

## تحلیل عملکرد سونار روزنه مصنوعی معکوس چندپایه در تصویرسازی از اهداف زیر آب

جواد تقی‌زاده<sup>۱</sup>، سید علیرضا سیدین<sup>۲</sup>

<sup>۱</sup>دکترای مهندسی برق- مخابرات، دانشگاه فردوسی مشهد

<sup>۲</sup>دانشیار گروه برق دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد، seyedin@um.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۳۹۵/۰۴/۱۶ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۵/۰۷/۱۷

### چکیده

به منظور تصویرسازی آکوستیکی از اهداف متحرک زیر آب می‌توان از ایده سونار روزنه مصنوعی معکوس چندپایه بهره برد. هرچند الگوریتم تصویرسازی مناسب برای این موضوع پیشنهاد شده است اما پارامترهای مختلف دخیل در آن بررسی و تحلیل نشده‌اند. در این مقاله پس از مرور ایده سونار مربوطه و الگوریتم تصویرسازی در آن، برای اولین بار به بررسی تحلیلی عوامل مؤثر بر تصویرسازی از اهداف متحرک زیر آب مانند ابعاد، عمق، فاصله و نحوه حرکت هدف، مشخصات و عمق قرارگیری سونار و پارامترهای مختلف کانال آب در این نوع سونار پرداخته خواهد شد و شرایط و محدودیت‌های تصویرسازی در شرایط عملی استخراج خواهد شد. با انجام شبیه‌سازی تاثیر تغییرات این پارامترها در تصویر ایجاد می‌شود. هدف، نتایج تحلیل‌های صورت گرفته ارزیابی و صحت‌گذاری خواهد شد.

### کلیدواژه

سونار روزنه مصنوعی معکوس (ISAS)، سونار روزنه مصنوعی معکوس چندپایه (MISAS)، منبع مجازی، الگوریتم پس تابش

### مقدمه

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 بدست 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 [۲]. 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 جبران سازی گردد.

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 بکار گرفته شده و نتایج آن برای دو نوع متفاوت هدف مورد بررسی قرار گرفته است [۳]. در [۴-۸] نیز که به زبان چینی منتشر شده‌اند، روش‌های مختلف تشکیل تصویر در ISAS مورد بررسی قرار گرفته است. در مقالات پراکنده دیگری نیز به

به دلیل امکان بهره‌گیری از امواج صوتی در زیر آب، استفاده از سونار راهکار مناسبی برای تصویربرداری آکوستیکی 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 اشیای زیر آب تبدیل شده است [۱]. 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 بدست 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 نوع زاویه‌ای در داده‌ها، برای جداسازی نقاط در راستای محور زاویه‌ای (عمود بر برد) استفاده می‌شود. در حالیکه 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

<sup>1</sup> Synthetic Aperture Sonar

<sup>2</sup> Synthetic Aperture Radar

<sup>3</sup> Inverse Synthetic Aperture Sonar

<sup>4</sup> Scatterer

هدف شامل انواع حرکت، فاصله، عمق و ابعاد هدف، مشخصات سونار شامل عمق قرارگیری، فرکانس و توان سیگنال ارسالی، شرایط کانال آب شامل افت انتشار، افت جذبی، نویز محیط، سرعت صوت، سطح آب و بستر دریا، عمق کانال و تاثیر این موارد بر تصاویر ایجادی مورد بررسی و شبیه‌سازی قرار خواهد گرفت و در بخش نتیجه‌گیری، به جمع‌بندی مطالب پرداخته خواهد شد.

### سونار روزنه مصنوعی معکوس چندپایه

به منظور تشریح ساختار و نحوه عملکرد MISAS لازم است به-طور مختصر به نحوه انتشار امواج صوتی در آب پرداخته شود.

#### 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 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 کم-تر 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 [۲۲]. از لحاظ صوتی به جایی کم‌عمق 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 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 [۲۳].

انتشار موج صوتی در شرایط مختلف با مدل‌های انتشار پرتو و انتشار موج قابل توجیه و مدل‌سازی است. تمامی مدل‌های انتشار موج مبتنی بر معادله موج می‌باشند. این معادله رابطه بین مشتقات مرتبه دوم زمانی و مکانی فشار صوت است. روش-های 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

ISAS اشاره شده است که از جنبه‌های مختلفی به بررسی موضوع پرداخته‌اند [۹-۱۲].

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

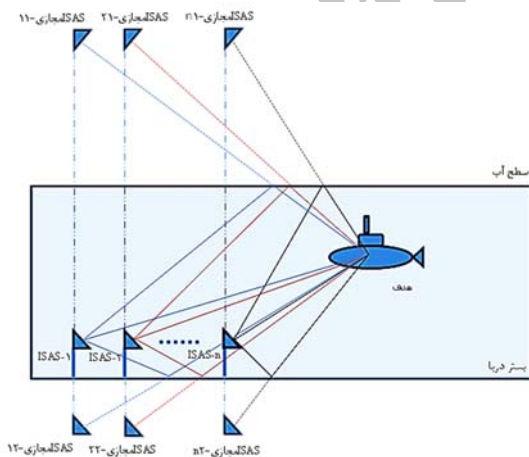
- لزوم دانستن سرعت و جهت حرکت هدف (دارا بودن رفتار همکارانه) برای تشکیل تصویر
- وابستگی جهت صفحه انعکاس تصویر دوبعدی از هدف سه‌بعدی به مکان سونار و حرکات هدف و پیچیدگی تفسیر تصویر ایجادی و شناسایی هدف
- نامشخص بودن رزولوشن زاویه‌ای در تصویر و وابستگی به بردار چرخش نسبی بین سونار و هدف در اهداف با رفتار غیر همکارانه
- لزوم مانوردهنده نبودن هدف برای حذف حرکت انتقالی هدف و رسیدن به حرکت چرخشی مطلق برای ایجاد تصویر
- امکان‌پذیر نبودن ایجاد تصویر در برخی از سناریوهای حرکتی مانند حرکت مستقیم الخط هدف به سمت سونار (حرکت در راستای خط دید) به دلیل عدم تغییر زاویه نسبی

در راستای حل مشکلات و چالش‌های ذکر شده، راه‌حل‌ها و روش‌های مختلفی برای رادار روزنه مصنوعی معکوس مانند استفاده از خاصیت تداخل‌سنجی [۱۳]، بکارگیری هندسه دوپایه [۱۴]، سیستم‌های چندآنتنه [۱۵-۱۷] و چندورودی-چندخروجی [۱۸-۱۹] ارائه شده است.

در [۲۰] برای اولین بار ساختار سونار روزنه مصنوعی معکوس چندپایه<sup>۵</sup> (MISAS) با استفاده از منابع مجازی برای تصویرسازی از اهداف متحرک زیر آب پیشنهاد شده است که علاوه بر موارد اشاره شده به مسائل مربوط به کانال آب و نحوه انتشار صوت در زیر آب و تفاوت‌های ذاتی ISAR و ISAS نیز پرداخته است. در [۲۱] نیز الگوریتم تصویربرداری مناسب برای MISAS استخراج شده است. از آنجا که در [۲۰ و ۲۱] شرایط مختلف مربوط به هدف مانند ابعاد و اندازه، عمق قرارگیری و نحوه حرکت، شرایط مربوط به عمق و فاصله بین سونارها و همچنین تاثیر پارامترهای مختلف کانال آب مانند عمق کانال، دما، میزان شوری آب و سرعت صوت، میزان نویزهای صوتی، شرایط آب و هوایی و جنس بستر دریا مورد بررسی و تحلیل قرار نگرفته‌اند، در این مقاله برای اولین بار به بررسی و تحلیل شرایط مختلف تصویرسازی توسط MISAS و عوامل موثر در آن می‌پردازیم. در ادامه پس از معرفی MISAS و روابط تصویرسازی مربوطه، در بخش‌های بعد به ترتیب مشخصات

<sup>5</sup> Multi-static Inverse Synthetic Aperture Sonar

شکل ۱. تصاویر منبع ایجادی در آب کم عمق در انتشار به صورت پرتو [۲۲] با توجه به مطالب فوق و با فرض قرارگیری در شرایط آب کم عمق، اگر فرض کنیم یک ISAS در عمق مناسبی از آب ثابت شده باشد، به دلیل 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 به عبارت دیگر چند پایه ISAS چند پایه شکل خواهد گرفت. حال در صورت وجود هدفی متحرک، هر یک از این ISAS ها تصویری از آن هدف ایجاد می کنند که با تلفیق مناسب این تصاویر و با توجه به مبانی سیستم های چند پایه، تصویری با کیفیت تر از ISAS تک پایه ایجاد خواهد شد. به طور مثال در شکل (۲) فرض شده است که چند ISAS تک پایه در محدوده ای از آب های کم عمق نصب شده اند و تصاویر ایجادی 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 چند پایه ای ایجاد گردیده است که پوشش زاویه ای بیشتری ایجاد نموده است. در واقع این ISAS چند پایه دارای n فرستنده و گیرنده واقعی و ۲n فرستنده مجازی خواهد بود. در شکل (۲) در صورتی که تعداد ISAS های تک پایه افزایش یابد و ISAS چند پایه به صورت واقعی شکل گیرد، باز هم با استفاده از منابع مجازی شکل گرفته در بالای سطح آب و زیر بستر دریا می توان به ISAS چند پایه کامل تری دست یافت که با افزایش تعداد فرستنده ها، منطقه تحت نظر را تحت پوشش زاویه ای و مکانی بهتری قرار خواهد داد و چندگانگی مکانی حاصل خواهد شد.



شکل ۲. ایده سونار روزنه مصنوعی معکوس چند پایه (MISAS) [۲۰]

### روابط تصویر سازی

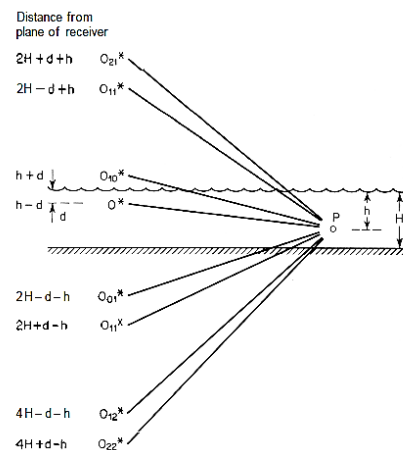
در این مقاله، روابط تصویر سازی در MISAS با استفاده از الگوریتم پس تابش فیلتر شده استخراج شده در [۲۱] که نسبت

مشکل می باشد. مدل سازی مبتنی بر تئوری پرتو دارای حجم محاسبات کم تر بوده و در فرکانس های بالا پاسخ نسبتاً مناسبی می دهد. انتشار امواج صوتی در دریا را در فرکانس های بالاتر از ۵ kHz می توان به صورت پرتو یا خطی فرض کرد [۲۲]. هم چنین با بررسی دو روش انتشار، روش انتشار به صورت پرتو در فواصل کوتاه، برای استفاده بسیار راحت تر است. روش انتشار مدهای نرمال برای فواصل بیشتر مناسب است. فاصله مرزی r جهت سهولت استفاده بین این دو روش انتشار، از رابطه (۱) بدست می آید [۲۳].

$$r = \frac{D^2}{\lambda} \quad (1)$$

که در آن D عمق آب و  $\lambda$  طول موج است. مثلاً این مقدار برای فرکانس ۵ kHz و عمق آب ۱۰۰ متر، 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 به صورت پرتو، میدان صوتی به صورت مجموعه ای از پرتوهای صوتی نمایش داده می شود و هر یک از آن ها از منبع صوت یا تصویر آن نسبت به سطح آب یا کف دریا ساطع می شوند. در شکل (۱) یک منبع صوتی در نقطه O و یک گیرنده در نقطه P در یک کانال کم عمق قرار گرفته اند. تصویر O<sub>10</sub> از منبع نسبت به سطح آب با شدت سیگنال منبع و شیفت فاز ۱۸۰ درجه به عنوان نمایانگر انعکاس سطح آب اضافه شده است. برای نشان دادن انعکاس بستر دریا زوج تصاویر O<sub>01</sub> و O<sub>11</sub> اضافه شده است. مجدداً با توجه به قابلیت انعکاس سطح آب، تصاویر منابع O<sub>01</sub> و O<sub>11</sub>، تصاویر O<sub>21</sub> و O<sub>11</sub> اضافه شده اند. 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 می تواند تا بی نهایت ادامه داشته باشد اما از تصاویر مرتبه بالاتر به دلیل تضعیف ناشی از انعکاس های متوالی می توان صرف نظر کرد.

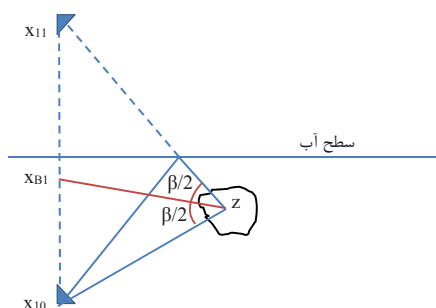


$$H_2(j, k) = f_j D_2(j, k) e^{-i \frac{2\pi f_j}{c} (2x_{10})} \quad (9)$$

و

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

در حالت چندپایه می‌توان مشابه روابط به‌دست آمده، تصویر ایجاد‌ی توسط هر یک از ISASهای اصلی یا مجازی را به‌دست آورد و سپس با روشی مناسب اقدام به ادغام این تصاویر با هم و تشکیل تصویر نهایی نمود. برای اطلاع از چگونگی استخراج روابط تصویرسازی فوق به [۲۱] مراجعه نمایید.



شکل ۳. هندسه قرارگیری دوپایه

بر اساس قضیه معادل‌سازی دوپایه با تک‌پایه (MBET) و شکل (۳)، سطح مقطع پراکندگی هدف در حالت دوپایه معادل با سطح مقطع پراکندگی اندازه‌گیری شده در نیمساز زاویه بین تک‌پایه‌ها با رابطه (۱۰) است [۲۴].

$$\sigma_B(\theta = \beta, f) = \sigma_M(\theta = \frac{\beta}{2}, f \sec(\frac{\beta}{2})) \quad (11)$$

که در آن  $\sigma_B$  سطح مقطع پراکندگی دوپایه،  $\sigma_M$  سطح مقطع پراکندگی تک‌پایه،  $\theta$  جهت قرارگیری گیرنده،  $\beta$  زاویه دوپایه و  $f$  فرکانس کاری است. با استفاده از این قضیه و با فرض کوچک بودن  $\beta$  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 دو به دو تصاویر به‌دست آورد.

اگر فرض کنیم ISAS مدنظر مشابه شکل (۴) در کانالی کم عمق 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  $x_{11}(0, z_s)$  و ISAS مجازی-۱۱ واقع در مکان  $x_{11}(0, -z_s)$  به‌ترتیب از روابط (۲) و (۷) به‌دست می‌آیند و تصویر معادل دوپایه این دو مشابه شکل (۳) در مکان  $x_{B1}$  به‌صورت رابطه (۱۲) است.

$$I_{B1}(z) = \frac{1}{N_p} \left( \sum_{k=1}^{N_p} A_{B1}(k) e^{i \frac{4\pi f \min(z(k))}{c}} \right). \text{IFFT}_{N_f} \{H_{B1}(k, z)\} \quad (12)$$

به روش‌های برد-داپلر و قالب‌بندی قطبی عملکرد بهتری دارد، مرور خواهد شد. در این روش تصویر ایجاد‌ی از ISAS اصلی با ارسال سیگنال پالس چیرپ LFM با طول پالس  $\tau$ ، نرخ چیرپ  $K$  و فرکانس حامل  $f_0$  و با فرض همه‌جهته بودن فرستنده و گیرنده به‌صورت رابطه (۲) است.

$$I_1(z) = \frac{1}{N_p} \left( \sum_{k=1}^{N_p} A_1(k) e^{i \frac{4\pi f \min(z(k))}{c}} \right). \text{IFFT}_{N_f} \{H_1(k, z)\} \quad (2)$$

که در آن  $N_p$  تعداد نمونه‌های پالسی سونار،  $f_{\min}$  کمترین نمونه فرکانسی از سیگنال دریافتی از سونار،  $c$  سرعت انتشار صوت در آب،  $z$  مکان هدف با توجه به شکل (۳)،  $N_f$  تعداد نمونه‌های فرکانسی سونار است و همچنین

$$A_1 = K(4\pi)^2 |z - x_{10}| |z - x_{11}| \quad (3)$$

و

$$H_1(j, k) = f_j D_1(j, k) e^{-i \frac{2\pi f_j}{c} (x_{10} + x_{11})} \quad (4)$$

و

$$D_1(f) = (4\pi)^2 |x_{10}| |x_{11}| e^{-ik(x_{10} + |x_{11}|)} \frac{1}{K} \text{rect} \left( \frac{f - f_0}{K\tau} \right) \mathcal{F}_{(q)}(-2kR\hat{x}_{10}, -2kR\hat{x}_{11}) \quad (5)$$

که در آن‌ها  $x_{10}$  مکان ISAS،  $x_{11}$  مکان ISAS مجازی-۱۱،  $\text{rect}(\cdot)$  تابع پنجره مستطیلی،  $q$  چگالی پراکندگی ایستاز هدف و  $\mathcal{F}_{(q)}(-2kR\hat{x}_{10}, -2kR\hat{x}_{11})$  تبدیل فوریه چگالی پراکندگی از هدف در نقاط  $-2kR\hat{x}_{10}$  و  $-2kR\hat{x}_{11}$  است. همچنین سیگنال‌های دریافتی از سونار در نقاط  $f_j$  و  $\phi_k$  نمونه-برداری شده اند و داریم:

$$f_j = f_{\min} + (j - 1)\Delta f \quad j = 1, 2, \dots, N_f \quad (6)$$

به‌صورت مشابه تصویر ایجاد‌ی از منابع مجازی را نیز می‌توان مشابه رابطه (۲) به‌دست آورد. به‌عنوان مثال رابطه تصویر ایجاد‌ی از منبع مجازی اول (ISAS مجازی-۱۱) به‌صورت رابطه (۷) است.

$$I_2(z) = \frac{1}{N_p} \left( \sum_{k=1}^{N_p} A_2(k) e^{i \frac{4\pi f \min(z(k))}{c}} \right). \text{IFFT}_{N_f} \{H_2(k, z)\} \quad (7)$$

که در آن

$$A_2 = K(4\pi)^2 |z - x_{10}|^2 \quad (8)$$

و

6 Range-Doppler

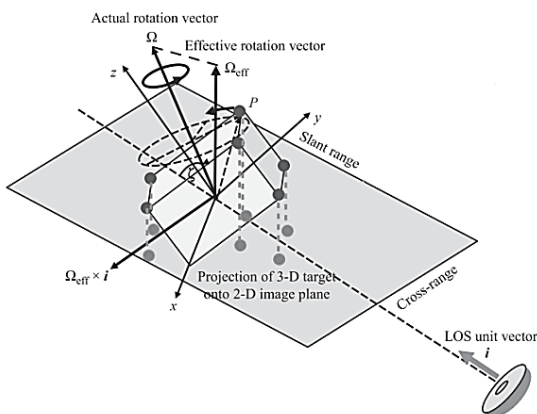
7 Polar formatting

8 Stationary Scattering Density

9 Monostatic to Bistatic Equivalence Theorem

در صورتی که هدف دارای حرکت انتقالی باشد، سرعت و شتاب حرکت را می‌توان به دو مولفه در راستای خط دید هدف و عمود بر خط دید هدف تجزیه کرد. مولفه در راستای خط دید، تغییر فرکانس داپلر ایجاد می‌کند اما مولفه عمود بر راستای خط دید، تغییر در زاویه دید ایجاد خواهد کرد که تاثیر آن مشابه حرکت چرخشی هدف است.

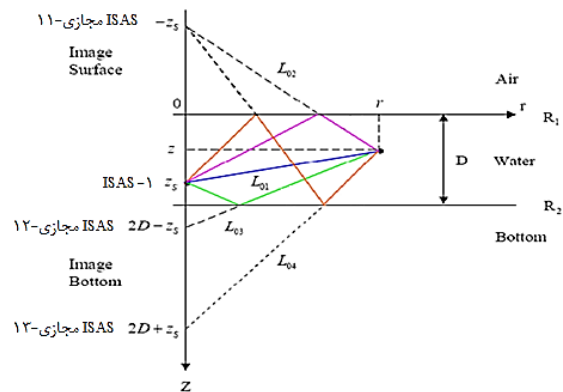
هنگامی که هدف دارای حرکات رول، پیچ و سمت باشد بردار چرخش ترکیبی  $\Omega$ ، شیفت داپلر یک پراکنده‌ساز مشخص در هدف را تعیین می‌کند. مطابق شکل (۵) بردار چرخش موثر  $\Omega_{eff}$  برداری عمود بر  $i$  بردار یک خط دید و واقع در صفحه‌ای است که بردارهای  $\Omega$  و  $i$  در آن قرار دارند. بنابراین صفحه انعکاس هدف به صورت صفحه‌ای تعریف می‌شود که  $\Omega_{eff}$  بر آن عمود است و بردار  $i$  در آن قرار می‌گیرد.



شکل ۵. صفحه انعکاس تصویر در ISAS [۲۶]

در فرایند جبران‌سازی حرکت استاندارد با انجام اصلاح برد، پراکنده‌سازها در سلول‌های برد و با اصلاح فاز، شیفت فرکانس داپلر به صورت ثابت، حفظ می‌شوند. در نتیجه پس از انجام جبران‌سازی حرکت، تمامی پراکنده‌سازهای هدف با توجه به شیفت داپلر ثابت، در حال حرکت با سرعت ثابت و با توجه به برد ثابت، مشابه شکل (۶) در راستای دایره‌ای قرار خواهند گرفت.

اگر هدف دارای حرکت یکنواخت باشد، روش جبران‌سازی حرکت استاندارد با استفاده از تبدیل فوریه برای ایجاد تصویر متمرکز شده از هدف کافی است اما در صورتی که هدف دارای حرکات پیچیده باشد، با توجه به جابجایی پراکنده‌سازها از سلول‌های برد و شیفت داپلر متغیر با زمان، روش استاندارد مبتنی بر تبدیل فوریه برای ایجاد تصویر مناسب کافی نخواهد بود و باید از روش‌های پیچیده‌تر و تبدیل‌های زمان-فرکانس استفاده نمود. البته لازم به ذکر است که معمولاً اهداف دریایی مدنظر دارای حرکات پیچیده نیستند.



شکل ۴. ساختار فرض شده برای انتشار امواج در آب کم عمق [۲۵]

که در آن

$$H_{B1}(j, k) = f_j D_{B1}(j, k) e^{-i \frac{2\pi f_j}{c} (2x_{B1})} \quad (13)$$

و

$$A_{B1} = K(4\pi)^2 |z - x_{B1}|^2 \quad (14)$$

و

$$D_{B1}(f) = \frac{1}{K} \text{rect}\left(\frac{f-f_0}{K\tau}\right) \int_{\mathbb{R}^3} q(R^{-1}z) \frac{e^{-i2k(z-x_{B1})}}{(4\pi)^2 |z-x_{B1}|^2} dz \quad (15)$$

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  $x_{12}(0, 2D-z_s)$  نیز به روش مشابه محاسبه خواهد شد. در ادامه تصویر معادل MISAS مدنظر از محاسبه تصویر ناشی از ISAS سه پایه مستقر در  $x_{B2}$  و ISAS مجازی-۱۳ مستقر در مکان  $x_{13}(0, 2D+z_s)$  به دست خواهد آمد.

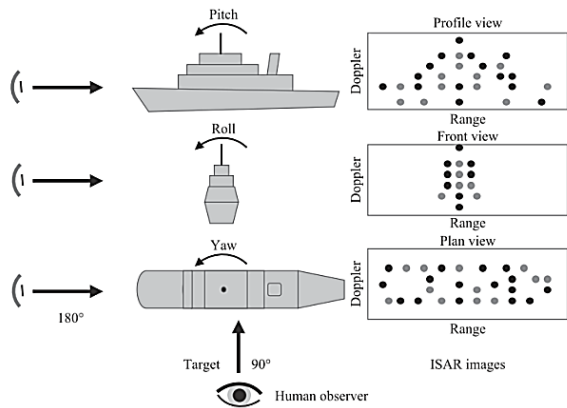
در صورتی که مشابه شکل (۲) علاوه بر ISAS-1، ISAS‌های دیگری نیز مانند ISAS-2، ISAS-3، ... و ISAS-n در محدوده موردنظر قرار داشته باشند، می‌توان به همین روش تصویر هر یک را استخراج نمود و سپس با تلفیق تصاویر، به تصویر کامل-تری از هدف مورد نظر دست یافت.

### مشخصات هدف

تصویر ایجاد شده از هدف متحرک زیر آب وابسته به مشخصاتی از هدف همچون نحوه حرکت هدف، فاصله هدف از سونار، عمق قرارگیری هدف و ابعاد هدف است که در ادامه این موارد بررسی می‌شود.

### حرکت هدف

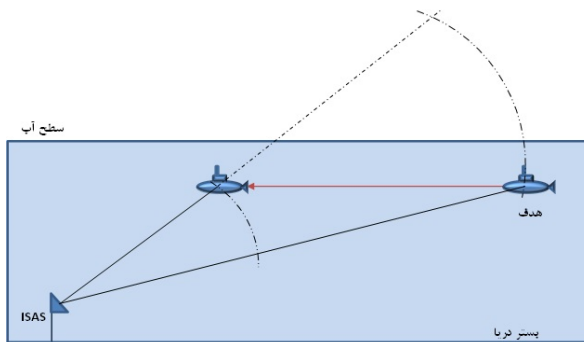
حرکت یک هدف متحرک ممکن است دارای شش درجه آزادی شامل سه حرکت خطی در راستای سه محور و سه حرکت زاویه‌ای حول سه محور مختصات باشد که در ساختار روزنه مصنوعی معکوس تنها حرکات چرخشی ایجاد تصویر می‌نمایند.



شکل ۷. نمای جانبی، روبرو و بالای هدف از دید چشم ناظر و ISAS [۲۶]

### ۱- حرکت مستقیم الخط

در صورتی که مشابه شکل (۸)، هدف در صفحه عمودی مشتمل بر هدف و سونار به صورت مستقیم حرکت کند، با فرض انجام جبران‌سازی در برد، حرکت چرخشی معادل تغییر زاویه pitch است و سونار تصویر جانبی از هدف ایجاد می‌کند.

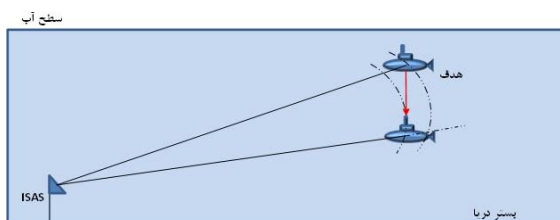


شکل ۸. حرکت مستقیم الخط هدف در صفحه عمودی شامل سونار و هدف

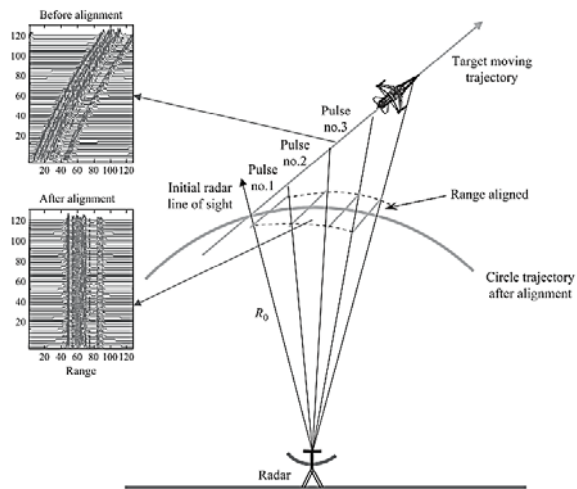
در صورتی که راستای حرکت مستقیم الخط هدف بر راستای نصب سونار عمود باشد، با فرض انجام جبران‌سازی در برد، حرکت چرخشی معادل تغییر زاویه سمت است و سونار تصویری از نمای پایین هدف ایجاد می‌کند.

### ۲- تغییر عمق

اگر هدف مشابه شکل (۹) کاهش یا افزایش عمق دهد یعنی به موازات راستای نصب سونار حرکت نماید، پس از انجام جبران‌سازی در برد، حرکت چرخشی معادل تغییر زاویه pitch است و سونار تصویر جانبی از هدف ایجاد می‌کند.



شکل ۹. کاهش عمق هدف



شکل ۶. جبران‌سازی در برد [۲۶]

از لحاظ هندسی تصویر ایجاد شده توسط ISAS با تصویر اپتیکی که چشم ناظر می‌بیند، متفاوت است و نه تنها این تصویر به تصویر اپتیکی هدف شبیه نیست بلکه فرایند ایجاد تصویر نیز کاملاً متفاوت است. شکل (۷) تفاوت بین تصویر ایجاد شده از ISAS و تصویر رویت شده توسط چشم ناظر را در زوایای دید مختلف تشریح می‌کند. برای داشتن نمایی یکسان از هدف، زاویه دید چشم ناظر باید ۹۰ درجه با زاویه دید سونار اختلاف داشته باشد. در ISAS نمای تصویر توسط صفحه انعکاس تصویر تعیین می‌گردد و مثلاً برای داشتن نمای جانبی از هدف، سونار باید در مقابل هدف (در راستای خط دماغه تا پاشنه کشتی) قرار گیرد و هدف دارای حرکت زاویه‌ای پیچ خالص باشد. همچنین برای داشتن نمای روبرو از هدف، سونار باید در کنار هدف قرار گیرد و هدف دارای حرکت زاویه‌ای رول خالص باشد. برای داشتن نمای از بالای هدف، باید هدف دارای حرکت سمت خالص باشد و سونار می‌تواند در هر نقطه از صفحه‌ای که هدف در آن قرار دارد، واقع شود. در حالت کلی که هدف دارای حرکات هم‌زمان رول، پیچ و سمت است، تصویر ایجاد شده پرسپکتیوی از هدف خواهد بود که الزاماً به هیچ‌کدام از نماهای جانبی، روبرو یا بالا ارتباطی ندارد.

از آنجا که سونار روزنه مصنوعی معکوس مدنظر در زیر آب ثابت شده است لذا اهداف مدنظر نیز اهداف متحرک زیرآبی همچون انواع زیردریایی می‌باشد که معمولاً دارای حرکات یکنواخت هستند. در ادامه به بررسی برخی از حرکات ساده اهداف پرداخته می‌شود.

$$\beta_1 = tg^{-1} \left( \frac{\frac{2z_s}{r}}{1 - \frac{z_s^2 - z_t^2}{r^2}} \right) < tg^{-1}(0.1763) \quad (17)$$

از آنجا که سونار و هدف در محدوده آب‌های کم‌عمق فرض شده‌اند لذا:

$$0 < z_s, z_t < 180 \text{ m} \quad (18)$$

با ساده‌سازی رابطه (۱۷) خواهیم داشت:

$$\frac{2rz_s}{r^2 - z_s^2 + z_t^2} < 0.1763 \quad (19)$$

با توجه به رابطه (۱۸) و تعیین علامت رابطه (۱۹) با توجه به وضعیت ریشه‌های رابطه درجه دوم آن، شروط فاصله افقی هدف به صورت زیر خواهد بود:

$$r > 0.5 \left( \frac{2z_s}{0.1763} + \sqrt{\left( \frac{2z_s}{0.1763} \right)^2 - 4(z_t^2 - z_s^2)} \right) \quad (20)$$

و

$$r > 180 \quad (21)$$

حال می‌توان با تعمیم روابط فوق، شروط بیشتری را نیز برای فاصله هدف در نظر گرفت. مثلاً برای داشتن تصویری بدون اعوجاج ناشی از ISAS مجازی-۱۲ نیز می‌توان نوشت:

$$\beta_2 = tg^{-1} \left( \frac{2D - z_s - z_t}{r} \right) - tg^{-1} \left( \frac{z_s - z_t}{r} \right) < 10^\circ \quad (22)$$

که با انجام محاسبات مشابه، شرط دیگری برای فاصله افقی هدف به صورت زیر خواهیم داشت:

$$r > 0.5 \left( \frac{2(D - z_s)}{0.1763} + \sqrt{\left( \frac{2(D - z_s)}{0.1763} \right)^2 - 4(z_t^2 - z_s^2 + 2D(z_s - z_t))} \right) \quad (23)$$

#### عمق هدف

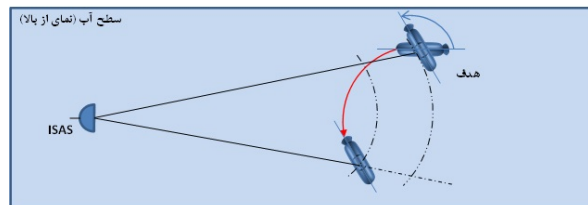
در روابط تصویرسازی برای عمق هدف محدودیت خاصی وجود ندارد و هدف می‌تواند در هر عمقی در کانال قرار گیرد و در تمامی حالات، تصویری از آن ایجاد خواهد شد. البته در شبیه‌سازی‌ها نشان داده شده است که بسته به عمق قرارگیری هدف، اندازه لوب مرکزی و میزان لوب‌های جانبی در تصویر ایجاد از نقاط هدف متفاوت خواهد بود.

#### ابعاد هدف

ابعاد هدف ارتباط تنگاتنگی با ابعاد تصویر ایجاد دارد و باید به گونه‌ای باشد که در محدوده تصویر قرار گیرد. اگر ابعاد هدف  $L_x$  در  $L_y$  و  $L_z$  و رزولوشن تصویر ایجادی  $\rho_x$  و  $\rho_y$  باشد، برای قرارگیری در محدوده سلول‌های تصویر باید داشته باشیم [۲۸]:

#### ۳- دور زدن

در صورتی که هدف مشابه شکل (۱۰) اقدام به دور زدن نماید، با فرض انجام جبران‌سازی در برد، حرکت چرخشی معادل تغییر در زاویه سمت است و تصویری از نمای پایین هدف ایجاد می‌شود.



شکل ۱۰. دور زدن هدف

#### ۴- حرکات ترکیبی

سایر انواع حرکات محتمل در اهداف مدنظر همچون زیردریایی‌ها مانند حرکت مستقیم الخط همراه با کاهش یا افزایش عمق، دور زدن همراه با تغییر عمق و ...، ترکیبی از حرکات زاویه‌ای خواهند بود و بسته به زوایا، پرسپکتیوی از هدف ایجاد می‌نماید.

#### فاصله هدف

تاثیر فاصله هدف بر روی تصویر ایجاد از چند منظر قابل بررسی است. با افزایش فاصله هدف، افت مربوط به انتشار امواج صوتی در آب افزایش خواهد یافت. همچنین با افزایش فاصله هدف، میزان تضعیف به دلیل افت جذبی امواج نیز به صورت نمایی افزایش خواهد یافت. میزان تضعیف متاثر از محیط انتشار و فرکانس موج است و در مجموع تاثیر افت جذبی در محدوده فرکانسی کمتر از یک کیلوهرتز ناچیز و در حدود ۱۰ کیلوهرتز تا ده‌ها کیلوهرتز، در حدود ۱۰۰ کیلوهرتز تا حدود یک کیلوهرتز و در محدوده مگاهرتز تا کمتر از ۱۰۰ متر تاثیر کمی دارد [۲۷].

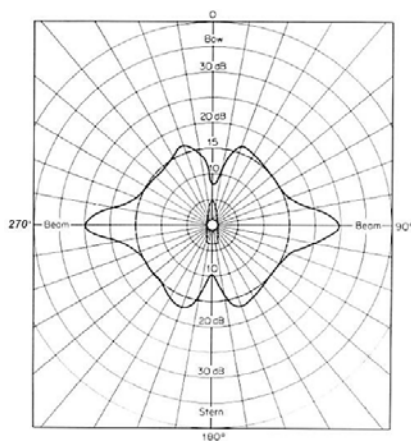
از منظر دیگر، فاصله هدف تاثیر مستقیمی بر روی زاویه دوپایه تشریح شده در شکل (۳) دارد. هر چه فاصله هدف کمتر باشد، زاویه دوپایه ایجاد بین ISAS و ISAS‌های مجازی بیشتر خواهد شد. از طرفی مطابق با رابطه (۱۱)، این زاویه باید کوچک (کمتر از ۱۰ درجه) باشد در غیر این صورت باعث اعوجاج در تصویر ایجاد خواهد شد. در نتیجه با توجه به شکل (۴) برای داشتن تصویری بدون اعوجاج حاصل از ISAS مجازی-۱۱ باید داشته باشیم:

$$\beta_1 = tg^{-1} \left( \frac{z_s - z_t}{r} \right) + tg^{-1} \left( \frac{z_s + z_t}{r} \right) < 10^\circ \quad (16)$$

که در آن برای عمق هدف  $z_t$  استفاده شده است. رابطه فوق را می‌توان پس از ساده‌سازی به صورت زیر نوشت:

$$TS = 10 \log_{10} \frac{I_r}{I_i} \quad (28)$$

شدت سیگنال‌های تابیده و منعکس شده با زمان تغییر می‌کند و روش‌های متفاوتی برای اندازه‌گیری آن‌ها وجود دارد که یکی از آن‌ها انتگرال‌گیری از این مقادیر در طول مدت پالس ارسالی و اکوی بازگشتی است. البته معمولاً قدرت هدف به صورت مستقیم اندازه‌گیری نمی‌شود بلکه با فراهم نمودن شرایط روابط سونار فعال به دست می‌آید. قدرت هدف به عواملی همچون زاویه دید، فرکانس، فاصله هدف و طول پالس ارسالی بستگی دارد [۲۳]. در شکل (۱۱) تغییرات قدرت هدف در زوایای دید مختلف برای یک زیردریایی مشخص نشان داده شده است.



شکل ۱۱. تغییرات قدرت هدف یک زیردریایی با زاویه دید [۲۳]

با فرض معلوم بودن قدرت هدف، تخمین افت‌های موجود در مسیر رفت ( $TL_1$ ) و برگشت ( $TL_2$ ) سیگنال و توان سیگنال دریافتی (RL)، می‌توان مقدار توان سیگنال ارسالی را با استفاده از رابطه زیر به دست آورد:

$$SL = RL - TS + TL_1 + TL_2 \quad (29)$$

به‌طور کلی با مشخص بودن هدف موردنظر و داشتن تخمینی از شرایط کانال و قدرت هدف، حداقل توان سیگنال ارسالی موردنیاز قابل محاسبه است.

### شرایط کانال آب

تصویرسازی از هدف متحرک توسط سونار موردنظر در زیر آب وابسته به شرایط کانال آب است. در ادامه مهم‌ترین پارامترهای موثر بر تصویرسازی مربوط به کانال آب بررسی می‌شود.

$$L_x \Omega \leq \rho_y \quad \text{و} \quad L_y \Omega \leq \rho_x \quad (24)$$

که در نتیجه خواهیم داشت:

$$L_x \leq \frac{2\rho_x \rho_y \cos \frac{\beta}{2}}{\lambda} \quad (25)$$

و

$$L_y \leq \frac{2\rho_x^2 \cos \frac{\beta}{2}}{\lambda} \quad (26)$$

### مشخصات سونار

تصویرسازی از هدف متحرک توسط سونار روزنه مصنوعی معکوس چندپایه به مشخصاتی از سونار همچون عمق قرارگیری سونار، فرکانس و توان سیگنال ارسالی بستگی دارد که در ادامه به بررسی آن‌ها پرداخته می‌شود.

### عمق قرارگیری سونار

در روابط تصویرسازی محدودیتی برای عمق سونار وجود ندارد و فقط باید عمق ثابت و معلوم باشد اما با توجه به شبیه‌سازی‌های صورت گرفته در شرایط یکسان، عمق قرارگیری سونار در اندازه لوب مرکزی و میزان لوب‌های جانبی نقاط تصویر و در نتیجه کیفیت تصویر ایجاد می‌شود. این تأثیر در زمینه برد و سمت نقاط تصویر متفاوت است.

### فرکانس سیگنال ارسالی

فرکانس سیگنال چیرپ ارسالی از رابطه زیر حاصل خواهد شد [۲۶]:

$$f_c = \frac{c}{2\rho_y \Omega} \quad (27)$$

در نتیجه انتخاب فرکانس ارسالی در یک کانال آبی مشخص بستگی به رزولوشن مدنظر و حرکات هدف دارد. در شرایط یکسان کانال آب و فرکانس کاری ثابت، هر چه چرخش هدف بیشتر باشد، رزولوشن تصویر ایجاد می‌شود.

### توان سیگنال ارسالی

میزان توان سیگنال ارسالی با توجه به روابط سونار در حالت فعال، به میزان افت‌های موجود در مسیر و قدرت هدف بستگی دارد. قدرت هدف معیاری از میزان انعکاس جسم در برابر موج صفحه‌ای است و معمولاً به صورت نسبت شدت صوت منعکس شده ( $I_r$ ) به شدت صوت تابیده شده ( $I_i$ ) نمایش داده می‌شود [۲۹].



## افت انتشار

غیرگوسی 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 [۲۲] آمده است.

## 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 آگه در سال ۲۰۰۸ ارائه شده، استفاده شده است [۲۷].

## 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 تاثیری 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 [۲۳].

## عمق کانال

با توجه به اینکه ایده MISAS در آب‌های کم‌عمق تحقق می‌یابد، عمق کانال حداکثر در حدود ۱۸۰ متر باید باشد. در روابط تصویرسازی، عمق کانال در تصویر ناشی از ISAS تاثیری ندارد اما در تصویر ایجاد از ISAS‌های مجازی و در نتیجه تصویر تلفیقی نهایی موثر است.

به‌هنگام انتشار امواج آکوستیکی در آب یکی از مهم‌ترین پدیده‌های موثر، افت ناشی از انتشار هندسی امواج در آب است. این افت در آب‌های 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 (۳۰) خواهد بود [۲۲].

$$L_S = r^m \quad (30)$$

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

## افت جذب

در هنگام انتشار امواج در آب، بخشی از انرژی صوت جذب 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 استفاده کرد که مشتمل بر سه جمله است که هر یک میزان تاثیر اسید بوریک، سولفات منیزیم و آب خالص را نشان می‌دهد:

$$\alpha = A_1 P_1 \frac{f_1 f}{f_1^2 + f^2} + A_2 P_2 \frac{f_2 f}{f_2^2 + f^2} + A_3 P_3 f^2 \quad (31)$$

که در آن  $\alpha$  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 [۲۷] آمده است. در این مقاله برای سادگی در محاسبات از مدل تورپ که در فرکانس‌های کم‌تر از ۵۰ kHz قابل قبول است، استفاده شده است [۲۷].

## 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 گوسی (غیر سفید و وابسته به فرکانس) هستند. نویزهای وابسته به مکان اغلب دارای مولفه‌های

1 Leroy

3

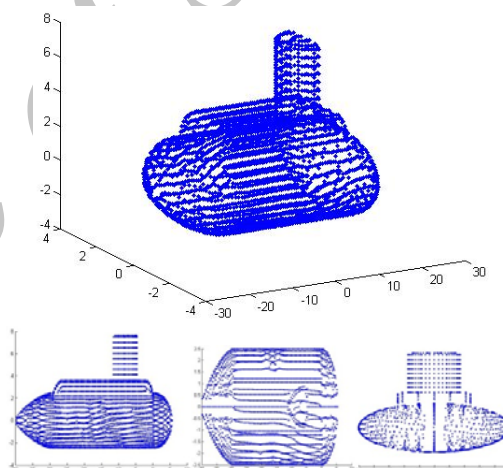
1 Francois-Garrison 1

1 Thorp 2

## شبیه‌سازی

به منظور ارزیابی و مقایسه شرایط مختلف مطرح شده و تاثیر آن‌ها بر تصاویر ایجاد شده از شبیه‌سازی کمک گرفته خواهد شد. بدین منظور در شبیه‌سازی‌ها فرض می‌شود یک ISAS در کانالی کم‌عمق قرار گرفته است و با ارسال سیگنال صوتی و دریافت و پردازش سیگنال‌های بازگشتی از هدف با استفاده از ساختار MISAS و الگوریتم تصویربرداری پس‌تابش فیلتر شده و تلفیق تصاویر به دست آمده با استفاده از روش تصویربرداری تشریح شده، تصویری از هدف مورد نظر ایجاد خواهد کرد.

هم‌چنین فرض می‌شود 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 شبیه‌سازی‌ها بسته به مورد، هدف به صورت تک نقطه‌ای و یا به صورت یک زیردریایی به شکل (۱۲) در نظر گرفته شده است.



شکل ۱۲. نماهای مختلف از مدل در نظر گرفته شده برای زیردریایی هدف

جدول ۱. پارامترهای شبیه‌سازی

مقدار	پارامتر
LFM	نوع سیگنال ارسالی
۸/۱	فرکانس حامل (کیلو هرتز)
۰/۷۵	پهنای باند (کیلو هرتز)
۰/۴	نرخ تکرار پالس (ثانیه)
۰/۰۰۱	طول پالس (ثانیه)
۱۵	دمای آب (سانتی‌گراد)
۳۰	شوری آب (p.s.u.)
۶۰	عمق کانال (متر)
۲۵	عرض جغرافیایی (درجه)
۵۰	عمق ISAS (متر)
۲۵	عمق هدف (متر)

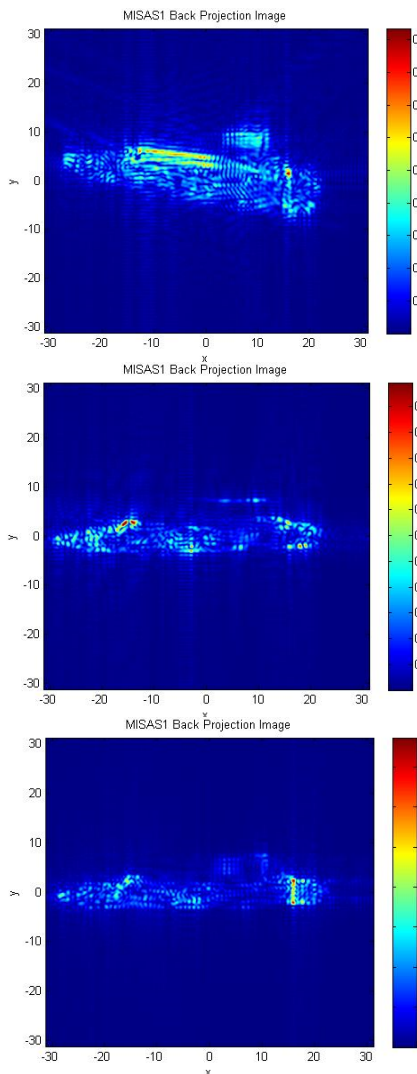
در تمامی شبیه‌سازی‌ها شرایط کانال مانند افت‌های انتشار و جذبی در نظر گرفته شده و از نویز محیط به دلیل وابستگی به شرایط مکانی و زمانی صرف‌نظر شده است. هم‌چنین سطح دریا آرام و بستر دریا سخت و صاف در نظر گرفته شده و از افت‌های ناشی از جذب و پراکنش بستر دریا چشم‌پوشی شده است. هم‌چنین در شبیه‌سازی‌ها با ثابت 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 شبیه‌سازی‌ها استفاده می‌شود. پارامترهای ثابت در شبیه‌سازی‌ها مطابق با جدول (۱) در نظر گرفته شده است. در بعضی از شبیه‌سازی‌ها برخی از این پارامترها متغیر است. در ادامه تاثیر تغییرات برخی از پارامترهای موثر در تصویرسازی با استفاده از شبیه‌سازی بررسی خواهد شد. برای ایجاد شبیه‌سازی با استفاده از نرم‌افزار Matlab، روابط تصویرسازی تشریح شده در بخش‌های قبل با در نظر گرفتن پارامترها و مفروضات شبیه‌سازی بیان شده در حالات و سناریوهای مختلف، کدنویسی شده است و تصاویر ایجاد شده در ادامه خواهد آمد.

## تصویرسازی از نماهای مختلف هدف

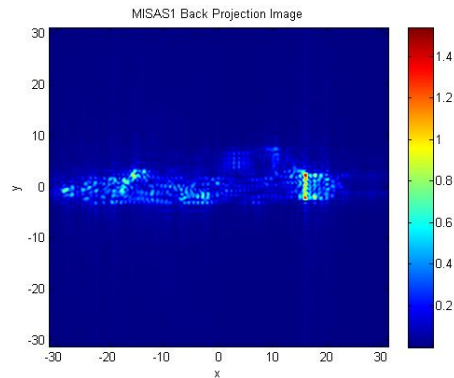
به منظور بررسی تاثیر نوع حرکت هدف بر تصویر ایجاد شده از هدف، تصویرسازی از هدف زیردریایی در سه سناریو که هدف دارای حرکت مستقیم الخط به موازات سطح آب، حرکت عمودی یا کاهش در عمق و دور زدن هدف بود، شبیه‌سازی شده است. در سناریو اول مشابه شکل (۸)، هدف از فاصله افقی ۶۰۰ متری به صورت مستقیم به سمت سونار به اندازه ۴۵۰ متر حرکت می‌کند که با انجام جبران‌سازی در برد معادل ۷۰۰۷۶ درجه تغییر زاویه است. تصویر که از نمای جانبی هدف ایجاد می‌شود، در شکل (۱۳) نشان داده شده است.

### تأثیر فاصله هدف

همان‌گونه که قبلاً بررسی شد، برای داشتن تصویری بدون اعوجاج لازم است برای فاصله هدف شروط مندرج در روابط (۲۰)، (۲۱) و (۲۳) برآورده گردد. با توجه به پارامترهای جدول (۱) طبق روابط مذکور باید فاصله هدف به ترتیب بیشتر از ۵۷۰٫۵ متر، ۱۸۰ متر و ۲۴۵٫۳ متر باشد در نتیجه باید فاصله افقی هدف بیشتر از ۵۷۰٫۵ متر باشد تا تصویر ایجاد دچار اعوجاج نشود. برای بررسی صحت موضوع تصویر ایجاد د از هدف در فواصل ۵۰، ۳۰۰ و ۶۰۰ متر شبیه‌سازی شده و نتایج آن در شکل (۱۶) آمده است.

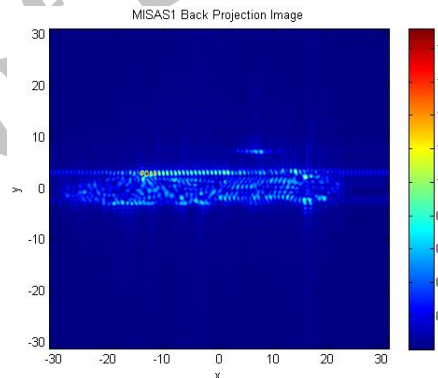


شکل ۱۶. تصویر ایجاد د از هدف در فواصل ۵۰، ۳۰۰ و ۶۰۰ متری (به ترتیب از بالا به پایین)



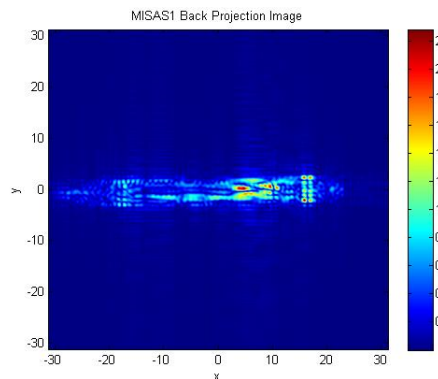
شکل ۱۳. تصویر ایجاد د ناشی از حرکت مستقیم الخط هدف

در سناریو دوم مشابه شکل (۹)، هدف که در فاصله افقی ۶۰۰ متری قرار دارد از عمق ۵ متری به عمق ۴۵ متری می‌رود که با انجام جبران‌سازی در برد معادل ۳٫۸۱ درجه تغییر زاویه است. تصویر که باز هم از نمای جانبی هدف ایجاد می‌شود، در شکل (۱۴) نشان داده شده است.



شکل ۱۴. تصویر ایجاد د ناشی از تغییر در عمق هدف

در سناریو سوم مشابه شکل (۱۰)، هدف که در فاصله ۶۰۰ متری قرار دارد با دور زدن به اندازه ۱۰ درجه تغییر زاویه سمت می‌دهد. تصویری که از نمای بالا از هدف ایجاد می‌شود، در شکل (۱۵) نشان داده می‌شود.



شکل ۱۵. تصویر ایجاد د ناشی از دور زدن هدف

جدول ۳. تاثیر تغییر عمق سونار در معیارهای کیفیت تصویر هدف تک نقطه‌ای

عمق سونار (متر)	ISLR برد (dB)	ISLR سمت (dB)	PSLR برد (dB)	PSLR سمت (dB)	IRW برد (نمونه)	IRW سمت (نمونه)
۰	-۳۰.۸۰	-۱۶.۴۷	-۱۸.۵۵	-۹.۲۷	۱۲.۹۰	۱۱.۵۱
۵	-۳۰.۷۰	-۱۹.۵۹	-۱۸.۴۸	-۱۰.۲۵	۱۲.۹۰	۱۱.۵۳
۱۰	-۳۰.۴۱	-۲۲.۴۹	-۱۸.۲۵	-۱۱.۱۶	۱۲.۹۴	۱۱.۵۷
۲۰	-۲۹.۶۷	-۲۷.۴۲	-۱۷.۶۱	-۱۳.۱۲	۱۲.۹۵	۱۱.۶۸
۲۵	-۲۸.۹۷	-۲۹.۲۰	-۱۷.۰۶	-۱۳.۹۲	۱۳.۱۷	۱۲.۰۴
۳۰	-۲۹.۹۶	-۳۳.۰۹	-۱۶.۳۸	-۱۴.۹۵	۱۳.۴۴	۱۲.۰۲
۵۰	-۲۳.۵۳	-۳۱.۲۴	-۱۳.۲۳	-۱۴.۰۸	۱۲.۵۳	۱۱.۷۷
۶۰	-۲۳.۴۶	-۲۷.۸۴	-۱۱.۴۷	-۱۰.۹۸	۱۴.۰۶	۱۰.۶۴

با توجه به نتایج جدول (۳) در حوزه برد با افزایش عمق سونار، وضعیت لوب‌های جانبی بدتر شده است و وضعیت لوب اصلی تا محدوده ۲۵ متر (عمق هدف) بدتر و پس از آن کمی بهتر شده است. در حوزه سمت با افزایش عمق سونار، وضعیت لوب‌های جانبی خصوصاً بعد از ۲۵ متر بهتر شده اما لوب اصلی تا ۲۵ متر بدتر و پس از آن کمی بهتر شده است.

### نتیجه گیری

در این مقاله پس از مرور ایده شکل‌گیری سونار روزنه مصنوعی معکوس چندپایه و الگوریتم تصویرسازی پیشنهادی برای آن، عوامل موثر بر تصویر ایجاد از هدف متحرک زیر آب بررسی شد. تاثیر مشخصات هدف، مشخصات سونار و شرایط کانال آب بر تصویرسازی سونار از هدف تحلیل شد که اهم نتایج در ادامه آمده است:

نحوه حرکت هدف علاوه بر این که بر تصویر ایجاد از نمای مشخصی از هدف تاثیر دارد، میزان چرخش زاویه‌ای هدف را نیز تعیین می‌کند که عامل موثر در تعیین رزولوشن سمت در تصویر است. حداکثر فاصله هدف از سونار به فرکانس کاری سونار وابسته است و حداقل فاصله هدف نیز برای داشتن تصویری بدون اعوجاج به عمق سونار، هدف و کانال وابسته است که رابطه آن استخراج شد. عمق قرار گیری هدف در کیفیت تصویر موثر است اما در حوزه سمت و برد تصویر تاثیرات متفاوتی ایجاد می‌کند و این تاثیر به عمق سونار نیز وابسته است. ابعاد هدف نیز ارتباط تنگاتنگی با ابعاد و رزولوشن تصویر ایجاد دارد لذا برای ایجاد تصویری از هدف با ابعاد و دینامیک حرکتی مشخص، باید فرکانس سونار برای این منظور تنظیم شود.

عمق قرارگیری سونار نیز در کیفیت حوزه سمت و برد تصویر ایجاد به شکلی متفاوت تاثیر دارد و تاثیر آن با توجه به عمق

همان‌گونه که مشهود است با تخطی هر چه بیشتر از شرط عدم اعوجاج به دست آمده، اعوجاج تصویر بیشتر شده است.

### تاثیر عمق هدف

برای بررسی تاثیر عمق هدف بر تصویر ایجاد، هدف تک نقطه‌ای در فاصله ۶۰۰ متری فرض می‌شود. با تغییر عمق هدف از صفر تا ۶۰ متر، شبیه‌سازی تکرار و نتایج مربوطه در جدول (۲) درج شده است. همان‌گونه که از نتایج مشخص است در حوزه برد با افزایش عمق هدف، وضعیت لوب‌های جانبی با توجه به معیارهای نسبت مجموع لوب‌های جانبی<sup>۱</sup> (ISLR) و نسبت قله لوب اصلی به لوب جانبی<sup>۲</sup> (PSLR) بهتر می‌شود اما وضعیت لوب مرکزی با توجه به معیار پهنای لوب اصلی<sup>۳</sup> (IRW) بدتر می‌شود. در حوزه سمت با افزایش عمق تا حدود ۱۰ متر (معادل با فاصله سونار تا کف) وضعیت لوب‌های جانبی بهبود می‌یابد اما با افزایش عمق بیشتر، این وضعیت رو به افول می‌نهد. البته با افزایش عمق وضعیت لوب اصلی در سمت بهتر می‌شود.

جدول ۲. تاثیر تغییر عمق هدف در معیارهای کیفیت تصویر هدف تک نقطه‌ای

عمق هدف (متر)	ISLR برد (dB)	ISLR سمت (dB)	PSLR برد (dB)	PSLR سمت (dB)	IRW برد (نمونه)	IRW سمت (نمونه)
۰	-۲۲.۷۴	-۳۰.۵۳	-۱۱.۹۵	-۱۳.۶۴	۱۳.۰۲	۱۱.۶۸
۵	-۲۳.۲۰	-۳۱.۲۷	-۱۲.۲۴	-۱۴.۴۹	۱۳.۰۵	۱۱.۶۶
۱۰	-۲۳.۶۴	-۳۱.۷۱	-۱۲.۵۱	-۱۵.۰۶	۱۳.۱۴	۱۱.۷۴
۲۵	-۲۳.۵۳	-۳۱.۲۴	-۱۳.۲۳	-۱۴.۰۸	۱۳.۴۹	۱۱.۷۷
۴۵	-۲۶.۷۳	-۲۵.۵۱	-۱۳.۸۱	-۱۰.۶۳	۱۳.۷۲	۱۱.۶۲
۵۰	-۲۷.۰۱	-۲۳.۰۴	-۱۳.۹۰	-۱۰.۰۰	۱۳.۷۷	۱۱.۵۷
۵۵	-۲۷.۲۱	-۲۰.۲۴	-۱۳.۹۱	-۹.۴۸	۱۳.۸۱	۱۱.۵۰
۶۰	-۲۷.۳۳	-۱۷.۱۷	-۱۳.۸۸	-۸.۹۲	۱۳.۸۷	۱۱.۰۸

### تاثیر عمق سونار

برای بررسی تاثیر عمق سونار بر تصویر ایجاد، هدف تک نقطه‌ای در عمق ۲۵ متری و فاصله ۶۰۰ متری فرض می‌شود. با تغییر عمق سونار از صفر تا ۶۰ متر، شبیه‌سازی تکرار و نتایج مربوطه در جدول (۳) درج شده است.

1 Integrated Side Lobe Ratio  
 2 Peak Side Lobe Ratio  
 3 Impulse Response Width

- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] 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.
- [12] 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.
- [13] T. G. Kostis, *Interferometric inverse synthetic aperture radar*, Master of Science thesis, Department of Electrical & Electronic Engineering in University College London, 2001.
- [14] Zh. Zhu, Y. Zhang and Z. Tang, "Bistatic inverse synthetic aperture radar imaging," *International Radar Conference*, pp. 354-358, IEEE, 2005.
- [15] M. Soumekh, *Synthetic aperture radar signal processing with MATLAB algorithms*, New York, Wiley Interscience Publication, 1999.
- [16] 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.

قرارگیری هدف تغییر می‌کند. فرکانس سیگنال چیرپ ارسال شده با توجه به فاصله هدف، ابعاد هدف، میزان چرخش زاویه‌ای هدف و رزولوشن تصویر موردنظر تعیین شود. توان سیگنال ارسال شده نیز باید با توجه شرایط کانال و تضعیف‌های موجود در آن و همچنین قدرت هدف موردنظر تعیین گردد.

تضعیف‌های موجود در کانال آب مانند افت انتشار، افت جذبی و نویز محیط باید محاسبه گردد و در تعیین توان سیگنال ارسال شده به کار گرفته شود. همچنین سرعت صوت با توجه به شرایط کانال باید تعیین شود و در روابط تصویرسازی استفاده شود. هر چه سطح آب صاف‌تر باشد، تصویر ایجاد شده بهتر خواهد بود. همچنین هر چه بستر دریا صاف‌تر و سخت‌تر باشد، تصویر بهتر خواهد شد. عمق کانال نیز باید باید در محدوده آب‌های کم-عمق باشد تا تصویرسازی با این سونار امکان‌پذیر گردد.

شبیه‌سازی‌های صورت گرفته از نحوه ایجاد تصویر توسط سونار روزنه مصنوعی معکوس چندپایه از یک زیردریایی مدل در شرایط مختلف هدف و با در نظر گرفتن پارامترهای کانال آب در شرایط نزدیک به واقعیت، صحت تحلیل‌های صورت گرفته را تایید نمود. با تحلیل‌های صورت گرفته برای اولین بار در این مقاله، عوامل موثر بر تصویرسازی از اهداف متحرک زیر آب و محدودیت‌های ایده سونار روزنه مصنوعی معکوس چندپایه بررسی گردید و نتایج عملکرد آن در سناریوهای مختلف شبیه-سازی شد.

## مراجع

- [1] R. E. Hansen, "Introduction to Synthetic Aperture Sonar Systems," Edited by Prof. Nikolai Kolev, InTech, September 2011.
- [2] C. Ozdemir, "Inverse synthetic aperture radar imaging with MATLAB Algorithms," Vol. 210, John Wiley & Sons, 2012.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] 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.

- [23] R. J. Urick, Principles of underwater sound, 3d edition, McGraw-Hill, 1983.
- [24] R. E. Kell, "On the derivation of bistatic RCS from monostatic measurements," Proceedings of the IEEE, Vol. 53, No. 8, pp. 983-988, 1965.
- [25] M. J. Dargahi, A. D. Aref, 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.
- [26] V. C. Chen, M. Martorella, Inverse Synthetic Aperture Radar Imaging Principles, Algorithms and Applications, First Edition, Scitech, 2014.
- [27] X. Lurton, An introduction to underwater acoustics: principles and applications, 2nd edition, Springer, 2010.
- [28] Z. Zhu, Y. Zhang, Z. Tang, "Bistatic Inverse Synthetic Aperture Radar Imaging," 2005 IEEE International Radar Conference, pp. 354-358, IEEE, 2005.
- [29] A. Ghiotto, G. Cook, "Mobile Submarine Target Strength Measurement," Preceeding of Acoustic 2005, pp. 451-457, 2005.
- [17] 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.
- [18] 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.
- [19] 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.
- [20] J. Taghizadeh, S. A. Seyedin, "Underwater moving target imaging using Multistatic Inverse Synthetic Aperture Sonar (MISAS) with virtual resources," Journal of Radar, Vol. 2, No. 4, pp. 51-62, 2015.
- [21] J. Taghizadeh, S. A. Seyedin, "Filtered Back Projection Imaging in Multistatic Inverse Synthetic Aperture Sonar," Tabriz Journal of Electrical Engineering, Vol. 46, No.1, pp. 41-52, 2016.
- [22] E. An, Underwater Channel Modeling for Sonar Applications, MSc thesis, The Graduate School of Natural and Applied Sciences of Middle East Technical University, 2011.

Archive.org