

## تخمین و جبران سازی خطای حرکت یک سامانه سونار روزنه مصنوعی با استفاده از روش مرکز فاز افزوده

حمیدرضا ترکی زاده<sup>۱</sup>، دانشجو، سید روح الله ثمره هاشمی<sup>۲</sup>، استادیار، احسان سلیمانی نسب<sup>۱</sup>، دانشیار

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد -دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر - دانشگاه تحصیلات تکمیلی صنعتی و فناوری پیشرفته -کرمان -ایران-  
Hamidreza.torkizadeh@gmail.com

۲- گروه پژوهشی فیبر نوری -پژوهشگاه علوم و تکنولوژی پیشرفته و علوم محیطی -دانشگاه تحصیلات تکمیلی صنعتی و فناوری پیشرفته -  
کرمان -ایران - Sr.hashemi@kgut.ac.ir

۳- گروه مهندسی الکترونیک و مخابرات -دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر - دانشگاه تحصیلات تکمیلی صنعتی و فناوری پیشرفته -  
کرمان -ایران - Ehsan.soleimani@kgut.ac.ir

**چکیده:** تصویربرداری از اعماق دریا با چالش‌های مختلفی مواجه است چراکه با افزایش عمق آب شدت نور کاهش پیدا می‌کند، بنابراین نمی‌توان با استفاده از دستگاه‌های تصویربرداری نوری یک تصویر برد بلند ایجاد کرد. برای تشکیل تصویر با قدرت تفکیک مناسب از سونارهای روزنه مصنوعی استفاده می‌شود. یکی از چالش‌های استفاده از سونارهای روزنه مصنوعی وجود نوسانات حرکتی به دلیل جریان‌های آب است. این نوسانات باعث محوشدگی تصویر تشکیل شده می‌شوند چراکه الگوریتم‌های تشکیل تصویر با فرض حرکت مستقیم عمل می‌کنند. نوسانات ایجاد شده باید تشخیص داده شده و اصلاح شوند. یکی از روش‌های تشخیص خطای حرکتی، استفاده از یک آرایه خطی از مراکز فاز و ایجاد همپوشانی بین یک یا چند مرکز فاز در فاصله ارسال دو پالس (پینگ) متوالی است. با پردازش سیگنال دریافتی مراکز فاز همپوشان (افزوده) می‌توان خطای حرکتی را تشخیص داده و اصلاح نمود. در این مقاله شبیه‌سازی و بهبود الگوریتم مبتنی بر مرکز فاز افزوده برای یک سامانه سونار روزنه مصنوعی ارائه گردیده است. در الگوریتم ارائه شده ابتدا خطای حرکتی با استفاده از محاسبه همبستگی متقابل بین سیگنال مراکز فاز افزوده تخمین زده شده و به وسیله ضرب فاز جبران سازی صورت می‌گیرد. در الگوریتم پایه، به دلیل استفاده از تقریب‌های مختلف خطای حرکتی به صورت کامل جبران نمی‌شود، لذا با استفاده از تخمین بیشترین درست نمایی خطای باقی‌مانده‌ی فاز تخمین زده شده و جبران می‌شود. در نهایت با استفاده از الگوریتم برد داپلر بهبود یافته تصویر هدف نقطه‌ای تشکیل می‌گردد. شبیه‌سازی‌ها عملکرد مطلوب الگوریتم پیشنهادی در تخمین و اصلاح خطای حرکتی سکو را نشان می‌دهد.

**واژه‌های کلیدی:** سونار روزنه مصنوعی، مرکز فاز افزوده، جبران سازی حرکت، الگوریتم برد داپلر

# Motion Estimation and Compensation of a Synthetic Aperture Sonar Using Redundant Phase Center Method

Hamidreza Torkizadeh, Student<sup>1</sup>, Seyed Rouhollah samareh Hashemi, Assistant Professor<sup>2</sup>, Ehsan Soleimani Nasab, Associate Professor<sup>3</sup>

1 - Master's Student, Faculty of Electrical and Computer Engineering, Graduate University of Advanced Technology, Kerman, Iran, Hamidreza.torkizadeh@gmail.com

2 - Fiber Optics Research Group, Institute of Advanced Science and Technology and Environmental Sciences, Graduate University of Advanced Technology, Kerman, Iran, Sr.hashemi@kgut.ac.ir

3 - Electronics and Telecommunications Engineering Group, Department of Electrical and Computer Engineering, Graduate University of Advanced Technology, Kerman, Iran, Ehsan.soleimani@kgut.ac.ir

**Abstract:** Imaging the depths of the sea faces various challenges because as the water depth increases, the light intensity decreases. Therefore, it is not possible to create a high-resolution image using optical imaging devices. To form a well-resolved image in range and bearing, artificial aperture sonars are used. One of the challenges of using artificial aperture sonars is the presence of motion-induced oscillations due to water currents. These oscillations cause blurring in the formed image as imaging algorithms assume straight motion. The induced oscillations need to be detected and corrected. One method to detect motion errors is using a linear array of phase centers and creating overlap between one or more phase centers at the distance of two consecutive pings. By processing the received signal, overlapped phase centers can detect and correct motion errors. This article presents a simulation and improvement of an algorithm based on overlapped phase centers for an artificial aperture sonar system. In the proposed algorithm, motion errors are first estimated using mutual correlation calculation between the received signals of overlapped phase centers and compensated by phase multiplication. In the basic algorithm, due to the use of different approximations, motion errors are not fully compensated, so by estimating the maximum likelihood of the remaining phase error and compensating it, the algorithm improves the target image point using an enhanced Doppler beamformer algorithm. Simulations demonstrate the satisfactory performance of the proposed algorithm in estimating and correcting motion errors on the platform.

**Keywords:** Synthetic Aperture Sonar, Redundant Phase Centers, Motion Compensation, Enhanced Doppler Beamforming Algorithm.

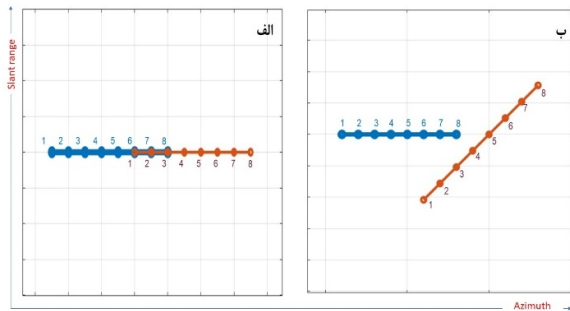
تاریخ ارسال مقاله: ۱۴۰۳/۰۲/۰۷

تاریخ اصلاح مقاله: ۱۴۰۳/۰۶/۲۱

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۳/۰۶/۲۷

نام نویسنده مسئول: سید روح الله ثمره هاشمی

نشانی نویسنده مسئول: ایران - کرمان - دانشگاه تحصیلات تکمیلی صنعتی و فناوری پیشرفته - گروه پژوهشی فیبر نوری - پژوهشگاه علوم و تکنولوژی پیشرفته و علوم محیط



شکل ۱: سونار دهانه مصنوعی با چندین مرکز فاز در جهت سمت: الف) بدون خطای حرکتی ب) با لحاظ خطای حرکتی.

همان‌طور که در شکل الف مشخص است مرکز فازهای ۶، ۷ و ۸ از پینگ اول با مرکز فازهای ۱، ۲ و ۳ پینگ دارای همپوشانی هستند. با فرض عدم تغییر هدف و محیط در فاصله بین دو پینگ، دو مرکز فاز همپوشان باید سیگنال کاملاً یکسانی دریافت کرده باشند، لذا اگر سیگنال دو مرکز فاز همپوشان دارای تأخیر نسبی باشند، این بدان معنی است که آرایه از مسیر نامی و مطلوب خود منحرف شده است [۲]. با اندازه‌گیری تأخیر نسبی دو سیگنال نسبی زوج مرکز فاز همپوشان، می‌توان به میزان انحراف حرکتی آرایه پی برده و آن را اصلاح نمود. لذا فن مرکز فاز افزوده به‌عنوان یکی از مهم‌ترین روش‌های تخمین و جبران سازی خطای حرکتی سامانه سونار مورد استفاده قرار می‌گیرد. البته برای بالا بردن دقت در تخمین و تصحیح خطای حرکتی می‌توان تعداد مراکز فاز همپوشان را بالا برد که باعث کاهش نرخ پوشش ناحیه و افزایش محاسبات می‌شود، لذا بهتر است بسته به شرایط، مصالحه‌ای بین این دو موضوع در نظر گرفته شود.

در این مقاله، هدف شیبه سازی روش RPC در تخمین و جبران سازی خطای حرکتی یک آرایه سونار روزه مصنوعی است که حین حرکت دچار خطای چرخش و خطای جابجایی می‌گردد. پس از تخمین این خطای حرکتی با استفاده از تخمین تأخیر سیگنال جفت مراکز فاز همپوشان، این خطا در الگوریتم تشکیل تصویری با استفاده از ضرب فاز جبران می‌گردد. به دلیل خطای تخمین روش RPC، پس از اعمال این روش هنوز مقدار کمی خطای فاز در سیگنال حوزه سمت باقی می‌ماند که می‌تواند منجر به مقداری محوشدگی در تصویری گردد، لذا در این مقاله با اضافه کردن یک بخش جدید به الگوریتم تشکیل تصویری به تخمین فاز باقی مانده پرداخته شده است. در این بخش، با تحلیل دقیق سیگنال در حوزه فرکانس، نشان داده شده که خطای فاز باقی‌مانده به صورت یک فاز درجه ۲ است، لذا ضرب این فاز با استفاده از یک الگوریتم جست و جو محاسبه می‌گردد و سپس این فاز از سیگنال حذف می‌گردد.

سونار روزه مصنوعی با دریافت سیگنال برگشتی از هدف و پردازش، تصاویری با وضوح بسیار بالا از بستر دریا ارائه می‌دهد که

## ۱- مقدمه

سامانه سونار از نظر عملکردی همانند رادار است ولی با استفاده از امواج صوتی به جای استفاده از امواج الکترومغناطیس به آشکار سازی درون آب می‌پردازد. امواج الکترومغناطیس به دلیل تضعیف شدید درون آب کارایی ندارند. سونار کنارنگر<sup>۱</sup> روزه واقعی<sup>۲</sup> سامانه‌ای شامل یک ورا رسان متحرک است که خط مستقیمی را طی کرده و با ارسال پالس‌های صوتی در جهت عمود بر حرکت و جمع‌آوری پژواک دریافتی، تصویری از ناحیه کناری را تشکیل می‌دهد. از آنجایی که در سامانه سونار روزه حقیقی حد تفکیک در جهت حرکت (سمت) معمولاً ضعیف و وابسته به برد است، از فن روزه مصنوعی استفاده می‌شود. سونار روزه مصنوعی (SAS<sup>۳</sup>) سامانه‌ای است که با جمع‌آوری داده در طول یک روزه مصنوعی طولانی قادر به تشکیل تصاویر دو یا سه بعدی از کف دریا با حد تفکیک بسیار خوب در جهت سمت است. این سامانه از نظر عملکردی همانند رادار روزه مصنوعی<sup>۴</sup> است. یکی از مشخصه‌های مهم در یک سونار تصویربردار، نرخ پوشش سطح است. نرخ پوشش سطح به معنی مساحت ناحیه تصویربرداری شده در واحد زمان است و به وسیله زمان بین دو پینگ محدود می‌شود. در سونار روزه مصنوعی به دلیل فاصله کوتاه بین پینگ‌ها مقدار نرخ پوشش ناحیه کم است. برای حل این مشکل به‌جای استفاده از یک گیرنده، می‌توان از تعدادی گیرنده که در امتداد مسیر حرکت قرار گرفته‌اند، استفاده نمود. در این حالت پس از ارسال پینگ به‌وسیله فرستنده، سیگنال دریافتی به‌طور هم‌زمان به‌وسیله چندین گیرنده و در چندین مکان سمت دریافت می‌شود. در تصویربرداری با استفاده از سونار با توجه به حرکات سونار در مسیر غیرمطلوب به دلیل اعوجاج‌های موجود مانند جریان آب، ناپایداری سکو و... تصویر دریافتی دچار محوشدگی و کشیدگی در جهت سمت و برد می‌شود. علت این محوشدگی، تغییر فاز سیگنال دریافتی نسبت به حالت حرکت مستقیم است، در حالی که الگوریتم‌های تشکیل تصویری با فرض حرکت مستقیم و با سرعت ثابت سکو سیگنال دریافتی را مورد پردازش قرار می‌دهند.

برای تخمین و جبران سازی خطای فاز روش‌هایی وجود دارد که یکی از این روش‌ها فن مرکز فاز افزوده (RPC<sup>۵</sup>) است. در این فن از یک فرستنده و چندین گیرنده استفاده می‌شود [۱]. به تعداد گیرنده‌ها مرکز فاز وجود دارد که در نقطه‌ای بین فاصله فرستنده و گیرنده متناظر قرار می‌گیرند. در فن مرکز فاز افزوده، یک یا چند جفت از مراکز فاز بین دو پینگ متوالی همپوشانی دارند، لذا اگر حرکت بدون انحراف باشد، سیگنال دریافتی این جفت مراکز فاز همپوشان کاملاً یکسان است، اما اگر حرکت دارای انحراف باشد، سیگنال دریافتی جفت همپوشان متفاوت و دارای جابجایی زمانی خواهد بود. این مطلب در شکل ۱ نشان داده شده است. در این شکل، ۸ مرکز فاز نشان داده شده که در فاصله بین دو پینگ سه مرکز فاز دارای همپوشانی خواهند بود. مکان مراکز فاز در پینگ اول با رنگ آبی و مکان مراکز فاز در پینگ دوم با رنگ قرمز نشان داده شده است.

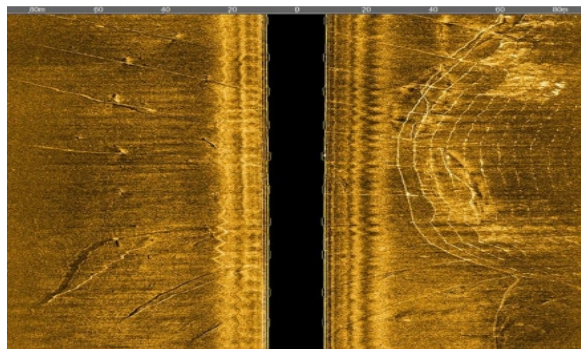
استفاده از روش‌های تطبیق ویژگی، مانند تبدیل ویژگی ثابت مقیاس به عنوان مثال در [۸] با موفقیت انجام شده است. سایر پژوهشگران ثبت هم‌زمان گذر تکراری را در سطح سیگنال نشان داده‌اند و تأثیر ضریب همبستگی را بر جداسازی مسیر و اندازه خطا بررسی کرده‌اند. در [۹] یک الگوریتم میکرو ناوبری برای SAS جدید برای ثبت داده‌های تکراری همدوس در سطح سیگنال ارائه شده است. این الگوریتم تعمیم الگوریتم RPC است. روش پیشنهادی برای تولید نقشه‌های فاز تداخلی و انسجام گذر تکراری از بستر دریا استفاده شده است. این نتایج امکان تشخیص تغییر همدوس و پردازش تداخل سنجی در فرکانس ۳۰۰ کیلوهرتز در مقیاس زمانی حداقل ده‌ها دقیقه را نشان می‌دهد. این نتایج همچنین قابلیت و برخی چالش‌ها را برای کاربردهای تداخل سنجی تکراری نشان می‌دهند. در سال ۱۹۸۱ ریون [۱۰] یک روش جبران حرکت سونار را پیشنهاد کرد که از مفهوم مرکز فاز جابجا شده استفاده کرد. بعدها، در سال ۱۹۹۲ شریف [۱۱] روش مشابهی را پیشنهاد کرد. ایده اصلی این روش‌ها این است که سرعت سکو به گونه‌ای انتخاب شود که مراکز فاز از پینگ‌های مجاور در همان مکان و امتداد مسیر رخ دهند. به این ترتیب، همپوشانی بازگشتی‌های هدف را می‌توان برای به دست آوردن اطلاعات خطای فاز تراز کرد. در این روش هیچ پراکنده ساز غالبی برای تخمین خطاهای فاز مورد نیاز نیست؛ بنابراین این روش برای بازگشتی‌های کف دریا که معمولاً فاقد اهداف قوی هستند، بسیار مناسب است. در [۱۲] یک روش آبشاری مبتنی بر همبستگی برای سیستم گیرنده چندگانه توسعه یافته است. اخیراً پژوهشگران در [۱۳] پیشنهاد کرده‌اند که باید از همپوشانی مراکز فاز به صورت گروهی برای تشکیل پرتو و تشکیل تصاویر استفاده کرد [۱۴] که همبستگی متقاطع دوبعدی برای استخراج حرکت دارند. ایده‌های مشابهی در مجموعه جبران حرکت در این مقاله استفاده شده است.

## ۲- مدل سازی و مبانی نظری

### ۲-۱- بیان مسئله

در سونارهای روزنه مصنوعی، خطاهای حرکتی در صورتی که جبران سازی نشوند باعث کاهش شدید کیفیت تصویر می‌گردند [۱۵]. برای اینکه تصویر به خوبی متمرکز شود، بدون اینکه محوشدگی قابل توجهی داشته باشد، انحرافات حرکت باید کمتر از  $1/8$  طول موج باقی بماند. شش درجه آزادی حرکت برای سیستم سونار وجود دارد که عبارتند از جابجایی عرضی<sup>۱</sup>، جابجایی طولی<sup>۲</sup>، جابجایی قائم<sup>۳</sup>، پیچش<sup>۴</sup>، دوران<sup>۵</sup> و غلتش<sup>۶</sup>. این درجات آزادی در شکل ۳ نشان داده شده‌اند.

مستقل از برد و فرکانس است [۳]. شکل ۲ نمونه‌ای از یک تصویر سونار کنارنگر است.



شکل ۲: تصویر سونار کنارنگر [۱]

با این حال، دقت بالای ناوبری و حرکتی برای پردازش سیگنال‌های دریافتی و تشکیل تصویر مورد نیاز است. پیامد عدم برآورده کردن این الزام، ایجاد خطا در تصویر، از جمله کاهش قدرت تفکیک<sup>۷</sup> و محوشدگی است [۴].

برای سیستم‌های SAS که در فرکانس‌های بالا کار می‌کنند، خطای حرکتی مجاز در حد میلی‌متر است و بیشتر از این مقدار نیاز به جبران سازی دارد که می‌توان با استفاده از ترکیب سخت‌افزار سیستم ناوبری و الگوریتم‌های پردازش سیگنال مبتنی بر داده به آن دست یافت. الگوریتم‌های تخمین ناوبری (از طریق حسگر) با استفاده از سیگنال‌های بازگشتی سونار ارائه می‌شوند. به دلیل حرکات انتقالی و انحرافات امواج در طول مسیر به شدت موجب خطای تصویربرداری می‌شوند. ریز ناوبری دقت بسیار بهتری نسبت به اندازه گیری‌های سرعت یکپارچه از یک سیستم ناوبری اینرسی (INS) و ثبت سرعت داپلر<sup>۸</sup> ارائه می‌دهد [۵]. حرکت دیگری که بیشترین نقش را در خطاهای تصویربرداری SAS دارد، چرخش در صفحه تصویربرداری است و این حرکت را می‌توان به اندازه کافی با استفاده از INS های دقیق اندازه گیری کرد. در میان الگوریتم‌های ریز ناوبری، الگوریتم مرکز فاز افزوده بسیار پرکاربرد است که معمولاً به عنوان الگوریتم آنتن مرکز فاز جابجا شده نیز نامیده می‌شود [۶]. الگوریتم ریز ناوبری RPC با تشکیل یک آرایه مجازی از همبستگی متقابل سیگنال‌ها بین آرایه‌ها، یعنی قسمت همپوشانی آرایه سونار در پینگ‌های بعدی، عمل می‌کند. نوسان پینگ به پینگ با شکل‌دهی پرتو این آرایه مجازی و تعیین نقطه قله در تابع همبستگی تخمین زده می‌شود. علاوه بر این، دامنه قله با نسبت توان سیگنال به نویز مرتبط است و می‌توان از آن برای تقریب خطای تخمین استفاده کرد [۷]. پردازش تکراری همدوس چالش‌های بیشتری را به مشکل ناوبری اضافه می‌کند، زیرا خطاهای ناوبری می‌توانند به طور قابل توجهی بین پالس‌ها جمع شوند و تغییرات زمانی و زاویه‌ای می‌توانند برای کاهش همدوس بودن سیگنال عمل کنند. ایجاد تصویر همدوس از هدف توسط پردازش پالس‌های مکرر با

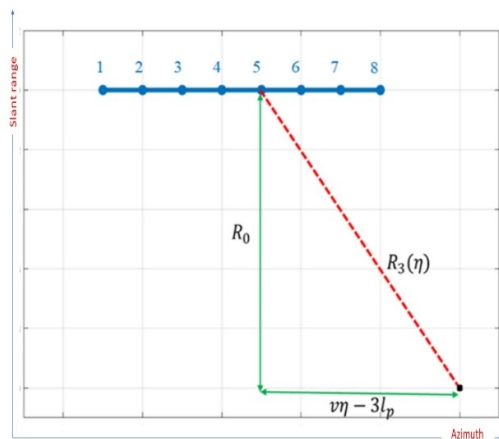
مصنوعی مورد تخمین قرار می گیرد. سپس با جبران سازی خطای حرکتی، اقدام به تشکیل تصویر می شود.

لازم به ذکر است هندسه سونار به صورت سه بعدی است؛ اما در این مقاله تمامی شکل ها در صفحه برد مایل رسم شده اند. صفحه برد مایل صفحه ای است که از مراکز هندسی آرایه در پینگ اول، پینگ بعدی و مکان هدف تشکیل شده است. در واقع مراکز فاز و آرایه تشکیل شده روی صفحه برد مایل تصویر می شوند، در نتیجه تصویر آرایه در این مسئله روی صفحه برد مایل به این نحو دوبعدی می شود و می توان مسئله را به صورت دوبعدی تحلیل کرد. ضمناً در این حالت کلیه خطاهای حرکتی چرخش و جابجایی در فضای سه بعدی به صورت دو پارامتر خطای چرخش<sup>۱۷</sup> و جابجایی<sup>۱۸</sup> در صفحه برد مایل قابل مدل کردن هستند.

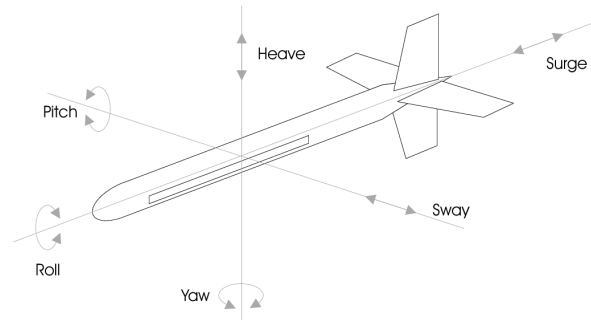
در شکل ۱ (الف) یک آرایه خطی با هشت مرکز فاز که سه تایی آنها مرکز فاز همپوشان هستند، نشان داده شده است. همان طور که در شکل ۱ (ب) مشخص است در صورت بروز خطای حرکتی موقعیت مرکز فازهای همپوشان یکسان نیست همچنین فاصله ی بین مرکز فاز ها متناسب با فرکانس تکرار پینگ و سرعت سکو است. در ادامه ی این بخش ابتدا معادله ی برد سونار دهانه مصنوعی بدون در نظر گرفتن خطای حرکتی ارائه شده است. پس از آن با در نظر گرفتن خطای حرکتی معادله ی برد برای حالتی که خطای حرکتی Yaw و Sway رخ داده است، بیان می شود. در ادامه با استفاده از بسط تیلور معادله ی برد تقریب زده شده است. سپس الگوریتم تشکیل تصویر برد-دایر [۱۷] با روش پیشنهادی برای تخمین و جبران سازی خطای حرکتی ترکیب می شود.

## ۲-۳-۱- معادله برد در حالت مطلوب و با خطای حرکتی

در این بخش برای درک بهتر یک رابطه ی جامع برای تمامی عناصر ارائه می شود. در شکل ۵ وضعیت معادله ی برد برای مرکز فاز پنجم نشان داده شده است.



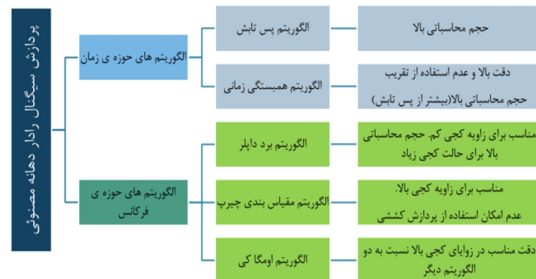
شکل ۵: وضعیت معادله ی برد برای مرکز فاز پنجم در صفحه برد مایل



شکل ۳: درجات آزادی حرکت سونار برای چرخش و جابجایی [۱۶]

## ۲-۲- الگوریتم های تشکیل تصویر

یکی از پردازش های اساسی در پردازش داده سونار روزنه مصنوعی، تشکیل تصویر<sup>۱۵</sup> از داده خام<sup>۱۶</sup> دریافتی است که به وسیله الگوریتم های تشکیل تصویر صورت می گیرد. اساس کار این الگوریتم ها فشرده سازی در برد و سمت است. این فشرده سازی می تواند در حوزه زمان یا فرکانس (یا به صورت ترکیبی) صورت گیرد. الگوریتم های تشکیل تصویر بر این اساس به دودسته الگوریتم های حوزه زمان و فرکانس تقسیم بندی می شوند که هر کدام ویژگی هایی دارند. به طور کلی الگوریتم های حوزه فرکانس به دلیل استفاده از تبدیل فوریه سریع در پردازش ها از سرعت بالاتری برخوردار هستند. اما در عوض الگوریتم های حوزه زمان انعطاف پذیری بیشتری در اصلاح فاز ناشی از حرکت غیر مطلوب سکو را دارند. ضمناً هر کدام از الگوریتم ها برای شیوه و شرایط کاری خاصی مناسب هستند. به عنوان مثال الگوریتم برد-دایر برای پردازش داده ها در شیوه کارکرد نواری مناسب تر است. در شکل ۴ الگوریتم های تشکیل تصویر برای سامانه های دهانه مصنوعی دسته بندی شده است. همچنین با بررسی و مقایسه ی این الگوریتم ها می توان نتیجه گرفت که الگوریتم های حوزه فرکانس نسبت به الگوریتم های حوزه زمان، کارایی بیشتری دارند. بنابراین در این مقاله از الگوریتم برد-دایر استفاده شده است [۱۷].



شکل ۴: دسته بندی الگوریتم های حوزه فرکانس و حوزه زمان.

## ۲-۳- روش مرکز فاز افزوده

در قسمت های قبل از خطای حرکتی سونار دهانه مصنوعی به عنوان عامل فاز مزاحم در تشکیل تصویر دهانه مصنوعی یاد شد، به طوری که این خطا باعث عدم تطبیق سیگنال در جهت سمت می شود. در این قسمت با استفاده از روش مرکز فاز افزوده، خطای حرکتی سونار دهانه

### ۲-۳-۲- روش تخمین و جبران خطای حرکتی

در ادامه برای تخمین خطای حرکتی از اندازه‌ی خروجی فشرده‌ساز برد، جفت مرکز فاز همپوشان (برای نمونه مرکز فاز هشتم در پینگ قبل و مرکز فاز سوم در پینگ فعلی) استفاده شده است. با فرض اینکه  $s_8(f_t, \eta)$  خروجی فشرده‌ساز مرکز فاز ۸ در پینگ  $\eta$  باشد می‌توان نوشت:

$$S_8(f_t, \eta) = \text{sinc} \left( \pi B_w \left( f_t - K_r \left( \frac{2R_8(\eta)}{c} \right) \right) \right) \quad (۴)$$

در فرمول بالا  $B_w$  پهنای باند سی‌ستم،  $K_r$  ضریب شکست محیط و  $f_t$  فرکانس سیگنال ورودی است.  $s_3(f_t, \eta + 1)$  خروجی فشرده‌ساز مرکز فاز ۳ در پینگ  $\eta + 1$  است که به صورت زیر بدست می‌آید:

$$S_3(f_t, \eta + 1) = \text{sinc} \left( \pi B_w \left( f_t - K_r \left( \frac{2R_3(\eta + 1)}{c} \right) \right) \right) \quad (۵)$$

پس از محاسبه همبستگی متقابل بین این دو سیگنال، می‌توان نوشت:

$$S_{out}(f_t, \eta) = \text{sinc} \left( \pi B_w \left( f_t - K_r \left( \frac{2(R_3(\eta + 1) - R_8(\eta))}{c} \right) \right) \right) \quad (۶)$$

بنابراین مقدار خطای حرکتی مرکز فاز سوم در پینگ  $\eta + 1$  به صورت زیر است.

$$\hat{d}_{r(u)} = \arg(\max(|S_{out}(f_t, \eta)|)) \quad (۷)$$

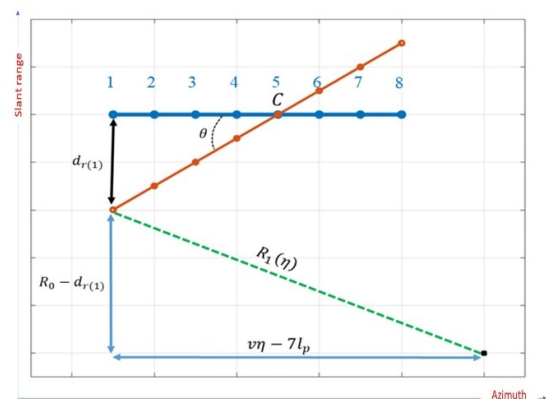
در صورتی که مقدار جابجایی تخمین زده شده برابر با  $\hat{d}_{r(u)}$  باشد، بنابراین با ضرب عبارت جبران سازی به صورت زیر می‌توان نوشت:

$$H_{comp}(u, \eta) = \exp \left( \left( -j2\pi \left( \frac{2R_{comp}(u, \eta)}{\lambda} \right) + K_r t \left( \frac{2R_{comp}(u, \eta)}{c} \right) \right) \right) \quad (۸)$$

در شکل ۵،  $v$  و  $\eta$  به ترتیب سرعت سونار و زمان سمت هستند. بنابراین طبق شکل ۵ معادله‌ی برد لحظه‌ای برای مرکز فاز  $u$  ام برابر است با:

$$R_u(\eta) = \sqrt{R_0^2 + (v\eta - (8-u)l_p - y_0)^2} \quad (۱)$$

در ادامه با اعمال خطای Yaw معادله‌ی برد برای هر مرکز فاز محاسبه شده است. در شکل (۶) خطای حرکتی حول مرکز فاز  $C$  نشان داده شده است. در این بخش خطای حرکتی ناشی از تغییرات حرکتی سکو به معادله‌ی برد به دست آمده در مرحله‌ی قبل، اعمال می‌شود.



شکل ۶: خطای حرکتی حول مرکز فاز  $C$  بدون در نظر گرفتن سرعت سکو

از آنجایی که  $C$  المانی است که حول آن بین آرایه‌ها در پینگ قبل و بعد خطای حرکتی رخ داده است، بنابراین با استفاده از معادله‌ی برد بیان شده در مرحله‌ی قبل می‌توان نوشت:

$$R_u(\eta) = \sqrt{(x_0 - dx - d_{r(u)})^2 + (z_0 - dz)^2 + (v\eta - (8-u)l_p - y_0)^2} \quad (۲)$$

که  $d_{r(u)}$  میزان جابجایی ناشی از چرخش Yaw المان‌ها،  $dx$  و  $dz$  به ترتیب خطای حرکتی در جهت محور  $X$  و  $Z$  هستند که رابطه‌ی  $\Delta z = dz$  و  $\Delta x = dx - d_{r(u)}$  برقرار است.

$$R_u(\eta) = \sqrt{(x_0 - \Delta x)^2 + (z_0 - \Delta z)^2 + (v\eta - (8-u)l_p - y_0)^2} \quad (۳)$$

بنابراین سیگنال دریافتی و اصلاح شده هر مرکز فاز در حوزه فرکانس برد و فرکانس سمت پس از درون یابی به صورت زیر بدست می آید:

$$S_5(f_\eta, f_\tau) = \text{rect}\left(\frac{f_\eta}{F_\eta}\right) w(f_\tau, f_\eta) \exp\left(j\pi\left(\frac{4R_0}{\lambda} + \frac{f_\eta^2}{Ka}\left(1 + \frac{Ka}{f_\eta^2} \Delta E(f_\eta)\right)\right)\right) \quad (16)$$

### ۲-۳-۳- جبران سازی فاز باقی مانده

همان طور که مشخص است مقدار فاز مزاحم  $\frac{Ka}{f_\eta^2} E(f_\eta)$  ایجاد شده است که در صورت جبران نشدن، باعث عدم تمرکز می گردد. بنابراین با خلاصه نویسی رابطه ی (۱۶) داریم:

$$S_5(f_\eta, f_\tau) = \text{rect}\left(\frac{f_\eta}{F_\eta}\right) \text{sinc}\left(\pi B_w\left(f_\tau - K_r\left(\frac{2R'_r(f_\eta)}{c}\right)\right)\right) \exp\left(j\pi\left(\frac{4R_0}{\lambda} + (1+a)\frac{f_\eta^2}{Ka}\right)\right) \quad (17)$$

تابع جبران سازی انحراف  $a$  و فشرده ساز سمت به صورت زیر است:

$$H_{az}(f_\eta) = \text{rect}\left(\frac{f_\eta}{F_\eta}\right) \exp\left(-j\pi\frac{(1+\hat{a}(m))f_\eta^2}{Ka}\right) \quad (18)$$

در رابطه ی بالا مقدار  $a$  توسط جستجوگر،  $\hat{a}(m)$  تخمین زده شده است. به دلیل هم فاز شدن سیگنال ها در جهت سمت، پس از جبران سازی در جهت برد و سمت بیشترین بهره را در اختیار پردازش قرار می دهد. به عبارتی کیفیت تصویر پس از تخمین این عبارت بهینه می شود.

پس از اعمال عکس تبدیل فوریه به رابطه (۱۸) تصویر نهایی اهداف تشکیل می شود:

$H_{comp}(u, \eta)$  تابع پاسخ سیستم در فاصله و زمان مشخص برای بدست آوردن همان مقدار خطای  $yaw$  است، همان طور که قبلاً اشاره شد، داریم:

$$R_{comp}(u, \eta) = \hat{a}_{r(u)} + \frac{v\eta l_p(8-u)}{R_0} - \frac{((8-u)l_p)^2}{2R_0} \quad (9)$$

در ادامه جبران سازی با استفاده از ضرب فاز انجام می شود:

$$s_1(u, t, \eta) = s_0(u, t, \eta) H_{comp}(u, \eta) \quad (10)$$

بنابراین پس از جبران سازی اثر خطای حرکتی چندین مرکز فاز هدف و فشرده سازی برد سیگنال های هر مرکز فاز، می توان نوشت:

$$S(f_t, \eta) = \text{rect}\left(\frac{\eta}{T_s}\right) w(f_t) \exp\left(j2\pi\left(f_0 + f_\tau\frac{2R(\eta)'}{c}\right)\right) \quad (11)$$

که با جایگذاری  $w(f_t) = \text{sinc}\left(\pi B_w\left(f_t - K_r\left(\frac{2R(\eta)'}{c}\right)\right)\right)$  رابطه بالا معادله ی برد نهایی به صورت زیر است:

$$R(\eta)' = R_0 + \frac{(v\eta)^2}{2R_0} + E(\eta) \quad (12)$$

که  $E(\eta)$  خطای تخمین سیگنال هر مرکز فاز است. پس از تبدیل فوریه سمت، سیگنال به صورت زیر است:

$$S(f_\eta, f_\tau) = \text{rect}\left(\frac{f_\eta}{F_\eta}\right) w(f_\tau) \exp(j\pi\phi(f_\eta)) \quad (13)$$

که  $\phi(f_\eta) = \frac{4R_0}{\lambda} + \frac{f_\eta^2}{Ka} + E(f_\eta)$  مقدار  $R_{rd}(f_\eta)$  بصورت زیر است:

$$R_{rd}(f_\eta) = R_0 + \frac{\lambda^2 f_\eta^2 R_0}{8v_r^2} + \Delta E(f_\eta) \quad (14)$$

پس از حذف اثر  $\frac{\lambda^2 f_\eta^2 R_0}{8v_r^2}$  معادله ی برد در حوزه ی فرکانس سمت به صورت زیر حاصل می شود:

$$R'_{rd}(f_\eta) = R_0 + \Delta E(f_\eta) \quad (15)$$

### شکل ۷: بلوک دیاگرام مراحل شبیه سازی

طبق بلوک دیاگرام بالا پس از تخمین خطا و تشکیل تصویر، تصویر کیفیت لازم را ندارد و یک مقدار محوشدگی در تصویر وجود دارد. در این مقاله با استفاده از الگوریتم جستجوی تطبیقی اقدام به بهینه سازی الگوریتم برد داپلر می شود. این الگوریتم در یک بازه معین اقدام به تخمین مقداری می شود که عبارت به دست آمده در رابطه (۲۰) را بیشینه می کند،

### ۳- شبیه سازی

#### ۳-۱- فرضیات شبیه سازی

پارامترهای مفروض در شبیه سازی در جدول ۱ ذکر شده اند. پارامترهای دهانه مصنوعی ممکن است متناسب با هر سناریو تغییر کنند؛ بنابراین لزوماً ثابت نیستند. همچنین تمامی شبیه سازی ها برای سونار دهانه مصنوعی با زاویه ی کجی صفر درجه در نظر گرفته شده است. پهنای نوار تصویربرداری برابر با ۵۲/۵ متر است که سطح قابل قبولی از کف دریا را پوشش می دهد.

جدول ۱: پارامترهای شبیه سازی سونار روزنه مصنوعی.

| مقادیر                  | پارامترها                    |                         |
|-------------------------|------------------------------|-------------------------|
| ۵۰ کیلوهرتز             | فرکانس صوت ارسالی            | پارامترهای سونار        |
| ۱۵۰۰ متر بر ثانیه       | سرعت صوت                     |                         |
| ۱۵ متر بر ثانیه         | سرعت سکوی سونار              |                         |
| ۴ کیلوهرتز              | پهنای باند صوت ارسالی        | پارامترهای دهانه مصنوعی |
| ۱۵۰ هرتز                | فرکانس تکرار پینگ            |                         |
| ۱/۴۷۶۷ ثانیه            | مدت زمان تصویربرداری         |                         |
| ۹۴۷/۵ متری الی ۱۰۰۰ متر | کمترین و بیشترین برد         |                         |
| ۰ دسی بل                | نسبت سیگنال به نویز (قبل از) |                         |

$$s_6(\eta, f_t) = \text{sinc}(\pi F_\eta(\eta - \eta_0)) \text{sinc}\left(\pi B_w\left(f_t - K_r \frac{2R'_{rd}(f_\eta)}{c}\right)\right) \exp\left(j\pi \frac{4R_0}{\lambda}\right) \quad (19)$$

که مقدار  $\hat{a}$  به صورت زیر انتخاب می شود:

$$\hat{a} = \arg\left(\max\left(\sum \sum |s_6(\eta, f_t)|\right)\right) \quad (20)$$

بنابراین پس از جبران سازی خطای باقی مانده و فشرده سازی سمت تصویر تشکیل شده از هدف نقطه ای دارای معادله ی زیر است:

$$s_{final}(\eta, f_t) = \text{sinc}(\pi F_\eta(\eta - \eta_0)) \text{sinc}\left(\pi B_w\left(f_t - K_r \frac{2R'_{rd}(f_\eta)}{c}\right)\right) \quad (21)$$

تابع  $\text{sinc}\left(\pi B_w\left(f_t - K_r \frac{2R'_{rd}(f_\eta)}{c}\right)\right)$  حاوی فرکانس  $K_r \frac{2R'_{rd}(f_\eta)}{c}$  معادل برد هدف در موقعیت  $R'_{rd}(f_\eta)$  است، همان طور که قبلاً گفته شد این مقدار برد همراه با باقی مانده ی خطای حرکتی است اما به دلیل کوچک تر بودن آن از تفکیک پذیری برد، از جبران سازی در تصویر نهایی صرف نظر می شود. همچنین تابع  $\text{sinc}(\pi F_\eta(\eta - \eta_0))$  حاوی زمان عبور از مرکز  $\eta_0$  برای اهداف با سمت های متفاوت است.

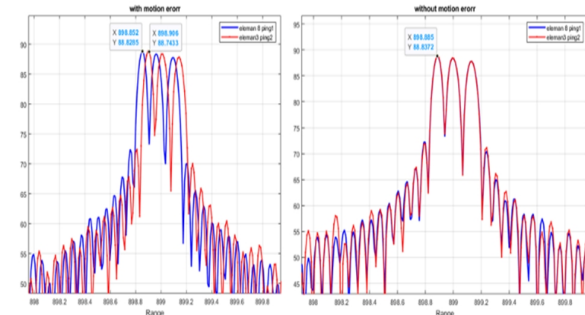
#### ۲-۳-۴- بلوک دیاگرام روش پیشنهادی

در شکل ۷ تمام مراحل روش پیشنهادی به صورت یک بلوک دیاگرام نمایش داده شده است. در این شکل، بلوک جستجوی تطبیق که جزء روش پیشنهادی این مقاله است، با رنگ متفاوت نشان داده شده است.



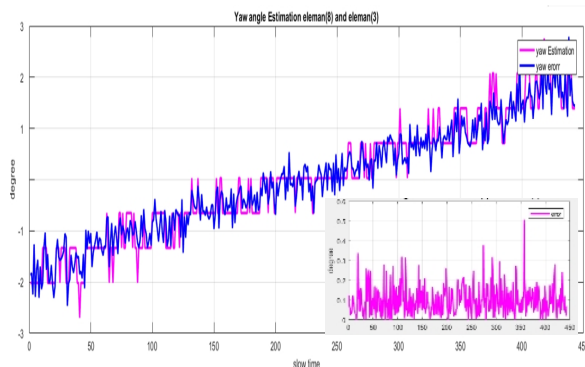
در این بخش ابتدا نتایج شبیه سازی روش پیشنهادی برای خطای حرکتی بر اثر تغییر زاویه ی Yaw به صورت خطی بین  $-3^\circ$  الی  $+3^\circ$  درجه همراه با تغییرات تصادفی با میانگین صفر و انحراف استاندارد  $0.1^\circ$  درجه نشان داده شده است. ابتدا در شکل ۹ نتایج خروجی فشرده ساز برد برای دو حالت بدون خطای حرکتی و با خطای حرکتی ارائه می گردد:

- حالت اول: در این حالت خطای حرکتی وجود ندارد و اهداف برای دو مرکز فاز ۳ و ۸ به دلیل همپوشانی در برد منطبق شده اند (شکل سمت راست).
  - حالت دوم: در این حالت خطای حرکتی وجود دارد. موقعیت به دست آمده برای ۲ مرکز فاز به ترتیب  $898/885$  متر و  $898/852$  متر است. تفاوت  $0.32^\circ$  متری ناشی از خطای حرکتی است. به عبارت دیگر محل قرارگیری هدف برای مرکز فاز ۸ در پینگ اول (نمودار آبی) متفاوت از محل قرارگیری هدف برای مرکز فاز ۳ در پینگ دوم (نمودار قرمز) است (شکل سمت چپ).
- به این ترتیب مقدار خطای حرکتی با استفاده از همبستگی متقابل بین دو نمودار به دست آمده قابل محاسبه است.



شکل ۹: نتایج خروجی فشرده سازی برد در مرکز فازهای ۸ و ۳ برای حالت بدون خطای حرکتی (سمت راست) و همراه با خطای حرکتی (سمت چپ).

در شکل ۱۰ نمودار تخمین Yaw و مقدار واقعی Yaw و خطای تخمین نشان داده شده است.



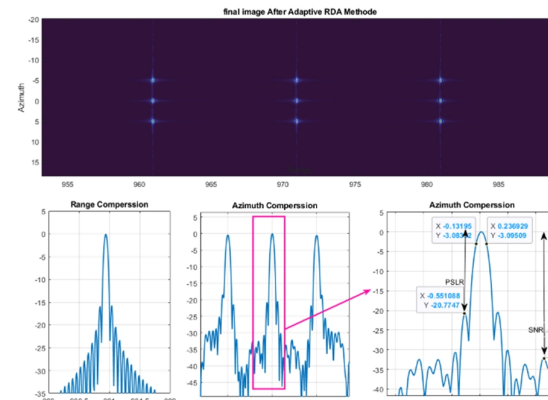
شکل ۱۰: نمودار تخمین Yaw و مقدار واقعی Yaw و خطای تخمین مشاهده می شود که مقدار زوایای Yaw اعمالی در مقایسه با زاویه های Yaw تخمین زده شده حداکثر  $0.5^\circ$  درجه تفاوت دارد، این مقدار

|            |  |
|------------|--|
| فشرده سازی |  |
|------------|--|

همچنین در این مقاله، چهار سناریو برای تخمین خطای حرکتی و تشکیل تصویر از آن ارائه شده است. در سناریوی اول بدون در نظر گرفتن خطای حرکتی شبیه سازی سیگنال انجام و سپس تصویر هدف تشکیل شده است. در سناریوی دوم مقدار خطای Yaw به صورت خطی از  $-3^\circ$  الی  $+3^\circ$  درجه تغییر کرده که ضمناً این تغییر خطی همراه با تغییرات تصادفی با میانگین صفر و انحراف استاندارد مشخص است. در سناریوی سوم با ایجاد تغییرات Yaw به صورت خطی بین  $-5^\circ$  الی  $+5^\circ$  درجه همراه با تغییرات تصادفی با میانگین صفر و انحراف استاندارد  $0.2^\circ$  درجه و خطا در محوره های  $x$  و  $z$  بین  $-40$  الی  $+40$  سانتی متر همراه با یک مؤلفه تصادفی با میانگین صفر و انحراف استاندارد  $5$  سانتی متر است. در سناریوی چهارم نشان داده می شود با میانگین گیری از تخمین به دست آمده در جفت مراکز فاز همپوشان مختلف، خطای تخمین کاهش پیدا می کند. در این چهار سناریو نتایج نسبت قله به گلبرگ کناری<sup>۱۹</sup> و تفکیک پذیری سمت اندازه گیری شده است.

### ۳-۲- سناریوی اول

در این نوع سناریو تصویر هدف نقطه ای با استفاده از الگوریتم تشکیل تصویر برد-دایر بهود یافته ارائه شده است. در این سناریو تنها معیارهای یک تصویر مطلوب ارائه شده است. این معیارها شامل تفکیک پذیری<sup>۲۰</sup> و نسبت قله به گلبرگ کناری هستند. لازم به ذکر است ۹ هدف نقطه ای در برد و سمت های مختلف در نظر گرفته شده است که تصویر این اهداف طبق شکل ۸ نمایش داده شده است.

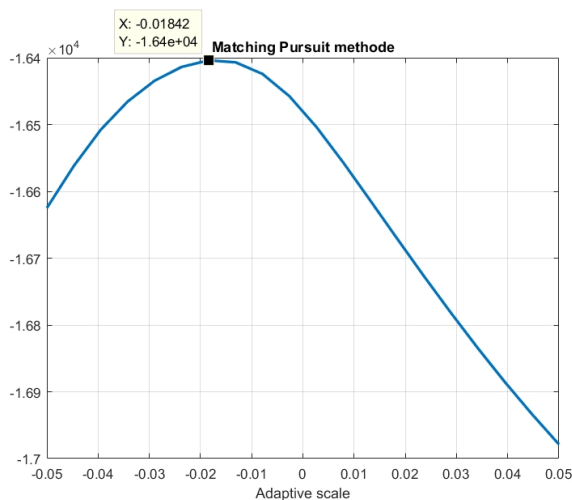


شکل ۸: تصویر تشکیل شده برای هدف نقطه ای در حالت مطلوب و بدون خطای حرکتی

همان طور که مشخص است تفکیک پذیری مطلوب در جهت سمت حدوداً  $33^\circ$  سانتی متر است؛ با توجه به اینکه  $la$  برابر با  $60^\circ$  سانتی متر است، تفکیک پذیری در جهت سمت باید  $30^\circ$  سانتی متر باشد اما به دلیل استفاده از پنجره گذاری، این مقدار گسترش یافته است. نسبت قله به گلبرگ کناری حدوداً  $20$  دسی بل است. در ادامه با افزایش خطای حرکتی این معیارها در سناریوهای مختلف مقایسه می شوند.

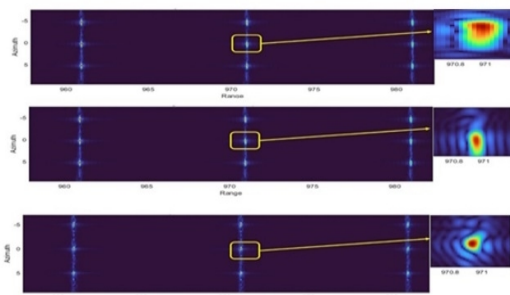
### ۳-۳- سناریوی دوم

در مرحله بعد از فشرده سازی سمت یک خطای باقی مانده وجود دارد که تا حدودی بر کیفیت تصویر تشکیل شده تأثیر می گذارد؛ لذا برای آنکه خطای باقی مانده را محاسبه کنیم مطابق رابطه (۲۰) از یک تابع درجه دو به عنوان فیلتر استفاده می کنیم. در شکل ۱۲ نحوه تخمین ضریب درجه ۲ نشان داده شده است. در مقابل عملکرد مفید این تابع برای بهبود کیفیت تصویر، حجم محاسباتی الگوریتم افزایش پیدا می کند.



شکل ۱۲: تخمین خطای باقی مانده توسط جست جوی تطبیق.

تعداد جست و جو همراه با بازهی جست و جو، میزان حجم محاسباتی این بهینه ساز را تعیین می کنند. در ادامه برای درک بهتر موضوع و مقایسه، تصاویر اهداف پیش از اصلاح خطای حرکتی، پس از اصلاح خطای تخمین زده شده به روش RPC و پس از اصلاح خطای درجه ۲ باقی مانده به روش پیشنهادی در شکل ۱۳ نمایش داده شده است.

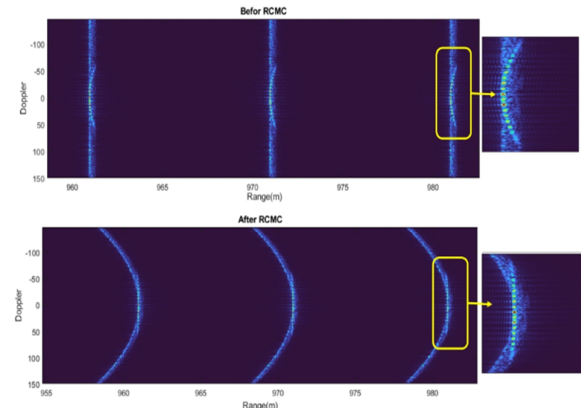


شکل ۱۳: تصویر تشکیل شده در حالت وجود خطای حرکتی و عدم جبران سازی (شکل بالا)، تصویر با جبران سازی خطای حرکتی به روش RPC (شکل وسط) و تصویر با جبران سازی خطای باقی مانده به روش پیشنهادی (شکل پایین)

به عنوان خطای تخمین شناخته می شود. خطای تخمین همان  $\Delta e(u, \eta)$  ارائه شده در رابطه های (۴) تا (۲۱) است. در این مقاله برای جبران سازی این خطای تخمین باقی مانده از روش جست و جوی تطبیقی استفاده شده است. لازم به ذکر است عوامل زیر بر روی خطای تخمین تأثیرگذار هستند:

- تعداد نقاط تبدیل فوریه: هر چه نقاط تبدیل فوریه بیشتر باشد خطای تخمین کمتر است.
- پهنای باند سیگنال: هر چه پهنای باند بیشتر باشد به دلیل بهبود تفکیک پذیری، تخمین دقیق تر است.
- موقعیت اهداف: در صورتی که اهداف در بردهای مختلف به صورت نامنظم پخش شده باشند، الگوریتم همبستگی متقابل عملکرد بهتری را نشان می دهد.

در ادامه پس از تخمین خطای حرکتی هر مرکز فاز، جبران سازی آن انجام می شود. مرحله ی بعدی پردازش با استفاده از درون یابی برای اصلاح مهاجرت سلول برد است که در شکل ۱۱ نمایش داده شده است.

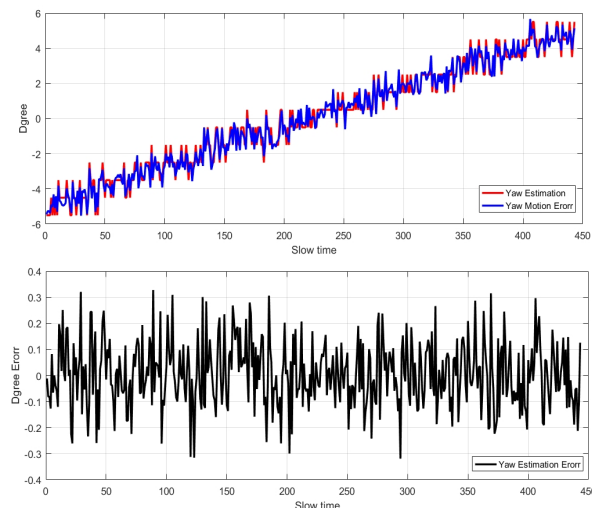


شکل ۱۱: نمودار قبل از اصلاح مهاجرت سلول برد (شکل بالا) و بعد از اصلاح (شکل پایین) توسط درون یابی.

در شکل ۱۱ نشان داده شده است که قبل و بعد از اصلاح مهاجرت سلول برد اهداف دارای چه موقعیت مکانی بوده اند. پس از اعمال درون یابی خطی، انحنای ایجاد شده به دلیل سرعت سکو جبران می شود. اصلاح مهاجرت سلول برد، انرژی اهداف را در یک سلول برد مختص به خود متمرکز می کند؛ اما همان طور که مشخص است، ترم های ناشی از خطای حرکتی دچار انحنای می شوند (شکل پایین). در واقع به دلیل وجود نویز در خطای حرکتی اعمال شده، طیف داپلر اهداف در جهت سمت دارای پخش شدگی است. در صورتی که درون یابی تنها بر محدوده ی پهنای باند داپلر ایجاد شده توسط سرعت سکو تأثیر مفید می گذارد.

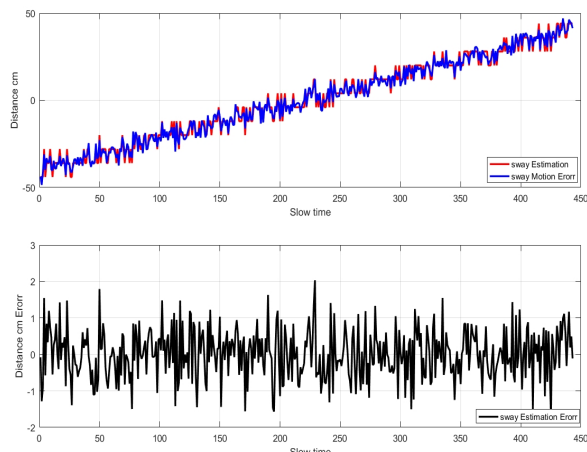
در این مرحله پس از جبران سازی مهاجرت سلول برد برای کاهش سطح توان نویز از پنجره گذاری استفاده می شود. در این روش با ضرب یک پنجره معادل پهنای باند داپلر، آثار نویز خطای حرکتی تضعیف می شود.

در سناریوی قبلی تغییرات Yaw بین ۳- الی ۳+ درجه همراه با تغییرات تصادفی با انحراف استاندارد ۰/۱ درجه بود. در این سناریو شبیه سازی برای تغییرات Yaw بین ۵- الی ۵+ همراه با تغییرات تصادفی با انحراف استاندارد ۰/۲ درجه انجام می شود. همچنین تغییرات سونار در دو جهت  $x$  و  $z$  بین بازه ی ۴۰- الی ۴۰+ سانتی متر همراه با انحراف استاندارد ۵ سانتی متر اعمال شده است. در شکل ۱۵ مقدار Yaw ایجاد شده و تخمین آن ارائه شده است.



شکل ۱۵: نتایج تخمین Yaw ناشی از تغییرات تصادفی (شکل بالا) و خطای تخمین Yaw (شکل پایین).

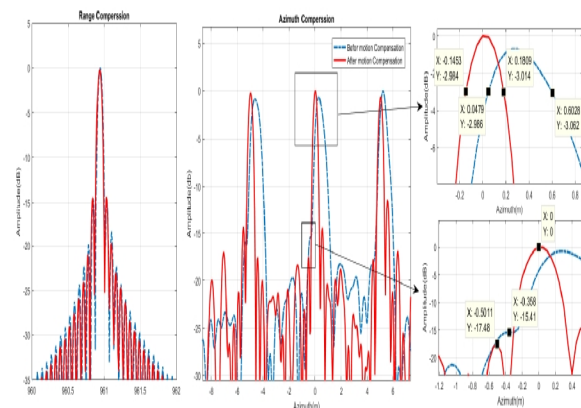
در ادامه نمودار تخمین Sway و خطای تخمین آن در شکل ۱۶ ارائه شده است. همچنین تخمین تغییرات Sway توسط الگوریتم پیشنهادی تا حد بالایی قابل قبول است.



شکل ۱۶: نتایج تخمین Sway ناشی از تغییرات تصادفی (شکل بالا) و خطای تخمین Sway (شکل پایین).

شکل ۱۷ نتایج شبیه سازی الگوریتم پیشنهادی تأثیر جبران سازی خطای حرکتی را بر روی تصویر تشکیل شده نشان می دهد. همان طور که مشخص است هدف در جهت سمت متمرکزتر می شود.

در شکل ۱۳ تصویر با اعمال خطای حرکتی (شکل بالا)، تصویر با جبران سازی خطای حرکتی (شکل وسط)، و تصویر با جبران سازی خطای باقی مانده (شکل پایین) نشان داده می شود. در این شکل یک تصویر از ۹ هدف نقطه ای در ۳ برد و ۳ سمت مختلف ارائه می گردد و همان طور که مشخص است در صورت وجود خطای حرکتی و عدم جبران سازی آن، اهداف به صورت محوشده ظاهر می شوند (شکل بالا). همچنین پس از جبران سازی خطای حرکتی هدف نقطه ای متمرکزتر می شود (شکل پایین و وسط). در ادامه در شکل ۱۴ برای اندازه گیری عدم تمرکز هدف، یک برش در جهت برد و سمت ارائه شده است.

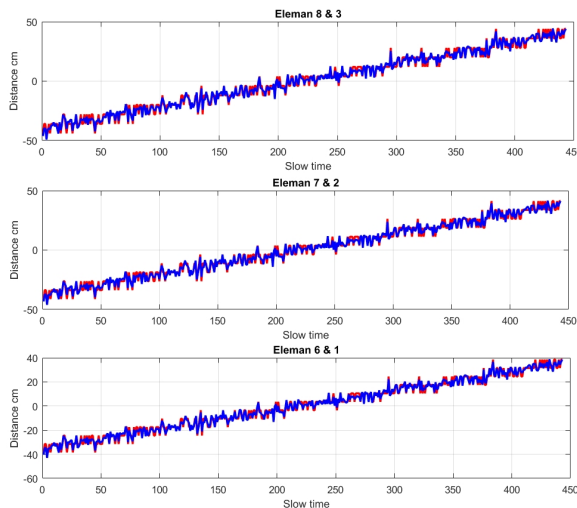


شکل ۱۴: برش جهت برد (سمت چپ) و جهت سمت (شکل وسط و سمت راست) اهداف نقطه ای برای دو حالت، بدون جبران سازی خطای حرکتی (نمودار آبی) و جبران سازی خطای حرکتی (نمودار قرمز)

در شکل ۱۴ برش جهت برد (سمت چپ) و جهت سمت (دو تصویر وسط و سمت راست) اهداف نقطه ای برای دو حالت، بدون جبران سازی خطای حرکتی (نمودار آبی)، و جبران سازی خطای حرکتی (نمودار قرمز) ارائه گردیده است. همان طور که مشخص است، انرژی هدف در سلول های برد و سمت متناسب با موقعیت هدف متمرکز گشته است. در صورت جبران نشدن خطای حرکتی طبق (نمودار آبی)، انرژی اهداف در جهت سمت گسترش می یابد. به عنوان مثال هدف میانی برد مرکزی مورد مقایسه قرار گرفته است. تفکیک پذیری در جهت سمت قبل از جبران سازی ۵۵ سانتی متر و بعد از جبران سازی به روش الگوریتم جست و جوی تطبیق آن ۳۲ سانتی متر اندازه گیری شده است. این در حالی است که تفکیک پذیری در حالت بدون خطای حرکتی ۳۰ سانتی متر اندازه گیری شده است. همچنین عدم جبران سازی باعث جابجایی اهداف در جهت سمت می گردد. علامه بر این، نسبت قله به گلبرگ کناری بعد از جبران سازی از ۱۵/۴۱ + دسی بل به ۱۷/۴۸ + دسی بل یا معادل ۲/۰۷ دسی بل افزایش پیدا کرده است.

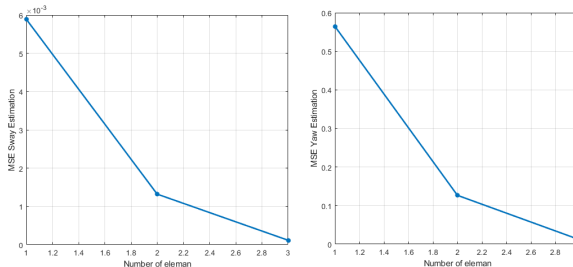
### ۳-۴- سناریوی سوم

Sway برای هر سه مرکز فاز به صورت جداگانه مورد ارزیابی قرار گرفته است.



شکل ۱۹: نتایج تخمین Sway برای هر سه گیرنده دارای همپوشانی.

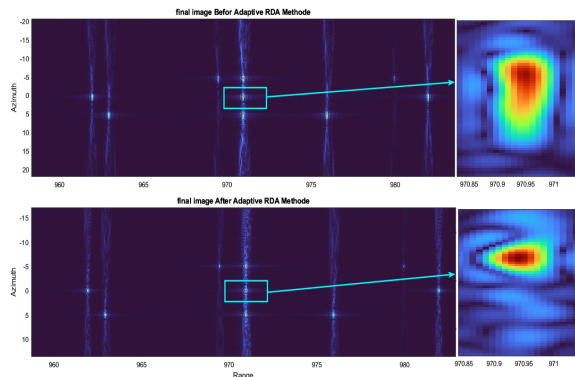
همان طور که در شکل ۱۹ مشخص است در هر سه مرکز فاز مقدار تغییرات با دقت قابل قبولی تخمین زده شده اند. در شکل ۲۰ خطای تخمین Sway و Yaw برحسب تعداد مرکز فاز استفاده شده برای تخمین نمایش داده شده است. با میانگین گیری از تخمین های به دست آمده از مرکز فازهای دارای همپوشانی، میانگین مربعات خطا (MSE= Mean square Error) کاهش پیدا می کند.



شکل ۲۰: تخمین خطای حرکتی برحسب تعداد مراکز فاز

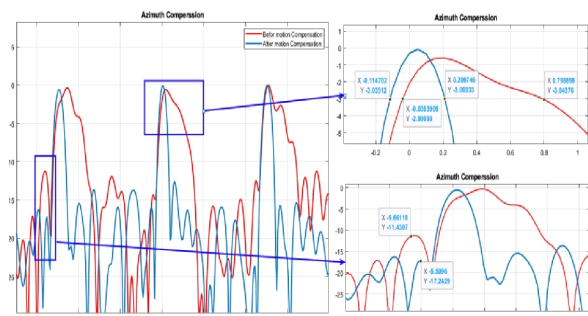
در شکل ۲۱، با استفاده از میانگین خطای به دست آمده جبران سازی انجام می شود. همان طور که مشخص است تصویر هدف نقطه ای تا حد زیادی بهبود پیدا کرده است. معیارهای تفکیک پذیری، پهنای ۳ دسی بل و نسبت قله به گلبیگ کناری به ترتیب برابر با ۳۲ سانته متر و ۱۵ دسی بل است که نشان می دهد نسبت به حالتی که تخمین خطا با تک مرکز فاز است تنها نسبت قله به گلبیگ ۵ دسی بل بهبود پیدا کرده است.

به دلیل عدم تأثیرپذیری تمرکز هدف در جهت برد از ارائه نمودار آن در این بخش خودداری می شود.



شکل ۱۷: تصویر تشکیل شده برای چیدمان دوم اهداف در حالت وجود و جبران سازی خطای حرکتی.

در شکل ۱۸ برش تصویر در جهت سمت جهت مقایسه و بررسی نمایش داده شده است.



شکل ۱۸: برش در جهت سمت تصویر برای قبل (نمودار قرمز) و بعد از جبران سازی خطای حرکتی (نمودار آبی).

طبق شکل ۱۸ مشخص است قبل از جبران سازی خطای حرکتی تفکیک پذیری اهداف در جهت سمت گسترش می یابد؛ به صورتی که پهنای ۳ دسی بل قله به ۷۶ سانته متر می رسد. به عبارتی نسبت به حالت مطلوب ۳۰ سانته متر است. پس از جبران سازی خطای حرکتی به روش الگوریتم جست و جوی تطبیق، تفکیک پذیری به ۳۲ سانته متر می رسد. همچنین نسبت قله به گلبیگ کناری در جهت سمت قبل از جبران سازی برابر با ۱۱/۵ دسی بل و بعد از جبران سازی ۱۷/۲ دسی بل می شود.

### ۳-۵- سناریوی چهارم

در سناریوی قبلی توسط یک جفت مرکز فاز اقدام به تخمین Sway و Yaw شد. در این سناریو با استفاده از همپوشانی ۳ جفت مرکز فاز اقدام به تخمین Sway و Yaw شده است در این سناریو پس از تخمین با میانگین گیری از نتایج به دست آمده از هر ۳ جفت مرکز فاز، خطای تخمین کاهش پیدا می کند. در شکل ۱۹ نتایج تخمین

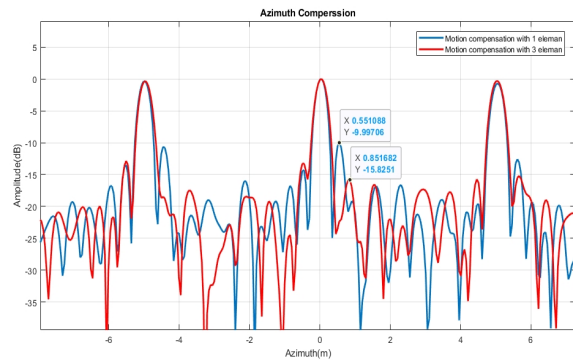
| مراکز فاز<br>(همپوشان) | انحراف<br>استاندارد | استاندارد<br>۵<br>سانتی متر |  |  |  |
|------------------------|---------------------|-----------------------------|--|--|--|
|                        | درجه                | ۰/۱۲                        |  |  |  |

نتایج شبیه سازی این چهار سناریو به صورت خلاصه در زیر ارائه شده است:

- خطای حرکتی در هر سه حالت به درستی تخمین زده شد.
- خطای حرکتی تنها بر روی اهداف فشرده شده در جهت سمت تأثیر می گذارد و باعث گستردگی آن می شود.
- تابع حاصل از بهینه سازی به روش جست و جوی تطبیق، خطای باقی مانده را جبران می کند.
- با افزایش محدوده ی خطا، نسبت قله به گلبرگ کناری کاهش پیدا می کند.
- با افزایش مراکز فاز همپوشان، دقت تخمین خطای حرکتی بهتر می شود.

#### منابع

- [۱] M. Borrelli, B. Legare, B. McCormack, P. P. G. M. dos Santos, and D. Solazzo, "Absolute Localization of Targets Using a Phase-Measuring Sidescan Sonar in Very Shallow Waters," Remote Sensing, vol. 15, no. 6, p. 1626, 2023.
- [۲] X. Meng, W. Xu, B. Shen, and X. Guo, "A High-Efficiency Side-Scan Sonar Simulator for High-Speed Seabed Mapping," Sensors, vol. 23, no. 6, p. 3083, 2023.
- [۳] M. P. Hayes and P. T. Gough, "Synthetic aperture sonar: A review of current status," IEEE journal of oceanic engineering, vol. 34, no. 3, pp. 207-224, 2009.
- [۴] D. A. Cook and D. C. Brown, "Analysis of phase error effects on stripmap SAS," IEEE Journal of Oceanic Engineering, vol. 34, no. 3, pp. 250-261, 2008.
- [۵] M. Pinto et al., "Experimental investigations into high resolution sonar systems," in Oceans' 99. MTS/IEEE. Riding the Crest into the 21st Century. Conference and Exhibition. Conference Proceedings (IEEE Cat. No. 99CH37008), vol. 2: IEEE, pp. 916-922. 1999.
- [۶] R. W. Sheriff, "Synthetic aperture beamforming with automatic phase compensation for high frequency sonars," in Proceedings of the 1992 symposium on autonomous underwater vehicle technology, IEEE, pp. 236-245. 1992.
- [۷] A. J. Hunter, S. Dugelay, and W. L. Fox, "Repeat-pass synthetic aperture sonar micronavigation using redundant phase center arrays," IEEE Journal of Oceanic Engineering, vol. 41, no. 4, pp. 820-830, 2016.
- [۸] G. Tesfaye, B. Marchand, J. D. Tucker, D. D. Sternlicht, T. M. Marston, and M. R. Azimi-Sadjadi, "Automated change detection for synthetic aperture sonar," in Detection and Sensing of Mines, Explosive Objects, and Obscured Targets XIX, vol. 9072: SPIE, pp. 10-20, 2014.
- [۹] S. A. Synnes, H. J. Callow, R. E. Hansen, and T. O. Sæbø, "Multipass coherent processing on synthetic aperture sonar data," in Proc. Eur. Conf. Underwater Acoust., pp. 1-7 2010.
- [۱۰] R. S. Raven, "Electronic stabilization for displaced phase center systems," ed: Google Patents, 1981.
- [۱۱] J. Prater, M. Emigh, and D. Bryner, "Motion Estimation for Synthetic Aperture Sonar using Redundant Phase Center



شکل ۲۱: نتایج فشرده سازی سمت برای حالت تخمین خطا توسط ۱ و ۳ جفت مرکز فاز.

#### ۴- جمع بندی و نتیجه گیری

در جدول ۲ نتایج مربوط به شبیه سازی پس از جبران سازی خطا ارائه شده است. همان طور که از مقایسه ی سناریوی اول و دوم مشخص است تفکیک پذیری، نسبت قله به گلبرگ فرعی به ترتیب افزایش و کاهش می یابد.

جدول ۲: جمع بندی نتایج شبیه سازی چهار سناریو ارائه شده.

| سناریو                     | خطای حرکتی<br>اعمال شده<br>Yaw                                               | خطای حرکتی<br>اعمال شده<br>Sway                                            | نسبت قله به<br>گلبرگ کناری<br>(دسی بل) |       | پهنای ۳<br>دسی بل<br>سمت<br>(سانتی متر) |     |
|----------------------------|------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------|-------|-----------------------------------------|-----|
|                            |                                                                              |                                                                            | قبل                                    | بعد   | قبل                                     | بعد |
| اول                        | بدون خطا                                                                     | بدون خطا                                                                   | ۲۰                                     |       | ۳۲                                      |     |
| دوم                        | از ۳- الی<br>+۳ درجه<br>به صورت<br>خطی با<br>انحراف<br>استاندارد<br>۰/۱ درجه | بدون<br>خطا                                                                | ۱۵/۴۱                                  | ۱۷/۴۸ | ۵۵                                      | ۳۲  |
| سوم                        | از ۵- الی<br>+۵ درجه<br>به صورت<br>خطی با<br>انحراف<br>استاندارد<br>۰/۲ درجه | از ۴۰- الی<br>+۴۰<br>سانتی متر<br>با انحراف<br>استاندارد<br>۵<br>سانتی متر | ۱۱/۵                                   | ۱۷/۲  | ۷۶                                      | ۳۲  |
| چهارم<br>(افزایش<br>تعداد) | از ۵- الی<br>+۵ درجه<br>به صورت<br>خطی با<br>انحراف                          | از ۴۰- الی<br>+۴۰<br>سانتی متر<br>با انحراف                                | ۱۰                                     | ۱۵/۵  | ۳۲                                      | ۳۲  |

- [۱۴] Cook, Daniel A, Synthetic aperture sonar motion estimation and compensation, Georgia Institute of Technology, 2007.
- [۱۵] Roy Edgar Hansen, Introduction to Synthetic Aperture Sonar, University Campus STeP Ri, September, 2011.
- [۱۶] M. Brown, X. Zhang, and Y. Liu, "Autofocus Techniques for Motion-Induced Image Correction in Synthetic Aperture Sonar," IEEE Journal of Oceanic Engineering, vol. 44, no. 1, Jan. pp. 1-10. 2019.
- [۱۷] Roy Edgar Hansen, Introduction to Synthetic Aperture Sonar, University Campus STeP Ri, September, 2011
- Interferograms," in EUSAR 2021; 13th European Conference on Synthetic Aperture RadarVDE, pp. 1-4. , 2021
- [۱۲] J. Smith, X. Zhang, and Y. Liu, "Redundant Phase Center Motion Compensation for Synthetic Aperture Sonar," IEEE Journal of Oceanic Engineering, vol. 44, no. 1, Jan, pp. 1-10. . 2020
- [۱۳] R. E. Hansen, T. O. Saebo, K. Gade, and S. Chapman, "Signal processing for AUV based interferometric synthetic aperture sonar," in Oceans 2003. Celebrating the Past... Teaming Toward the Future (IEEE Cat. No. 03CH37492), vol. 5: IEEE, pp. 2438-2444., 2003.

|                                                                       |
|-----------------------------------------------------------------------|
| Sidescan Sonar <sup>۱</sup>                                           |
| Real Aperture Sonar <sup>۲</sup>                                      |
| Synthetic Aperture Sonar <sup>۳</sup>                                 |
| Synthetic Aperture Radar <sup>۴</sup>                                 |
| Rudandat Phase Center <sup>۵</sup>                                    |
| Resolution <sup>۶</sup>                                               |
| Inertial Navigation System <sup>۷</sup>                               |
| Doppler Velocity Logs <sup>۸</sup>                                    |
| Sway <sup>۹</sup>                                                     |
| Surge <sup>۱۰</sup>                                                   |
| Heave <sup>۱۱</sup>                                                   |
| Pitch <sup>۱۲</sup>                                                   |
| Yaw <sup>۱۳</sup>                                                     |
| Roll <sup>۱۴</sup>                                                    |
| Image Formation <sup>۱۵</sup>                                         |
| Raw Data <sup>۱۶</sup>                                                |
| yaw <sup>۱۷</sup>                                                     |
| sway <sup>۱۸</sup>                                                    |
| Peak to Side-lobe Ratio <sup>۱۹</sup>                                 |
| Incremental Representation for Image-Based Walkthroughs <sup>۲۰</sup> |