J. RS. GEOINF. RES. 4(2): 335-344, Summer & Autumn 2026

Journal of Remote Sensing and Geoinformation Research
(JRSGR)
Homepage: jrsgr.sru.ac.ir

ORIGINAL RESEARCH PAPER

Displacement Evaluation in a W-band Ground-Based Synthetic Aperture Radar Sensor Using a Temporal–Spatial Phase Unwrapping Method

M. Mohammadi, J. Amini*

Department of Photogrammetry and Remote Sensing, School of Surveying and Geospatial Engineering, College of Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran

Received: 01 May 2026
Reviewed: 15 June 2026
Revised: 02 September 2026
Accepted: 27 October 2026

KEYWORDS:
Displacement Monitoring
Ground-based Synthetic Aperture Radar
Phase Unwrapping

* Corresponding author
jamini@ut.ac.ir
((+9821) 88008841

ABSTRACT

Background and Objectives: Monitoring the displacement of the ground surface and structures is an important topic in deformation studies. Ground-Based Synthetic Aperture Radar (GBSAR) offers considerable potential for deformation monitoring due to its ability to acquire images independently of lighting conditions and measure submillimeter displacements along the line of sight (LOS). One of the essential steps in extracting displacement information from radar data is phase unwrapping, because the restriction of the measured phase to a specific interval introduces ambiguity in determining the number of complete phase cycles. On the other hand, the performance of conventional phase unwrapping methods may be associated with reduced accuracy in the presence of significant displacements, abrupt changes, and measurement errors. Therefore, the aim of the present study is to investigate the performance of a combined approach based on temporal and spatial information to improve phase unwrapping and increase displacement estimation accuracy. For this purpose, two displacement models, linear and step-like, were investigated.

Methods: In this study, time-series data corresponding to two displacement models, linear and step-like, were acquired using a GBSAR sensor, and the radar images were processed to extract amplitude and phase information. Permanent scatterers (PSs) were then selected based on their amplitude behavior throughout the time series, with 42 points selected for the linear model and 18 points for the step-like model. Following the selection of the points, the phase of each point was extracted over time, and temporal phase unwrapping was performed using Itoh's algorithm. In the next step, the selected points were connected using a Delaunay triangulation network, and a system of equations was established based on spatial relationships by calculating the phase differences between neighboring points. Subsequently, the unwrapped phase values at the points were estimated using the least-squares method and converted into displacements along the line of sight (LOS). Finally, to evaluate the performance of the two methods, the estimated displacements were compared with the reference values, and the root mean square error (RMSE) was calculated. The processing times of the temporal and combined temporal–spatial methods were also measured.

Findings: The results showed that the combined temporal–spatial method improved displacement estimation accuracy compared with temporal phase unwrapping alone. In the linear model, the final displacement estimated by the combined method was 31.563 mm, and the RMSE decreased from 0.3317 to 0.0406 mm, representing an improvement of 87.8%. In the step-like model, the final displacement was 3.748 mm, and the RMSE decreased from 0.1432 to 0.1203 mm. Analysis of the displacement time series also showed that the combined method was able to reconstruct the overall displacement trend and its abrupt changes with good agreement with the reference values. Furthermore, the processing times of the temporal and combined temporal–spatial methods were 0.0005 and 0.0132 s, respectively, for the linear model, and 0.0004 and 0.0051 s, respectively, for the step-like model.

Conclusion: The findings of this study showed that combining temporal and spatial phase unwrapping using permanent scatterers (PSs) improves displacement estimation accuracy and reduces residual errors remaining after temporal phase

unwrapping. This improvement was observed in both displacement models, with the greatest error reduction occurring in the linear model. In the step-like model, the combined method also demonstrated more accurate performance than the temporal method despite abrupt displacement changes. It is recommended that future studies investigate the performance of the method under more complex displacement models and examine the effects of the number and distribution of permanent scatterers on displacement estimation accuracy.

NUMBER OF REFERENCES	NUMBER OF FIGURES	NUMBER OF TABLES
22	4	2

مقاله پژوهشی

ارزیابی جابه‌جایی در یک سنجنده رادار روزنه مصنوعی زمینی باند W با استفاده از روش رفع ابهام فاز زمانی- مکانی

مینا محمدی، جلال امینی*

گروه فتوگرامتری و سنجش‌ازدور ، دانشکده مهندسی نقشه‌برداری و اطلاعات مکانی، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران، تهران، ایران

چکیده

پیشینه و اهداف: پایش جابه‌جایی سطح زمین و سازه‌ها از موضوعات مهم در مطالعات تغییرشکل است. سنجنده رادار با روزنه مصنوعی زمینی به دلیل قابلیت تصویربرداری مستقل از شرایط نوری و اندازه‌گیری جابه‌جایی‌های زیرمیلی‌متری در راستای خط دید، ظرفیت مناسبی برای پایش تغییرشکل‌ها دارد. یکی از مراحل اساسی در استخراج جابه‌جایی از داده‌های راداری، رفع ابهام فاز است؛ زیرا محدود بودن فاز اندازه‌گیری‌شده به یک بازه مشخص، موجب ابهام در تعیین تعداد چرخه‌های کامل فاز می‌شود. از طرف دیگر عملکرد روش‌های متداول رفع ابهام فاز ممکن است در حضور جابه‌جایی‌های قابل‌توجه، تغییرات ناگهانی و خطاهای اندازه‌گیری با کاهش دقت همراه شود. ازاین‌رو، هدف پژوهش حاضر بررسی عملکرد یک رویکرد ترکیبی مبتنی بر اطلاعات زمانی و مکانی برای بهبود رفع ابهام فاز و افزایش دقت برآورد جابه‌جایی است. بدین منظور، دو مدل جابه‌جایی خطی و پله‌ای مورد بررسی قرار گرفتند.

روش‌ها: در این پژوهش، داده‌های سری زمانی مربوط به دو مدل جابه‌جایی خطی و پله‌ای با استفاده از سنجنده GBSAR اخذ و تصاویر راداری برای استخراج اطلاعات دامنه و فاز پردازش شدند. سپس نقاط پراکنش گر دائمی بر اساس رفتار دامنه در طول سری زمانی انتخاب شدند که تعداد آن‌ها در مدل خطی ۴۲ و در مدل پله‌ای ۱۸ نقطه بود. پس از انتخاب نقاط، فاز هر نقطه در طول زمان استخراج و رفع ابهام فاز زمانی با استفاده از الگوریتم ایتوه انجام شد. در مرحله بعد، نقاط منتخب با استفاده از شبکه مثلث‌بندی دلونی به یکدیگر متصل شده و با محاسبه اختلاف فاز میان نقاط مجاور، دستگاه معادلات بر اساس روابط مکانی تشکیل شد. سپس با استفاده از روش کمترین مربعات، فاز رفع ابهام‌شده نقاط برآورد و به جابه‌جایی در راستای خط دید تبدیل شد. در نهایت، برای ارزیابی عملکرد دو روش، جابه‌جایی برآورد شده با مقدار مرجع مقایسه و معیار RMSE محاسبه شد. همچنین زمان پردازش روش‌های زمانی و ترکیبی زمانی–مکانی اندازه‌گیری شد.

یافته‌ها: نتایج نشان داد که روش ترکیبی زمانی–مکانی نسبت به رفع ابهام فاز زمانی، دقت برآورد جابه‌جایی را افزایش می‌دهد. در مدل خطی، جابه‌جایی نهایی روش ترکیبی ۳۱/۵۶۳ میلی‌متر بود و RMSE از ۰/۳۳۱۷ به ۰/۰۴۰۶میلی‌متر کاهش یافت که بیانگر بهبود ۸۷/۸درصدی است. در مدل پله‌ای نیز جابه‌جایی نهایی ۳/۷۴۸میلی‌متر بود و RMSE از ۰/۱۴۳۲ به ۰/۱۲۰۳ میلی‌متر کاهش یافت. بررسی سری‌های زمانی جابه‌جایی نیز نشان داد که روش ترکیبی توانسته است روند کلی جابه‌جایی و تغییرات ناگهانی آن را با انطباق مناسبی نسبت به مقادیر مرجع بازسازی کند. همچنین زمان پردازش روش‌های زمانی و ترکیبی زمانی–مکانی در مدل خطی به ترتیب ۰/۰۰۰۵ و ۰/۰۱۳۲ ثانیه و در مدل پله‌ای به ترتیب ۰/۰۰۰۴ و ۰/۰۰۵۱ ثانیه به دست آمد.

تاریخ دریافت: ۱۱ اردیبهشت ۱۴۰۵
تاریخ داوری: ۲۵ خرداد ۱۴۰۵
تاریخ اصلاح: ۱۱ شهریور ۱۴۰۵
تاریخ پذیرش: ۰۵ آبان ۱۴۰۵

واژگان کلیدی:
پایش جابه‌جایی
سنجنده رادار با روزنه مصنوعی زمینی
رفع ابهام فاز

* نویسنده مسئول
jamini@ut.ac.ir
۰۲۱-۸۸۰۰۸۸۴۱

نتیجه‌گیری: یافته‌های این پژوهش نشان داد که ترکیب رفع ابهام فاز زمانی و مکانی با بهره‌گیری از نقاط پراکنش گر دائمی، موجب افزایش دقت برآورد جابه‌جایی و کاهش خطاهای باقی‌ملنده از مرحله رفع ابهام زمانی می‌شـــود. این بهبود در هر دو مدل جابه‌جایی مشاهده شـد؛ به‌طوری‌که بیشـترین کاهش خطا مربوط به مدل خطی بود و در مدل پله‌ای نیز روش ترکیبی، باوجود تغییر ناگهانی جابه‌جایی، عملکرد دقیق‌تری نســـبت به روش زمانی داشـــت. پیشـــنهاد می‌شـــود در مطالعات آینده، عملکرد روش در مدل‌های جابه‌جایی پیچیده‌تر و تأثیر تعداد و توزیع نقاط پراکنش گر دائمی بر دقت برآورد جابه‌جایی بررسی شود.

مقدمه

GBSAR یک سامانه تصویربرداری راداری زمینی است که در این سیستم نه‌تنها دامنه، بلکه فاز سیگنال رادار دریافتی نیز اندازه‌گیری می‌شود؛ بنابراین اندازه‌گیری‌های فاز را می‌توان با استفاده از تکنیک‌ها تداخل سنجی، برای استخراج اطلاعات مربوط به تغییر شکل و جابجایی مورداستفاده قرارداد[۱]. اما برآورد صحیح تغییر شکل و جابجایی ، مستلزم بازیابی فاز واقعی ، با تخمین تعداد چرخه‌های کامل فاز است که باید به فاز پیچیده شده اضافه شوند. این عملیات که رفع ابهام فاز نام دارد ، دارای راه‌حل‌های نامتناهی است[۲]. بسیاری از الگوریتم‌های رفع ابهام فاز فرض می‌کنند که فازهای رفع ابهام شده تداخل‌نگاشت به‌صورت یکنواخت تغییر می‌کنند و شرط $|\Delta\varphi_{12_{unwr}}(i,j) - \Delta\varphi_{12_{unwr}}(k,l)| < \pi$ را برآورده می‌کنند. که در آن (i,j) و (k,l) دو پیکسل مجاور همدوس و $\Delta\varphi_{12_unwr}(i,j)$ و $\Delta\varphi_{12_unwr}(k,l)$ به ترتیب مقادیر فاز رفع ابهام شده آن‌ها در یک تداخل‌نگاشت را نشان می‌دهند. اگر این شرط برآورده نشود، خطاهای رفع ابهام فاز که مضربی از 2π هستند می‌توانند رخ دهند و درنتیجه، خطاهای شدیدی ممکن است برآورد تغییر شکل را تحت تأثیر قرار دهند[۳].

روش‌های مختلفی برای رفع ابهام فاز به‌منظور پایش دقیق‌تر جابه‌جایی ارائه‌شده است. از ساده‌ترین الگوریتم‌های رفع ابهام فاز مطرح‌شده الگوریتم‌های حوزه زمان هستند [۴-۶]. این الگوریتم‌ها به‌منظور محاسبه سریع تغییرشکل و جابه‌جایی مطرح‌شده‌اند. برای نمونه، Helmyو همکاران در روش پیشنهادی خود، به دلیل نسبت سیگنال به نویز متوسط و زمان کوتاه برداشت داده، از متداول‌ترین روش‌های رفع ابهام فاز زمانی استفاده کرده‌اند تا سرعت پردازش را بدون کاهش قابل‌توجه دقت حفظ کنند[۷]. این مفهوم رفع ابهام فاز یک‌بعدی را می‌توان به سناریوهای دوبعدی و سه‌بعدی تعمیم داد که به‌عنوان رفع ابهام فاز دوبعدی[۸-۱۰] و سه‌بعدی [۱۱-۱۳] شناخته می‌شوند. Rebmeister و همکاران در مطالعه‌ای باهدف مقایسه‌ی استراتژی‌های مختلف پردازش سری‌های زمانی طولانی داده‌هایGBSAR ، از روش رفع ابهام فاز دوبعدی مبتنی بر الگوریتم جریان با حداقل هزینه (MCF)که در نرم‌افزار SNAPHU پیاده‌سازی شده، برای پردازش ۳۰۰۰۰ تصویر برداشت‌شده از سد انگوری در گرجستان استفاده کردند. در این پژوهش، به‌منظور کاهش زمان محاسبات، با بهره‌گیری از معیار واریانس دایره‌ای، تداخل‌نگاشت‌های فاقد تغییرات معنادار فاز را شناسایی و از انجام عملیات رفـع ابهام بر روی آن‌ها صرف‌نـظر کردند[۱۴]. Luo و همکاران در اولین کاربرد تداخل‌سنجی سامانه‌یArc FMCW SAR ، برای رفع ابهام فاز از روش کمترین مربعات مبتنی بر FFT استفاده کردند که با حفظ دقت مناسب، امکان تولید نقشه‌ی ارتفاعی و بررسی تغییرات توپوگرافی را فراهم می‌آورد[۱۵]. در پژوهشی دیگر، Zhou و همکاران برای استخراج مدل رقومی ارتفاعی شیب با استفاده ازGBSAR ، پس از فیلتر کردن تداخل‌نگاشت با فیلتر گلدشتاین و درون‌یابی نواحی فاقد سیگنال، از روش کمترین مربعات برای رفع ابهام فاز استفاده کردند و با افزایش خط مبنای عمودی به بیش از ۰/۵ متر، به‌دقت ارتفاعی کمتر از ۲ متر دست یافتند[۱۶]. در کاربردهای خاص مانند پایش شیب‌های کوهستانی چندمرحله‌ای که پله‌های شیب باعث ناپیوستگی فاز می‌شوند، روش‌های متداول رفع ابهام مانند شاخه برش استاندارد با شکست مواجه می‌شوند. Huang و همکاران الگوریتم شاخه برش مبتنی بر ماسک و قطعه‌بندی را پیشنهاد دادند که با استفاده از نقشه‌ی همدوسی، نواحی پله‌ای را ماسک کرده و رفع ابهام فاز هر بخش را به‌صورت مستقل انجام می‌دهد و سپس نتایج را به هم متصل می‌نماید. این روش از انتشار خطای ناشی از فاز ناپایدار در نواحی پله‌ای جلوگیری کرده و نتایج دقیق‌تری ارائه می‌دهد[۱۷].

در اصل، رفع ابهام فاز سه‌بعدی نشان‌دهنده یک مفهوم مکانی-زمانی است که از دو بعد مکانی و یک بعد زمانی تشکیل‌شده است. Xiang و همکاران برای پردازش بی‌درنگ داده‌های GB-SAR، از ترکیب رفع ابهام فاز زمانی مبتنی بر الگوریتم ایتوه و رفع ابهام فاز مکانی دوبعدی استفاده کردند. این روش با بهره‌گیری از فیلتر کالمن پویا و پنجره لغزان شامل ۲۱ تصویر، توانست تغییرشکل شیب سد را با خطای فاز ۰/۲۱۹ میلی‌رادیان و در مدت‌زمان ۲ تا ۳ دقیقه برای هر به‌روزرسانی، محاسبه کند[۱۸]. در پژوهشی دیگر، Wangو همکاران برای پایش تغییر شکل سطح سد، از روش رفع ابهام فاز زمانی مبتنی بر الگوریتم ایتوه روی زیرمجموعه‌های تصاویر استفاده کردند. در این روش، ابتدا سری‌های زمانی طولانی به چندین زیرمجموعه‌ی کوتاه‌مدت تقسیم‌شده و در هر زیرمجموعه، رفع ابهام فاز به‌صورت مستقل برای هر نقطه انجام می‌شود. سپس با میانگین‌گیری از فازهای رفع ابهام شده در هر زیرمجموعه، تصاویر میانگین باکیفیت بالا تولیدشده و تداخل‌سنجی بین زیرمجموعه‌ها، تغییرشکل با دقت زیرمیلی‌متری محاسبه می‌شود[۱۹].

در مطالعات اخیر، با توسعه‌ی سامانه‌های GBSAR با طول‌موج‌های کوتاه‌تر مانند باند W با طول‌موج ۴ میلی‌متر، چالش پیچش فاز و خطاهای ناشی از رفع ابهام افزایش‌یافته است. محمدی و همکاران با شبیه‌سازی داده‌های یک سنجنده باندW ، عملکرد دو الگوریتم رفع ابهام

فاز مکانی شامل شاخه برش گلدشتاین و روش هدایت‌شده بر اساس کیفیت را در ترکیب با رفع ابهام فاز زمانی مبتنی بر الگوریتم ایتوه مقایسه کردند. نتایج نشان داد که روش شاخه‌برش گلدشتاین با RMSE برابر ۰/۱۲۲ میلی‌متر و زمان پردازش حدود ۹۵ ثانیه، نسبت به روش هدایت‌شده بر اساس کیفیت باRMSE برابر ۰/۱۵۴ میلی‌متر و زمان ۲۵۱۱ ثانیه عملکرد به‌مراتب بهتری دارد و برای کاربردهای پایش تغییر شکل با سنجنده های باند W مناسب‌تر است[۲۰]. در رویکردی دیگر، Wang و همکاران نیز یک زنجیره پردازشی بی‌درنگ برای داده‌های GB-SAR بر اساس مفهوم SBAS و پردازش دسته‌به‌دسته تصاویر ارائه دادند. در این روش، پس از کاهش نویز با استفاده از فیلتر Non-Local MIAS، از الگوریتم رفع ابهام فاز سه‌بعدی StaMPS استفاده شد. این روش ترکیبی مکانی–زمانی، دقت زیرمیلی‌متری را در دو مطالعه میدانی تپه ماسه‌ای و پرتگاه ساحلی به دست آورد و با شناسایی پیکسل‌های دارای همدوسی موقت، امکان بررسی تغییرات زمانی تغییرشکل‌های ناشی از جزرومد دریا و جابه‌جایی ماسه‌ها را فراهم کرد [۲۱].

همان‌طور که گفته شد، باوجود مزایای GBSAR در پایش جابه‌جایی، دقت برآورد جابه‌جایی به‌شدت به کیفیت مرحله رفع ابهام فاز وابسته است. ازاین‌رو، در پژوهش حاضر، به ارزیابی یک روش رفع ابهام فاز زمانی–مکانی پرداخته می‌شود که با تلفیق رفع ابهام فاز در ابعاد زمانی و مکانی و به‌کارگیری شبکه مثلث‌بندی دلونی مبتنی بر نقاط پراکنش گر دائمی (PS)، به دنبال کاهش محدودیت‌های روش‌های متداول و افزایش دقت برآورد جابه‌جایی است. در همین راستا، کارایی روش مورد بررسی با استفاده از داده‌های سنجنده GB-SAR باند W و در دو مدل جابه‌جایی خطی و پله‌ای مورد ارزیابی قرار می‌گیرد.

روش تحقیق

همان‌طور که گفته شد، هدف این پژوهش، ارزیابی روش رفع ابهام فاز زمانی- مکانی در پایش جابجایی با استفاده از سنجنده GBSAR باند W است. روش تحقیق از دو بخش اخذ داده‌ها و ارزیابی عملکرد روش رفع ابهام فاز در پایش جابجایی تشکیل‌شده است. الگوریتم موردبررسی بر پایه یک ساختار چندمرحله‌ای استوار است که جزئیات ریاضی و نحوه پیاده‌سازی گام‌به‌گام آن در ادامه تشریح شده است. ساختار مفهومی و روند اجرای این روش به‌صورت خلاصه در فلوچارت شکل ۱ نشان داده‌شده است.

اخذ داده‌ها

به‌منظور ارزیابی روش پیشنهادی، داده‌های سری زمانی جابه‌جایی با استفاده از یک سامانه رادار با روزنه مصنوعی زمینی (GBSAR) مجهز به سنجنده AWR1642 در باند فرکانسی W اخذشده‌اند. این سنجنده قابلیت تصویربرداری در محدوده فرکانسی ۷۶ تا ۸۱ گیگاهرتز با طول‌موج حدود ۴ میلی‌متر را دارد. مشخصات سنجنده GBSAR در جدول ۱ آمده است.

جدول ۱: مشخصات سنجنده GBSAR باند W

Table 1) Specifications of the W-band GBSAR sensor.

پارامترهای سنجنده راداری Parameters of Radar Sensor	مقادیر Experiments
مدل سنجنده راداری Radars sensor model	TI-AWR1642BOOST
نوع سیگنال Signal type	Linear FMCW
فرکانس حامل Carrier frequency	76-81 GHz
پهنای باند سیگنال Signal bandwidth	4 GHz
تعداد آنتن‌های فرستنده Number of transmitters	2
تعداد آنتن‌های گیرنده Number of receivers	4

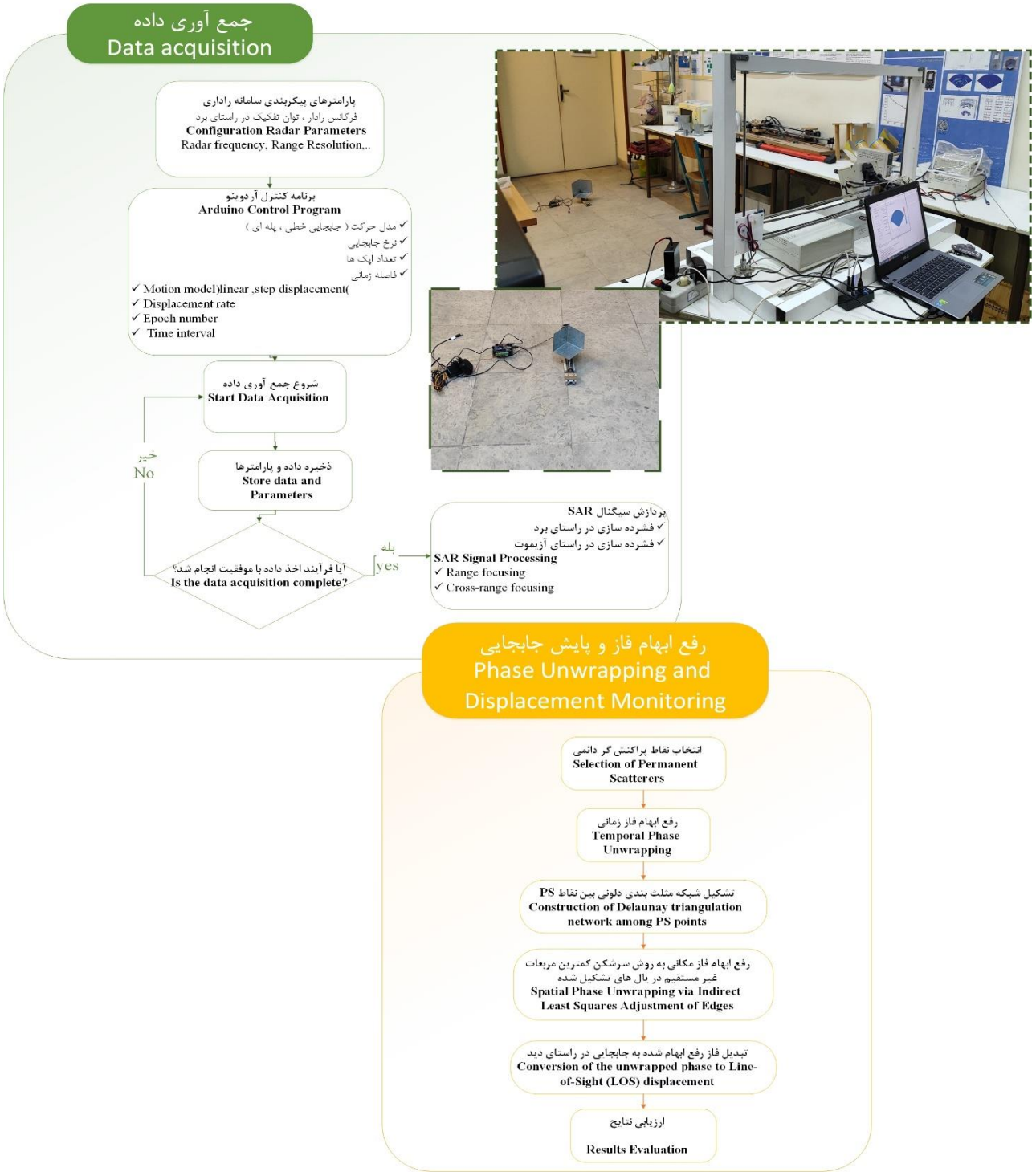
برای ایجاد جابه‌جایی‌های کنترل‌شده و ارائه یک مرجع جابه‌جایی دقیق، یک سامانه مکانیکی متشکل از یک ریل خطی، یک موتور و یک برد آردوینو طراحی و پیاده‌سازی شد. در این سامانه، هدف روی ریل نصب‌شده و حرکت آن توسط موتور کنترل می‌شود. همچنین برنامه کنترلی پیاده‌سازی شده روی برد آردوینو امکان تعریف مدل جابه‌جایی، نرخ جابه‌جایی، فاصله زمانی بین اندازه‌گیری‌ها و تعداد اپک‌ها را فراهم می‌کند. در هر اپک، موتور هدف را به یک موقعیت از پیش تعریف‌شده منتقل کرده و پس از تثبیت موقعیت، داده‌های راداری توسط سامانه GBSARثبت می‌شوند. فاصله زمانی بین دو اندازه‌گیری متوالی ۲ دقیقه تنظیم شد و فاصله بین هدف و سنجنده ۲۰۰ سانتی‌متر در نظر گرفته شد.

بنابراین، در این پژوهش، دو مدل جابه‌جایی شامل الگوهای خطی و پله‌ای با استفاده از سنجنده GBSAR موردبررسی قرار گرفتند. در سناریوی جابه‌جایی خطی، هدف با گام ثابت ۰/۵ میلی‌متر در هر اپک ، طی ۷۰ اپک جابه‌جا شد تا روند جابه‌جایی یکنواخت ایجاد شود. در سناریوی جابه‌جایی پله‌ای، هدف در ابتدا با گام ثابت ۱.۰ میلی‌متر در هر اپک حرکت کرد و پس از ۱۸ اپک، یک جابه‌جایی ناگهانی به مقدار ۰/۷ میلی‌متر در مسیر حرکت اعمال شد.

رفع ابهام فاز زمانی

اصل پایه روش رفع ابهام فاز یک‌بعدی که توسط ایتوه پیشنهادشده به شرح زیر است: برایm دنباله گسسته فاز پیچیده شده$[\phi_1^w, \phi_2^w, \dots, \phi_n^w]$ ، فاز تداخلی رفع ابهام شده $\varphi_{1,k} = \phi_1 - \phi_k$ را می‌توان از طریق جمع اختلاف‌فازهای حاصل از تصاویر راداری مختلط تک نگاه (SLC) که در زمان‌های مختلف به‌دست‌آمده‌اند ، به‌صورت رابطه ۱ محاسبه کرد:

$$\begin{aligned}\varphi_{1,k} = \phi_1^w - \phi_2^w - 2\pi n_{12} + \phi_2^w - \phi_3^w - 2\pi n_{23} + \cdots + \phi_{k-1}^w \\ - \phi_k^w - 2\pi n_{k-1,k} \\ = \phi_1^w - \phi_k^w \\ - 2\pi\left(n_{12} + n_{23} + \cdots + n_{k-1,k}\right), (k \\ = 1,2, \dots, m)\end{aligned} \quad (۱)$$



شکل ۱: روند کلی پژوهش

Fig. 1: General research workflow

از رابطه بالا مشخص است که به شرطی که عدد صحیح ابهام فاز $n_{k-1,k}$ بین دو تصویر متوالی در زمان صفر باشد ، فاز تداخلی رفع ابهام شده φ_k در هر زمان قابل‌محاسبه است. درواقع، در هنگام اخذ داده‌های راداری، اگر نرخ نمونه‌برداری زمانی به‌اندازه کافی بالا باشد تا از وقوع لغزش چرخه فاز (phase cycle slip) جلوگیری شود، می‌توان رفع ابهام فاز را به‌درستی انجام داد. به‌عبارت‌دیگر، اگر نرخ نمونه‌برداری معیار نایکوئیست را برآورده کند، اختلاف‌فاز بین تصاویر متوالی بدون ابهام قابل‌محاسبه خواهد بود و فاز تداخلی مطابق رابطه (۲) محاسبه می‌شود[۵]:

$$\varphi_{k-1,k} = \phi_{k-1}^{w} - \phi_{k}^{w} - 2\pi n_{k-1,k} = \phi_{k-1}^{w} - \phi_{k}^{w} \quad (۲)$$

رفع ابهام فاز مکانی

پس از مرحله رفع ابهام فاز زمانی، ممکن است ناپیوستگی‌هایی در اختلاف فاز مکانی بین نقاط پراکنش گر دائمی (PS) مشاهده شود. برای رفع این ناپیوستگی‌ها و دست‌یابی به فاز رفع ابهام شده با پیوستگی مکانی–زمانی، اعمال الگوریتم‌های رفع ابهام فاز مکانی ضروری است. اگرچه روش‌های گوناگونی برای رفع ابهام فاز دوبعدی وجود دارد، اما هریک در پیاده‌سازی عملی با محدودیت‌هایی مواجه‌اند. در این پژوهش، به‌منظور دستیابی به نتایجی با دقت بالا، از روش سرشکنی به روش کمترین مربعات غیرمستقیم استفاده‌شده است.

در این چارچوب، چنانچه فاز حاصل از مرحله زمانی برای مجموعه نقاط PSبه‌صورت $\varphi_1^\omega, \varphi_2^\omega, \dots, \varphi_N^\omega$ تعریف شود و اختلاف فاز بین دو نقطه مجاور روی M یال شبکه مثلث‌بندی برابر با φ_{ij}^ω باشد، رابطه ۳ میان آن‌ها برقرار خواهد بود:

$$\varphi_{ij}^\omega = \varphi_j^\omega - \varphi_i^\omega \qquad (۳)$$

رویکرد سرشکنی به روش کمترین مربعات غیرمستقیم به دلیل ساختار ریاضی منسجم و امکان ارزیابی خطاها، گزینه مناسبی برای این فرایند است. مبنای کار بر کمینه‌سازی اختلاف میان تفاضل فاز مشاهده‌شده در نقاط مجاور و تفاضل فاز برآورد شده استوار است تا از این طریق، فاز رفع ابهام‌شده هر نقطه محاسبه شود.

مدل‌سازی ریاضی و معادلات خطا

برای پیاده‌سازی الگوریتم در داده‌های رادار زمینی (GBSAR) برای پایش جابه‌جایی سطح موردمطالعه، ابتدا بر اساس الگوی مثلث‌بندی دلونی (Delaunay)، یک شبکه ارتباطی میان نقاط PS تشکیل می‌شود. اگر N نقطه PS در تصویر موجود باشد، M اتصال (یال) ایجادشده و به همین تعداد، مشاهدات اختلاف فاز به دست می‌آید.

با فرض انتخاب فازهای رفع ابهام شده در هر نقطه به‌عنوان مجهولات اصلی (Nپارامتر مستقل)، معادله خطای مربوط به هر اتصال i,j به‌صورت رابطه ۴ نوشته می‌شود:

$$\upsilon_{i,j} = (\varphi_j - \varphi_i) - \varphi_{ij}^\omega \qquad (۴)$$

با تعمیم این روابط برای تمامی M یال موجود در شبکه، دستگاه معادلات خطا به شکل ماتریسی رابطه ۵ بازنویسی می‌شود:

$$V = A\phi - L \qquad (۵)$$

که در رابطه ۵ $V_{M\times1}$ بردار باقی‌مانده‌ها ، $A_{M\times N}$ ماتریس ضرایب شبکه‌ی مثلث‌بندی ، $\phi_{N\times1}$ بردار مجهولات ، شامل فازهای رفع ابهام شده نهایی در نقاط PS و $L_{M\times1}$ بردار مشاهدات (اختلاف فاز روی یال‌ها) است.

حل معادله و ماتریس وزن

برای پیاده‌سازی دوبعدی الگوریتم، مختصات مکانی نقاط در دو جهت x و y برای تشکیل شبکه مثلث‌بندی مورداستفاده قرار می‌گیرند. طبق معیار حداقل مربعات، شرط کمینه‌سازی تابع هدف $(V^TPV = min)$ منجر به تشکیل معادلات نرمال (رابطه ۶) می‌شود:

$$A^TPA\Phi - A^TPL = 0 \qquad (۶)$$

که در این معادله، $P_{M\times M}$ ماتریس وزن مشاهدات است. با فرض استقلال آماری مشاهدات اختلاف فاز، عناصر غیر قطری ماتریس P صفر در نظر گرفته‌شده و عناصر روی قطر اصلی (p_{ij}) به‌صورت عکس فاصله هندسی بین دونقطه (D_{ij}) تعریف می‌شوند:(رابطه ۷)

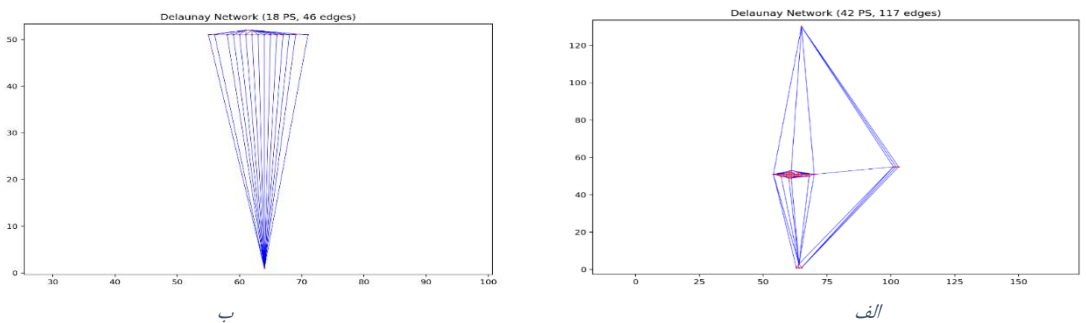
$$p_{ij} = \frac{1}{D_{ij}} \qquad (۷)$$

درنهایت، با حل معادلات نرمال رابطه ۶ ، مقادیر فاز رفع ابهام شده در نقاط PS مطابق رابطه (۸) به دست می‌آیند (رابطه ۸)[۲۲]:

$$\Phi = (A^TPA)^{-1}A^TPL \qquad (۸)$$

نتایج و بحث

به‌منظور ارزیابی عملکرد روش پیشنهادی رفع ابهام فاز، آزمایش‌ها در دو سناریوی جابه‌جایی شامل مدل خطی و مدل پله‌ای انجام شد. در هر دو سناریو، عملکرد دو رویکرد شامل رفع ابهام فاز زمانی و روش ترکیبی زمانی–مکانی مورد مقایسه قرار گرفت. معیارهای ارزیابی شامل مقدار جابه‌جایی نهایی، ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) و زمان پردازش بود. در روش ترکیبی، پس از رفع ابهام فاز در راستای زمان، ارتباط مکانی میان نقاط پراکنش گر دائمی با استفاده از شبکه مثلث‌بندی دلونی برقرار و مسئله رفع ابهام فاز مکانی با روش کمترین مربعات حل شد (شکل ۲).



ب الف

شکل ۲: شبکه مثلث‌بندی دلونی:الف) مدل جابجایی خطی ب) مدل جابجایی پله‌ای

Fig. 2: Delaunay triangulation network: (a) linear displacement model, (b) step-like displacement model

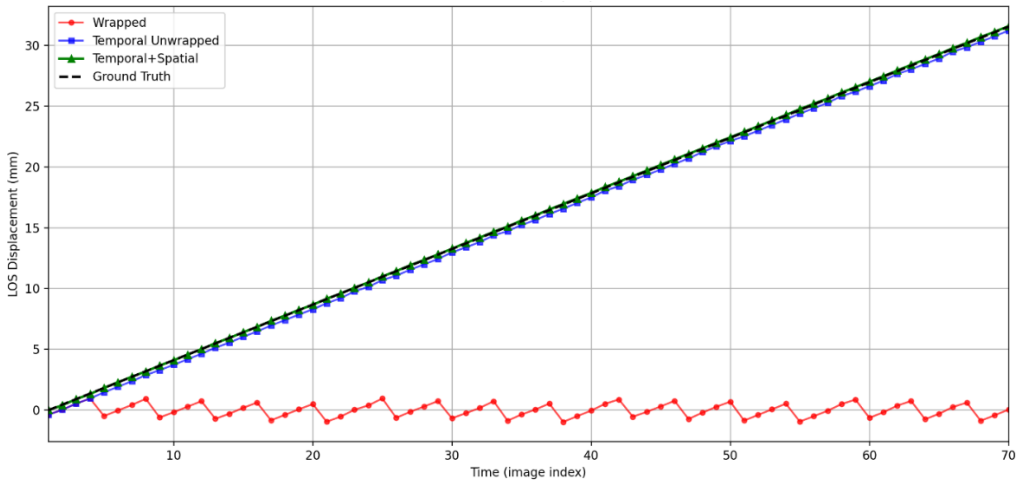
مطابق با نتایج حاصل از پردازش ۴۲ نقطه پراکنش گر دائمی (PS) در سناریوی جابه‌جایی خطی (ارائه‌شده در شکل ۳ و جدول ۲)، عملکرد دو روش زمانی و ترکیبی زمانی–مکانی به‌صورت کمی مقایسه شد. در برآورد جابه‌جایی نهایی، روش زمانی مقدار ۳۱/۲ میلی‌متر و روش ترکیبی مقدار ۳۱/۵۶۳ میلی‌متر را ارائه داد که مقدار حاصل از روش ترکیبی نسبت به مقدار مرجع ۳۱/۵۱۷ میلی‌متر، تطابق بیشتری دارد و نشان‌دهنده نقش مؤثر قید مکانی در اصلاح برآورد اولیه است. ارزیابی بر اساس معیار RMSE نیز برتری روش ترکیبی را تأیید می‌کند؛ این شاخص از ۰/۳۳۱۷ میلی‌متر در روش زمانی به ۰/۰۴۰۶ میلی‌متر در روش ترکیبی کاهش یافت که معادل کاهشی حدود ۸۷/۸ درصدی است. این بهبود چشمگیر، کارایی اطلاعات مکانی را در تعدیل خطاهای باقی‌مانده از مرحله رفع ابهام زمانی نشان می‌دهد.

بررسی سری زمانی جابه‌جایی نقطه مرجع نیز گویای همین نتیجه است؛ منحنی روش ترکیبی انطباق بیشتری با روند مرجع دارد، درحالی‌که منحنی روش زمانی انحراف بیشتری نسبت به آن نشان می‌دهد. هرچند زمان پردازش در روش ترکیبی به ۰/۰۱۳۲ ثانیه در مقایسه با ۰/۰۰۰۵ ثانیه در روش زمانی افزایش یافت که ناشی از تشکیل شبکه مثلث‌بندی و حل دستگاه کمترین مربعات است، اما کاهش چشمگیر RMSE نشان می‌دهد که این افزایش زمان پردازش با بهبود قابل‌توجه دقت همراه بوده است.

به‌منظور ارزیابی کارایی روش در مواجهه با تغییرات غیرخطی و ناپیوسته، سناریوی جابه‌جایی پله‌ای با استفاده از ۱۸ نقطه PS موردبررسی قرار گرفت (شکل ۴). در این مدل، جابه‌جایی پایه با گام ۰/۱ میلی‌متر روندی افزایشی داشته و پس از اپک هجدهم، پرشی به میزان ۰/۷ میلی‌متر به آن اعمال شد. مقدار جابه‌جایی نهایی مرجع در راستای خط دید طی ۳۳ اپک برابر با ۳/۵۶۳ میلی‌متر بود. نتایج نشان داد که روش زمانی، جابه‌جایی نهایی را برابر با ۳/۸۳۶ میلی‌متر برآورد کرده، درحالی‌که روش ترکیبی این مقدار را به ۳/۷۴۸ میلی‌متر کاهش داد. با در نظر گرفتن مقدار مرجع محاسبه‌شده در راستای خط دید، یعنی ۳/۵۶۳ میلی‌متر، خروجی روش ترکیبی انطباق بیشتری با مقدار مرجع نشان داد که بیانگر تأثیر مثبت قید مکانی بر دقت برآورد جابه‌جایی در حضور تغییرات ناگهانی است.

بررسی معیار RMSE نیز مؤید این برتری است؛ این شاخص از ۰/۱۴۳۲ میلی‌متر در روش زمانی به ۰/۱۲۰۳ میلی‌متر در روش ترکیبی کاهش یافت که معادل کاهشی حدود ۱۶ درصدی است. هرچند میزان این بهبود نسبت به سناریوی خطی، کمتر است، اما در هر دو سناریو، روش ترکیبی خطای کمتری نسبت به روش زمانی نشان داد. این تفاوت در میزان بهبود را می‌توان تا حدودی به ماهیت ناپیوسته مدل پله‌ای نسبت داد؛ وجود پرش ناگهانی، حفظ پیوستگی فاز را با دشواری بیشتری همراه می‌سازد و اگرچه رفع ابهام فاز مکانی قادر به تعدیل بخشی از خطاهای باقی‌مانده است، اما میزان بهبود حاصل از آن در مقایسه با مدل خطی کمتر است. نمودار سری زمانی مرتبط با این سناریو نیز نشان می‌دهد که روش ترکیبی، ضمن بازسازی روند کلی افزایشی، تغییر ناگهانی اعمال‌شده را نیز بازسازی کرده است. از نظر زمان پردازش، روش زمانی به ۰/۰۰۰۴ ثانیه و روش ترکیبی به ۰/۰۰۵۱ ثانیه نیاز داشت. بنابراین، اگرچه روش ترکیبی زمان پردازش بیشتری داشت، این افزایش با کاهش RMSE و بهبود دقت برآورد جابه‌جایی همراه بود.

بنابراین، به‌طورکلی، مقایسه نتایج دو سناریو نشان می‌دهد که روش زمانی–مکانی در هر دو مدل جابه‌جایی، عملکرد دقیق‌تری نسبت به روش زمانی دارد. همچنین روش مذکور، با وجود افزایش زمان پردازش نسبت به روش زمانی، زمان محاسباتی کوتاهی در آزمایش‌های انجام‌شده داشته است. این ویژگی می‌تواند ظرفیت استفاده از آن را در کاربردهای پایش تغییرشکل با نیاز به پردازش سریع نشان دهد.



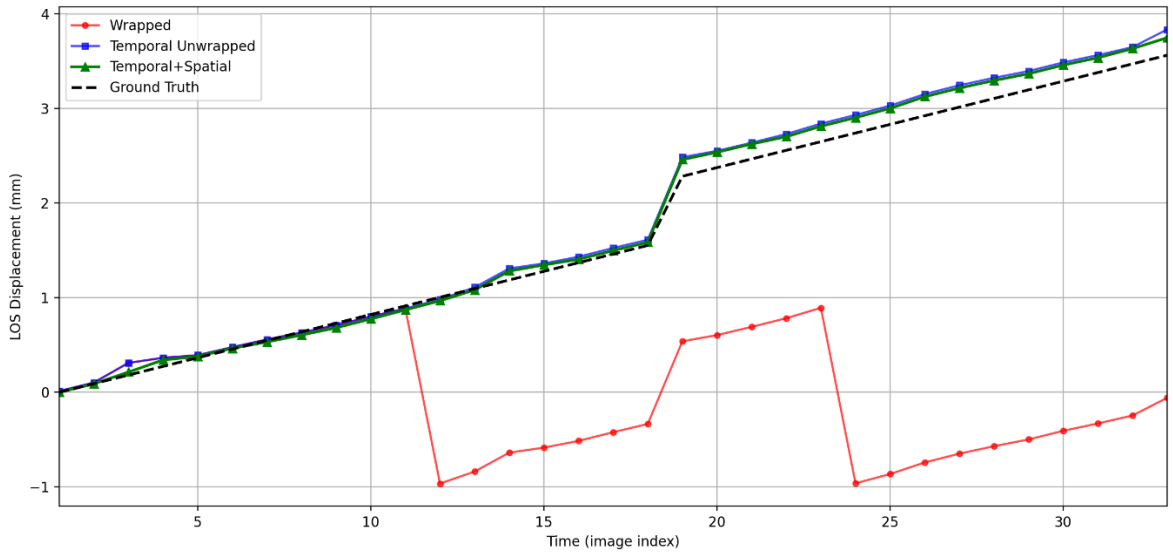
شکل ۳: مقایسه سری زمانی جابه‌جایی در راستای خط دید در سناریوی خطی: منحنی‌های قرمز، آبی، سبز و مشکی به ترتیب نشان‌دهنده جابه‌جایی حاصل از فاز دارای ابهام، روش رفع ابهام فاز زمانی، روش ترکیبی زمانی–مکانی و جابه‌جایی مرجع هستند.

Fig.3: Comparison of line-of-sight (LOS) displacement time series in the linear scenario: the red, blue, green, and black curves represent the displacement derived from the wrapped phase, the temporal phase unwrapping method, the combined temporal–spatial phase unwrapping method, and the reference displacement, respectively.

جدول ۲: مقایسه معیارهای کمی دقت و زمان پردازش

Table 2: Comparison of quantitative accuracy metrics and processing time.

مدل جابجایی Displacement model	خطی linear		پله‌ای Step-like	
روش رفع ابهام فاز Phase unwrapping method	زمانی temporal	زمانی- مکانی Temporal-Spatial	زمانی temporal	زمانی- مکانی Temporal-Spatial
جابجایی نهایی (میلی‌متر) Final displacement(mm)	۳۱/۲	۳۱/۵۶۳	۳/۸۳۶	۳/۷۴۸
RMSE (mm)	۰/۳۳۱۷	۰/۰۴۰۶	۰/۱۴۳۲	۰/۱۲۰۳
زمان پردازش (ثانیه) Processing time(s)	۰/۰۰۰۵	۰/۰۱۳۲	۰/۰۰۰۴	۰/۰۰۵۱



شکل ۴: مقایسه‌ی سری زمانی جابجایی در راستای خط دید در سناریوی پله‌ای: منحنی‌های قرمز، آبی، سبز و مشکی به ترتیب نشان‌دهنده جابه‌جایی حاصل از فاز دارای ابهام، روش رفع ابهام فاز زمانی، روش ترکیبی زمانی-مکانی و جابه‌جایی مرجع هستند.

Fig. 4: Comparison of the time-series displacement along the Line-of-Sight (LOS) in the step-like scenario: the red, blue, green, and black curves represent the displacement derived from the wrapped phase, the temporal phase unwrapping method, the combined temporal–spatial phase unwrapping method, and the reference displacement, respectively.

نتیجه‌گیری

در این پژوهش، عملکرد یک رویکرد ترکیبی برای رفع ابهام فاز و برآورد جابه‌جایی در داده‌های GBSAR مورد بررسی قرار گرفت. روش پیشنهادی با بهره‌گیری همزمان از اطلاعات زمانی و مکانی، شامل رفع ابهام فاز زمانی، تشکیل شبکه مثلث‌بندی دلونی و رفع ابهام فاز مکانی مبتنی بر روش کمترین مربعات است. هدف اصلی این پژوهش، کاهش خطاهای باقی‌مانده در فرایند رفع ابهام زمانی و افزایش دقت برآورد جابه‌جایی در راستای خط دید (LOS) بود. برای ارزیابی عملکرد روش، دو سناریوی جابه‌جایی خطی و پله‌ای مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که روش زمانی–مکانی در هر دو سناریو نسبت به روش زمانی به‌تنهایی، مقدار RMSE کمتری دارد. در مدل خطی، RMSE از ۰/۳۳۱۷ میلی‌متر در روش زمانی به ۰/۰۴۰۶ میلی‌متر در روش پیشنهادی کاهش یافت که بیانگر کاهش حدود ۸۷/۸ درصدی خطا است. در مدل پله‌ای نیز RMSE از ۰/۱۴۳۲ به ۰/۱۲۰۳ میلی‌متر کاهش یافت. این نتایج نشان می‌دهد که استفاده از اطلاعات مکانی نقاط PS می‌تواند مکمل اطلاعات زمانی بوده و موجب افزایش دقت برآورد جابه‌جایی شود.

یکی از نتایج مهم پژوهش، عملکرد روش پیشنهادی در مواجهه با تغییرات ناگهانی جابه‌جایی است. در مدل پله‌ای، باوجود ایجاد پرش در سری زمانی جابه‌جایی، روش ترکیبی توانست مقدار نهایی جابه‌جایی در راستای خط دید را برابر با ۳/۷۴۸ میلی‌متر برآورد کند که در مقایسه با مقدار مرجع ۳/۵۶۳ میلی‌متر، نسبت به روش زمانی انطباق بیشتری دارد. این نتیجه نشان می‌دهد که استفاده از قید مکانی می‌تواند بخشی از خطاهای باقی‌مانده پس از رفع ابهام زمانی را تعدیل کند. ازنظر محاسباتی، استفاده از رفع ابهام فاز مکانی موجب افزایش زمان پردازش شد. بااین‌حال، این افزایش زمان با کاهش خطای برآورد، به‌ویژه در سناریوی خطی، همراه بود. بنابراین، در کاربردهایی که دقت برآورد جابه‌جایی اهمیت بیشتری نسبت به سرعت پردازش دارد، استفاده از روش ترکیبی می‌تواند گزینه مناسب‌تری باشد همچنین، به‌منظور افزایش کارایی محاسباتی روش، می‌توان بهینه‌سازی فرایند تشکیل شبکه مثلث‌بندی دلونی و حل دستگاه معادلات کمترین مربعات را در پژوهش‌های آینده مورد بررسی قرار داد.

در مجموع، یافته‌های این پژوهش نشان داد که ترکیب اطلاعات زمانی و مکانی در فرایند رفع ابهام فاز می‌تواند دقت برآورد جابه‌جایی در

داده‌های GBSAR را افزایش دهد. این بهبود به‌ویژه در سناریوی جابه‌جایی خطی قابل‌توجه بود، درحالی‌که در سناریوی پله‌ای نیز روش ترکیبی خطای کمتری نسبت به روش زمانی داشت. ازاین‌رو، استفاده از رویکرد زمانی–مکانی می‌تواند به‌عنوان راهکاری مؤثر برای بهبود دقت استخراج جابه‌جایی از داده‌های GBSAR در نظر گرفته شود. پیشنهاد می‌شود در پژوهش‌های آینده، عملکرد این روش در سناریوهای جابه‌جایی غیرخطی و پیچیده‌تر و همچنین تأثیر تعداد و توزیع مکانی نقاط پراکنش گر دائمی بر دقت برآورد جابه‌جایی بررسی شود.

مشارکت نویسندگان

نویسنده اول در طراحی و اجرای پژوهش، جمع‌آوری و پردازش داده‌ها، تحلیل نتایج و نگارش اولیه مقاله نقش داشته است. نویسنده دوم در هدایت علمی پژوهش، نظارت بر مراحل انجام تحقیق و بررسی و بازبینی علمی مقاله مشارکت داشته است. تمامی نویسندگان نسخه نهایی مقاله را مطالعه و تأیید کرده‌اند.

تشکر و قدردانی

بدین‌وسیله از کلیه عزیزانی که ما را در انجام این تحقیق یاری کردند، صمیمانه تشکر می‌کنیم.

تعارض منافع

«هیچ‌گونه تعارض منافع توسط نویسندگان بیان‌نشده است.»

منابع و مآخذ

[1] Monserrat, O., et al., *A review of ground-based SAR interferometry for deformation measurement.* 2014. 93: p. 40-48. https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2014.04.001

[2] Ghiglia, D.C.J.A. and Software, *Two-dimentional phase unwrapping: Theory.* 1998.

[3] Crosetto, M., et al., *Spaceborne Differential SAR Interferometry: Data Analysis Tools for Deformation Measurement.* 2011. 3(2): p. 305-318. https://doi.org/10.3390/rs3020305

[4] Huntley, J.M. and H.J.A.o. Saldner, *Temporal phase-unwrapping algorithm for automated interferogram analysis.* 1993. 32(17): p. 3047-3052. https://doi.org/10.1364/AO.32.003047

[5] Itoh, K.J.A.o., *Analysis of the phase unwrapping algorithm.* 1982. 21(14): p. 2470-2470. https://doi.org/10.1364/AO.21.002470

[6] Tribolet, J.J.I.T.o.A., Speech, and S. Processing, *A new phase unwrapping algorithm.* 1977. 25(2): p. 170-177. https://doi.org/10.1109/TASSP.1977.1162923

[7] Helmy, I., et al., *Dextractor: deformation extractor framework for monitoring-based ground radar.* 2024. 16(16): p. 2926. https://doi.org/10.3390/rs16162926

[8] Goldstein, R.M., H.A. Zebker, and C.L.J.R.s. Werner, *Satellite radar interferometry: Two-dimensional phase unwrapping.* 1988. 23(4): p. 713-720. https://doi.org/10.1029/RS023i004p00713

[9] Flynn, T.J.J.J.o.t.O.S.o.A.A., *Two-dimensional phase unwrapping with minimum weighted discontinuity.* 1997. 14(10): p. 2692-2701. https://doi.org/10.1364/JOSAA.14.002692

[10] Costantini, M.J.I.T.o.g. and r. sensing, *A novel phase unwrapping method based on network programming.* 1998. 36(3): p. 813-821. https://doi.org/10.1109/36.673674

[11] Costantini, M., *A Three-dimensional Phase Unwrapping Algorithm for Processing of Multitemporal SAR Interferometric Measurements M. Costantini," F. Malvarosa," F. Minati," L. Pietranera," and G. Milillo.* 2002. https://doi.org/10.1109/IGARSS.2002.1026239

[12] Hooper, A. and H.A.J.J.o.t.O.S.o.A.A. Zebker, *Phase unwrapping in three dimensions with application to InSAR time series.* 2007. 24(9): p. 2737-2747. https://doi.org/10.1364/JOSAA.24.002737

[13] Huntley, J.M.J.A.O., *Three-dimensional noise-immune phase unwrapping algorithm.* 2001. 40(23): p. 3901-3908. https://doi.org/10.1364/AO.40.003901

[14] Rebmeister, M., et al., *Comparison and Evaluation of Different Approaches for Efficient Processing of Long Ground-Based SAR Times Series.* 2022. 43: p. 341-348. https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLIII-B3-2022-341-2022

[15] Luo, Y., et al., *Arc FMCW SAR and applications in ground monitoring.* 2014. 52(9): p. 5989-5998. https://doi.org/10.1109/TGRS.2014.2325905

[16] Zhou, X., et al. *Application Research of Extracting Slope DEM Data by GB-SAR*. in *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2019. IOP Publishing. https://doi.org/10.1088/1757-899X/490/7/072016

[17] Zengshu, H., et al. *Ground-based SAR multistage mountain slope interferometric phase unwrapping*. in *2015 IEEE 5th Asia-Pacific Conference on Synthetic Aperture Radar (APSAR)*. 2015. IEEE. https://doi.org/10.1109/APSAR.2015.7306148

[18] Xiang, X., et al., *A real-time processing method for GB-SAR monitoring data by using the dynamic Kalman filter based on the PS network.* 2023. 20(8): p. 1639-1655. https://doi.org/10.1007/s10346-023-02057-z

[19] Wang, P., C. Xing, and X.J.S. Pan, *Reservoir dam surface deformation monitoring by differential GB-InSAR based on image subsets.* 2020. 20(2): p. 396. https://doi.org/10.3390/s20020396

[20] Mohammadi, M., et al., *Interferometric Phase Unwrapping for W-Band GBSAR: Experiments on Simulated Signal.* 2026. 10: p. 525-531. https://doi.org/10.5194/isprs-annals-X-4-W8-2025-525-2026

[21] Wang, Z., et al., *A new processing chain for real-time ground-based SAR (RT-GBSAR) deformation monitoring.* 2019. 11(20): p. 2437. https://doi.org/10.3390/rs11202437

[22] Xiang, X., et al., *An improved method of GB-SAR phase unwrapping for landslide monitoring.* 2022. 10: p. 973320. https://doi.org/10.3389/feart.2022.973320

معرفی نویسندگان

AUTHOR(S) BIOSKETCHES



مینا محمدی دانشجوی دکتری مهندسی نقشه‌برداری، گرایش سنجش از دور، در دانشکده مهندسی نقشه‌برداری و اطلاعات مکانی دانشگاه تهران است. زمینه‌های پژوهشی وی شامل آشکارسازی و پایش تغییرات، شناسایی و پایش مخاطرات طبیعی، پردازش و تحلیل داده‌های رادار با روزنه مصنوعی زمینی (GBSAR) و تداخل‌سنجی راداری (InSAR) به‌منظور پایش جابه‌جایی و تغییرشکل‌های سطح زمین با استفاده از داده‌های راداری ماهواره‌ای و زمینی است.

Mohammadi,M. PhD. candidate of Remote sensing, School of Surveying and Geospatial Engineering, College of Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran

minamohammadi@ut.ac.ir



جلال امینی استاد حوزه سنجش از دور مایکروویو در دانشکده مهندسی نقشه‌برداری و اطلاعات مکانی دانشگاه تهران است. وی همچنین مدیریت آزمایشگاه سنجش از دور مایکروویو (MReSL) این دانشگاه را بر عهده دارد. زمینه‌های اصلی فعالیت‌های علمی و پژوهشی ایشان شامل پردازش سیگنال رادار با روزنه مصنوعی(SAR) ، تحلیل تصاویر راداری پلاریمتریک و کاربردهای آن، و طراحی و توسعه سامانه‌های رادار با روزنه مصنوعی زمینی(GBSAR) است.ایشان علاوه بر فعالیت‌های آموزشی و پژوهشی، به‌عنوان سردبیر نشریه علمی مهندسی مشاهده زمین و ژئوماتیک (Earth Observation and Geomatics Engineering – EOGE) نیز فعالیت می‌کند.

Amini,J. Professor, School of Surveying and Geospatial Engineering, College of Engineering, University of Tehran, Tehran ,Iran

jamini@ut.ac.ir

Citation (Vancouver): Mohammadi M, Amini J. [Displacement Evaluation in a W-band Ground-Based Synthetic Aperture Radar Sensor Using a Temporal–Spatial Phase Unwrapping Method]. *J. RS. GEOINF. RES. 2026; 4(2): 335-344*

https://doi.org/10.22061/jrsgr.2026.113557.1141

COPYRIGHTS

© 2026 The Author(s). This is an open-access article distributed under the terms and conditions of the Creative Attribution-NonCommercial 4.0 International (CC BY-NC 4.0)
(https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/)