تصویرسازی در سونار روزنه مصنوعی معکوس چندپایه با استفاده از روش پستابش فیلترشده

جواد تقیزاده'، دانشجوی دکتری؛ سیدعلیرضا سیدین'، دانشیار

taghizadeh.j@gmail.com - گروه مهندسی برق – دانشگاه فردوسی مشهد – مشهد – ایران – seyedin@um.ac.ir - گروه مهندسی برق – دانشگاه فردوسی مشهد – مشهد – ایران – seyedin@um.ac.ir

چکیده: تصویربرداری از اهداف متحرک زیر آب با استفاده از سونار روزنه مصنوعی معکوس امکان پذیر است اما علاوه بر مشکلات کاربردی که در به کارگیری رادارهای روزنه مصنوعی معکوس موجود است، شرایط خاص محیط آب و انتشار امواج صوتی در آن، تصویربرداری را به امری دشوار و پرچالش تبدیل کرده است. در این مقاله روشی پیشنهاد می گردد که با استفاده از ایده سونار روزنه مصنوعی معکوس چند پایه و با فرض قرار گیری در آبهای کم عمق که منجر به ایجاد منابع مجازی می شود، می توان تصویر مناسبی از اهداف متحرک زیر آب ایجاد کرد. به منظ و دستیابی به الگوریتمی مناسب، روابط تصویر سازی با استفاده از روشهای قالب بندی قطبی و پس تابش فیلتر شده برای سونار روزنه مصنوعی معکوس چند پایه و استخراج خواهد شد. پس از بررسی و شبیه سازی این دو روش، نشان داده خواهد شد که الگوریتم تصویر سازی پس تابش فیلتر شده پیدی در شرایط در نظر گرفته شده با توجه به معیارهای کیفیت تصویر، دارای کارایی و عملکرد بهتری است و به فاصله هدف بستگی ندارد.

واژههای کلیدی: سونار روزنه مصنوعی معکوس (ISAS)، سونار روزنه مصنوعی معکوس چندپایه (MISAS)، الگوریتم قالببنـدی قطبـی، الگـوریتم یستابش فیلترشده.

Filtered Back Projection Imaging in Multistatic Inverse Synthetic Aperture Sonar

Javad Taghizadeh¹, PhD Student; Seyed Alireza Seyedin², Associate Professor

1- Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran, Email: taghizadeh.j@gmail.com

2- Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran, Email: seyedin@um.ac.ir

Abstract: Underwater target imaging is possible using inverse synthetic aperture sonar but there are some practical difficulties because of inverse synthetic aperture geometry and underwater acoustic conditions. This paper proposes Multistatic Inverse Synthetic Aperture Sonar (MISAS) in shallow water, which can create better images of underwater moving targets. For finding an appropriate algorithm, imaging equations are derived for MISAS using polar format and filtered back projection algorithms. After simulation of both methods, it is shown that proposed filtered back projection algorithm has better performance due to picture quality criteria and target distance independence.

Keywords: Inverse synthetic aperture sonar (ISAS), Multistatic inverse synthetic aperture sonar (MISAS), Polar format algorithm, Filtered back projection algorithm.

تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۳/۰۹/۰۹ و ۱۳۹۳/۱۲/۰۸ تاریخ اصلاح مقاله: ۱۳۹۳/۱۱/۰۵ و ۱۳۹۳/۱۲/۰۸ نام نویسنده مسئول: سیدعلیرضا سیدین نشانی نویسنده مسئول: ایران – مشهد – میدان آزادی – دانشگاه فردوسی مشهد – دانشکده مهندسی – گروه مهندسی برق.

۱ – مقدمه

پدیده تضعیف نور در زیر آب بهدلیل خاصیت جذب (که باعث از بین رفتن انرژی نور می شود) و پراکنش (که باعث تغییر مسیر جهت نور می شود) ایجاد می گردد و باعث می شود که تصاویر زیر آب دارای حداقل یکی از مشکلات محدودیت در فاصله و میدان دید، کنتراست پایین، نورپردازی غیر یکنواخت، کدری، ضعف درخشندگی، نقصان زیر آب و بهدلیل اندرکنش با مولکول های آب و سایر ذرات محلول در آب، فاصله انتشار و تشعشع در محیط زیر آب بهمیزان قابل توجهی نسبت به محیط هوا کاهش می یاب [۲]، لذا استفاده از تجهیزاتی امکان بهره گیری از امواج صوتی در زیر آب مناسب نیست. بهدلیل استفاده از سونار راهکار مناسبی برای این موضوع است و در سالهای الهما گرفته است، به ابزاری مناسب برای تصویرداری از در الهام گرفته است، به ابزاری مناسب برای تصویرداری از بستر دریا و اشیا زیر آب تبدیل شده است [۳].

برای تصویربرداری از اهداف متحرک می توان از ایده سونار روزنه مصنوعی معکوس (ISAS) بهره برد. در ISAS سونار ثابت و هدف در حرکت است و سونار، دادههای منتشره از هدف را در زوایای دید مختلف با حرکت هدف بهدست خواهد آورد. در هنگام حرکت هدف، زوایای دید هدف نسبت به خط دید سونار تغییر نموده و باعث شکل گیری تصویر ISAS خواهد شد. از این تنوع زاویهای در دادهها، برای جداسازی نقاط در راستای محور زاویهای (عمود بر برد) استفاده می شود. در حالی که مشابه SAR و SAS، رزولوشن مورد نیاز در راستای محور برد از پهنای باند فرکانسی مشخص سیگنال ارسالی تأمین می شود. با نوشتن روابط مربوط به حرکت چرخشی هدف (در حالت حرکت چرخشی مطلق همانند یک میز چرخان) و سیگنال ارسالی و دریافتی مشاهده می گردد رابطه مستقیمی بین حرکت چرخشی هـدف و راستای عمود بر برد تصویر بهدست آمده وجود دارد و هـر چـه مقـدار این زاویه چرخش (و یا بهعبارتی طول روزنه مصنوعی) بیشتر باشد، رزولوشن زاویهای (راستای عمود بر برد) بیشتر خواهد بود [۴]. البته در كاربردهاى واقعى، هدف ممكن است حركت انتقالى نيز داشته باشد یعنی مقدار برد هدف نیز در هنگام چرخش هـدف تغییـر نمایـد. ایـن حالت باعث جابجایی پراکندهسازها در راستای برد در هریک از مقاطع و منجر به محو شدن تصویر خواهد شد لذا این حرکت انتقالی باید بەنحو مناسبى جبرانسازى گردد.

در خصوص سونار روزنه مصنوعی معکوس (ISAS) تاکنون مقالات اندکی منتشر شده است. در اولین مقالهای که درباره ISAS در سال ۱۹۹۱ منتشر شده است، تکنیک تصویربرداری روزنه مصنوعی معکوس دوبعدی برای سیگنالهای صوتی بازگشتی از سازههای ساده درون آب به کار گرفته شده و نتایج آن برای دو نوع متفاوت هدف مورد بررسی قرار گرفته است [۵]. در [۱۰-۶] نیز که به زبان چینی منتشر شدهاند،

علی رغم وجود شباهتهای بسیار زیاد بین ISAR و ISAR تفاوتهای فراوانی نیز بین آنها وجود دارد که عامل اصلی عدم توسعه SAS و ISAS تاکنون به نسبت SAR و ISAR بوده است. با توجه به تفاوتهایی از قبیل نوع سیگنال ارسالی، محیط انتشار، سرعت انتشار، محدوده فرکانسی، فاصله و سرعت اهداف مدنظر، افتها و اختلالات ناشی از محیط، مشکلاتی به طور خاص برای ISAS وجود دارد که عبار تاند از:

- ممکن است برخی از مفروضات در نظر گرفته شده برای تشکیل
 تصویر در ISAR در ISAS صادق نباشد که از آن جمله می توان
 به فرض میدان دور بودن هدف نسبت به رادار [۱۵] اشاره کرد.
- همچون سایر سیستمهای سوناری، عوامـل مـرتبط بـا کانـال آب همچون عدم تجانس و ناپایداری کانـال صـوتی آب، امـواج دریـا، جریانهای آبی، جزر و مد باعث ایجاد خطا در فاز خواهد شد.
- مشابه سایر سیستمهای آکوستیک زیر آب، بهدلیل سرعت کم صوت در آب، فرکانسهای تکرار ارسال سیگنال صوتی و درنتیجه سرعت حرکت (حامل سونار یا هدف) نمیتواند زیاد باشد و این مسئله موضوع خطای فاز بهدلیل ناپایداری کانال یا حرکتهای ناخواسته را تشدید میکند.

با توجه به تمامی نکات فوق، تصویربرداری از اهداف متحرک در زیر آب با استفاده از فناوری سونار روزنـه مصـنوعی معکوس هنگامی محقق خواهد شد که مشکلات مورد اشاره بهنحو مقتضـی رفـع شـده باشد و از آنجا که تاکنون کمتر به این مقوله پرداختـه شـده اسـت، در بخش ۲ با در نظر گرفتن فرضیات مناسب، روشی پیشنهاد میشود کـه متاسب از اهداف متحرک زیـر آب ایجاد نمایـد. در بخـش ۳ پـس از مناسب از اهداف متحرک زیـر آب ایجاد نمایـد. در بخـش ۳ پـس از الگوریتم پس تابش برای ایجاد تصویر در روش پیشنهادی استخراج و در بخش ۴ تأثیر محیط دریا بر روی روابط بررسی میگردد. پس از انجـام شبیهسازیها در بخش ۵ و بررسی و تحلیل نتایج، کارایی الگوریتمهای تصویربرداری اشاره شده در بخش نتیجه گیری جمع.

۲- روش پیشنهادی

برخی از چالشها و مشکلات کاربردی مشترک برای استفاده از ISAS و ISAR، ناشی از ساختار روزنه مصنوعی معکوس عبارتاند از:

 برای ایجاد تصویر ISAS باید سرعت و جهت حرکت هدف دانسته فـرض شـود تـا تصویر ایجـاد گـردد [۴] لـذا هـدف بایـد رفتـار همکارانهای داشته باشد اما ایـن فـرض در دنیـای واقعـی همـواره شدنی نیست.

- در اهداف با رفتار غیر همکارانه، تصویر تشکیلی از هدف، تصویری دوبعدی از هدف سهبعدی بر روی صفحه انعکاس تصویر است. جهت این صفحه بستگی به مکان سونار نسبت به هدف و حرکات هدف دارد که در کنترل اپراتور نیست لذا تفسیر تصویر ISAS و شناسایی هدف را مشکل خواهد کرد [۱۶].
- در اهداف با رفتار غیر همکارانه، رزولوشن زاویهای (در راستای عمود بر برد) در تصویر ISAS مشخص نیست چون به بردار چرخش نسبی بین سونار و هدف بستگی دارد [۱۶].
- برای حذف حرکت انتقالی هدف و رسیدن به حرکت چرخشی مطلق برای ایجاد تصویر، باید هدف حرکات مانوردهنده نداشته باشد. برای اهداف مانوردهنده، محور چرخشی هدف نسبت به سونار متغیر با زمان است.
- از آنجا که باید زاویه هدف نسبت به سونار تغییر کند تا تصویر ایجاد گردد، تنها در برخی از هندسههای حرکتی این امر امکان پذیر است و در برخی از شرایط مانند حرکت مستقیم الخط هدف به سمت سونار (حرکت در راستای خط دید) کارایی ندارد.
- با توجه به رزولوشن تصویر، ابعاد هدف نباید از مقدار مشخصی بیشتر باشد در غیر این صورت تصویر هدف مبهم خواهد شد.

در راستای حل مشکلات و چالشهای ذکرشده، راه حلها و روشهای مختلفی برای رادار روزنه مصنوعی معکوس مانند استفاده از خاصیت تداخلسنجی [۱۷]، به کارگیری هندسه دوپایه [۱۸]، سیستمهای چندآنتنه [۲۱–۱۹] و چندورودی-چندخروجی [۲۲، ۲۲] چندپایه باید در طراحی ISAS نیز مدنظر قرار گیرد. از طرفی بخشی از مشکلات ذکرشده به ماهیت کانال آب و نحوه انتشار صوت در زیر آب و تفاوتهای ذاتی ISAR و ISAR مرتبط است و باید به طور خاص در طراحی ISAS مدنظر قرار گیرد. حال آن که در تحقیقات صورت گرفته تاکنون در خصوص ISAS تنها به حالت تک پایه توجه شده و تمامی تلاش صورت گرفته در راستای اثبات امکان پذیر بودن تشکیل تصویر و انتخاب مناسب ترین روش برای تصویر سازی بوده است.

در این بخش روشی پیشنهاد میشود که علاوه بر دارا بودن ساختار سونار روزنه مصنوعی معکوس و ضمن لحاظ کردن شرایط خاص زیر آب، از ساختار چندپایه برای غلبه بر چالشها و موانع کاربردی شدن طرح استفاده گردد. با استفاده از ساختار چندپایه، مشکلاتی از قبیل لزوم حرکت همکارانه هدف و مشکلات ناشی از رفتار غیر همکارانه هدف، محدودیتهای موجود در برخی از هندسههای حرکتی هدف مانند حرکت در مسیر خط دید و مشکلات مربوط به کمبود رزولوشن و کیفیت تصویر رفع خواهد شد. در ادامه کافی است با انتخاب روش تصویربرداری و با در نظر گرفتن محدودیتهای کانال آب، الگوریتم و سازیوی تصویربرداری مناسب استخراج گردد.

۲-۲- نحوه انتشار امواج صوتی در آب

انتشار امواج صوت در دریا متأثر از پدیدههای گوناگونی است که باعـث پیچیدگی این امر گشته است. سرعت انتشار صـوت تـابع پارامترهـایی

مانند تغییرات دما، شوری و عمق آب است. راستای پرتـو مـوج در اثـر تغییر سرعت صوت، تغییر می کند و بر اساس قانون اسنل باعث شکست یا انکسار موج می گردد. در هنگام انتشار یک موج صوتی، به دو دلیل گسترش جبهه موج و پدیده جذب، موج تضعیف می شود که در آب تابع پارامترهایی چون شوری، دما و فرکانس است. با توجه به قانون اسنل در خصوص خمیدگی پرتوها، پرتو امواج صوتی به طرف ناحیه با سرعت کمتر خم می شود که به این پدیده انکسار گویند. علاوه بر این امواج پس از برخورد با سطح آب یا کف دریا انعکاس می یابند. برای بروز پدیده انکسار باید در هنگام انتشار، تغییر در سرعت صوت رخ دهد که معمولاً در آبهای عمیق اتفاق میافتد. از طرف دیگر پدیده انعکاس معمولاً در آبهای کمعمق رخ میدهد [۲۴]. منظور از آبهای کم عمق، عمقی است که در آن صوت تا فاصلهای از سطح آب و کف دریا مکرراً منعکس شود. این موضوع بستگی به شرایط صوتی سطح آب و کف دریا دارد لذا نمی توان تعریف دقیقی برای آب کم عمق ارائه نمود بلکه از لحاظ صوتی بهجایی کمعمق گفته میشود که فاصله انتشار صوت با انعکاس مکرر از سطح و کف حداقل بهاندازه چند برابر عمق آب باشد. از لحاظ جغرافیایی، نواحی بندری و نزدیک به ساحل با عمق کمتر از ۱۸۰ متر می توانند مناطق کمعمق تلقی شوند. در آبهای کمعمق، کانال صوتی بین سطح آب و کف دریا ایجاد می شود که صوت در بین این دو محدوده به دام می افتد [۲۵].

تمامی مدلهای انتشار موج مبتنی بر معادله موج می باشند. این معادله رابطه بین مشتقات مرتبه دوم زمانی و مکانی فشار صوت است. انتشار موج صوتی در شرایط مختلف با دو مدل انتشار پرتو و انتشار موج قابل توجیه و مدلسازی است. مدلسازی مبتنی بر تئوری پرتو دارای حجم محاسبات گمتر بوده و در فرکانسهای بالا پاسخ نسبتاً مناسبی می دهد. روشهای مدلسازی مبتنی بر تئوری موج یا مدهای نرمال با اعمال شرایط مرزی و میانی دارای پاسخ کامل برای معادلـه موج هستند ولی با حجم پردازش زیاد، تفسیر پاسخهای آن نیز مشکل است. انتشار امواج صوتی در دریا را در فرکانسهای بالاتر از kHz می توان به صورت پرتو یا خطی فرض کرد [۲۴]. همچنین با بررسی دو روش انتشار، روش انتشار به صورت پرتو در فواصل کوتاه، برای استفاده می می ماسب است. فاصله مرزی r جهت سهولت استفاده بین این دو روش

$$r = \frac{H^2}{A} \tag{1}$$

که در آن، H عمق آب و A طول موج است. مثلاً برای فر کانس ۳۰kHz و عمق آب ۱۰۰ متر، r برابر ۲۰۰ کیلومتر خواهد شد. این مقدار برای فرکانس ۵kHz با همان عمق برابر ۳۳ کیلومتر است. با توجه به عمق به کارگیری و فرکانس های معمول در ISAS، فرض استفاده از روش انتشار به صورت پرتو در آب های کم عمق معقول به نظر می رسد لذا در این مقاله از این روش استفاده خواهیم کرد.

در تئوری انتشار بهصورت پرتو، میدان صوتی بهصورت مجموعـهای از پرتوهای صوتی نمایش داده میشود و هریک از آنها از منبع صـوت یا تصویر آن نسبت به سطح آب یا کف دریا ساطع میشوند. در شکل ۱ یک منبع صوتی در نقطه O و یک گیرنـده در نقطـه P در یـک کانـال کمعمق قرار گرفتهاند. تصویر ۱۰۵ از منبع نسبت به سطح آب با شـدت سیگنال منبع و شیفت فاز ۱۸۰ درجه بهعنوان نمایانگر انعکاس سـطح آب اضافه شده است. برای نشان دادن انعکاس بستر دریـا زوج تصاویر آب، تصاویر منابع ۱۵۰ و ۱۵۰ توجه به قابلیـت انعکاس سـطح آب، تصاویر منابع ۱۵۰ و ۱۵۱، تصاویر ۱۱۵ و ۱۵۱ ضافه شدهاند. تصاویر آب، تصاویر منابع ۱۵۰ و ۱۵۱، تصاویر ۱۵۱ و ۱۵۱ ضافه شدهاند. تصاویر میتواند تا بینهایت ادامه داشته باشد اما از تصاویر مرتبه بالاتر بهدلیـل میتواند تا بینهایت ادامه داشته باشد اما از تصاویر مرتبه بالاتر بهدلیـل تخیف ناشی از انعکاسهای متوالی میتوان صوفنظر کرد.

ISAS روش پیشنهادی برای چندپایه شدن ۱۹۹۲ میرای جندپایه شدن

با توجه به مطالب فوق و با فرض قرار گیری در شرایط آب کمعمق، اگـر فرض کنیم یک ISAS در عمق مناسبی از آب ثابت شده باشد، بهدلیل ایجاد تصاویری از این منبع صوتی (ISAS مورد نظر) نسبت به سطح آب و بستر دریا، می توان تصور کرد که چندین ISAS در آن محدوده قرار دارند و بهعبارتدیگر ISAS چندپایه شکل خواهد گرفت. حال در صورت وجود هدفی متحرک، هریک از این ISAS ها تصویری از آن هدف ایجاد می کنند که با تلفیق مناسب این تصاویر و با توجه به مبانی سیستمهای چندپایه، تصویری باکیفیتتر از ISAS تک پایه ایجاد خواهد شد. به طور مثال در شکل ۲ فرض شده است که چند ISAS تکیایه در محدودهای از آبهای کمعمق نصب شدهاند و تصاویر ایجادشده از این منابع صوتی نسبت به سطح آب و بستر دریا نشان داده شده است. در این شکل که تصویر صحنه قرار گیری سونارها و هدف بر روی صفحه دوبعدی نشان داده شده است، ISAS چندپایهای ایجاد گردیده است که پوشش زاویهای بیشتری ایجاد نموده است. درواقع این ISAS چندپایه دارای n فرستنده و گیرنده واقعی و 2n فرستنده مجازی خواهد بود. در شکل ۲ درصورتی که تعداد ISAS های تکپایه افزایش یابد و ISAS چندپایه به صورت واقعی شکل گیرد، بازهم با استفاده از منابع مجازی شکل گرفته در بالای سطح آب و زیـر بستر دریا میتوان به ISAS چندپایه کاملتری دست یافت که با افزایش تعداد فرستندهها، منطقه تحت نظر را تحت پوشش زاویهای و مکانی بهتری قرار خواهد داد و چندگانگی مکانی حاصل خواهد شد.

۳- روابط تصویرسازی

برای نوشتن روابط تصویرسازی و بهدست آوردن الگوریتم آن، در ابتـدا مسئله فوق را بهصورت دوپایه مشابه شکل ۳ در نظر میگیریم. در ایـن شکل ISAS مدنظر در مکان ۱۵۸ ISAS مجازی ناشی از تصویر نسـبت به سطح آب در مکان ۱۱۸ و هدف در مکان z قرار گرفته است.







شکل ۲: ایده پیشنهادی برای سونار روزنه مصنوعی معکوس چندپایه (MISAS) با منابع مجازی

با فرض همهجهته بودن فرستنده و گیرنده و با توجه به روابط انتشار امواج، سیگنال دریافتی بازگشتی از هدف توسط ISAS مجازی در حوزه فرکانس را میتوان بهصورت رابطه زیر نوشت [۲۶]:

$$S(f) = P(f) \int_{\mathbb{R}^3} V(z) \frac{e^{-ik(|z-x_{10}|+|z-x_{11}|)}}{(4\pi)^2 |z-x_{10}||z-x_{11}|} dz$$
(Y)

که در آن، (*P*(f طیف فرکانسـی سـیگنال ارسـالی، (*V*(z تـابع انعکـاس هدف، k=2*πf*/*c و c* سرعت انتشار صوت در آب است.

از آنجا که در ISAS فرستنده و گیرنده ثابت است و اکوهای بازگشتی از هدف در حال چرخش باعث ایجاد تصویر می گردد، اگر مطابق شکل ۴، هدف حول محور X₃ بهاندازه φ و در خلاف جهت عقربههای ساعت بچرخد، ماتریس دوران ($P(\varphi)$ را می توان به صورت رابطه زیر نوشت:

$$R(\varphi) = \begin{bmatrix} \cos\varphi & -\sin\varphi & 0\\ \sin\varphi & \cos\varphi & 0\\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$
(7)





در ساختارهای روزنه مصنوعی که از فشردهسازی پالس برای ارسال و دریافت سیگنال استفاده میشود، میتوان با به کارگیری فیلتر تطبیقی، پروفایل برد را استخراج نمود. اگر مشخصه فرکانسی فیلتر تطبیقی را +(f)=P(f) در نظر بگیریم که در آن +(f) مزدوج مختلط (f) است، دادههای ذخیرهشده توسط ISAS مجازی را میتوان بهصورت رابطه زیر نشان داد:

$$D_{1}(f) = H(f)S(f)$$

$$= P(f)^{*}S(f) = |P(f)|^{2} \int_{\mathbb{R}^{3}} \frac{q(R^{-1}z)e^{-ik(|z-x_{10}|+|z-x_{11}|)}}{(4\pi)^{2}|z-x_{10}||z-x_{11}|} dz$$
(7)

اگر سیگنال ارسالی توسط ISAS پالس چیـرپ LFM^۲ در نظـر گرفتـه شود، داریم:

$$p(t) = rect\left(\frac{t}{\tau}\right)e^{i\left(\pi Kt^{2} + 2\pi f_{0}t\right)}$$
(Y)

rect(.) که در آن، au طول پالس، K نرخ چیرپ، f_0 فرکانس حامل و (.) rect تابع پنجره مستطیلی است و برای Xهای بزرگ خواهیم داشت [79]:

$$P(f) \approx \sqrt{\frac{1}{K}} \operatorname{rect}\left(\frac{f - f_0}{K\tau}\right) e^{-\left[\pi \frac{(f - f_0)^2}{K} + \frac{\pi}{4}\right]} \tag{A}$$

درنتيجه داريم:

$$\left|P(f)\right|^{2} = \frac{1}{K}rect\left(\frac{f-f_{0}}{K\tau}\right)$$
(9)

پس رابطه (۶) به صورت زیر قابل بازنویسی است:

$$D_{1}(f) = \frac{1}{K} \operatorname{rect}\left(\frac{f-f_{0}}{K\tau}\right)$$

$$\cdot \int_{\mathbb{R}^{3}} q\left(R^{-1}z\right) \frac{e^{-ik(|z-x_{10}|+|z-x_{11}|)}}{(4\pi)^{2}|z-x_{10}||z-x_{11}|} d$$
 (1.)

بهطور مشابه دادههای دریافتی ذخیرهشده توسط ISAS اصلی بهصورت رابطه زیر خواهد شد:

$$D_{2}(f) = \frac{1}{K} \operatorname{rect}\left(\frac{f - f_{0}}{K\tau}\right) \\ \cdot \int_{\mathbb{R}^{3}} \frac{q(R^{-1}z)e^{-i2k(|z-x_{10}|)}}{(4\pi)^{2}|z - x_{10}|^{2}} dz$$
(11)

1-1 الگوريتم قالببندى قطبى⁷

در این بخش الگوریتم تصویرسازی قالببندی قطبی مبتنی بر تئوری تفرق فوریه[،] که دادههای اندازه گیری شده را به تبدیل فوریه تابع انعکاس هدف مرتبط می کند، بررسی می شود. این تئوری بر این فرض استوار است که موج منتشر شده کروی را می توان در شرایط میدان دور به صورت موج صفحهای در نظر گرفت.

مطابق این تئوری، طیف میدان پراکندهشده مستقیم اندازه گیری شده در راستای خط موازی با شکل موج تابیدهشده، متناسب با تبدیل فوریه دوبعدی تابع انعکاس هدف در راستای یک کمان دایروی در حوزه فرکانس مشابه شکل ۵ است [۲۷].

با در نظر گرفتن ($z - \widehat{x_{10}} - \widehat{x_{10}} - \widehat{x_{10}} - \widehat{x_{10}}$) که همان فرض میدان دور است و در آن $\widehat{x_0}$ بردار یکه در راستای موج منتشره از 10 است، میتوان رابطه تقریبی زیر را نوشت [۲۸]:

$$\frac{e^{-i2k||z-x_{10}||}}{(4\pi)^{2}|z-x_{10}|^{2}} \approx \frac{e^{-i2k|x_{10}|}}{(4\pi)^{2}|x_{10}|^{2}}e^{i2k\hat{x_{10}}\cdot z}$$
(17)

بهطور مشابه خواهیم داشت:

$$\frac{e^{-ik(|z-x_{10}|+|z-x_{11}|)}}{(4\pi)^{2}|z-x_{10}||z-x_{11}|} \approx \frac{e^{-ik(|x_{10}|+|x_{11}|)}}{(4\pi)^{2}|x_{10}||x_{11}|} e^{ik(\widehat{x_{10}z}+x_{11}z)}$$
(17)

در این شرایط روابط (۱۰) و (۱۱) بهصورت روابط (۱۴) و (۱۵) تبدیل خواهند شد.

> www.SID.ir Serial no. 75



شکل ۶: نمایش هندسی تصویربرداری به روش پستابش [۲۹]

با توجه به ایـنکـه عبـارت $\left(\frac{f-f_0}{K\tau}\right)$ در روابـط (۱۱) و (۱۲) فقط محدوده فرکانس کاری را تعیـین مـیکنـد و در محاسـبات قابـل حذف است و با توجه به مثبت بودن عبارات $|z-x_{10}| = |z-x_{11}|$ بهدلیـل ماهیت فاصله، با تعریف ضرایب:

$$A_{1} = K (4\pi)^{2} |z - x_{10}| |z - x_{11}|$$
 (1Y)

$$A_{2} = K(4\pi)^{2} |z - x_{0}|^{2}$$

$$(1\lambda)$$

$$A_{l}e^{-\frac{2\pi f}{c}(x_{l0}+x_{l1})}D_{l} = \mathcal{F}\left\{q\left(R^{-l}z\right)\right\} = Q_{l}(f,\phi)$$
(19)

$$A_{2}e^{-i\frac{2\pi f}{c}(2x_{10})}D_{2} = \mathcal{F}\left\{q\left(R^{-1}z\right)\right\} = Q_{2}(f,\phi)$$
(Y •)

اگر بخواهیم از روش پستابش فیلترشده برای تصویرسازی سیگنالهای دریافتی مندرج در روابط (۱۰) و (۱۱) استفاده کنیم، پارامتر μ در رابطه (۱۶) معادل *I* (تصویر مدنظر) و پارامترهای *X* و s در رابطه (۱۶) متناظر با $k/2\pi$ (معادل f/c) و z در روابط (۱۰) و (۱۱) خواهند بود. همچنین با توجه به تعریف I و Q در روابط (۱۹) و (۱۹)، تصویر *I* بر اساس رابطه (۱۶) برای ISAS اصلی و مجازی بهترتیب بهصورت روابط (۲۱) و (۲۲) قابل ایجاد خواهد بود.

$$I_{1}(z) = \int_{0-\infty}^{\pi} |f| Q_{1}(f,\phi) e^{i\frac{2\pi f}{c}(2z)} df d\phi$$
(Y1)

$$I_2(z) = \iint_{0-\infty}^{\pi} |f| \mathcal{Q}_2(f,\phi) e^{\frac{2\pi f}{c}(2z)} df d\phi$$
(YY)

با استفاده از روابط (۲۱) و (۲۲)، تصویر
$$q\left(R^{-1}z
ight)$$
 کـه چگالی
براکندگی هدف است، ایحاد می گردد.

$$f_{j} = f_{min} + (j-1)\Delta f$$
 $j = 1, 2, ..., N_{f}$ (YY)

$$\phi_k = \phi_{min} + (k-1)\Delta\phi \quad k = 1, 2, ..., N_p$$
 (YF)

که در آن، N_f و N_f بهترتیب تعداد نمونههای فرکانسی و پالسی سونار هستند. با در نظر گرفتن:

$$H_{1}(j,k) = f_{j}D_{1}(j,k)e^{-\frac{i2\pi f_{j}}{c}(x_{10}+x_{11})}$$
(Y Δ)

و

$$D_{1}(f) = (4\pi)^{2} |x_{10}| |x_{11}| e^{-ik \{|x_{10}|+|x_{11}|\}}$$

$$\cdot \frac{1}{K} rect \left(\frac{f-f_{0}}{K\tau}\right) \mathcal{F}_{\{q\}} \left(-2kR\widehat{x_{10}}, -2kR\widehat{x_{11}}\right)$$
(14)

$$D_{2}(f) = (4\pi)^{2} |x_{10}|^{2} e^{-i2k|x_{10}|} \\ \cdot \frac{1}{K} rect\left(\frac{f-f_{0}}{K\tau}\right) \mathcal{F}_{[q]}\left(-2k\widehat{Rx_{10}}\right)$$
(1Δ)

در این روابط، ضرایب مازاد ایجادشده نسبت به فیلتر تطبیقی ایده آل در این روابط، ضرایب مازاد ایجادشده نسبت به فیلتر تطبیقی ایده آل شامل عبارات $(4\pi)^2 |x_{10}|^2 = (4\pi)^2 |x_{11}|_{11}|_{11}|_{11}|_{11}|_{11}|_{11}|_{11}|_{11}|_{11}|_{11}|_{11}|_{11}|_{11}|_{11}|_{11}|_{11}|_{11}|_{11}|_{11}|_{11}|_{11}|_{11}|_{11}|_{11}|_{11}|_{11}|_{11}|_{11}|_{11}|_{11}|_{11}|_{11}|_{11}|_{11}|_{11}|_{11}|_{11}|_{11}|_{11}|_{11}|_{11}|_{11}|_{11}|_{11}|_{11}|_{11}|_{11}|_{11}|_{11}|_{11}|_{11}|_{11}|_{11}|_{11}|_{11}|_{11}|_{11}|_{11}|_{11}|_{11}|_{11}|_{11}|_{11}|_{11}|_{11}|_{11}|_{11}|_{11}|_{11}|_{11}|_{11}|_{11}|_{11}|_{11}|_{11}|_{11}|_{11}|_{11}|_{11}|_{11}|_{11}|_{11}|_{11}|_{11}|_{11}|_{11}|_{11}|_{11}|_{11}|_{11}|_{11}|_{11}|_{11}|_{11}|_{11}|_{11}|_{11}|_{11}|_{11}|_{11}|_{11}|_{11}|_{11}|_{11}|_{11}|_{11}|_{11}|_{11}|_{11}|_{11}|_{11}|_{11}|_{11}|_{11}|_{11}|_{11}|_{11}|_{11}|_{11}|_{11}|_{11}|_{11}|_{11}|_{11}|_{11}|_{11}|_{11}|_{11}|_{11}|_{11}|_{11}|_{11}|_{11}|_{11}|_{11}|_{11}|_{11}|_{11}|_{11}|_{11}|_{11}|_{11}|_{11}|_{11}|_{11}|_{11}|_{11}|_{11}|_{11}|_{11}|_{11}|_{11}|_{11}|_{11}|_{11}|_{11}|_{11}|_{11}|_{11}|_{11}|_{11}|_{11}|_{11}|_{11}|_{11}|_{11}|_{11}|_{11}|_{11}|_{11}|_{11}|_{11}|_{11}|_{11}|_{11}|_{11}|_{11}|_{11}|_{11}|_{11}|_{11}|_{11}|_{11}|_{11}|_{11}|_{11}|_{11}|_{11}|_{11}|_{11}|_{11}|_{11}|_{11}|_{11}|_{11}|_{11}|_{11}|_{11}|_{11}|_{11}|_{11}|_{11}|_{11}|_{11}|_{11}|_{11}|_{11}|_{11}|_{11}|_{11}|_{11}|_{11}|_{11}|_{11}|_{11}|_{11}|_{11}|_{11}|_{11}|_{11}|_{11}|_{11}|_{11}|_{11}|_{11}|_{11}|_{11}|_{11}|_{11}|_{11}|_{11}|_{11}|_{11}|_{11}|_{11}|_{11}|_{11}|_{11}|_{11}|_{11}|_{11}|_{11}|_{11}|_{11}|_{11}|_{11}|_{11}|_{11}|_{11}|_{11}|_{11}|_{11}|_{11}|_{11}|_{11}|_{11}|_{11}|_{11}|_{11}|_{11}|_{11}|_{11}|_{11}|_{11}|_{11}|_{11}|_{11}|_{11}|_{11}|_{11}|_{11}|_{11}|_{11}|_{11}|_{11}|_{11}|_{11}|_{11}|_{11}|_{11}|_{11}|_{11}|_{11}|_{11}|_{11}|_{11}|_{11}|_{11}|_{11}|_{11}|_{11}|_{11}|_{11}|_{11}|_{11}|_{11}|_{11}|_{11}|_{11}|_{11}|_{11}|_{11}|_{11}|_{11}|_{11}|_{11}|_{11}|_{11}|_{11}|_{11}|_{11}|_{$

درنتیجه می توان الگوریتم قالببندی قطبی را در گامهای زیر خلاصه نمود: ۱) نمونهبرداری از سیگنالهای دریافتی در بازه فرکانسی تعریفشده ۲) اعمال روشهای مناسب جبران سازی حرکت انتقالی ۳) ایجاد مجموعه پروفایل برد ۹) درونیابی و تبدیل پروفایلهای برد از حالت قطبی به حالت مستطیلی

۵) اعمال تبدیل فوریه معکوس برای هر پروفایل برد

۲-۳- الگوريتم پستابش

الگوریتم پس تابش روشی مصطلح در ایجاد تصاویر رادارهای روزنه مصنوعی است که از اصول تصویربرداری به روش توموگرافی محاسبه شده و تبدیل رادون استفاده می کند [۲۷].

الگوريتم پستابش فيلترشده

رابطه اصلی این روش که تصویر جسم مورد نظر را مشابه شکل ۶، ایجاد میکند، بهصورت رابطه (۱۶) است [۲۹]:

$$\mu(x,y) = \int_{0}^{\pi} \int_{0}^{\infty} |K| G(K,\phi) e^{i2\pi Ks} dK d\phi$$
(17)

در این رابطـه ((x,y) تصـویر جسـم مـورد نظـر بـهدسـتآمـده از تصویربرداری بـه روش تومـوگرافی محاسـبه شـده و بـا تبـدیل رادون، (ϕ) $s = xcos(\phi) + ysin(\phi)$ تبـدیل فوریـه ($g(s,\phi)$ نسـبت بـه s و $g(s,\phi)$ تابش انجامشده با بردار s و زاویه ϕ در راستای خط L است.



شکل ۵: نمایش هندسی تئوری تفرق فوریه [۲۷]

$$H_{2}(j,k) = f_{j}D_{2}(j,k)e^{-\frac{i2\pi f_{j}}{c}(2x_{0})}$$
(Y9)

میتوانیم روابط ایجاد تصویر را به شکل رابطه زیر پیادهسازی کنیم:

$$I_{1}(z) = \frac{1}{N_{p}N_{f}} \sum_{k=1}^{N_{p}} A_{1}(k) e^{i\frac{4\pi f_{min}(z(k))}{c}} \cdot \sum_{j=1}^{N_{f}} H_{1}(j,k) e^{i\frac{4\pi \Delta f}{c}(z(k))}$$

$$= \frac{1}{N_{p}} (\sum_{k=1}^{N_{p}} A_{1}(k) e^{i\frac{4\pi f_{min}(z(k))}{c}}) \cdot IFFT_{N_{f}} \{H_{1}(k,z)\}$$
(YY)

بهصورت مشابه داريم:

$$I_{2}(z) = \frac{1}{N_{p}} \left(\sum_{k=1}^{N_{p}} A_{2}(k) e^{i\frac{4\pi f_{min}(z(k))}{c}} \right) \cdot IFFT_{N_{f}} \left\{ H_{2}(k,z) \right\}$$
(YA)

درنتیجه میتوان الگوریتم پـستابش فیلترشـده را در گـامهـای زیـر خلاصه نمود:

۲- ایجاد تصویر نهایی با در نظر گرفتن تمامی پالسها

۳-۳- تعمیم به حالت چندپایه

در بخشهای قبل روابط تصویرسازی با الگوریتمهای قالببندی قطبی و پستابش برای ISAS اصلی و مجازی بهدست آمد. درواقع روابط فوق، تصویر ایجادی توسط ISAS اصلی و مجازی را بهصورت جداگانه مدنظر قرار میدهد و تصویر نهایی باید از ادغام این دو تصویر بهدست آید. در حالت چندپایه نیز میتوان مشابه روابط بهدست آمده، تصویر ایجادی توسط هریک از ISASهای اصلی یا مجازی را بهدست آورد و سپس با روشی مناسب اقدام به ادغام این تصاویر باهم و تشکیل تصویر نهایی نمود.

بر اساس قضیه معادلسازی دوپایه با تـکـپایـه (MBET^V) و شـکل ۳، سطح مقطع پراکندگی هدف در حالت دوپایه معادل با سطح مقطـع پراکندگی اندازهگیری شده در نیمساز زاویه بین تـکـپایـههـا بـا رابطـه (۲۹) است [۳۰].

$$\sigma_{B}(\theta = \beta, f) = \sigma_{M}(\theta = \frac{\beta}{2}, fsec\left(\frac{\beta}{2}\right))$$
(Y9)

که در آن، σ_B سطح مقطع پراکندگی دوپایه، m سطح مقطع پراکندگی تک پایه، θ جهت قرار گیری گیرنده، β زاویه دوپایه و f فرکانس کاری است. با استفاده از این قضیه و با فرض کوچک بودن β میتوان تصویر ناشی از ادغام تصاویر ایجادی در حالت دوپایه را بهدست آورد. برای حالت چندپایه نیز میتوان با استفاده از همین خاصیت، تصویر نهایی را

با در نظر گرفتن دوبه و تصاویر به دست آورد که در این مقاله از این روش استفاده شده است.



شکل ۷: ساختار فرض شده برای انتشار امواج در آب کمعمق [۳۱]

اگر فرض کنیم ISAS مدنظر مشابه شکل ۷ در کانالی کمعمق با عمق *D* واقع شده باشد و ساختار انتشار امواج در این کانال به گونهای باشد که سه ISAS مجازی ایجاد شده باشد، تصاویر ناشی از ISAS-1 واقع در مکان (*s*,2)*x* و ISAS مجازی-۱۱ واقع در مکان ISAS-1 واقع در مکان (*s*,2) و (۲۱) بهدست میآیند و تصویر معادل دوپایه این دو مشابه شکل ۳ در مکان *x*_{B1} بهصورت رابطه (۳۰)

$$I_{B1}(z) = \frac{1}{N_p} \left(\sum_{k=1}^{N_p} A_{B1}(k) e^{i\frac{4\pi f_{BB1}}{c}(z(k))} \right) \cdot IFFT_{N_f} \left\{ H_{B1}(k,z) \right\}$$

 $(\mathbf{\tilde{v}})$

(۳۲)

$$H_{B1}(j,k) = f_j D_{B1}(j,k) e^{-i\frac{2\pi f_j}{c}(2x_{B1})}$$

$$A_{B1} = K (4\pi)^2 |z - x_{B1}|^2$$

$$D_{B1}(f) = \frac{1}{K} rect \left(\frac{f - f_0}{K\tau}\right) \int_{\mathbb{R}^3} q(R^{-1}z) \frac{e^{-i2k(|z - x_{B1}|)}}{(4\pi)^2 |z - x_{B1}|^2} dz$$
(YY)

تصویر معادل ISAS سهپایه مستقر در مکان xB2 ناشی از ISAS دوپایه واقع در مکان ISAS و ISAS مجازی-۱۲ واقع در مکان 2x1 (0,2*D*-2) نیز MISAS به روش مشابه محاسبه خواهد شد. در ادامه تصویر معادل ISAS م مدنظر از محاسبه تصویر ناشی از ISAS سهپایه مستقر در xB2 و ISAS مجازی-۱۳ مستقر در مکان x13 (0,2*D*+2) بهدست خواهد آمد.

درصورتی که مشابه شکل ۲ علاوه بر ISAS، ISAS، اهای دیگری نیز مانند ISAS، ISAS-3، ... و ISAS-۱ در محدوده مورد نظر قرار داشته باشند، می توان به همین روش تصویر هریک را استخراج نمود و سپس با انواع روشهای تلفیق تصاویر، به تصویر کامل تری از هدف مورد نظر دست یافت.

۴- تأثیر محیط دریا بر روابط تصویرسازی

امواج آکوستیکی به هنگام انتشار در کانال زیر آب به دلایل مختلفی دچار تضعیف و افت خواهند شد که در ادامه به بررسی تأثیر آنها بر محاسبات پرداخته میشود. سرعت صوت در زیر آب، شرایط سطح آب و بستر دریا نیز از دیگر عوامل مؤثر در تصویرسازی سونار هستند که بهطور خلاصه بررسی میشوند.

۴-۱- افت انتشار

به هنگام انتشار امواج آکوستیکی در آب یکی از مهم ترین پدیدههای مؤثر، افت ناشی از انتشار هندسی امواج در آب است. این افت در آبهای عمیق بهصورت کروی و در آبهای کمعمق بهصورت استوانهای است. در افت کروی، تضعیف سیگنال متناسب با عکس مجذور فاصله از منبع صوت و در افت استوانهای متناسب با عکس فاصله بهصورت رابطه (۳۴) خواهد بود [۲۴].

 $L_s = r^m$ (۳۴) که در آن، r فاصله از منبع صوت و m در افت کروی برابـر ۲ و در افـت استوانهای برابر ۱ است.

۲-۴- افت جذبی

در هنگام انتشار امواج در آب، بخشی از انرژی صوت جذب آب می شود که به فرکانس موج و مشخصات محیط انتشار مانند چسبندگی آب خالص، مقدار سولفات منیزیم و اسید بوریک موجود در آب، بستگی دارد. برای محاسبه این افت می توان از مدل کامل و دقیق فرانسوا-گریسون^ استفاده کرد که مشتمل بر سه جمله است که هریکمیزان تأثیر اسید بوریک، سولفات منیزیم و آب خالص را نشان می دهد:

$$\alpha = A_1 P_1 \frac{f_1 f}{f_1^2 + f^2} + A_2 P_2 \frac{f_2 f}{f_2^2 + f^2} + A_3 P_3 f^2$$
(°\Delta)

kHz و f فرکانس برحسب dB/km و f فرکانس برحسب kHz است. سایر ضرایب عباراتی است که به عمق، میزان شوری و دمای آب بستگی دارد و جزئیات آن در [۳۱] آمده است. در این مقاله برای سادگی در محاسبات از مدل تورپ^۹ که در فرکانسهای کمتر از ۵۰kHz ۵۰ مابل قبول است، استفاده شده است [۳۲].

۴-۳- نویز محیط

در سیستمهای آکوستیکی زیر آب، علاوه بر افتهای ذکرشده باید نویز نیز در محاسبات در نظر گرفته شود. منابع نویز ممکن است موارد مختلفی همچون جریانهای آبی، جانداران زیر آب، امواج، کشتیهای عبوری، باد، باران و نویزهای ایجادی توسط انسان باشد. ایـن نویزها را میتوان به دو دسته نویزهای محیطی و نویزهای وابسته بـه مکان دستهبندی کرد. نویزهای محیطی برخلاف نویزهای وابسته بـه مکان همواره وجود دارند و دارای طیف پیوسته و گاوسی (غیر سفید و وابسته به فرکانس) هستند. نویزهای وابسته بـه مکان اغلب دارای

مؤلفه های غیر گاوسی هستند و ماهیتشان بستگی به منبع مولد آن ها دارد. اصلی ترین عوامل تشکیل دهنده نویز محیطی، باد، نویز حرارتی، جریان های آبی و کشتی های مروری هستند که روابط مربوط به محاسبات آن ها در [۲۴] آمده است.

۴-۴- سرعت صوت

سرعت انتشار امواج آکوستیک به مشخصههای محیط انتشار از جمله چگالی و قابلیت فشردهسازی بستگی دارد. سرعت انتشار صوت در محیط دریا تقریباً برابر ۱۵۰۰ متر بر ثانیه (معمولاً بین ۱۴۵۰ تا ۱۵۵۰متر بر ثانیه و وابسته به فشار هیدرواستاتیک یا عمق، میزان شوری و دمای آب) است. روابط تقریبی و تجربی متعددی برای محاسبه سرعت صوت در زیر آب موجود است و در این مقاله از رابطه نسبتاً ساده و دقیق لروی^{۱۰} که در سال ۲۰۰۸ ارائه شده، استفاده شده است [۳۳].

۴-۵- سطح آب و بستر دریا

سطح آب و بستر دریا میتوانند هم به عنوان منعکس کننده و هم بهعنوان پراکنده کننده امواج صوتی عمل نمایند. میزان انعکاس یا پراکنش سطح آب به ارتفاع موج، فرکانس صوت و زاویه برخورد موج با صلاح بستگی دارد ولی بهطور کلی و در شرایط مشابه، هر چه سطح آب صاف تر باشد میزان انعکاس بیشتر و میزان پراکنش کمتر خواهد بود. بستر دریا نیز تأثیری مشابه سطح آب دارد اما بهدلیل وجود تنوع و شرایط مشابه، هر چه بستر دریا صاف تر و سخت ر باشد، میزان انعکاس بیشتر خواهد بود. با در نظر گرفتن زوایای انتشار صوت و شرایط سطح آب از جمله ارتفاع موج و همچنین جنس بستر دریا، میزان افت ناشی از جذب و پراکنش صوت نیز قابل محاسبه است [13].

۵- شبیهسازی

بهمنظور ارزیابی و مقایسه الگوریتمهای تصویربرداری طرحشده، ISAS در یک کانال کمعمق و در حالت مشابه شکل ۷ شبیهسازی شده است. ISAS تکپایه (فرستنده و گیرنده) در عمق ۵۰ متر ثابت و مرکز هدف در عمق ۲۵ متری فرض شده است. همچنین فرض شده است که با توجه به ماهیت اهداف نوعی زیرآبی، حرکت هدف خطی است و مانوردهنده نیست لذا با فرض انجام پیش پردازشهای لازم بهمنظور جبرانسازی حرکات انتقالی، هدف دارای حرکت چرخشی مطلق است. در شبیهسازی اول فقط یک نقطه از هدف و در شبیهسازی دوم یک زیردریایی بهعنوان هدف به صورت نقطهای و به شکل ۸ در نظر گرفته شده است.



شکل ۸: مدل در نظر گرفتهشده برای زیردریایی بهعنوان هدف

در شبیه سازی کانال، افتهای انتشار و جذبی در نظر گرفته شده و از نویز محیط به دلیل وابستگی به شرایط مکانی و زمانی صرفنظر شده است. همچنین سطح دریا آرام و بستر دریا سخت و صاف در نظر گرفته شده و از افتهای ناشی از جذب و پاکنش بستر دریا چشم پوشی شده است. در شبیه سازی با ثابت فرض کردن دما و شوری آب، تغییرات دمایی در محدوده سطح و کف آب و همچنین تغییرات احتمالی در میزان شوری آب در نظر گرفته نشده است. برای محاسبه احتمالی در میزان شوری آب در نظر گرفته نشده است. برای محاسبه مرعت صوت با در نظر گرفتن عماق SASI دما، شوری آب و عرض برابر محرافیایی، سرعت صوت بر اساس فرمول لروی محاسبه (تقریباً برابر مرابی اعترای مطبق با جدول <u>ا</u> در نظر گرفته شده است.

۵-۱-۵ شبیهسازی اول

در این شبیهسازی فقط یک نقطه از هدف به مختصات دلخواه (۶ و ۱۲) نسبت به مرکز هدف که در فاصله ۲۰۰ متری از ISAS واقع شده، مد نظر است. نتایج تصویرسازی برای هدف تکنقطهای با استفاده از ISAS تکپایه با در نظر گرفتن افتها و تضعیفهای موجود در کانال آب با استفاده از الگوریتم قالببندی قطبی در شکل ۹ و با استفاده از شکل ۹ تصویر در مکان (۶۹/۶ و ۹) و در شکل ۱۰ در مکان (۵/۱۵ و شکل ۹ تصویر در مکان (۶/۴۶ و ۹) و در شکل ۱۰ در مکانی (۵/۱۸ و معیار خطای مطلق مکانی در روش پستابش فیلترشده است. همچنین معیار خطای مطلق مکانی در روش پستابش فیلترشده است. همچنین در این روش از لحاظ بصری تصویر ایجادی به هدف نقطهای نزدیک تر است.

جدول ۱: پارامترهای شبیهسازی

مقدار	پارامتر
LFM	نوع سيگنال ارسالي
۶	فركانس حامل (كيلوهرتز)
• /Y۵	پهنای باند (کیلوهرتز)
۰/۵	نرخ تکرار پالس (ثانیه)
۰/۰۰۲	طول پالس (ثانیه)
۱۵	دمای آب (سانتیگراد)
۳.	شوری آب (p.s.u. ^{۱۱})
۶.	عمق کانال (متر)
۲۵	عرض جغرافیایی (درجه)
۵۰	عمق ISAS (متر)
۲۵	عمق هدف (متر)
۷	میزان چرخش هدف (درجه)

برای بررسی دقیق تر کیفیت تصویر می توان به اندازه لوب اصلی و لوب های کناری در هر نقطه از هدف توجه نمود. بدین منظور از معیارهای ۲۰ PSLR که نشان دهنده نسبت بزرگ ترین لوب فرعی به لوب اصلی، ۲۰ ISLR که بیان گر نسبت مجموع انرژی موجود در لوب های کناری به لوب اصلی، ۲۰ IPRWR که نشانگر نسبت عرض لوب اصلی در ۱۵dB پایین تر از قله به عرض ۳dB پایین تر از قله و ۱۳W۱ که نمایانگر عرض لوب اصلی پاسخ ضربه در ۳dB پایین تر از قله است،

استفاده می کنیم. شکل های ۱۱ و ۱۲ نمودارهای برد و سمت بهدست آمده در دو روش قالب بندی قطبی و پس تابش فیلتر شده توسط ISAS را نشان می دهد. با بررسی نتایج تصویر برداری با ISAS مندرج در شکل های ۱۱ و ۱۲ و جدول ۲ و با توجه به معیارهای IRW و IPRWR وضعیت لوب اصلی در روش پس تابش خصوصاً در سمت، بهبود یافته است. با توجه به معیارهای ISLR و SLR که نشان دهنده بهبود یافته است. با توجه به معیارهای ISLR و SLR که نشان دهنده وضعیت لوب های جانبی است، وضعیت لوب های جانبی در روش پس تابش در حوزه برد (به جز اولین لوب فرعی) بهبود یافته است. بهطور کلی روش پس تابش نسبت به روش قالب ندی قطبی موفق تر عمل کرده است لذا برای پیاده سازی آن در ادامه آمده است.



شکل ۹: تصویر هدف تکنقطهای توسط ISAS با الگوریتم قالببندی قطبی



شکل ۱۱: نمودار برد هدف تکنقطهای توسط ISAS، (بالا) با الگوریتم قالببندی قطبی، (پایین) با الگوریتم پستابش فیلترشده



شکل ۱۲: نمودار زاویه هدف تکنقطهای توسط ISAS، (بالا) با الگوریتم قالببندی قطبی، (پایین) با الگوریتم پستابش فیلترشده

با در نظر گرفتن اثرات انتشار پرتوهای صوتی در آبهای کمعمق و ایجاد MISAS، نتایج شبیهسازی برای هدف تکنقط های با روش پستابش فیلتر شده در شکل ۱۳ آمده است که از لحاظ بصری تصویر مناسب تری از هدف تکنقطهای نسبت به شکل ۱۰ ایجاد کرده است که در شکل ۱۳ تصویر در مکان (۵/۹۶ و ۱۰/۸۵) ایجاد شده است که MISAS در مکان (۹۹/۹ و ۱۰/۸۵) ایجاد شده است که نشان دهنده دقت مکانی بهتر و کاهش معیار خطای ALE در ISAS در پیشنهادی است. با مراجعه به شکل ۱۴ و ستون انتهایی جدول ۲ نیز میتوان بهبود وضعیت MISAS را به طور کلی نسبت به حالت ISAS نیز از مشاهده نمود. تقویت دامنه تصویر در MISAS نسبت به ISAS نیز از بهبودهای قابل توجه است.



شکل ۱۳: تصویر هدف تکنقطهای توسط MISAS با روش پستابش

هدف نقطهای	تصوير ،	كيفيت	مقايسه	:۲	جدول
------------	---------	-------	--------	----	------

MISAS	ISAS		
پستابش	پستابش	قالببندى	معيار كيفيت تصوير
فيلترشده	فيلترشده	قطبى	
-10/8	$-1\Delta/1$	-18	PSLR در سمت (dB)
$-\Upsilon\Delta/\Upsilon$	- ۲۶/۳	-۳۸	PSLR در برد (dB)
-34/40	-78/•8	-۳۱/۸۲	ISLR در سمت (dB)
-4.14	-46/18	-41/98	ISLR در برد (dB)
۱۰/۴۸	۹/۲۵	19/48	IRW در سمت (نمونه)
14/98	۱۸/۴۷	19/78	IRW در برد (نمونه)
١/٩٧	۲/۱۱	۲/۷۹	IPRWR در سمت
۲/۴۷	۱/٩۶	١/٨٩	IPRWR در برد



شکل ۱۴: نمودارهای برد و زاویه هدف تکنقطهای با الگوریتم پستابش فیلترشده توسط MISAS، (بالا) نمودار برد، (پایین) نمودار زاویه

۲-۵- شبیهسازی دوم

نتایج تصویرسازی برای هدف زیردریایی مفروض در فاصله ۶۵۰ متری با استفاده از ISAS تک پایه با روش های قالب بندی قطبی و پس تابش فیلتر شده در شکل های ۱۵ و ۱۶ و با استفاده از MISAS پیشنهادی در شکل ۱۷ نمایش داده شده است. بهبود کیفیت تصویر ایجادی با استفاده از MISAS پیشنهادی در این شبیه سازی نیز مشهود است.



شکل ۱۵: تصویر زیردریایی توسط ISAS با روش قالببندی قطبی



شکل ۱۶: تصویر زیردریایی توسط ISAS با روش پستابش فیلترشده



شکل ۱۷: تصویر زیردریایی توسط MISAS با روش پستابش فیلتر شده

در تصاویر ۱۸ و ۱۹ نتایج تصویربرداری از هدف واقع در فواصل ۱۰۰ و ۵۰۰ متری نشان داده شده است. با کاهش فاصله تا هدف، کیفیت تصویربرداری با روش قالببندی قطبی کاهش مییابد چراکه در روابط آن از فرض میدان دور استفاده شده است اما در روش پستابش، تغییر فاصله تأثیر محسوسی در کیفیت تصویر ایجادی ایجاد نمی کند و تنها با افزایش فاصله، بهدلیل افزایش افتهای ناشی از انتشار و جذب امواج آکوستیکی در آب، کمی باعث افت کیفیت تصویر خواهد شد.

۶- نتیجهگیری

در این مقاله پس از بررسی سونار روزنه مصنوعی معکوس و چالشهای به کارگیری آن، ایده سونار روزنه مصنوعی معکوس چندپایه با استفاده از منابع مجازی ناشی از انتشار امواج صوتی در آبهای کمعمق پیشنهاد و بررسی شد. در ادامه پس از بررسی روابط تصویربرداری با الگوریتم قالببندی قطبی در حالت میدان دور، برای اولین بار الگوریتم پستابش فیلتر شده برای سونار روزنه مصنوعی معکوس چندپایه پیشنهادی در حالت کلی استخراج گردید و تصویرسازی از اهداف با هر پیشنهادی در حالت کلی استخراج گردید و تصویرسازی از اهداف با هر ایجادشده از اهداف متحرک زیر آب توسط روش پستابش فیلتر شده دارای کیفیت بهتری نسبت به الگوریتم قالببندی قطبی است. علاوه بر این با توجه به روابط استخراج شده درروش پستابش فیلتر شده،



شکل ۱۸: تصویر ایجادی از هدف زیردریایی با الگوریتم قالببندی قطبی، (بالا) در فاصله ۱۰۰ متری، (پایین) در فاصله ۵۰۰ متری



شکل ۱۹: تصویر ایجادی از هدف زیردریایی با الگوریتم پستابش فیلترشده، (بالا) در فاصله ۱۰۰ متری، (پایین) در فاصله ۵۰۰ متری

مراجع

- R. Schettini, and S. Corchs, "Underwater image processing: state of the art of restoration and image enhancement methods," *EURASIP Journal on Advances in Signal Processing*, vol. 2010, pp. 1-14, 2010.
- [2] F. Bonin, A. Burguera, and G. Oliver, "Imaging systems for advanced underwater vehicles," *Journal of Maritime Research*, vol. 8, no. 1, pp. 65-86, 2011.
- [3] R.E. Hansen, Introduction to Synthetic Aperture Sonar Systems, Edited by Prof. Nikolai Kolev, Publisher InTech, 2011.
- [4] C. Ozdemir, Inverse synthetic aperture radar imaging with MATLAB Algorithms, vol. 210, John Wiley & Sons, 2012.
- [5] W.K. Blake, T.D. Le, and J.R. Peoples, "Target interpretation using inverse synthetic aperture sonar techniques," *The Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 90, no. 4, pp. 2341-2341, 1991.
- [6] J. Xu, X.Z. Jiang, Y. Zhu, and B.C. Yuan, "Research of inverse synthetic aperture sonar based on convolution back projection algorithm," *ActaAcustica*, vol. 26, no. 5, pp. 400-404, 2001.
- [7] J. Xu, X. Jiang, and J. Tang, "Range-instantaneous Doppler imaging of inverse synthetic aperture sonar," *Journal of Technical Acoustics*, vol. 22, no. 1, pp. 48-51, 2003.
- [8] G. Qian, H. Liang, Z.S. Li, Y.Q. Liu, and Y.L. Li, "An improved range-instant Doppler imaging algorithm in inverse synthetic aperture sonar," *Torpedo Technology*, vol. 11, no. 2, pp. 14-15, 2003.
- [9] G.J. Xu, G.L. Cheng, and M.M. Zhang, "Point target imaging of inverse synthetic aperture sonar," *Shipboard Electronic Countermeasure*, vol. 31, no. 3, pp. 64-65, 2008.
- [10] H. Xinyi, "The research on the application of inverse synthetic aperture imaging technology on acoustic homing torpedo," *Ship Science and Technology Journal*, vol. 30, no. 1, pp. 96-100, 2008.

- [22] X. Xiaochun, and Z. Yunhua, "3D ISAR imaging based on MIMO radar array," 2nd Asian-Pacific Conference on Synthetic Aperture Radar (APSAR 2009), pp. 1018-1021, 2009.
- [23] Y. Zhu, Y. Su, and W. Yu, "An ISAR imaging method based on MIMO technique," *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 48, no. 8, pp. 3290-3299, 2010.
- [24] E. An, Underwater Channel Modeling for Sonar Applications, MSc Thesis, The Graduate School of Natural and Applied Sciences of Middle East Technical University, 2011.
- [25] R.J. Urick, Principles of Underwater Sound, 3rd edition, McGraw-Hill, 1983.
- [26] J. X. Lopez, Inverse Synthetic Aperture Radar Imaging Theory and Applications, MSc thesis, The Graduate School of University of Texas-Pan American, 2011.
- [27] A.C. Kak, and M. Slaney, Principles of Computerized Tomographic Imaging, Philadelphia, SIAM, 2001.
- [28] T. Ray, Y. Cao, Z. Qiao, and G. Chen, "2D and 3D ISAR image reconstruction through filtered back projection," *SPIE Defense, Security and Sensing, International Society for Optics and Photonics*, pp. 836107-836111, 2012.
- [29] L.C. Parra, 2D Reconstruction from Projections, Lecture 5 from BME 15000, Biomedical Imaging Course, City College of NewYork, Available online at: http://bme.ccny.cuny.edu/faculty/parra/teaching/medimag ing/.
- [30] R.E. Kell, "On the derivation of bistatic RCS from monostatic measurements," *Proceedings of the IEEE*, vol. 53, no. 8, pp. 983-988, 1965.
- [31] M.J. Dargahi, A.D. Aref, and A. Khademzade, "Simulation and performance analysis of a novel model for short range underwater acoustic communication channel using ray tracing method in turbulent shallow water regions of the Persian Gulf," *International Journal* of Computer Science Issues (IJCSI), vol. 8, no.1, p. 329, 2011.
- [32] X. Lurton, An introduction to underwater acoustics: principles and applications, 2nd Edition, Springer, 2010.
 - ⁹ Thorp ¹⁰ Leroy
 - ¹¹ Practical Salinity Units
 - ¹² Peak Side Lobe Ratio
 - ¹³ Integrated Side Lobe Ratio
 - ¹⁴ Impulse Response Width Ratio
 - ¹⁵ Impulse Response Width

- [11] J. Xu, X. Jiang, and J. Tang, "A new range-instantaneous Doppler imaging method in inverse synthetic aperture sonar based on time-frequency analysis," *ActaAcustica*, vol. 26, no. 6, pp. 551-556, 2001.
- [12] D. Liu, et al., "A new mode of target-motion-induced sonar imaging and processing," 9th International Conference on Signal Processing (ICSP 2008), pp. 2567-2570, IEEE, 2008.
- [13] M. Zhang, et al., "On 2D-imaging algorithm for underwater target in near-field," *IEEE Congress on Image and Signal Processing (CISP'08)*, vol. 3, pp. 791-795, 2008.
- [14] H. Parmeswaran, et al., "Cross-range imaging of a cooperative source using passive inverse synthetic aperture technique," *IEEE International Underwater Technology Symposium (UT)*, pp. 1-7, 2013.
- [15] M. Martorella, "Introduction to inverse synthetic aperture radar," *IEEE International Radar Conference*, 2010.
- [16] M. Martorella, "Optimal sensor positioning for inverse synthetic aperture radar," *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, vol. 49, no. 1, pp. 648-658, 2013.
- [17] T.G. Kostis, *Interferometric Inverse Synthetic Aperture Radar*, Master of Science thesis, Department of Electrical and Electronic Engineering in University College London, 2001.
- [18] Z. Zhu, Y. Zhang, and Z. Tang, "Bistatic inverse synthetic aperture radar imaging," *IEEE International Radar Conference*, pp. 354-358, 2005.
- [19] M. Soumekh, Synthetic Aperture Radar Signal Processing with MATLAB Algorithms, New York, Wily Interscience Publication, 1999.
- [20] G. Wang, X.G. Xia, and V.C. Chen, "Three-dimensional ISAR imaging of maneuvering targets using three receivers," *IEEE Transactions on Image Processing*, vol. 10, no. 3, pp. 436-447, 2001.
- [21] C. Ma, et al., "Three-dimensional ISAR imaging based on antenna array," *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 46, no. 2, pp. 504-515, 2008.

زيرنويسها

- ¹ Stationary Scattering Density
- ² Linear Frequency Modulated
- ³ Polar Format Algorithm
- ⁴ Fourier Diffraction Theorem
- ⁵ Computerized Tomography
- 6 Radon Transform
- ⁷ Monostatic to Bistatic Equivalence Theorem
- 8 Francois-Garrison