



Evaluation of Small Displacements in SAR Interferometric Images Based on Stable Point Detection Using Coherence and Amplitude Dispersion Criteria

P.Yazdani¹ , A.Moftakharzadeh² *, T.Gholipour³ , Sepideh Sadat Shams⁴ , Ali Akbar Rahimfard⁵ , H. Saeedi Sourak⁶ , Hadi Safdarkhani⁷ , Mohammad Zoofaghari⁸

*Assistant professor, Yazd university, Yazd, Iran

(Received: 2024/04/06, Revised: 2024/07/16, Accepted: 2024/08/03, Published: 2024/08/31)

DOR:

ABSTRACT

Detecting displacement using radar is crucial for monitoring the stability of natural phenomena, such as mountain slopes, and artificial structures, like dams and open-pit mine walls, to prevent financial and human risks. Identifying highly stable reference points with minimal displacement is crucial for accurate displacement detection. This identification relies on coherence and amplitude dispersion criteria applied to radar images, making the image formation method a key factor in determining stable points.

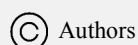
This paper compares the effectiveness of two Synthetic Aperture Radar (SAR) imaging methods—the Range-Doppler Algorithm (RDA) and the Back Projection Algorithm (BPA)—in identifying stable points based on various criteria. Practical results are presented for a radar site containing discrete targets. Using a coherence threshold of 0.9, the RDA method yielded an average stable point displacement of 0.18 mm, whereas the BPA method achieved approximately 0.09 mm, indicating superior performance of the BPA method in detecting stable points via the coherence criterion. On the other hand, using the amplitude dispersion criterion to identify stable points, the average displacement of stable points was about 0.015 mm and 0.040 mm for the RDA and BPA methods, respectively.

The results of this research can be effective in selecting the appropriate imaging method in Synthetic Aperture Radar for determining millimeter-scale displacements of targets.

Keywords: Synthetic Aperture Radar, Range Doppler Algorithm, Back Projection Algorithm, Stable Point, Coherency, Amplitude Dispersion.

This article is an open-access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license.

Publisher: Imam Hussein University



*Corresponding Author Email: Moftakharzadeh@yazd.ac.ir

علمی - پژوهشی

ارزیابی جابه‌جایی‌های کوچک در تصاویر تداخل سنجی SAR مبتنی بر تعیین نقاط پایدار با

استفاده از معیار همدوسی و پاشندگی دامنه

پریسا یزدانی^۱، علی مفتخرزاده^{۲*}، طیبه قلی پور^۳، سپیده السادات شمس^۴، علی اکبر رحیمی فرد^۵، حمید سعیدی سورک^۶، هادی صفدرخانی^۷، محمد ذوالفقاری^۸

۱ و ۴- کارشناسی ارشد ۲ و ۷- استادیار، ۳- دکتری ۵- دانشجوی دکتری ۶ و ۸- دانشیار دانشگاه یزد، یزد، ایران

(دریافت: ۱۴۰۲/۰۷/۲۶، بازنگری: ۱۴۰۲/۰۹/۱۳، پذیرش: ۱۴۰۲/۱۰/۲۱، انتشار: ۱۴۰۲/۱۱/۰۱)

DOR:



* این مقاله یک مقاله با دسترسی آزاد است که تحت شرایط و ضوابط مجوز Creative Commons Attribution (CC BY) توزیع شده است.

نویسندگان



ناشر: دانشگاه جامع امام حسین (ع)

چکیده

تشخیص جابه‌جایی نقاط با استفاده از رادار در پایش پایداری پدیده‌های طبیعی مثل دامنه کوه و پدیده‌های مصنوعی مانند سدها و دیواره معادن روباز، برای جلوگیری از ضررهای مادی و انسانی اهمیت زیادی دارد. برای تشخیص جابه‌جایی لازم است نقاطی از هدف با پایداری زیاد و جابه‌جایی بسیار کم به عنوان نقاط معیار انتخاب شوند. تشخیص نقاط پایدار با استفاده از معیارهای همدوسی و پاشندگی دامنه بر روی تصاویر راداری به دست آمده، انجام می‌شود. از این روش تشکیل تصاویر می‌تواند در تعیین نقاط پایدار تأثیرگذار باشد. در این مقاله تأثیر دو روش تصویربرداری بُرد - داپلر (RDA) و تصویرسازی معکوس (BPA) در یک رادار دهانه مصنوعی برای تعیین نقاط پایدار با معیارهای مختلف مقایسه شده و نتایج عملی برای یک سایت راداری شامل اهداف گسسته نشان داده شده است. با در نظر گرفتن معیار همدوسی برای تعیین نقاط پایدار با سطح آستانه ۰/۹، میانگین جابه‌جایی نقاط پایدار به دست آمده از روش تصویربرداری بُرد - داپلر ۰/۱۸mm و با روش تصویرسازی معکوس حدود ۰/۰۹mm به دست آمده است. این موضوع نشان می‌دهد که روش تصویرسازی معکوس در تشخیص نقاط پایدار با معیار همدوسی بهتر عمل کرده است. از طرف دیگر، با معیار پاشندگی دامنه در تعیین نقاط پایدار، میانگین جابه‌جایی نقاط پایدار حدود ۰/۱۵mm و ۰/۰۴mm به ترتیب برای روش‌های بُرد - داپلر و تصویرسازی معکوس به دست آمده است. نتایج به دست آمده از این تحقیق می‌تواند در انتخاب روش تصویربرداری مناسب در رادار دهانه مصنوعی برای تعیین جابه‌جایی‌های میلی‌متری اهداف مؤثر باشد.

کلیدواژه‌ها: رادار دهانه مصنوعی، روش بُرد - داپلر، روش تصویرسازی معکوس، نقاط پایدار، همدوسی، پاشندگی

دامنه

۱- مقدمه

زیادی برخورددار است. تغییرات جزئی شیب بخشی از یک دیواره معدن، می‌تواند هشدار برای ریزش آن بخش باشد و رصد مداوم شیب دیواره‌ها می‌تواند در تخلیه زودهنگام برای حفظ سلامتی کارگران و همچنین اقدامات اولیه برای جلوگیری از ضررهای مادی کمک کند امروزه سامانه‌های پوشش‌گر^۲ راداری جابه‌جایی‌های اتفاق افتاده را اندازه‌گیری کرده و به صورت لحظه‌ای گزارش می‌دهند. کند همچنین قابلیت پوشش سطح وسیعی از دیواره در بازه زمانی.

آشکارسازی جابه‌جایی‌های کوچک در کاربردهای مختلفی از جمله آنالیز پایداری سازه و جابه‌جایی زیرساخت‌های بزرگ، بررسی علائم حیاتی انسان، نظارت بر لرزش آتش‌فشان‌ها و حرکت یخچال‌های طبیعی، تخمین زمان ریزش در معادن روباز و غیره مورد استفاده قرار می‌گیرد [۱-۲]. بررسی پایداری شیب دیواره در یک معدن از اهمیت

و پیکسل‌هایی را که در طول زمان به لحاظ فاز، ثابت مانده‌اند به‌منزله نقاط پایدار برمی‌گزینند. هنگامی که در مدت‌زمان تصویربرداری، جابه‌جایی زمین رخ می‌دهد، فاز پیکسل مربوطه متناسب با جابه‌جایی تغییر می‌کند [۱۰]. در معدن Ge-Ting جهت اندازه‌گیری تغییر شکل سطح نشست از روش پردازش تداخل‌سنجی پراکنده گره‌های دائمی استفاده‌شده است و نتایج نشان می‌دهد که حداکثر مقدار نشست ثبت‌شده حدود ۵۸cm در سال است [۱۱]. در این مطالعه تأثیر بارندگی بر نتایج پایش در نظر گرفته نشده است. به‌طور خاص، باران مداوم باعث افزایش نرخ جابه‌جایی مشاهده‌شده با تکیه‌بر پراکنده گره‌های دائمی در فصول بارانی می‌شود، درحالی‌که در فصل خشک، نرخ جابه‌جایی کاهش می‌یابد [۱۱].

تصویر تداخل نما^۹ از حاصل‌ضرب مختلط دو تصویر حاصل از دو پویش دیواره معدن به دست می‌آید. فاز تصویر تداخل نما شامل اطلاعات مربوط به جابه‌جایی هدف است. البته این فاز شامل تغییرات ناخواسته مانند نویز حاصل از تغییرات دمایی در سامانه و خطای اتمسفر نیز است. با به‌کارگیری روش‌های تفکیک‌پذیری بالا^{۱۰} که سبب افزایش سیگنال به نویز می‌شوند، می‌توان نویز فاز را کاهش داد [۱۲]. برای جبران‌سازی خطای فاز و تشخیص جابه‌جایی، لازم است در ابتدا نقاط پایدار که در طول پویش‌های مختلف، نویز فاز پایینی دارند، انتخاب شوند و جابه‌جایی دیواره صرفاً برای این نقاط گزارش شود. معیارهای متفاوتی برای تعیین نقاط پایدار معرفی‌شده است که استفاده از معیار پاشندگی دامنه^{۱۱} و معیار همدوسی^{۱۲} از متداول‌ترین روش‌هاست [۱۶-۱۳]. تشخیص جابه‌جایی، بر اساس اختلاف‌فاز دریافتی در دو زمان مختلف انجام می‌شود. هر چه فرکانس سیگنال بالاتر باشد، اختلاف‌فاز ایجادشده در اثر یک جابه‌جایی ثابت بیشتر خواهد شد و درنتیجه، تخمین جابه‌جایی بهتر انجام می‌شود [۱۲].

در پژوهش قبلی این گروه تحقیقاتی [۱۷]، یک رادار دهانه واقعی برای تصویربرداری از اهداف گسسته و پیوسته ارائه‌شده است و روشی برای افزایش قدرت تفکیک تصاویر با در نظر گرفتن الگوی مختلط برگشتی از هدف نقطه‌ای پیشنهادشده است. بااین‌همه، این مقاله به تعیین نقاط پایدار و بررسی اثر روش تشکیل تصویر در کیفیت نقاط پایدار به‌دست‌آمده، می‌پردازد. هدف از این مقاله، بررسی اثر روش تشکیل تصویر در تعیین نقاط پایدار در یک رادار دهانه مصنوعی زمین پایه پیاده‌شده در دانشگاه یزد است. به همین منظور در این

. کوتاه رادارند. رصد دیواره معدن توسط سیگنال‌های راداری می‌تواند در باران و گردوخاک و در تمام شبانه‌روز انجام شود [۱]. یکی از سامانه‌های تجاری رصد دیواره معدن، سامانه IBIS-L است که توسط شرکت IDS^۱ ساخته‌شده است. این سامانه می‌تواند جابه‌جایی‌های منطقه‌ای را با دقت بالا (۱mm-۰/۰۱mm)، بسته به فاصله و کاربرد تشخیص دهد [۳]. سامانه LiSA مبتنی بر یک تحلیل‌گر شبکه برداری^۲ با ساختار ریلی ۵m نصب‌شده در یک یدک‌کش است. هدف اصلی ساخت این سامانه، تکمیل سایر روش‌های نظارتی در وظایف معمول حفاظت‌های شهری و همچنین حفاظت از میراث فرهنگی است [۴]. سامانه Risk-SAR توسط شرکت UPC توسعه‌یافته است. کل رادار با وزن تنها ۸/۵Kg، بر روی یک واحد حرکت خطی نصب‌شده است تا یک دهانه مصنوعی به طول ۵/۵m بسازد [۵]. در میان سامانه‌های پویش خطی، سامانه FastGB-SAR به کمترین زمان (۵s) برای پردازش و گزارش جابه‌جایی دیواره نیاز دارد، درحالی‌که پردازش در سایر سامانه‌ها چند دقیقه طول می‌کشد [۶]. برای شناسایی اهداف متحرک با استفاده از کاهش زمان جمع‌آوری داده، برخی از محققان رادارهای چند ورودی چند خروجی^۳ را معرفی کردند. این روش در سامانه‌ای به نام MELISSA با ۱۶ فرستنده و ۱۶ گیرنده با دهانه مصنوعی طولانی ۲/۵۶m و زمان پردازش بسیار سریع تقریباً ۱ms به‌کاررفته است [۷]. با استفاده از تصاویر راداری می‌توان مدل دیجیتالی ارتفاع^۴ و یا نقشه جابه‌جایی سطح زمین را تهیه کرد. روشی که برای استخراج این اطلاعات مکانی به کار می‌رود، تحت عنوان تداخل‌سنجی^۵ شناخته می‌شود که در آن، اختلاف‌فاز بین دو یا چند تصویر محاسبه‌شده و این اختلاف‌فاز به جابه‌جایی‌های سطحی نسبت داده می‌شود [۹-۸]. تداخل‌سنجی راداری می‌تواند توسط رادارهای دهانه مصنوعی^۶ و دهانه واقعی^۷ انجام شود. این روش دارای قابلیت اندازه‌گیری تغییرات در حد چند میلی‌متر در تغییر شکل در طول چندین سال است که می‌تواند جهت نظارت بر خطرات طبیعی و پایداری سازه‌ها و پایش دیواره معادن روباز مورد استفاده قرار گیرد [۹-۸]. روش تداخل‌سنجی مبتنی بر روش پراکنده‌گره ای دائمی^۸ را نخستین بار فریتی و همکاران مطرح کردند [۱۰]. این روش پایداری فاز پیکسل‌ها را در مجموعه‌ای از تصاویر تحلیل می‌کند

1 Intrusion Detection System (IDS)

2 Vector Network Analyzer (VNA)

3 Multiple Input-Multiple Output (MIMO)

4 Digital Elevation Model (DEM)

5 Interferometry

6 Synthetic Aperture RADAR (SAR)

7 Real Aperture RADAR (RAR)

8 Permanent Scatterers (PS)

9 Interferogram

10 Super Resolution

11 Amplitude Dispersion

12 Coherency

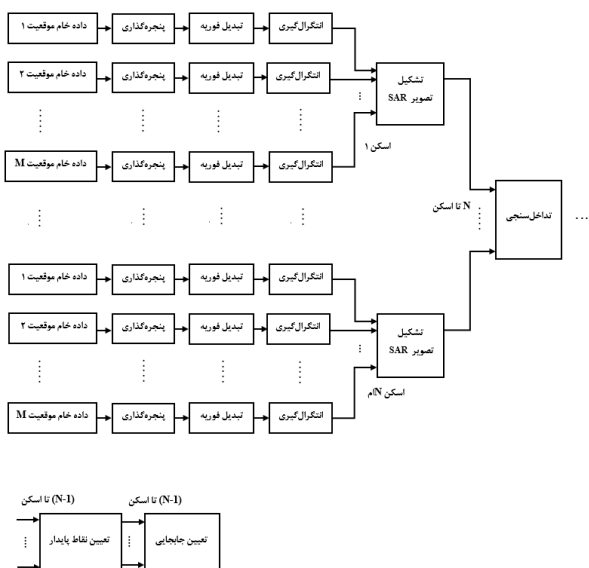
دو سیگنال دریافتی، باید در محدوده $[-\pi, \pi]$ قرار داشته باشد. با اضافه‌شدن نویز و اثر محیط به سیگنال دریافتی، نویزی به فاز سیگنال IF در رابطه (۱) اضافه می‌گردد که به آن نویز فاز می‌گویند. از این‌رو فاز سیگنال دریافتی علاوه بر اثر فاصله هدف، به نویز تجهیزات، تغییرات دمایی طول کابل، عدم همبستگی هندسی و شرایط اتمسفر نیز وابسته است.

بنابراین، در طی عملیات پردازش، در آخرین مرحله، تغییرات فاز نقاط روی دیواره در دو زمان مختلف، با رابطه

$$\varphi_{Measured} = \varphi_{atm} + \varphi_{Geom} + \varphi_{Instr} + \varphi_{disp} \quad (2)$$

بیان می‌شود [۱۹-۲۲]، که در آن، φ_{atm} تغییرات فاز ناشی از تغییرات شرایط اتمسفر را نشان می‌دهد و به تغییرات ضریب شکست ناشی از تغییرات دما و فشار و رطوبت وابسته است [۲۳-۲۴]. عبارت φ_{Geom} سهم عدم همبستگی هندسی است که در رادارهای زمین پایه به پایداری مکانیکی سامانه مربوط می‌شود و معمولاً مقدار ناچیزی دارد. عبارت φ_{disp} اختلاف‌فاز ایجادشده ناشی از جابه‌جایی واقعی هدف است. φ_{Instr} نویز فاز تجهیزات است و به عواملی چون تغییرات دمایی طول کابل و سامانه مکانیکی جابه‌جایی آنتن وابسته است.

در بلوک دیاگرام شکل (۱) مراحل مختلف پردازش موردنیاز بر روی داده‌های خام (تبدیل فوریه داده‌های زمانی در هر موقعیت آنتن) تا تعیین مقدار جابه‌جایی برحسب میلی‌متر نمایش داده‌شده است



شکل (۱). مراحل مختلف پردازش موردنیاز بر روی داده‌های خام.

مقاله، با پوشش ناحیه تصویربرداری که شامل بلوک‌های سیمانی است، تصاویر راداری از روش‌های بُرد - داپلر^۱ و تصویرسازی معکوس^۲ استخراج‌شده‌اند. در مرحله بعد، نقاط پایدار برای پوشش‌های متوالی تعیین‌شده و نتایج آن‌ها مقایسه می‌شوند. در تصاویر به‌دست‌آمده از روش BPA، نقاط پایدار بادقت بیشتر و با نویز فاز کمتری نسبت به روش RDA مشخص می‌شوند. در بخش دوم، روش تداخل‌سنجی راداری و لزوم تشخیص نقاط پایدار ارائه‌شده است. همچنین جزئیات روش‌های RDA و BPA برای یک رادار موج پیوسته مدوله‌شده فرکانس نیز بررسی می‌شوند و مراحل پیاده‌سازی تداخل‌سنجی راداری و روش‌های تعیین نقاط پایدار در تصاویر راداری مرور خواهند شد. در بخش سوم، ابتدا ملاحظات عملی رادار SAR پیاده‌سازی شده توضیح داده می‌شود و سپس نتایج تعیین نقاط پایدار با استفاده از معیارهای مختلف و برای روش‌های مختلف تشکیل تصاویر، برای داده‌های عملی در بخش چهارم ارائه خواهند شد. داده‌های به‌دست‌آمده از این تحقیق در بخش پنجم موردبحث و نتیجه‌گیری قرار خواهد گرفت.

۲- تعیین جابه‌جایی با استفاده از نقاط پایدار

سیگنال $S_{IF}(\tau, \eta)$ در باند پایه در گیرنده، حاصل ضرب سیگنال دریافتی $(S_r(\tau, \eta))$ در مزدوج سیگنال ارسالی $(S_t^*(\tau))$ است و طبق رابطه

$$S_{IF}(\tau, \eta) = S_r(\tau, \eta) \times S_t^*(\tau) = \quad (1)$$

$$e^{-j4\pi f_c \frac{R(\eta)}{c}} \times e^{-j4\pi k_r \frac{R(\eta)\tau}{c}} \times e^{j4\pi k_r \frac{R(\eta)^2}{c^2}} = e^{-j4\pi k_r \frac{R(\eta)\tau}{c}} \times e^{-j4\pi f_c \frac{R(\eta)}{c} + j4\pi k_r \frac{R(\eta)^2}{c^2}}$$

به دست می‌آید [۱۸] که در آن، τ زمان کند، η زمان سریع، c سرعت انتشار موج، k_r نرخ چرپ، f_c فرکانس مرکزی و $R(\eta)$ فاصله آنتن تا هدف است. فرکانس و فاز سیگنال دریافتی به ترتیب برابر $2k_r \frac{R(\eta)}{c}$ و $-4\pi f_c \frac{R(\eta)}{c} + 4\pi k_r \frac{R(\eta)^2}{c^2}$ هست. دیده می‌شود که فرکانس و فاز سیگنال دریافتی به پارامترهای سیستم رادار و فاصله هدف تا آنتن وابسته است. بنابراین با جابجایی جزئی مکان هدف، فاز سیگنال دریافتی تغییر می‌کند، از آنجایی‌که پارامترهای رادار همواره ثابت هستند، می‌توان با اندازه‌گیری تغییرات فاز سیگنال دریافت شده در دو فاصله زمانی مشخص، جابجایی هدف را اندازه گرفت. البته باید توجه نمود که جهت جلوگیری از ابهام، تغییرات فاز ناشی از جابجایی هدف در

1 Range-Doppler Algorithm (RDA)

2 Back Projection Algorithm (BPA)

ناحیه جست‌وجو هستند که $y_{\min} < y < y_{\max}$ و $x_{\min} < x < x_{\max}$ است. در این روش برای فشرده‌سازی در راستای بُرد، از رابطه (۱) نسبت به متغیر τ تبدیل فوریه گرفته می‌شود [۱۸، ۲۹]. سیگنال فشرده‌شده در جهت بُرد طبق رابطه

$$S_{rc}(f_{\tau}, \eta) = F_{\tau}(S_{IF}(\tau, \eta)) \quad (۴)$$

حاصل می‌شود که در آن F_{τ} تبدیل فوریه نسبت به پارامتر τ را نشان می‌دهد [۱۸، ۲۹]. حرکت سکو باعث می‌شود، بُرد دیده‌شده توسط هر آنتن از هدف با توجه به فاصله فیثاغورثی متفاوت باشد و برای هر موقعیت آنتن، مهاجرت بُردی^۵ نسبت به بُرد واقعی رخ دهد. بنابراین، با تصحیح مهاجرت سلولی بُرد (RCMC)، میزان جابه‌جایی هر سطر به‌طور جداگانه حساب‌شده و آن سطر به مقدار لازم در راستای بُرد شیفت می‌یابد. با تبدیل $S_{rc}(f_{\tau}, \eta) \rightarrow S_{rc}(y, x)$ سیگنال خروجی از بلوک RCMC طبق رابطه (۵) بیان می‌شود [۱۸، ۲۹]:

$$S_{rc}^{rm}(y, x) = S_{rc}(x, y - k(\eta)) \quad (۵)$$

که در آن مقدار $k(\eta)$ نیز از رابطه زیر به دست می‌آید [۱۸، ۲۹].

$$k(\eta) = \sqrt{y_{\min}^2 - x(\eta)^2 - y_{\min}} \quad (۶)$$

در ادامه، برای فشرده‌سازی سَمَت، پس از RCMC، فیلتر منطبق $H_{ac}(\eta)$ طبق رابطه

$$H_{ac}(\eta) = e^{j4\pi f_c \frac{R(\eta)}{c}} \quad (۷)$$

به داده‌ها اعمال می‌شود [۱۸، ۲۹]. پس از ضرب فیلتر در سیگنال خروجی بلوک RCMC و درنهایت انجام عمل عکس تبدیل فوریه، فشرده‌سازی در راستای سَمَت انجام‌شده و سیگنال حاصل توسط رابطه

$$S_{ac}(y, x) = F_{\eta}^{-1} \left(F_{\eta} \left(S_{rc}^{rm}(y, \eta) \right) \times F_{\eta} (H_{ac}(\eta)) \right) \quad (۸)$$

به دست می‌آید [۱۸، ۲۹]. با عکس تبدیل فوریه در راستای سَمَت، داده‌ها به حوزه زمان تبدیل‌شده و نتیجه آن یک تصویر مختلط فشرده می‌شود. پس‌ازاین مرحله، فشرده‌سازی در راستای سَمَت کامل می‌شود.

۲-۱-۲. روش تصویرسازی معکوس (BPA)

روش BPA یک روش بازسازی نقطه‌به‌نقطه با تفکیک‌پذیری بالا و راندمان پایین است [۲۹، ۳۲، ۳۳]. در این روش، برای هر مش از

این مراحل به ترتیب شامل پنجره‌گذاری برای جلوگیری از پنهان‌شدن اهداف ضعیف ناشی از لوب‌های فرعی اهداف قوی‌تر، تبدیل فوریه برای تعیین فاصله، انتگرال‌گیری پویش‌های مختلف برای کاهش توان متوسط نویز فاز و افزایش نسبت سیگنال به نویز [۲۵]، اعمال روش‌های افزایش تفکیک‌پذیری، تداخل‌سنجی برای تعیین اختلاف‌فاز دو پویش، تعیین نقاط پایدار و درنهایت تعیین میزان جابه‌جایی است. لازم به ذکر است در این مقاله از تقریب توقف و حرکت^۱ استفاده‌شده است. در این تقریب فرض می‌شود بالینکه حرکت آنتن پیوسته است، اما آنتن در یک سری نقاط مشخص روی ریل می‌ایستد و داده را جمع‌آوری کرده و دوباره حرکت می‌کند. بنابراین، تعداد موقعیت‌هایی که برای آنتن بر روی ریل در نظر گرفته‌شده است، با نماد M نمایش داده‌شده است. همچنین در این مقاله از موج پیوسته مدوله‌شده فرکانس^۲ که یک سیگنال با مدولاسیون خطی فرکانس است و در آن فرکانس از یک مقدار کمینه تا مقدار بیشینه پویش می‌شود، استفاده‌شده است. در این روش مصالحه‌ای بین متوسط توان برگشتی و قدرت تفکیک صورت می‌گیرد [۲۶-۲۸].

۲-۱-۲. مروری بر روش‌های تشکیل تصاویر

برای رسیدن به تصویر خروجی مناسب که در راستای بُرد^۳ و سَمَت^۴ تفکیک‌شده باشد، باید از روش‌های تشکیل تصویر استفاده شود. در این مقاله، نتایج دو روش تشکیل تصویر شامل روش RDA [۱۸، ۲۹-۳۱] و روش BPA [۲۹، ۳۲، ۳۳] مقایسه شده است.

۲-۱-۲. روش بُرد - داپلر (RDA)

این روش از پردازش حوزه فرکانس در راستای بُرد و سَمَت استفاده می‌کند. در شکل (۲) بلوک دیاگرام روش RDA نمایش داده‌شده است.



شکل (۲). بلوک دیاگرام روش RDA [۲۹].

همان‌طور که در رابطه (۱) گفته شد، $R(\eta)$ فاصله هدف تا آنتن است که از رابطه

$$R(\eta) = \sqrt{y^2 + x(\eta)^2} \quad (۳)$$

به دست می‌آید [۱۸، ۲۹]. مقادیر x و y مختصات پیکسل‌های

1 Stop and go

2 Frequency Modulated Continuous Wave (FMCW)

3 Range

4 Azimuth

5 Range Migration

6 Range Cell Migration Correction (RCMC)

نقطه پایدار با در نظر گرفتن یک سطح آستانه برای پارامتر همدوسی و پاشندگی دامنه انجام می‌شود [۱۳-۱۶]. این سطح آستانه بر اساس میزان کیفیت فاز و چگالی نقاط انتخابی تعیین می‌شود. انتخاب سطح آستانه می‌تواند به صورت ترکیبی از معیارهای همدوسی و پاشندگی دامنه نیز انجام شود. باید به این نکته توجه داشت که تغییرات مکانی فاز اتمسفر و فاز ناشی از تغییر شکل دیواره در پیکسل‌های مجاور به آرامی صورت می‌گیرد. این در حالی است که نویز فاز به صورت تصادفی ظاهر می‌شود و در پیکسل‌های مجاور می‌تواند تغییرات عمده‌ای داشته باشد [۳۵].

۲-۱-۲. روش پاشندگی دامنه

روش دامنه برای تشخیص نقاط پایدار از تجزیه و تحلیل دامنه پیکسل‌ها در سری‌های زمانی استفاده می‌کند. پارامتر پاشندگی دامنه طبق رابطه

$$D_A = \frac{\sigma_A}{m_A} \quad (11)$$

به دست می‌آید [۱۵] که در آن، m_A مقدار میانگین دامنه و σ_A انحراف معیار دامنه برای هر پیکسل در یک سری زمانی است. یک مقدار آستانه معقول T_d تعریف شده و پیکسل‌هایی که در شرط $D_A \leq T_d$ صدق می‌کنند، به عنوان نقاط پایدار شناخته می‌شوند [۱۵].

۲-۲-۲. روش همدوسی

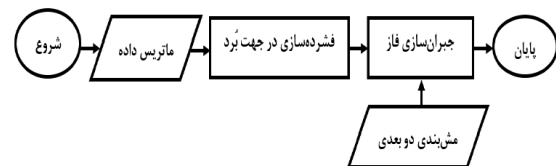
برای به دست آوردن شباهت پویش‌های متوالی از معیار همدوسی می‌توان استفاده نمود. این معیار می‌تواند برآوردی از مقدار نویز فاز در محل اهداف به ما بدهد. دامنه تغییرات این معیار بین صفر و یک است که صفر، عدم وجود شباهت و یک، وجود شباهت کامل بین پویش‌ها را نشان می‌دهد. اگر این معیار برای هدفی از آستانه ۰/۸ بزرگ‌تر باشد، می‌توان نتیجه گرفت که این هدف دارای تغییرات فاز کمی در طول پویش‌ها بوده و می‌توان آن را به عنوان نقطه پایدار در نظر گرفت. در روش همدوسی، ضریب همبستگی دو تصویر پشت‌سره (تصاویر اصلی و فرعی) از رابطه

$$\gamma = \frac{\left| \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N S_1(i,j) S_2^*(i,j) \right|}{\sqrt{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N |S_1(i,j)|^2 \times \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N |S_2(i,j)|^2}} \quad (12)$$

به دست می‌آید که در آن S_1 و S_2 تصاویر مختلط اصلی و فرعی، M و N ابعاد پنجره و γ ضریب همبستگی این دو تصویر را نشان می‌دهد [۱۳-۱۵]. برای محاسبه همدوسی از یک پنجره لغزان به ابعاد $M \times N$ روی دو تصویر استفاده می‌شود. عدد اول مربوط به ابعاد پنجره در راستای بُرد و عدد دوم ابعاد پنجره در راستای سمت است. مقادیر M و N باید به اندازه کافی کوچک باشند تا دقت تعیین نقطه پایدار بالا باشد. هرچه همدوسی تصاویر پشت سر هم در یک

فضای بازسازی، اختلاف فاز ناشی از فاصله هر آنتن با آن مش^۱ محاسبه و جبران سازی می‌شود و یک تابع متناسب با حاصل جمع سیگنال‌های جبران سازی و باز ارسال شده هر آنتن برای آن مش ایجاد می‌شود.

اگر در آن مش هدفی وجود داشته باشد، این تابع مقدار قابل ملاحظه‌ای خواهد داشت و در غیر این صورت صفر خواهد بود. در شکل (۳) بلوک دیاگرام روش BPA نمایش داده شده است.



شکل (۳). بلوک دیاگرام روش BPA.

در پیاده سازی روش BPA برای مدولاسیون FM CW ابتدا فرکانس مرکزی را انتخاب کرده و عدد موج k ، برای این فرکانس محاسبه می‌شود. سپس ناحیه جست‌وجو در دو راستای بُرد و سمت، مش بندی شده و به ازای تمام موقعیت‌های آنتن، فاصله موقعیت آنتن تا هر پیکسل ناحیه جست‌وجو از رابطه

$$R(x,y) = \sqrt{(x-x_a)^2 + (y-y_a)^2} \quad (9)$$

به دست می‌آید که در آن (x,y) موقعیت پیکسل و (x_a, y_a) موقعیت آنتن را نشان می‌دهد [۳۲].

سپس باتوجه به این فاصله، طبق رابطه

$$I(x,y) = \sum_{a=1}^{N_a} (E_S(x,y,x_a,y_a,k)) \times e^{-2jk_r R(x,y)} \quad (10)$$

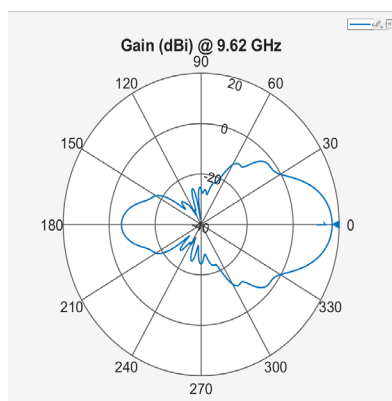
بازسازی سیگنال و جبران فاز انجام شده و تصویر نهایی $I(x,y)$ تشکیل می‌شود. در رابطه (۱۰)، $E_S(x,y,x_a,y_a,k)$ میدان دریافتی از پیکسل (x,y) در آنتن با موقعیت (x_a, y_a) است [۳۲]. جبران فاز باید برای تمام موقعیت‌های آنتن و برای هر پیکسل انجام شده و سپس نتایج آن باهم جمع شود. جبران فاز در رابطه (۱۰)، با عبارت $e^{-2jk_r R(x,y)}$ انجام شده است.

۲-۲-۲. تعیین نقاط پایدار

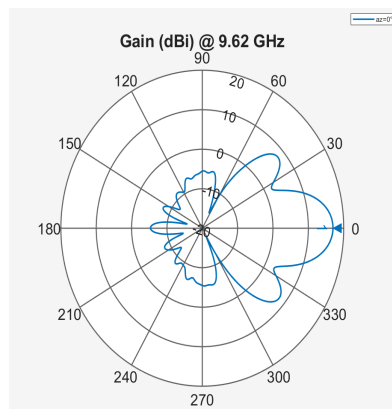
پس از تشکیل تصویر با هر روش و ایجاد تداخل نما از آن‌ها، به کمک مقادیر اختلاف فاز می‌توان پارامترهای متفاوت از جمله میزان جابه‌جایی سطح دیواره را استخراج کرد [۳۴]. برای محاسبه جابه‌جایی واقعی لازم است از نقاط پایدار که نویز فاز بسیار کمی دارند، استفاده شود. از متداول‌ترین روش‌ها برای انتخاب این نقاط معیار پاشندگی دامنه و معیار همدوسی است. در این روش، انتخاب

می‌دهد. در این ساختار در بخش فرستنده، سیگنال تولیدشده توسط مولد چرپ پس از یک مرحله تقویت، وارد تقسیم‌کننده توان می‌شود.

یکی از خروجی‌های تقسیم‌کننده توان به تقویت‌کننده توان و خروجی دیگر به میکسر^۲ گیرنده، می‌رود. بخشی که به تقویت‌کننده توان می‌رود، پس از تقویت وارد آنتن فرستنده می‌شود. همان‌طور که در جدول (۱) دیده می‌شود، محدوده فرکانس سیگنال تولیدی مولد چرپ $[9/9-4/85\text{GHz}]$ هست. در نتیجه فرکانس سیگنال ورودی به LO^۳ میکسر و بازتاب اهداف که به آنتن گیرنده وارد می‌شوند، نیز در همین محدوده است.



(الف)



(ب)

شکل (۵). نمودار: (الف) H-plane، (ب) E-plane.

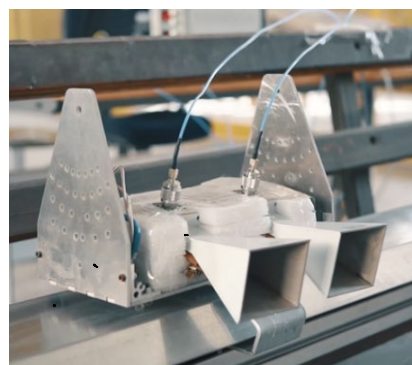
پس از ورود سیگنال بازتابی از هدف به آنتن گیرنده، ابتدا سیگنال از یک فیلتر میان‌گذر^۴ (BPF) با باند عبور $[9/10-1/1\text{GHz}]$ عبور می‌کند. این فیلتر سیگنال‌های خارج از باند موردنظر را حذف می‌کند درحالی‌که سیگنال اصلی را عبور می‌دهد. به علت استفاده از این فیلتر در پروژه‌های راداری دیگر، پهنای باند این فیلتر بزرگ‌تر از پهنای باند سیگنال ارسالی در نظر گرفته شده است که در

پیکسل بیشتر باشد، نویز فاز مربوط به آن پیکسل کمتر است و آن پیکسل برای تعیین جابه‌جایی مناسب‌تر خواهد بود. پارامتر همدوسی در توالی زمانی از روی میانگین همدوسی‌های به‌دست‌آمده برای دو تصویر پشت سر هم و برای هر پیکسل به دست می‌آید و این پارامتر معیار تشخیص نقاط پایدار قرار خواهد گرفت.

۳- سیستم عملی پیاده‌سازی شده



(الف)



(ب)

شکل (۴). نمایی از: (الف) سامانه پیاده‌سازی شده، (ب) آنتن‌های رادار.

رادار SAR پیاده‌سازی شده در این مقاله، شامل دو آنتن هورن^۱ با ابعاد دهانه $7/5 \times 10\text{cm}$ است که بافاصله 15cm از یکدیگر بر روی ریل به طول 2m سوار شده‌اند و دارای پهنای پرتو^۴ 26° درجه هستند. مدت‌زمان جاروب آنتن روی ریل 120s و سرعت حرکت آنتن‌ها m/s $0/166$ است. نمای کلی از سامانه پیاده‌سازی شده در شکل (۴-الف) و نمایی از آنتن‌های رادار در شکل (۴-ب) نمایش داده شده است. نمودار E-plane و H-plane آنتن در شکل (۵) آورده شده است.

بر اساس نتایج شبیه‌سازی و تست‌های عملی گرفته‌شده، حداقل ایزولاسیون لازم بین فرستنده و گیرنده برابر 29dB است. ایزولاسیون بین دو آنتن هورن در فاصله قرار داده شده در باند فرکانسی موردنظر بیشتر از 50dB است، بنابراین ایزولاسیون کافی بین آنتن‌ها وجود دارد. شکل (۶)، ساختار فرستنده - گیرنده را نشان

2 Mixer

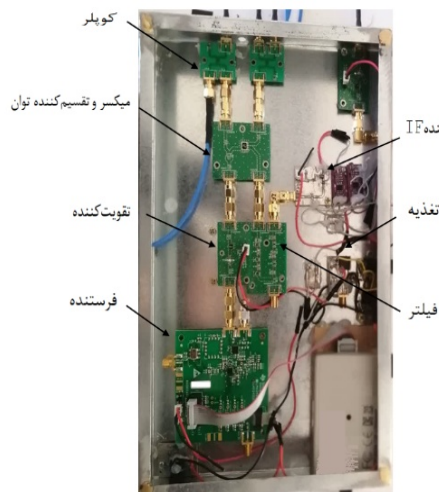
3 Local oscillator

4 Band Pass Filter(BPF)

1 Horn

نمونه‌برداری به ۱۲۵MSPS کاهش پیدا می‌کند. سپس دیتاهای یک چرپ بافر شده و از طریق پروتکل UDP^۵ در قالب پکت‌های ۱۲۰۰ بایتی و با نرخ ۱Gbps از طریق شبکه اترنت به کامپیوتر ارسال می‌شود. در کامپیوتر در نرم‌افزار MATLAB داده‌ها دریافت و پردازش می‌شود. شکل (۷) نمایی از مدار RF^۶ ساخته‌شده را نشان می‌دهد.

در ادامه، پارامترهای سامانه پیاده‌سازی شده در جدول (۱) ارائه شده است. همان‌طور که دیده می‌شود، نرخ نمونه‌برداری برابر ۱۲۵MHz است. بر اساس رابطه (۱) فرکانس سیگنال دریافتی برای هدفی در فاصله ۷۹۰ متر (برد رادار) برابر ۳۰MHz است، بنابراین حداکثر فرکانس دریافتی در بخش IF برابر ۳۰MHz خواهد بود که از نصف نرخ نمونه‌برداری کوچک‌تر است. لازم به ذکر است که تعداد چرپ بکار گرفته‌شده جهت انتگرال‌گیری در شکل (۱)، برابر ۲ هست که در جدول (۱) آورده شده است.



شکل (۷). نمایی از مدار RF ساخته‌شده.

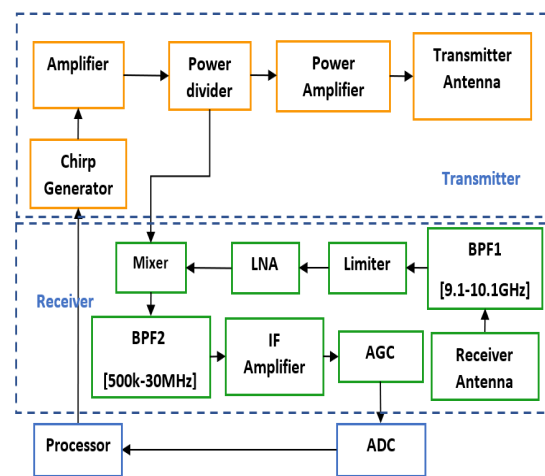
۳-۱. سناریو تست

محل موردنظر برای تست، مطابق با شکل (۸)، یک ناحیه بایر شامل ۵ ستون سیمانی به ارتفاع ۱/۲m به‌عنوان اهداف گسسته است. همچنین مطابق شکل (۹)، برای افزایش سیگنال برگشتی به سمت رادار، بلوک‌های دو ردیف آخر هر یک از ستون‌ها به‌صورت گوشه‌ای قرار داده شده است.

ستون‌های سیمانی به‌صورت پراکنده بافاصله‌های متفاوت و با فرض اینکه محل آنتن، مبدأ دستگاه مختصات است، طبق مختصات اهداف در جدول (۲) در ناحیه بایر قرار داده شده است. لازم به ذکر است که در حین تصویربرداری، سناریو تغییر نکرده و پویش‌ها بافاصله زمانی چند دقیقه ثبت شده است.

عمل مشکلی ایجاد نمی‌کند. بعد از BPF1 سیگنال وارد تقویت‌کننده کم‌نویز (LNA)^۱ می‌شود. بهره LNA برابر ۱۵dBm است.

بعد از LNA سیگنال دریافتی وارد میکسر می‌شود. در واقع، در میکسر گیرنده، سیگنال بازتاب شده از اهداف با یک سیگنال مرجع که یک کپی از سیگنال ارسال شده است، ترکیب می‌شود. این فرآیند به نام de-ramping شناخته می‌شود. خروجی این ترکیب شامل اطلاعات مربوط به هدف است. در رادار FMCW، بر اساس رابطه (۱) این اطلاعات در حوزه فرکانس قرار دارند. در این نوع رادار، سیگنال چرپ به طور پیوسته منتشر می‌شود.



شکل (۶). بلوک دیاگرام فرستنده-گیرنده.

بر اساس رابطه (۱) فرکانس سیگنال‌های دریافتی اهداف در فاصله‌های ۱۲ تا ۷۹۰ متر (برد رادار) در بخش IF بین ۵۰۰KHz تا ۳۰MHz است. از این‌رو خروجی میکسر به یک فیلتر BPF2 با باند عبور ۵۰۰KHz تا ۳۰MHz داده می‌شود. بر اساس دامنه دریافتی سیگنال و محدوده ولتاژ کاری مبدل آنالوگ به دیجیتال^۲، از دو تقویت‌کننده فرکانس پایین استفاده می‌شود. بهره اولین تقویت‌کننده ثابت و ۲۰dBm است. تقویت‌کننده دوم یک کنترل‌کننده خودکار بهره^۳ است که بهره آن تا ۴۰dBm قابل تنظیم است. در نهایت، سیگنال دریافتی تقویت‌شده توسط یک ADC به شماره AD9467 با نرخ نمونه‌برداری ۲۵۰MSPS و رزولوشن ۱۶ بیت نمونه‌برداری شده و به حوزه دیجیتال منتقل می‌شود. قرائت اطلاعات این ADC توسط یک پردازنده قابل برنامه‌ریزی^۴ از خانواده Kintex UltraScale از شرکت AMD با شماره XCKU115-FLVA1517 انجام می‌شود. لازم به ذکر است که در داخل FPGA یک پردازش اولیه انجام شده و برای افزایش SNR و کاهش حجم داده با انتگرال‌گیری اولیه، نرخ

1 Low Noise Amplifier (LNA)

2 Analog to Digital Converter (ADC)

3 Automatic Gain Control (AGC)

4 Field Programmable Gate array (FPGA)

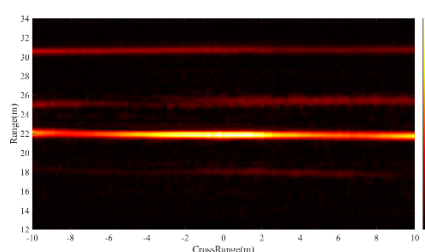
5 User Datagram Protocol (UDP)

6 Radio-Frequency (RF)

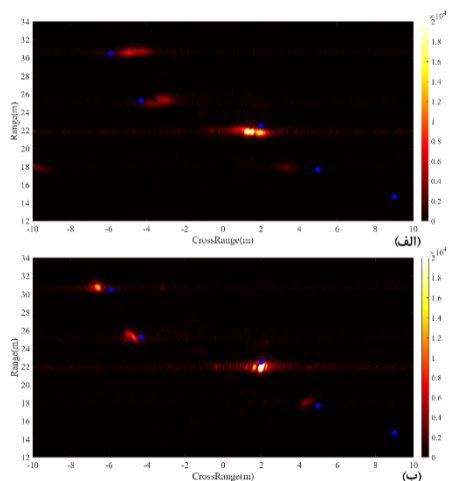
تصاویر آشکارسازی شده پس از اعمال روش RDA و BPA در شکل (۱۱) نشان داده شده‌اند. همانطور که مشاهده می‌شود، اهداف نسبت به تصاویر خام فشرده‌تر شده و به محل واقعی مشخص شده، نزدیک شده‌اند. با مشاهده دقیق‌تر می‌توان پی برد که فشرده‌سازی با روش BPA، بهتر از روش RDA است.

جدول (۲). مختصات اهداف.

اهداف	مختصات (متر)
هدف اول	(-۵/۹.۳۰/۵)
هدف دوم	(-۴/۳.۲۵/۳)
هدف سوم	(۲.۲۲/۵)
هدف چهارم	(۵.۱۷/۷)
هدف پنجم	(۹.۱۴/۷)



شکل (۱۰). تصویر خام به‌دست‌آمده از محیط قبل از اعمال روش‌های پردازشی.



شکل (۱۱). تصویر آشکارسازی شده پس از اعمال: (الف) روش RDA، (ب) روش BPA.

جدول (۳) ارزیابی کمی برای نتایج تست عملی با دو معیار خطای مکان‌یابی و تفکیک‌پذیری سمت برای اهداف آشکارسازی شده با روش‌های BPA و RDA را ارائه می‌دهد. همانطور که مشخص است، خطای مکان‌یابی در روش BPA نسبت به روش RDA بهبود یافته است. این بهبود برای اهداف اول و سوم چشم‌گیرتر است. خطای تفکیک‌پذیری در راستای سمت در روش BPA نسبت به روش RDA برای اهداف اول تا سوم بهبود یافته است.

جدول (۱). پارامترهای سامانه پیاده‌سازی شده.

پارامتر	مقدار	نماد
پهنای بیم نیم‌توان آنتن فرستنده و گیرنده	۲۶°	HPBW
پهنای باند سیگنال ارسالی	۰/۴۵GHz	BW
فرکانس مرکزی	۹/۶۲۵GHz	f_c
فرکانس نمونه‌برداری	۱۲۵MHz	f_s
طول ریل	۲m	L
زمان جاروب ریل	۱۲۰s	T
تعداد چرپ	۲	N
نرخ چرپ	۵/۷۶THz/s	k_r
نوع پنجره	Kaiser۳/۵	W
تعداد موقعیت مکانی آنتن	۱۱۹	N_c
گام مکانی آنتن	۰/۰۱۶۹m	ΔL
طول زمانی چرپ	۷۸μS	τ_c
توان ارسال	۲۵dBm	P_t



شکل (۸). سایت اهداف در دانشگاه یزد.

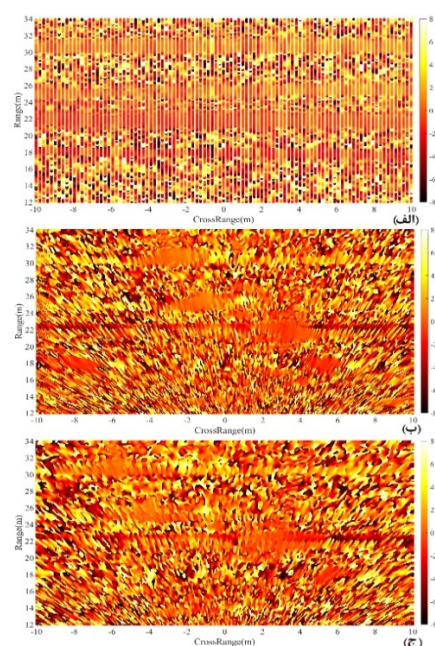


شکل (۹). بلوک‌های سیمانی استفاده‌شده به‌عنوان اهداف گسسته.

۴- نتایج و بحث

داده‌های به‌دست‌آمده در نرم‌افزار MATLAB با دو روش RDA و BPA پردازش شده است. در این بخش ابتدا تصاویر داده‌های خام و سپس تصاویر داده‌های پردازش شده نمایش داده شده است. شکل (۱۰) تصویر خام به‌دست‌آمده از محیط را قبل از اعمال روش‌های پردازشی نشان می‌دهد. همانطور که مشخص است، اهداف در این شکل در راستای سمت تفکیک نشده‌اند. اهداف در فاصله ۱۲m تا ۳۴m در راستای بُرد و ۱۰m تا ۱۰m در راستای سمت آشکارسازی شده‌اند.

در این قسمت نتایج تداخل‌سنجی پویش‌های اول و آخر برای کل نقاط ناحیه تحت تست و همچنین برای نقاط پایدار با معیار همدوسی $0/9$ و معیار پاشندگی دامنه $0/5$ ، برای داده خام و برای دو روش RDA و BPA نشان‌داده‌شده است [۱۵،۳۵]. نتایج همدوسی (بین پویش اول تا آخر) قبل و بعد از اعمال روش‌ها در شکل (۱۲) نشان‌داده‌شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود مقدار همدوسی در محل اهداف تقریباً بزرگ‌تر از $0/9$ است. از طرف دیگر، نقاط با همدوسی بزرگ‌تر از $0/9$ با اعمال روش BPA بیشتر از اعمال روش RDA در محل اهداف متمرکز شده‌اند. اگر اهداف در طول پویش‌های متوالی جابه‌جایی نداشته باشند، همدوسی آن‌ها افزایش می‌یابد و به ۱ نزدیک می‌شود. در نتیجه این نقاط، نقاط مناسبی برای در نظر گرفتن به‌عنوان نقاط پایدار خواهند بود. نتایج تغییرات پارامتر پاشندگی دامنه قبل و بعد از اعمال روش‌ها در شکل (۱۳) نشان‌داده‌شده است. مشاهده می‌شود که پاشندگی دامنه در محل اهداف کمتر از $0/5$ است. با اعمال روش BPA، نقاط با پاشندگی دامنه کمتر از $0/5$ بیشتر در محل اهداف متمرکز شده‌اند. همچنین، شکل (۱۴) جابه‌جایی نقاط بین پویش‌های اول و آخر را بدون اعمال معیار نشان می‌دهد که در این حالت تمام نقاط نمایش داده می‌شوند. در ادامه مشاهده می‌شود که با اعمال معیارها، تعداد محدودی از نقاط که همان نقاط پایدار و متمرکز در محل اهداف هستند باقی می‌مانند. بر اساس شکل (۱۴) در نقاط آشکارسازی، جابه‌جایی در بازه λmm تا λmm دیده می‌شود.

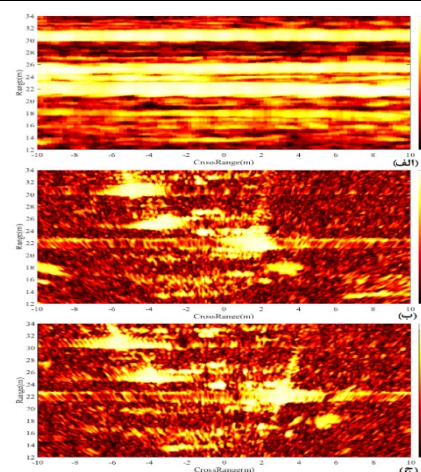


شکل (۱۴). جابه‌جایی نقاط بین پویش‌های اول و آخر برای کل نقاط: (الف) داده خام، (ب) روش RDA، (ج) روش BPA.

باتوجه به کوچک بودن زمان بین دو پویش و همچنین فاصله

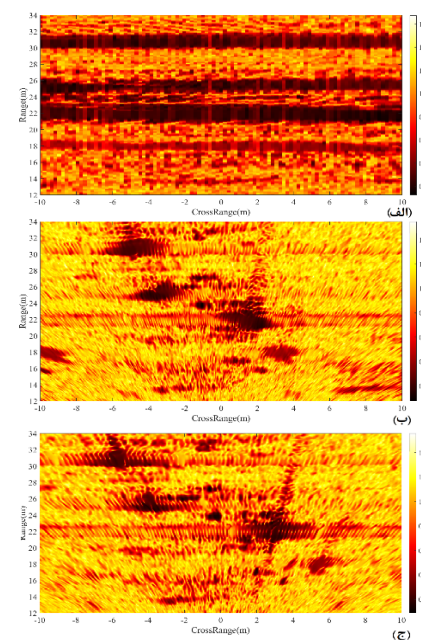
جدول (۳). نتایج تست عملی روش RDA و BPA برای پارامترهای سامانه پیاده‌سازی شده با دو معیار خطای مکان‌یابی و تفکیک‌پذیری سمت برای همه اهداف

روش	اهداف	خطای مکان‌یابی (متر)	تفکیک‌پذیری سمت (متر)
RDA	اول	$0/9723$	$0/400$
	دوم	$1/2780$	$0/612$
	سوم	$0/9102$	$0/446$
	چهارم	$1/6761$	$0/392$
BPA	اول	$0/7374$	$0/235$
	دوم	$0/4186$	$0/164$
	سوم	$0/5819$	$0/164$
	چهارم	$0/7495$	$0/282$



شکل (۱۲). نتایج تغییرات همدوسی برای: (الف) داده خام، (ب)

روش RDA، (ج) روش BPA.



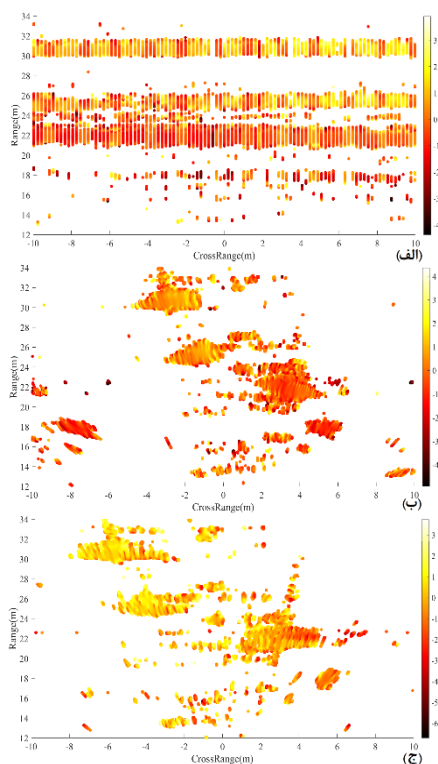
شکل (۱۳). نتایج تغییرات پاشندگی دامنه برای: (الف) داده خام،

(ب) روش RDA، (ج) روش BPA

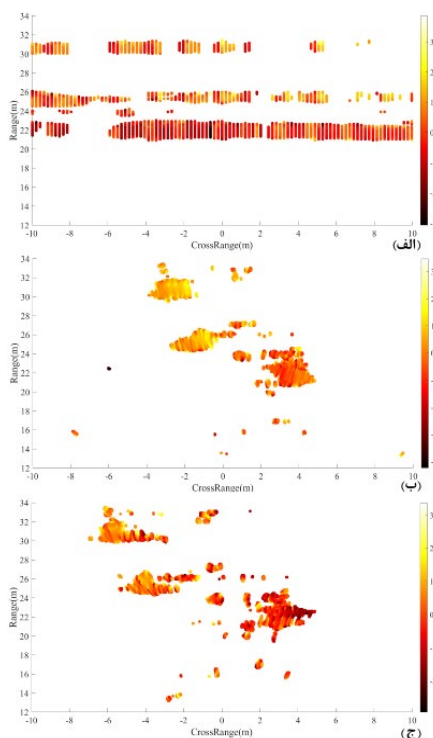
نزدیک اهداف انتظار می‌رود که این بُرد تغییرات نزدیک به صفر باشد و لذا بسیاری از نقاط آشکارسازی شده مربوط به یک هدف واقعی در محیط نیستند.

برای اعتبارسنجی روش‌های مختلف، می‌توان میزان جابه‌جایی‌های نقاط مختلف را در دو پوشش بررسی کرد. درحالی‌که جابه‌جایی بین دو پوشش در حالت ایده‌آل باید صفر باشد، اما به علت وجود نویز موجود در تصاویر، تغییر فازهایی در پیکسل‌های مختلف وجود دارد. نقاط پایدار نقاطی هستند که نویز فاز در آن‌ها خیلی کم است؛ بنابراین اگر جابه‌جایی‌های نقاط پایدار در این حالت در حد صفر باشند، به معنی انتخاب درست آن نقاط پایدار است. شکل‌های (۱۵) و (۱۶) نتایج به‌دست‌آمده برای جابه‌جایی نقاط انتخاب‌شده با معیارهای همدوسی و پاشندگی دامنه را به ترتیب نشان می‌دهند.

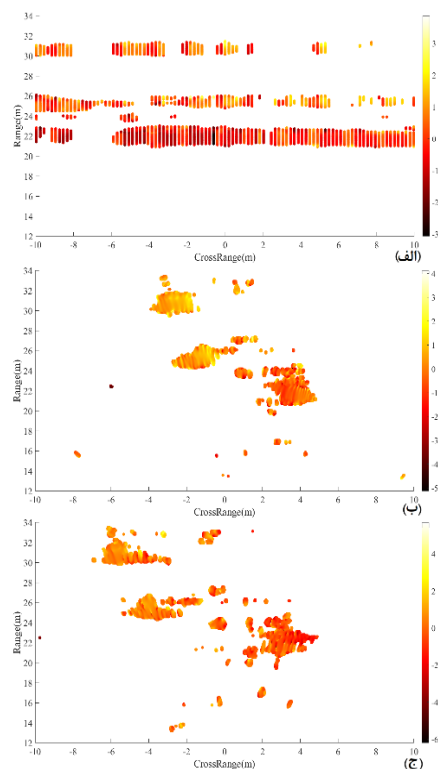
شکل (۱۷) نیز نتایج به‌دست‌آمده برای نقاط انتخاب‌شده با ترکیب معیارهای همدوسی و پاشندگی دامنه را نشان می‌دهند. همانطور که مشاهده می‌شود نقاط انتخاب‌شده در محل اهداف متمرکز شده است. با توجه به عدم جابه‌جایی نقاط بین دو پوشش انتظار می‌رود متوسط جابه‌جایی نقاط نزدیک صفر و واریانس جابه‌جایی به‌اندازه کافی کوچک باشد.



شکل (۱۶). جابه‌جایی نقاط بین پوشش‌های اول و آخر با معیار پاشندگی دامنه ۰/۵ برای: (الف) داده خام، (ب) روش RDA، (ج) روش BPA.



شکل (۱۷). جابه‌جایی نقاط بین پوشش‌های اول و آخر با معیار همدوسی ۰/۹ و پاشندگی دامنه ۰/۵ برای: (الف) داده خام، (ب) روش RDA، (ج) روش BPA.



شکل (۱۵). جابه‌جایی نقاط بین پوشش‌های اول و آخر با معیار همدوسی ۰/۹ برای: (الف) داده خام، (ب) روش RDA، (ج) روش BPA.

می‌شود، طبق جدول (۷) مشاهده می‌شود که عملکرد واریانس در روش RDA و عملکرد میانگین در روش BPA بهتر بوده و مقادیر میانگین و واریانس بیشتر به صفر نزدیک شده است.

جدول (۴). نتایج میانگین و واریانس جابه‌جایی نقاط بدون اعمال معیار.

روش	واریانس	میانگین
RDA	۱۶/۱۶۸۲	۰/۰۶۹۶
BPA	۱۶/۲۹۹۴	۰/۰۶۶۵

جدول (۵). نتایج میانگین و واریانس جابه‌جایی نقاط فقط با اعمال معیار همدوسی.

روش	آستانه همدوسی	واریانس	میانگین
RDA	۰/۹۵	۰/۲۴۳۴	۰/۰۷۳۰
	۰/۹	۰/۵۹۴۸	۰/۱۷۴۹
	۰/۸۵	۱/۰۴۰۸	۰/۱۵۴۶
BPA	۰/۹۵	۰/۳۳۰۶	۰/۰۶۱۴
	۰/۹	۰/۷۳۹۴	۰/۰۹۷۱
	۰/۸۵	۱/۲۶۳۷	۰/۰۰۸۱

جدول (۶). نتایج میانگین و واریانس جابه‌جایی نقاط فقط با اعمال معیار پاشندگی دامنه.

روش	آستانه همدوسی	واریانس	میانگین
RDA	۰/۸	۴/۸۹۶۳	۰/۰۷۹۴
	۰/۵	۱/۰۶۱۷	۰/۰۱۵۳
	۰/۳	۰/۳۵۶۹	۰/۱۲۵۸
BPA	۰/۸	۴/۵۸۱۹	۰/۰۶۱۲
	۰/۵	۱/۰۲۵۰	۰/۰۴۰۷
	۰/۳	۰/۲۸۸۳	۰/۰۸۶۶

جدول (۷). نتایج میانگین و واریانس جابه‌جایی نقاط اعمال معیار همدوسی و پاشندگی دامنه

روش	آستانه همدوسی	آستانه پاشندگی دامنه	واریانس	میانگین
RDA	۰/۹	۰/۵	۰/۵۶۸۲	۰/۱۷۵۶
BPA	۰/۹	۰/۵	۰/۶۶۲۷	۰/۰۹۷۰

۵- نتیجه‌گیری

در این مقاله، به بررسی پیاده‌سازی رادار دهانه مصنوعی زمین پایه برای تعیین نقاط پایدار پرداخته شده است. نقاط پایدار نقطه‌ای هستند که در طول پوی‌های مختلف نویز فاز پایینی دارند و می‌توانند به‌عنوان هدف آشکارسازی جابه‌جایی و یا برای کالیبراسیون و حذف اثر فازهای ناخواسته ایجاد شده توسط تغییر پارامترهای اتمسفر (فشار، دما، رطوبت) انتخاب شوند. معیار پاشندگی دامنه و معیار همدوسی برای تعیین نقاط پایدار در نظر

در کل نقاط آشکارسازی شده در شکل (۱۴)، جابه‌جایی در بازه ۸mm- تا ۸mm است. با پردازش روش RDA و اعمال معیار همدوسی یا معیار پاشندگی دامنه، جابه‌جایی در بازه ۵mm- تا ۴mm و با اعمال ترکیب هر دو معیار، جابه‌جایی در بازه ۳mm- تا ۳mm قرار می‌گیرد. با پردازش روش BPA و اعمال معیار همدوسی، جابه‌جایی در بازه ۶mm- تا ۵mm و با اعمال معیار پاشندگی دامنه، جابه‌جایی در بازه‌ی ۷mm- تا ۳mm و با اعمال ترکیب هر دو معیار، جابه‌جایی در بازه ۳mm- تا ۳mm قرار می‌گیرد. همانطور که مشاهده می‌شود با هر دو روش با اعمال هم‌زمان هر دو معیار همدوسی و پاشندگی دامنه، جابه‌جایی کاهش می‌یابد و این کاهش جابه‌جایی در روش BPA بیشتر است. معیارهای همدوسی و پاشندگی دامنه فقط نقطه‌هایی از تصویر را به‌عنوان نقطه پایدار مشخص می‌کنند که دارای دامنه برگشتی قوی و SNR بالا باشند. روش‌های RDA و BPA این نقاط را با دقت خوبی از هم تفکیک می‌کنند و باعث متمرکزتر شدن اهداف در مکان واقعی و در نتیجه افزایش دقت معیارهای همدوسی و پاشندگی دامنه و همچنین افزایش دقت در تعیین جابه‌جایی نقاط خواهند شد.

از مقایسه نتایج معلوم می‌شود معیار پاشندگی دامنه توانسته است به‌خوبی نقاط پایدار را تفکیک کند و بُرد تغییرات جابه‌جایی بعد از اعمال این معیار کاهش یافته، جابه‌جایی‌ها حوالی صفر متمرکز شده و واریانس به‌مراتب کمتری نسبت به حالتی که این معیار اعمال نشود، حاصل شده است. با توجه به کاهش قابل‌توجه میانگین و واریانس، جابه‌جایی نتایج بهبود یافته است. در ادامه به بررسی نتایج میانگین و واریانس جابه‌جایی نقاط (به ترتیب بر حسب میلی‌متر و میلی‌متر مربع) به‌ازای حدود آستانه برای معیارهای پاشندگی دامنه و همدوسی پرداخته می‌شود. جدول (۴) نتایج بدون اعمال معیار، جدول (۵) و (۶) به ترتیب نتایج فقط با اعمال معیار همدوسی و پاشندگی دامنه و جدول (۷) نتایج با اعمال هم‌زمان معیار همدوسی و پاشندگی دامنه را نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود، در حالت کلی، معیار پاشندگی دامنه روی بهبود نتایج میانگین نقاط پایدار تأثیر بیشتری داشته و میانگین جابه‌جایی نقاط نزدیک صفر شده است. همچنین معیار همدوسی باعث شده است که واریانس جابه‌جایی به‌اندازه کافی کوچک باشد. معیار همدوسی و معیار پاشندگی دامنه، برای روش BPA نسبت به روش RDA تأثیر بیشتری روی بهبود نتایج میانگین و واریانس نقاط پایدار داشته است. زمانی که ترکیب دو معیار مرجع همدوسی و پاشندگی دامنه اعمال

در طول اسکن) مؤثر است. این موضوع در این مقاله به صورت کمی

- [11] C. Huang, H. Xia, and J. Hu, "Surface deformation monitoring in coal mine area based on PSI," IEEE Access, vol. 7, pp. 29672-29678, 2019.
<https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2900258>
- [12] M. A. Richards, J. Scheer, W. A. Holm, and W. L. Melvin, "Principles of modern radar," Scitech Publishing, 2010. ISBN: 9781891121524
- [13] A. M. H. Ansar, A. H. M. Din, A. S. A. Latip and M. N. M. Reba, "A Short Review on Persistent Scatterer Interferometry Techniques for Surface Deformation Monitoring. The International Archives of the Photogrammetry," Remote Sensing and Spatial Information Sciences, pp. 23-31, 2022.
<https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLVI-4-W3-2021-23-2022>
- [14] L. Iannini and A. M. Guarnieri, "Atmospheric phase screen in ground-based radar: Statistics and compensation," IEEE Geosci. Remote Sens. Lett., vol. 8, no. 3, pp. 537-541, 2010.
<https://doi.org/10.1109/LGRS.2010.2090647>
- [15] H. Jia and L. Liu, "A technical review on persistent scatterer interferometry," J. Mod. Transport., vol. 24, no. 2, pp. 153-158, 2016.
<https://doi.org/10.1007/s40534-016-0108-4>
- [16] A. Ferretti, C. Prati, and F. Rocca, "Permanent scatterers in SAR interferometry," IEEE Trans. Geosci. Remote Sens., vol. 39, pp. 8-20, 2001.
<https://doi.org/10.1109/36.898661>
- [17] A. A. Rahimifard, M. Zoofaghari, T. Gholipour, S. S. Shams, H. Safdarkhani, "Azimuth Resolution Enhancement of Real Aperture Radar Using the Accelerated Sparse-TSVD algorithm and Calibrated Radiation Pattern for Discrete and Distributed Targets," accepted for publication in J. RADAR, (In Persian). DOR: <https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.23454024.1402.11.1.9.5>
- [18] I. G. Cumming and F. H. Wong, "Digital processing of synthetic aperture radar data," Artech house, 2005. ISBN: 1580530583
- [19] X. Tuo, Y. Zhang, Y. Huang, and J. Yang, "A fast sparse azimuth super-resolution imaging method of real aperture radar based on iterative reweighted least squares with linear sketching," IEEE J. Sel. Top. Appl. Earth Obs. Remote Sens., vol. 14, pp. 2928-2941, 2021.
<https://doi.org/10.1109/JSTARS.2021.3061430>
- [20] R. Gundersen, R. Norland, and C. Rolstad Denby, "Geometric, environmental and hardware error sources of a ground-based interferometric real-aperture FMCW radar system," Remote Sens., vol. 10, no. 12, p. 2070, 2018.
<https://doi.org/10.3390/rs10122070>
- [21] G. Luzi, M. Pieraccini, D. Mecatti, L. Noferini, G. Macaluso, A. Galgaro, and C. Atzeni, "Advances in ground-based microwave interferometry for landslide survey: a case study," Int. J. Remote Sens., vol. 27, no. 12, pp. 2331-2350, 2006.
<https://doi.org/10.1080/01431160600554975>
- [22] L. Noferini, M. Pieraccini, G. Luzi, D. Mecatti, G. Macaluso and C. Atzeni, "Ground-based radar interferometry for monitoring unstable slopes," Int. Geosci. Remote Sens. Symp. (IGARSS), pp. 4088-4091, 2006.
<https://doi.org/10.1109/IGARSS.2006.1048>
- [23] A. Di Pasquale, G. Nico, A. Pitullo, and G. Prezioso, "Monitoring strategies of earth dams by ground-based radar interferometry: How to extract useful information for seismic risk assessment," Sensors, vol. 18, no. 1, p. 244, 2018.
<https://doi.org/10.3390/s18010244>
- [24] L. Iannini and A. M. Guarnieri, "Atmospheric phase screen in ground-based radar: Statistics and compensation," IEEE Geosci. Remote Sens. Lett., vol. 8, no. 3, pp. 537-541, 2010.
<https://doi.org/10.1109/LGRS.2010.2090647>
- [25] D. Lühr, Sierra, M. Adams, "Radar Noise Reduction Based on Binary Integration," IEEE Sensors Journal vol. 15, no. 2, pp. 766-777, 2015.
<https://doi.org/10.1109/JSSEN.2014.2352295>
- [26] G. Wang, J.-M. Munoz-Ferreras, C. Gu, C. Li, and R.

گرفته شدند. بر اساس نتایج این تحقیق، ماهیت روش تشکیل تصاویر SAR در تعیین نقاط پایدار باکیفیت بالا (جابه‌جایی کم با در نظر گرفتن میانگین و واریانس جابه‌جایی نقاط بعد از اعمال معیارها بررسی شده است. نتایج نشان می‌دهند روش BPA بر اساس معیار همدوسی توانسته است نقاط پایدار باکیفیت بالاتری را تعیین کند. از طرف دیگر با در نظر گرفتن معیار پاشندگی دامنه، روش RDA عملکرد بهتری دارد. با این‌همه با اعمال هم‌زمان دو معیار، در روش BPA نقاط پایدار آشکارسازی شده میانگین جابه‌جایی حدود ۵۰ درصد کمتر از میانگین جابه‌جایی نقاط پایدار آشکارسازی شده در روش RDA دارند که این موضوع برتری روش BPA را تبیین می‌کند. در ادامه این پژوهش لازم است تحلیل‌های ارائه‌شده برای داده‌های جمع‌آوری‌شده از اهداف پیوسته؛ مانند دیواره معدن نیز ارزیابی شوند.

۶- مراجع

- [1] C. Li, W. Chen, G. Liu, R. Yan, H. Xu, and Y. Qi, "A noncontact FMCW radar sensor for displacement measurement in structural health monitoring," Sensors, vol. 15, pp. 7412-7433, 2015.
<https://doi.org/10.3390/s150407412>
- [2] P. Eshghy, M. Kazerooni, "Extracting the amount of subsidence of subway tunnels from InSAR," J. RADAR, vol. 10, no. 1, 2022. (In Persian). DOR: 20.1001.1.23454024.1401.10.1.12.1.
- [3] S. Rödelberger, G. Läufer, C. Gerstenecker, and M. Becker, "Monitoring of displacements with ground-based microwave interferometry: IBIS-S and IBIS-L," J. Appl. Geod., vol. 4, pp. 41-54, 2010.
<https://doi.org/10.1515/jag.2010.005>
- [4] H. Rudolf, D. Leva, D. Tarchi, and A. Sieber, "A mobile and versatile sar system," IEEE Int. Geosci. Remote Sens. Symp. (IGARSS), vol. 1, pp. 592-594, 1999.
<https://doi.org/10.1109/IGARSS.1999.773575>
- [5] A. Aguasca, A. Broquetas, J. J. Mallorquí, and X. Fabregas, "A solid state L to x-band flexible ground-based SAR system for continuous monitoring applications," IEEE Int. Geosci. Remote Sens. Symp. (IGARSS), vol. 2, pp. 757-760, 2004.
<https://doi.org/10.1109/IGARSS.2004.1368512>
- [6] S. Rödelberger and A. Meta, "Metasensing's fastgbsar: ground based radar for deformation monitoring," Proc. SPIE 9243, SAR Image Analysis, Modeling, and Techniques XIV, pp. 355-362, SPIE, 2014.
<https://doi.org/10.1117/12.2067243>
- [7] D. Tarchi, F. Oliveri, and P. F. Sammartino, "MIMO radar and ground-based sar imaging systems: Equivalent approaches for remote sensing," IEEE Trans. Geosci. Remote Sens., vol. 51, no. 1, pp. 425-435, 2012.
<https://doi.org/10.1109/TGRS.2012.2199120>
- [8] M. bayat, M. moradi, "The Presentation of an Algorithm for Interference Detection in the Synthetic Aperture Radar," J. RADAR, vol. 9, no. 1, pp. 107-117, 2021 (In Persian). DOR: 20.1001.1.23454024.1400.9.1.11.3.
- [9] A. Tavakkoli Estahbanati, M. Dehghani, "Evaluation of the proposed methods for phase recovery in conventional radar interferometric method," J. RADAR, vol. 5, no. 3, pp. 1-14, 2018 (In Persian). DOR: 20.1001.1.23454024.1396.5.3.1.9
- [10] A. Ferretti, C. Prati, and F. Rocca, "Nonlinear subsidence rate estimation using permanent scatterers in differential SAR interferometry," IEEE Trans. Geosci. Remote Sens., vol. 38, no. 5, pp. 2202-2212, 2000.
<https://doi.org/10.1109/36.868878>

2004-2005.

http://www.fedoa.unina.it/672/01/PERNA_TESI.pdf

[32] Y. Yang, Y. Pi and R. Li, "Back projection algorithm for spotlight bistatic SAR imaging," CIE Int. Conf. on Radar, pp. 1–4, 2006.

<https://doi.org/10.1109/ICR.2006.343581>

[33] Z. Chen, Z. Zeng, D. Fu, Y. Huang, Q. Li, X. Zhang and J. Wan, "Back-Projection Imaging for Synthetic Aperture Radar with Topography Occlusion," Remote Sens., vol. 15, no. 3, p. 726, 2023.

<https://doi.org/10.3390/rs15030726>

[34] F. Falabella, A. Perrone, T. A. Stabile, and A. Pepe, "Atmospheric phase screen compensation on wrapped ground-based SAR interferograms," IEEE Trans. Geosci. Remote Sens., vol. 60, pp. 1–15, 2022.

<https://doi.org/10.1109/TGRS.2021.3055648>

[35] S. Long, A. Tong, Y. Yuan, Z. Li, W. Wu, and C. Zhu, "New approaches to processing ground-based SAR (gbsar) data for deformation monitoring," Remote Sens., vol. 10, no. 12, p. 1936, 2018. <https://doi.org/10.3390/rs10121936>

Gomez- Garcia, "Application of linear-frequency-modulated continuouswave (LFMCW) radars for tracking of vital signs," IEEE Trans. Microw. Theory Techn., vol. 62, no. 6, pp. 1387–1399, 2014.

<https://doi.org/10.1109/TMTT.2014.2320464>

[27] M. M. Abdul-Atty, A. S. I. Amar, and M. Mabrouk. "C-band FMCW radar design and implementation for breathing rate estimation," Adv. Sci. Technol. Eng. Syst. J., vol. 4, pp. 1299–1307, 2020.

<http://dx.doi.org/10.25046/aj0505156>

[28] B. A. Atayants, V. M. Davydochkin, V. V. Ezerskiy, V. S. Parshin, and S. M. Smolskiy, "Precision FMCW shortrange radar

for industrial applications," Artech House, 2014.

ISBN: 9781608077397

[29] H. Cruz, M. Véstias, J. Monteiro, H. Neto, and R. P. Duarte, "A review of synthetic-aperture radar image formation algorithms and implementations: a computational perspective," Remote Sens., vol. 14, no. 5, pp. 1258, 2022.

<https://doi.org/10.3390/rs14051258>

[30] M. M. Ashry, A. S. Mashaly, and B. I. Sheta, "Comparative analysis between SAR pulse compression techniques," 12th Int. Conf. on Elect. Eng. (ICEENG), pp. 234–240. 2020.

<https://doi.org/10.1109/ICEENG45378.2020.9171747>

[31] I. Tutore, "Airborne synthetic aperture radar," Ph.D. Thesis,