

بررسی قابلیت پایش جابجایی در یک سامانه رادار روزنه مصنوعی زمینی با آنتن چندورودی - چندخروجی

سید بنیامین حسینی^۱، جلال امینی^{۲*}، صفی الدین صفوی نائینی^۳

۱- دانشجوی دکتری سنجش از دور، دانشکده مهندسی نقشه‌برداری و اطلاعات مکانی، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران

۲- استاد دانشکده مهندسی نقشه‌برداری و اطلاعات مکانی، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران

۳- استاد دانشکده برق و کامپیوتر، دانشگاه واترلو کانادا

تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۹/۱۰/۳۰ تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۰/۰۳/۲۶

چکیده

با افزایش کاربرد سنجش از دور راداری و افزایش نیاز به داده‌های متنوع راداری در کاربردهای پایش زمین، مطالعات در زمینه توسعه و ارزیابی سامانه‌های رادار روزنه مصنوعی زمینی (GBSAR) اهمیت بیشتری پیدا کرده است. سامانه‌های GBSAR در مقایسه با سامانه‌های هواپرد و ماهواره‌ای دارای زاویه دید مناسب‌تر نسبت به محدوده پایشی هستند. علاوه بر این، این سامانه‌ها دارای قدرت تفکیک مکانی و زمانی بهتری در مقایسه با سایر سامانه‌ها هستند و هزینه راه‌اندازی کمتری دارند. مقاله پیشرو به توسعه و ارزیابی یک سامانه GBSAR با ترکیب سنجنده رادار با آنتن چندورودی - چندخروجی (MIMO) و تصویربرداری روزنه مصنوعی (MIMO GBSAR) در محیط شبیه‌سازی می‌پردازد. سنجنده راداری مورد بررسی در این مقاله از دو آنتن فرستنده و چهار آنتن گیرنده در باند فرکانسی W با محدوده فرکانس ۷۶-۸۱ گیگاهرتز بهره می‌برد. فشرده‌سازی در راستای آزمون در دو مرحله فرم‌دهی پرتو آنتن مجازی MIMO و سپس فشرده‌سازی تمامی سیگنال‌های راستای آزمون صورت می‌گیرد. طبق نتایج شبیه‌سازی، حالت ترکیبی MIMO GBSAR، باعث بهبود قدرت تفکیک در راستای آزمون از ۴۰۰ میلی رادیان در حالت رادار MIMO به ۴۹ میلی رادیان بوده است. همچنین در مقایسه با حالت رادار روزنه مصنوعی مونو استاتیک، تعداد گام‌های مورد نیاز در حالت ترکیبی از ۹۲۰ گام به ۱۱۵ گام در ریلی به طول ۹۰ سانتی‌متر کاهش یافت که بیانگر قابلیت سامانه MIMO GBSAR به اخذ داده با نرخ تصویربرداری بالاتر است. در بررسی پردازش تداخل‌سنجی و قابلیت پایش جابجایی سامانه پیشنهادی در محیط شبیه‌سازی آزمایشی صورت‌گرفت که طی آن، هدفی با نرخ جابجایی ۰/۱ میلی‌متر بر اپوک در نظر گرفته و فرایند ایجاد سیگنال خام و پردازش تداخل‌سنجی آن شبیه‌سازی گردید و تصویربرداری صورت‌گرفت. طی این آزمایش نرخ جابجایی هدف متحرک در هر اپوک ۰/۱ میلی‌متر در نظر گرفته شد. طی این آزمایش، دقت برآورد جابجایی سنجنده در مقیاس میکرو متر بدست آمد. بطوری که مقادیر شدت خطا از سطح ۱/۵ میکرومتر پایین‌تر و بطور میانگین حدود ۰/۳۲ میکرومتر برآورد شدند.

کلید واژه‌ها: فرم‌دهی پرتو، تصویربرداری رادار روزنه مصنوعی، تداخل‌سنجی راداری، طول موج میلی‌متری، باند W .

* نویسنده مکاتبه کننده: تهران، تقاطع خیابان کارگر شمالی و جلال آل احمد، دانشکده فنی دانشگاه تهران، دانشکده نقشه‌برداری و اطلاعات مکانی، گروه فتوگرامتری و

سنجش از دور.

تلفن: ۰۲۱۶۱۱۴۳۷۸

Email: jamini@ut.ac.ir

۱- مقدمه

سنجش‌ازدور راداری از جمله فناوری‌های شناخته‌شده در زمینه پایش زمین به‌منظور حل مسائل عمرانی و محیط زیستی است [۱ و ۲]. از این‌رو با گسترش روزافزون کاربردهای سنجش‌ازدور راداری و افزایش نیاز به این فناوری، مطالعات در زمینه ارائه سامانه‌های نوین نیز افزایش پیدا کرده است.

در سنجش‌ازدور راداری، عموماً سامانه‌های هواپرد و ماهواره‌ای به‌همراه پردازش رادار روزنه مصنوعی (SAR^1) کاربرد و قدمت بیشتری را دارا هستند. با این وجود، در سال‌های اخیر سامانه‌های رادار روزنه مصنوعی زمینی ($GBSAR^2$) به‌علت قابلیت‌هایی که در حل محدودیت‌های سایر سامانه‌های ذکرشده دارند، توجهات زیادی را جلب کرده‌اند [۳ و ۴]. به‌عنوان مثال در مناطقی که سامانه‌های هواپرد یا ماهواره‌ای زاویه دید مناسبی ندارند، می‌توان از سامانه $GBSAR$ با جایگیری مناسب، بهره‌برد. این سامانه‌ها عموماً دارای ساختار ساده‌تری هستند و با قطعات کمتر و کوچک‌تری ساخته می‌شوند. علاوه‌براین، با توجه به کاربرد عمده آن‌ها برای بردهای نسبتاً کوتاه، سنجنده استفاده‌شده در $GBSAR$ معمولاً از سیگنال‌های پیوسته با مدولاسیون فرکانسی ($FMCW^3$) استفاده می‌کند که باعث کاهش شدید هزینه و ابعاد سیستم می‌شود. از دیگر ویژگی‌های $GBSAR$ ، کاهش نرخ اخذ داده به کسری از ساعت است. این ویژگی باعث می‌شود تا مناطق با جابجایی سریع را بطور پیوسته پایش‌نمود. علاوه‌براین، مانع کاهش هم‌دوسی بین داده‌های سری-زمانی و جلوگیری از وقوع فاز مبهم در مسائل تداخل-سنجی راداری می‌شود [۵ و ۶].

توسعه نخستین سامانه $GBSAR$ در کاربرد سنجش-ازدور به سال ۱۹۹۹ برمی‌گردد که توسط آن محققین

به پایش جابجایی سازه‌های باستانی در کشور ایتالیا پرداختند. در این سامانه سنجنده رادار بر یک ریل مکانیکی قرارگرفته و با حرکت در مسیر ریل، روزنه مصنوعی در راستای عمود بر برد ایجاد می‌گردد [۷]. در این سال‌ها اغلب سامانه‌های $GBSAR$ توسعه‌یافته با هدف کاربرد پایش جابجایی بوده‌اند. ایگلسیاس و همکاران در مقاله‌ای در سال ۲۰۱۴ به توسعه سامانه $GBSAR$ در باند X به‌منظور پایش فرونشست شهری پرداختند. این سامانه با افزودن قابلیت قطبیدگی باعث بهبود هم‌دوسی بین داده‌های سری‌زمانی و بهبود در تخمین فرونشست منطقه شده‌است [۸]. مقاله‌ای به نویسندگی کارونائیلاک و همکاران، با بهره‌گیری از سامانه $GBSAR$ سریع به پایش زمین‌رانش در منطقه معدنی می‌پردازد. این سامانه با نرخ تصویربرداری ۴ ثانیه امکان ثبت جابجایی‌های سریع را فراهم می‌کند [۹].

روش‌های شکل‌دهی دیجیتال پرتو (DBF^4) در سال‌های اخیر پیشرفت و کاربرد فراوانی عرصه رادار داشته‌اند. استفاده از این رویکرد در آنتن‌های آرایه فازی می‌تواند باعث بهبود پرتوی آنتن گردد. آنتن‌های چندورودی - چندخروجی ($MIMO^5$) نوعی از آنتن‌های آرایه فازی با قابلیت DBF هستند؛ با این تفاوت که هندسه قرارگیری آنتن‌ها در این حالت از قانون نایکوئیست^۶ پیروی نمی‌کند. همین امر باعث می‌شود تا تعداد آنتن‌های مورد نیاز نیز کاهش‌یابد [۱۰]. سامانه $MELISSA$ نخستین سامانه زمینی راداری با قابلیت $MIMO$ بود که در کاربردهای سنجش‌ازدوری توسعه پیدا کرد [۱۱]. در این سامانه، دوازده آنتن فرستنده و گیرنده با هندسه $MIMO$ ، جایگزین ریل مکانیکی شده‌اند و بدین ترتیب از ترکیب این آنتن‌ها، تفکیک‌پذیری زاویه با قدرت ۲۱ میلی‌رادیان فراهم می‌شود. عدم

^۴ Digital Beamforming (DBF)^۵ Multiple-Input Multiple-Output (MIMO)^۶ Nyquist^۱ Synthetic aperture radar (SAR)^۲ Ground-Based SAR (GBSAR)^۳ Frequency modulated continuous wave (FMCW)

۲- مبانی تئوری

این قسمت به مبانی تئوری مورد نیاز به منظور پردازش سیگنال سیستم‌های راداری می‌پردازد. ابتدا معادله اساسی رادار به منظور تعیین برد بیشینه رادار بیان می‌شود. در ادامه، مراحل پردازشی لازم جهت رسیدن به تصویر راداری از سیگنال خام رادار روزنه مصنوعی زمینی با آنتن *MIMO* بیان می‌شود. در نهایت نیز، طریقه بازیابی جابجایی از طریق اختلاف فاز تداخل-سنجی بیان می‌شود.

۲-۱- معادله اساسی رادار

همواره در طراحی و یا بررسی عملکرد یک سنجنده راداری، معادله اساسی رادار نقش مهمی را ایفا می‌کند. در این معادله ارتباط بین تمامی اجزای سنجنده رادار، محیط انتشار، و هدف بازتابی بیان می‌شود. رابطه (۱) بیشترین برد قابل کشف توسط سنجنده رادار را برای هدف بازتابنده بیان می‌کند که به آن معادله اساسی رادار نیز گفته می‌شود [۱۵].

$$R_{\max}^4 = \frac{NPG G_{\text{Tx}} G_{\text{Rx}} \lambda_c^2 \sigma}{(4\pi)^3 k T_0 F_n B_n (SNR)_1 L_s} \quad \text{رابطه (۱)}$$

علائم استفاده شده در رابطه (۱) موارد زیر هستند:

N : تعداد پالس‌های ارسالی

P_t : توان بیشینه ارسالی به واحد وات

$G_{\text{Tx}}, G_{\text{Rx}}$: به ترتیب بهره آنتن ارسالی و دریافتی

λ_c : طول موج حامل

σ : سطح مقطع راداری هدف مدنظر (واحد متر مربع)

$k = 1.38 \times 10^{-23} \text{ (J/deg)}$: ثابت بولتزمن

T_0 : دمای استاندارد

F_n : عدد نویز

B_n : پهنای باند نویز

$(SNR)_1$: نسبت سیگنال به نویز در یک پالس

L_s : ضریب تلف سیستم

$R_{\max}$: برد بیشینه

در رابطه (۱) ارتباط بین تمام اجزای اصلی تشکیل-دهنده یک سنجنده رادار بیان می‌شود. بنابراین، بررسی این رابطه اهمیت بالایی در بحث طراحی و یا ارزیابی

استفاده از ریل مکانیکی باعث می‌گردد تا نرخ تصویربرداری بسیار بالا رود. در پژوهش‌های اخیر نیز سامانه‌هایی با ترکیب قابلیت *MIMO* و پردازش حسگری فشرده معرفی گردیدند [۱۲ و ۱۳]. به عنوان مثال سامانه توسعه یافته توسط پیراچینی و میچینسی، با استفاده از ۴ آنتن فرستنده و ۴ آنتن گیرنده و با کمک پردازش حسگری فشرده، به تفکیک پذیری ۵۰ میلی رادیان در راستای آزیموت می‌رسد [۱۲]. با این-حال، برای رسیدن به تفکیک پذیری بالا، نیاز به تعداد آنتن‌های بسیاری است که این امر می‌تواند منجر به افزایش هزینه شود. از این رو در این مقاله به بررسی ترکیبی آنتن *MIMO* با استفاده از ریل مکانیکی (*MIMO GBSAR*) پرداخته می‌شود تا علاوه بر کسب تفکیک پذیری بالا در راستای عمود برد، بتوان تعداد گام‌های مورد نیاز را کاهش و نرخ تصویربرداری را بهبود بخشید. از جمله مراحل مهم در توسعه یک سامانه، ارزیابی و بررسی پارامترها و قابلیت‌های آن سامانه در محیط شبیه سازی است [۱۴]. از این رو، هدف از ارائه این مقاله توسعه و سپس بررسی و ارزیابی ترکیب آنتن *MIMO* با تصویربرداری روزنه مصنوعی به منظور توسعه سامانه *MIMO GBSAR* در محیط شبیه سازی است. بدین منظور، پارامترهای یک رادار *MIMO* با طول موج میلیمتری و سوار بر ریل مکانیکی از لحاظ تفکیک-پذیری و کشف اهداف و در نهایت در تخمین جابجایی با روش تداخل سنجی، مورد بررسی و ارزیابی قرار می-گیرد.

بخش‌های بعدی مقاله بدین شرح است: بخش ۲ مبانی تئوری مربوط به سامانه‌های رادار و مراحل پردازشی سیگنال *MIMO GBSAR* به منظور تشکیل تصویر و پایش جابجایی را بیان می‌کند. در بخش ۳ پارامترهای سامانه پیشنهادی مورد بررسی قرار می‌گیرند و سپس نتایج شبیه سازی تصویر راداری و پایش جابجایی ارائه و بررسی می‌شوند. در نهایت، در بخش ۴ نتیجه گیری ارائه می‌گردد.

$$s_r = \exp(j 2\pi f_c (t - t_d) + j \pi c_r (t - t_d)^2)$$

علت تاخیر صورت گرفته، مسیر حرکت موج از لحظه ارسال تا برخورد به هدف و بازگشت به سمت گیرنده است. اگر موقعیت آنتن گیرنده و فرستنده را یکسان در نظر بگیریم، مقدار تاخیر زمانی t_d معادل با رابطه (۴) خواهد بود.

$$t_d = \frac{2R}{c} \quad \text{رابطه (۴)}$$

در رابطه (۴) R معادل فاصله هدف تا سنجنده و c برابر با سرعت نور است [۱۷].

آشکارسازی اهداف موجود در سیگنال دریافتی رادار با روش فشرده سازی برد^۴ صورت می گیرد. طی این فرایند، کورلیشن^۵ سیگنال دریافتی با سیگنال ارسالی یا مرجع محاسبه می شود. به این فرایند، فیلتر منطبق^۶ نیز گفته می شود که طی انجام آن، چرپ سیگنال دریافتی حذف می گردد و سیگنال دیچرپ^۷ ایجاد می گردد [۱۸]. معادله سیگنال دیچرپ بصورت رابطه (۵) بیان می گردد.

$$s_b = \exp(j 2\pi (c_r t_d t + f_c t_d)) \quad \text{رابطه (۵)}$$

در رابطه (۵) s_b بیانگر سیگنال دیچرپ شده است که اصطلاحاً به آن سیگنال میانی^۸ یا ضربه^۹ نیز گفته می شود.

در سیستم های FMCW عموماً فرایند فشرده سازی برد بصورت سخت افزاری صورت می گیرد. شکل (۱) ساختار متداول یک سیستم رادار FMCW را نمایش می دهد. در این سیستم، سیگنال دریافتی توسط میکسر^{۱۰} با یک نسخه از سیگنال ارسالی ترکیب می

قابلیت های یک سنجنده راداری خواهد داشت. پس از طراحی و ساخت سنجنده رادار تمامی پارامترهای بیان شده در معادله رادار از قبیل بهره آنتن های گیرنده و فرستنده، عدد نویز، تلف سیستم، نسبت سیگنال به نویز، پهنای باند نویز، طول موج حامل، و توان ارسالی معلوم هستند. در نتیجه، می توان بیشترین قابلیت سنجنده در کشف هدفی با سطح مقطع راداری معلوم را محاسبه نمود.

۲-۲- پردازش سیگنال رادار (راستای برد)

سیگنال عملیاتی رادار می تواند بصورت پالس، و یا پیوسته تولید شود. در بین این دو نوع، سیگنال های پیوسته کاربرد و قابلیت های بهتری را برای سیستم های زمینی برخوردارند و استفاده از سیگنال پیوسته با مدولاسیون فرکانس در این نوع از سیستم ها بسیار متداول است. به سیگنال مدوله فرکانسی در طول یک تناوب به مدت زمان τ ، اصطلاحاً سیگنال چرپ^۱ و یا سویپ^۲ گفته می شود. در سیگنال چرپ، فرکانس سیگنال بصورت تابعی از زمان از فرکانس آغازین f_1 تا فرکانس پایانی f_2 در حال تغییر است. رابطه (۲) معادله سیگنال ارسالی FMCW با مدولاسیون خطی را بیان می کند.

$$s_t = \exp(j 2\pi f_c t + j \pi c_r t^2) \quad \text{رابطه (۲)}$$

در رابطه (۲)، s_t بیانگر سیگنال ارسالی، f_c بیانگر فرکانس حامل (آغازین)، c_r بیانگر نرخ (شیب) تغییر فرکانس^۳ و $t \in [0, \tau]$ بیانگر متغیر زمان هستند. در این حالت، فرکانس و فاز سیگنال به ترتیب تابعی خطی و سهموی از زمان هستند. سیگنال بازتابی (s_r) نیز، در حالت ایده آل، رابطه ای مشابه معادله سیگنال ارسالی دارد (رابطه (۳))؛ با این تفاوت که به اندازه t_d تاخیر یافته است [۱۶].

رابطه (۳)

^۴ Range compression

^۵ Correlation

^۶ Matched filter

^۷ Dechirped signal

^۸ Intermediate signal

^۹ Beat signal

^{۱۰} Mixer

^۱ Chirp signal

^۲ Sweep

^۳ Chirp-rate (slope)

$$R = \frac{cf_b \tau}{2B} = \frac{cf_b}{2c_r} \quad \text{رابطه (۶)}$$

در رابطه (۶)، f_b بیانگر فرکانس ضربه (میانی) هدف پراکنده گر بعد از دیچرپ کردن سیگنال دریافتی؛ و B بیانگر پهنای باند سیگنال ارسالی است که از اختلاف بین فرکانس بیشینه و کمینه محاسبه می گردد.

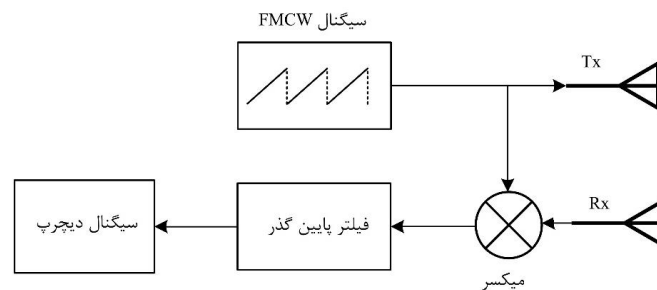
قدرت تفکیک اهداف در راستای برد از رابطه (۷) محاسبه می گردد.

$$\rho_r = \frac{c}{2B} \quad \text{رابطه (۷)}$$

از رابطه (۷) می توان دریافت که قدرت تفکیک رادار در راستای برد، تنها به پارامتر پهنای باند آن وابسته است.

و پس از اعمال یک فیلتر پایین گذر، سیگنال دیچرپ شده ذخیره می گردد [۱]. فیلتر ذکر شده توسط پهنای باند دیچرپ تعیین می گردد تا فقط اهداف با فرکانس های پایین تر را عبور دهد. علت وجود این فیلتر کاهش نیاز به مبدل آنالوگ به دیجیتال با نرخ نمونه برداری زیاد است.

سیگنال دیچرپ ذخیره شده یک سیگنال سینوسی در حوزه زمان خواهد بود و پس از یک تبدیل فوری فرکانس های مربوط به اهداف بازتابی، آشکار می گردند [۱۹]. در نتیجه، برد اهداف از رابطه (۶) محاسبه می شود.

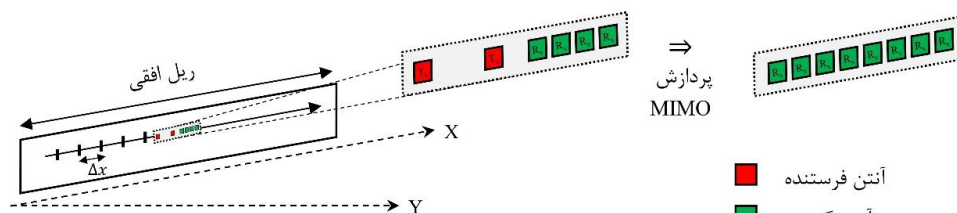


شکل ۱: بلوک دیاگرام سنجنده رادار با سیگنال FMCW

را با استفاده از آنتن $MIMO$ نمایش می دهد. همان طور که مشاهده می شود، با وجود آنتن $MIMO$ ، دو مرحله پردازشی در راستای آزمون مورد نیاز است که شامل شکل دهی پرتو آنتن $MIMO$ و سپس فشردگی سیگنال های تهیه شده در راستای آزمون یا همان ریل مکانیکی است.

۲-۳- پردازش سیگنال آزمون (راستای عمود بر برد)

به منظور رسیدن به تفکیک پذیری در راستای آزمون، نیاز به ایجاد روزنه مصنوعی با حرکت سنجنده رادار در راستای عمود بر برد رادار است. شکل (۲) بصورت گرافیکی سامانه رادار روزنه مصنوعی زمینی مورد نظر



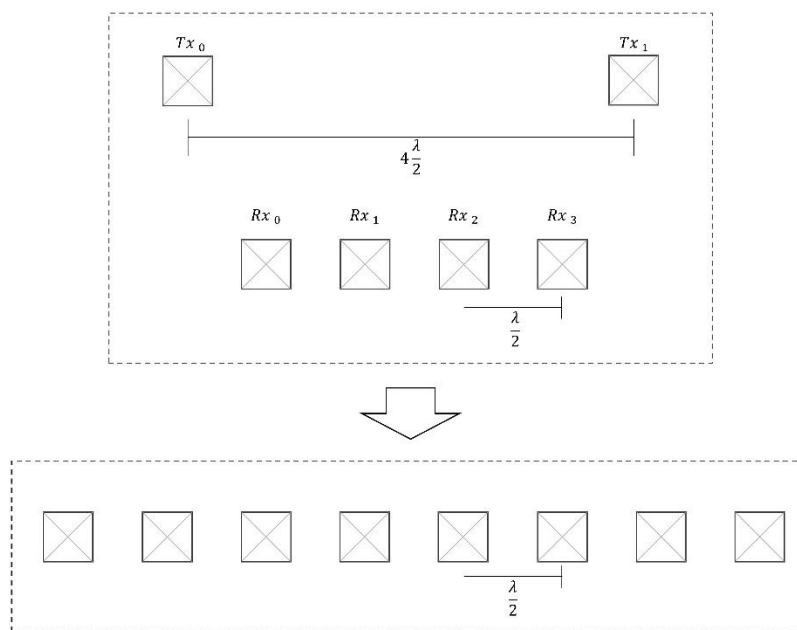
شکل ۲: نمایش گرافیکی $MIMO$ GBSAR

خواهد شد. شکل (۳) نمونه‌ای از هندسه قرارگیری آنتن‌ها در صورت حضور ۴ گیرنده و ۲ فرستنده را نمایش می‌دهد. در این حالت، هر آنتن مجازی ایجاد شده دارای یک شیفت فاز نسبت به مرکز آرایه خواهد بود که بصورت تابعی از زاویه آزمون هدف و فاصله قرارگیری آنتن‌ها در مجاور هم است (رابطه (۸)).

$$\phi_{\text{shift}} = 2\pi \left(\frac{l \cdot \sin \theta}{\lambda} \right) i; \frac{-MN}{2} \leq i \leq \frac{MN}{2}$$

رابطه (۸)

در حالت معمول و متداول در رادارهای MIMO در صورتی که N آنتن گیرنده (یا فرستنده) در فاصله نصف طول موج سیگنال $\frac{\lambda}{2}$ (فاصله نایکوئیست) از هم قرار گرفته باشند و همین‌طور M آنتن فرستنده (یا گیرنده) وجود داشته باشد که در فاصله $\frac{\lambda}{2}$ از هم باشند، آنگاه ترکیب این آنتن‌ها باعث ایجاد آرایه‌ای مجازی متشکل از $N \times M$ آنتن به اندازه $\frac{\lambda}{2}$ NM



شکل ۳: فاصله قرارگیری آنتن‌های فرستنده و گیرنده در یک سنجنده رادار MIMO که باعث ایجاد آرایه‌ای مجازی با تعداد بیشتری آنتن می‌شود

سنجنده تا هدف را در هر گام از طریق رابطه (۹) محاسبه نمود.

$$R(x) \cong R_0 - x \sin \theta \quad \text{رابطه (۹)}$$

در نتیجه، با جایگذاری رابطه (۹) در رابطه (۵)، سیگنال دریافتی از هدف در گام بصورت رابطه (۱۰) بیان می‌شود:

شکل (۴) هندسه تصویربرداری SAR در سنجنده زمینی در صفحه دوبعدی را نمایش می‌دهد. در این حالت سنجنده رادار در مسیری مستقیم حرکت می‌کند و در نتیجه، هر هدف نقطه‌ای دارای بردی متفاوت در هر گام رادار خواهد بود. با توجه به هندسه بیان شده، برد هدف نقطه‌ای (x_p, y_p) را در هر گام از رابطه $R(x) = \sqrt{x^2 + R_0^2 - 2R_0 x \sin \theta}$ محاسبه می‌شود. با خطی‌سازی این رابطه توسط بسط تیلور، می‌توان فاصله

رابطه (۱۰)

$$s_b = \exp\left(j \frac{4\pi}{\lambda} R(x)\right) \cong \exp\left(j \frac{4\pi}{\lambda} (R_0 - x \sin \theta)\right)$$

طبق رابطه (۱۰)، اختلاف فاز ایجادشده بین دو سیگنال دریافتی از دو گام پیاپی سنجنده، که متعلق به یک هدف است را می‌توان بصورت رابطه (۱۱) تعریف کرد.

$$\Delta\phi = \frac{4\pi}{\lambda} \Delta x \sin \theta \quad \text{رابطه (۱۱)}$$

در رابطه (۱۱) معادل گام‌های حرکتی سنجنده بر روی ریل مکانیکی است. با درنظر گرفتن شرط $|\Delta\phi| \leq \pi$ ، حد اندازه گام سنجنده بصورت رابطه (۱۲) خواهد بود.

$$\Delta x \leq \frac{\lambda}{4 \sin \theta} \quad \text{رابطه (۱۲)}$$

همان‌طور که اشاره شد، استفاده از آنتن MIMO باعث می‌شود تا آنتن مجازی بزرگ‌تری به طول $D = NM \lambda / 2$ ایجاد گردد. حال اگر θ را معادل نصف پهنای بیم آنتن مجازی ایجادشده در نظر بگیریم، مقدار

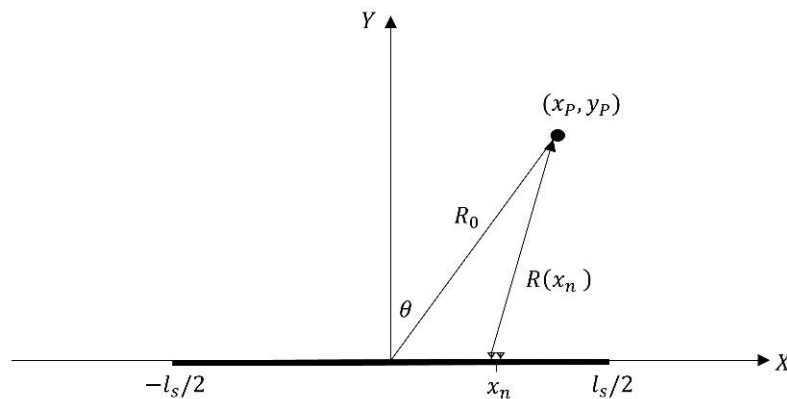
آن معادل $\theta = \lambda / 2D$ خواهد بود. در نتیجه، با در نظر گرفتن اینکه آنتن مجازی بطول D ، پهنای پرتوی چندبرابر باریکتر از آنتن فیزیکی خواهد داد، می‌توان رابطه (۱۲) را بصورت تقریبی بر اساس طول آن مجازی MIMO بصورت رابطه (۱۳) بیان نمود.

$$\Delta x \leq \frac{\lambda}{4 \sin \theta} \cong \frac{D}{2} = \frac{NM \lambda}{4} \quad \text{رابطه (۱۳)}$$

در نتیجه طبق رابطه (۱۳) می‌توان دریافت که فاصله بین گام‌ها را می‌توان براساس تعداد آنتن‌های گیرنده و فرستاده افزایش داد. در نهایت فشرده‌سازی در راستای آزمون نیز مشابه راستای برد با تبدیل فوریه امکان پذیر می‌شود و در نهایت، اهداف مشابه راستای برد در راستای آزمون با قدرت تفکیک معادل رابطه (۱۴) از هم تفکیک می‌شوند.

$$\rho_w = \frac{\lambda}{2L_s} \quad \text{رابطه (۱۴)}$$

در رابطه (۱۴) L_s و ρ_w به ترتیب بیانگر طول روزنه مصنوعی و قدرت تفکیک در راستای آزمون به رادیان هستند [۱۷].



شکل ۴: هندسه تصویربرداری روزنه مصنوعی در سیستم رادار زمینی

۴-۲- پردازش تداخل سنجی رادار

در صورتی که از فاز نویزی صرف نظر کنیم، مدل فاز سیگنال دیچرپ دریافتی را می توان بصورت رابطه (۱۵) بازنویسی کرد [۷ و ۲۰].

$$\phi = \frac{4\pi R}{\lambda} + \phi_{scatt} \quad \text{رابطه (۱۵)}$$

در رابطه (۱۵)، ϕ_{scatt} مربوط به فاز پراکندگی سیگنال بازگشتی است که به ماهیت و جنس هدف بازتابنده وابسته است. در صورتی که در دو زمان t_1 و t_2 سیگنال رادار ارسال و دریافت شود؛ آنگاه با استفاده از اختلاف فاز بین دو سیگنال بازتابی می توان میزان جابجایی را برآورد نمود. در صورتی که ϕ_{scatt} را در دو سیگنال بازتابی یکسان در نظر بگیریم، رابطه اختلاف فاز ایجاد شده را می توان بصورت رابطه (۱۶) بیان نمود [۵].

$$\Delta\phi_{21} = \phi_2 - \phi_1 = \frac{4\pi\Delta R_{21}}{\lambda} \quad \text{رابطه (۱۶)}$$

در رابطه (۱۶)، $\Delta\phi_{21}$ بیانگر اختلاف فاز و ΔR_{21} بیانگر جابجایی ایجاد شده است. با ایجاد معکوس رابطه بالا،

میزان جابجایی بین دو لحظه t_1 و t_2 بصورت رابطه (۱۷) محاسبه می شود.

$$\Delta R_{21} = R_2 - R_1 = \frac{\lambda\Delta\phi_{21}}{4\pi} \quad \text{رابطه (۱۷)}$$

۳- سامانه پیشنهادی، نتایج و بحث

در این بخش سامانه GBSAR توسعه یافته با ترکیب آنتن MIMO و تصویربرداری روزنه مصنوعی، در محیط شبیه سازی مورد ارزیابی قرار می گیرد. ابتدا مشخصات این سامانه، از جمله پارامترهای سنجنده رادار آن بیان می شوند و براساس معادله اساسی رادار مورد ارزیابی قرار می گیرد. در ادامه، قابلیت تصویربرداری این سامانه بررسی و با حالات متداول دیگر مقایسه و ارزیابی می شود. در نهایت، نیز قابلیت تداخل سنجی سنجنده مورد نظر به منظور پایش و کشف جابجایی ارزیابی می شود.

۳-۱- مشخصات سیستم مورد بررسی

جدول (۱) پارامترهای اساسی این سنجنده را بیان می کند.

جدول ۱: پارامترهای اساسی سامانه MIMO GBSAR

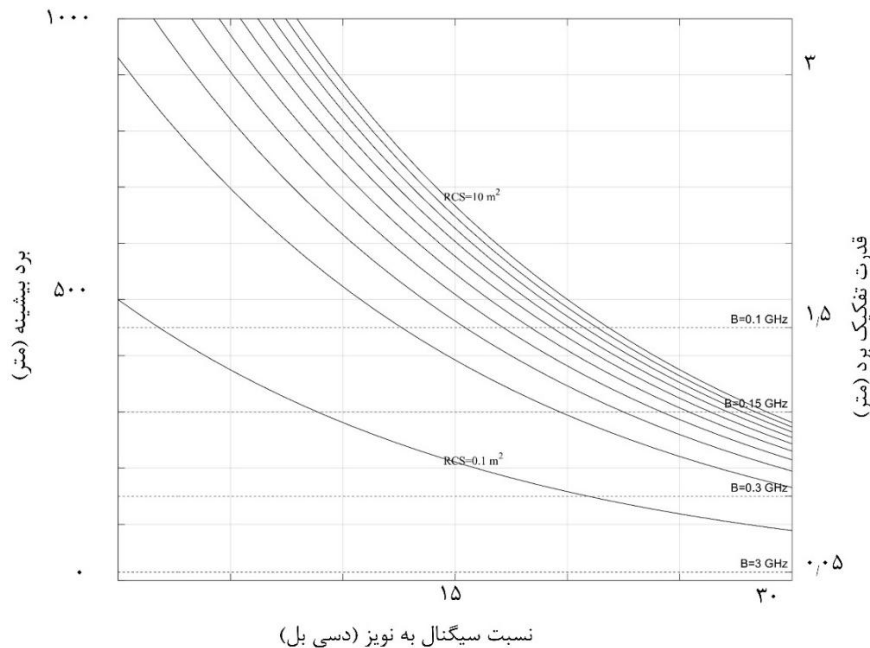
پارامتر	مقدار
توان فرستنده	۱٫۵ میلی وات
عدد نویز	۱۵ دسی بل
محدوده فرکانس حامل	۷۶-۸۱ گیگاهرتز
پهنای باند سیگنال	تا ۴ گیگاهرتز
پهنای باند میانی	۵ مگاهرتز
بهره آنتن فرستنده	۳۰ دسی بل
بهره آنتن گیرنده	۳۰ دسی بل
طول چرپ	۶۰ میکرو ثانیه
تعداد فرستنده	۲
تعداد گیرنده	۴
طول ریل	۹۰ سانتی متر

سنجده می‌شود.

طبق نمودار شکل (۵) می‌توان پارامتر قدرت تفکیک برد سنجده را برای کاربرد مورد نظر تنظیم نمود. به عنوان مثال، در صورتی که قصد پایش هدفی با سطح مقطع راداری ۱۰ مترمربع با نسبت سیگنال به نویز ۱۵ دسی بل مدنظر باشد؛ بطور معمول سنجده می‌تواند این نوع هدف را تا برد ۶۸۰ متر کشف کند (منحنی‌های معادله رادار). با این حال، پارامتر برد بیشینه ذخیره شده (محورهای افقی) نشان‌دهنده این است که هدف در چه فاصله‌ای باید قرار داشته‌باشد تا محدوده پهنای باند دیچرپ سنجده قرار گرفته و در سیگنال ذخیره شده نهایی دیده شود. در نتیجه، طبق این نمودار می‌توان، با توجه به کاربرد مورد نظر و منطقه مورد مطالعه، محل قرارگیری سامانه GBSAR را پس از تنظیم پارامترها تعیین نمود.

محدوده فرکانسی این سنجده در باند W قرارداد و فرکانس حامل آن در محدوده ۷۶-۸۱ گیگاهرتز قابل تنظیم است که باعث ایجاد طول موجی به اندازه حدود ۴ میلی‌متر می‌شود. در این سنجده بخش فرستنده دارای توان ۱٫۵ میلی‌وات است. سیگنال ایجادشده بصورت FMCW با طول چرپ ۶۰ میکروثانیه می‌باشد و امکان تعیین پهنای باند فرکانسی تا ۴ گیگاهرتز وجود دارد. این سیستم از ۲ آنتن فرستنده و ۴ آنتن گیرنده تشکیل شده که قابلیت پردازش MIMO و ایجاد ۸ آنتن مجازی را میسر می‌کند. هریک از آنتن‌های گیرنده و فرستنده دارای بهره ۳۰ دسی بل هستند. همچنین عدد نویز ۱۵ دسی بل برای گیرنده در نظر گرفته شده است. پهنای باند میانی (B_{IF}) در نظر گرفته شده در این سیستم ۵ مگاهرتز است. بنابراین، پس از فرایند دیچرپینگ سیگنال دریافتی، تنها اهداف با فرکانس کمتر از ۵ مگاهرتز شناسایی می‌شوند. با جایگذاری پارامترهای موجود در جدول (۱) در معادله اساسی رادار (رابطه (۱)) نمودار شکل (۵) برای سامانه مورد بررسی بدست می‌آید. این نمودار بطور کامل و جامع به بررسی برد بیشینه قابل شناسایی توسط این سنجده می‌پردازد. در این نمودار هر یک خطوط منحنی مربوط به بیشترین برد قابل کشف سنجده براساس معادله رادار برای هدفی با سطح مقطع راداری (RCS^1) مشخص و برای نسبت سیگنال به نویزهای متفاوت است. خطوط افقی در این نمودار نیز مربوط به برد بیشینه ذخیره شده توسط سنجده است که این مقدار وابسته به پهنای باند دیچرپ سیگنال و قدرت تفکیک در راستای برد است. برد بیشینه ذخیره شده برای هر قدرت تفکیک مکانی مشخص، با جایگذاری $F_b = B_{IF}$ در رابطه (۶) بدست می‌آید. طبق این رابطه و همان‌طور که از شکل نیز می‌توان دریافت، بهبود قدرت تفکیک در راستای برد باعث کاهش برد بیشینه ذخیره شده در

¹ Radar Cross Section (RCS)



شکل ۵: نمودار استخراج برد بیشینه براساس پارامترهای سامانه GBSAR موردنظر

حالات عنوان شده را بیان می کند. در این شبیه سازی، فرکانس حامل سنجنده ۷۷ گیگاهرتز در نظر گرفته شده که با پهنای باند ۶۰۰ مگاهرتز مدوله می شود. موقعیت قرارگیری مرکز سنجنده GBSAR در مبدا مختصات محلی در نظر گرفته شده است. همچنین دو هدف نقطه ای با سطح مقطع راداری ۱۰ دسی بل با فاصله ۱۰ متر در راستای عمود بر برد در نظر گرفته شده اند. از یکدیگر در راستای عمود بر برد در نظر گرفته شده اند. همان طور که جدول (۱) بیان می کند، سنجنده رادار مورد بررسی از ۲ آنتن فرستنده و ۴ آنتن گیرنده با هندسه MIMO تشکیل شده که در نهایت باعث ایجاد ۸ آنتن مجازی با فواصل $\frac{\lambda}{2}$ از هم می گردد. در نتیجه، در زمان تشکیل تصویر با حالت ترکیبی MIMO و ریل می توان بجای گام هایی به اندازه $\frac{\lambda}{4}$ از گام های بلندتری به اندازه 2λ بهره گرفت.

۳-۲- نتایج پردازش سیگنال و تشکیل تصویر

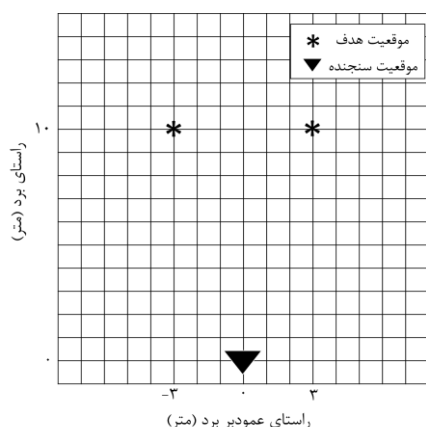
همان طور که در رابطه (۱۲) بیان گردید، فاصله نمونه برداری در راستای عمود بر برد (گام های حرکتی سنجنده بر ریل) در سامانه های متداول GBSAR با یک فرستنده و گیرنده (سامانه های مونواستاتیک^۱) برابر با $\Delta x = \frac{\lambda}{4}$ است. در ادامه نیز بیان شد که با استفاده از آنتن MIMO می توان فاصله نمونه برداری را طبق رابطه (۱۳) افزایش داد. بنابراین، این قابلیت باعث می گردد تا بدون نقض قضیه نایکوئیست در راستای عمود بر برد، بتوان فاصله گام های حرکتی را افزایش و مدت زمان اسکن را کاهش داد.

در این زیربخش، نتایج تصاویر حاصل در سه حالت MIMO ثابت، رادار روزنه مصنوعی متداول مونواستاتیک، و ترکیب رادار روزنه مصنوعی با رادار MIMO مورد بررسی قرار می گیرند. جدول (۲) هندسه و خصوصیات محیط شبیه سازی به منظور تصویربرداری در

^۱ Monostatic

جدول ۲: پارامترهای شبیه‌سازی تصویربرداری در حالت رادار روزنه مصنوعی روی ریل خطی

پارامتر	مقدار
فرکانس حامل (GHz)	۷۷
پهنای باند (GHz)	۰/۶
قدرت تفکیک مکانی (m)	۰/۲۵
تعداد آنتن‌های مجازی در حالت MIMO	۸
طول ریل (m)	۰/۹
موقعیت قرارگیری سنجنده‌های رادار در مختصات سه‌بعدی (X,Y,Z) (m)	(۰،۰،۰)
موقعیت قرارگیری هدف در مختصات سه‌بعدی (X,Y,Z) (m)	(۱۰، -۳، ۰) و (۱۰، ۳، ۰)
سطح مقطع راداری هر هدف (dB)	۱۰



هندسه قرارگیری اهداف و سنجنده

باریک‌تر شده و همچنین اثر لوب‌های کناری نیز بسیار کاهش یافته است.

در مقایسه دو حالت ایجاد روزنه مصنوعی، در حالت ترکیبی حرکت مکانیکی سنجنده MIMO بر روی ریل، علاوه بر حفظ قدرت تفکیک مکانی بالای حالت مونواستاتیک، تعداد گام‌های مورد نیاز نیز به اندازه هشت برابر کاهش یافته است.

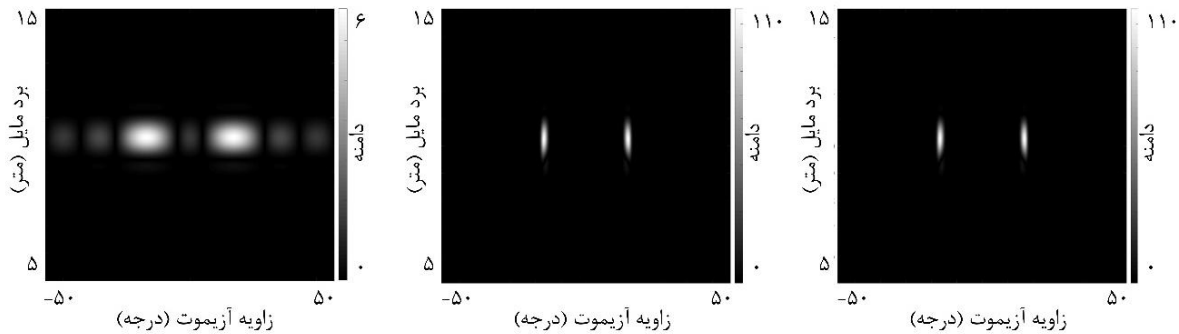
در نهایت، جدول (۳) هر سه حالت تصویربرداری را بصورت عددی مقایسه می‌کند. در حالت متداول رادار روزنه مصنوعی مونواستاتیک برای رادار میلیمتری باند W نیاز به ۹۲۰ گام حرکتی در ریلی به طول ۹۰

در شکل (۶) مقایسه تصویری هر یک از حالات تصویربرداری رادار روزنه مصنوعی نمایش داده می‌شود. در حالت استفاده از تنها رادار MIMO (بدون حرکت روی ریل)، به علت تعداد کم آنتن‌های مجازی دو هدف در راستای آزمون بسیار پهن‌تر دیده می‌شوند. همین‌طور، تداخل لوب‌های کناری^۱ اهداف باعث ایجاد لوب‌های قوی در اطراف اهداف شده است. در حالی که، در دو حالت دیگر با حرکت سنجنده بر ریل مکانیکی و ایجاد روزنه مصنوعی بلندتر، پهنای اهداف بسیار

^۱ Sidelobe

درحالی که، حالت رادار *MIMO* با ۸ آنتن مجازی دارای قدرت تفکیکی به اندازه ۴۰۰ میلی رادیان است.

سانتی متر است. درحالی که، با ترکیب رادار *MIMO* این تعداد به ۱۱۵ کاهش می یابد. در هر دو حالت، قدرت تفکیک آزمون بدست آمده ۴/۹ میلی رادیان است.



شکل ۶: شبیه سازی تصاویر رادار روزنه مصنوعی ایجادشده در سه حالت رادار *MIMO* (سمت چپ)، حالت حرکت مکانیکی رادار مونواستاتیک روی ریل (وسط)، حالت ترکیبی حرکت رادار *MIMO* بر روی ریل مکانیکی (سمت راست)

جدول ۳: مقایسه حالات تصویربرداری رادار روزنه مصنوعی

حالت تصویربرداری	اندازه گام	تعداد گام (ریل ۹۰ سانتی متر)	قدرت تفکیک آزمون ($mrad$)
رادار <i>MIMO</i>	-	-	۴۰۰
رادار روزنه مصنوعی مونواستاتیک	$\frac{\lambda}{4}$	۹۲۰	۴/۹
ترکیب رادار <i>MIMO</i> و روزنه مصنوعی روی ریل	2λ	۱۱۵	۴/۹

۱۰، ۱۵ و ۲۰ متری در مقابل دید سنجنده درنظر گرفته شده اند. در این شبیه سازی ۴۰ مشاهده زمانی صورت می گیرد. هدف نقطه ای اول دارای جابجایی به اندازه ۰/۱ میلیمتر در هر مشاهده است بطوری که تا ۲۰ ام به اندازه ۲ میلیمتر از موقعیت اولیه دور شده و از مشاهده ۲۰ تا ۴۰ به جایگاه اولیه بازمی گردد. اهداف نقطه ای دوم و سوم نیز ثابت فرض می شوند. لازم به ذکر است که این نوع رفتار و شدت جابجایی با الگوگیری از رفتار جابجایی در سازه های پل صورت گرفته است [۲۱ و ۲۲].

۳-۳- نتایج بررسی تداخل سنجی

در این زیربخش قابلیت پایش جابجایی توسط موج میلیمتری سنجنده در دو حالت مورد بررسی و ارزیابی قرار می گیرد. حالت اول مختص پایش جابجایی برای اهداف با بردهای مختلف در حالت راداری (بدون ایجاد روزنه مصنوعی و تشکیل تصویر) است. پارامترهای مدنظر برای سنجنده و پارامترهای تعیین شده برای شبیه سازی اهداف در جدول (۴) نمایش داده شده اند. باتوجه به طول موج ۴ میلیمتری سنجنده، جابجایی ها باید کمتر از ۱ میلیمتر باشند تا ابهام فاز رخ ندهد. سه هدف با سطح مقطع راداری ۱۰ دسی بل در بردهای

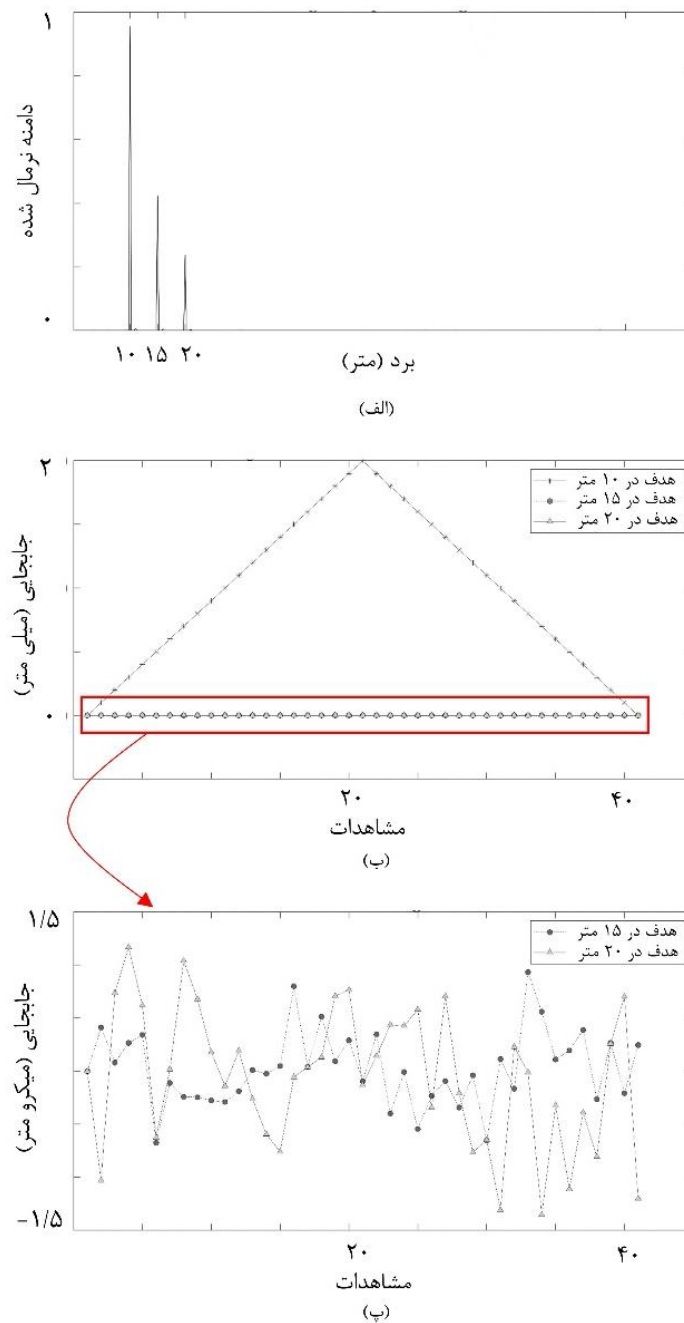
جدول ۴: پارامترهای شبیه‌سازی پایش جابجایی در حالت رادار با روزنه واقعی

پارامتر	مقدار
فرکانس حامل (GHz)	۷۷
پهنای باند (GHz)	۰٫۶
قدرت تفکیک مکانی (m)	۰٫۲۵
نسبت سیگنال به نویز (dB)	۱۵
برد اهداف نسبت به رادار (m)	(۱۰، ۱۵، ۲۰)
میزان جابجایی هر هدف در هر برداشت (در راستای دید سنجنده) (mm)	(۰، ۰٫۱)
سطح مقطع راداری هر هدف (dB)	(۱۰، ۱۰، ۱۰)

شکل (۷-الف) مقادیر دامنه سیگنال فشرده‌شده در راستای برد را نمایش می‌دهد که محل قرارگیری هر سه هدف بصورت مقادیر بیشینه ظاهر شده‌اند. در شکل (۷-ب) میزان جابجایی هر هدف بصورت جداگانه در هر مشاهده را نمایش می‌دهد. مقادیر جابجایی پس از طی فرایند شبیه‌سازی و محاسبه فاز تداخل سنجی و طبق رابطه (۱۷) بدست می‌آیند. همانطور که دیده می‌شود هدف نقطه‌ای اول تا مشاهده ۲۰ از موقعیت اولیه دور و سپس به موقعیت اولیه باز می‌گردد. در حالیکه، دو هدف نقطه‌ای دیگر ظاهراً ثابت هستند. شکل (۷-پ) بصورت دقیق‌تری سیگنال جابجایی دو هدف ثابت را نمایش می‌دهد که برخلاف اینکه ثابت بوده‌اند ولی سیگنال پردازش شده اندکی جابجایی در هر مشاهده را نمایش می‌دهد. مقادیر شدت خطا از سطح ۱/۵ میکرومتر پایین‌تر و پس از ۵۰۰ تکرار، بطور میانگین حدود ۰/۳۲ میکرومتر است. درواقع از این نتایج می‌توان نتیجه گرفت که با دقت میکرون در حالت ایده‌آل می‌توان به استخراج جابجایی پرداخت.

در شبیه‌سازی دوم، قابلیت محاسبه جابجایی در حالتی که اهداف دارای بردهای یکسان ولی موقعیت آزمون متفاوت هستند مورد بررسی قرار می‌گیرد. در این حالت، نیاز به ایجاد روزنه مصنوعی و قابلیت تفکیک-

پذیری بالا در راستای آزمون بررسی می‌شود. پارامترهای مدنظر برای سنجنده و پارامترهای تعیین شده برای شبیه‌سازی اهداف در جدول (۵) نمایش داده شده‌اند. مشابه با حالت اول در این شبیه‌سازی نیز سه هدف با سطح مقطع راداری ۱۰ دسی‌بل در نظر گرفته شده‌اند. با این تفاوت که هر سه هدف دارای برد یکسان ۲۰ متر هستند و تفاوت آن‌ها در موقعیت قرارگیری در راستای آزمون است. در این شبیه‌سازی نیز ۴۰ مشاهده زمانی صورت می‌گیرد. هدف نقطه‌ای اول دارای جابجایی به اندازه ۰/۱ میلیمتر در هر مشاهده است بطوری که تا ۲۰ ام به اندازه ۲ میلیمتر از موقعیت اولیه دور شده و از مشاهده ۲۰ تا ۴۰ به جایگاه اولیه بازمی‌گردد. اهداف نقطه‌ای دوم و سوم نیز ثابت فرض می‌شوند. طبق شبیه‌سازی صورت گرفته، در حالت رادار MIMO فاصله کم اهداف در راستای آزمون، تفکیک پذیری پایین و تاثیر سیگنال اهداف در یک پیکسل، باعث گردید تا در این حالت از تصویربرداری (جدول ۳)، تصویر حاصل قادر به کشف و محاسبه سیگنال جابجایی اهداف نباشد. در حالی که با توسعه به حالت MIMO-SAR و ایجاد روزنه مصنوعی بلندتر، و بهبود تفکیک پذیری، سیگنال جابجایی اهداف نیز استخراج قابل محاسبه گردید.



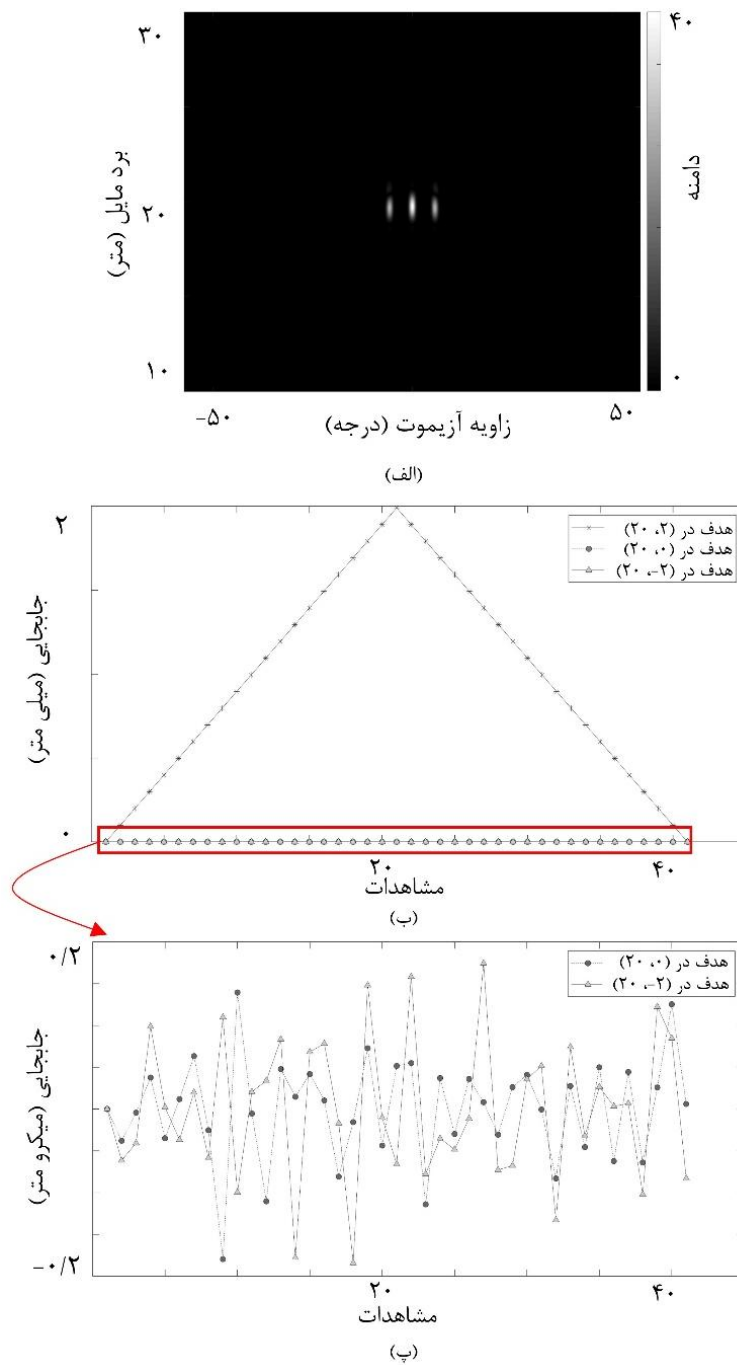
شکل ۷: شبیه‌سازی پایش جایبایی در حالت رادار با حضور سه هدف. (الف) سیگنال فشرده‌شده (ب) جایبایی اهداف در پایش سری زمانی (پ) بررسی خطای جایبایی مشاهده‌شده در طول پایش برای دو هدف ثابت

جدول ۵: پارامترهای شبیه‌سازی پایش جابجایی در حالت رادار روزنه مصنوعی

پارامتر	مقدار
فرکانس حامل (GHz)	۷۷
پهنای باند (GHz)	۰٫۶
قدرت تفکیک مکانی (m)	۰٫۲۵
نسبت سیگنال به نویز (dB)	۱۵
موقعیت قرارگیری اهداف (m)	(۲۰، ۲، ۰)
	(۲۰، ۰، ۰)
	(۲۰، -۲، ۰)
میزان جابجایی هر هدف در هر برداشت (در راستای دید سنجنده) (mm)	(۰٫۱، ۰، ۰)
سطح مقطع راداری هر هدف (dB)	(۱۰، ۱۰، ۱۰)

دقیق‌تری سیگنال جابجایی دو هدف ثابت را نمایش می‌دهد. در این حالت، مقادیر شدت خطا از سطح ۰٫۲ میکرومتر پایین‌تر است.

شکل (۸-الف) تصویر رادار روزنه مصنوعی از محل قرارگیری اهداف را نمایش می‌دهد. در شکل (۸-ب) میزان جابجایی هر هدف بصورت جداگانه در هر مشاهده را نمایش می‌دهد. شکل (۸-پ) نیز بصورت



شکل ۸: شبیه‌سازی پایش جابجایی در حالت رادار روزنه مصنوعی با حضور سه هدف. (الف) تصویر دامنه (ب) جابجایی اهداف در پایش سری زمانی (پ) بررسی خطای جابجایی مشاهده‌شده در طول پایش برای دو هدف ثابت

۳-۴- بحث درباره کاربردها

پس از ارائه نتایج مربوط در زیربخش‌های پیشین، این زیربخش به مقایسه قابلیت‌های سامانه پیشنهادی با سایر سامانه‌های موجود و بررسی کاربردهای احتمالی آن می‌پردازد.

طبق توضیحاتی که برای شکل (۵) بیان گردید، می‌توان دریافت که برای رسیدن به تفکیک‌پذیری بالا، برد بیشینه سنجنده کاهش می‌یابد. به‌عنوان مثال و طبق آزمایش‌های صورت گرفته در بخش‌های قبل، در هنگام تعیین تفکیک‌پذیری ۲۵ سانتی‌متر (پهنای باند ۶۰۰ مگاهرتز)، برد بیشینه سنجنده تا ۷۵ متر کاهش می‌یابد. بنابراین می‌توان سامانه پیشنهادی را برای کاربردهایی در برد کوتاه و مساحت کوچک در نظر گرفت. همین‌طور با در نظر گرفتن طول موج میلیمتری سنجنده، می‌توان از این سامانه برای پایش سازه‌های عمرانی و یا صنعتی برای کشف جابجایی‌های کوچک بهره گرفت.

طبق نتایج جدول (۳) سامانه پیشنهادی با بهره‌گیری از پردازش SAR به تفکیک‌پذیری ۴/۹ میلی‌رادیان در راستای آزیموت می‌رسد که معادل تفکیک‌پذیری ۲۵ سانتی‌متر در فاصله ۵۰ متری است. این قابلیت باعث می‌گردد تا از این سامانه در پایش سازه‌های پیچیده‌تر با رفتار جابجایی پیچیده مانند پل‌ها بهره گرفت. بطوری‌که بتوان در هر بخشی از تصویر SAR، رفتار متفاوتی از جابجایی را اندازه‌گیری و کشف نمود.

بنابراین، می‌توان بطور خلاصه گفت که سامانه پیشنهادی برای پایش اهداف در بردهای کوتاه طراحی گردیده‌است. از طرفی فرکانس بالای این سنجنده باعث ایجاد طول موجی میلیمتری با سطح نویز بسیار پایین و دقت فاز بسیار بالا می‌گردد. ویژگی‌های ذکر شده با در نظر گرفتن قابلیت پردازش تداخل‌سنجی، برای کشف و اندازه‌گیری جابجایی تک‌سازه (مانند پل، و ساختمان) با تفکیک‌پذیری مکانی (بهتر از یک متر) و زمانی (حدود چند ساعت) بالا، به‌همراه قابلیت کشف جابجایی‌های با مقیاس کمتر از میلیمتر است.

۳-۵- مقایسه سامانه پیشنهادی با سامانه‌های موجود

این زیربخش به مقایسه قابلیت‌های سامانه پیشنهادی با سایر سامانه‌های مشابه در مقالات می‌پردازد. همان‌طور که اشاره شد، سامانه پیشنهادی از سنجنده‌ای با قابلیت MIMO و متشکل از ۴ آنتن گیرنده و ۲ فرستنده بهره می‌برد. استفاده از سیگنال در باند W باعث گردیده تا ابعاد سنجنده بسیار کوچک‌تر از سایر سنجنده‌های متداول باشد که همین نکته باعث راحتی نصب و راه‌اندازی این سنجنده بر روی ریل مکانیکی می‌شود. استفاده از ریل مکانیکی و پردازش SAR باعث بهبود تفکیک‌پذیری زاویه‌ای سامانه تا ۴/۹ میلی‌رادیان گردیده‌است.

جدول (۶) بیانگر مقایسه‌ای از سامانه‌های GBSAR معرفی شده در مقالات اخیر با سامانه پیشنهادی است. سامانه‌های LISA [۷] و IBIS-L [۲۳]، با فعالیت در باندهای فرکانسی C و Ku و با تفکیک‌پذیری برد ۰/۵ متر و آزیموت ۳ و ۴ میلی‌رادیان، معمولاً دارای کاربرد در زمینه پایش فرونشست کند در مناطق شهری، و یا زمین‌رانش در شیب‌ها و کوهپایه‌ها دارند. سامانه‌های ذکر شده نسبت به سامانه پیشنهادی از سخت‌افزار با توان قوی‌تری استفاده می‌کنند که همین باعث می‌گردد تا برای کاربردهای با فواصل بلندتر و مساحت‌های بزرگ‌تر با دقت میلیمتر استفاده گردند.

از سامانه‌های جدیدتر که از تکنولوژی MIMO نیز بهره می‌برند می‌توان به سامانه MELISSA [۱۱] با تفکیک‌پذیری ۲۱ میلی‌رادیان در باند فرکانسی Ku و سامانه معرفی شده توسط محققین دانشگاه فلورانس [۱۲] با تفکیک‌پذیری ۵۰ میلی‌رادیان و در باند فرکانسی X اشاره نمود. سامانه‌های اشاره شده تنها از قابلیت MIMO بهره می‌برند و برای رسیدن به تفکیک‌پذیری بالا نیاز به تعداد زیادی آنتن فیزیکی هستند. به‌عنوان مثال، سامانه MELISSA از ۱۲ آنتن فرستنده و ۱۲ آنتن گیرنده تشکیل می‌شود. همان‌طور که اشاره گردید، استفاده از آنتن‌های فیزیکی با وجود افزایش نرخ

این مقاله، به علت استفاده از ریل مکانیکی، قادر به استخراج لرزش‌ها نخواهد بود ولی با بهره‌گیری از تفکیک‌پذیری بهتر و طول موج کوتاه‌تر، قادر به استخراج جابجایی متراکم‌تر و با دقت‌تر خواهد بود.

برداشت داده باعث افزایش هزینه ساخت و نگهداری می‌شوند. بنابراین، از کاربردهای اصلی این سامانه‌ها می‌توان به پایش و کشف جابجایی‌های سریع و یا لرزش سازه‌ها اشاره نمود. در مقابل، سامانه پیشنهادی

جدول ۶: پارامترهای شبیه‌سازی پایش جابجایی در حالت رادار با روزنه واقعی

نام سامانه GBSAR	باند فرکانسی	تفکیک‌پذیری برد (m)	تفکیک‌پذیری آزمون (mrad)	کاربرد
[۷] LISA	C, Ku	۰٫۵	۳	فرونشست شهری و زمین‌رانش
[۲۳] IBIS-L	Ku	۰٫۵	۴	فرونشست شهری و زمین‌رانش
[۱۱] MELISSA	Ku	۰٫۹~۰٫۳۷	۲۱	پایش جابجایی و لرزش سازه
[۱۲]	X	۰٫۴۷	۵۰	پایش جابجایی و لرزش سازه
MIMO GBSAR	W	>۰٫۰۸	۴٫۹	پایش جابجایی سازه

مورد بررسی و ارزیابی قرار گرفت. قابلیت MIMO شرایطی را فراهم می‌آورد تا بتوان با استفاده از ترکیب چندین آنتن فرستنده و گیرنده به آنتنی مجازی با ابعاد بزرگتر و توانایی تفکیک‌پذیری در راستای عمود بر برد (زاویه آزمون) رسید. با این حال، نیاز به تعداد آنتن‌های زیاد برای رسیدن به تفکیک‌پذیری بالای آزمون باعث گردید تا در این مقاله به بررسی ترکیب آنتن MIMO با تصویربرداری روزنه مصنوعی به کمک حرکت سنجنده بر روی ریل مکانیکی پرداخته شود. سنجنده رادار مورد بررسی از طول موج میلیمتری در باند W بهره می‌برد و دارای دو آنتن فرستنده و چهار آنتن گیرنده با هندسه MIMO است که باعث ایجاد هشت آنتن مجازی پس از فرم‌دهی پرتو می‌شود. در شبیه‌سازی‌های صورت گرفته ابتدا قابلیت سامانه مورد بررسی در کشف دورترین هدف در شرایط مختلف، براساس معادله رادار مورد بررسی قرار گرفت. در ادامه، قابلیت تصویربرداری با مقایسه سه حالت رادار MIMO، رادار روزنه مصنوعی مونو استاتیک، و ترکیب رادار MIMO با تصویربرداری روزنه مصنوعی بررسی و ارزیابی شد. طبق نتایج حاصل، حالت ترکیبی MIMO GBSAR، باعث بهبود قدرت تفکیک در راستای

لازم به ذکر است که تمامی سامانه‌های اشاره شده (مشابه سامانه پیشنهادی) تنها قابلیت استخراج جابجایی در راستای دید سنجنده وجود دارد. بطور معمول برای استخراج جابجایی در جهات XYZ از اطلاعات پیشین^۱ و یا اخذ داده‌های جانبی با ارتقای سخت‌افزاری بهره گرفته می‌شود. به عنوان مثال در مقاله [۲۴] با ترکیب داده‌های ماهواره‌ای Cosmo-skymed با سنجنده GBSAR به استخراج جابجایی در راستای افقی و عمودی برای پایش فرونشست شهری می‌پردازد. در روشی نوین‌تر، مقاله [۲۵] با استفاده ترکیبی از سنجنده راداری با سنجنده‌های ترنسپوندر^۲ و پایش منطقه از زوایای دید مختلف، باعث ایجاد هندسه گسترده‌تر و اندازه‌گیری جابجایی از زوایای مختلف-گشتند. در نتیجه، با ترکیب این مشاهدات، توانستند تا با دقت بالایی بردار جابجایی را تخمین بزنند.

۴- نتیجه‌گیری

در این مقاله توسعه یک سامانه رادار روزنه مصنوعی زمینی با استفاده از آنتن MIMO در محیط شبیه‌سازی

^۱ A priori

^۲ Transponder

مقادیر شدت خطا از سطح ۱/۵ میکرومتر پایین تر و بطور میانگین حدود ۰/۳۲ میکرومتر برآورد شدند. در بررسی جابجایی اهداف با برد یکسان، در حالت روزنه مصنوعی، سنجنده MIMO به علت تفکیک پذیری ضعیف آزمون و تداخل سیگنال اهداف با یکدیگر، به تنهایی قابلیت استخراج و محاسبه جابجایی چند را نداشت. در حالیکه با ایجاد SAR MIMO و بهبود تفکیک پذیری زاویه، سیگنال جابجایی اهداف نیز در راستای عمود بر برد شناسایی و محاسبه گردید. در کارهای آینده، نتایج شبیه سازی با داده واقعی مقایسه و ارزیابی می شود. همچنین، روشی برای استخراج بردار جابجایی سه بعدی ارائه و توسط سامانه پیشنهادی مورد بررسی و ارزیابی می گردد.

آزمون از ۴۰۰ میلی رادیان در حالت رادار MIMO به ۴/۹ میلی رادیان بوده است. در مقایسه با حالت رادار روزنه مصنوعی مونو استاتیک نیز، تعداد گام های مورد نیاز در حالت ترکیبی از ۹۲۰ گام به ۱۱۵ گام در ریلی به طول ۹۰ سانتی متر کاهش یافت که بیانگر قابلیت سامانه MIMO GBSAR به اخذ داده با نرخ تصویربرداری بالاتر است. در بررسی پردازش تداخل-سنجی و قابلیت پایش جابجایی سامانه پیشنهادی در محیط شبیه سازی دو آزمایش با حالت های رادار روزنه واقعی و مصنوعی صورت گرفت. طی این دو آزمایش نرخ جابجایی هدف متحرک ۰/۱ میلیمتر در هر اپوک تصویربرداری بود. در حالت رادار، دقت برآورد جابجایی سنجنده در مقیاس میکرو متر بدست آمد. بطوری که

مراجع

- [1] F. Ulaby et al., *Microwave radar and radiometric remote sensing*. Ann Arbor: University of Michigan Press, 2014.
- [2] M. Crosetto, O. Monserrat, M. Cuevas-González, N. Devanthery, and B. Crippa, "Persistent Scatterer Interferometry: A review," *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, vol. 115. Elsevier B.V., pp. 78–89, 01-May-2016.
- [3] M. Pieraccini and L. Miccinesi, "Ground-based radar interferometry: A bibliographic review," *Remote Sens.*, vol. 11, no. 9, p. 1029, 2019.
- [4] B. Hosseiny, J. Amini, M. Esmailzade, and M. Nekoei, "Range Migration Algorithm in the Processing Chain of Signals of a Ground-Based SAR Sensor," *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spat. Inf. Sci.*, vol. 42, pp. 521–525, 2019.
- [5] O. Monserrat, M. Crosetto, and G. Luzi, "A review of ground-based SAR interferometry for deformation measurement," *ISPRS J. Photogramm. Remote Sens.*, vol. 93, pp. 40–48, 2014.
- [6] Y. Wang et al., "Ground-Based Differential Interferometry SAR: A Review," *IEEE Geosci. Remote Sens. Mag.*, vol. 8, no. 1, pp. 43–70, 2020.
- [7] D. Tarchi, H. Rudolf, M. Pieraccini, and C. Atzeni, "Remote monitoring of buildings using a ground-based SAR: application to cultural heritage survey," *Int. J. Remote Sens.*, vol. 21, no. 18, pp. 3545–3551, 2000.
- [8] R. Iglesias et al., "Ground-based polarimetric SAR interferometry for the monitoring of terrain displacement phenomena-Part II: Applications," *IEEE J. Sel. Top. Appl. Earth Obs. Remote Sens.*, vol. 8, no. 3, pp. 994–1007, 2014.
- [9] A. Karunathilake, L. Zou, K. Kikuta, M. Nishimoto, and M. Sato, "Implementation and configuration of GB-SAR for landslide monitoring: case study in Minami-Aso, Kumamoto," *Explor. Geophys.*, vol. 50, no. 2, pp. 210–220, 2019.
- [10] Y. Zhou et al., "Digital Beamforming Synthetic Aperture Radar (DBSAR): Experiments and Performance Analysis in Support of 16-Channel Airborne X-Band SAR Data," *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, pp. 1–15, Oct. 2020.
- [11] 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.
- [12] M. Pieraccini and L. Miccinesi, "An interferometric MIMO radar for bridge monitoring," *IEEE Geosci. Remote Sens. Lett.*, vol. 16, no. 9, pp. 1383–1387, 2019.
- [13] N. Rojhani, M. Passafiume, M. Lucarelli, G. Collodi, and A. Cidronali, "Assessment of Compressive Sensing 2×2 MIMO Antenna Design for Millimeter-Wave Radar Image Enhancement," *Electronics*, vol. 9, no. 4, p. 624, Apr. 2020.
- [14] B. Hosseiny and J. Amini, "Evaluation of a Signal Processing Algorithm in a Ground-Based SAR System in Simulated Environment," *ISSGE*, vol. 8, no. 2, pp. 189–198, Dec. 2018.
- [15] M. I. (Merrill I. Skolnik, Introduction to radar systems. McGraw Hill, 2003.
- [16] A. Meta, P. Hoogeboom, and L. P. Ligthart, "Signal processing for FMCW SAR," *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, vol. 45, no. 11, pp. 3519–3532, 2007.
- [17] W. G. Carrara, R. S. Goodman, and R. M. Majewski, *Spotlight synthetic aperture radar: signal processing algorithms*. Boston : Artech House, 1995.
- [18] M. Soumekh, *Synthetic aperture radar signal processing*, vol. 7. New York: Wiley, 1999.
- [19] B. R. Mahafza and A. Elsherbeni, *MATLAB simulations for radar systems design*. CRC press, 2003.
- [20] R. F. Hanssen, *Radar interferometry: data interpretation and error analysis*, vol. 2. Springer Science & Business Media, 2001.
- [21] 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, no. 4, pp. 7412–7433, 2015.
- [22] M. Pieraccini, "Monitoring of civil infrastructures by interferometric radar: A review," *Sci. World J.*, vol. 2013, 2013.
- [23] 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, no. 1, pp. 41–54, 2010.
- [24] A. Montuori et al., "The interferometric use of radar sensors for the urban monitoring of structural vibrations and surface displacements," *IEEE J. Sel. Top. Appl. Earth Obs. Remote Sens.*, vol. 9, no. 8, pp. 3761–3776, 2016.
- [25] L. Miccinesi and M. Pieraccini, "Bridge Monitoring by a Monostatic/Bistatic Interferometric Radar Able to Retrieve the Dynamic 3D Displacement Vector," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 210339–210346, 2020.



Evaluating the deformation monitoring capability of a ground based SAR system with MIMO antenna

Benyamin Hosseini¹, Jalal Amini^{2*}, Safioddin Safavi-Naeini³

1- Ph.D. candidate of remote sensing in Department of Surveying and Geospatial Engineering, College of Engineering, University of Tehran

2- Professor in Department of Surveying and Geospatial Engineering, College of Engineering, University of Tehran

3- Professor in Faculty of Electrical and Computer Engineering, University of Waterloo, ON., Canada

Abstract

By increasing the applicability of ground-based SAR (GBSAR) systems in geoscience and remote sensing, the development and evaluation of new systems have gained attention. GBSAR systems can be utilized for monitoring areas that are hard to or cannot be seen by the airborne or spaceborne systems. Furthermore, they have better spatial and temporal resolutions and are cost-effective and easy to implement. This paper develops and evaluates a GBSAR system by combining a multiple-input multiple-output (MIMO) radar and mechanical linear rail as a synthetic aperture in azimuth direction (MIMO GBSAR) in a simulated environment. The considered radar sensor consists of two transmitters and four receiver antennas, operating at the W band frequency between 76-81 GHz. Azimuth compression consists of two main steps: MIMO beamforming and then compressing all gathered signals in the azimuth direction. According to the simulated results, the proposed MIMO GBSAR is able to improve the azimuth angular resolution to 4.9 mrad, compared to the 400 mrad angular resolution of the simple MIMO radar. A monostatic radar sensor requires 920 steps to complete a 0.9 m linear synthetic aperture, while the proposed MIMO GBSAR requires 115 steps, which implies a faster data acquisition rate. A simulated experiment was conducted in order to evaluate the interferometric capability of the considered sensor. The target's displacement rate was considered 0.1 millimeters per epoch. According to the results, the errors' amplitude was smaller than 1.5 micrometer, and the average displacement error was 0.32 micrometer.

Key words: Beamforming, SAR imaging, radar interferometry, millimeter wave, W-band.