Scientific Journal of Radar
Vol. 12, No. 1, Spring and Summer2024, Serial No. 31, pp. 67- 88
ISSN: 2322-4347, E-ISSN: 2980-8979

Evaluation of Phase Errors Induced by Unwanted Platform Motion in Six Degrees of Freedom on Synthetic Aperture Sonar Imaging

H. Hajirahimi Kashani, SA. Seyedin*

*Professor, Department of Electrical and Telecommunication Engineering, Faculty of Engineering, Ferdowsi University, Mashhad, Iran

(Received: 2024/04/25, Revised: 2024/07/16, Accepted: 2024/08/03, Published: 2024/08/28)

DOR:https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.23454024.1403.12.1.1.4

ABSTRACT

Synthetic aperture sonar (SAS) is an underwater imaging technology whose image accuracy depends on the motion stability of the carrier platform. Nevertheless, underwater platforms inevitably experience unwanted movements in all six degrees of freedom, which result in phase errors and image quality degradation. So far, no comparative study has evaluated the effect of each of these motions on phase error and image quality, and most recent research has merely focused on geometric compensation of motion errors, overlooking quantitative assessment of their impact on image quality. In this research, the effects of sinusoidal unwanted platform motions in six degrees of freedom—including surge, sway, and heave displacements as well as rotational motions: roll, pitch, and yaw—have been numerically simulated and compared. To this end, the phase error induced by platform motion was modeled, and by calculating the RMSE, PSNR, PSLR, and ISLR metrics under various conditions, the system's sensitivity to increasing error amplitude was assessed. Simulation results show that among translational motions, vertical displacement (heave) has the most detrimental impact: displacements exceeding 0.1 m cause a severe drop in image quality, with PSNR falling below 20dB and RMSE rising above 0.1m. sway displacement above about 0.5m also rapidly reduces quality, while surge displacement has the least effect, with noticeable degradation occurring only at very large errors. Among rotational motions, rotation about the yaw has the greatest destructive effect, with deviations beyond 5° leading to severe image degradation, while roll remains the most stable axis, and the image remains nearly intact for deviations up to 5. Consequently, controlling and stabilizing vertical, lateral, and yaw motions of the carrier platform are essential in the design of synthetic aperture sonar systems to ensure stable and high-quality imaging.

Keywords: Synthetic Aperture Sonar (SAS), Phase Error, Platform Motion Disturbance, Hydrophone Array, Six Degrees of Freedom (DoF)

Cite this article: Hajirahimi Kashani, H. & Seyedin, S. A., "Evaluation of Phase Errors Induced by Unwanted Platform Motion in Six Degrees of Freedom on Synthetic Aperture Sonar Imaging." *Radar*, vol. 12, no. 1, pp. 67- 88, 2024.

DOR:https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.23454024.1403.12.1.1.4

© The Author(s). retain the copyright and full publishing rights

Publisher: Imam Hossein University

Corresponding Author Email: seyedin@um.ac.ir

"رادار"
سال دوازدهم، شماره ۱، بهار و تابستان ۱۴۰۳، ص ۶۷- ۸۸
شاپا الکترونیکی: ۴۰۲۴ -۲۳۴۵ شاپا چاپی: ۴۰۳۲ -۲۳۴۵

علمی – پژوهشی

ارزیابی خطای فاز ناشی از تکانه‌های ناخواسته سکو در شش درجه آزادی بر تصویرسازی سونار روزنه مصنوعی

حمید حاجی رحیمی کاشانی[۱]، سید علیرضا سیدین[۲*]

۱- دانشجوی دکتری ۲- استاد، گروه مهندسی برق مخابرات سیستم، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی، مشهد، ایران

(دریافت: ۱۴۰۳/۰۱/۲۶، بازنگری: ۱۴۰۳/۰۴/۲۸، پذیرش: ۱۴۰۳/۰۵/۲۱، انتشار: ۱۴۰۳/۰۶/۰۱)

DOR:https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.23454024.1403.12.1.1.4

چکیده

سونار روزنه مصنوعی، یک فناوری تصویربرداری زیرآبی است که دقت تصاویر آن به پایداری حرکت سکوی حامل وابسته است. بااین‌حال سکوی زیر آب به‌ناچار دچار حرکات ناخواسته در شش درجه آزادی می‌شود که موجب خطای فاز و افت کیفیت تصویر می‌گردد. تاکنون مطالعه مقایسه‌ای برای سنجش تأثیر هر یک از این حرکات بر خطای فاز و کیفیت تصویر انجام نشده و اغلب پژوهش‌های اخیر صرفاً به جبران هندسی خطاهای حرکت پرداخته‌اند و ارزیابی کمی اثر حرکات بر کیفیت تصویر مغفول مانده است. در این پژوهش اثر حرکات سینوسی ناخواسته سکو در شش درجه آزادی شامل جابه‌جایی‌های طولی، عرضی، عمودی و چرخش‌های زاویه‌ای غلتش حول محور x، پیچش حول محور y و دوران حول محور z به‌صورت عددی شبیه‌سازی و مقایسه شده است. بدین منظور خطای فاز ناشی از حرکت سکو مدل‌سازی شد و با محاسبه شاخص‌هایRMSE ، PSNR، PSLR و ISLR در شرایط مختلف، حساسیت سامانه نسبت به افزایش دامنه خطا به‌منظور ارزیابی سیستم صورت می‌گیرد. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد با عامل‌های در نظر گرفته شده در این پژوهش در بین حرکات انتقالی، جابه‌جایی عمودی بیشترین تأثیر مخرب را دارد و حرکت بیش از ۰/۱m افت شدید کیفیت تصویر با PSNR کمتر از ۲۰dB و RMSE بیشتر از ۰/۱m ایجاد می‌کند. جابه‌جایی عرضی نیز از حدود ۰/۵m به‌سرعت موجب افت کیفیت می‌شود، اما جابه‌جایی طولی کمترین تأثیر را داشته و افت محسوس تنها در خطاهای بسیار بزرگ رخ می‌دهد. از میان حرکات زاویه‌ای نیز دوران حول محور عمودی بیشترین اثر مخرب را داشته و فراتر از ۵° موجب افت شدید تصویر می‌شود، درحالی‌که غلتش حول محور x پایدارترین محور بوده و تصویر تا انحراف‌های ۵° تقریباً دست‌نخورده باقی می‌ماند. در نتیجه کنترل و تثبیت حرکات عمودی، عرضی و دوران حول محور عمودی سکوی حامل در طراحی سامانه‌های سونار روزنه مصنوعی برای تضمین تصویربرداری پایدار و باکیفیت ضروری است.

کلیدواژه‌ها: سونار روزنه مصنوعی، خطای فاز، تکانه ناخواسته سکو، آرایه هیدروفونی، شش درجه آزادی

۱. مقدمه

سونار روزنه مصنوعی یکی از فناوری‌های مهم و نوین در حوزه تصویربرداری زیرسطحی و زیرآبی است که به دلیل توانایی ایجاد تصاویر با وضوح بسیار بالا از کف دریا و اشیا مدفون در آن، موردتوجه ویژه قرار گرفته است. اساس عملکرد این سامانه بر ایجاد یک روزنه مصنوعی طولانی به‌وسیله حرکت سکوی حامل گیرنده و فرستنده در طول مسیر مشخص استوار است. بااین‌وجود، عملکرد دقیق و وضوح‌بالای تصاویر تولیدی توسط سامانه‌های سونار به‌شدت تحت‌تأثیر پایداری مسیر حرکتی

استناد: حاجی رحیمی کاشانی، حمید و سیدین، سید علیرضا، "ارزیابی خطای فاز ناشی از تکانه های ناخواسته سکو در شش درجه آزادی بر تصویرسازی سونار روزنه مصنوعی." *رادار*، ۱۲(۱)، ۶۷- ۸۸، ۱۴۰۳.

DOR:https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.23454024.1403.12.1.1.4

© نویسنده(گان) حق نشر و حقوق کامل انتشار را برای خود محفوظ می‌دارند.

ناشر: دانشگاه جامع امام حسین(ع).

رایانامه نویسنده مسئول:seyedin@um.ac.ir

سکو و عدم وجود حرکات ناخواسته است.

حرکات ناخواسته سکو که می‌توانند ناشی از جریان‌های زیرآبی، امواج سطحی، تلاطم‌های هیدرودینامیکی و خطاهای مکانیکی باشند، به‌صورت ترکیبی از حرکات انتقالی جابه‌جایی در جهت‌های طولی، عرضی و قائم و حرکات زاویه‌ای غلتش، پیچش و دوران در شش درجه آزادی بروز پیدا می‌کنند. این حرکات به طور مستقیم باعث ایجاد خطای فاز در سیگنال‌های بازگشتی شده و در نتیجه منجر به افت کیفیت تصویرسازی و کاهش دقت مکانی و وضوح تصاویر نهایی می‌شوند.

پژوهش حاضر باهدف بهره‌گیری از نتایج آن در سامانه‌های سونار روزنه مصنوعی چند گیرنده و پهن بیم تدوین شده است، اما به‌منظور جداسازی اثرات حرکتی سکو، شبیه‌سازی‌ها برای یک گیرنده در محیط زیرآبی انجام شده‌اند تا تأثیر حرکات ناخواسته در جهت شش درجه‌ی آزادی به‌صورت مستقل از تعداد سنسورها و نوع چینش آرایه مورد ارزیابی قرار گیرد. در پژوهش [۲] جبران حرکت در رادار دهانه مصنوعی هوابرد بررسی شده است. آن‌ها یک روش تخمین خطای حرکت بر پایه‌ی تغییرات بردار خط دید حسگر ارائه دادند و الگوریتم برد - داپلر را برای تشکیل تصویر به کار بردند. روش آن‌ها پس از فشرده‌سازی برد به‌صورت تک‌مرحله‌ای خطای مؤثر برد را جبران می‌کرد. با اینکه این رویکرد در بستر هوابُرد مؤثر بود، در سامانه‌های سونار زیردریایی با چند گیرنده و پهنای بیم زیاد کافی نیست؛ زیرا پلتفرم‌های دریایی حرکات پیچیده‌تری (نظیر گهواره‌ای شدن و چرخش‌ها) داشته و دقت تصویربرداری در زیر آب به‌مراتب به خطاهای حرکت حساس‌تر است.

در پژوهش [۳] یک سامانه‌ی سونار دهانه مصنوعی تداخلی روی یک شناور سطحی خودکار توسعه‌یافته است. مزیت اصلی آن استفاده از ناوبری دقیق برای کنترل شناور و جبران حرکت است که بسیاری از مشکلات تشکیل تصویر را کاهش می‌دهد. در واقع، به دلیل دسترسی به سامانه‌های موقعیت‌یابی دقیق روی قایق سطحی، خطاهای حرکت تا حد زیادی اندازه‌گیری و اصلاح شدند. هرچند این رویکرد سخت‌افزاری (اتکا بر ناوبری) برای پلتفرم سطحی مفید است، در این پژوهش تمرکز اصلی بر شبیه‌سازی شرایط حرکتی سکو باهدف به‌کارگیری نتایج در سامانه‌های سونار روزنه مصنوعی زیرآبی است تا بتواند رفتار فاز و تغییرات هندسی سکو را در تمامی مؤلفه‌های درجات شش‌گانه آزادی بازنمایی کند. بدین ترتیب نتایج به‌دست‌آمده قابلیت تعمیم و استفاده در تحلیل عملکرد سکوهای زیرآبی را خواهند داشت.

در سال‌های اخیر تلاش‌های تخصصی برای بهبود تصویربرداری چند گیرنده‌ی پهن‌بیم انجام شده است. در [۴] یک الگوریتم دومرحله‌ای جبران حرکت پیشنهاد دادند. آن‌ها ابتدا خطای مسیر واقعی ناشی از پنج درجه آزادی حرکت را استخراج کردند و سپس با دو مرحله جبران، این خطاها را اصلاح نمودند. مزیت این پژوهش دقت بالای آن در حضور حرکات پیچیده‌ی پلتفرم بود، اما درعین‌حال اجرای آن به مراحل پردازشی متعددی نیاز دارد. پژوهش حاضر نیز به مقایسه خطاهای حرکت چند درجه آزادی می‌پردازد، با این تفاوت که سعی شده فرایند آن یکپارچه‌تر انجام شود تا پیچیدگی محاسباتی کاهش یابد.

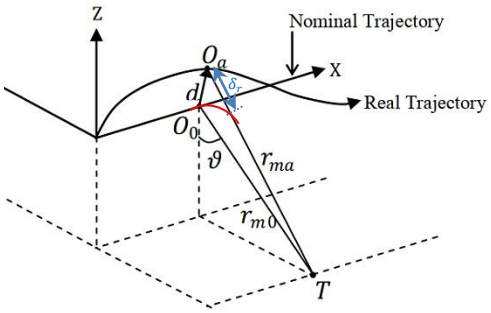
همچنین در [۷] برای بهبود کیفیت تصویر در سونار چند گیرنده با سیگنال پهن باند، الگوریتم مقیاس‌دهی چیرپ توسعه‌یافته‌ای را ارائه کردند. آن‌ها نشان دادند که در الگوریتم‌های کلاسیک مقیاس‌پذیری چیرپ به علت تقریب درجه دوم سیگنال مرجع، خطاهای مرتبه بالاتر در سیگنال‌های پهن باند نادیده گرفته می‌شود. روش توسعه‌یافته‌ی آن‌ها با درنظرگرفتن این جمله‌های مرتبه بالاتر، دقت تمرکز تصویر را افزایش می‌دهد که مستلزم پیش‌پردازش پیچیده‌ای برای هر گیرنده است که موجب افزایش بار محاسباتی می‌شود.

مطالعات متعددی درگذشته به بررسی تأثیر این خطاها بر کیفیت تصویرسازی پرداخته‌اند، اما اکثر این مطالعات تنها به بررسی‌های محدودتر اکتفا کرده‌اند. همچنین تأثیر هم‌زمان چندین عامل نظیر فرم زمانی خطا، دامنه و فرکانس خطا و همچنین عامل‌های سیستمی و محیطی مانند طول‌موج سیگنال و زاویه نشیب به طور دقیق و کمی مورد ارزیابی قرار نگرفته است. علاوه بر این، کمبود مدل‌های ریاضی برای توصیف دقیق و پیش‌بینی حساسیت سامانه سونار روزنه مصنوعی نسبت به عامل‌های مختلف، یکی از محدودیت‌های اصلی پژوهش‌های قبلی بوده است.

در این مقاله برای نخستین بار تحلیل دقیقی از حساسیت عددی سامانه سونواری نسبت به تغییرات در عامل‌های حرکتی و محیطی ارائه می‌شود. در این تحلیل، ابتدا مدل ریاضی خطای فاز در شش درجه آزادی معرفی شده و سپس با طراحی مجموعه‌ای کامل از شبیه‌سازی‌ها، اثر هر یک از عوامل مؤثر به‌صورت عددی محاسبه و بررسی می‌گردد. خروجی‌های شبیه‌سازی شامل معیارهای کمی دقیق نظیر RMSE، PSNR، PSLR و ISLR هستند که امکان مقایسه کمی اثرگذاری هر یک از این عامل‌ها را فراهم می‌سازد. همچنین برای اولین‌بار با استفاده از نتایج تجربی مدل‌های ریاضی مناسبی برای پیش‌بینی و ارزیابی حساسیت سامانه ارائه شده است.

بیشتر پژوهش‌های اخیر بر روی داده‌های خام بازگشتی از اهداف زیر آب بر این فرض استوارند که وسیله نقلیه زیرآبی خودکار، دارای حرکت خطی بوده؛ بنابراین مطابق شکل (۱) اگر آرایه در طول حرکت سونار دچار تکانه‌های ناگهانی خارج از انتظار گردد، در یک فاصله تکرار پالس فاصله مسیر ارسالی پالس بین فرستنده

تا اهداف بافاصله بازگشتی سیگنال از اهداف تا گیرنده دچار تغییرات قابل‌ملاحظه می‌گردد که منجر به تأخیر در سیگنال دریافتی می‌گردد. این تأخیر زمانی در فاز سیگنال تأثیرگذار بوده و باعث به‌وجودآمدن خطای فاز می‌گردد و منتج به خرابی در کیفیت تصویرسازی سونار می‌گردد. حال اگر این تکانه‌ها از حد استاندارد بالاتر باشد ممکن است باعث نرسیدن سیگنال دریافتی از اهداف در یک فاصله تکرار پالس مشخص گردد و تصویر اهداف در نقاطی از مسیر حرکت سونار در زیر آب تشکیل نگردد. اما در واقعیت بر خلاف سامانه‌های رادار روزنه مصنوعی که در هوا مأموریت خود را انجام می‌دهند، سامانه‌های سونار روزنه مصنوعی در زیر آب شرایط به‌ندرت برآورده می‌شود. برای رسیدن به تصاویر راداری دوبعدی با وضوح‌بالا لازم است که به طور هم‌زمان وضوح برد و سمت ارتقا یابد [۱]. در شرایط واقعی حسگرهای گیرنده تحت‌تأثیر حرکات انتقالی و چرخشی ناشی از جریان‌های زیرآبی، مانورهای وسیله نقلیه یا شرایط محیطی قرار می‌گیرد. ازاین‌رو جبران خطاهای حرکتی به یکی از چالش‌های اصلی در طراحی و مانورهای سامانه‌های SAS تبدیل شده است.



شکل (۱). انحراف حرکت سکو از مسیر ایدئال [۲].

باتوجه‌به میزان انحراف سکو از مسیر واقعی (δ_r)، خطای برد به میزان رابطه (۱) در مسیر رفت‌وبرگشت اتفاق می‌افتد.

$$r_{ma} = r_{m0} + \delta_r \qquad (۱)$$

که در آن r_{m0} فاصله برد سکو تا هدف در مسیر نامی و ایدئال و r_{ma} فاصله برد سکو تا هدف پس از تکانه ناخواسته در شرایط واقعی زیر آب اتفاق خواهد افتاد.

مطابق شکل (۱) هنگامی که سکو با سرعت v در مسیر مشخصی حرکت می‌کند، مدل سیگنال بازگشتی دریافتی نشان از انحراف حرکت از مسیر از پیش تعیین شده است که میزان خطا مطابق رابطه (۲) محاسبه می‌گردد [۳]:

$$ee_b(\tau,t) = \iint ff(x,y_s)\, p_b\left(t - \frac{2}{c}\sqrt{(x-x(\tau))^2+(y-y(\tau))^2+(z-z(\tau))^2}\right) \qquad (۲)$$

که در آن $ee_b(\tau,t)$ سیگنال بازگشتی در باند پایه در لحظه نمونه‌برداری τ و در مدت‌زمان t است. $ff(x,y_s)$ تابع مختلط دوبعدی بازگشتی از میدان هدف است که دو بعد آن در جهت‌های مسیر حرکت (x) و برد مایل (y_s) قرار دارد. p_b سیگنال پالس ارسالی در باند پایه، t مدت‌زمان حضور سیگنال (مجموع زمان ارسال سیگنال و بازگشت آن)، c سرعت صوت و τ لحظه نمونه‌برداری است. همچنین مختصات اولیه سونار در موقعیت $[x \quad y \quad z]$ و مختصات ثانویه سونار در لحظه نمونه‌برداری و پس از انحراف ناخواسته سکو در موقعیت $[x(\tau) \quad y(\tau) \quad z(\tau)]$ است [۳].

ساختار این مقاله به این صورت سازمان‌دهی شده است که در بخش دوم، مدل ریاضی خطای فاز در شش درجه آزادی و فرم‌های زمانی مختلف خطا معرفی می‌شود. بخش سوم به معرفی مشخصات و عامل‌های شبیه‌سازی اختصاص دارد. در بخش چهارم، مدل‌سازی خطای فاز ناشی از تکانه‌های ناخواسته سکو ارائه می‌شوند. بخش پنجم به معرفی شاخص‌های کمی و تحلیل حساسیت و محدودیت‌ها و مفروضات در شبیه‌سازی می‌پردازد. در بخش ششم، بحث و نتیجه‌گیری از یافته‌ها و در نهایت پیشنهادهایی برای تحقیقات آتی ارائه شده است.

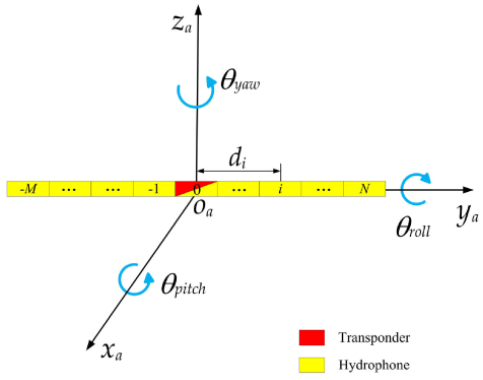
۲. تأثیرات تکانه سکو در جهت شش درجه آزادی

عوامل محیطی همچون امواج دریایی، جزرومد، جریان‌های آبی و باد ممکن است باعث انحراف سونار از مسیر ایدئال کنند. این انحرافات حرکتی در سونارهای روزنه مصنوعی، اگر به‌درستی تعدیل نشوند، باعث کاهش قابل‌ملاحظه کیفیت تصاویر می‌گردند [۷]. برای داشتن تصاویر با مرکزیت مناسب و بدون کاهش واضحی تصاویر، انحرافات حرکت باید کمتر از یک‌هشتم طول‌موج باقی‌مانده باشند.

برای تعیین و کم‌کردن انحرافات حرکتی نیازمند تخمین دقیق مکانیزمی سرعت، مکان و وضعیت سکو در هر لحظه هستیم. حرکت سونار در محیط زیرآبی شش درجه آزادی دارد.

عوامل محیطی همچون امواج نوسانی که منجر به جابه‌جایی طولی می‌گردد. بر اثر حرکت شتابی غیرصفر در امتداد حرکت سکو صورت می‌گیرد که با تنظیم فرکانس تکرار پالس می‌توان خطای ناشی از آن را جبران‌سازی کرد. حرکت ناخواسته جابه‌جایی عرضی بر روی برد تخمین زده شده تمام گیرنده تا اهداف تأثیر مخرب می‌گذارد و باعث به‌وجودآمدن خطا در حرکت می‌گردد. همچنین تأثیر خطای ناشی از جابه‌جایی در جهت عمودی نیز در جابه‌جایی‌های مکانی کوچک و جهت پیچش‌هایی حول محور y، در چرخش‌های زاویه‌ای بزرگ قابل‌صرف نظر کردن نیست. علاوه‌برآن نوسانات زاویه‌ای دوران و پیچش نیز تأثیر زیادی بر روی برد اهداف تا لبه گیرنده‌ها در طول آرایه دارد.

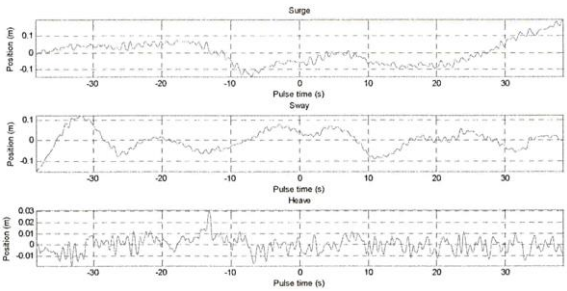
این در حالی است که میزان تأثیر تغییر برد با جابه‌جایی زاویه‌ای غلتش نیز تا حدی کم اتفاق می‌افتد [۴].



شکل (۲). هندسه آرایه هیدروفونی در سامانه‌های سونار روزنه مصنوعی با چند گیرنده [۴]

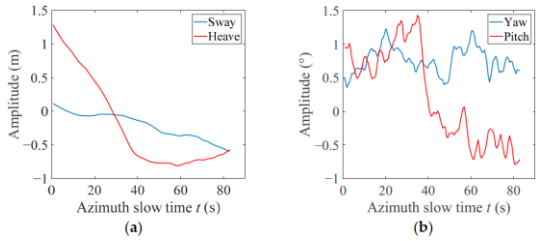
در شکل (۲) آرایه هیدروفونی طولی به تصویر کشیده شده که فاصله هر یک از هیدروفون‌ها به میزان d از یکدیگر قرار دارند و جهت زوایای دورانی نیز در آن مشخص گردیده است. همچنین d_i فاصله بین مرکز گیرنده i ام تا مرکز فرستنده است. φ، θ و ψ به ترتیب زوایای دورانی در جهت غلتش، پیچش و دوران است. همان‌طور که در شکل بالا نشان‌داده‌شده است مرکز چرخش سکو O_A با مرکز فرستنده منطبق است.

در شکل (۳) میزان انحراف حرکت ناخواسته سونار آورده شده است که مطابق این شکل مشخص می‌گردد که در طول حرکت، تکانه‌ها در جهت طولی و عرضی دارای مقدار کمتری است، اما به دلیل امواج روی سطح آب تغییرات حرکت در جهت عمودی می‌تواند دارای مقادیر قابل‌توجهی باشد [۳].



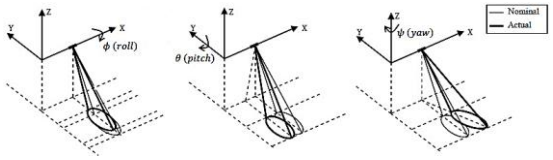
شکل (۳). انحراف‌های حرکتی سونار در طول تصویربرداری [۳]
(تصویر بالا: Surge، تصویر وسط: Sway، تصویر پائین: Heave)

همچنین مطابق مرجع [۴] و بر اساس خروجی سیستم ChinSAS دانشگاه مهندسی نیروی دریایی در شکل (۴) طی یک آزمایش زیر آب علاوه بر اهمیت تغییرات حرکتی عمودی، نشان می‌دهد تغییرات زاویه‌ای پیچش حول محور y و دوران حول محور z نیز در سامانه‌های سونار روزنه مصنوعی دارای بیشترین نوسانات است.



شکل (۴). مقایسه انحراف‌های زاویه‌ای و انتقالی سونار [۴]

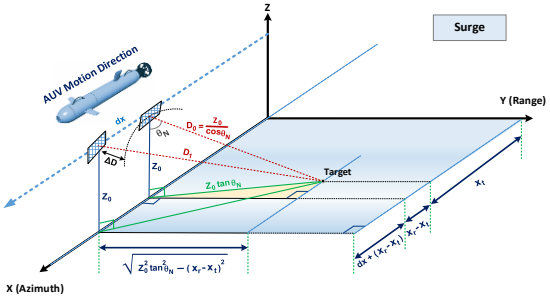
باتوجه‌به شرایط محیطی حساس ذکر شده فوق، برای سونار روزنه مصنوعی در این پژوهش سعی می‌گردد که در جهات مختلف میزان حساسیت هر کدام از جهات درجه آزادی و تأثیر آن بر تخریب تصویرهای ایجاد شده توسط این سامانه‌ها شبیه‌سازی و با یکدیگر مقایسه گردد. نکته حائز اهمیت این است که این میزان تغییرات زمانی در سامانه‌های چند گیرنده در همه گیرنده‌ها یکسان است؛ چراکه نوسان حرکتی بر روی همه گیرنده‌ها به طور یکسان تأثیر می‌گذارد. یک نوسان مثبت باعث می‌شود که هدف نزدیک‌تر از آنچه در واقعیت است به نظر برسد و برعکس یک نوسان منفی باعث می‌شود که هدف دورتر از آنچه که در واقعیت است به نظر برسد. در شکل (۵) اثر تغییر ناحیه پایش سونار در هر گام حرکتی با انحراف‌های زاویه‌ای در جهت‌های غلتش (Roll)، پیچش (Pitch) و دوران (Yaw) به نمایش گذاشته شده است [۲].



شکل (۵). تأثیر حرکت‌های ناخواسته زاویه‌ای سکو [۲]

۲-۱. خطای فاز در اثر جابه‌جایی در جهت طولی

اگر سونار با ارتفاع Z_0 هدفی را با زاویه θ_N ببیند و جابه‌جایی ناخواسته به میزان dx در جهت محور xها داشته باشیم، فاصله سونار مطابق روابط ۳ الی ۶ تا هدف به میزان ΔD_{surge} تغییر می‌کند که همین تغییر فاصله منجر به تغییر فاز می‌شود و در شکل زیر نحوه این تغییر فاصله نشان‌داده‌شده است.



شکل (۶). جابه‌جایی سکو در اثر حرکت ناخواسته در جهت طولی

$$D_0 = \frac{Z_0}{\cos\theta} \quad (۳)$$

$$D_1 = \sqrt{Z_0^{\,2} + Z_0^{\,2} \times tan^2\theta_N + (dx + x_r - x_t)^2 - (x_r - x_t)^2} \quad (۴)$$

$$x_d = x_r - x_t \quad (۵)$$

$$\Delta D_{surge}(Z_0, \theta_N, x_d) = D_1 - D_0 = \sqrt{\frac{Z_0}{cos\,\theta_N} + (dx + x_d)^2 - x_d^{\,2}} - \frac{Z_0}{cos\,\theta_N} \quad (۶)$$

در نتیجه خطای فاز به میزان $\Delta\varphi_{surge}$ مطابق روابط ۷ و ۸ رخ خواهد داد که برابر است با:

$$\Delta t_{surge} = \frac{2 \times \Delta D_{surge}}{c} \quad (۷)$$

$$\Delta\varphi_{surge} = 2\pi f_0 \times \Delta t_{surge} = \frac{4\pi f_0}{c} \times \left[\sqrt{\frac{Z_0}{\cos\theta_N} + (dx + x_d)^2 - x_d^{\,2}} - \frac{Z_0}{\cos\theta_N}\right] \quad (۸)$$

که در آن عامل‌ها به‌صورت زیر تعریف می‌گردند:

D_0: فاصله مرکز آرایه سونار تا هدف قبل از تکانه ناخواسته

D_1: فاصله مرکز آرایه سونار تا هدف بعد از تکانه ناخواسته

x_t, y_t: مختصات هدف

θ_N: زاویه دید هدف توسط سونار

x_r: مختصات سونار در جهت محور x

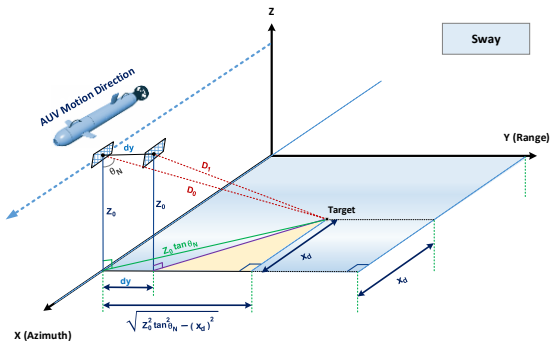
Z_0: ارتفاع سونار

dx: میزان جابه‌جایی ناخواسته در جهت طولی

۲-۲. خطای فاز در اثر جابه‌جایی در جهت عرضی

اگر سونار با ارتفاع Z_0 هدفی را با زاویه θ_N ببیند که دارای اختلاف فاصله x_d در جهت محور xها باشد، بعد از تکانه ناخواسته در جهت عرضی، جابه‌جایی به‌اندازه d_y در راستای محور yها دارای اختلاف فاصله ΔD_{sway} مطابق روابط ۹ الی ۱۱ خواهد شد.

$$D_0 = \frac{Z_0}{\cos\theta} \quad (۹)$$



شکل (۷). جابه‌جایی سکو در اثر حرکت ناخواسته در جهت عرضی

$$D_1 = \sqrt{Z_0^{\,2} + \left[\sqrt{Z_0^{\,2} tan^2\theta_N - (x_d)^2} - dy\right]^2 + (+x_d)^2} = \sqrt{Z_0^{\,2}(1 + tan^2\theta_N) + (dy)^2 + (-2dy\sqrt{Z_0^{\,2} tan^2\theta_N - (x_d)^2})} \quad (۱۰)$$

$$\Delta D_{sway}(Z_0, \theta_N, x_d, dy) = D_1 - D_0 = \frac{Z_0}{\cos\theta} - \sqrt{Z_0^{\,2}(1 + tan^2\theta_N) + (dy)^2 - 2dy\sqrt{Z_0^{\,2} tan^2\theta_N - (x_d)^2}} \quad (۱۱)$$

در نتیجه خطای فاز به میزان $\Delta\varphi_{sway}$ مطابق روابط ۱۲ و ۱۳ رخ خواهد داد که برابر است با:

$$\Delta t_{sway} = \frac{2 \times \Delta D_{sway}}{c} \quad (۱۲)$$

$$\Delta\varphi_{sway} = 2\pi f_0 \times \Delta t_{sway} = \frac{4\pi f_0}{c} \times \left[\frac{Z_0}{\cos\theta} - \sqrt{Z_0^{\,2}(1 + tan^2\theta_N) + (dy)^2 - 2dy\sqrt{Z_0^{\,2} tan^2\theta_N - (x_d)^2}}\right] \quad (۱۳)$$

که در آن عامل‌ها به‌صورت زیر تعریف می‌گردند:

D_0: فاصله مرکز آرایه سونار تا هدف قبل از تکانه ناخواسته

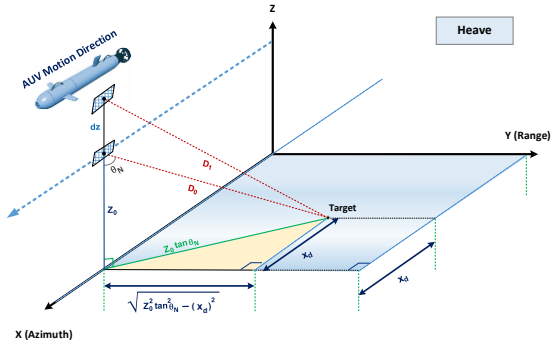
D_1: فاصله مرکز آرایه سونار تا هدف بعد از تکانه ناخواسته

x_d: اختلاف فاصله هدف و سونار در راستای محور x

dy: میزان جابه‌جایی ناخواسته در جهت عرضی

۲-۳. خطای فاز در اثر جابه‌جایی در جهت عمودی

اگر سونار با ارتفاع Z_0 هدفی را با زاویه θ_N ببیند، بعد از تکانه ناخواسته در جهت عمودی، جابه‌جایی به‌اندازه d_z در راستای محور zها دارای اختلاف فاصله ΔD_{heave} مطابق روابط ۱۴ الی ۱۶ خواهد شد.



شکل (۸). جابه‌جایی سکو در اثر حرکت ناخواسته در جهت قائم

$$D_0 = \frac{Z_0}{\cos\theta} \qquad (۱۴)$$

$$D_1 = \sqrt{(Z_0 + dz)^2 + Z_0{}^2 tan^2\theta_N} \qquad (۱۵)$$

$$\Delta D_{heave}(Z_0, \theta_N, dz) = D_1 - D_0$$
$$= \sqrt{(Z_0 + dz)^2 + Z_0{}^2 tan^2\theta_N} - \frac{Z_0}{\cos\theta} \qquad (۱۶)$$

در نتیجه خطای فاز به میزان $\Delta\varphi_{heave}$ مطابق روابط ۱۷ و ۱۸ رخ خواهد داد که برابر است با:

$$\Delta t_{heave} = \frac{2 \times \Delta D_{heave}}{c} \qquad (۱۷)$$

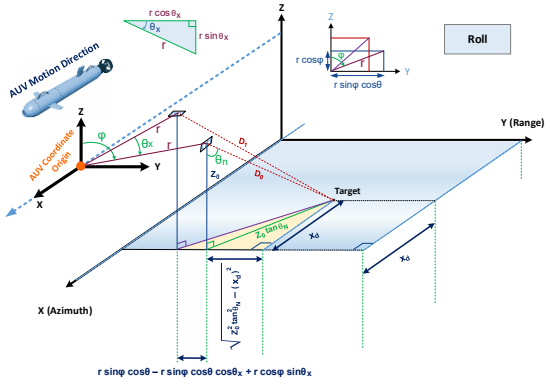
$$\Delta\varphi_{heave} = 2\pi f_0 \times \Delta t_{heave} = \frac{4\pi f_0}{c} \times$$
$$\left[\sqrt{Z_0{}^2\left(1 + tan^2\theta_N\right) + 2Z_0 dz + dz^2} - \frac{Z_0}{\cos\theta}\right] \qquad (۱۸)$$

۲-۴. خطای فاز در اثر چرخش ناخواسته غلتش

در این صورت اگر سونار با ارتفاع Z_0 و فاصله r از مبدأ AUV، دارای مختصات کروی (r,θ,φ) نسبت به مبدأ AUV باشد و هدفی را با زاویه θ_N ببیند که در راستای محور x ها، به میزان x_d اختلاف فاصله دارند، دچار چرخش ناخواسته غلتش به میزان θ_x شود، آنگاه اختلاف فاصله ΔD_{roll} مطابق روابط ۱۹ الی ۲۴ ایجاد می‌شود.

برای درک بهتر به بیان تأثیر چرخش ناخواسته حول محور x در مختصات کروی پرداخته می‌شود. در همین راستا ابتدا ماتریس دوران حول محور x بیان می‌گردد:

$$R_x = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\theta_x & -\sin\theta_x \\ 0 & \sin\theta_x & \cos\theta_x \end{bmatrix} \qquad (۱۹)$$



شکل (۹). چرخش ناگهانی سکو در اثر حرکت ناخواسته غلتش

$$R_x \times \begin{bmatrix} 0 \\ r\sin\varphi\cos\theta \\ r\cos\varphi \end{bmatrix} =$$
$$\begin{bmatrix} 0 \\ r\sin\varphi\cos\theta\cos\theta_x - r\cos\varphi\sin\theta_x \\ r\sin\varphi\cos\theta\sin\theta_x + r\cos\varphi\cos\theta_x \end{bmatrix} \qquad (۲۰)$$

$$D_0 = \frac{Z_0}{\cos\theta} \qquad (۲۱)$$

جهت ساده‌نویسی عامل‌های A و B به‌صورت زیر تعریف می‌شوند.

$$\begin{cases} B = Z_0 - r\cos\varphi + r\sin\varphi\cos\theta\sin\theta_x + \\ r\cos\varphi\cos\theta_x \\ A = \sqrt{Z_0{}^2 \times tan^2\theta_N - (x_d)^2} + \\ r\sin\varphi\cos\theta(1 - \cos\theta_x) + r\cos\varphi\sin\theta_x \end{cases} \qquad (۲۲)$$

$$D_1 = \sqrt{B^2 + A^2 + (x_d)^2} \qquad (۲۳)$$

$$\Delta D_{roll}(Z_0, \theta_N, \theta_x, x_d, r) = D_1 - D_0$$
$$= \sqrt{B^2 + A^2 + (x_d)^2} - \frac{Z_0}{\cos\theta} \qquad (۲۴)$$

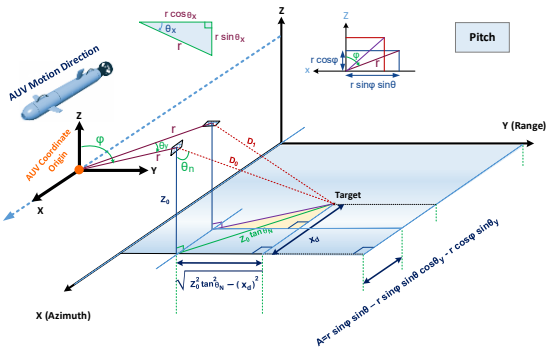
در نتیجه خطای فاز به میزان $\Delta\varphi_{roll}$ مطابق روابط ۲۵ و ۲۶ رخ خواهد داد که برابر است با:

$$\Delta t_{roll} = \frac{2 \times \Delta D_{roll}}{c} \qquad (۲۵)$$

$$\Delta\varphi_{roll} = 2\pi f_0 \times \Delta t_{roll} = \frac{4\pi f_0}{c} \times$$
$$\left[\sqrt{B^2 + A^2 + (x_d)^2} - \frac{Z_0}{\cos\theta}\right] \qquad (۲۶)$$

۲-۵. خطای فاز در اثر چرخش ناخواسته پیچش

اگر آرایه حسگرها که بر روی سکو تعبیه شده است حول محور Y به میزان θ_y درجه دچار چرخش شود، فاصله سونار تا هدف حول آن محور دچار چرخش شده تغییر می‌کند در این صورت اگر سونار هدفی را با زاویه θ_N ببیند که دارای اختلاف فاصله x_d در جهت محور xها باشد، بعد از تکانه ناخواسته در جهت $Pitch$ حول محور yها دارای اختلاف فاصله ΔD_{pitch} مطابق روابط ۲۷ الی ۳۲ خواهد شد.



شکل (۱۰). چرخش ناگهانی سکو در اثر حرکت ناخواسته پیچش

برای درک بهتر به بیان تأثیر چرخش ناخواسته حول محور y در مختصات کروی پرداخته می‌شود. در همین راستا ابتدا ماتریس دوران حول محور y بیان می‌گردد:

$$R_y = \begin{bmatrix} \cos\theta_y & 0 & \sin\theta_y \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin\theta_y & 0 & \cos\theta_y \end{bmatrix} \quad (۲۷)$$

$$R_y \times \begin{bmatrix} r\sin\varphi\sin\theta \\ 0 \\ r\cos\varphi \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r\sin\varphi\sin\theta\cos\theta_y + r\cos\varphi\sin\theta_y \\ 0 \\ -r\sin\varphi\sin\theta\sin\theta_y + r\cos\varphi\cos\theta_y \end{bmatrix} \quad (۲۸)$$

$$D_0 = \frac{Z_0}{\cos\theta} \quad (۲۹)$$

باهدف ساده‌نویسی عامل‌های A و B به‌صورت زیر تعریف می‌شوند.

$$\begin{cases} B = Z_0 - r\cos\varphi + r\cos\varphi\ \cos\theta_y - \\ r\sin\varphi\sin\theta\sin\theta_y \\ A = r\sin\varphi\sin\theta - r\sin\varphi\sin\theta\cos\theta_y - \\ r\cos\varphi\ \sin\theta_y \end{cases} \quad (۳۰)$$

$$D_1 = \sqrt{B^2 + (x_d - A)^2 + Z_0^2\tan^2\theta_N - (x_d)^2} \quad (۳۱)$$

$$\Delta D_{pitch}(Z_0, \theta_N, \theta_y, x_d, r) = D_1 - D_0 = \sqrt{\begin{matrix} B^2 + (x_d - A)^2 + \\ Z_0^2\tan^2\theta_N - (x_d)^2 \end{matrix}} - \frac{Z_0}{\cos\theta} \quad (۳۲)$$

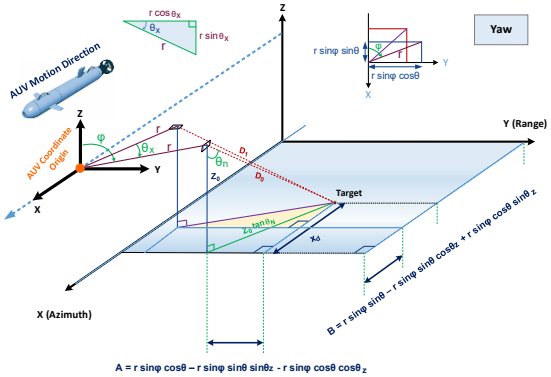
در نتیجه خطای فاز به میزان $\Delta\varphi_{roll}$ مطابق روابط ۳۳ و ۳۴ رخ خواهد داد که برابر است با:

$$\Delta t_{pitch} = \frac{2\times\Delta D_{pitch}}{c} \quad (۳۳)$$

$$\Delta\varphi_{pitch} = 2\pi f_0 \times \Delta t_{pitch} = \frac{4\pi f_0}{c} \times \left[\sqrt{\begin{matrix} B^2 + (x_d - A)^2 + \\ Z_0^2\tan^2\theta_N - (x_d)^2 \end{matrix}} - \frac{Z_0}{\cos\theta}\right] \quad (۳۴)$$

۲-۶. خطای فاز در اثر چرخش ناخواسته دوران

اگر آرایه حسگرها که بر روی سکو تعبیه شده است حول محور Z به میزان θ_z درجه دچار چرخش شود، فاصله سونار تا هدف حول آن محور دچار چرخش شده تغییر می‌کند در این صورت اگر سونار هدفی را با زاویه θ_N ببیند که دارای اختلاف فاصله x_d در جهت محور xها باشد، بعد از تکانه ناخواسته در جهت Yaw حول محور zها دارای اختلاف فاصله ΔD_{yaw} مطابق روابط ۳۵ الی ۴۰ خواهد شد.



شکل (۱۱). چرخش ناگهانی سکو در اثر حرکت ناخواسته دوران

برای درک بهتر به بیان تأثیر چرخش ناخواسته حول محور z در مختصات کروی پرداخته می‌شود. در همین راستا ابتدا ماتریس دوران حول محور z بیان می‌گردد:

$$R_z = \begin{bmatrix} \cos\theta_z & -\sin\theta_z & 0 \\ \sin\theta_z & \cos\theta_z & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (۳۵)$$

$$R_z \times \begin{bmatrix} r\sin\varphi\sin\theta \\ r\sin\varphi\cos\theta \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r\sin\varphi\sin\theta\cos\theta_z - r\sin\varphi\cos\theta\sin\theta_z \\ r\sin\varphi\sin\theta\sin\theta_z + r\sin\varphi\cos\theta\cos\theta_z \\ 0 \end{bmatrix} \quad (۳۶)$$

$$D_0 = \frac{Z_0}{\cos\theta} \quad (۳۷)$$

باهدف ساده‌نویسی عامل‌های A و B به‌صورت زیر تعریف می‌شوند.

$$\begin{cases} B = r\sin\varphi\sin\theta - r\sin\varphi\sin\theta\cos\theta_z + \\ r\sin\varphi\cos\theta\sin\theta_z \\ A = r\sin\varphi\cos\theta - r\sin\varphi\sin\theta\sin\theta_z - \\ r\sin\varphi\cos\theta\cos\theta_z \end{cases} \quad (۳۸)$$

$$D_1 = \sqrt{Z_0^2 + (x_d - B)^2 + (\sqrt{Z_0^2\tan^2\theta_N - (x_d)^2} + A)^2} \quad (۳۹)$$

$$\Delta D_{yaw}(Z_0, \theta_N, \theta_z, x_d, r) = D_1 - D_0 = \sqrt{Z_0^2 + (x_d - B)^2 + (\sqrt{Z_0^2\tan^2\theta_N - (x_d)^2} + A)^2} - \frac{Z_0}{\cos\theta} \quad (۴۰)$$

در نتیجه خطای فاز به میزان $\Delta\varphi_{yaw}$ مطابق روابط ۴۱ و ۴۲ رخ خواهد داد که برابر است با:

$$\Delta t_{yaw} = \frac{2\times\Delta D_{yaw}}{c} \quad (۴۱)$$

$$\Delta\varphi_{yaw} = 2\pi f_0 \times \Delta t_{yaw} = \frac{4\pi f_0}{c} \times \left[\sqrt{Z_0^2 + (x_d - B)^2 + (\sqrt{Z_0^2\tan^2\theta_N - (x_d)^2} + A)^2} - \frac{Z_0}{\cos\theta}\right] \quad (۴۲)$$

۳. مشخصات و عامل‌های شبیه‌سازی

به‌منظور بررسی و تحلیل دقیق تأثیر تکانه‌های ناخواسته سکو در جهت شش درجه آزادی، سناریوهای مختلف شبیه‌سازی با استفاده از نرم‌افزار MATLAB تعریف و اجرا شده است. نوع سیگنال ارسالی LFM است و فرم زمانی خطا به‌صورت سینوسی در نظر گرفته شده است. همچنین تأکید می‌شود که جهت بهتر مشخص‌شدن مقایسه تأثیر تکانه‌های ناخواسته، تمامی شبیه‌سازی‌ها با یک فرستنده و یک گیرنده انجام شده‌اند تا تأثیر تعداد حسگرها و نوع چینش آرایه هیدروفونی بر روی نتایج اثرگذار نباشد.

مشخصات عددی و دقیق عامل‌های استفاده شده در این شبیه‌سازی‌ها در جدول (۱) ارائه شده است.

جدول (۱). عامل‌های مورداستفاده در شبیه‌سازی

عامل	مقدار	خطای استاندارد
فرکانس مرکزی	۳۰KHz	حدود ±۰/۵KHz
پهنای باند	۲۰KHz	±۱KHz
سرعت صوت در آب	۱۵۰۰m/s	±۳m/s
سرعت سکو	۱/۵m/s	±۰/۱m/s
طول‌موج	۵cm	۰/۰۵cm
مدت‌زمان پالس	۵ms	۰/۱ms
ارتفاع سکو از سطح بستر دریا	۳۵m	۰/۱m
زاویه نشیب	۶۰ (	±۰/۵ (
فرکانس خطا	۵Hz	±۰/۰۵Hz
بازه زمانی تکرار پالس	۰/۵s	±۰/۰۱s
فرکانس نمونه‌برداری	۱۰۰KHz	±۱KHz
عرض پرتو (-۳dB)	۲۰ (	±۱ (
سطح گلبرگ جانبی	-۱۵dB	±۱dB

۴. مدل‌سازی خطای فاز ناشی از تکانه‌های ناخواسته سکو

در سامانه‌های سونار روزنه مصنوعی موقعیت هر عضو آرایه هیدروفونی نسبت به هدف باید بادقت بالا ثبت شود. هرگونه تکانه ناخواسته باعث تغییر لحظه‌ای فاصله بین آرایه و هدف و در نتیجه ایجاد خطای فاز در سیگنال دریافتی می‌شود. در این شرایط اگر موقعیت آرایه در لحظه ایدئال (بدون تکانه) $\overrightarrow{r_0}$ و در حضور تکانه $\overrightarrow{r_t}$ باشد. میزان تغییر برد به هدف مطابق رابطه ۴۳ برابر است با:

$$\Delta R(t) = \left\| \vec{r_t} - \overrightarrow{r_{target}} \right\| - \left\| \vec{r_0} - \overrightarrow{r_{target}} \right\| \qquad (۴۳)$$

برای هر محور، تکانه به‌صورت سینوسی و مطابق رابطه ۴۴ مدل می‌شود:

$$\Delta_{axis}(t) = A_{axis} \times \sin(2\pi f_{axis} t + \varphi_{axis}) \qquad (۴۴)$$

که در آن A_{axis} معادل دامنه خطا است که در حرکات انتقالی بر حسب متر و در حرکات چرخشی بر حسب درجه است. همچنین f_{axis} معرف فرکانس است که معمولاً بین ۰.۰۱ تا ۱ هرتز برای سکو شروع می‌شود و φ_{axis} نیز فاز اولیه است.

این مدل‌سازی دقیقاً با فیزیک حرکات واقعی سکو متناسب با امواج، جریان زیرآبی یا تکانه‌های مکانیکی سازگار است.

خطای فاز ناشی از تکانه‌های حرکتی سکو مستقیماً به دلیل افزایش مسیر طی شده به وجود می‌آید و به‌صورت مطابق رابطه ۴۵ بیان می‌شود:

$$\Delta\varphi_{axis}(t) = \frac{4\pi}{\lambda} \Delta R_{axis}(t) \qquad (۴۵)$$

که در آن $\Delta R_{axis}(t)$ تغییرات لحظه‌ای برد ناشی از حرکت سکو در هر درجه آزادی و λطول‌موج سیگنال سونار است. این خطای فاز موجب اختلال در هم‌ترازی سیگنال‌های دریافتی شده و باعث تخریب لوب اصلی تصویر بازسازی‌شده و ایجاد لوب‌های جانبی قوی و نویز می‌شود.

تأثیر فیزیکی خطا در هر درجه آزادی متفاوت است. حرکت جابه‌جایی عمودی بیشترین تأثیر را دارد، چرا که معمولاً راستای پرتو سونار در جهت عمودی است. جابه‌جایی عرضی نیز بر کیفیت تصویر اثرگذار است؛ اما شدت آن کمتر از جابه‌جایی عمودی است .همچنین جابه‌جایی طولی کمترین تأثیر را دارد؛ زیرا این محور با جهت حرکت اصلی سکو تطابق بیشتری دارد. در میان خطاهای چرخشی، دوران (چرخش حول محور عمودی) با تغییردادن محور دید آرایه، شدیدترین بازتوزیع انرژی و بیشترین تخریب تصویر را به دنبال دارد. همچنین پیچش (چرخش حول محور عرضی) موجب کشیدگی و پراکندگی تصویر در امتداد عمودی می‌شود و تأثیر متوسطی دارد و در نهایت غلتش (چرخش حول محور طولی) عمدتاً باعث کشیدگی جانبی تصویر شده و کمتر باعث افت محسوس وضوح هدف می‌گردد.

بنابراین، در کل فرایند تصویربرداری، سیگنال دریافتی هر المان آرایه هیدروفونی با خطای فاز ناشی از تکانه‌های سینوسی ترکیب می‌شود. در مرحله بازسازی تصویر با الگوریتم backprojection، این خطاها به طور مستقیم منجر به افت عامل‌های کیفی تصویر و کاهش قابلیت سامانه در آشکارسازی و تفکیک اهداف می‌شود.

۵. شاخص‌های کمی کیفیت تصویر

در این پژوهش برای ارزیابی کمی اثر تکانه‌های حرکتی بر کیفیت تصویر سونار، چهار شاخص استاندارد تصویری مورداستفاده قرار گرفته است که هرکدام جنبه‌ای متفاوت از تخریب تصویر را کمّی می‌کنند. نخست، شاخص RMSE یا خطای جذر میانگین مربعات، میزان انحراف کلی تصویر شبیه‌سازی‌شده نسبت به تصویر مرجع ایدئال را نشان می‌دهد و هرچه مقدار آن کمتر باشد، تصویر به نمونه مرجع نزدیک‌تر است. افزایش مقدار آن به معنای بروز تخریب کلی تصویر نظیر جابه‌جایی لوب اصلی، ایجاد هاله یا کشیدگی است و معمولاً مقادیر بالاتر از ۰/۰۳m تا ۰/۰۵m، آغازی بر تخریب محسوس تصویر به شمار می‌آیند.

شاخص دوم PSNR یا نسبت اوج سیگنال به نویز است که نسبت انرژی سیگنال مرجع به انرژی خطا را به‌صورت لگاریتمی و بر حسب دسی‌بل بیان می‌کند. هرچه این مقدار بالاتر باشد، وضوح و خلوص تصویر بیشتر خواهد بود و افت به زیر ۲۵dB تا ۲۷dB نشانه تخریب شدید تصویر و غیرقابل‌استفاده بودن آن برای شناسایی اهداف است و این شاخص برای خطاهای کوچک در محورهای با حساسیت بالا مانند جابه‌جایی و چرخش در جهت محور عمودی بسیار سریع افت می‌کند.

سومین شاخص، PSLR یا نسبت بیشینه توان لوب جانبی به لوب اصلی است که معیاری از میزان تداخل و قدرت نویز جانبی در تصویر است. هرچه مقدار PSLR منفی‌تر باشد، تصویر تمیزتر و تداخل لوب جانبی کمتر است. افزایش PSLR (کاهش منفی بودن) بیانگر رشد لوب جانبی و پنهان‌شدن هدف در میان نویز است و معمولاً برای PSLR بیشتر از ۷dB-، تصویر غیرقابل‌اطمینان در نظر گرفته می‌شود.

چهارمین شاخص ISLR یا نسبت تجمیعی انرژی لوب‌های جانبی به انرژی لوب اصلی است که توزیع کل انرژی خارج از لوب اصلی هدف را می‌سنجد. اگر مقدار ISLR به صفر یا مثبت نزدیک شود، بیشتر انرژی در لوب‌های جانبی تمرکزیافته و تصویر بی‌ارزش می‌شود، درحالی‌که ISLR کمتر از ۵dB- ، کیفیت قابل‌قبولی را برای شناسایی هدف تضمین می‌کند.

استخراج این شاخص‌ها در سه مرحله انجام می‌شود. ابتدا بازسازی تصویر برای هر سناریوی اعمال تکانه‌های سینوسی، سپس محاسبه چهار شاخص فوق برای هر حالت و هر دامنه خطا بر اساس مقادیر جداول مربوط به هر محور و در نهایت تحلیل روند تغییر شاخص‌ها نسبت به افزایش دامنه خطا به‌منظور ارزیابی حساسیت سیستم صورت می‌گیرد. اهمیت ترکیبی این

شاخص‌ها نیز در تحلیل هم‌زمان آنها مشخص می‌شود. به‌گونه‌ای که برای خطاهای ناشی از جابه‌جایی عمودی، افت هم‌زمان PSNRو PSLR حتی در مقادیر پایین خطا، بیانگر حساسیت بسیار زیاد تصویر به این خطاهاست. اما در اثر جابه‌جایی در جهت طولی و یا چرخش حول این محور، شاخص‌ها تا مقادیر بالای خطا پایدار می‌مانند و اثر تخریب تکانه ناچیز است. همچنین، اگر RMSE افزایش یابد اما PSNR نسبتاً بالا بماند، نشان‌دهنده کشیدگی یا تغییر موقعیت هدف بدون افزایش نویز شدید خواهد بود. نکته حائز اهمیت این است که عبور هر شاخص از آستانه‌های تجربی، مانند PSNR کمتر از ۲۵dB یا PSLR بیشتر از ۷dB-، به‌عنوان معیار علمی تخریب جدی تصویر در نظر گرفته می‌شود و همین آستانه‌ها برای تحلیل عددی و تعیین حدود مرزی تخریب در جداول این پژوهش به کار گرفته شده‌اند.

۵-۱. مدل‌سازی حساسیت و روابط متناسب عددی

برای هر محور مطابق رابطه ۴۶ و ۴۷، افت *PSNR* نسبت به دامنه خطا با مدل نمایی متناسب شده است.

$$PSNR_{axis}(x) = a e^{-bx} + c \qquad (۴۶)$$

$$S_{PSNR_{axis}(x)} = \left|\frac{dPSNR_{axis}(x)}{dx}\right| = ab\, e^{-bx} \qquad (۴۷)$$

که در آن ضرایب a، b، c بر اساس داده‌های جدول زیر تخمین زده شده است.

جدول (۲). ضرایب تناسب در محاسبه حساسیت

جهت منتخب	a	b	c
Surge	۸	۰/۷	۱۷
Sway	۱۸	۱/۹	۱۰
Heave	۲۰	۲/۱	۱۱
Roll	۸	۰/۵	۱۵
Pitch	۱۰	۱/۱	۱۴
Yaw	۱۴	۱/۴	۱۲

۵-۲. محدودیت‌ها و فرضیات پژوهش

در این پژوهش، باوجود تلاش برای مدل‌سازی دقیق و تحلیل کمی اثر تکانه‌های حرکتی سکو در شش درجه آزادی بر کیفیت تصویر سونار روزنه مصنوعی، محدودیت‌هایی وجود دارد که باید موردتوجه قرار گیرد. نخست اینکه مدل حرکتی به‌کاررفته تنها شامل تکانه‌های سینوسی پیوسته و تک‌محوره است، درحالی‌که در شرایط واقعی، حرکات ناخواسته ممکن است ترکیبی از نویزهای تصادفی، تکانه‌های لحظه‌ای و تغییرات هم‌زمان در چند محور باشند که می‌تواند منجر به پاسخ‌های غیرخطی و پیچیده‌تری شود؛ بنابراین، نتایج ارائه‌شده عمدتاً برای شرایط تکانه منظم و مستقل معتبر بوده و برای نویزهای ترکیبی یا حرکات آشوبناک نیاز به بررسی تکمیلی دارد.

ازسوی‌دیگر، تمام شبیه‌سازی‌ها در محیط آبی همگن با عامل‌های صوتی ثابت انجام شده است و اثرات تغییرات سرعت صوت، لایه‌بندی‌های محیط، وجود موانع و سایر عوامل محیطی واقعی لحاظ نشده است؛ درحالی‌که در سناریوهای عملیاتی این موارد می‌تواند موجب انحراف سیگنال و تغییر حساسیت سامانه شود. همچنین، نویز سیستمی و سخت‌افزاری مانند خطای حسگرها، خطای کالیبراسیون آرایه و نویز الکترونیکی به طور مستقل در این پژوهش لحاظ نشده است و این منابع نویز در عمل می‌تواند با تکانه‌های حرکتی ترکیب شده و باعث افت بیشتر کیفیت تصویر گردد.

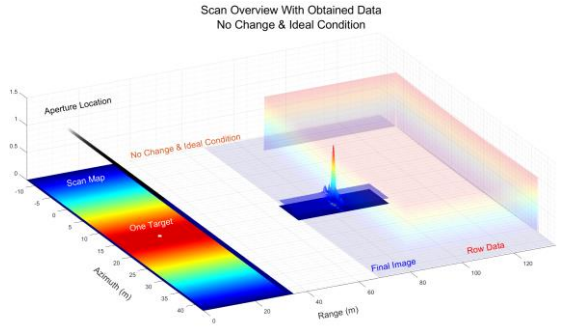
در بخش الگوریتم پردازش نیز صرفاً از روش متداول بازسازی تصویر backprojection استفاده شده و تأثیر استفاده از الگوریتم‌های پیشرفته‌تر، نظیر جبران خطای هوشمند یا پردازش یادگیری‌محور، بررسی نشده است. همچنین تحلیل‌ها عمدتاً برای هدف نقطه‌ای و آرایه‌ای با آرایش خاص انجام شده است و اثر تکانه‌ها بر اهداف گسترده‌تر یا توزیع‌های پیچیده‌تر مورد ارزیابی قرار نگرفته است. سرانجام، تمام نتایج بر مبنای شبیه‌سازی عددی است و به علت نبود داده‌های میدانی یا آزمایشگاهی، صحت نتایج با داده واقعی سنجیده نشده است.

در مجموع، هرچند این پژوهش توانسته مدل حساسیت کمی برای تکانه‌های حرکتی در شش درجه آزادی ارائه کند، اما تعمیم کامل نتایج به شرایط واقعی و عملیاتی، نیازمند مطالعات تکمیلی، شبیه‌سازی‌های پیشرفته‌تر و انجام اعتبارسنجی تجربی در محیط‌های متنوع و واقعی است.

۶. مقایسه تأثیر تکانه‌های حرکت انتقالی سکو

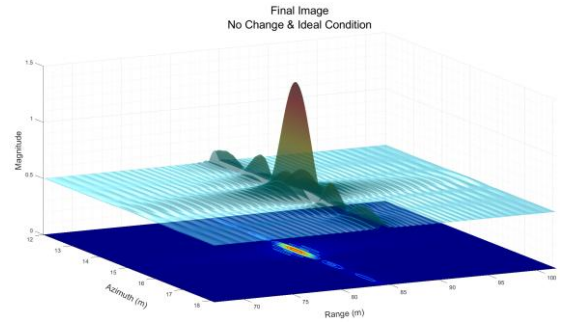
برای مقایسه اثرات تکانه‌های ناخواسته سکو بر کیفیت تصویر و به جهت مقایسه بهتر میزان تأثیر آن بر درجات آزادی، ابتدا شبیه‌سازی برای یک هدف نقطه‌ای در حالت ایدئال و بدون تکانه بیان می‌گردد. به همین منظور در شکل (۱۲) نمای کلی اسکن صحنه و ساخت اطلاعات خام ورودی برای به‌دست‌آوردن یک تصویر نقطه‌ای به نمایش گذاشته شده است. برای درک بهتر در سمت چپ همان‌طور که سونار در جهت سمت شروع به اسکن محیط می‌کند، در سمت راست تصویر نحوه تشکیل تابع سینک و ماتریس اطلاعات خام در یک تصویر مشترک به نمایش گذاشته

شده است.

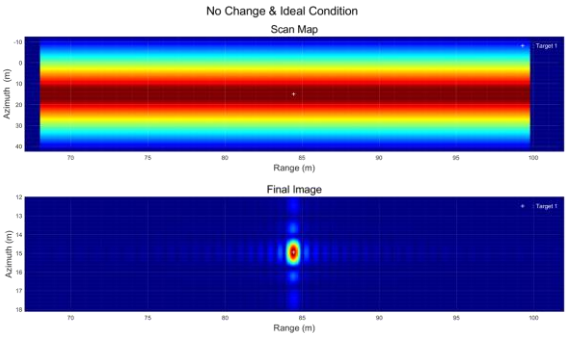


شکل (۱۲). اسکن محیط و نحوه تشکیل تابع سینک در یک هدف ایدئال نقطه‌ای

در شکل (۱۳) نحوه تشکیل تصویر یک هدف نقطه‌ای در شرایط ایدئال و بدون تکانه ناخواسته نشان‌داده‌شده است که فاصله لوب‌های جانبی از لوب اصلی به‌خوبی دیده می‌شود.



شکل (۱۳). تابع سینک یک هدف ایدئال و لوب‌های اصلی و جانبی

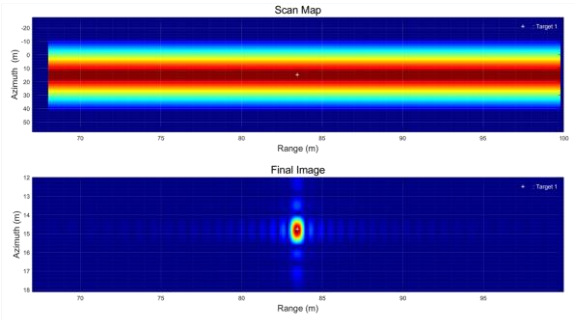


شکل (۱۴). تصویرسازی یک هدف نقطه‌ای در شرایط ایدئال

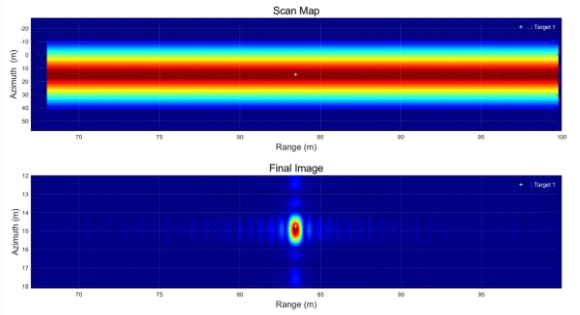
مطابق شبیه‌سازی‌های صورت‌گرفته به تأثیر جابه‌جایی سکو به‌صورت حرکت انتقالی در جهت محور x، y و z پرداخته می‌شود به‌طوری‌که در بخش بالای هر تصویر تغییرات در ناحیه اسکن شده توسط سونار پس از هر تکانه در راستای درجات آزادی حرکت انتقالی و در بخش پائین تصاویر میزان تخریب یک هدف نقطه‌ای در اثر تغییر ناگهانی سکو نمایش‌داده‌شده است. برای درک بهتر اثر عامل‌ها، تصویرسازی یک هدف نقطه‌ای را با جابه‌جایی در جهت طولی، عرضی و عمودی به مقدار ۰/۱m، ۰/۵m، ۱m، ۵m، ۱۰m و ۱۵m ارائه گردیده است. نتایج مقایسه این تکانه‌ها، امکان طراحی بهتر و اتخاذ تدابیر پیشگیرانه در ساخت سکو و چیدمان آرایه هیدروفون در سونارهای روزنه مصنوعی را فراهم می‌سازد و همچنین می‌تواند نقش مؤثری در بهبود الگوریتم‌های جبران‌سازی خطای فاز ناشی از حرکات سکو، به‌ویژه در راستاهایی که بیشترین تأثیر را بر کیفیت تصویربرداری دارند، ایفا کند.

۶-۱. تأثیر جابه‌جایی طولی بر کیفیت تصویر

جابه‌جایی در این جهت بیانگر انتقال طولی سکو در راستای حرکت اصلی است. طبق نتایج شبیه‌سازی، این محور کمترین حساسیت را در بین درجات آزادی انتقالی دارد و تا خطاهای ۱m، شاخص‌هایی مانند *PSNR* و *RMSE* همچنان در محدوده قابل‌قبول باقی می‌مانند و شکل لوب اصلی تصویر به‌خوبی حفظ می‌شود. فقط برای خطاهای بزرگ‌تر (۵m و بیشتر)، افت کیفیت محسوس شده و شاخص‌های *PSLR* و *ISLR* به حدود بحرانی نزدیک می‌شوند. این پایداری به دلیل تطابق جهت *Surge* با راستای طولی روزنه مصنوعی است و سامانه نسبت به جابه‌جایی‌های طولی کمتر آسیب‌پذیر است.



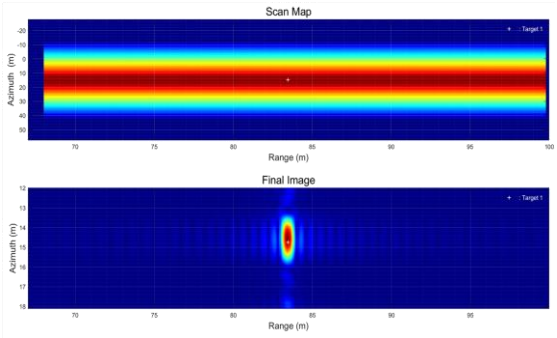
شکل (۱۵). میزان تخریب تصویرسازی یک هدف نقطه‌ای با جابه‌جایی در جهت طولی و به میزان ۰/۱m



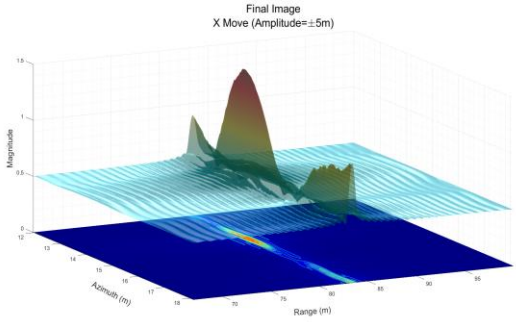
شکل (۱۶). میزان تخریب تصویرسازی یک هدف نقطه‌ای با جابه‌جایی در جهت طولی و به میزان ۰/۵m

در شکل (۱۸) افزایش محسوس میزان انرژی لوب‌های جانبی در خطای ۵m در جابه‌جایی ناخواسته در جهت طولی به نمایش گذاشته شده است.

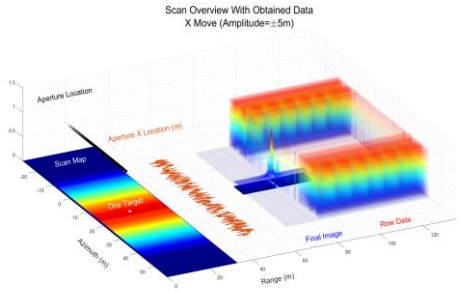
و همچنین نحوه تصویرسازی در خطای ۵m در جابه‌جایی ناخواسته در جهت طولی در شکل (۱۹) نشان‌داده‌شده است.



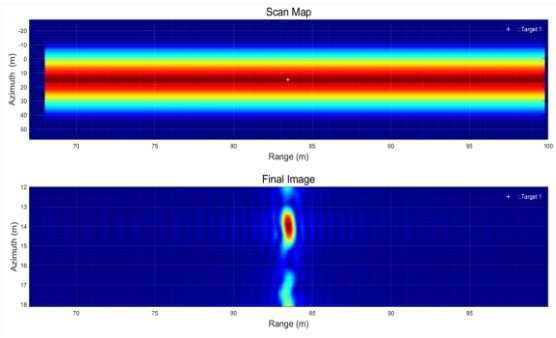
شکل (۱۷). میزان تخریب تصویرسازی یک هدف نقطه‌ای با جابه‌جایی در جهت طولی و به میزان ۱m



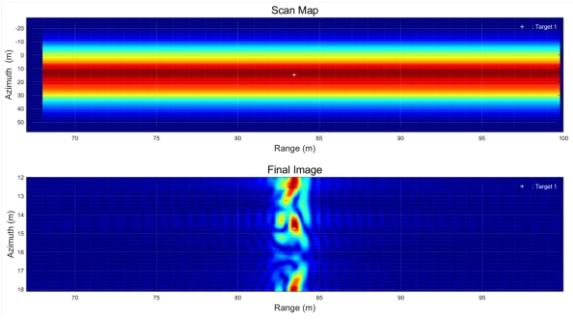
شکل (۱۸). افزایش انرژی لوب‌های جانبی در خطای جابه‌جایی به میزان ۵m در جهت طولی



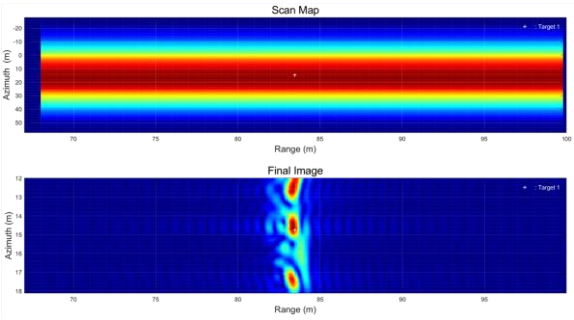
شکل (۱۹). نحوه اسکن و تصویرسازی یک هدف نقطه‌ای با جابه‌جایی در جهت طولی و به میزان ۵m



شکل (۲۰). میزان تخریب تصویرسازی یک هدف نقطه‌ای با جابه‌جایی در جهت طولی و به میزان ۵m



شکل (۲۱). میزان تخریب تصویرسازی یک هدف نقطه‌ای با جابه‌جایی در جهت طولی و به میزان ۱۰m



شکل (۲۲). میزان تخریب تصویرسازی یک هدف نقطه‌ای با جابه‌جایی در جهت طولی و به میزان ۱۵m

جدول (۳). میزان تخریب تصویر در جهت انتقال طولی

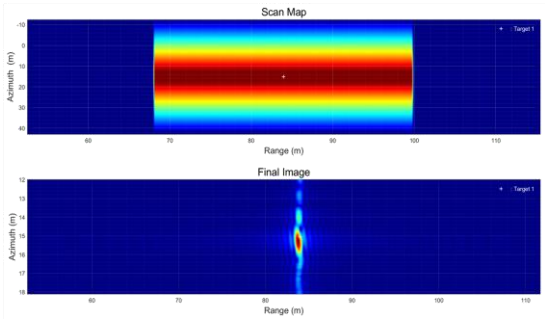
خطا (m)	RMSE (m)	PSNR (dB)	PSLR (dB)	ISLR (dB)	تحلیل کمی
۰/۱	۰/۰۰۴	۳۲/۷	-۱۳/۱	-۱۰/۵	تقریباً تصویر سالم
۰/۵	۰/۰۲۱	۲۹/۰	-۱۰/۴	-۸/۱	تخریب جزئی، شاخص‌ها مطلوب
۱	۰/۰۴۴	۲۵/۸	-۸/۸	-۶/۲	کاهش وضوح، تصویر همچنان قابل‌استفاده
۵	۰/۱۱۴	۲۱/۳	-۵/۱	-۳/۳	افت نسبی، شروع تخریب محسوس تصویر
۱۰	۰/۱۷۸	۱۷/۱	-۳/۶	-۲/۱	افت قابل‌توجه در خطاهای بزرگ
۱۵	۰/۲۶۷	۱۴/۸	-۲/۲	-۱/۰	انرژی عمدتاً در لوب جانبی، حذف هدف

بنابراین، در جابه‌جایی در جهت طولی، تا خطای $5m$ *PSNR* همچنان بالای $21dB$ است و *RMSE* کمتر از $0/12m$ باقی می‌ماند. تنها در خطاهای بزرگ‌تر، افت کیفیت قابل‌توجه بوده و

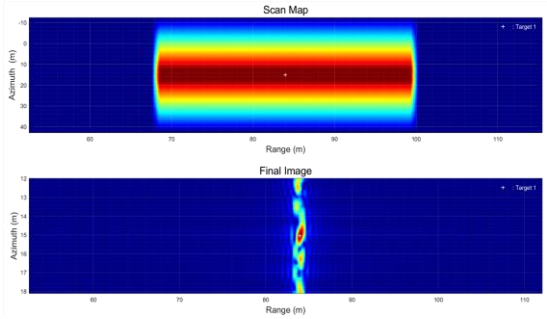
شاخص‌های *PSLR* و *ISLR* از حدود اطمینان عبور می‌کنند. در نتیجه دارای کمترین میزان حساسیت به افت *PSNR* در جابه‌جایی‌های انتقالی است.

۶-۲. تأثیر جابه‌جایی عرضی بر کیفیت تصویر

این جهت بیانگر جابه‌جایی عرضی سکو عمود بر مسیر حرکت است. نتایج نشان می‌دهد تأثیر قابل‌توجهی بر کیفیت تصویر دارد، به‌ویژه زمانی که دامنه خطا از ۰/۵m عبور می‌کند. برای ۱m و بیشتر، شاخص‌های *PSNR* و *PSLR* با سرعت افت می‌کنند و پراکندگی انرژی هدف در لوب‌های جانبی افزایش می‌یابد. علت حساسیت بالا آن است که خطاهای عرضی، هم‌ترازی آرایه را برهم می‌زند و باعث کاهش وضوح مکانی و دقت مکان‌یابی هدف می‌شود؛ بنابراین کنترل جابه‌جایی در این راستا برای تصویربرداری دقیق *SAS* ضروری است.



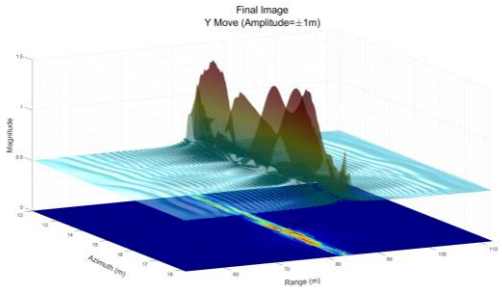
شکل (۲۳). میزان تخریب تصویرسازی یک هدف نقطه‌ای با جابه‌جایی عرضی و به میزان ۰/۱m



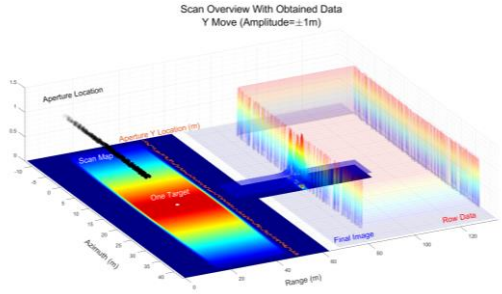
شکل (۲۴). میزان تخریب تصویرسازی یک هدف نقطه‌ای با جابه‌جایی عرضی و به میزان ۰/۵m

در شکل (۲۵) افزایش محسوس میزان انرژی لوب‌های جانبی در خطای ۱m در جابه‌جایی ناخواسته در جهت عرضی به نمایش گذاشته شده است.

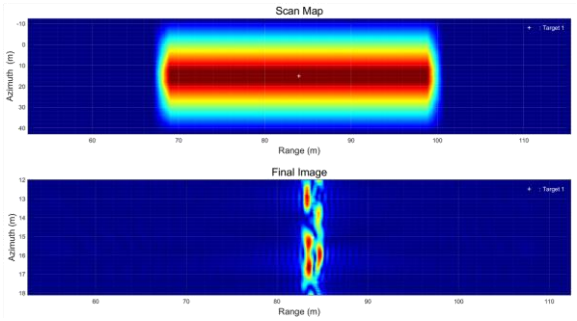
و همچنین نحوه تصویرسازی در خطای ۱m در جابه‌جایی ناخواسته در جهت عرضی در شکل (۲۶) نشان‌داده‌شده است.



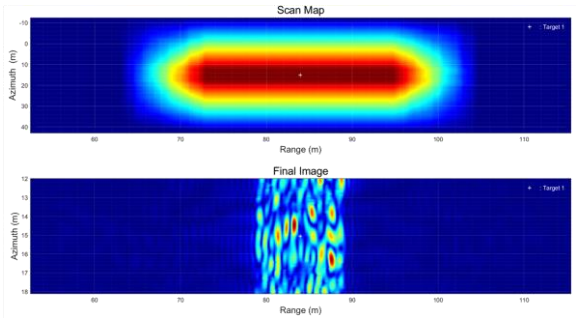
شکل (۲۵). افزایش انرژی لوب‌های جانبی در خطای جابه‌جایی عرضی و به میزان ۱m



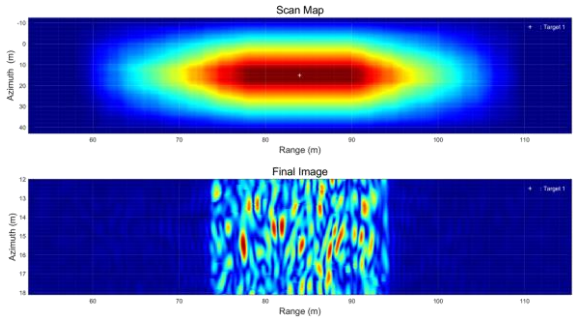
شکل (۲۶). نحوه اسکن و تصویرسازی یک هدف نقطه‌ای با جابه‌جایی عرضی و به میزان ۵m



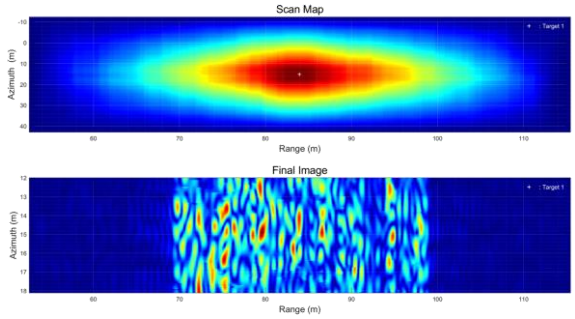
شکل (۲۷). میزان تخریب تصویرسازی یک هدف نقطه‌ای با جابه‌جایی در جهت عرضی و به میزان ۱m



شکل (۲۸). میزان تخریب تصویرسازی یک هدف نقطه‌ای با جابه‌جایی در جهت عرضی و به میزان ۵m



شکل (۲۹). میزان تخریب تصویرسازی یک هدف نقطه‌ای با جابه‌جایی در جهت عرضی و به میزان ۱۰m



شکل (۳۰). میزان تخریب تصویرسازی یک هدف نقطه‌ای با جابه‌جایی در جهت عرضی و به میزان ۱۵m

جدول (۴). میزان تخریب تصویر در جهت انتقال عرضی

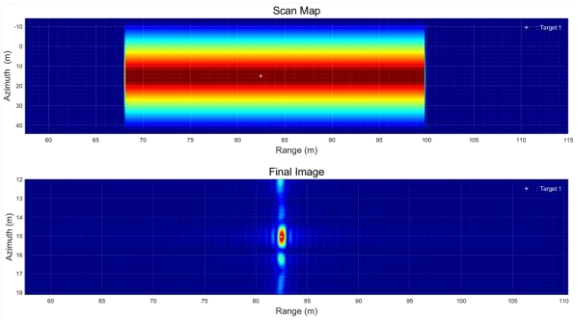
خطا (m)	RMSE (m)	PSNR (dB)	PSLR (dB)	ISLR (dB)	تحلیل کمی
۰/۱	۰/۰۰۶	۳۲/۱	-۱۲/۳	-۱۰/۱	تخریب جزئی، تصویر سالم
۰/۵	۰/۰۲۶	۲۷/۰	-۹/۳	-۷/۸	افت محسوس وضوح؛ لوب جانبی ظاهر می‌شود
۱	۰/۰۵۶	۲۳/۵	-۷/۷	-۵/۷	آشفتگی و پراکندگی تصویر
۵	۰/۱۴۷	۱۷/۷	-۴/۲	-۱/۸	تخریب شدید، هدف به‌سختی قابل‌شناسایی
۱۰	۰/۲۱۴	۱۴/۵	-۲/۲	-۰/۹	تخریب تصویر، انرژی در لوب جانبی
۱۵	۰/۳۲۹	۱۱/۹	-۰/۸	-۰/۲	انرژی عمدتاً در لوب جانبی، هدف محو شده

بنابراین، در جابه‌جایی در جهت عرضی، *PSNR* با افزایش خطا به‌سرعت افت می‌کند و برای ۱m به حدود ۲۳dB می‌رسد.

با ۵m خطا، *RMSE* به ۱۵m و *PSLR* به حدود ۴dB- می‌رسد که نشانه تخریب جدی تصویر است. *ISLR* نیز به‌سرعت رشد می‌کند و کارایی سامانه کاهش می‌یابد.

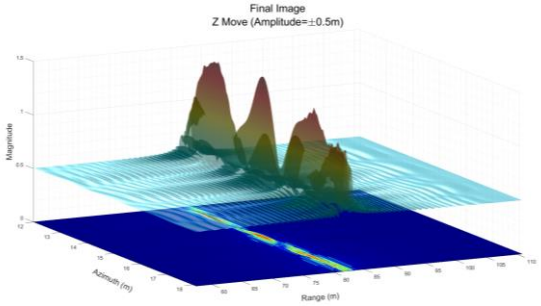
۶-۳. تأثیر جابه‌جایی عمودی بر کیفیت تصویر

این جهت بیانگر حرکت عمودی آرایه نسبت به بستر یا هدف است و حساس‌ترین درجه آزادی انتقالی محسوب می‌شود. حتی مقادیر کوچک (۰/۱m تا ۰/۵m) به‌سرعت موجب افت *PSNR* و افزایش *RMSE* می‌شود و در دامنه‌های بالاتر از ۱m، سطح لوب‌های جانبی با لوب اصلی برابر شده و تصویر کیفیت خود را از دست می‌دهد. علت این حساسیت بالا، تأثیر مستقیم جابه‌جایی عمودی بر فاز سیگنال اکو و نقش کلیدی زاویه نشیب است؛ بنابراین، تثبیت دقیق در این جهت برای عملکرد مطلوب *SAS* ضروری است.



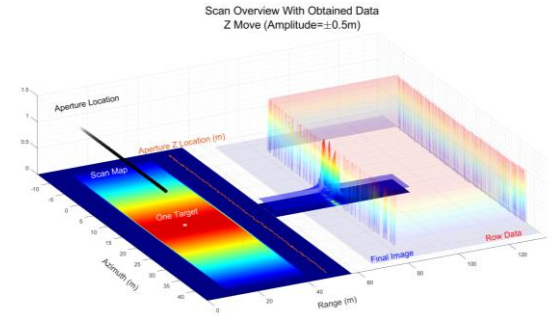
شکل (۳۱). میزان تخریب تصویرسازی یک هدف نقطه‌ای با جابه‌جایی در جهت عمودی و به میزان ۰/۱m

در شکل (۳۲) افزایش محسوس میزان انرژی لوب‌های جانبی در خطای ۱m در جابه‌جایی ناخواسته در جهت عمودی به نمایش گذاشته شده است.

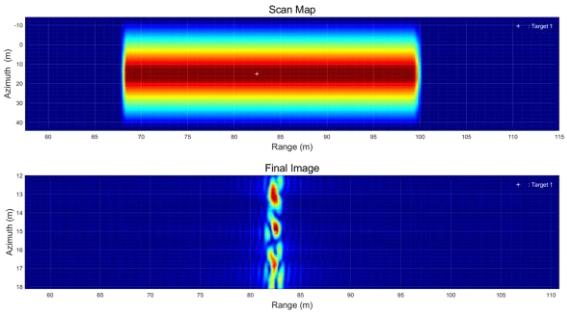


شکل (۳۲). افزایش انرژی لوب‌های جانبی در خطای جابه‌جایی به میزان ۰/۵m در جهت عمودی

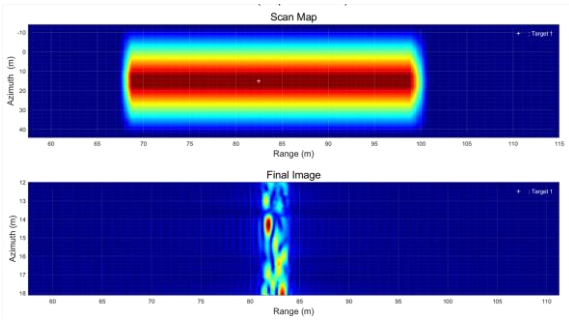
و همچنین نحوه تصویرسازی در خطای ۱m در جابه‌جایی ناخواسته در جهت عمودی در شکل (۳۳) نشان‌داده‌شده است.



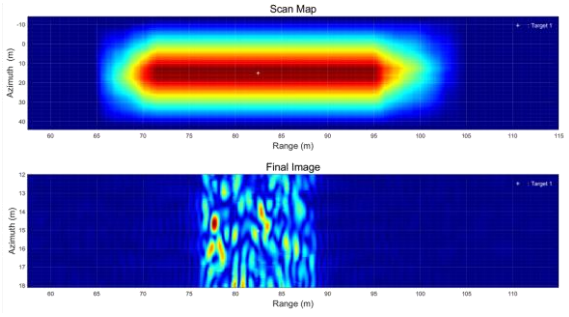
شکل (۳۳). نحوه اسکن و تصویرسازی یک هدف نقطه‌ای با جابه‌جایی در جهت عمودی و به میزان ۰/۵m



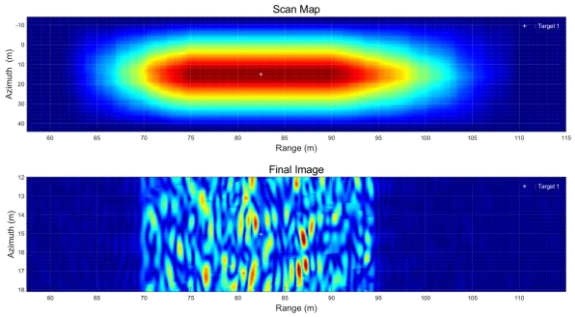
شکل (۳۴). میزان تخریب تصویرسازی یک هدف نقطه‌ای با جابه‌جایی در جهت عمودی و به میزان ۰/۵m



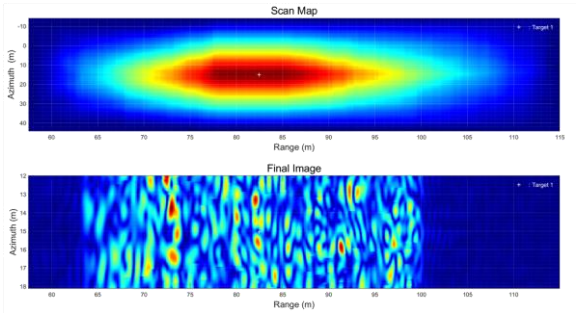
شکل (۳۵). میزان تخریب تصویرسازی یک هدف نقطه‌ای با جابه‌جایی در جهت عمودی و به میزان ۱m



شکل (۳۶). میزان تخریب تصویرسازی یک هدف نقطه‌ای با جابه‌جایی در جهت عمودی و به میزان ۵m



شکل (۳۷). میزان تخریب تصویرسازی یک هدف نقطه‌ای با جابه‌جایی در جهت عمودی و به میزان ۱۰m



شکل (۳۸). میزان تخریب تصویرسازی یک هدف نقطه‌ای با جابه‌جایی در جهت عمودی و به میزان ۱۵m

جدول (۵). میزان تخریب تصویر در جهت انتقال عمودی

خطا (m)	RMSE (m)	PSNR (dB)	PSLR (dB)	ISLR (dB)	تحلیل کمی
۰/۱	۰/۰۰۷	۳۱/۶	-۱۲/۲	-۱۰/۰	آغاز افت PSNR تصویر هنوز تمیز، اما حساسیت بالا
۰/۵	۰/۰۳۱	۲۴/۶	-۹/۰	-۷/۲	افت محسوس وضوح؛ لوب جانبی نسبتاً قوی، هدف محوشدگی جزئی
۱	۰/۰۶۵	۲۲/۷	-۷/۰	-۵/۱	تصویر آشفته؛ هدف در نویز گم می‌شود
۵	۰/۱۵۴	۱۶/۸	-۳/۷	-۱/۴	تخریب شدید
۱۰	۰/۲۴۲	۱۴/۰	-۱/۹	-۰/۷	تخریب کامل تصویر؛ شاخص‌ها غیرقابل‌استفاده
۱۵	۰/۳۵۹	۱۱/۲	-۰/۷	-۰/۱۴	انرژی در لوب‌های جانبی؛ تصویر فاقد اطلاعات هدف

بنابراین، در جابه‌جایی در جهت عمودی، PSNR با افزایش

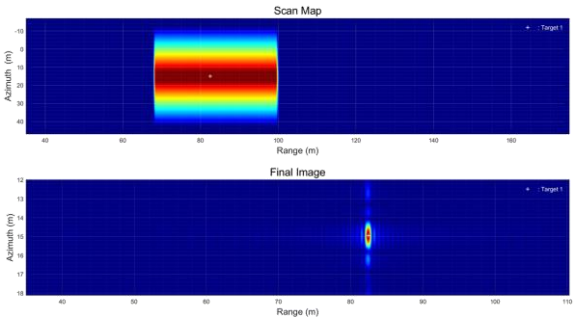
خطا به‌سرعت افت می‌کند و برای ۱m به حدود ۲۳dB می‌رسد. با ۵m خطا، RMSE به m15/0 و PSLR به حدود dB4- می‌رسد که نشانه تخریب جدی تصویر است. ISLR نیز به‌سرعت رشد می‌کند و کارایی سامانه کاهش می‌یابد.

۷. مقایسه تأثیر تکانه‌های حرکت چرخشی سکو

در این بخش به تأثیر جابه‌جایی سکو به‌صورت حرکت چرخشی حول محور x، y و z پرداخته می‌شود. به‌طوری‌که در بخش بالای هر تصویر تغییرات در ناحیه اسکن شده توسط سونار پس از هر تکانه در راستای درجات آزادی نوسانات چرخشی و در بخش پائین تصاویر میزان تخریب یک هدف نقطه‌ای در اثر تغییر ناگهانی سکو نمایش‌داده‌شده است. برای درک بهتر اثر عامل‌ها، تصویرسازی یک هدف نقطه‌ای را چرخش در جهت غلتش، پیچش و دوران به ترتیب به میزان °۰/۱، °۰/۵، °۱، °۵، °۱۰ و °۱۵ ارائه گردیده است.

۷-۱. تأثیر غلتش ناخواسته بر کیفیت تصویر

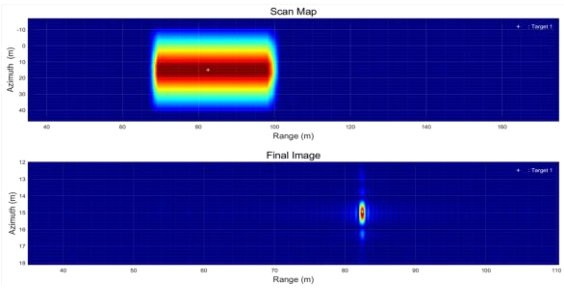
این جهت بیانگر چرخش آرایه حول محور طولی خود است. شبیه‌سازی نشان می‌دهد که خطاهای رول عمدتاً باعث کشیدگی جانبی تصویر می‌شوند؛ اما تا دامنه °۵ افزایش نویز یا رشد لوب جانبی چشمگیر نیست. افت *PSNR* و افزایش *RMSE* تدریجی است و حتی در خطاهای بالا، هدف همچنان قابل‌تشخیص باقی می‌ماند، هرچند شکل هندسی آن تغییر می‌کند. این پایداری ناشی از تأثیر محدود غلتش بر هم‌ترازی فاز در سونار روزنه مصنوعی است و این محور مقاوم‌ترین درجه آزادی زاویه‌ای به شمار می‌آید.



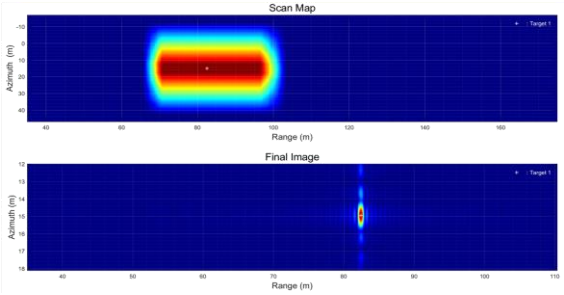
شکل (۳۹). میزان تخریب تصویرسازی یک هدف نقطه‌ای با غلتش حول محور x و به میزان °۰/۱

در شکل (۴۲) افزایش محسوس میزان انرژی لوب‌های جانبی در خطای °۵ در غلتش ناخواسته حول محور x به نمایش گذاشته شده است.

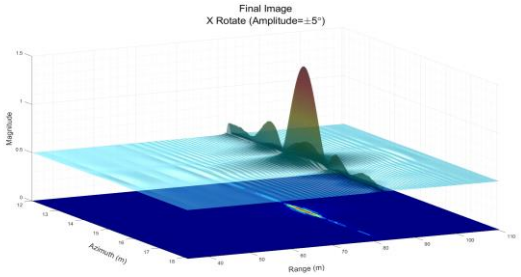
و همچنین نحوه تصویرسازی در خطای °۵ در غلتش ناخواسته حول محور x در شکل (۴۳) نشان‌داده‌شده است.



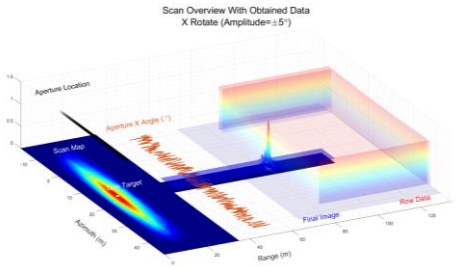
شکل (۴۰). میزان تخریب تصویرسازی یک هدف نقطه‌ای با غلتش حول محور xو به میزان °۰/۵



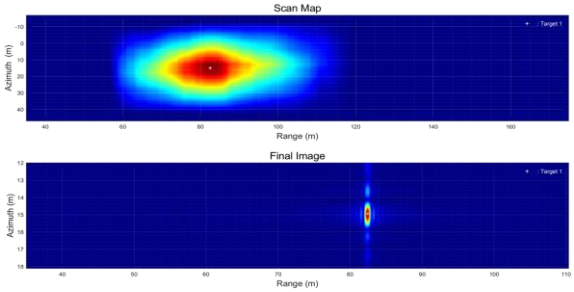
شکل (۴۱). میزان تخریب تصویرسازی یک هدف نقطه‌ای با غلتش حول محور xو به میزان °۱



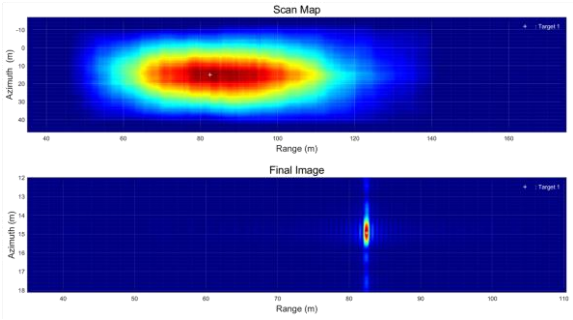
شکل (۴۲). افزایش انرژی لوب‌های جانبی در خطای غلتش به میزان °۵ حول محور x



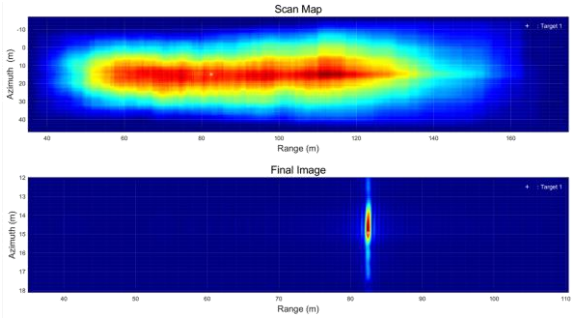
شکل (۴۳). نحوه اسکن و تصویرسازی یک هدف نقطه‌ای با غلتش حول محور xو به میزان °۵



شکل (۴۴). میزان تخریب تصویرسازی یک هدف نقطه‌ای با غلتش حول محور xو به میزان °۵



شکل (۴۵). میزان تخریب تصویرسازی یک هدف نقطه‌ای با غلتش حول محور xo به میزان ۱۰°



شکل (۴۶). میزان تخریب تصویرسازی یک هدف نقطه‌ای با غلتش حول محور xo به میزان ۱۵°

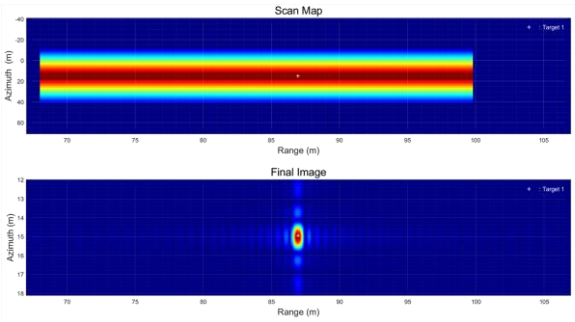
جدول (۶). میزان تخریب تصویر با غلتش حول محور x

خطا (°)	RMSE (m)	PSNR (dB)	PSLR (dB)	ISLR (dB)	تحلیل کمی
۰/۱ (	۰/۰۰۵	۳۲/۸	-۱۳/۶	-۱۰/۹	تصویر سالم
۰/۵ (	۰/۰۲۲	۲۹/۲	-۱۰/۸	-۸/۳	کشیدگی جانبی بسیار کم
۱ (	۰/۰۴۱	۲۶/۰	-۹/۱	-۶/۵	کمی کشیدگی، وضوح خوب
۵ (	۰/۱۰۱	۲۰/۴	-۶/۰	-۳/۶	کشیدگی قابل‌توجه، هدف قابل‌تشخیص
۱۰ (	۰/۱۸۶	۱۷/۰	-۳/۷	-۲/۲	هدف همچنان قابل‌تشخیص
۱۵ (	۰/۲۹۱	۱۴/۵	-۲/۴	-۱/۲	خطای زیاد در تشخیص هدف

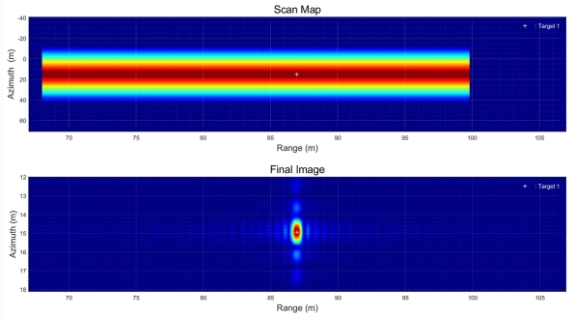
در غلتش تا ۵° هنوز تصویر قابل‌استفاده است و *PSNR* بالای ۲۰*dB* باقی می‌ماند. *RMSE* کمتر از ۰/۱*m* و *PSLR* کمتر از ۶*dB*- است؛ بنابراین تا این حدود، تخریب جدی رخ نمی‌دهد.

۷-۲. تأثیر پیچش ناخواسته بر کیفیت تصویر

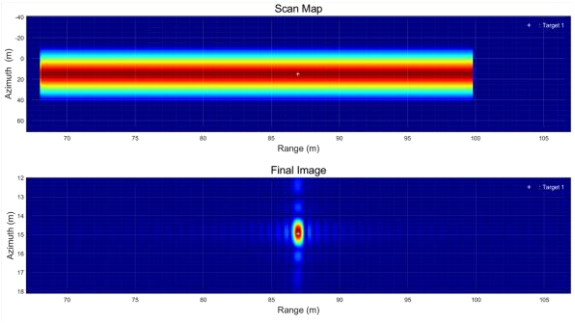
در این بخش پیچش آرایه حول محور عرضی و تغییر زاویه پرتو در راستای عمودی است. با افزایش خطای پیچش، به‌ویژه بالاتر از ۱°، کیفیت تصویر روبه‌کاهش می‌گذارد که دلیل آن کشیدگی و محوشدگی عمودی و کاهش وضوح لوب اصلی است. شاخص *PSNR*افت می‌کند و *RMSE* بالا می‌رود، و در خطاهای زیاد جزئیات تصویر از بین می‌رود. اگرچه حساسیت در این راستا کمتر از *Heave* یا *Yaw* است، اما کنترل این خطا برای حفظ وضوح عمودی و کیفیت کلی تصویر ضروری است.



شکل (۴۷). میزان تخریب تصویرسازی یک هدف نقطه‌ای با پیچش حول محور yo به میزان ۰/۱°

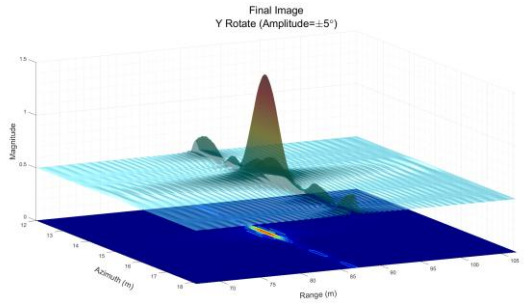


شکل (۴۸). میزان تخریب تصویرسازی یک هدف نقطه‌ای با پیچش حول محور yo به میزان ۰/۵°



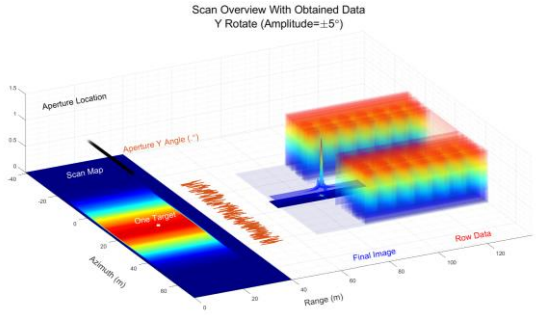
شکل (۴۹). میزان تخریب تصویرسازی یک هدف نقطه‌ای با پیچش حول محور yo به میزان ۱°

در شکل (۵۰) افزایش محسوس میزان انرژی لوب‌های جانبی در خطای ۵° در پیچش ناخواسته حول محور *y* به نمایش گذاشته شده است.

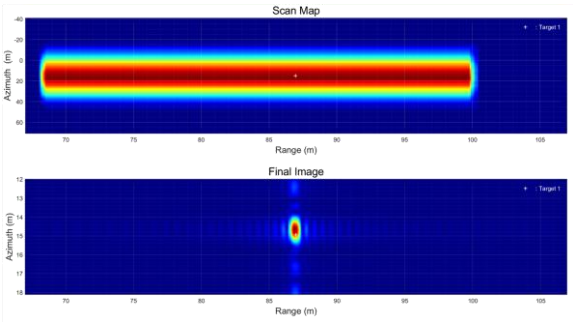


شکل (۵۰). افزایش انرژی لوب‌های جانبی در خطای پیچش به میزان ۵° حول محور y

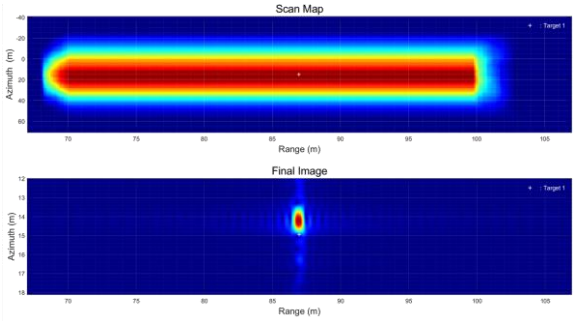
و همچنین نحوه تصویرسازی در خطای ۵° در پیچش ناخواسته حول محور y در شکل (۵۱) نشان‌داده‌شده است.



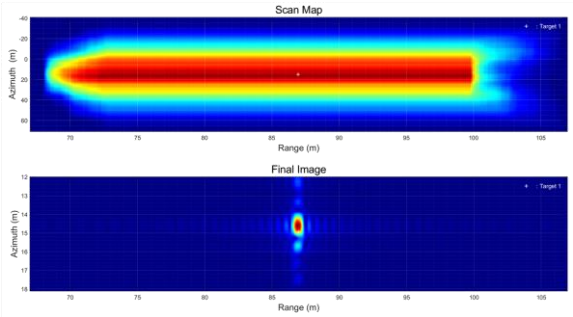
شکل (۵۱). نحوه اسکن و تصویرسازی یک هدف نقطه‌ای با غلتش حول محور x به میزان ۵°



شکل (۵۲). میزان تخریب تصویرسازی یک هدف نقطه‌ای با پیچش حول محور y به میزان ۵°



شکل (۵۳). میزان تخریب تصویرسازی یک هدف نقطه‌ای با پیچش حول محور y به میزان ۱۰°



شکل (۵۴). میزان تخریب تصویرسازی یک هدف نقطه‌ای نقطه‌ای با پیچش حول محور yو به میزان ۱۵°

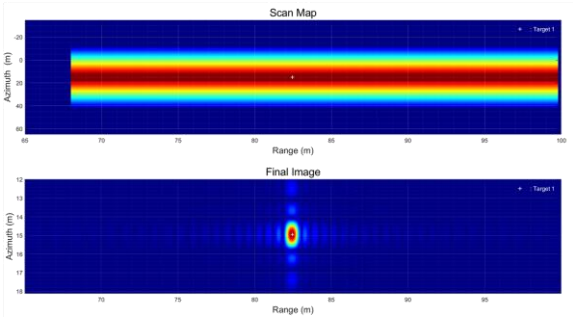
جدول (۷). میزان تخریب تصویر با پیچش حول محور y

خطا (°)	RMSE (m)	PSNR (dB)	PSLR (dB)	ISLR (dB)	تحلیل کمی
۰/۱ (	۰/۰۰۶	۳۲/۴	-۱۳/۱	-۱۰/۳	تصویر سالم
۰/۵ (	۰/۰۲۴	۲۸/۳	-۱۰/۳	-۷/۹	تخریب اندک
۱ (	۰/۰۴۹	۲۵/۲	-۸/۷	-۶/۱۱	تصویر کشیده و کمی تار
۵ (	۰/۱۲۶	۱۸/۲	-۴/۷	-۲/۶	کاهش وضوح، هدف قابل‌تشخیص
۱۰ (	۰/۲۱۱	۱۵/۹	-۳/۱	-۱/۸	کیفیت پایین، هدف تشخیص‌پذیر
۱۵ (	۰/۳۱۸	۱۳/۱	-۱/۷	-۰/۷	افت زیاد، هدف محو شده

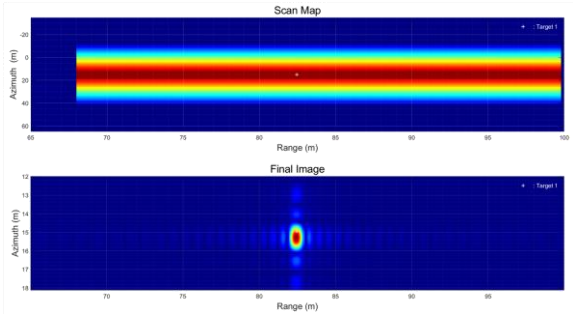
در این راستا در ۵° خطا هنوز $PSNR$ بالای $18dB$ و $RMSE$ کمتر از $0/13m$ دارد. تصویر تا این مقدار خطا معمولاً قابل‌تحلیل است و تخریب جدی فقط برای زوایای بزرگ‌تر رخ می‌دهد.

۷-۳. تأثیر دوران ناخواسته بر کیفیت تصویر

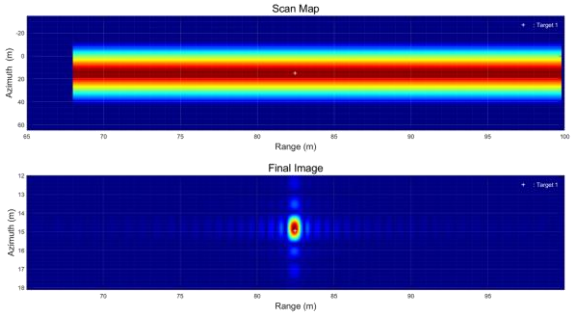
چرخش آرایه در این راستا حول محور عمودی و تغییر جهت نگاه را نشان می‌دهد. این درجه آزادی بیشترین تأثیر مخرب زاویه‌ای را دارد. حتی در خطاهای کوچک (۱°) افت قابل‌توجه $PSNR$ و $PSLR$رخ می‌دهد و از ۵° به بالا، هدف عملاً غیرقابل‌شناسایی شده و انرژی به طور کامل به لوب‌های جانبی منتقل می‌شود. خطای دوران ناخواسته به طور اساسی پیوستگی هندسی روزنه مصنوعی را بر هم می‌زند و باعث تضعیف شدید تصویر می‌شود؛ بنابراین، کنترل دقیق این راستا برای حفظ کیفیت تصویر سونار روزنه مصنوعی حیاتی است.



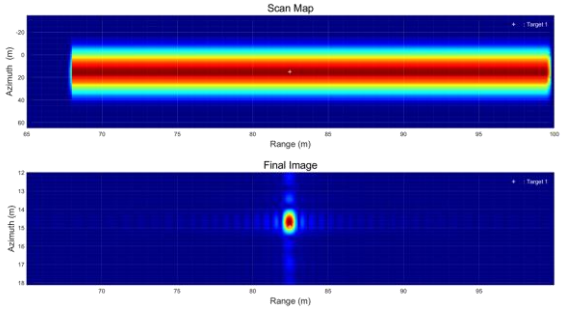
شکل (۵۵). میزان تخریب تصویرسازی یک هدف نقطه‌ای با دوران حول محور z به میزان $^\circ$۰/۱



شکل (۵۶). میزان تخریب تصویرسازی یک هدف نقطه با دوران حول محور z به میزان $^\circ$۰/۵



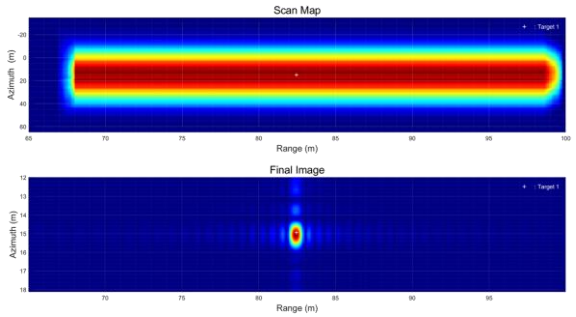
شکل (۵۷). میزان تخریب تصویرسازی یک هدف نقطه‌ای با دوران حول محور z به میزان $^\circ$۱



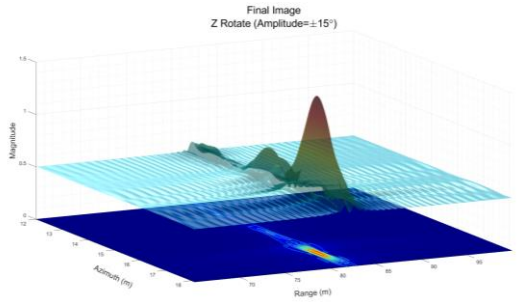
شکل (۵۸). میزان تخریب تصویرسازی یک هدف نقطه با دوران حول محور z به میزان $^\circ$۵

در شکل (۶۰) افزایش محسوس میزان انرژی لوب‌های جانبی در خطای $^\circ$۱۵ در دوران ناخواسته حول محور z به نمایش گذاشته شده است.

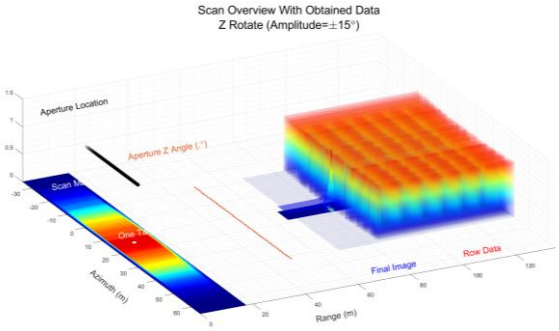
و همچنین نحوه تصویرسازی در خطای $^\circ$۱۵ در دوران ناخواسته حول محور z در شکل (۶۱) نشان‌داده‌شده است.



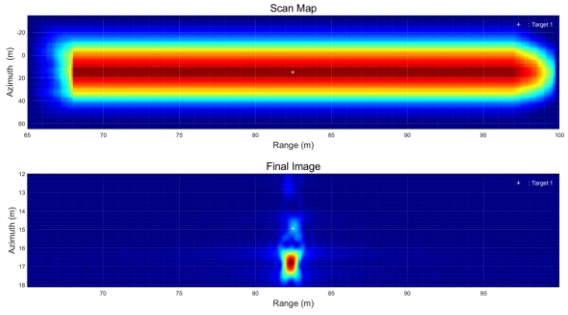
شکل (۵۹). میزان تخریب تصویرسازی یک هدف نقطه با دوران حول محور z به میزان $^\circ$۱۰



شکل (۶۰). افزایش انرژی لوب‌های جانبی در خطای دوران به میزان $^\circ$۱۵ حول محور z



شکل (۶۱). نحوه اسکن و تصویرسازی یک هدف نقطه‌ای با دوران حول محور z به میزان $^\circ$۱۵



شکل (۶۲). میزان تخریب تصویرسازی یک هدف نقطه‌ای با دوران حول محور z به میزان $^\circ$۱۵

جدول (۸). میزان تخریب تصویر با دوران حول محور z

خطا (°)	RMSE (m)	PSNR (dB)	PSLR (dB)	ISLR (dB)	تحلیل کمی
۰/۱ (	۰/۰۰۵	۳۲/۳	-۱۳/۰	-۱۰/۲	رویت اولین آثار افت PSNR
۰/۵ (	۰/۰۲۳	۲۸/۰	-۱۰/۱	-۷/۶	کاهش محسوس وضوح تصویر
۱ (	۰/۰۴۷	۲۴/۶	-۸/۴	-۶/۰	هدف کم‌کم گم می‌شود؛ PSLR بحرانی
۵ (	۰/۱۱۶	۱۸/۸	-۵/۳	-۲/۷	تخریب شدید و ازدست‌رفتن کیفیت تصویر
۱۰ (	۰/۱۸۸	۱۶/۲	-۳/۳	-۱/۷	هدف تقریباً نامشخص؛ وضوح از بین می‌رود
۱۵ (	۰/۲۹۳	۱۳/۶	-۱/۸	-۰/۸	انرژی در لوب جانبی؛ تصویر غیرقابل‌استفاده

بنابراین، این راستا حساس‌ترین محور چرخشی است و با ۵° خطا، $PSNR$ به $18dB$ و $PSLR$ به $5dB$- افت می‌کند، $RMSE$ به $120dB$ می‌رسد. کیفیت تصویر در این مقدار خطا به‌طورجدی افت می‌کند و برای ۱۰° به بالا، تصویر کاملاً غیرقابل‌استفاده است.

۸. نتیجه‌گیری

یافته‌های این پژوهش نشان می‌دهد که در سامانه‌های سونار روزنه مصنوعی، تأثیر تکانه‌های ناخواسته سکوی حامل آرایه بر کیفیت تصویر بسیار وابسته به نوع و دامنه انحراف در شش درجه آزادی حرکتی است. در بین جابه‌جایی‌های انتقالی، محور جابه‌جایی عمودی بیشترین آسیب را به تصویر وارد می‌کند. به‌گونه‌ای که برای خطاهای بیش از ۰/۵m، شاخص PSNR به زیر ۲۶dB و RMSE به بالای ۰/۰۳m می‌رسد و در خطای ۵m، PSNRبه کمتر از ۲۰dB و RMSE بالاتر از ۰/۱m ثبت می‌شود که نشان‌دهنده تخریب جدی تصویر است. جابه‌جایی عرضی نیز پس از جابه‌جایی عمودی، حساسیت بالایی دارد و با افزایش خطا به بیش از ۱m، کیفیت تصویر به‌سرعت افت می‌کند و شاخص‌های PSLR و ISLR از حدود قابل‌قبول خارج می‌شوند. همچنین جابه‌جایی طولی کمترین اثر را در تخریب تصویر دارد و تنها در خطاهای خیلی بزرگ (بالاتر از ۵m) موجب کاهش جدی کیفیت می‌شود.

در میان خطاهای زاویه‌ای، دوران ناخواسته حول محور عمودی بالاترین حساسیت را دارد؛ به‌طوری‌که برای خطای ۵°، PSLR به حدود ۵dB- و ISLR نزدیک صفر می‌رسد و هدف به طور کامل در لوب‌های جانبی تصویر گم می‌شود. پیچش حول محور عرضی نیز برای خطاهای بالاتر از ۵° باعث افت تدریجی شاخص‌ها و محوشدگی تصویر می‌شود. در مقابل غلتش حول محور طولی پایدارترین محور است و حتی تا خطای ۵° نیز تصویر قابل‌تحلیل و هدف قابل‌شناسایی باقی می‌ماند و مقادیر PSNR و RMSEدر محدوده قابل‌قبول قرار دارند. به‌طورکلی عبور PSNR از مرز ۲۰dB، RMSE از ۰/۱m و رسیدن PSLR و ISLR به مقادیر نزدیک به صفر، مرز تخریب جدی تصویر را نشان می‌دهد و باید در طراحی، ساخت و کنترل سامانه‌های سونار روزنه مصنوعی، به‌ویژه در راستاهای جابه‌جایی عمودی، جابه‌جایی عرضی و چرخش افقی توجه ویژه‌ای مبذول شود.

نوآوری اصلی این پژوهش ارائه یک تحلیل کمی جامع و مدل حساسیت عددی برای شش درجه آزادی سکوی حامل سونار است که با استفاده از شاخص‌هایRMSE ، PSNR، PSLR و ISLR، مرزهای تخریب تصویر را به‌دقت برای هر محور حرکتی مشخص می‌کند. این نتایج نه‌تنها امکان ارزیابی و پیش‌بینی افت کیفیت تصویر در شرایط واقعی زیرآبی را فراهم می‌سازد، بلکه به طراحان و مهندسان کمک می‌کند تا با تعیین آستانه‌های مجاز هر نوع انحراف حرکتی، عملکرد سامانه را بهینه‌سازی و پایداری تصویربرداری را تضمین کنند. همچنین مدل‌سازی سینوسی تکانه‌ها و تطابق آن با شرایط فیزیکی واقعی زیرآبی، باعث کاربردی‌تر شدن نتایج این پژوهش شده است.

۹. پیشنهادهای برای پژوهش‌های آینده

در نهایت، این پژوهش نشان داد کنترل دقیق و کاهش نوسانات ناخواسته به‌ویژه در راستاهای جابه‌جایی عمودی، جابه‌جایی عرضی و چرخش افقی، کلید اصلی دستیابی به تصاویر باکیفیت و قابل‌اطمینان در سامانه‌های سونار روزنه مصنوعی محسوب می‌شود.

الف) گسترش مدل حرکتی: پیشنهاد می‌شود در پژوهش‌های بعدی، مدل‌های حرکتی پیچیده‌تر مانند ترکیب هم‌زمان چند محور، یا مدل‌سازی نویز تصادفی و آشوبناک نیز بررسی شوند تا دامنه اعتبار نتایج افزایش یابد.

ب) بررسی محیط‌های واقعی‌تر: شبیه‌سازی و ارزیابی عملکرد سامانه در محیط‌های متغیر با عامل‌های صوتی متفاوت مانند آب‌های کم‌عمق، محیط‌های چندلایه یا حضور مانع می‌تواند نتایج را به شرایط عملیاتی نزدیک‌تر کند.

ج) تأثیر چینش آرایه و طراحی هندسی: مطالعه اثر تغییرات

هندسه آرایه هیدروفونی، فاصله‌گذاری و تعداد المان‌ها بر حساسیت سامانه به تکانه‌های حرکتی از اهمیت بالایی برخوردار است.

د) پیاده‌سازی و اعتبارسنجی تجربی: پیشنهاد می‌شود نتایج به‌دست‌آمده در محیط آزمایشگاهی یا در میدان عملی، با داده‌های واقعی اعتبارسنجی شود تا میزان تطابق مدل‌سازی عددی با واقعیت ارزیابی گردد.

ه) توسعه الگوریتم‌های جبران خطا: بررسی و توسعه الگوریتم‌های جبران خطای حرکتی به‌صورت عملیاتی، به‌منظور افزایش پایداری و کیفیت تصاویر خروجی، از مسیرهای مهم و کاربردی آینده است.

۱۰. سپاس گزاری

از آزمایشگاه مرکز تحقیقات SAR و آزمایشگاه پردازش سیگنال دیجیتال دانشکده مهندسی دانشگاه فردوسی مشهد برای حمایت از این پژوهش و فراهم‌کردن امکانات تحقیقاتی قدردانی می‌گردد.

۱۱. مراجع

[1] M.Zoofaghari, A.Rahimi Fard, T.Gholipour, S.Sadat 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," Journal of RADAR, Vol. 11, No. 1, Spring & Summer 2023. (In Persian)

https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.23454024.1402.11.1.9.5

[2] Dushyant Kaliyari, Amit Shukla, Y. S. Rao, Hari B. Hablani, “Motion Compensation of Airborne Synthetic Aperture Radar," IFAC Proceedings Volumes. 47, 2014.

https://doi.org/10.3182/20140313-3-IN-3024.00065

[3] Sérgio Silva, “Interferometric Synthetic Aperture Sonar: A surface vehicle-based approach,” Lamber Academic Publishing, USA-Culumbia-SC, August,2021.

[4] Zhang, J.; Cheng, G.; Tang, J.; Wu, H.; Tian, Z. A Subaperture Motion Compensation Algorithm for Wide-Beam, Multiple-Receiver SAS Systems. J. Mar. Sci. Eng. 11, 1627, 2023. https://doi.org/10.3390/jmse11081627

[5] S.Zolfaghari Moghadam, M.Kazeruni, “Analysis and simulation of the effect of phase noise in the output image of the airborne ground penetrating radar system," Journal of RADAR, Vol. 11, No. 1, Spring & Summer 2023. (In Persian)

https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.23454024.1402.11.1.11.7

[6] M. Pourjoula1, M. Karbasi, M. M. Nayebi, “Using Iterative-Based Methods in Multiple-Input Multiple-Output Synthetic Aperture Radar for Target-Image Separation," Journal of RADAR, Vol. 10, No. 2, Autumn & Winter 2023. (In Persian). https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.23454024.1401.10.2.11.2

[7] Zhang, X., et al., “Wide-bandwidth signal-based multireceiver SAS imagery using extended chirp scaling algorithm, " IET Radar Sonar Navig, 16(3), 531–541, 2022. https://doi.org/10.1049/rsn2.12200