمی بدون نیاز به دانش اولیه مدل جابه‌جایی آنها و حتی در مناطق خارج شهری و فاقد بازتابنده‌های گوشه‌ای ارائه داد [۴]

در روش StaMPS ابتدا کاندیدای پراکنش کننده‌ی دائمی^۷ بر پایه‌ی مقدار شاخص پراکنش دامنه^۸ تعیین می‌شوند. پیکسل‌های پراکنش کننده‌ی دائمی نهایی براساس میزان استحکام فاز حاصل از آنالیز فاز انتخاب می‌شوند. در واقع پراکنش کننده‌های دائمی پیکسل‌هایی هستند که سهم نویز آن‌ها به‌قدری کوچک باشد که سیگنال به‌طور کامل از بین نرود [۵]. سپس جهت به‌دست آوردن سیگنال جابه‌جایی، فاز پیکسل‌های پراکنش کننده‌ی دائمی باید بازیابی شود. از طرفی بازیابی فاز دقیق تنها زمانی ممکن است که اندازه‌ی اختلاف فاز پیکسل‌های همسایه کمتر از π باشد [۶] که این همان شرط نمونه‌برداری نایکوئیست است. از آن‌جا که اگر نرخ جابه‌جایی بالا باشد، اختلاف فاز پیکسل‌های همسایه شامل ابهام فاز^۹ ($2k\pi$) خواهد شد و شرط نمونه‌برداری نایکوئیست برقرار نخواهد شد، بنابراین StaMPS در مناطق با نرخ بالای جابه‌جایی به‌درستی قادر به تقریب جابه‌جایی نیست.

سال ۲۰۱۰ دهقانی و همکاران یک روش نوین به‌صورت ترکیب روش سنتی^{۱۰} و PSI (StaMPS) جهت افزایش کارایی الگوریتم StaMPS در مناطق با نرخ بالای جابه‌جایی ارائه دادند. در این روش پس از اجرای الگوریتم StaMPS تا قبل از مرحله‌ی بازیابی فاز، المان خطی جابه‌جایی به کمک روش سنتی از اینترفروگرام‌های کورننت برآورد می‌شود و جهت برقراری شرط نمونه‌برداری نایکوئیست، از فاز بازیابی نشده‌ی کلیه‌ی اینترفروگرام‌های شکل یافته

7 Persistent Scatterer Candidate

8 Amplitude Dispersion Index

9 Phase Ambiguity

10 Conventional SAR interferometry

1 SAR interferometry conventional

2 Persistent Scatterer Interferometry

3 Ferreti

4 Colesanti

5 Corner Reflector

6 Hooper

حداکثر سازد. پس از انتخاب تصویر پایه، تمامی تصاویر پیرو^۴ نسبت به آن ثبت هندسی و بازنمونه‌برداری می‌شوند و N اینترفروگرام نسبت به تصویر پایه شکل داده می‌شود.

۲-۲- انتخاب پراکنش کننده‌های دائمی

در این مرحله در ابتدا مجموعه‌ای از پیکسل‌ها براساس تحلیل دامنه به‌عنوان کاندیدای پیکسل‌های پراکنش کننده‌ی دائمی مشخص می‌شوند. با در نظر گرفتن حد آستانه‌ی مناسب برای شاخص پراکنندگی دامنه‌ی ارائه شده توسط فرتی و همکاران در سال ۲۰۰۱، مجموعه پیکسل‌های انتخاب می‌شود که اغلب آنها می‌توانند پراکنش کننده‌ی دائمی باشند. پس از تحلیل دامنه، پایداری فاز برای هر یک از پیکسل‌های انتخاب شده با انجام تحلیل فاز در یک فرآیند تکراری بررسی می‌شود. در واقع پیکسل پراکنش کننده‌ی دائمی پیکسلی است که سهم فاز نویز آن در مقایسه با سیگنال به قدر کافی کوچک باشد. بنابراین سهم نویز برای هر پراکنش کننده‌ی دائمی برآورد می‌شود و این کار تا زمانی تکرار می‌شود که مولفه‌ی برآوردی نویز به یک مقدار مشخص همگرا شود. با معرفی کمیتی معادل با سطح نویز، پیکسل‌های پراکنش کننده‌ی دائمی را می‌توان تعیین کرد. این کمیت مشابه کمیت کوهرنسی است و بیانگر کوهرنسی در زمان است. در هر تکرار مقدار تغییر حاصل در کوهرنسی زمانی محاسبه می‌شود. مادامی که مقدار کوهرنسی زمانی کاهش نیابد الگوریتم به یک پاسخ مشخص همگرا شده‌است. در نهایت پیکسل‌های پراکنش کننده‌ی دائمی براساس احتمال پراکنش کننده‌ی دائمی بودن در نتیجه‌ی آنالیز دامنه و فاز انتخاب می‌شوند.

در الگوریتم StaMPS کم می‌شود. پس از انجام عملیات بازیابی فاز المان خطی جابه‌جایی به فازهای بازیابی شده اضافه می‌شود [۷]. در این مقاله ما یک روش کارا جهت بهبود الگوریتم StaMPS برای برآورد جابه‌جایی در مناطق با نرخ بالای جابه‌جایی خطی و بدون نیاز به داشتن اینترفروگرام‌های کوهرنس ارائه می‌کنیم.

۲- روش تحقیق

در روش پیشنهادی ابتدا الگوریتم StaMPS تا قبل از مرحله‌ی بازیابی در منطقه‌ی مورد نظر اجرا می‌شود. سپس سهم فاز ناشی از جابه‌جایی خطی برای پیکسل‌های پراکنش کننده‌های دائمی برآورد و از فاز مشاهداتی کسر می‌شود. بنابراین مرحله‌ی بازیابی فاز برای فازهای باقیمانده‌ی پراکنش کننده‌های دائمی انجام می‌شود و پس از اضافه کردن سهم فاز جابه‌جایی برآوردی به فاز بازیابی شده، مابقی مراحل الگوریتم StaMPS جهت برآورد جابه‌جایی اجرا می‌شود.

۲-۱- تشکیل اینترفروگرام‌ها با یک تصویر پایه^۱

در روش‌هایی که در آن‌ها از یک مدل تابعی زمانی برای انتخاب پراکنش کننده‌های دائمی استفاده می‌کنند، به‌طور معمول حداقل ۲۵ اینترفروگرام مورد نیاز است [۳]. با استفاده از StaMPS اینترفروگرام‌های کمتری (حداقل ۱۲ اینترفروگرام) مورد نیاز است. لیکن تعداد بیشتر اینترفروگرام‌ها منجر به برآورد دقیقتر خطای زاویه دید می‌گردد. یک تصویر پایه از $N+1$ تصویر راداری به‌دست آمده در زمان‌های متفاوت از منطقه به‌گونه‌ای انتخاب می‌گردد که مجموع همبستگی^۲ تمامی N اینترفروگرام تشکیل شده نسبت به تصویر پایه به‌صورت تابعی از خط مبنای مکانی و زمانی، فرکانس مرکزی داپلر^۳ و نویز حرارتی را

1 Master

2 Correlation

3 Doppler centroid frequency

4 Slave

۲-۳- کاهش فاز پراکنش کننده‌های دائمی جهت برقراری شرط نایکوئیست

در این مرحله تلاش می‌شود بخشی از فاز بازیابی نشده‌ی پراکنش کننده‌های دائمی تقریب زده شود که باعث عدم برقراری شرط نمونه‌برداری نایکوئیست می‌شود. همان‌طور که از شکل (۱) مشخص است این مرحله به دو قسمت تقسیم می‌شود که بخش اول آن که در مرحله ۲-۳-۱ توضیح داده شده توسط الگوریتم StaMPS اجرا می‌شود. بخش دوم این مرحله بیان شده در مرحله ۲-۳-۲، توسط الگوریتم پیشنهادی ارائه شده است. در واقع در بخش دوم این مرحله با فرض بالا بودن نرخ جابه‌جایی و عدم برقراری شرط نمونه‌برداری نایکوئیست، فاز ناشی از مولفه خطی جابه‌جایی برآورد و از فاز حاصل از بخش اول این مرحله کسر شود.

۲-۳-۱ تقریب و حذف سهم خطای زاویه دید و تصویر پایه در بخش غیر همبسته در مکان فاز

اندازه اختلاف فاز بازیابی نشده‌ی پراکنش کننده‌های دائمی همسایه به‌علت بخش ناهمبسته در مکان سیگنال^۱ مقداری بزرگتر از π دارد و مهم‌ترین سهم در این بخش سیگنال مربوط به بخش ناهمبسته در مکان خطای زاویه دید^۲ است که در این مرحله تقریب زده می‌شود.

به‌طور کلی فاز بازیابی نشده‌ی پراکنش کننده‌ی دائمی i ام در اینترفروگرام k ام، ψ_i^k ، پس از حذف اثر توپوگرافی شامل ۵ بخش اصلی به‌صورت زیر است:

رابطه (۱)

$$\psi_i^k = w \left\{ \phi_{D,i}^k + \phi_{Atmo,i}^k + \phi_{Orbit,i}^k + \phi_{\theta,i}^k + \phi_{N,i}^k \right\}$$

که $\phi_{D,i}^k$ سهم فاز ناشی از جابه‌جایی، $\phi_{Atmo,i}^k$ سهم فاز ناشی از تفاوت تأخیرات اتمسفریک دو تصویر راداری، $\phi_{Orbit,i}^k$ سهم فاز ناشی از خطای مداری، $\phi_{\theta,i}^k$ سهم فاز ناشی از خطای زاویه دید و $\phi_{N,i}^k$ سهم فاز ناشی از نویز است و w اپراتور تبدیل فاز به بازه $[-\pi, \pi]$ (فاز بازیابی نشده) است. پس از اعمال یک فیلتر بر ψ_i^k بخشی از سیگنال تقریب زده می‌شود که در مکان همبسته است ($\tilde{\phi}_i^k$) و با کسر نمودن این مقدار از فاز اولیه و تبدیل آن به بازه $[-\pi, \pi]$ خواهیم داشت:

$$w \left\{ \phi_i^k - \tilde{\phi}_i^k \right\} = w \left\{ \Delta\phi_{\theta,i}^{u,k} + \phi_{N,i}^{u,k} + \delta_i^k \right\}$$

رابطه (۲)

که $\Delta\phi_{\theta,i}^{u,k}$ فاز ناشی از بخش ناهمبسته در مکان خطای زاویه دید، $\phi_{N,i}^{u,k}$ فاز ناشی از نویز ناهمبسته در مکان و δ_i^k فاز ناچیز ناشی از جابه‌جایی، خطای مداری و اثر اتمسفر به‌صورت ناهمبسته در مکان است. بخش ناهمبسته در مکان خطای زاویه دید، $\Delta\theta_i^u$ ، به کمک رابطه‌ی (۳) می‌تواند حاصل شود:

رابطه (۳)

$$\Delta\phi_{\theta,i}^{u,k} = \frac{4\pi}{\lambda} B_{\perp i}^k \Delta\theta_i^u$$

که $B_{\perp i}^k$ خط مبنای مکانی پراکنش کننده‌ی دائمی i ام در اینترفروگرام k ام است. فضای جستجو برای $\Delta\theta_i^u$ برابر با ± 10 متر و با گام‌هایی با تغییر مقدار $\Delta\phi_{\theta,i}^{u,k}$ به اندازه $\pi/4$ ایجاد می‌شود. برای مقادیر مختلف خطای زاویه‌ی دید موجود در فضای جستجو پارامتر کوهرنسی زمانی محاسبه شده و بهترین پاسخ تقریبی برای خطای زاویه‌ی دید متناظر با بیشترین مقدار کوهرنسی است.

همچنین پس از برآورد سهم تصویر پایه در بخش ناهمبسته در مکان سیگنال، هر دو این سهم فازهای

1 Spatially Uncorrelated Part of Signal

2 Look Angle Error

کننده‌های دائمی نزدیک (در فاصله‌ی ۱ کیلومتری) سهم فاز تفاضلی آنها بسیار ناچیز خواهد بود [۸] در طول یک کمان قابل صرف نظر کردن می باشد. از روش تابع ابهام^۳ (پریودوگرام) برای تقریب ابهام صحیح و سرعت جابه‌جایی خطی استفاده می‌شود [۱]. در این روش ساده و سریع برای پارامتر مجهول سرعت جابه‌جایی خطی یک فضای جستجو با یک محدوده و سایر گام‌های مشخص، تعریف شده است. از فضای جستجوی ایجاد شده برای پارامتر مجهول مقداری پاسخ خواهد شد که کوهرنسی زمانی تعریف شده، γ_l ، مطابق با (۵) را ماکزیمم سازد.

رابطه (۵)

$$\gamma_l = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N \exp(j w_l^k)$$

که w_l^k تفاوت بین فاز مدل شده و فاز نسبی مشاهداتی برای کمان l ام در اینترفروگرام m/k و N تعداد اینترفروگرام‌ها است. مقدار سرعت جابه‌جایی خطی از فضای جستجوی تعریف شده برآورد می‌شود به صورتی که کوهرنسی زمانی را حداکثر سازد، سپس مقدار ابهام فاز صحیح به کمک روش اینتیجر راندینگ^۴ برآورد می‌شود [۹]. به دلیل وجود فاز ناشی از APS یا جابه‌جایی غیرخطی در فاز نسبی بعضی کمان‌ها، خطای بازیابی فاز در نتایج حاصل شده و نرخ جابه‌جایی خطی برآوردی مقداری ناصحیح خواهد داشت. جهت شناسایی خطای بازیابی فاز در کمان‌ها برای هر کمان پس از برآورد مجهولات مقدار کوهرنسی زمانی محاسبه می‌شود و سپس کمان‌هایی با مقادیر کم کوهرنسی زمانی (کمتر از یک حد آستانه) حذف می‌شوند. در نهایت از نرخ جابه‌جایی خطی برای کمان‌های باقی‌مانده با حل روش کمترین مربعات نرخ جابه‌جایی خطی برای پراکنش کننده‌های دائمی باقی‌مانده نسبت به یک پراکنش کننده‌ی دائمی مرجع

ناهمبسته در مکان برآورد شده برای هر پراکنش کننده دائمی در هر اینترفروگرام از سهم فاز اولیه کم می‌شود.

۲-۳-۲- تقریب و حذف سهم جابه‌جایی خطی در فاز

از آن جا که در مناطق با نرخ جابه‌جایی بالا شرط نمونه برداری نایکوئیست هم چنان برقرار نمی‌باشد [۷]، بنابراین به علت خطای بازیابی فاز نرخ تقریبی حاصل از الگوریتم StaMPS در این مناطق بسیار کمتر از مقدار واقعی خواهد بود. در این مرحله با فرض این که بخش اصلی جابه‌جایی در منطقه رفتار خطی در زمان دارد، جهت برقراری شرط نمونه برداری نایکوئیست سهم فاز ناشی از جابه‌جایی خطی برای هر پراکنش کننده‌ی دائمی برآورد و از فاز مشاهداتی باقی مانده (پس از حذف بخش ناهمبسته در مکان) کسر می‌شود.

بنابراین در این روش تلاش می‌شود المان خطی جابه‌جایی از فاز بازیابی نشده‌ی پراکنش کننده‌های دائمی تقریب زده شود که در اولین مرحله از کلیه‌ی پراکنش کننده‌های دائمی با استفاده از مثلث بندی دلونی یک شبکه‌ی مکانی ساخته می‌شود. سهم فاز نسبی بازیابی نشده برای هر کمان متصل کننده‌ی دو پراکنش کننده‌ی دائمی i ام و j ام در اینترفروگرام k ام، ψ_{ij}^k ، را مطابق با رابطه‌ی (۴) می‌توان شامل ابهام صحیح^۱، a_{ij}^k ، و پارامترهای مورد نظر مثل سرعت جابه‌جایی خطی، v_{ij} ، در نظر گرفت.

رابطه (۴)

$$\psi_{ij}^k = -2a_{ij}^k \pi + \frac{4\pi}{\lambda} v_{ij} T^k$$

که T^k خط مبنای زمانی اینترفروگرام k ام است. از آن جا که سهم اتمسفر و خطای مداری (APS)^۲ به شدت در مکان همبسته است برای پراکنش

3 Ambiguity function

4 Integer Rounding

1 Integer ambiguity

2 Atmospheric Phase Screen

یک بعد در زمان است، از الگوریتم بازیابی فاز سه بعدی استفاده می‌شود [۶].

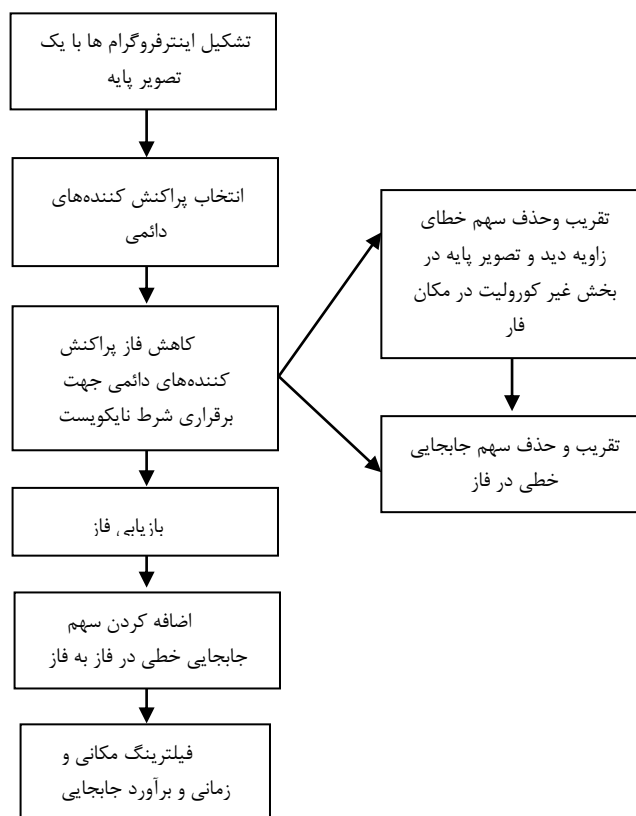
۲-۵- اضافه کردن سهم جابجایی خطی در فاز

پس از بازیابی فاز در دو فضای مکان و زمان سهم فاز ناشی از جابه‌جایی خطی پراکنش کننده‌های دائمی باقی‌مانده محاسبه شده در مرحله ۲-۳ به فاز بازیابی شده حاصل از مرحله ۲-۴ اضافه می‌شود. در واقع فاز ناشی از جابه‌جایی خطی پراکنش کننده‌های دائمی باقی‌مانده قبل از مرحله بازیابی فاز تنها به منظور برقراری شرط نمونه‌برداری نایکوئیست از فاز اولیه پیکسل‌های پراکنش کننده دائمی کسر می‌شود بنابراین پس از مرحله بازیابی فاز این سهم فاز باید دوباره اضافه شود.

حاصل می‌شود که انتخاب پراکنش کننده‌ی دائمی مرجع کاملاً اختیاری و بدون تأثیر بر روی صحت نتایج حاصله است. در آخرین مرحله سهم فاز جابه‌جایی برآوردی به صورت بازیابی نشده (مقدار بین π و $-\pi$) از سهم فاز حاصل از مرحله ۲-۳ برای پراکنش کننده‌های دائمی باقی‌مانده کسر می‌شود.

۲-۴- بازیابی فاز

پس از کسر کردن سهم فاز جابه‌جایی برآوردی از سهم فاز مشاهداتی برای پراکنش کننده‌های دائمی باقی‌مانده، شرط نمونه‌برداری نایکوئیست برقرار می‌شود و فازهای باقی‌مانده می‌تواند به درستی به وسیله‌ی روش مورد استفاده در الگوریتم StaMPS بازیابی شوند. از آن‌جا که فاز پیکسل‌ها دارای دو بعد در مکان و



شکل ۱: مراحل مختلف روش پیشنهادی در برآورد نرخ صحیح جابجایی

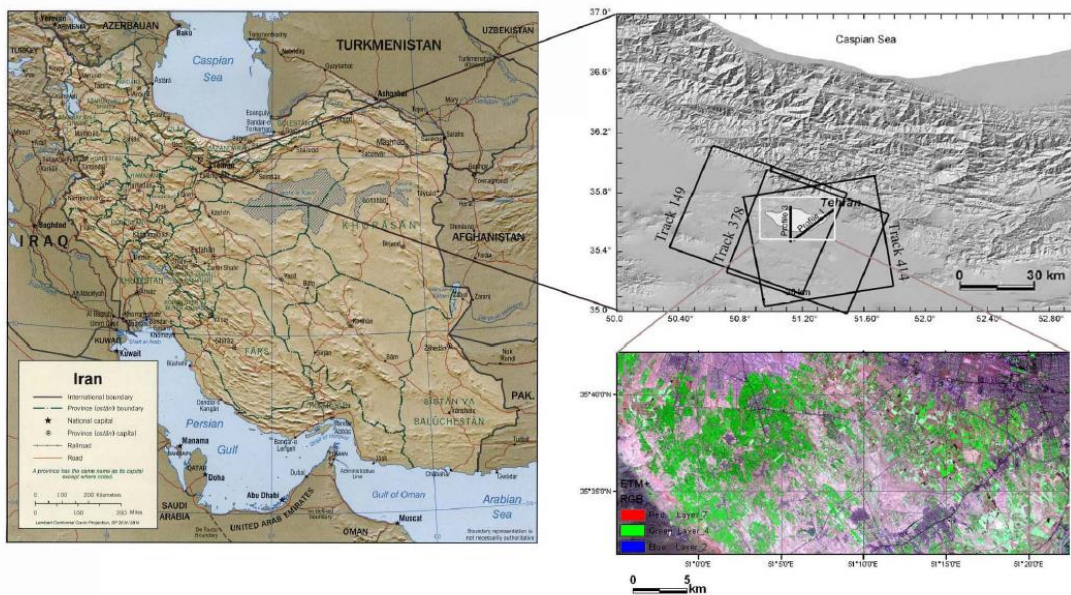
۳- نتایج

۳-۱- منطقه مورد مطالعه و داده‌ها

دشت تهران واقع در شمال ایران و از جنوب به کوه‌های آراد و فشاپویه و از شمال به رشته کوه البرز محدود می‌شود (شکل ۲). پدیده‌ی فرونشست برای اولین بار در جنوب غربی دشت تهران توسط عملیات ترازبایی دقیق در بازه‌ی زمانی ۱۹۹۵ تا ۲۰۰۲ با حداکثر نرخ جابه‌جایی 20 cm/year شناسایی شد [۱۰] و مطابق با گزارش سازمان نقشه برداری ایران در سال ۸۳-۸۴ حداکثر با نرخ 23 cm/year تحت تأثیر فرونشست گرفته‌است [۱۱].

۲-۶- فیلترینگ مکانی و زمانی و برآورد جابه‌جایی

پس از عمل بازبایی فاز مولفه‌هایی در فاز اینترفروگرام وجود دارند که باعث می‌شود نتوان فاز مربوط به جابه‌جایی را برآورد نمود. بخشی از فاز که در مکان همبسته است می‌تواند باعث ایجاد یک بایاس در نتایج گردد که بایستی برآورد و از نتایج کسر گردد که این بخش از فاز به دو بخش همبسته و نا همبسته در زمان تقسیم می‌شود. هر دو بخش فاز را به‌طور جداگانه با به‌کاربردن تلفیقی از فیلترهای مکانی و زمانی مطابق با الگوریتم StaMPS برآورد می‌شود که به‌منظور دانستن جزئیات بیشتر به [۴] مراجعه شود. پس از حذف فازهای تقریب زده شده پس از فیلترینگ، تنها سیگنال مربوط به جابه‌جایی باقی می‌ماند. شکل (۱) مراحل اجرایی پیشنهاد شده در این مقاله را نشان می‌دهد.



شکل ۲: موقعیت دشت تهران که تحت تأثیر پدیده فرونشست می‌باشد. مسیرهای مختلف داده‌های راداری که منطقه فرونشست را می‌پوشاند (مربع‌های سیاه رنگ) به همراه موقعیت منطقه فرونشست (مستطیل سفید رنگ) به همراه پهنه فرونشست (پلیگون سفید رنگ) که در شکل بالا سمت راست نشان داده شده‌است. در شکل پایین سمت راست تصویر ETM^+ منطقه‌ی مورد نظر با ترکیب رنگی ۷، ۴، ۲ در کانال‌های قرمز، سبز و آبی به تصویر کشیده شده‌است [۷].

جدول ۱: مشخصات اینترفروگرام‌های مورد استفاده

Orbit	Date	(m) B_{\perp}^*	(day) B_{temp}^{**}
07217	18-Jul-2003	-360	-525
08219	26-Sep-2003	-121	-455
09221	05-Dec-2003	-166	-385
09722	09-Jan-2004	502	-350
10223	13-Feb-2004	-178	-315
10724	19-Mar-2004	901	-280
11225	23-Apr-2004	180	-245
11726	28-May-2004	511	-210
12227	02-Jul-2004	-622	-175
12728	06-Aug-2004	48	-140
13730	15-Oct-2004	546	-70
14231	19-Nov-2004	-42	-35
14732	24-Dec-2004	0	0
16736	13-May-2005	570	140
18239	26-Aug-2005	585	245
20744	17-Feb-2006	-210	420
21746	28-Apr-2006	245	490
29762	09-Nov-2007	181	1050
32267	02-May-2008	-91	1225
33770	15-Aug-2008	169	1330
34271	19-Sep-2008	-227	1365
34772	24-Oct-2008	176	1400

۳-۲-ارائه نتایج

برای حذف سهم فاز ناشی از توپوگرافی از DEM^2 تهیه‌شده توسط SRTM³ با قدرت تفکیک مکانی ۹۰ متری استفاده شد. در مرحله‌ی انتخاب پراکنش کننده‌های دائمی به کمک الگوریتم StaMPS در ابتدا پیکسل‌هایی با مقدار شاخص پراکنندگی دامنه کمتر از ۰/۴ به‌عنوان کاندیدای پراکنش کننده‌ی دائمی تعیین‌شدند، پس از آنالیز فاز آن‌ها ۲۰۱۹ پراکنش کننده‌ی دائمی انتخاب شدند. سپس سهم فاز ناهمبسته در مکان ناشی خطای زاویه دید و تصویر پایه برای هر پراکنش کننده‌ی دائمی برآورد و حذف شد. یک شبکه‌ی مکانی از پراکنش کننده‌های دائمی با استفاده از مثلث‌بندی دلونی ایجاد شد. به کمک روش

بنابراین از آن‌جا که بخش جنوب غربی دشت تهران تحت تأثیر پدیده‌ی فرونشست با نرخ بالا قرار دارد و مطابق با مطالعات متفاوت انجام‌شده در بیشتر بخش‌های ایران، بخش عمده‌ای از پدیده‌ی فرونشست رفتار خطی در زمان دارد [۱۲، ۱۳، ۱۴]، روش پیشنهادی در منطقه‌ای کوچک به ابعاد ۱۰ در ۴/۵ کیلومتر واقع در جنوب غربی دشت تهران آزمایش شد. داده‌های مورد استفاده در این مطالعه ۲۲ تصویر گذر پایین انویست آسار^۱ از مسیر ۱۴۹ در بازه‌ی زمانی جولای ۲۰۰۳ تا اکتبر ۲۰۰۸ پوشش دهنده‌ی منطقه‌ی مورد مطالعه بود (جدول ۱). تصویر ۲۴ اکتبر ۲۰۰۴ را به‌عنوان تصویر پایه انتخاب شد و ۲۱ اینترفروگرام فرم یافته نسبت به تک تصویر پایه را پردازش شد.

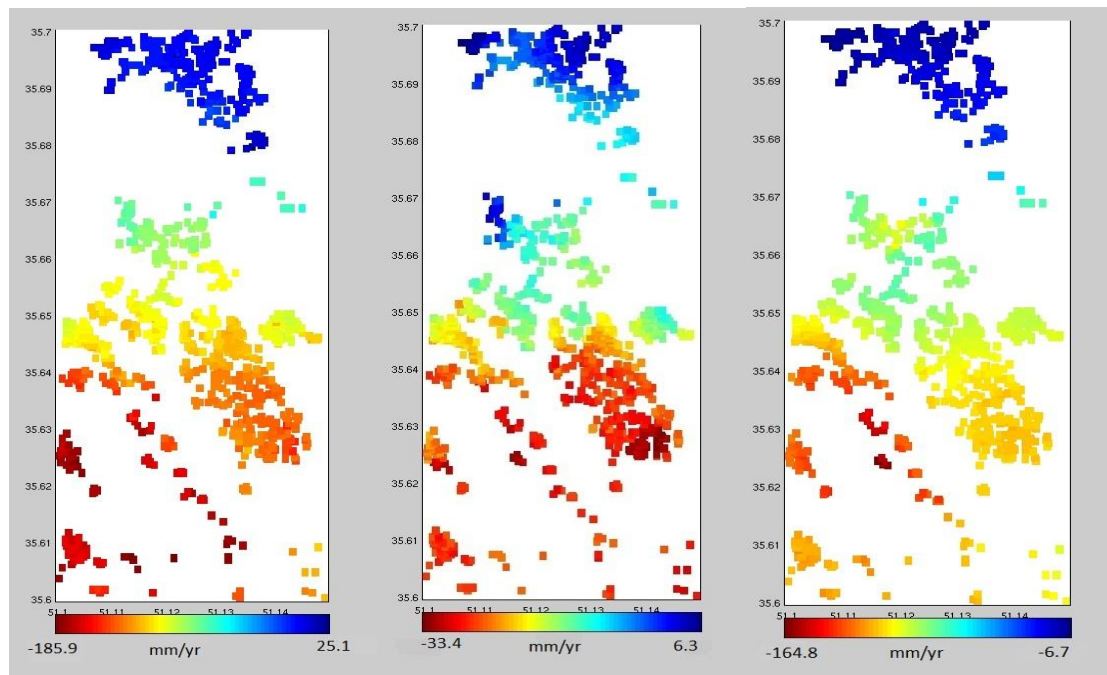
2 Digital Elevation Model

3 Shuttle Radar Topography Mission

1 ENVISAT ASAR

شکل (۳.ب) مشخص است جهش‌های فاز که به صورت تغییر ناگهانی رنگ نمایان است در خروجی الگوریتم StaMPS به وضوح دیده می‌شود که نشان از عدم برقراری شرط نمونه‌برداری نایکوئیست و خطای بازیابی فاز است. از طرف دیگر همان‌طور که در قبل اشاره شد، با علم به اینکه حداکثر نرخ جابه‌جایی در جنوب غربی دشت تهران بین سالهای ۱۹۹۵ تا ۲۰۰۲، 20 cm/year شناسایی شد و همچنین بین سالهای ۲۰۰۳ تا ۲۰۰۵ از روش تداخلسنجی راداری 25 cm/year گزارش شد [۷]، حداکثر نرخ جابه‌جایی ۳ برآورد شده توسط الگوریتم StaMPS نشان‌دهنده ناکارآمدی این روش در برآورد نرخ جابه‌جایی در جنوب غربی دشت تهران است.

پریودوگرام مقدار فاز جابه‌جایی خطی برای هر کمان شبکه مکانی تقریب زده شد و کمان‌ها با کوه‌رنسی زمانی کمتر از 0.4 حذف شدند در نتیجه ۱۱۹۴ پراکنش‌کننده‌ی دائمی باقی ماندند که موقعیت جغرافیایی آن‌ها در شکل (۳) مشخص شده است. فاز جابه‌جایی برآوردی برای پراکنش‌کننده‌های دائمی باقی‌مانده از فاز مشاهداتی کم شد و بازیابی فاز در فضای مکان و زمان مطابق با روش مورد استفاده در الگوریتم StaMPS انجام شد. پس از اضافه کردن فاز تقریبی به فاز بازیابی شده و اجرای فیلترینگ زمانی و مکانی، نرخ فرونشست در منطقه (شکل ۳.الف)) برآورد شد. همچنین نرخ برآوردی حاصل از داده‌های استفاده شده در این مطالعه و با به‌کارگیری الگوریتم StaMPS در شکل (۳.ب) نمایش داده شده است. همان‌طور که از



(ج)

(ب)

(الف)

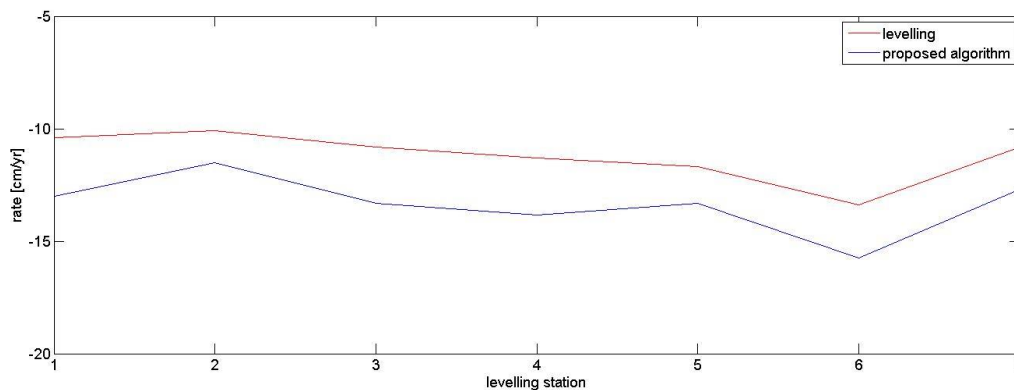
شکل ۳: جنوب غربی تهران، منطقه مورد مطالعه: الف) نرخ فرونشست برآوردی پراکنش‌کننده‌های دائمی با استفاده از الگوریتم پیشنهادی (ب) نرخ فرونشست برآوردی پراکنش‌کننده‌های دائمی با استفاده از الگوریتم StaMPS (ج) نرخ فرونشست برآوردی پراکنش‌کننده‌های دائمی با استفاده از روش SBAS و تصاویر مسیر ۳۷۸

موفقتر عمل می‌کند.

۴- بحث و نتیجه‌گیری:

به منظور ارزیابی نتایج به‌دست آمده، از داده‌های ترازایی تهیه شده توسط سازمان نقشه‌برداری در سال ۸۳-۸۴ در منطقه مورد مطالعه استفاده شد [۱۱]. همان‌طور که شکل ۴ نشان می‌دهد، الگوی جابه‌جایی در طول ایستگاه‌های ترازایی یکسان است که موفقیت الگوریتم پیشنهادی در برآورد جابه‌جایی را نشان می‌دهد. تفاوت در نرخ جابه‌جایی در شکل ۴ را می‌توان به تفاوت در بازه زمانی آن‌ها نسبت داد.

همان‌طور که شکل (۳.الف) نشان می‌دهد و با توجه به دانش حداکثر نرخ جابه‌جایی در منطقه از روش‌های تداخل سنجی راداری و ترازایی دقیق، نرخ فرونشست برآوردی با استفاده از روش پیشنهادی در مقایسه با نرخ فرونشست برآوردی با استفاده از الگوریتم StaMPS نه تنها صحت بالاتری دارد (در ادامه بیشتر توضیح داده خواهد شد) بلکه دچار جهش فاز و خطای بازایی فاز نمی‌باشد. بنابراین می‌توان اینگونه نتیجه گرفت که نرخ جابه‌جایی خطی به‌درستی تقریب زده شده و شرط نمونه‌برداری نایکوئیست برقرار شده‌است و الگوریتم پیشنهادی در مقایسه با الگوریتم StaMPS در برآورد جابه‌جایی با نرخ بالا بسیار



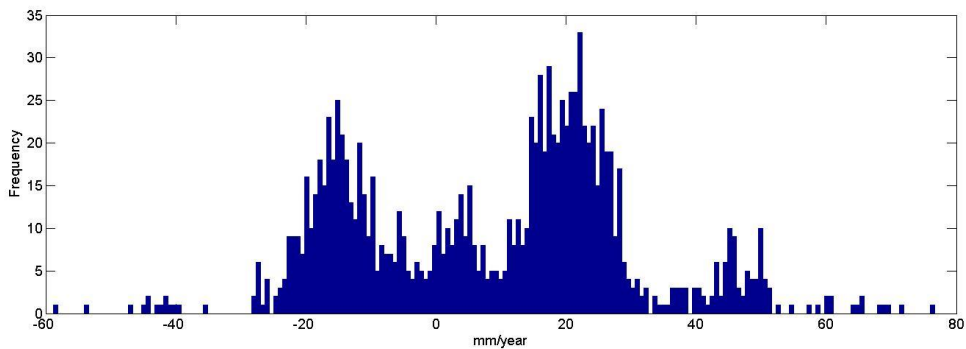
شکل ۴: مقایسه داده‌های ترازایی دقیق و تداخل سنجی راداری

پیشنهادی نسبت به الگوریتم StaMPS در برآورد نرخ بالای جابه‌جایی به اثبات رسید. در این بخش از مقایسه‌ی نتایج نمایش داده شده در شکل (۳.الف) و (۳.ج) می‌توان به یکی بودن الگوی جابه‌جایی در منطقه پی‌برد. در شکل (۴) می‌توان هیستوگرام اختلاف نرخ برآوردی روش پیشنهادی و تصاویر مسیر ۱۴۹ را از نرخ برآوردی روش SBAS و تصاویر مسیر ۳۷۸ دید. میانگین این اختلاف‌ها $8/9$ mm/year و انحراف از معیار نرخ فرونشست حاصل از روش پیشنهادی $22/9$ mm/year است. که این نتایج موفقیت الگوریتم پیشنهادی در بهبود الگوریتم StaMPS و میزان صحت الگوریتم پیشنهادی را آشکار می‌کند.

همچنین با توجه به اینکه در مطالعات انجام شده در ایران، نرخ جابه‌جایی حاصل از روش SBAS دارای خطایی کمتر از 1 cm/year نسبت شبکه ترازایی دقیق و مدل جهانی GPS می‌باشد [۱۲، ۱۳، ۱۴] و با ناچیز فرض کردن این مقدار در مقایسه با نرخ جابه‌جایی در منطقه مورد مطالعه، به منظور ارزیابی صحت نتایج از نرخ جابه‌جایی حاصل از SBAS و با استفاده از داده‌های متفاوت هم استفاده شد. شکل (۳.ج) نرخ فرونشست برآورد شده از ۱۴ تصویر انویست آسار مسیر ۳۷۸ در بازه زمانی آگوست ۲۰۰۳ تا آپریل ۲۰۰۵ و با استفاده از روش SBAS را نشان می‌دهد. در بخش قبل موفقیت الگوریتم

پدیده‌ی فرونشست قرار نگرفته است (منطقه آبی رنگ در شکل ۳)، دسترسی به نقاط مورد نیاز به منظور برازش صفحه در این منطقه مقدور نیست و خطای مداری به درستی تقریب زده نمی‌شود این در حالی است که در صورت بزرگتر کردن منطقه مورد مطالعه سرعت عملیات تقریب نرخ جابه‌جایی خطی کاهش می‌یابد، بنابراین ما موفق به حذف خطای مداری از نرخ فرونشست برآوردی روش پیشنهادی نشدیم.

عوامل مختلفی می‌تواند دلیل این اختلاف باشد. در ابتدا باید به این نکته اشاره کرد که نرخ روش SBAS مربوط به بازه‌ی زمانی ۲۰۰۳ تا ۲۰۰۵، در حالی که نرخ روش پیشنهادی مربوط به بازه‌ی زمانی ۲۰۰۳ تا ۲۰۰۸ است، بنابراین تغییر نرخ فرونشست پس از سال ۲۰۰۵ می‌تواند باعث اختلاف شود همچنین از آنجا که جهت حذف خطای مداری نیاز به برازش یک صفحه به منطقه به کمک نقاط خارج از محدوده جابه‌جایی وجود دارد و با توجه به این که تنها بخش کوچکی از منطقه مورد مطالعه تحت تأثیر



شکل ۵: هیستوگرام اختلاف نرخ برآوردی روش پیشنهادی و تصاویر مسیر ۱۴۹ از نرخ برآوردی روش SBAS و تصاویر مسیر ۳۷۸ برای تمام پراکنش‌کننده‌های دائمی

جهت بهبود نتایج می‌توان سرعت بخشی روش پیشنهادی در مناطق بزرگتر یا حذف خطای مداری در مناطق کاملاً تحت تأثیر پدیده‌ی فرونشست را مد نظر قرار داد. همچنین مشاهدات ژئودتیکی به صورت پیوسته در بازه‌های زمانی مرتب در منطقه جنوب غربی دشت تهران پیشنهاد می‌شود.

همان‌طور که در بخش قبل اشاره شد، پس از اجرای روش پیشنهادی تعدادی از پیکسل‌های پراکنش‌کننده‌ی دائمی انتخاب شده توسط الگوریتم StaMPS در اثر حذف کمان‌هایی با کوه‌رنسی زمانی کم از دست داده شد، که علت حذف تعدادی از آنها عدم تطابق مدل جابه‌جایی با مدل فرضی جابه‌جایی خطی است در حالی که تعدادی با وجود اختلاف ناچیز مدل جابه‌جایی از مدل فرضی جابه‌جایی به خطا

از طرف دیگر روش پرودوگرام روش بهینه به منظور برآورد نرخ جابه‌جایی نیست چراکه روش اینتیجر راندینگ مورد استفاده جهت برآورد ابهام فاز صحیح^۱ از ابهام فاز حقیقی^۲ در صورت عدم وجود همبستگی بین مشاهدات روش مناسبی است [۱۵] لذا به علت وجود همبستگی بین مشاهدات ابهام فاز حقیقی (غیر صحیح) استفاده از روش پرودوگرام منجر به برآورد جابه‌جایی همراه با خطا می‌شود.

نتایج نشان داد که روش پیشنهادی به‌خوبی قادر به اندازه‌گیری نرخ بالای جابه‌جایی می‌باشد که نشان‌دهنده بهبود قابل توجه الگوریتم StaMPS است.

1 integer
2 real

پراکنش کننده‌های دائمی انتخاب شده از طریق آنالیز فاز و دامنه ایجاد شد و سهم فاز جابه‌جایی خطی برای هر کمان به روش پریودوگرام محاسبه شد. سپس جهت برقراری شرط نمونه‌برداری نایکوئیست قبل از عملیات بازبازی فاز، علاوه بر حذف سهم فاز ناهمبسته در مکان ناشی از خطای زاویه دید و تصویر پایه، سهم فاز ناشی از جابه‌جایی خطی هم برای هر پراکنش کننده‌ی دائمی برآورد و حذف شد. پس از مقایسه‌ی نرخ جابه‌جایی برآوردی روش پیشنهادی با نرخ حاصل از تصاویر مسیر مجاور و با استفاده از روش SBAS، انحراف از معیار $22/9 \text{ mm/year}$ نشان‌دهنده‌ی کارایی بالای الگوریتم پیشنهادی در مناطق با نرخ جابه‌جایی بالا و با رفتار نسبتاً خطی در زمان است.

حذف شدند. از جمله عوامل ایجاد کننده‌ی خطای بهینه نبودن روش پریودوگرام و وجود سهم اتمسفر باقی‌مانده در طول کمان‌ها است. بنابراین با توجه به این‌که در صورت همبستگی بین مشاهدات روش اینتیر راندینگ مورد استفاده در پریودوگرام مقادیر ابهام صحیح را به‌درستی برآورد نمی‌کند، استفاده از روش بهینه جهت برآورد ترم خطی جابه‌جایی و همچنین حذف سهم فاز اتمسفر از تمامی اینترفروگرام‌ها پیشنهاد می‌شود.

در این مقاله ما یک روش جدید برای بهبود الگوریتم StaMPS جهت برآورد نرخ جابه‌جایی بالا و با رفتار تقریباً خطی در زمان ارائه کردیم. روش پیشنهادی در منطقه‌ی کوچکی در جنوب غربی دشت تهران آزمایش شد. در این روش یک شبکه‌ی مکانی از

مراجع

- [1] Ferretti, A., Prati, C., and Rocca, F., January 2001. *Permanent scatterers in SAR interferometry*, IEEE Trans. Geosci. Remote Sens., 39, 8-20.
- [2] Ferretti, A., Prati, C., and Rocca, F., 2000a, *Nonlinear subsidence rate estimation using permanent scatterers in differential SAR interferometry*. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 38, 2202-2212.
- [3] Colesanti, C., Ferretti, A., Novali, F. and Rocca, F., 2003b. *SAR monitoring of progressive and seasonal ground deformation using the Permanent Scatterers Technique*. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 41, 1685-1701.
- [4] Hooper, A., 2006. *Persistent Scatterer Radar Interferometry for Crustal Deformation Studies and Modeling of Volcanic Deformation*. PhD thesis. Stanford University.
- [5] Hooper, A., Segall, P., and Zebker, H., July 2007a, *Persistent Scatterer Interferometric Synthetic Aperture Radar for Crustal Deformation Analysis, With Application to Volcano Alcedo, Galapagos*, Journal of Geophysical Research., 112, B07407, doi:10.1029/2006JB004763.
- [6] Hooper, A., and Zebker, H., September 2007, *Phase Unwrapping In Three Dimensions With Application to InSAR Time Series*, J. Opt. Soc. Am. A, 24, 2737-2747.
- [7] Dehghani, M., 2010. *Estimation of deformation rate and modeling of land subsidence induced by groundwater exploitation using Interferometry*. PhD thesis. K.N. Toosi University of Technology.
- [8] William, S., Bock, Y., Fang, P., 1998. *Integrated satellite interferometry: tropospheric noise, GPS estimates and implications for interferometric synthetic aperture radar products*. J. Geophys. Res., 103.
- [9] Counselman, C. C. & Gourevitch, S.A. (1981). *Miniature interferometer terminals for earth surveying: ambiguity and multipath with the Global Positioning System*. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 19(4).
- [10] Amighpey, M., Arabi, S., Talebi, A., and Djamour, Y., 2006, *Elevation Changes of Precise Leveling Tracks In The Iran Leveling Network*. , Iran : National Cartographic Center (NCC).
- [11] Arabi, S., Montazerian, A. R., Maleki, E., Talebi, A., (2003) *Study of Land Subsidence in South-west of Tehran*. National Cartographic Center of Iran, Journal Of Surveying, No. 69, pp. 14-24.

- [12] Dehghani, M., Valadan Zouj, M.J., Entezam, I., and Saatchi, S., 2009b, *InSAR Monitoring of Progressive Land Subsidence in Neyshabour; Northeast Iran*, Geophysical Journal International (GJI), 178, 47-56.
- [13] Dehghani, M., Valadan Zouj, M.J., Biggs, J., Mansourian, A., Parsons, B. and Wright, T., March. 2009, *RADAR Interferometry Time Series Analysis of Mashhad Subsidence*, Journal of International Society of Remote Sensing (ISRS), India, 37, 147-156.
- [14] Dehghani, M., Valadan Zouj, M.J., Entezam, I., Saatchi, S. and Shemshaki, A., November. 2010, *Interferometric Measurements of Ground Surface Subsidence induced by Overexploitation of Groundwater*, Journal of Applied Remote Sensing, 4, 041864, doi:10.1117/1.3527999.
- [15] Kampes, B. M. & Hanssen, R. F. (2004). Ambiguity Resolution for Permanent Scatterer Interferometry. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 42(11).



Improvement of Persistent Scatterer Interferometry Algorithm (StaMPS) for Estimation of Deformation Using Periodogram Approach

Zahra Sadeghi^{1*}, Mohammad Javad Valadan Zoej², Maryam Dehghani³

1 Ms.c student of remote sensing in Department of Geomatics, Faculty of Geodesy and Geomatics Engineering, K.N.Toosi University of Technology

2 Associate professor in Department of Geomatics, Faculty of Geodesy and Geomatics Engineering, K.N.Toosi University of Technology

3 Assistant professor in Department of Geomatics, Faculty of Geodesy and Geomatics Engineering, K.N.Toosi University of Technology

Abstract

Persistent Scatterer Interferometry (PSI) was presented in order to overcome the limitations of conventional Interferometry through selection of so-called Persistent Scatterers (PS) with coherent scattering behavior over time using *a priori* deformation model. The algorithm later developed as StaMPS (Stanford Method for Persistent Scatterers), is able to select the PSs without using a pre-defined deformation model and extract the deformation even in areas lacking the corner reflectors. However, if the deformation rate is too high, Nyquist sampling criterion required for temporal unwrapping will not be fulfilled. As a result, StaMPS will underestimate the deformation rate. In this paper, an efficient approach is presented to improve StaMPS performance for estimating high deformation rate. PS pixels are firstly selected using the method proposed in StaMPS. The linear component of deformation for all arcs connecting two PSs are then estimated using periodogram approach. The estimated linear deformation component for all PS pixels is subtracted modulo- 2π from observed wrapped phase. The residual phases can be correctly unwrapped using the Nyquist sampling criterion since the most significant contribution of the deformation signal is assumed to be linear which is mostly the case. We applied the proposed approach to the ENVISAT ASAR images of southwestern Tehran basin. The estimated deformation rate is finally compared with deformation rate extracted from images of additional adjacent track using SBAS algorithm and the value of 22.9 mm/year as standard deviation of deformation rate demonstrates the high performance of the presented approach.

Key words: Persistent Scatterer Interferometry, StaMPS, Periodogram.