نشریه علمی مهندسی فناوری اطلاعات مکانی

سال نهم، شماره نخست، بهار ۱۴۰۰

Vol.9, No.1, Spring 2021

۴۰- ۲۱

مقاله پژوهشی

DOR: 20.1001.1.20089635.1400.9.1.5.2

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 هوابرد و ماهواره‌ای دارای زاویه دید مناسب‌تر نسبت به محدوده پایشی هستند. علاوه‌بر 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 آزیموت در دو مرحله فرم‌دهی پرتو آنتن مجازی *MIMO* و سپس فشرده‌سازی تمامی سیگنال‌های راستای آزیموت صورت می‌گیرد. طبق نتایج شبیه‌سازی، حالت ترکیبی *MIMO GBSAR*، باعث بهبود قدرت تفکیک در راستای آزیموت از ۴۰۰ میلی رادیان در حالت رادار *MIMO* به ۴٫۹ میلی رادیان بوده‌است. همچنین در مقایسه با حالت رادار روزنه مصنوعی مونو استاتیک، تعداد گام‌های موردنیاز 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 درنظر 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 درنظر گرفته‌شد. طی این آزمایش، دقت براورد 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 براورد 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: ۰۲۱۶۱۱۱۴۳۷۸

Email: jamini@ut.ac.ir

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2025-10-24]

[DOR: 20.1001.1.20089635.1400.9.1.5.2]

[DOI: 10.52547/jgit.9.1.21]

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 پیداکرده است.

در سنجش‌ازدور راداری، عموما سامانه‌های هوابرد و ماهواره‌ای به‌همراه پردازش رادار روزنه مصنوعی (*SAR*[۱]) کاربرد و قدمت بیشتری را دارا هستند. با این وجود، در سال‌های اخیر سامانه‌های رادار روزنه مصنوعی زمینی (*GBSAR*[۲]) به‌علت قابلیت‌هایی که در حل محدودیت‌های سایر سامانه‌های ذکرشده دارند، توجهات زیادی را جلب‌کرده‌اند [۳ و ۴]. به‌عنوان مثال در مناطقی که سامانه‌های هوابرد یا ماهواره‌ای زاویه دید مناسبی ندارند، می‌توان از سامانه *GBSAR* با جایگیری مناسب، بهره‌برد. این سامانه‌ها عموما دارای ساختار ساده‌تری هستند و با قطعات کمتر و کوچک‌تری ساخته می‌شوند. علاوه‌براین، با توجه به کاربرد عمده آن‌ها برای بردهای نسبتا کوتاه، سنجنده استفاده‌شده در *GBSAR* معمولا از سیگنال‌های پیوسته با مدولاسیون فرکانسی (*FMCW*[۳]) 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. علاوبراین، مانع کاهش همدوسی بین داده‌های سری‌زمانی و جلوگیری از وقوع فاز مبهم در مسائل تداخل‌سنجی راداری می‌شود [۵ و ۶].

توسعه نخستین سامانه *GBSAR* در کاربرد سنجش‌ازدور 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 کاروناثیلاک 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*[۴]) 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*[۵]) 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 پیداکرد [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

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

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2025-10-24]
[DOR: 20.1001.1.20089635.1400.9.1.5.2]
[DOI: 10.52547/jgit.9.1.21]

استفاده از ریل مکانیکی باعث می‌گردد تا نرخ تصویربرداری بسیار بالارود. در پژوهش‌های اخیر نیز سامانه‌هایی با ترکیب قابلیت *MIMO* و پردازش حسگری فشرده معرفی‌گردیدند [۱۲و ۱۳]. به‌عنوان مثال سامانه توسعه‌یافته توسط پیپراچینی و میچینسی، با استفاده از ۴ آنتن فرستنده و ۴ آنتن گیرنده و با کمک پردازش حسگری فشرده، به تفکیک‌پذیری ۵۰ میلی‌رادیان در راستای آزیموت می‌رسد [۱۲]. با این‌حال، برای رسیدن به تفکیک‌پذیری بالا، نیاز به تعداد آنتن‌های بسیاری است که این امر می‌تواند منجر به افزایش هزینه شود. از این‌رو در این مقاله به بررسی ترکیبی آنتن *MIMO* با استفاده از ریل مکانیکی (*MIMO GBSAR*) پرداخته می‌شود تا علاوه‌بر کسب تفکیک‌پذیری بالا در راستای عمودبر برد، بتوان تعداد گام‌های موردنیاز 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 شبیه‌سازی است [۱۴]. از این‌رو، هدف از ارائه این مقاله توسعه و سپس بررسی و ارزیابی ترکیب آنتن *MIMO* با تصویربرداری روزنه مصنوعی به‌منظور توسعه سامانه *MIMO GBSAR*، در محیط شبیه‌سازی است. بدین‌منظور، پارامترهای یک رادار *MIMO* با طول‌موج میلیمتری و سوار بر ریل مکانیکی از لحاظ تفکیک‌پذیری و کشف اهداف و در نهایت در تخمین جابجایی با روش تداخل‌سنجی، مورد بررسی و ارزیابی قرار می‌گیرد.

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

۲- مبانی تئوری

این قسمت به مبانی تئوری مورد نیاز به‌منظور پردازش سیگنال سیستم‌های راداری می‌پردازد. ابتدا معادله اساسی رادار به‌منظور 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 تداخل‌سنجی 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].

$$R_{\max}^{4} = \frac{NPG_{tx}G_{rx}\lambda_c^2\sigma}{(4\pi)^3 kT_0F_nB_n(SNR)_1L_s} \qquad \text{رابطه(۱)}$$

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

N: *تعداد* پالس‌های ارسالی

P_t: توان بیشینه ارسالی به واحد وات

G_{tx}, G_{rx}: به‌ترتیب بهره آنتن ارسالی و دریافتی

λ: طول موج حامل

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

$k = 1.38 \times 10^{-23}$ *(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 تشکیل‌دهنده یک سنجنده رادار بیان می‌شود. بنابراین، بررسی این رابطه اهمیت بالایی در بحث طراحی و یا ارزیابی

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2025-10-24]
[DOR: 20.1001.1.20089635.1400.9.1.5.2]
[DOI: 10.52547/jgit.9.1.21]

قابلیت‌های یک سنجنده راداری خواهدداشت. پس از طراحی و ساخت سنجنده رادار تمامی پارامترهای بیان-شده در معادله رادار از قبیل بهره آنتن‌های گیرنده و فرستنده، عدد نویز، تلف سیستم، نسبت سیگنال به نویز، پهنای باند نویز، طول موج حامل، و توان ارسالی معلوم هستند. درنتیجه، می‌توان بیشترین قابلیت سنجنده در کشف هدفی با سطح مقطع راداری معلوم را محاسبه نمود.

۲-۲- پردازش سیگنال رادار (راستای برد)

سیگنال عملیاتی رادار می‌تواند بصورت پالس، و یا پیوسته تولیدشود. در بین این‌دو نوع، سیگنال‌های پیوسته کاربرد و قابلیت‌های بهتری را برای سیستم‌های زمینی برخوردارند و استفاده از سیگنال پیوسته با مدولاسیون فرکانس در این‌نوع از سیستم‌ها بسیار متداول است. به سیگنال مدوله فرکانسی در طول یک تناوب به مدت زمان τ، اصطلاحا سیگنال چرپ[۱] و یا سوییپ[۲] گفته می‌شود. در سیگنال چرپ، فرکانس سیگنال بصورت تابعی از زمان از فرکانس آغازین f_1 تا فرکانس پایانی f_2 درحال تغییر است. رابطه (۲) معادله سیگنال ارسالی *FMCW* با مدولاسیون خطی را بیان می‌کند.

$$s_t = exp(j\,2\pi f_c t + j\,\pi c_r t^2)$$ 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 به‌ترتیب تابعی خطی و سهموی از زمان هستند. سیگنال بازتابی (s_r) نیز، درحالت ایده‌آل، رابطه‌ای مشابه معادله سیگنال ارسالی دارد (رابطه (۳))؛ با این تفاوت که به اندازه t_d تاخیر یافته‌است [۱۶].

رابطه(۳)

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

علت تاخیر صورت‌گرفته، مسیر حرکت موج از لحظه ارسال تا برخورد به هدف و بازگشت به سمت گیرنده است. اگر موقعیت آنتن گیرنده و فرستنده را یکسان درنظربگیریم، مقدار تاخیر زمانی t_d معادل با رابطه (۴) خواهدبود.

$$t_d = \frac{2R}{c}$$ 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 فشرده‌سازی برد[۴] صورت می‌گیرد. طی این فرایند، کورلیشن[۵] سیگنال دریافتی با سیگنال ارسالی یا مرجع محاسبه می‌شود. به این فرایند، فیلتر منطبق[۶] نیز گفته می‌شود که طی انجام آن، چرپ سیگنال دریافتی حذف می‌گردد و سیگنال دیچرپ[۷] ایجاد می-گردد [۱۸]. معادله سیگنال دیچرپ بصورت رابطه (۵) بیان می‌گردد.

$$s_b = \exp(j\,2\pi(c_r t_d t + f_c t_d))$$ رابطه(۵)

در رابطه (۵) s_b بیانگر سیگنال دیچرپ‌شده است که اصطلاحا به آن سیگنال میانی[۸] یا ضربه[۹] نیز گفته می-شود.

در سیستم‌های *FMCW* عموما فرایند فشرده‌سازی برد بصورت سخت‌افزاری صورت می‌گیرد. شکل (۱) ساختار متداول یک سیستم رادار *FMCW* را نمایش می‌دهد. در این سیستم، سیگنال دریافتی توسط میکسر[۱۰] با یک نسخه از سیگنال ارسالی ترکیب می-

---

۱ *Chirp signal*
۲ *Sweep*
۳ *Chirp-rate (slope)*
۴ *Range compression*
۵ *Correlation*
۶ *Matched filter*
۷ *Dechirped signal*
۸ *Intermediate signal*
۹ *Beat signal*
۱۰ *Mixer*

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2025-10-24]
[DOR: 20.1001.1.20089635.1400.9.1.5.2]
[DOI: 10.52547/jgit.9.1.21]

و پس از اعمال یک فیلتر پایین‌گذر، سیگنال دیچرپ-شده ذخیره می‌گردد [۱]. فیلتر ذکرشده توسط پهنای باند دیچرپ تعیین می‌گردد تا فقط اهداف با فرکانس-های پایین‌تر را عبور دهد. علت وجود این فیلتر کاهش نیاز به مبدل آنالوگ به دیجیتال با نرخ نمونه‌برداری زیاد است.

سیگنال دیچرپ ذخیره‌شده یک سیگنال سینوسی در حوزه زمان خواهدبود و پس از یک تبدیل فوریه فرکانس‌های مربوط به اهداف بازتابی، آشکار می‌گردند [۱۹]. در نتیجه، برد اهداف از رابطه (۶) محاسبه می-شود.

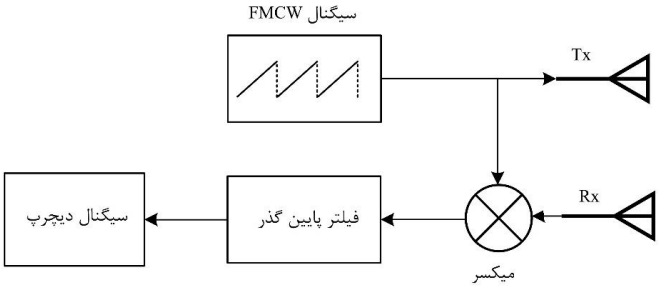
$$R = \frac{cf_b\tau}{2B} = \frac{cf_b}{2c_r}$$ رابطه(۶)

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

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

$$\rho_r = \frac{c}{2B}$$ رابطه(۷)

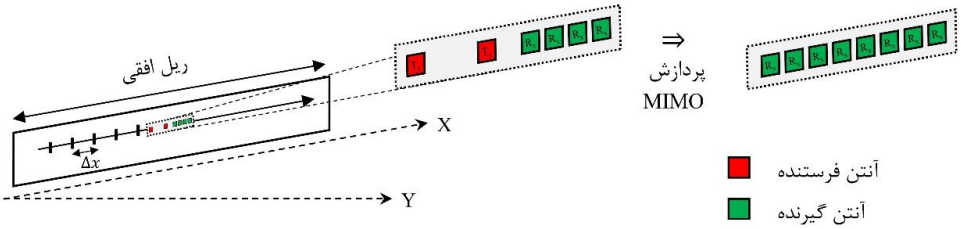
از رابطه (۷) می‌توان دریافت که قدرت تفکیک رادار در راستای برد، تنها به پارامتر پهنای باند آن وابسته است.



شکل۱: بلوک‌دیاگرام سنجنده رادار با سیگنال *FMCW*

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

به‌منظور رسیدن به تفکیک‌پذیری در راستای آزیموت، 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 را با استفاده از آنتن *MIMO* نمایش می‌دهد. همان‌طور که مشاهدا می‌شود، با وجود آنتن *MIMO*، دو مرحله پردازشی در راستای آزیموت مورد نیاز است که شامل شکل‌دهی پرتو آنتن *MIMO* و سپس فشرده‌سازی سیگنال‌های تهیه‌شده در راستای آزیموت یا همان ریل مکانیکی است.



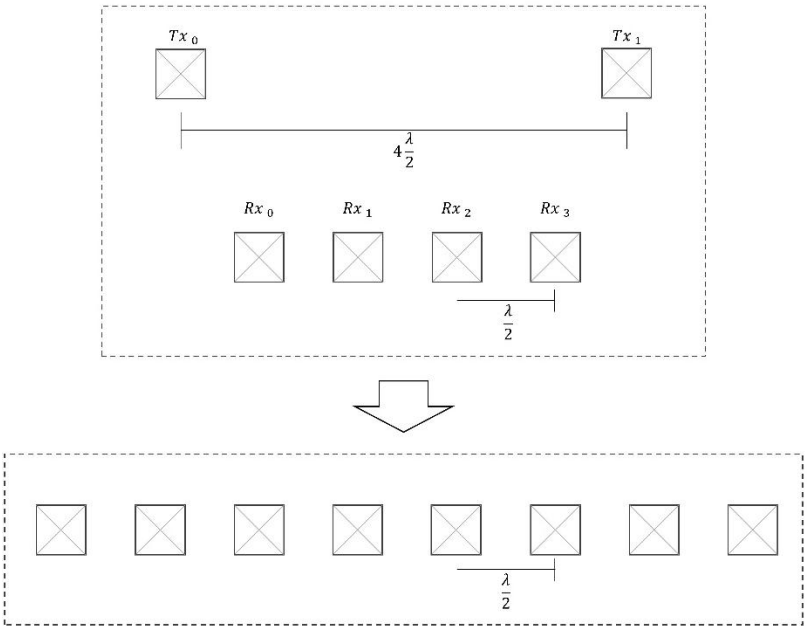
شکل ۲: نمایش گرافیکی *MIMO GBSAR*

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2025-10-24]
[DOR: 20.1001.1.20089635.1400.9.1.5.2]
[DOI: 10.52547/jgit.9.1.21]

در حالت معمول و متداول در رادارهای *MIMO* درصورتی‌که N آنتن گیرنده (یا فرستنده) در فاصله نصف طول‌موج سیگنال $\frac{\lambda}{2}$ (فاصله نایکوئیست) از هم قرار گرفته‌باشند و همین‌طور M آنتن فرستنده (یا گیرنده) وجود داشته‌باشد که درفاصله $N\frac{\lambda}{2}$ از هم باشند، آنگاه ترکیب این آنتن‌ها باعث ایجاد آرایه‌ای مجازی متشکل از $N\times M$ آنتن به اندازه $NM\frac{\lambda}{2}$ خواهدشد. شکل (۳) نمونه‌ای از هندسه قرارگیری آنتن‌ها درصورت حضور ۴ گیرنده و ۲فرستنده را نمایش می‌دهد. در این حالت، هر آنتن مجازی ایجادشده دارای یک شیفت فاز نسبت به مرکز آرایه خواهدبود که بصورت تابعی از زاویه آزیموت هدف و فاصله قرارگیری آنتن‌ها در مجاورهم است (رابطه (۸)).

رابطه(۸)

$$\phi_{shift} = 2\pi(\frac{l\cdot\sin\theta}{\lambda})i\,;\frac{-MN}{2}\le i\le\frac{MN}{2}$$



شکل ۳: فاصله قرارگیری آنتن‌های فرستنده و گیرنده در یک سنجنده رادار *MIMO* که باعث ایجاد آرایه‌ای مجازی با تعداد بیشتری آنتن 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 درنتیجه، هر هدف نقطه‌ای دارای بردی متفاوت در هر گام رادار خواهدبود. با توجه به هندسه بیان‌شده، برد هدف نقطه‌ای (x_p, y_p) را در هر گام از رابطه $R(x)=\sqrt{x^2+R_0^2-2R_0 sin\theta}$ محاسبه می‌شود. با خطی‌سازی این رابطه توسط بسط تیلور، می‌توان فاصله سنجنده تا هدف را در هر گام از طریق رابطه (۹) محاسبه‌نمود.

رابطه(۹) $$R(x)\cong R_0 - x\sin\theta$$

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

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2025-10-24]
[DOR: 20.1001.1.20089635.1400.9.1.5.2]
[DOI: 10.52547/jgit.9.1.21]

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.

رابطه(۱۱)

$$\Delta\phi = \frac{4\pi}{\lambda} \Delta x\,\sin\theta$$

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

رابطه(۱۲)

$$\Delta x \le \frac{\lambda}{4\sin\theta}$$

همان‌طور که اشاره‌شد، استفاده از آنتن *MIMO* باعث می‌شود تا آنتن مجازی بزرگ‌تری به طول $D = NM\,\lambda / 2$ ایجادگردد. حال اگر θ را معادل نصف پهنای بیم آنتن مجازی ایجادشده در نظر بگیریم، مقدار آن معادل $\theta = \lambda / 2D$ خواهدبود. درنتیجه، با در نظر گرفتن اینکه آنتن مجازی بطول D، پهنای پرتوی چندبرابر باریکتر از آنتن فیزیکی خواهدداد، می‌توان رابطه (۱۲) را بصورت تقریبی بر اساس طول آن مجازی *MIMO* بصورت رابطه (۱۳) بیان‌نمود.

رابطه(۱۳)

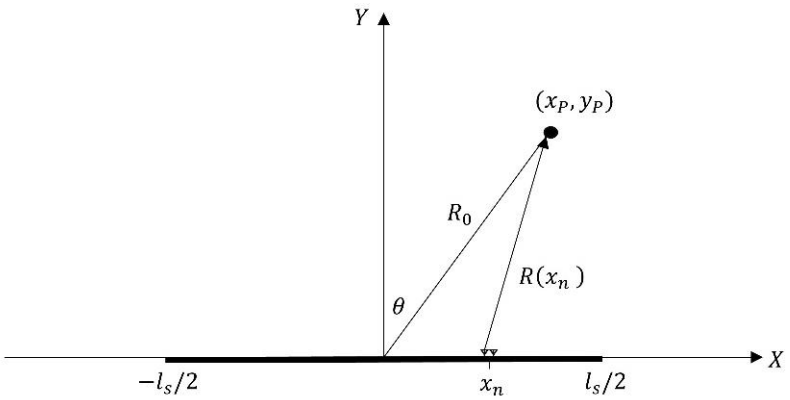
$$\Delta x \le \frac{\lambda}{4\sin\theta} \cong \frac{D}{2} = \frac{NM\,\lambda}{4}$$

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 آزیموت نیز مشابه راستای برد با تبدیل فوریه امکان-پذیر می‌شود و درنهایت، اهداف مشابه راستای برد در راستای آزیموت با قدرت تفکیک معادل رابطه (۱۴) از هم تفکیک می‌شوند.

رابطه(۱۴)

$$\rho_{az} = \frac{\lambda}{2L_s}$$

در رابطه (۱۴) L_s و ρ_{az} به‌ترتیب بیانگر طول روزنه مصنوعی و قدرت تفکیک در راستای آزیموت به رادیان هستند [۱۷].



شکل ۴: هندسه تصویربرداری روزنه مصنوعی در سیستم رادار زمینی

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2025-10-24]
[DOR: 20.1001.1.20089635.1400.9.1.5.2]
[DOI: 10.52547/jgit.9.1.21]

۲-۴- پردازش تداخل‌سنجی رادار

درصورتی‌که از فاز نویزی صرف‌نظر کنیم، مدل فاز سیگنال دیچرپ دریافتی را می‌توان بصورت رابطه (۱۵) بازنویسی‌کرد [۷ و ۲۰].

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

در رابطه (۱۵)، ϕ_{scatt} مربوط به فاز پراکندگی سیگنال بازگشتی است که به ماهیت و جنس هدف بازتابنده وابسته است. درصورتی‌که در دو زمان t_1 و t_2 سیگنال رادار ارسال و دریافت‌شود؛ آنگاه با استفاده از اختلاف فاز بین دو سیگنال بازتابی می‌توان میزان جابجایی را برآورد نمود. درصورتی‌که ϕ_{scatt} را در دو سیگنال بازتابی یکسان درنظر بگیریم، رابطه اختلاف فاز ایجادشده را می‌توان بصورت رابطه (۱۶) بیان‌نمود [۵].

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

در رابطه (۱۶)، $\Delta\phi_{21}$ بیانگر اختلاف فاز و ΔR_{21} بیانگر جابجایی ایجادشده است. با ایجاد معکوس رابطه بالا، میزان جابجایی بین دو لحظه t_1 و t_2 بصورت رابطه(۱۷) محاسبه می‌شود.

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

۳- سامانه پیشنهادی، نتایج و بحث

در این بخش سامانه *GBSAR* توسعه‌یافته با ترکیب آنتن *MIMO* و تصویربرداری روزنه مصنوعی، در محیط شبیه‌سازی مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. ابتدا مشخصات این سامانه، از جمله پارامترهای سنجنده رادار آن بیان می‌شوند و براساس معادله اساسی رادار مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. در ادامه، قابلیت تصویربرداری این سامانه بررسی و با حالات متداول دیگر مقایسه و ارزیابی می‌شود. درنهایت، نیز قابلیت تداخل‌سنجی سنجنده مورد نظر به‌منظور پایش و کشف جابجایی ارزیابی می‌شود.

۳-۱- مشخصات سیستم مورد بررسی

جدول (۱) پارامترهای اساسی این سنجنده را بیان می‌کند.

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

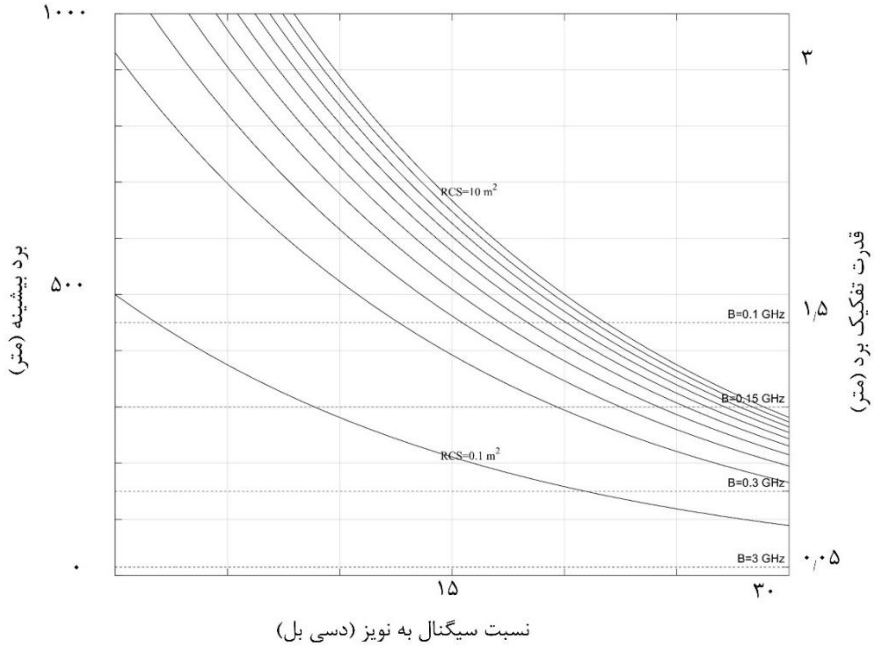
[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2025-10-24]
[DOR: 20.1001.1.20089635.1400.9.1.5.2]
[DOI: 10.52547/jgit.9.1.21]

محدوده فرکانسی این سنجنده در باند W قراردارد 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 سنجنده 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 تشکیل‌شده که قابلیت پردازش $MIMO$ و ایجاد ۸ آنتن مجازی را میسر می‌کنند. هریک از آنتن‌های گیرنده و فرستنده دارای بهره ۳۰ دسی‌بل هستند. همچنین عدد نویز ۱۵ دسی‌بل برای گیرنده درنظرگرفته‌شده است. پهنای باند میانی(B_{IF}) درنظرگرفته‌شده 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 سنجنده می‌پردازد. در این نمودار هر یک خطوط منحنی مربوط به بیشترین برد قابل کشف سنجنده 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 ذخیره‌شده توسط سنجنده است که این مقدار وابسته به پهنای باند دیچرپ سیگنال و قدرت تفکیک در راستای برد است. برد بیشینه ذخیره‌شده 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 ذخیره‌شده در سنجنده می‌شود.

طبق نمودار شکل (۵) می‌توان پارامتر قدرت تفکیک برد سنجنده را برای کاربرد مورد نظر تنظیم نمود. به‌عنوان مثال، درصورتی‌که قصد پایش هدفی با سطح مقطع راداری ۱۰ مترمربع با نسبت سیگنال به نویز ۱۵ دسی‌بل مدنظر باشد؛ بطور معمول سنجنده می‌تواند این نوع هدف را تا برد ۶۸۰ متر کشف‌کند (منحنی‌های معادله رادار). با این حال، پارامتر برد بیشینه ذخیره‌شده (محورهای افقی) نشان‌دهنده این است که هدف در چه فاصله‌ای باید قرارداشته‌باشد تا محدوده پهنای باند دیچرپ سنجنده قرارگرفته و در سیگنال ذخیره‌شده نهایی دیده شود. درنتیجه، طبق این نمودار می‌توان، با توجه به کاربرد موردنظر و منطقه مورد مطالعه، محل قرارگیری سامانه $GBSAR$ را پس از تنظیم پارامترها تعیین نمود.

[1] *Radar Cross Section (RCS)*

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2025-10-24]
[DOR: 20.1001.1.20089635.1400.9.1.5.2]
[DOI: 10.52547/jgit.9.1.21]



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

۳-۲- نتایج پردازش سیگنال و تشکیل تصویر

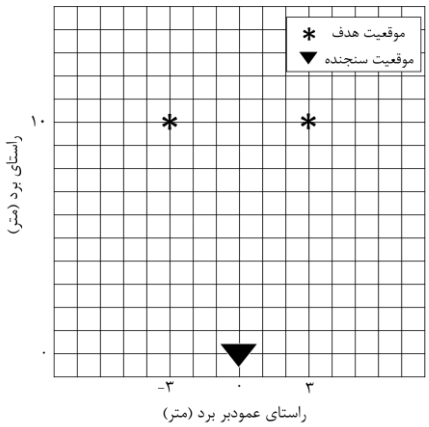
همان‌طور که در رابطه (۱۲) بیان‌گردید، فاصله نمونه‌برداری در راستای عمود بر برد (گام‌های حرکتی سنجنده بر ریل) در سامانه‌های متداول *GBSAR* با یک فرستنده و گیرنده (سامانه‌های مونواستاتیک[۱]) برابر با $\Delta x = \frac{\lambda}{4}$ است. در ادامه نیز بیان‌شد که با استفاده از آنتن *MIMO* می‌توان فاصله نمونه‌برداری را طبق رابطه(۱۳) افزایش‌داد. بنابراین، این قابلیت باعث می‌گردد تا بدون نقض قضیه نایکوئیست در راستای عمود بر برد، بتوان فاصله گام‌های 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 قرارمی‌گیرند. جدول(۲) هندسه و خصوصیات محیط شبیه‌سازی به‌منظور تصویربرداری در حالات عنوان‌شده را بیان می‌کند. در این شبیه‌سازی، فرکانس حامل سنجنده ۷۷ گیگاهرتز در نظرگرفته شده که با پهنای باند ۶۰۰ مگاهرتزی مدوله می‌شود. موقعیت قرارگیری مرکز سنجنده *GBSAR* در مبدا مختصات محلی درنظرگرفته‌شده است. همچنین دو هدف نقطه‌ای با سطح مقطع راداری ۱۰ دسی‌بل با فاصله ۱۰ متر در راستای برد از سنجنده و فاصله ۶ متر از یکدیگر در راستای عمود بر برد درنظر گرفته شده‌اند. همان‌طور که جدول (۱) بیان می‌کند، سنجنده رادار مورد بررسی از ۲ آنتن فرستنده و ۴ آنتن گیرنده با هندسه *MIMO* تشکیل‌شده که درنهایت باعث ایجاد ۸ آنتن مجازی با فواصل $\frac{\lambda}{2}$ از هم می‌گردد. درنتیجه، در زمان تشکیل تصویر با حالت ترکیبی *MIMO* و ریل می‌توان بجای گام‌هایی به اندازه $\frac{\lambda}{4}$ از گام‌های بلندتری به اندازه 2λ بهره‌گرفت.

[۱] *Monostatic*

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2025-10-24]
[DOR: 20.1001.1.20089635.1400.9.1.5.2]
[DOI: 10.52547/jgit.9.1.21]

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)	(۰، ۳-، ۱۰) و (۰، ۳، ۱۰)
سطح مقطع راداری هر هدف(dB)	۱۰
هندسه قرارگیری اهداف و سنجنده	

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)، به‌علت تعداد کم آنتن‌های مجازی دو هدف در راستای آزیموت بسیار پهن‌تر دیده می‌شوند. همین‌طور، تداخل لوب‌های کناری[1] اهداف باعث ایجاد لوب‌های قوی در اطراف اهداف شده‌است. در حالی‌که، در دو حالت دیگر با حرکت سنجنده بر ریل مکانیکی و ایجاد روزنه مصنوعی بلندتر، پهنای اهداف بسیار باریک‌تر شده و همچنین اثر لوب‌های کناری نیز بسیار کاهش یافته است.

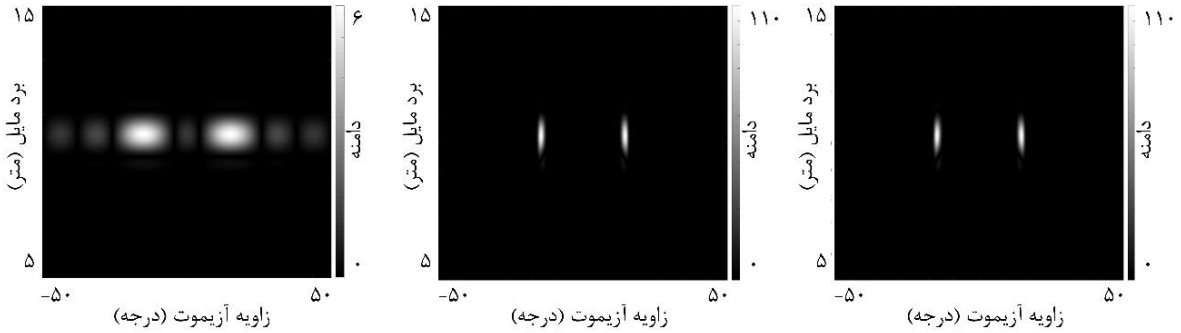
در مقایسه دو حالت ایجاد روزنه مصنوعی، در حالت ترکیبی حرکت مکانیکی سنجنده $MIMO$ بر روی ریل، علاوه‌بر حفظ قدرت تفکیک مکانی بالای حالت مونواستاتیک، تعداد گام‌های مورد نیاز نیز به اندازه هشت برابر کاهش یافته‌است.

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

[1] *Sidelobe*

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2025-10-24]
[DOR: 20.1001.1.20089635.1400.9.1.5.2]
[DOI: 10.52547/jgit.9.1.21]

سانتی‌متر است. درحالیکه، با ترکیب رادار *MIMO* این تعداد به ۱۱۵ کاهش می‌یابد. در هر دو حالت، قدرت تفکیک آزیموت بدست‌آمده ۴٫۹ میلی رادیان است. درحالی‌که، حالت رادار *MIMO* با ۸ آنتن مجازی دارای قدرت تفکیکی به اندازه ۴۰۰ میلی رادیان است.



شکل ۶: شبیه‌سازی 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 سانتی‌متر)	قدرت تفکیک آزیموت (*mrad*)
رادار *MIMO*	-	-	۴۰۰
رادار روزنه مصنوعی مونواستاتیک	$\frac{\lambda}{4}$	۹۲۰	۴٫۹
ترکیب رادار *MIMO* و روزنه مصنوعی روی ریل	2λ	۱۱۵	۴٫۹

۳-۳- نتایج بررسی تداخل‌سنجی

در این زیربخش قابلیت پایش جابجایی توسط موج میلیمتری سنجنده در دو حالت مورد بررسی و ارزیابی قرارمی‌گیرد. 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 تعیین‌شده برای شبیه‌سازی اهداف در جدول (۴) نمایش‌داده شده‌اند. باتوجه به طول موج ۴ میلیمتری سنجنده، جابجایی‌ها باید کمتر از ۱ میلیمتر باشند تا ابهام فاز رخ ندهد.

سه هدف با سطح مقطع راداری ۱۰ دسی‌بل در بردهای ۱۰، ۱۵، و ۲۰ متری در مقابل دید سنجنده درنظر گرفته‌شده‌اند. در این شبیه‌سازی ۴۰ مشاهده زمانی صورت می‌گیرد. هدف نقطه‌ای اول دارای جابجایی به اندازه ۰٫۱ میلیمتر در هر مشاهده است بطوری‌که تا ۲۰ ام به‌اندازه ۲ میلیمتر از موقعیت اولیه دورشده و از مشاهده ۲۰ تا ۴۰ به جایگاه اولیه بازمی‌گردد. اهداف نقطه‌ای دوم و سوم نیز ثابت فرض می‌شوند. لازم به ذکر است که این نوع رفتار و شدت جابجایی با الگوگیری از رفتار جابجایی در سازه‌های پل صورت‌گرفته است [۲۱ و ۲۲].

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2025-10-24]
[DOR: 20.1001.1.20089635.1400.9.1.5.2]
[DOI: 10.52547/jgit.9.1.21]

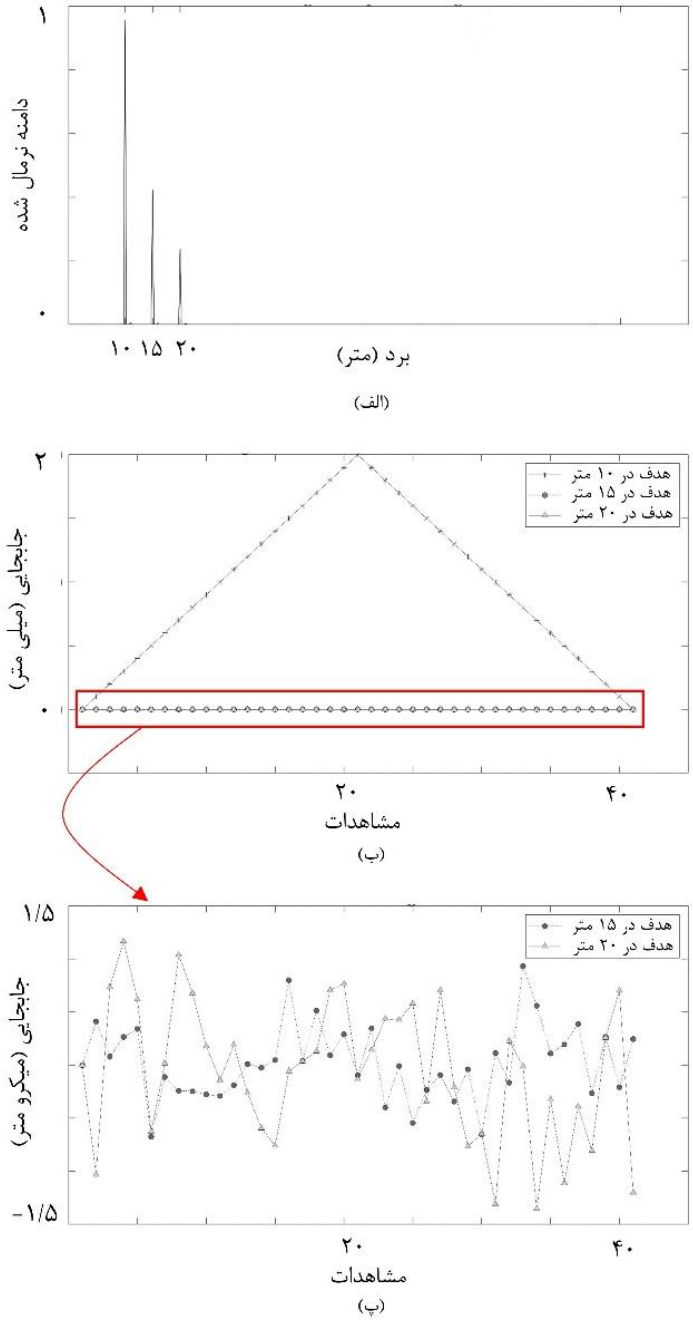
جدول ۴: پارامترهای شبیه‌سازی پایش جابجایی در حالت رادار با روزنه واقعی

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)	(۲۰، ۱۵، ۱۰)
میزان جابجایی هر هدف در هر برداشت (در راستای دید سنجنده) (mm)	(۰، 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 ظاهرشده‌اند. 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 تداخل‌سنجی 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. درحالیکه، دو هدف نقطه‌ای دیگر ظاهرا ثابت هستند. شکل (۷-پ) بصورت دقیق‌تری سیگنال جابجایی دو هدف ثابت را نمایش می‌دهد که برخلاف اینکه ثابت بوده‌اند ولی سیگنال پردازش‌شده 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 نتیجه‌گرفت که با دقت میکرون درحالت ایده‌آل می‌توان به استخراج جابجایی پرداخت.

در شبیه‌سازی دوم، قابلیت محاسبه جابجایی در حالتی که اهداف دارای بردهای یکسان ولی موقعیت آزیموت متفاوت هستند مورد بررسی قرار می‌گیرد. در این حالت، نیاز به ایجاد روزنه مصنوعی و قابلیت تفکیک‌پذیری بالا در راستای آزیموت بررسی می‌شود. پارامترهای مدنظر برای سنجنده و پارامترهای تعیین‌شده برای شبیه‌سازی اهداف در جدول (۵) نمایش‌داده شده‌اند. مشابه با حالت اول در این شبیه‌سازی نیز سه هدف با سطح مقطع راداری ۱۰ دسی‌بل درنظرگرفته‌شده‌اند. با این تفاوت که هر سه هدف دارای برد یکسان ۲۰ متر هستند و تفاوت آن‌ها در موقعیت قرارگیری در راستای آزیموت است. در این شبیه‌سازی نیز ۴۰ مشاهده زمانی صورت می‌گیرد. هدف نقطه‌ای اول دارای جابجایی به اندازه ۰٫۱ میلیمتر در هر مشاهده است بطوری‌که تا ۲۰ ام به‌اندازه ۲ میلیمتر از موقعیت اولیه دورشده و از مشاهده ۲۰ تا ۴۰ به جایگاه اولیه بازمی‌گردد. اهداف نقطه‌ای دوم و سوم نیز ثابت فرض می‌شوند. طبق شبیه‌سازی صورت‌گرفته، در حالت رادار *MIMO* فاصله کم اهداف در راستای آزیموت، تفکیک‌پذیری پایین و تاثیر سیگنال اهداف در یک پیکسل، باعث‌گردید تا دراین 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 تفکیک‌پذیری، سیگنال جابجایی اهداف نیز استخراج و قابل محاسبه‌گردید.

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2025-10-24]
[DOR: 20.1001.1.20089635.1400.9.1.5.2]
[DOI: 10.52547/jgit.9.1.21]



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

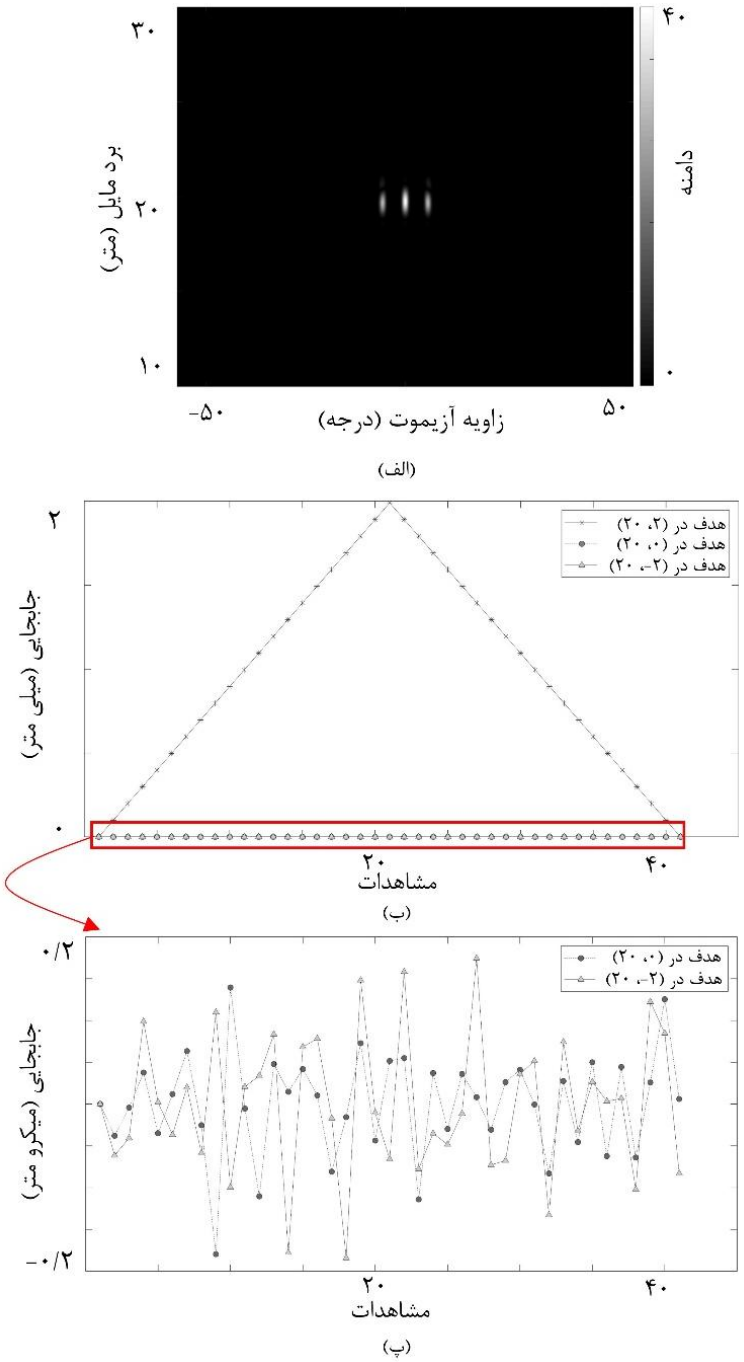
[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2025-10-24]
[DOR: 20.1001.1.20089635.1400.9.1.5.2]
[DOI: 10.52547/jgit.9.1.21]

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)	(۰، ۲، ۲۰)
	(۰، ۰، ۲۰)
	(۰، ۲-، ۲۰)
میزان جابجایی هر هدف در هر برداشت (در راستای دید سنجنده) (mm)	(۰، ۰، ۰٫۱)
سطح مقطع راداری هر هدف(dB)	(۱۰، ۱۰، ۱۰)

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

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2025-10-24]
[DOR: 20.1001.1.20089635.1400.9.1.5.2]
[DOI: 10.52547/jgit.9.1.21]



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

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2025-10-24]
[DOR: 20.1001.1.20089635.1400.9.1.5.2]
[DOI: 10.52547/jgit.9.1.21]

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) بیان‌گردید، می‌توان دریافت که برای رسیدن به تفکیک‌پذیری بالا، برد بیشینه سنجنده کاهش می‌یابد. به‌عنوان مثال و طبق آزمایش‌های صورت‌گرفته 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 درنظرگرفت. همینطور با درنظرگرفتن طول موج میلیمتری سنجنده، می‌توان از این سامانه برای پایش سازه‌های عمرانی و یا صنعتی برای کشف جابجایی‌های کوچک بهره‌گرفت.

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 بهره‌گرفت. 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 ذکرشده با درنظر 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 اشاره‌شد، سامانه پشنهادی از سنجنده‌ای با قابلیت *MIMO* و متشکل از ۴ آنتن گیرنده و ۲ فرستنده بهره می‌برد. استفاده از سیگنال در باند *W* باعث‌گردیده تا ابعاد سنجنده بسیار کوچک‌تر از سایر سنجنده‌های متداول باشد که همین نکته باعث راحتی نصب و راه‌اندازی این سنجنده بر روی ریل میکانیکی 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* معرفی‌شده 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، معمولا دارای کاربرد در زمینه پایش فرونشست کند در مناطق شهری، و یا زمین‌رانش در شیب‌ها و کوهپایه‌ها دارند. سامانه‌های ذکرشده 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 استفاده‌گردند.

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 معرفی‌شده توسط محققین دانشگاه فلورانس [۱۲] با تفکیک‌پذیری ۵۰ میلی‌رادیان و در باند فرکانسی *X* اشاره‌نمود. سامانه‌های اشاره‌شده 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 اشاره‌گردید، استفاده از آنتن‌های فیزیکی باوجود افزایش نرخ

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2025-10-24]
[DOR: 20.1001.1.20089635.1400.9.1.5.2]
[DOI: 10.52547/jgit.9.1.21]

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 اشاره‌نمود. در مقابل، سامانه پیشنهادی این مقاله، به‌علت استفاده از ریل مکانیکی، قادر به استخراج لرزش‌ها نخواهدبود ولی با بهره‌گیری از تفکیک‌پذیری بهتر و طول موج کوتاه‌تر، قادر به استخراج جابجایی متراکم‌تر و با دقت‌تر خواهدبود.

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

نام سامانه GBSAR	باند فرکانسی	تفکیک‌پذیری برد (m)	تفکیک‌پذیری آزیموت (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**

لازم به‌ذکر است که تمامی سامانه‌های اشاره‌شده (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 بهره‌گرفته می‌شود. به‌عنوان 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 مختلف‌گشتند. درنتیجه، باترکیب این مشاهدات، توانستند تا با دقت بالایی بردار جابجایی را تخمین‌بزنند.

۴- نتیجه‌گیری

در این مقاله توسعه یک سامانه رادار روزنه مصنوعی زمینی با استفاده از آنتن *MIMO* در محیط شبیه‌سازی مورد بررسی و ارزیابی قرارگرفت. 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 آزیموت) رسید. با این‌حال، نیاز به تعداد آنتن‌های زیاد برای رسیدن به تفکیک‌پذیری بالای آزیموت باعث گردید تا در این مقاله به بررسی ترکیب آنتن *MIMO* با تصویربرداری روزنه مصنوعی به کمک حرکت سنجنده بر روی ریل مکانیکی پرداخته‌شود. 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 شبیه‌سازی های صورت‌گرفته 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

[۱] *A priory*
[۲] *Transponder*

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2025-10-24]
[DOR: 20.1001.1.20089635.1400.9.1.5.2]
[DOI: 10.52547/jgit.9.1.21]

آزیموت از ۴۰۰ میلی رادیان در حالت رادار *MIMO* به ۴/۹ میلی رادیان بوده‌است. در مقایسه با حالت رادار روزنه مصنوعی مونو استاتیک نیز، تعداد گام‌های موردنیاز 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 تداخل-سنجی و قابلیت پایش جابجایی سامانه پیشنهادی در محیط شبیه‌سازی دو آزمایش با حالت‌های رادار روزنه واقعی و مصنوعی صورت‌گرفت. طی این دو آزمایش نرخ جابجایی هدف متحرک ۰/۱ میلیمتر در هر اپوک تصویربرداری بود. در حالت رادار، دقت براورد 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 براورد شدند. در بررسی جابجایی اهداف با برد یکسان، در حالت روزنه مصنوعی، سنجنده *MIMO* به‌علت تفکیک‌پذیری ضعیف آزیموت و تداخل سیگنال اهداف با یکدیگر، به-تنهایی قابلیت استخراج و محاسبه جابجایی چند را نداشت. درحالیکه با ایجاد *MIMO SAR* و بهبود تفکیک‌پذیری زاویه، سیگنال جابجایی اهداف نیز در راستای عمود بر برد شناسایی و محاسبه‌گردید.

در کارهای آینده، نتایج شبیه‌سازی با داده واقعی مقایسه و ارزیابی می‌شود. همچنین، روشی برای استخراج بردار جابجایی سه‌بعدی ارائه و توسط سامانه پیشنهادی مورد بررسی و ارزیابی می‌گردد.

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. Devanthéry, 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. Esmaeilzade, and M. Nekoee, "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-*

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2025-10-24]
[DOR: 20.1001.1.20089635.1400.9.1.5.2]
[DOI: 10.52547/jgit.9.1.21]

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. Rödelsperger, 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.

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2025-10-24]
[DOR: 20.1001.1.20089635.1400.9.1.5.2]
[DOI: 10.52547/jgit.9.1.21]

K. N. TOOSI UNIVERSITY OF TECHNOLOGY
FACULTY OF GEODESY AND GEOMATICS ENGINEERING

Journal of Geospatial Information Technology
Vol.9 No.1, Spring 2021

Research Paper

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

Benyamin Hosseini[1], Jalal Amini[2]*, Safioddin Safavi-Naeini [3]

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.*

Correspondence Address: *Remote Sensing Group, Department of Surveying and Geospatial Engineering, College of Engineering, University of Tehran.*
Tel : *+ 98 21 61114378.*
Email : *jamini@ut.ac.ir*

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2025-10-24]
[DOR: 20.1001.1.20089635.1400.9.1.5.2]
[DOI: 10.52547/jgit.9.1.21]