

تصویرسازی در سونار روزنه مصنوعی معکوس چندپایه با استفاده از روش پس-تابش فیلترشده

جواد تقی‌زاده^۱، دانشجوی دکتری، سید علیرضا 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 هم 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, PhD Candidate¹, S. Alireza Seyedin, Associate Professor²

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: ۹۳/۹/۹

تاریخ اصلاح مقاله: ۹۳/۱۱/۵

تاریخ پذیرش مقاله:

نام نویسنده مسئول: سید علیرضا سیدین

نشانی نویسنده مسئول: ایران - مشهد - میدان آزادی - دانشگاه فردوسی مشهد - دانشکده مهندسی - گروه مهندسی برق

۱- مقدمه

پدیده تضعیف نور در زیر آب به دلیل 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 غیریکنواخت، کدری، ضعف درخشندگی، نقصان رنگ و نویز باشد [۱]. در هنگام انتشار امواج الکترومغناطیس در محیط زیر آب و به دلیل اندرکنش با ملکول‌های آب و سایر ذرات محلول در آب، فاصله انتشار و تشعشع در محیط زیر آب به میزان قابل توجهی نسبت به محیط هوا کاهش می‌یابد [۲]، لذا استفاده از تجهیزاتی همچون رادار نیز برای تصویربرداری زیر آب مناسب نمی‌باشد. به دلیل امکان بهره‌گیری از امواج صوتی در زیر آب، تصویربرداری آکوستیکی و استفاده از سونار راه کار 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 اشیاء 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 به دست 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 می‌شود. در حالی که مشابه SAR و SAS، رزولوشن موردنیاز در راستای محور برد از پهنای باند فرکانسی مشخص سیگنال ارسالی تامین 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 به دست آمده وجود دارد و هر چه مقدار این زاویه چرخش (و یا به عبارتی 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 هر یک از مقاطع و منجر به محو شدن تصویر خواهد شد لذا این حرکت انتقالی باید به نحو 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 عبارتند از:

- ممکن است برخی از مفروضات در نظر گرفته شده 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 هم-چون 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، به دلیل سرعت کم صوت در آب، فرکانس‌های تکرار ارسال سیگنال صوتی و در نتیجه سرعت حرکت (حامل سونار یا هدف) نمی‌تواند زیاد باشد و این مساله موضوع خطای فاز به دلیل 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 به نحو 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 تاثیر محیط دریا بر روی روابط بررسی می‌گردد. پس از انجام شبیه‌سازی‌ها در بخش ۵ و بررسی و تحلیل نتایج، کارآیی الگوریتم‌های تصویربرداری اشاره شده 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 عبارتند 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.

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 به طرف 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 کم عمق رخ می‌دهد [۲۴]. منظور از آب-های 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 نمی‌توان تعریف دقیقی برای آب کم عمق ارائه نمود بلکه از لحاظ صوتی به جایی کم عمق گفته می‌شود که فاصله انتشار صوت با انعکاس مکرر از سطح و کف حداقل به اندازه چند برابر عمق آب باشد. از لحاظ جغرافیایی، نواحی بندری و نزدیک به ساحل با عمق کم‌تر از ۱۸۰ متر می‌توانند مناطق کم عمق تلقی شوند. در آب-های کم عمق، کانال صوتی بین سطح آب و کف دریا ایجاد می‌شود که صوت در بین این دو محدوده به دام می‌افتد [۲۵].

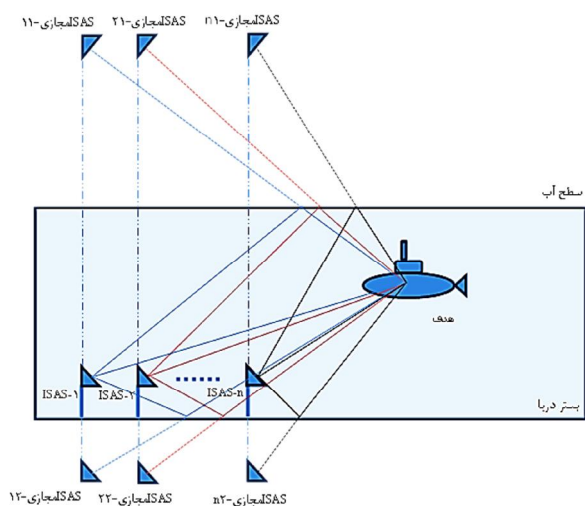
تمامی مدل‌های انتشار موج مبتنی بر معادله موج می‌باشند. این معادله رابطه بین مشتقات مرتبه دوم زمانی و مکانی فشار صوت است. انتشار موج صوتی در شرایط مختلف با دو مدل انتشار پرتو و انتشار موج قابل توجیه و مدل‌سازی است. مدل‌سازی مبتنی بر تئوری پرتو دارای حجم محاسبات کم‌تر بوده و در فرکانس‌های بالا پاسخ نسبتاً 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 می‌باشد. انتشار امواج صوتی در دریا را در فرکانس‌های بالاتر از ۵ kHz می‌توان به صورت پرتو یا خطی فرض کرد [۲۴]. هم‌چنین با بررسی دو روش انتشار، روش انتشار به صورت 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) بدست می‌آید [۲۵].

$$r = \frac{H^2}{A} \quad (1)$$

که در آن H عمق آب و A طول موج است. مثلاً برای فرکانس ۳۰ و عمق آب ۱۰۰ متر، r برابر ۲۰۰ کیلومتر خواهد شد. این مقدار برای فرکانس ۵ kHz با همان عمق برابر ۳۳ کیلومتر است. با توجه به

- 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 زاویه ای (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 این صورت تصویر هدف مبهم خواهد شد.
- در راستای حل مشکلات و چالش‌های ذکر شده، راه‌حل‌ها و روش‌های مختلفی برای رادار روزنه مصنوعی معکوس مانند استفاده از خاصیت تداخل‌سنجی [۱۷]، به‌کارگیری هندسه دویاچه [۱۸]، سیستم‌های چندآنتنه [۱۹-۲۱] و چندرودی-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 ذکر شده 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 کفایت با انتخاب روش تصویربرداری و با در نظر گرفتن محدودیت‌های کانال آب، الگوریتم و سناریوی تصویربرداری مناسب استخراج گردد.

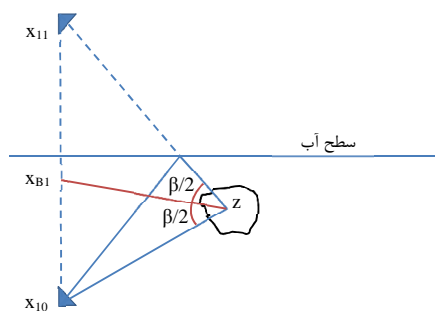
شده است. در این شکل که تصویر صحنه قرارگیری سونارها و هدف بر روی صفحه دوبعدی نشان داده شده است، ISAS چندپایه‌ای ایجاد گردیده است که پوشش زاویه‌ای بیشتری ایجاد نموده است. در واقع این ISAS چندپایه دارای n فرستنده و گیرنده واقعی و $2n$ فرستنده مجازی خواهد بود. در شکل (۲) در صورتی که تعداد ISAS های تک‌پایه افزایش یابد و ISAS چندپایه به صورت واقعی شکل گیرد، باز هم با استفاده از منابع مجازی شکل گرفته 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.



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

۳- روابط تصویرسازی

برای نوشتن روابط تصویرسازی و به دست آوردن الگوریتم آن، در ابتدا مساله فوق را به صورت 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.

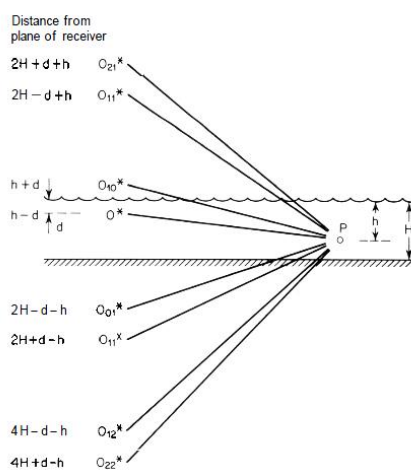


شکل (۳): هندسه قرارگیری دوپایه

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 به صورت رابطه (۲) نوشت [۲۶].

عمق به‌کارگیری و فرکانس‌های معمول در ISAS، فرض استفاده از روش انتشار به صورت پرتو در آب‌های کم‌عمق معقول به نظر می‌رسد لذا در این مقاله از این روش استفاده خواهیم کرد.

در تئوری انتشار به صورت پرتو، میدان صوتی به صورت مجموعه‌ای از پرتوهای صوتی نمایش داده می‌شود و هر یک 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 کم عمق قرار گرفته‌اند. تصویر O_{10} از منبع نسبت به سطح آب با شدت سیگنال منبع و شیفت فاز 180° 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 فرایند رفت و برگشتی ایجاد تصاویر از منابع می‌تواند تا بی‌نهایت ادامه داشته باشد اما از تصاویر مرتبه بالاتر به دلیل تضعیف ناشی از انعکاس‌های متوالی می‌توان صرف نظر کرد.



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

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، به دلیل ایجاد تصاویری از این منبع صوتی (ISAS موردنظر) نسبت به سطح آب و بستر دریا، می‌توان تصور کرد که چندین ISAS در آن محدوده قرار دارند و به عبارت دیگر ISAS چندپایه شکل خواهد گرفت. حال در صورت وجود هدفی متحرک، هر یک از این ISAS ها تصویری از آن هدف ایجاد می‌کنند که با تلفیق مناسب این تصاویر و با توجه به مبانی سیستم‌های چندپایه، تصویری با کیفیت‌تر از ISAS تک‌پایه ایجاد خواهد شد. به طور مثال در شکل (۲) فرض شده است که چند ISAS تک‌پایه در محدوده ای از آبهای کم‌عمق نصب شده‌اند و تصاویر ایجادی از این منابع صوتی نسبت به سطح آب و بستر دریا نشان داده

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

اگر سیگنال ارسالی توسط ISAS پالس چیرپ LFM^T در نظر گرفته شود، داریم:

$$p(t) = \text{rect}\left(\frac{t}{\tau}\right) e^{i(\pi K t^2 + 2\pi f_0 t)} \quad (7)$$

که در آن τ طول پالس، K نرخ چیرپ، f_0 فرکانس حامل و $\text{rect}(\cdot)$ تابع پنجره مستطیلی است و برای K های بزرگ خواهیم داشت [۲۶]:

$$P(f) \approx \sqrt{\frac{1}{K}} \text{rect}\left(\frac{f-f_0}{K\tau}\right) e^{-i\left[\frac{\pi(f-f_0)^2}{K} + \frac{\pi}{4}\right]} \quad (8)$$

در نتیجه داریم:

$$|P(f)|^2 = \frac{1}{K} \text{rect}\left(\frac{f-f_0}{K\tau}\right) \quad (9)$$

پس رابطه (۶) به صورت رابطه (۱۰) خواهد شد.

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

به طور مشابه داده های دریافتی ذخیره شده توسط ISAS اصلی به صورت رابطه (۱۱) خواهد شد.

$$D_2(f) = \frac{1}{K} \text{rect}\left(\frac{f-f_0}{K\tau}\right) \int_{\mathbb{R}^3} \frac{q(R^{-1}z) e^{-i2k(|z-x_{10}|)}}{(4\pi)^2 |z-x_{10}|^2} dz \quad (11)$$

۳-۱- الگوریتم قالب بندی قطبی^۲

در این بخش الگوریتم تصویرسازی قالب بندی قطبی مبتنی بر تئوری تفرق فوری^۴ که داده های اندازه گیری شده را به تبدیل فوری 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 صفحه ای در نظر گرفت.

مطابق این تئوری، طیف میدان پراکنده شده مستقیم اندازه گیری شده در راستای خط موازی با شکل موج تابیده شده، متناسب با تبدیل فوری 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}_{10} بردار یکه در راستای موج منتشره از x_{10} است، می توان رابطه تقریبی (۱۲) را نوشت [۲۸].

$$\frac{e^{-i2k(|z-x_{10}|)}}{(4\pi)^2 |z-x_{10}|^2} \approx \frac{e^{-i2k|x_{10}|}}{(4\pi)^2 |x_{10}|^2} e^{i2k\widehat{x}_{10} \cdot z} \quad (12)$$

به طور مشابه خواهیم داشت:

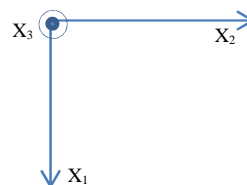
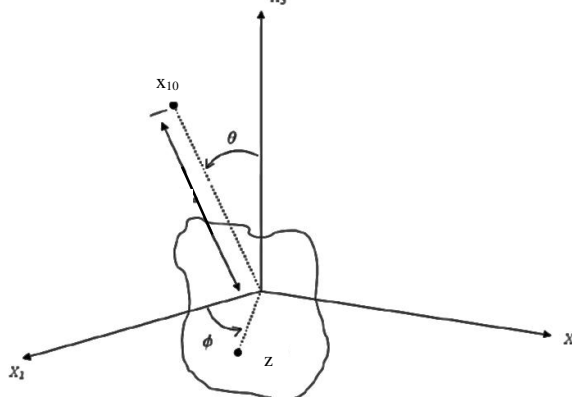
$$\frac{e^{-ik(|z-x_{10}|+|z-x_{11}|)}}{(4\pi)^2 |z-x_{10}| |z-x_{11}|} \approx \frac{e^{-ik(|x_{10}|+|x_{11}|)}}{(4\pi)^2 |x_{10}| |x_{11}|} e^{ik(\widehat{x}_{10}z + \widehat{x}_{11}z)} \quad (13)$$

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

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 می گردد، اگر مطابق شکل (۴)، هدف حول محور X_3 به اندازه φ و در خلاف جهت عقربه های ساعت بچرخد، ماتریس دوران $R(\varphi)$ را می توان به صورت رابطه (۳) نوشت.

$$R(\varphi) = \begin{bmatrix} \cos \varphi & -\sin \varphi & 0 \\ \sin \varphi & \cos \varphi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}_{X_3} \quad (3)$$



شکل (۴): نحوه چرخش هدف

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

$$V(z) = q(R^{-1}(\varphi)z) \quad (4)$$

در نتیجه رابطه (۲) را می توان به صورت رابطه (۵) بازنویسی کرد.

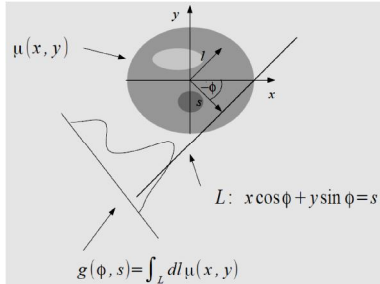
$$S(f) = P(f) \int_{\mathbb{R}^3} q(R^{-1}z) \frac{e^{-ik(|z-x_{10}|+|z-x_{11}|)}}{(4\pi)^2 |z-x_{10}| |z-x_{11}|} dz \quad (5)$$

در ساختارهای روزنه مصنوعی که از فشرده سازی پالس برای ارسال و دریافت سیگنال استفاده می شود، می توان با به کارگیری 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، داده های ذخیره شده توسط ISAS مجازی را می توان به صورت رابطه (۶) نشان داد.

$$D_1(f) = H(f) \cdot S(f) = P(f)^* \cdot S(f) \quad (6)$$

$$\mu(x, y) = \int_0^\pi \int_{-\infty}^{\infty} |K|G(K, \phi)e^{i2\pi Ks} dKd\phi \quad (16)$$

در این رابطه $\mu(x, y)$ تصویر جسم مورد نظر به دست آمده از تصویربرداری به روش توموگرافی محاسبه شده و با تبدیل رادون، $s = x \cos(\phi) + y \sin(\phi)$ تبدیل فوریه $G(K, \phi)$ نسبت به s و $g(s, \phi)$ تابش انجام شده با بردار s و زاویه ϕ در راستای خط L است.



شکل (۶): نمایش هندسی تصویربرداری به روش پس تابش [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 می کند و در محاسبات قابل حذف است و با توجه به مثبت بودن عبارات $|z - x_{10}|$ و $|z - x_{11}|$ به دلیل ماهیت فاصله، با تعریف ضرایب:

$$A_1 = K(4\pi)^2 |z - x_{10}| |z - x_{11}| \quad (17)$$

و

$$A_2 = K(4\pi)^2 |z - x_{10}|^2 \quad (18)$$

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

$$A_1 e^{-i\frac{2\pi f}{c}(x_{10}+x_{11})} D_1 = \mathcal{F}\{q(R^{-1}z)\} = Q_1(f, \phi) \quad (19)$$

$$A_2 e^{-i\frac{2\pi f}{c}(2x_{10})} D_2 = \mathcal{F}\{q(R^{-1}z)\} = Q_2(f, \phi) \quad (20)$$

اگر بخواهیم از روش پس تابش فیلترشده برای تصویرسازی سیگنال های دریافتی مندرج در روابط (۱۰) و (۱۱) استفاده کنیم، پارامتر μ در رابطه (۱۶) معادل I (تصویر مد نظر) 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. هم چنین 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 به- ترتیب به صورت روابط (۲۱) و (۲۲) قابل ایجاد خواهد بود.

$$I_1(z) = \int_0^\pi \int_{-\infty}^{\infty} |f| Q_1(f, \phi) e^{i\frac{2\pi f}{c}(2z)} df d\phi \quad (21)$$

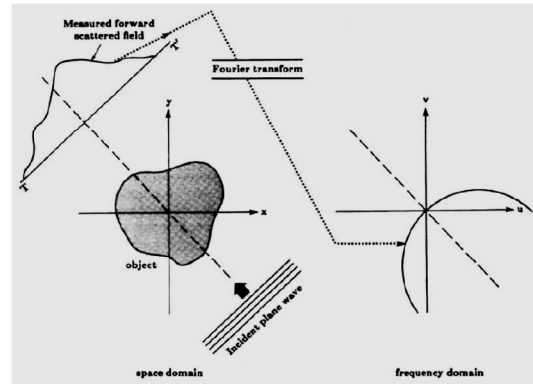
$$I_2(z) = \int_0^\pi \int_{-\infty}^{\infty} |f| Q_2(f, \phi) e^{i\frac{2\pi f}{c}(2z)} df d\phi \quad (22)$$

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

اگر فرض کنیم سیگنال های دریافتی از سونار در نقاط f_j و ϕ_k نمونه برداری شده باشند، داریم:

$$f_j = f_{min} + (j - 1)\Delta f \quad j = 1, 2, \dots, N_f \quad (23)$$

$$\phi_k = \phi_{min} + (k - 1)\Delta\phi \quad k = 1, 2, \dots, N_p \quad (24)$$



شکل (۵): نمایش هندسی تئوری تفرق فوریه [۲۷]

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

$$D_1(f) = (4\pi)^2 |x_{10}| |x_{11}| e^{-ik(|x_{10}|+|x_{11}|)} \cdot \frac{1}{K} rect\left(\frac{f-f_0}{K\tau}\right) \mathcal{F}_{\{q\}}(-2kR\widehat{x}_{10}, -2kR\widehat{x}_{11}) \quad (14)$$

$$D_2(f) = (4\pi)^2 |x_{10}|^2 e^{-i2k|x_{10}|} \cdot \frac{1}{K} rect\left(\frac{f-f_0}{K\tau}\right) \mathcal{F}_{\{q\}}(-2kR\widehat{x}_{10}) \quad (15)$$

در این روابط، ضرایب مزاد ایجاد شده نسبت به فیلتر تطبیقی ایده آل شامل عبارات $(4\pi)^2 |x_{10}|^2$ و $(4\pi)^2 |x_{10}| |x_{11}|$ ، جبران کننده تضعیف توان و عبارات $e^{-i2k|x_{10}|}$ و $e^{-ik(|x_{10}|+|x_{11}|)}$ ، جبران کننده آفست برد می باشند. روابط (۱۵) و (۱۶) نشان دهنده تناسب سیگنال دریافتی از هدف با تبدیل فوریه چگالی پراکندگی از هدف $(\mathcal{F}_{\{q\}}(\cdot))$ در نقاط $-2kR\widehat{x}_{10}$ و $-2kR\widehat{x}_{11}$ است.

در نتیجه می توان الگوریتم قالب بندی قطبی را در گام های زیر خلاصه نمود:

۱. نمونه برداری از سیگنال های دریافتی در بازه فرکانسی تعریف شده
۲. اعمال روش های مناسب جبران سازی حرکت انتقالی
۳. ایجاد مجموعه پروفایل برد
۴. درونیایی و تبدیل پروفایل های برد از حالت قطبی به حالت مستطیلی
۵. اعمال تبدیل فوریه معکوس برای هر پروفایل برد

۲-۳- الگوریتم پس تابش

الگوریتم پس تابش روشی مصطلح در ایجاد تصاویر رادارهای روزنه مصنوعی است که از اصول تصویربرداری به روش توموگرافی محاسبه- شده^۵ و تبدیل رادون^۶ استفاده می کند [۲۷].

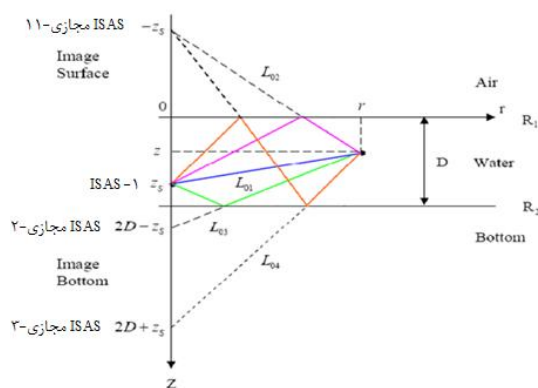
۳-۱- الگوریتم پس تابش فیلترشده

رابطه اصلی این روش که تصویر جسم مورد نظر را مشابه شکل (۶)، ایجاد می کند، به صورت رابطه (۱۶) است [۲۹]:

بر اساس قضیه معادل سازی دوپایه با تک پایه (MBET^v) و شکل (۳)، سطح مقطع پراکندگی هدف در حالت دوپایه معادل با سطح مقطع پراکندگی اندازه گیری شده در نیمساز زاویه بین تک پایه ها با رابطه (۲۹) است [۳۰].

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

که در آن σ_B سطح مقطع پراکندگی دوپایه، σ_M سطح مقطع پراکندگی تک پایه، θ جهت قرارگیری گیرنده، β زاویه دوپایه و f فرکانس کاری است. با استفاده از این قضیه و با فرض کوچک بودن β می توان تصویر ناشی از ادغام تصاویر ایجاد شده در حالت دوپایه را به دست آورد. برای حالت چندپایه نیز می توان با استفاده از همین خاصیت، تصویر نهایی را با در نظر گرفتن دو به دو تصاویر به دست آورد که در این مقاله از این روش استفاده شده است.



شکل (۷): ساختار فرض شده برای انتشار امواج در آب کم عمق [۳۱]

اگر فرض کنیم ISAS مدنظر مشابه شکل (۷) در کانالی کم عمق با عمق D واقع شده باشد و ساختار انتشار امواج در این کانال به گونه ای باشد که سه ISAS مجازی ایجاد شده باشد، تصاویر ناشی از ISAS-1 واقع در مکان $x_{11}(0, z_s)$ و ISAS مجازی-۱۱ واقع در مکان $x_{11}(0, -z_s)$ به ترتیب از روابط (۲۷) و (۲۸) به دست می آیند و تصویر معادل دوپایه این دو مشابه شکل (۳) در مکان x_{B1} به صورت رابطه (۳۰) است.

$$I_{B1}(z) = \frac{1}{N_p} \left(\sum_{k=1}^{N_p} A_{B1}(k) e^{i \frac{4\pi f}{c} \min(z(k))} \right) \cdot \text{IFFT}_{N_f} \{ H_{B1}(k, z) \} \quad (۳۰)$$

که در آن:

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

و

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

و

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

تصویر معادل ISAS سه پایه مستقر در مکان x_{B2} ناشی از ISAS دوپایه واقع در مکان x_{B1} و ISAS مجازی-۱۲ واقع در مکان

که در آن N_p و N_f به ترتیب تعداد نمونه های فرکانسی و پالس سونار هستند. با در نظر گرفتن:

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

و

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

می توانیم روابط ایجاد تصویر را به شکل رابطه (۲۷) پیاده سازی نماییم.

$$I_1(z) = \frac{1}{N_p N_f} \sum_{k=1}^{N_p} A_1(k) e^{i \frac{4\pi f}{c} \min(z(k))} \cdot \sum_{j=1}^{N_f} H_1(j, k) e^{i \frac{4\pi j D}{c}} \quad (۲۷)$$

$$= \frac{1}{N_p} \left(\sum_{k=1}^{N_p} A_1(k) e^{i \frac{4\pi f}{c} \min(z(k))} \right) \cdot \text{IFFT}_{N_f} \{ H_1(k, z) \}$$

به صورت مشابه داریم:

$$I_2(z) = \frac{1}{N_p} \left(\sum_{k=1}^{N_p} A_2(k) e^{i \frac{4\pi f}{c} \min(z(k))} \right) \cdot \text{IFFT}_{N_f} \{ H_2(k, z) \} \quad (۲۸)$$

در نتیجه می توان الگوریتم پس تابش فیلتر شده را در گام های زیر خلاصه نمود:

- ۱- نمونه برداری از سیگنال های دریافتی در بازه فرکانسی تعریف شده
- ۲- ایجاد مجموعه پروفایل برد (D) برای هر پالس
- ۳- به دست آوردن تابع H
- ۴- اعمال تابع فوریه معکوس به آن
- ۵- ایجاد گرید تصویر با استفاده از توابع فاصله $z(k)$ و فاز $e^{i \frac{4\pi f}{c} \min(z(k))}$
- ۶- درونبایی هر پالس تابع فوریه معکوس به درون گرید تصویر
- ۷- ایجاد تصویر نهایی با در نظر گرفتن تمامی پالس ها

۳-۳- تعمیم به حالت چندپایه

در بخش های قبل روابط تصویر سازی با الگوریتم های قالب بندی قطبی و پس تابش برای ISAS اصلی و مجازی به دست آمد. در واقع روابط فوق، تصویر ایجاد شده توسط ISAS اصلی و مجازی را به صورت جداگانه مدنظر قرار می دهد و تصویر نهایی باید از ادغام این دو تصویر به دست آید. در حالت چندپایه نیز می توان مشابه روابط به دست آمده، تصویر ایجاد شده توسط هر یک از ISAS های اصلی یا مجازی را به دست آورد و سپس با روشی مناسب اقدام به ادغام این تصاویر با هم و تشکیل تصویر نهایی نمود.

۴-۳- نویز محیط

در سیستم‌های آکوستیکی زیر آب، علاوه بر افت‌های ذکر شده 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 ایجاد شده 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 مولفه‌های غیر گاوسی هستند و ماهیتشان بستگی به منبع مولد آن‌ها دارد. اصلی‌ترین عوامل تشکیل دهنده 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 ۱۵۵۰ متر 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^۱ 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 به‌طور کلی 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 در خصوص بستر دریا به‌دلیل وجود تنوع و تعدد در لایه‌ها، پیچیدگی بیشتر است. به‌طور کلی 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 طرح شده، در 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

در 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.

در صورتی که مشابه شکل (۲) علاوه بر ISAS-1، ISAS‌های دیگری نیز مانند ISAS-2، ISAS-3، ISAS-n ... و ISAS-n در محدوده موردنظر قرار داشته باشند، می‌توان به‌همین روش تصویر هر یک را استخراج نمود و سپس با انواع روش‌های تلفیق تصاویر، به تصویر کامل‌تری از هدف مورد نظر دست یافت.

۴-۴- تأثیر محیط دریا بر روابط تصویرسازی

امواج آکوستیکی به‌هنگام انتشار در کانال زیر آب به‌دلایل 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 موثر در تصویرسازی سونار هستند که به‌طور خلاصه بررسی می‌شوند.

۴-۱- افت انتشار

به‌هنگام انتشار امواج آکوستیکی در آب یکی از مهم‌ترین پدیده‌های موثر، افت ناشی از انتشار هندسی امواج در آب است. این افت در آب-های عمیق به‌صورت کروی و در آب‌های کم عمق 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].

$$L_S = r^m \quad (34)$$

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

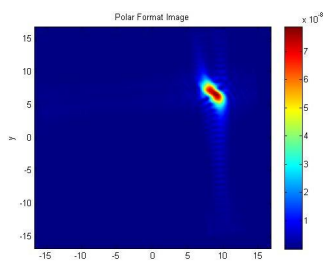
۴-۲- افت جذبی

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^۲ استفاده کرد که مشتمل بر سه جمله است که هر یک میزان تأثیر اسید بوریک، سولفات منیزیم و آب خالص را نشان می‌دهد:

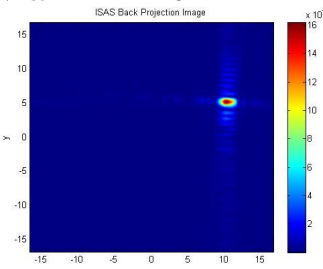
$$\alpha = A_1 P_1 \frac{f_1 f}{f_1^2 + f^2} + A_2 P_2 \frac{f_2 f}{f_2^2 + f^2} + A_3 P_3 f^2 \quad (35)$$

که در آن α میزان تضعیف بر حسب dB/Km و f فرکانس بر حسب 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^۳ که در فرکانس‌های کم‌تر از ۵۰ kHz قابل قبول است، استفاده شده است [۳۲].

ای با استفاده از ISAS تک پایه 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.



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



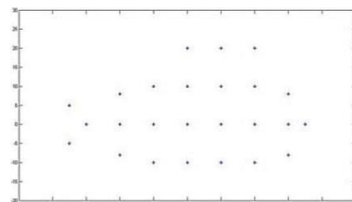
شکل (۱۰): تصویر هدف تک‌نقطه‌ای توسط ISAS با روش پس‌تابش

در شکل (۹) تصویر در مکان (۶/۴۶ و ۹) و در شکل (۱۰) 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 ایجاد شده به هدف نقطه‌ای نزدیک‌تر است.

برای بررسی دقیق‌تر کیفیت تصویر می‌توان به اندازه لوب اصلی و لوب‌های کناری در هر نقطه از هدف توجه نمود. بدین منظور از معیارهای^{۱۲} PSRLR که نشان‌دهنده نسبت بزرگ‌ترین لوب فرعی به لوب اصلی،^{۱۳} ISLR که بیان‌گر نسبت مجموع انرژی موجود در لوب‌های کناری به لوب اصلی،^{۱۴} IPRWR که نشانگر نسبت عرض لوب اصلی در ۱۵dB پایین‌تر از قله به عرض ۳dB پایین‌تر از قله و^{۱۵} IRW که نمایانگر عرض لوب اصلی پاسخ ضربه در ۳dB پایین‌تر از قله است، استفاده می‌کنیم. شکل‌های (۱۱) و (۱۲) نمودارهای برد و سمت به-دست آمده 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 خصوصا در سمت، بهبود یافته است. با توجه به معیارهای ISLR و PSRLR که نشان‌دهنده وضعیت لوب‌های جانبی است، وضعیت لوب‌های جانبی در روش پس‌تابش در حوزه برد (به جز اولین لوب فرعی) بهبود یافته است. به‌طور کلی 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.

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 به منظور جبران‌سازی حرکات انتقالی، هدف دارای حرکت چرخشی مطلق می‌باشد. 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 گرفته شده برای زیردریایی به‌عنوان هدف

در شبیه‌سازی کانال، افت‌های انتشار و جذبی در نظر گرفته شده 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 (تقریبا برابر ۱۵۰۰ متر بر ثانیه) و در شبیه‌سازی استفاده می‌شود. پارامترهای شبیه‌سازی مطابق با جدول (۱) در نظر گرفته شده است.

جدول (۱): پارامترهای شبیه‌سازی

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

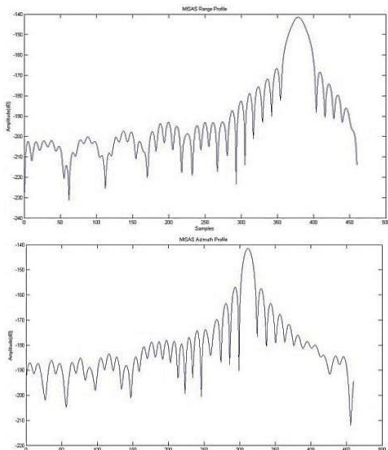
۵-۱- شبیه‌سازی اول

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، در نظر گرفته شده است. نتایج تصویرسازی برای هدف تک‌نقطه-

به حالت ISAS مشاهده نمود. تقویت دامنه تصویر در MISAS نسبت به ISAS نیز از بهبودهای قابل توجه است.

جدول (۲): مقایسه کیفیت تصویر هدف نقطه‌ای

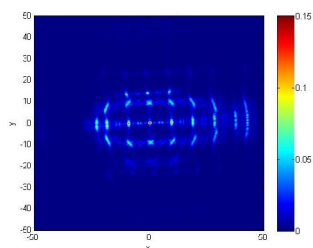
MISAS	ISAS		معیار کیفیت تصویر
	پس تابش فیلتر شده	قالب بندی قطبی	
-۱۵/۶	-۱۵/۱	-۱۸	PSLR در سمت (dB)
-۲۵/۳	-۲۶/۳	-۳۸	PSLR در برد (dB)
-۳۹/۴۵	-۲۸/۰۶	-۳۱/۸۲	ISLR در سمت (dB)
-۴۰/۸۲	-۴۶/۱۸	-۴۱/۹۸	ISLR در برد (dB)
۱۰/۴۸	۹/۲۵	۱۹/۴۶	IRW در سمت (نمونه)
۱۴/۹۶	۱۸/۴۷	۱۹/۲۶	IRW در برد (نمونه)
۱/۹۷	۲/۱۱	۲/۷۹	IPRWR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



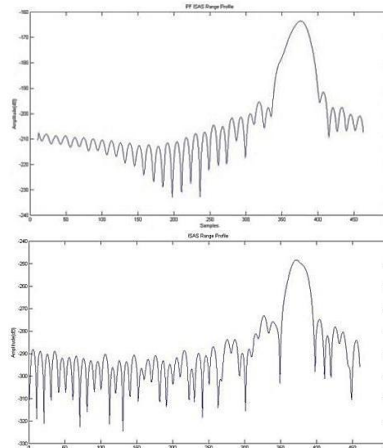
شکل (۱۴): نمودارهای برد و زاویه هدف تک نقطه‌ای با الگوریتم پس تابش فیلتر شده توسط MISAS، (بالا) نمودار برد، (پایین) نمودار زاویه

۵-۲- شبیه سازی دوم

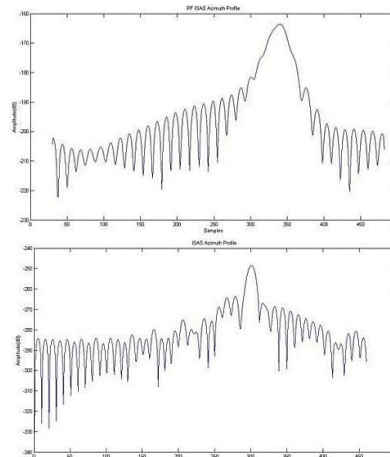
نتایج تصویرسازی برای هدف زیردریایی مفروض در فاصله ۶۵۰ متری با استفاده از ISAS تک پایه با روش‌های قالب بندی قطبی و پس تابش فیلتر شده در شکل‌های (۱۵) و (۱۶) و با استفاده از MISAS پیشنهادی در شکل (۱۷) نمایش داده شده است. بهبود کیفیت تصویر ایجاد شده با استفاده از MISAS پیشنهادی در این شبیه سازی نیز مشهود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



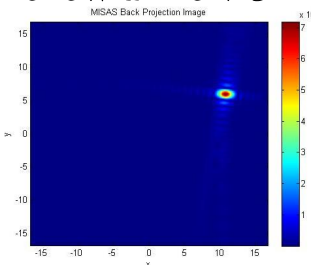
شکل (۱۵): تصویر زیردریایی توسط ISAS با روش قالب بندی قطبی



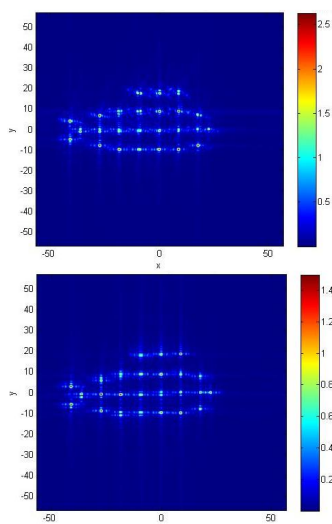
شکل (۱۱): نمودار برد هدف تک نقطه‌ای توسط ISAS، (بالا) با الگوریتم قالب بندی قطبی، (پایین) با الگوریتم پس تابش فیلتر شده



شکل (۱۲): نمودار زاویه هدف تک نقطه‌ای توسط ISAS، (بالا) با الگوریتم قالب بندی قطبی، (پایین) با الگوریتم پس تابش فیلتر شده



شکل (۱۳): تصویر هدف تک نقطه‌ای توسط MISAS با روش پس تابش با در نظر گرفتن اثرات انتشار پرتوهای صوتی در آب‌های کم عمق و ایجاد MISAS، نتایج شبیه سازی برای هدف تک نقطه‌ای با روش پس تابش فیلتر شده در شکل (۱۳) آمده است که از لحاظ بصری تصویر مناسب تری از هدف تک نقطه‌ای نسبت به شکل (۱۰) ایجاد کرده است. در شکل (۱۳) تصویر در مکان (۵/۹۶ و ۱۰/۸۵) ایجاد شده است که نشان دهنده دقت مکانی بهتر و کاهش معیار خطای ALE در MISAS پیشنهادی است. با مراجعه به شکل (۱۴) و ستون انتهایی جدول (۲) نیز می توان بهبود وضعیت MISAS را به طور کلی نسبت

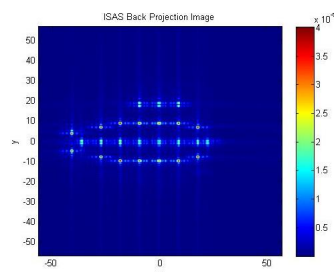


شکل (۱۹): تصویر ایجاد شده از هدف زیردریایی با الگوریتم پس تابش فیلتر شده، (بالا) در فاصله ۱۰۰ متری، (پایین) در فاصله ۵۰۰ متری

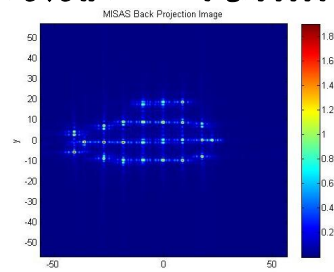
از منابع مجازی ناشی از انتشار امواج صوتی در آب‌های کم عمق پیشنهاد و بررسی شد. در ادامه پس از بررسی روابط تصویربرداری با الگوریتم قالب بندی قطبی در حالت میدان دور، برای اولین بار الگوریتم پس تابش فیلتر شده برای سونار روزنه مصنوعی معکوس چندپایه پیشنهادی در حالت کلی استخراج گردید و تصویرسازی از اهداف با هر دو الگوریتم بررسی و شبیه سازی شد. نتایج نشان داد که تصاویر ایجاد شده از اهداف متحرک زیر آب توسط روش پس تابش فیلتر شده دارای کیفیت بهتری نسبت به الگوریتم قالب بندی قطبی است. علاوه بر این با توجه به روابط استخراج شده در روش پس تابش فیلتر شده، تصویرسازی از اهداف در این روش به فاصله آنها بستگی ندارد.

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, September 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,"



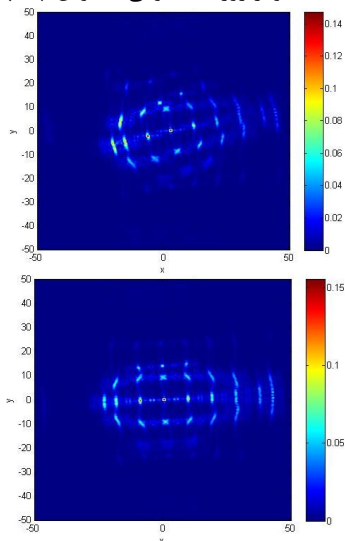
شکل (۱۶): تصویر زیردریایی توسط ISAS با روش پس تابش فیلتر شده



شکل (۱۷): تصویر زیردریایی توسط MISAS با روش پس تابش فیلتر شده در تصاویر (۱۸) و (۱۹) نتایج تصویربرداری از هدف واقع در در فواصل ۱۰۰ و ۵۰۰ متری نشان داده شده است. با کاهش فاصله تا هدف، کیفیت تصویربرداری با روش قالب بندی قطبی کاهش می یابد چرا که در روابط آن از فرض میدان دور استفاده شده است اما در روش پس تابش، تغییر فاصله تاثیر محسوسی در کیفیت تصویر ایجاد نمی کند و تنها با افزایش فاصله، به دلیل افزایش افت ناشی از انتشار و جذب امواج آکوستیکی در آب، کمی باعث افت کیفیت تصویر خواهد شد.

۶- نتیجه گیری

در این مقاله پس از بررسی سونار روزنه مصنوعی معکوس و چالش های به کارگیری آن، ایده سونار روزنه مصنوعی معکوس چندپایه با استفاده



شکل (۱۸): تصویر ایجاد شده از هدف زیردریایی با الگوریتم قالب بندی قطبی، (بالا) در فاصله ۱۰۰ متری، (پایین) در فاصله ۵۰۰ متری

- [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*, 3d 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, 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*, Lecture5 from BME I5000: Biomedical Imaging Course, City College of New York, <http://bme.cuny.edu/faculty/parra/teaching/med-imaging/>.
- [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.
- [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 and 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 and et al., "On 2D-Imaging Algorithm for Underwater Target in Near-Field," *Congress on Image and Signal Processing (CISP'08)*, Vol. 3, pp. 791-795, IEEE, 2008.
- [14] H. Parmeswaran and et al., "Cross-range imaging of a cooperative source using passive inverse synthetic aperture technique," *IEEE International Underwater Technology Symposium (UT)*, pp. 1-7, IEEE, 2013.
- [15] M. Martorella, "Introduction to Inverse Synthetic Aperture Radar," *International Radar Conference*, IEEE, 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 & Electronic Engineering in University College London, 2001.
- [18] Zh. Zhu, Y. Zhang and Z. Tang, "Bistatic inverse synthetic aperture radar imaging," *International Radar Conference*, pp. 354-358, IEEE, 2005.
- [19] M. Soumekh, *Synthetic aperture radar signal processing with MATLAB algorithms*, New York, Wiley 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] Ch. Ma and 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 Zh. Yunhua, "3D ISAR imaging based on MIMO radar array," *2nd Asian-Pacific Conference on Synthetic Aperture Radar (APSAR 2009)*, pp. 1018-1021, IEEE, 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.

زیر نویس ها

- 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