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

جواد تقی‌زاده[۱]، دانشجوی دکتری؛ سیدعلیرضا سیدین[۲]، دانشیار

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

چکیده: تصویربرداری از اهداف متحرک زیر آب با استفاده از سونار روزنه مصنوعی معکوس امکان‌پذیر است اما علاوه بر مشکلات کاربردی که در به‌کارگیری 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 می‌گردد که با استفاده از ایده سونار روزنه مصنوعی معکوس چندپایه و با فرض قرارگیری در آب‌های کم‌عمق که منجر به ایجاد منابع مجازی می‌شود، می‌توان تصویر مناسبی از اهداف متحرک زیر آب ایجاد کرد. به‌منظور دستیابی به الگوریتمی مناسب، روابط تصویرسازی با استفاده از روش‌های قالب‌بندی قطبی و پس‌تابش فیلترشده برای سونار روزنه مصنوعی معکوس چندپایه استخراج خواهد شد. پس از بررسی و شبیه‌سازی این دو روش، نشان داده خواهد شد که الگوریتم تصویرسازی پس‌تابش فیلترشده پیشنهادی در شرایط در نظر گرفته‌شده 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 قالب‌بندی قطبی، الگوریتم پس‌تابش فیلترشده.

Filtered Back Projection Imaging in Multistatic Inverse Synthetic Aperture Sonar

Javad Taghizadeh[1], PhD Student; Seyed Alireza Seyedin[2], 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
تاریخ اصلاح مقاله: ۱۳۹۳/۱۱/۰۵ و ۱۳۹۳/۱۲/۰۸
تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۳/۱۲/۱۷
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 می‌شود) و پراکنش (که باعث تغییر مسیر جهت نور می‌شود) ایجاد می‌گردد و باعث می‌شود که تصاویر زیر آب دارای حداقل یکی از مشکلات محدودیت در فاصله و میدان دید، کنتراست پایین، نورپردازی غیر یکنواخت، کدری، ضعف درخشندگی، نقصان رنگ و نویز باشد [۱]. در هنگام انتشار امواج الکترومغناطیس در محیط زیر آب و به‌دلیل اندرکنش با مولکول‌های آب و سایر ذرات محلول در آب، فاصله انتشار و تشعشع در محیط زیر آب به‌میزان قابل توجهی نسبت به محیط هوا کاهش می‌یابد [۲]، لذا استفاده از تجهیزاتی همچون رادار نیز برای تصویربرداری زیر آب مناسب نیست. به‌دلیل امکان بهره‌گیری از امواج صوتی در زیر آب، تصویربرداری آکوستیکی و استفاده از سونار راهکار مناسبی برای این موضوع است و در سال‌های اخیر سونار روزنه مصنوعی (SAS) که از رادار روزنه مصنوعی (SAR) الهام گرفته است، به ابزاری مناسب برای تصویربرداری از بستر دریا و اشیا زیر آب تبدیل شده است [۳].

برای تصویربرداری از اهداف متحرک می‌توان 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 شکل‌گیری تصویر ISAS خواهد شد. از این تنوع زاویه‌ای در داده‌ها، برای جداسازی نقاط در راستای محور زاویه‌ای (عمود بر برد) استفاده می‌شود. درحالی‌که مشابه SAR و SAS، رزولوشن مورد نیاز در راستای محور برد از پهنای باند فرکانسی مشخص سیگنال ارسالی تأمین می‌شود. با نوشتن روابط مربوط به حرکت چرخشی هدف (در حالت حرکت چرخشی مطلق همانند یک میز چرخان) و سیگنال ارسالی و دریافتی مشاهده می‌گردد رابطه مستقیمی بین حرکت چرخشی هدف و راستای عمود بر برد تصویر به‌دست‌آمده وجود دارد و هر چه مقدار این زاویه چرخش (و یا به‌عبارتی طول روزنه مصنوعی) بیشتر باشد، رزولوشن زاویه‌ای (راستای عمود بر برد) بیشتر خواهد بود [۴]. البته در کاربردهای واقعی، هدف ممکن است حرکت انتقالی نیز داشته باشد یعنی مقدار برد هدف نیز در هنگام چرخش هدف تغییر نماید. این حالت باعث جابجایی پراکنده‌سازها در راستای برد در هریک از مقاطع و منجر به محو شدن تصویر خواهد شد لذا این حرکت انتقالی باید به‌نحو مناسبی جبران‌سازی 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، روش‌های مختلف تشکیل تصویر در ISAS مورد بررسی قرار گرفته است. در مقالات پراکنده دیگری نیز به ISAS اشاره شده است که از جنبه‌های مختلفی به بررسی موضوع پرداخته‌اند [۱۴-۱۱].

علی‌رغم وجود شباهت‌های بسیار زیاد بین ISAR و ISAS، 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 به‌طور خاص برای ISAS وجود دارد که عبارت‌اند از:

- ممکن است برخی از مفروضات در نظر گرفته‌شده برای تشکیل تصویر در ISAR در ISAS صادق نباشد که از آن جمله می‌توان به فرض میدان دور بودن هدف نسبت به رادار [۱۵] اشاره کرد.
- همچون سایر سیستم‌های سوناری، عوامل مرتبط با کانال آب همچون عدم تجانس و ناپایداری کانال صوتی آب، امواج دریا، 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 روزنه مصنوعی معکوس هنگامی محقق خواهد شد که مشکلات مورد اشاره به‌نحو مقتضی رفع شده باشد و از آنجا که تاکنون کمتر به این مقوله پرداخته شده است، در بخش ۲ با در نظر گرفتن فرضیات مناسب، روشی پیشنهاد می‌شود که بتواند با استفاده از ساختار سونار روزنه مصنوعی معکوس، تصویری مناسب از اهداف متحرک زیر آب ایجاد نماید. در بخش ۳ پس از بررسی روابط الگوریتم تصویربرداری با قالب‌بندی قطبی، روابط الگوریتم پس‌تابش برای ایجاد تصویر در روش پیشنهادی استخراج و در بخش ۴ تأثیر محیط دریا بر روی روابط بررسی می‌گردد. پس از انجام شبیه‌سازی‌ها در بخش ۵ و بررسی و تحلیل نتایج، کارایی الگوریتم‌های تصویربرداری اشاره‌شده در بخش نتیجه‌گیری جمع‌بندی خواهد شد.

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 فرض شود تا تصویر ایجاد گردد [۴] لذا هدف باید رفتار همکارانه‌ای داشته باشد اما این فرض در دنیای واقعی همواره 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 امکان‌پذیر است و در برخی از شرایط مانند حرکت مستقیم‌الخط 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 این‌صورت 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]، به‌کارگیری هندسه دوپایه [۱۸]، سیستم‌های چندآنتنه [۱۹-۲۱] و چندورودی-چندخروجی [۲۲، ۲۳] ارائه شده است. بدیهی است این راهکارها از جمله استفاده از ساختار 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 ISAS مرتبط است و باید به‌طور خاص در طراحی ISAS مدنظر قرار گیرد. حال آن‌که در تحقیقات صورت گرفته تاکنون در خصوص ISAS تنها به حالت تک‌پایه توجه شده و تمامی تلاش صورت گرفته در راستای اثبات امکان‌پذیر بودن تشکیل تصویر و انتخاب مناسب‌ترین روش برای تصویرسازی 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 سناریوی تصویربرداری مناسب استخراج گردد.

۲-۱- نحوه انتشار امواج صوتی در آب

انتشار امواج صوت در دریا متأثر از پدیده‌های گوناگونی است که باعث پیچیدگی این امر گشته است. سرعت انتشار صوت تابع پارامترهایی مانند تغییرات دما، شوری و عمق آب است. راستای پرتو موج در اثر تغییر سرعت صوت، تغییر می‌کند و بر اساس قانون اسنل باعث شکست یا انکسار موج می‌گردد. در هنگام انتشار یک موج صوتی، به دو دلیل گسترش جبهه موج و پدیده جذب، موج تضعیف می‌شود که در آب تابع پارامترهایی چون شوری، دما و فرکانس است. با توجه به قانون اسنل در خصوص خمیدگی پرتوها، پرتو امواج صوتی به‌طرف ناحیه با سرعت کمتر خم می‌شود که به این پدیده انکسار گویند. علاوه بر این امواج پس از برخورد با سطح آب یا کف دریا انعکاس می‌یابند. 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 کم‌عمق، 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 نمی‌توان تعریف دقیقی برای آب کم‌عمق 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 می‌توانند مناطق کم‌عمق تلقی شوند. در آب‌های کم‌عمق، کانال صوتی بین سطح آب و کف دریا ایجاد می‌شود که صوت در بین این دو محدوده به دام می‌افتد [۲۵].

تمامی مدل‌های انتشار موج مبتنی بر معادله موج می‌باشند. 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 کمتر بوده و در فرکانس‌های بالا پاسخ نسبتاً مناسبی می‌دهد. روش‌های مدل‌سازی مبتنی بر تئوری موج یا مدهای نرمال با اعمال شرایط مرزی و میانی دارای پاسخ کامل برای معادله موج هستند ولی با حجم پردازش زیاد، تفسیر پاسخ‌های آن نیز مشکل است. انتشار امواج صوتی در دریا را در فرکانس‌های بالاتر از ۵ kHz می‌توان به‌صورت پرتو یا خطی فرض کرد [۲۴]. همچنین با بررسی دو روش انتشار، روش انتشار به‌صورت پرتو در فواصل کوتاه، برای استفاده بسیار راحت‌تر است. روش انتشار حالت نرمال برای فواصل بیشتر مناسب است. فاصله مرزی r جهت سهولت استفاده بین این دو روش انتشار، از رابطه (۱) به‌دست می‌آید [۲۵].

$$r = \frac{H^2}{A} \tag{۱}$$

که در آن، H عمق آب و A طول‌موج است. مثلاً برای فرکانس 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 به‌کارگیری و فرکانس‌های معمول در ISAS، فرض استفاده از روش انتشار به‌صورت پرتو در آب‌های کم‌عمق معقول به نظر می‌رسد لذا در این مقاله از این روش استفاده خواهیم کرد.

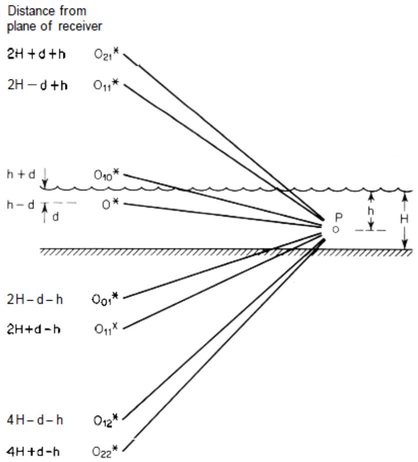
در تئوری انتشار به‌صورت پرتو، میدان صوتی به‌صورت مجموعه‌ای از پرتوهای صوتی نمایش داده می‌شود و هریک از آن‌ها از منبع صوت یا تصویر آن نسبت به سطح آب یا کف دریا ساطع می‌شوند. در شکل ۱ یک منبع صوتی در نقطه O و یک گیرنده در نقطه P در یک کانال کم‌عمق قرار گرفته‌اند. تصویر O_{10} از منبع نسبت به سطح آب با شدت سیگنال منبع و شیفت فاز ۱۸۰ درجه به‌عنوان نمایانگر انعکاس سطح آب اضافه شده است. برای نشان دادن انعکاس بستر دریا زوج تصاویر O_{01} و O_{11} اضافه شده است. مجدداً با توجه به قابلیت انعکاس سطح آب، تصاویر منابع O_{01} و O_{11}، تصاویر O_{11} و O_{21} اضافه شده‌اند. تصاویر این دو منبع جدید نسبت به بستر دریا، تصاویر جدیدی هستند که در شکل ۱ آمده است. این فرآیند رفت و برگشتی ایجاد تصاویر از منابع می‌تواند تا بی‌نهایت ادامه داشته باشد اما از تصاویر مرتبه بالاتر به‌دلیل تضعیف ناشی از انعکاس‌های متوالی می‌توان صرف‌نظر کرد.

۲-۲- روش پیشنهادی برای چندپایه شدن ISAS

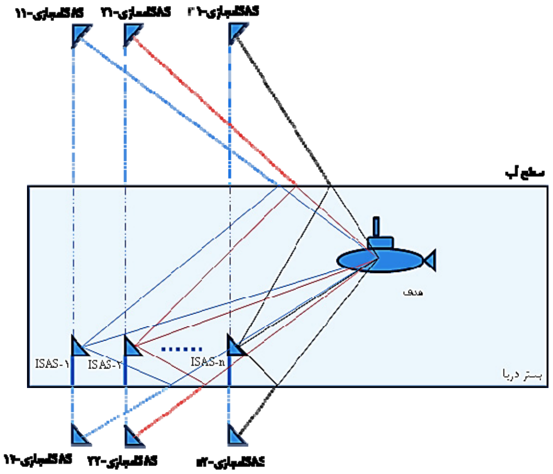
با توجه به مطالب فوق و با فرض قرارگیری در شرایط آب کم‌عمق، اگر فرض کنیم یک ISAS در عمق مناسبی از آب ثابت شده باشد، به‌دلیل ایجاد تصاویری از این منبع صوتی (ISAS مورد نظر) نسبت به سطح آب و بستر دریا، می‌توان تصور کرد که چندین ISAS در آن محدوده قرار دارند و به‌عبارت‌دیگر ISAS چندپایه شکل خواهد گرفت. حال در صورت وجود هدفی متحرک، هریک از این ISAS ها تصویری از آن هدف ایجاد می‌کنند که با تلفیق مناسب این تصاویر و با توجه به مبانی سیستم‌های چندپایه، تصویری باکیفیت‌تر از ISAS تک‌پایه ایجاد خواهد شد. به‌طور مثال در شکل ۲ فرض شده است که چند ISAS تک‌پایه 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 قرارگیری 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 درصورتی‌که تعداد ISAS های تک‌پایه افزایش یابد و ISAS چندپایه به‌صورت واقعی شکل گیرد، بازهم با استفاده از منابع مجازی شکل‌گرفته در بالای سطح آب و زیر 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 ابتدا مسئله فوق را به‌صورت دوپایه مشابه شکل ۳ در نظر می‌گیریم. در این شکل ISAS مدنظر در مکان x_{10} ISAS مجازی ناشی از تصویر نسبت به سطح آب در مکان x_{11} و هدف در مکان z قرار گرفته است.



شکل ۱: تصاویر منبع ایجادی در آب کم‌عمق [۲۵]



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

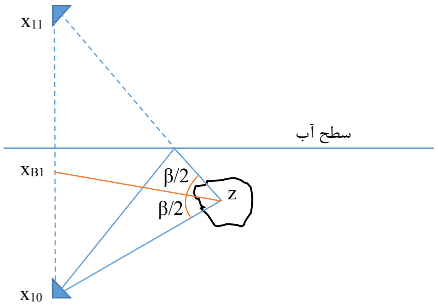
با فرض هم‌جهته بودن فرستنده و گیرنده و با توجه به روابط انتشار امواج، سیگنال دریافتی بازگشتی از هدف توسط ISAS مجازی در حوزه فرکانس را می‌توان به‌صورت رابطه زیر نوشت [۲۶]:

$$S(f)=P(f)\int_{\mathbb{R}^3} V(z)\frac{e^{-ik(|z-x_{10}|+|z-x_{11}|)}}{(4\pi)^2|z-x_{10}||z-x_{11}|}dz \qquad (۲)$$

که در آن، $P(f)$ طیف فرکانسی سیگنال ارسالی، $V(z)$ تابع انعکاس هدف، $k=2\pi f/c$ 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 می‌گردد، اگر مطابق شکل ۴، هدف حول محور X_3 به‌اندازه φ و در خلاف جهت عقربه‌های ساعت بچرخد، ماتریس دوران $R(\varphi)$ را می‌توان به‌صورت رابطه زیر نوشت:

$$R(\varphi)=\begin{bmatrix}\cos\varphi & -\sin\varphi & 0\\ \sin\varphi & \cos\varphi & 0\\ 0 & 0 & 1\end{bmatrix} \qquad (۳)$$



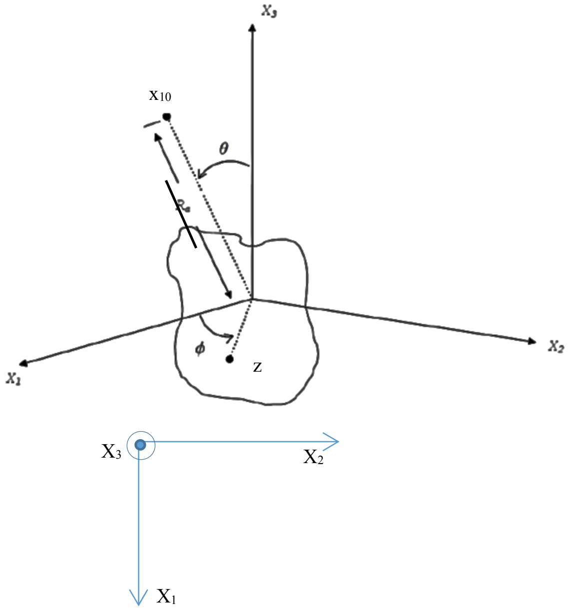
شکل ۳: هندسه قرارگیری دوپایه

اگر q چگالی پراکندگی ایستا[1] از هدف فرض شود، داریم:

$$V(z)=q\left(R^{-1}(\varphi)z\right) \tag{۴}$$

درنتیجه رابطه (۲) را می‌توان به‌صورت رابطه (۵) بازنویسی کرد.

$$S(f)=P(f)\int_{\mathbb{R}^3} q\left(R^{-1}z\right)\frac{e^{-ik\left(|z-x_{10}|+|z-x_{11}|\right)}}{(4\pi)^2|z-x_{10}||z-x_{11}|}dz \tag{۵}$$



شکل ۴: نحوه چرخش هدف

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

$$D_1(f)=H(f)S(f)$$
$$=P(f)^*S(f)=|P(f)|^2\int_{\mathbb{R}^3}\frac{q\left(R^{-1}z\right)e^{-ik\left(|z-x_{10}|+|z-x_{11}|\right)}}{(4\pi)^2|z-x_{10}||z-x_{11}|}dz \tag{۶}$$

اگر سیگنال ارسالی توسط ISAS پالس چیرپ LFM[2] در نظر گرفته شود، داریم:

$$p(t)=rect\left(\frac{t}{\tau}\right)e^{i\left(\pi Kt^2+2\pi f_0 t\right)} \tag{۷}$$

که در آن، τ طول پالس، K نرخ چیرپ، f_0 فرکانس حامل و $rect(.)$ تابع پنجره مستطیلی است و برای Kهای بزرگ خواهیم داشت [۲۶]:

$$P(f)\approx\sqrt{\frac{1}{K}}rect\left(\frac{f-f_0}{K\tau}\right)e^{-i\left[\pi\frac{(f-f_0)^2}{K}+\frac{\pi}{4}\right]} \tag{۸}$$

درنتیجه داریم:

$$|P(f)|^2=\frac{1}{K}rect\left(\frac{f-f_0}{K\tau}\right) \tag{۹}$$

پس رابطه (۶) به‌صورت زیر قابل بازنویسی است:

$$D_1(f)=\frac{1}{K}rect\left(\frac{f-f_0}{K\tau}\right)\cdot\int_{\mathbb{R}^3}q\left(R^{-1}z\right)\frac{e^{-ik\left(|z-x_{10}|+|z-x_{11}|\right)}}{(4\pi)^2|z-x_{10}||z-x_{11}|}d \tag{۱۰}$$

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

$$D_2(f)=\frac{1}{K}rect\left(\frac{f-f_0}{K\tau}\right)\cdot\int_{\mathbb{R}^3}\frac{q\left(R^{-1}z\right)e^{-i2k\left(|z-x_{10}|\right)}}{(4\pi)^2|z-x_{10}|^2}dz \tag{۱۱}$$

۳-۱- الگوریتم قالب‌بندی قطبی[3]

در این بخش الگوریتم تصویرسازی قالب‌بندی قطبی مبتنی بر تئوری تفرق فوریه[4] که داده‌های اندازه‌گیری شده را به تبدیل فوریه تابع انعکاس هدف مرتبط می‌کند، بررسی می‌شود. این تئوری بر این فرض استوار است که موج منتشرشده کروی را می‌توان در شرایط میدان دور به‌صورت موج صفحه‌ای در نظر گرفت.

مطابق این تئوری، طیف میدان پراکنده‌شده مستقیم اندازه‌گیری 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 ($|z-x_{10}|\approx|x_{10}|-\widehat{x_{10}}\cdot z$) که همان فرض میدان دور است و در آن $\widehat{x_0}$ بردار یکه در راستای موج منتشره از x_{10} است، می‌توان رابطه تقریبی زیر را نوشت [۲۸]:

$$\frac{e^{-i2k\left(|z-x_{10}|\right)}}{(4\pi)^2|z-x_{10}|^2}\approx\frac{e^{-i2k|x_{10}|}}{(4\pi)^2|x_{10}|^2}e^{i2k\widehat{x_{10}}\cdot z} \tag{۱۲}$$

به‌طور مشابه خواهیم داشت:

$$\frac{e^{-ik\left(|z-x_{10}|+|z-x_{11}|\right)}}{(4\pi)^2|z-x_{10}||z-x_{11}|}\approx\frac{e^{-ik\left(|x_{10}|+|x_{11}|\right)}}{(4\pi)^2|x_{10}||x_{11}|}e^{ik\left(\widehat{x_{10}}z+\widehat{x_{11}}z\right)} \tag{۱۳}$$

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

$$D_1(f) = (4\pi)^2 |x_{10}||x_{11}| e^{-ik(|x_{10}|+|x_{11}|)} \cdot \frac{1}{K} rect\left(\frac{f-f_0}{K\tau}\right) \mathcal{F}_{\{q\}}\left(-2kR\widehat{x_{10}}, -2kR\widehat{x_{11}}\right) \quad (۱۴)$$

$$D_2(f) = (4\pi)^2 |x_{10}|^2 e^{-i2k|x_{10}|} \cdot \frac{1}{K} rect\left(\frac{f-f_0}{K\tau}\right) \mathcal{F}_{\{q\}}\left(-2kR\widehat{x_{10}}\right) \quad (۱۵)$$

در این روابط، ضرایب مازاد ایجادشده نسبت به فیلتر تطبیقی ایده‌آل شامل عبارات $(4\pi)^2|x_{10}|^2$ و $(4\pi)^2|x_1||x_{11}|$، جبران‌کننده تضعیف توان و عبارات $e^{-i2k|x_{10}|}$ و $e^{-ik(|x_{10}|+|x_{11}|)}$، جبران‌کننده آفست برد می‌باشند. روابط (۱۵) و (۱۶) نشان‌دهنده تناسب سیگنال دریافتی از هدف با تبدیل فوریه چگالی پراکندگی از هدف ($\mathcal{F}_{\{q\}}(.)$) در نقاط $-2kR\widehat{x_{10}}$ و $-2kR\widehat{x_{11}}$ است.

درنتیجه می‌توان الگوریتم قالب‌بندی قطبی را در گام‌های زیر خلاصه نمود:

۱) نمونه‌برداری از سیگنال‌های دریافتی در بازه فرکانسی تعریف‌شده
۲) اعمال روش‌های مناسب جبران‌سازی حرکت انتقالی
۳) ایجاد مجموعه پروفایل برد
۴) درون‌یابی و تبدیل پروفایل‌های برد از حالت قطبی به حالت مستطیلی
۵) اعمال تبدیل فوریه معکوس برای هر پروفایل برد

۳-۲- الگوریتم پس‌تابش

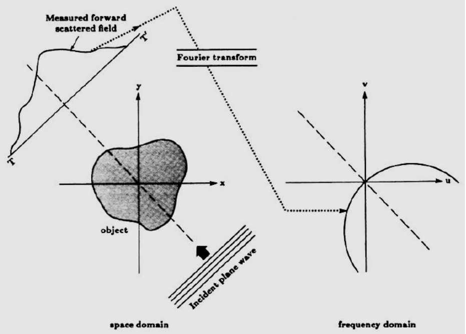
الگوریتم پس‌تابش روشی مصطلح در ایجاد تصاویر رادارهای روزنه مصنوعی است که از اصول تصویربرداری به روش توموگرافی محاسبه‌شده[۵] و تبدیل رادون[۶] استفاده می‌کند [۲۷].

الگوریتم پس‌تابش فیلترشده

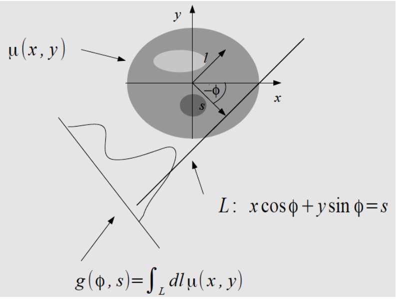
رابطه اصلی این روش که تصویر جسم مورد نظر را مشابه شکل ۶، ایجاد می‌کند، به‌صورت رابطه (۱۶) است [۲۹]:

$$\mu(x,y) = \int_0^{\pi}\int_{-\infty}^{\infty} |K| G(K,\phi) e^{i2\pi Ks} dK d\phi \quad (۱۶)$$

در این رابطه $\mu(x,y)$ تصویر جسم مورد نظر به‌دست‌آمده از تصویربرداری به روش توموگرافی محاسبه شده و با تبدیل رادون، $s = x\cos(\phi) + y\sin(\phi)$، $G(K,\phi)$ تبدیل فوریه $g(s,\phi)$ نسبت به 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]



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

با توجه به این‌که عبارت $rect\left(\frac{f-f_0}{K\tau}\right)$ در روابط (۱۱) و (۱۲) فقط محدوده فرکانس کاری را تعیین می‌کند و در محاسبات قابل حذف است و با توجه به مثبت بودن عبارات $|z-x_{10}|$ و $|z-x_{11}|$ به‌دلیل ماهیت فاصله، با تعریف ضرایب:

$$A_1 = K(4\pi)^2 |z-x_{10}||z-x_{11}| \quad (۱۷)$$

و

$$A_2 = K(4\pi)^2 |z-x_{10}|^2 \quad (۱۸)$$

و با توجه به روابط (۱۰) و (۱۱) خواهیم داشت:

$$A_1 e^{-i\frac{2\pi f}{c}(x_{10}+x_{11})} D_1 = \mathcal{F}\{q(R^{-1}z)\} = Q_1(f,\phi) \quad (۱۹)$$

$$A_2 e^{-i\frac{2\pi f}{c}(2x_{10})} D_2 = \mathcal{F}\{q(R^{-1}z)\} = Q_2(f,\phi) \quad (۲۰)$$

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 K 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 Q_1 و Q_2 در روابط (۱۹) و (۲۰)، تصویر I بر اساس رابطه (۱۶) برای ISAS اصلی و مجازی به‌ترتیب به‌صورت روابط (۲۱) و (۲۲) قابل ایجاد خواهد بود.

$$I_1(z) = \int_0^{\pi}\int_{-\infty}^{\infty} |f| Q_1(f,\phi) e^{i\frac{2\pi f}{c}(2z)} df d\phi \quad (۲۱)$$

$$I_2(z) = \int_0^{\pi}\int_{-\infty}^{\infty} |f| Q_2(f,\phi) e^{i\frac{2\pi f}{c}(2z)} df d\phi \quad (۲۲)$$

با استفاده از روابط (۲۱) و (۲۲)، تصویر $q(R^{-1}z)$ که چگالی پراکندگی هدف است، ایجاد می‌گردد.

اگر فرض کنیم سیگنال‌های دریافتی از سونار در نقاط f_j و ϕ_k نمونه‌برداری شده باشند، داریم:

$$f_j = f_{min} + (j-1)\Delta f \qquad j = 1,2,\ldots,N_f \quad (۲۳)$$

$$\phi_k = \phi_{min} + (k-1)\Delta\phi \quad k = 1,2,\ldots,N_p \quad (۲۴)$$

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

$$H_1(j,k) = f_j D_1(j,k) e^{-i\frac{2\pi f_j}{c}(x_{10}+x_{11})} \quad (۲۵)$$

و

$$H_2(j,k)=f_j D_2(j,k)\,e^{-i\frac{2\pi f_j}{c}(2x_{10})} \qquad (۲۶)$$

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

$$\begin{aligned} I_1(z)&=\frac{1}{N_pN_f}\sum_{k=1}^{N_p}A_1(k)e^{i\frac{4\pi f_{min}}{c}(z(k))}\cdot\sum_{j=1}^{N_f}H_1(j,k)e^{i\frac{4\pi\Delta f}{c}(z(k))}\\ &=\frac{1}{N_p}\Big(\sum_{k=1}^{N_p}A_1(k)e^{i\frac{4\pi f_{min}}{c}(z(k))}\Big)\cdot IFFT_{N_f}\{H_1(k,z)\}\end{aligned} \qquad (۲۷)$$

به‌صورت مشابه داریم:

$$I_2(z)=\frac{1}{N_p}\Big(\sum_{k=1}^{N_p}A_2(k)e^{i\frac{4\pi f_{min}}{c}(z(k))}\Big)\cdot IFFT_{N_f}\{H_2(k,z)\} \qquad (۲۸)$$

درنتیجه می‌توان الگوریتم پس‌تابش فیلترشده را در گام‌های زیر خلاصه نمود:

۱- نمونه‌برداری از سیگنال‌های دریافتی در بازه فرکانسی تعریف‌شده
۲- ایجاد مجموعه پروفایل برد (D) برای هر پالس
۳- به‌دست آوردن تابع H
۴- اعمال تابع فوریه معکوس به آن
۵- ایجاد گرید تصویر با استفاده از توابع فاصله $z(k)$ و فاز $e^{i\frac{4\pi f_{min}}{c}(z(k))}$
۶- درون‌یابی هر پالس تابع فوریه معکوس به درون گرید تصویر
۷- ایجاد تصویر نهایی با در نظر گرفتن تمامی پالس‌ها

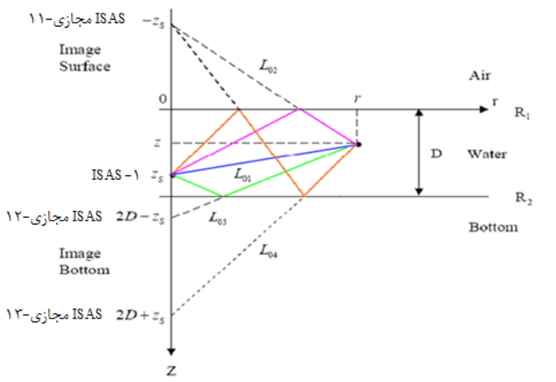
۳-۳- تعمیم به حالت چندپایه

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 به‌دست‌آمده، 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 تک‌پایه (MBET[۷]) و شکل ۳، سطح مقطع پراکندگی هدف در حالت دوپایه معادل با سطح مقطع پراکندگی اندازه‌گیری شده در نیمساز زاویه بین تک‌پایه‌ها با رابطه (۲۹) است [۳۰].

$$\sigma_B(\theta=\beta,f)=\sigma_M\Big(\theta=\frac{\beta}{2},f\sec\Big(\frac{\beta}{2}\Big)\Big) \qquad (۲۹)$$

که در آن، σ_B سطح مقطع پراکندگی دوپایه، σ_M سطح مقطع پراکندگی تک‌پایه، θ جهت قرارگیری 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 دوبه‌دو تصاویر به‌دست 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 به‌گونه‌ای باشد که سه ISAS مجازی ایجاد شده باشد، تصاویر ناشی از ISAS-1 واقع در مکان $x_1(0,z_s)$ و ISAS مجازی-۱۱ واقع در مکان $x_{11}(0,-z_s)$ به‌ترتیب از روابط (۲۷) و (۲۸) به‌دست می‌آیند و تصویر معادل دوپایه این دو مشابه شکل ۳ در مکان x_{B1} به‌صورت رابطه (۳۰) است.

$$I_{B1}(z)=\frac{1}{N_p}\Big(\sum_{k=1}^{N_p}A_{B1}(k)e^{i\frac{4\pi f_{min}}{c}(z(k))}\Big)\cdot IFFT_{N_f}\{H_{B1}(k,z)\} \qquad (۳۰)$$

که در آن:

$$H_{B1}(j,k)=f_j D_{B1}(j,k)\,e^{-i\frac{2\pi f_j}{c}(2x_{B1})} \qquad (۳۱)$$

و

$$A_{B1}=K(4\pi)^2|z-x_{B1}|^2 \qquad (۳۲)$$

و

$$D_{B1}(f)=\frac{1}{K}rect\Big(\frac{f-f_0}{K\tau}\Big)\int_{\mathbb{R}^3}q(R^{-1}z)\frac{e^{-i2k(|z-x_{B1}|)}}{(4\pi)^2|z-x_{B1}|^2}dz \qquad (۳۳)$$

تصویر معادل ISAS سه‌پایه مستقر در مکان x_{B2} ناشی از ISAS دوپایه واقع در مکان x_{B1} و ISAS مجازی-۱۲ واقع در مکان $x_{12}(0,2D\text{-}z_s)$ نیز به روش مشابه محاسبه خواهد شد. در ادامه تصویر معادل MISAS مدنظر از محاسبه تصویر ناشی از ISAS سه‌پایه مستقر در x_{B2} و ISAS مجازی-۱۳ مستقر در مکان $x_{13}(0,2D+z_s)$ به‌دست خواهد آمد.

درصورتی‌که مشابه شکل ۲ علاوه بر ISAS-1، ISASهای دیگری نیز مانند ISAS-2، ISAS-3، ... و ISAS-n در محدوده مورد نظر قرار داشته باشند، می‌توان به همین روش تصویر هریک را استخراج نمود و سپس با انواع روش‌های تلفیق تصاویر، به تصویر کامل‌تری 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 مهم‌ترین 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].

$$L_S = r^m \qquad (۳۴)$$

که در آن، r فاصله از منبع صوت و m در افت کروی برابر ۲ و در افت استوانه‌ای برابر ۱ است.

۴-۲- افت جذبی

در هنگام انتشار امواج در آب، بخشی از انرژی صوت جذب آب می‌شود 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 می‌توان از مدل کامل و دقیق فرانسوا-گریسون[۸] استفاده کرد که مشتمل بر سه جمله است که هریک‌میزان تأثیر اسید بوریک، سولفات منیزیم و آب خالص را نشان می‌دهد:

$$\alpha = A_1P_1\frac{f_1 f}{f_1^2+f^2} + A_2P_2\frac{f_2 f}{f_2^2+f^2} + A_3P_3f^2 \qquad (۳۵)$$

که در آن، α میزان تضعیف 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 قابل 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. این نویزها را می‌توان به دو دسته نویزهای محیطی و نویزهای وابسته به مکان دسته‌بندی کرد. نویزهای محیطی برخلاف نویزهای وابسته به مکان همواره وجود دارند و دارای طیف پیوسته و گاوسی (غیر سفید و وابسته به فرکانس) هستند. نویزهای وابسته به مکان اغلب دارای مؤلفه‌های غیر گاوسی هستند و ماهیتشان بستگی به منبع مولد آن‌ها دارد. اصلی‌ترین عوامل تشکیل‌دهنده نویز محیطی، باد، نویز حرارتی، جریان‌های آبی و کشتی‌های مروری هستند که روابط مربوط به محاسبات آن‌ها در [۲۴] آمده است.

۴-۴- سرعت صوت

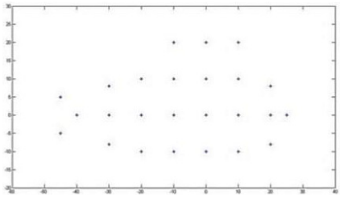
سرعت انتشار امواج آکوستیک به مشخصه‌های محیط انتشار از جمله چگالی و قابلیت فشرده‌سازی بستگی دارد. سرعت انتشار صوت در محیط دریا تقریباً برابر ۱۵۰۰ متر بر ثانیه (معمولاً بین ۱۴۵۰ تا ۱۵۵۰متر بر ثانیه و وابسته به فشار هیدرواستاتیک یا عمق، میزان شوری و دمای آب) است. روابط تقریبی و تجربی متعددی برای محاسبه 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 [۳۲].

۴-۵- سطح آب و بستر دریا

سطح آب و بستر دریا می‌توانند هم به‌عنوان منعکس‌کننده و هم به‌عنوان پراکنده‌کننده امواج صوتی عمل نمایند. میزان انعکاس یا پراکنش سطح آب به ارتفاع موج، فرکانس صوت و زاویه برخورد موج با سطح بستگی دارد ولی به‌طورکلی و در شرایط مشابه، هر چه سطح آب صاف‌تر باشد میزان انعکاس بیشتر و میزان پراکنش کمتر خواهد بود. بستر دریا نیز تأثیری مشابه سطح آب دارد اما به‌دلیل وجود تنوع و تعدد در لایه‌های بستر دریا، پیچیدگی بیشتر است. به‌طورکلی و در شرایط مشابه، هر چه بستر دریا صاف‌تر و سخت‌تر 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 [۲۵].

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 پیش‌پردازش‌های 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 به‌صورت نقطه‌ای و به شکل ۸ در نظر گرفته شده است.



شکل ۸: مدل در نظر گرفته‌شده برای زیردریایی به‌عنوان هدف

در شبیه‌سازی کانال، افت‌های انتشار و جذبی در نظر گرفته‌شده و از نویز محیط به‌دلیل 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 پراکنش بستر دریا چشم‌پوشی شده است. در شبیه‌سازی 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 سرعت صوت با در نظر گرفتن عمق ISAS، دما، شوری آب و عرض جغرافیایی، سرعت صوت بر اساس فرمول لروی محاسبه (تقریباً برابر ۱۵۰۰ متر بر ثانیه) و در شبیه‌سازی استفاده می‌شود. پارامترهای شبیه‌سازی مطابق با جدول ۱ در نظر گرفته شده است.

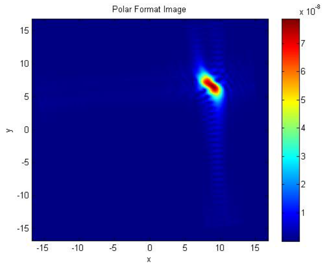
۵-۱- شبیه‌سازی اول

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 الگوریتم پس‌تابش فیلترشده در شکل ۱۰ نمایش داده شده است. در شکل ۹ تصویر در مکان (۶/۴۶ و ۹) و در شکل ۱۰ در مکان (۵/۱۵ و ۱۰/۳۴) ایجاد شده است که نشان‌دهنده دقت مکانی بهتر و کاهش معیار خطای مطلق مکانی در روش پس‌تابش فیلترشده است. همچنین در این روش از لحاظ بصری تصویر ایجادی به هدف نقطه‌ای نزدیک‌تر است.

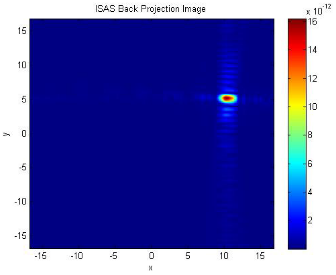
جدول ۱: پارامترهای شبیه‌سازی

پارامتر	مقدار
نوع سیگنال ارسالی	LFM
فرکانس حامل (کیلوهرتز)	۶
پهنای باند (کیلوهرتز)	۰/۷۵
نرخ تکرار پالس (ثانیه)	۰/۵
طول پالس (ثانیه)	۰/۰۰۲
دمای آب (سانتی‌گراد)	۱۵
شوری آب (p.s.u.[۱۱])	۳۰
عمق کانال (متر)	۶۰
عرض جغرافیایی (درجه)	۲۵
عمق ISAS (متر)	۵۰
عمق هدف (متر)	۲۵
میزان چرخش هدف (درجه)	۷

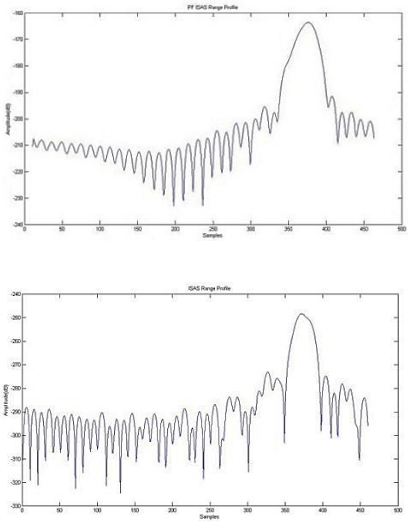
برای بررسی دقیق‌تر کیفیت تصویر می‌توان به‌اندازه لوب اصلی و لوب‌های کناری در هر نقطه از هدف توجه نمود. بدین منظور از معیارهای PSLR[۱۲] که نشان‌دهنده نسبت بزرگ‌ترین لوب فرعی به لوب اصلی، ISLR[۱۳] که بیان‌گر نسبت مجموع انرژی موجود در لوب‌های کناری به لوب اصلی، IPRWR[۱۴] که نشانگر نسبت عرض لوب اصلی در ۱۵dB پایین‌تر از قله به عرض ۳dB پایین‌تر از قله و IRW[۱۵] که نمایانگر عرض لوب اصلی پاسخ ضربه در 3dB پایین‌تر از قله است، استفاده می‌کنیم. شکل‌های ۱۱ و ۱۲ نمودارهای برد و سمت به‌دست‌آمده در دو روش قالب‌بندی قطبی و پس‌تابش فیلترشده توسط ISAS را نشان می‌دهد. با بررسی نتایج تصویربرداری با ISAS مندرج در شکل‌های ۱۱ و ۱۲ و جدول ۲ و با توجه به معیارهای IRW و IPRWR وضعیت لوب اصلی در روش پس‌تابش خصوصاً در سمت، بهبود یافته است. با توجه به معیارهای ISLR و PSLR که نشان‌دهنده وضعیت لوب‌های جانبی است، وضعیت لوب‌های جانبی در روش پس‌تابش در حوزه برد (به‌جز اولین لوب فرعی) بهبود یافته است. به‌طورکلی روش پس‌تابش نسبت به روش قالب‌بندی قطبی موفق‌تر عمل کرده است لذا برای پیاده‌سازی MISAS از این الگوریتم تصویربرداری استفاده شده و نتایج شبیه‌سازی آن در ادامه آمده است.



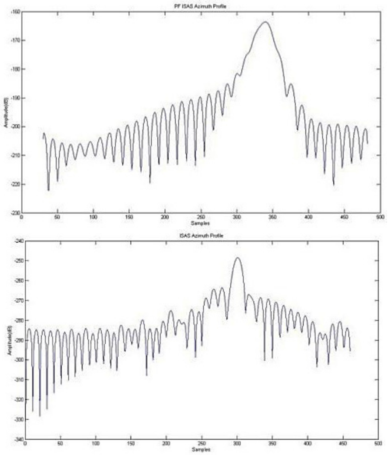
شکل ۹: تصویر هدف تک‌نقطه‌ای توسط ISAS با الگوریتم قالب‌بندی قطبی



شکل ۱۰: تصویر هدف تک‌نقطه‌ای توسط ISAS با روش پس‌تابش

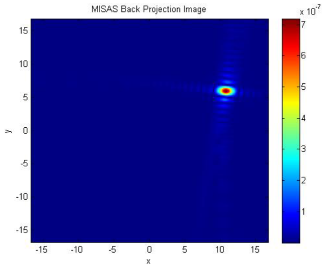


شکل ۱۱: نمودار برد هدف تک‌نقطه‌ای توسط ISAS، (بالا) با الگوریتم قالب‌بندی قطبی، (پایین) با الگوریتم پس‌تابش فیلترشده



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

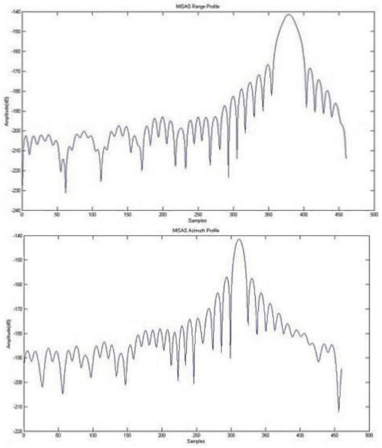
با در نظر گرفتن اثرات انتشار پرتوهای صوتی در آب‌های کم‌عمق و ایجاد MISAS، نتایج شبیه‌سازی برای هدف تک‌نقطه‌ای با روش پس‌تابش فیلتر شده در شکل ۱۳ آمده است که از لحاظ بصری تصویر مناسب‌تری از هدف تک‌نقطه‌ای نسبت به شکل ۱۰ ایجاد کرده است. در شکل ۱۳ تصویر در مکان (۵/۹۶ و ۱۰/۸۵) ایجاد شده است که نشان‌دهنده دقت مکانی بهتر و کاهش معیار خطای ALE در MISAS پیشنهادی است. با مراجعه به شکل ۱۴ و ستون انتهایی جدول ۲ نیز می‌توان بهبود وضعیت MISAS را به‌طورکلی نسبت به حالت ISAS 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

جدول ۲: مقایسه کیفیت تصویر هدف نقطه‌ای

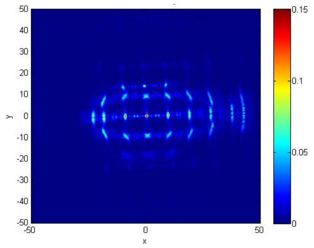
معیار کیفیت تصویر	ISAS		MISAS
	قالب‌بندی قطبی	پس‌تابش فیلترشده	پس‌تابش فیلترشده
PSLR در سمت (dB)	-۱۸	-۱۵/۱	-۱۵/۶
PSLR در برد (dB)	-۳۸	-۲۶/۳	-۲۵/۳
ISLR در سمت (dB)	-۳۱/۸۲	-۲۸/۰۶	-۳۹/۴۵
ISLR در برد (dB)	-۴۱/۹۸	-۴۶/۱۸	-۴۰/۸۲
IRW در سمت (نمونه)	۱۹/۴۶	۹/۲۵	۱۰/۴۸
IRW در برد (نمونه)	۱۹/۲۶	۱۸/۴۷	۱۴/۹۶
IPRWR در سمت	۲/۷۹	۲/۱۱	۱/۹۷
IPRWR در برد	۱/۸۹	۱/۹۶	۲/۴۷



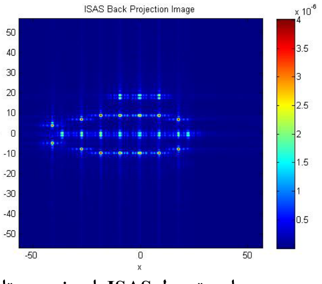
شکل ۱۴: نمودارهای برد و زاویه هدف تک‌نقطه‌ای با الگوریتم پس‌تابش فیلترشده توسط **MISAS**، (بالا) نمودار برد، (پایین) نمودار زاویه

۵-۲- شبیه‌سازی دوم

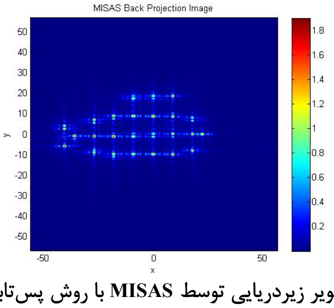
نتایج تصویرسازی برای هدف زیردریایی مفروض در فاصله ۶۵۰ متری با استفاده از ISAS تک‌پایه با روش‌های قالب‌بندی قطبی و پس‌تابش فیلتر شده در شکل‌های ۱۵ و ۱۶ و با استفاده از MISAS پیشنهادی در شکل ۱۷ نمایش داده شده است. بهبود کیفیت تصویر ایجادی با استفاده از MISAS پیشنهادی در این شبیه‌سازی نیز مشهود است.



شکل ۱۵: تصویر زیردریایی توسط **ISAS** با روش قالب‌بندی قطبی



شکل ۱۶: تصویر زیردریایی توسط **ISAS** با روش پس‌تابش فیلترشده

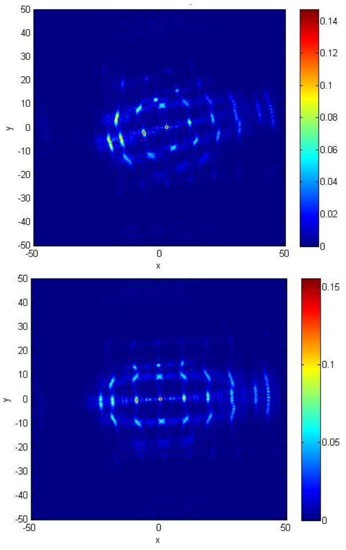


شکل ۱۷: تصویر زیردریایی توسط **MISAS** با روش پس‌تابش فیلتر شده

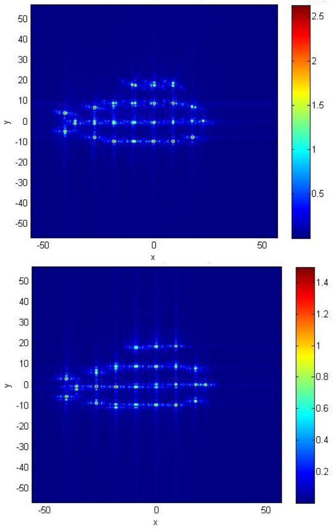
در تصاویر ۱۸ و ۱۹ نتایج تصویربرداری از هدف واقع در فواصل ۱۰۰ و ۵۰۰ متری نشان داده شده است. با کاهش فاصله تا هدف، کیفیت تصویربرداری با روش قالب‌بندی قطبی کاهش می‌یابد چراکه در روابط آن از فرض میدان دور استفاده شده است اما در روش پس‌تابش، تغییر فاصله تأثیر محسوسی در کیفیت تصویر ایجادی ایجاد نمی‌کند و تنها 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 به‌کارگیری 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 دو الگوریتم بررسی و شبیه‌سازی شد. نتایج نشان داد که تصاویر 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 استخراج‌شده درروش پس‌تابش فیلتر شده، تصویرسازی از اهداف در این روش به فاصله آن‌ها بستگی ندارد.



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

[1] 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.

[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.

[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-HiIl, 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 I5000, Biomedical Imaging Course, City College of NewYork, Available online at: http://bme.ccny.cuny.edu/faculty/parra/teaching/medimaging/.

[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.

زیرنویس‌ها

[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
[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