پانزدهمین همایش صنایع دریایی (MIC2013)
۷ الی ۹ آبان ماه۱۳۹۲ ـ جزیره کیش

تصویربرداری زیر آب با استفاده از سونار روزنه مصنوعی

جواد تقی زاده[۱]، سید علیرضا سیدین[۲]

۱دانشجوی دکتری مخابرات سیستم، دانشگاه فردوسی مشهد؛ Taghizadeh.J@gmail.com
[۲]دانشیار گروه مخابرات دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد؛ Seyedin@um.ac.ir

چکیده

در این مقاله پس از مروری اجمالی بر انواع روشهای تصویربرداری سونارى زیر آب، به بررسی سونار اسکن جانبی[۱] و سونار روزنه مصنوعی[۲] پرداخته و با مقایسه تصاویر حاصله از آنها، مزایا و معایب هر یک را تشریح می نماییم. در ادامه به منظور تصویربرداری از بستر دریا و شناسایی اجسام و موانع موجود در کف دریا، نحوه طراحی یک سونار روزنه مصنوعی برای یک شناور زیر سطحی را بیان می کنیم که قابلیت تصویربرداری در زیر آب را دارا باشد. در این سونار با استفاده از آرایه های هیدروفون و استفاده از روش روزنه مصنوعی، امکان تصویربرداری در زیر آب فراهم می گردد. نتایج و تصاویر بدست آمده از این گونه سونارها، موید عملکرد مناسب و تصاویر با کیفیت این سونارها در مقایسه با سونارهای اسکن جانبی معمول می باشد.

کلمات کلیدی: سونار کنارنگر، سونار اسکن جانبی، سونار روزنه مصنوعی

مقدمه

تصویربرداری در زیر آب به دلایل متعددی مورد توجه محققان و کارشناسان علوم مختلف بوده است. از آنجا که استفاده از تجهیزات اپتیکی و یا استفاده از امواج الکترومغناطیسی در فواصل زیاد ممکن نمی باشد لذا معمولا از امواج صوتی و تجهیزات سونارى برای این منظور استفاده می شود. در طی بیست سال گذشته، فناوری تصویربرداری سونارى در زیر آب به طور ویژه ای مورد توجه بسیاری از محققان خصوصا در کشورهای دارای مناطق دریایی و ساحلی بوده است. در این زمینه در کشورهای توسعه یافته پیشرفتهای خیره کننده و فزاینده ای رخ داده است و باعث گسترش کاوشهای زیر آب در حوزه های اجتماعی، اقتصادی، علمی و نظامی شده است.

تصویربرداری سونارى، روش تصویربرداری است که در آن آشکارسازی و مکان یابی هدف با استفاده از سونار فعال[۳] و امواج صوتی انجام می شود. روشهای اساسی و مدرن تصویر برداری سونارى در زیر آب شامل سونارهای با شکل دهی پرتو چندگانه[۴]، سونارهای اسکن جانبی، سونارهای روزنه مصنوعی، لنزهای صوتی[۵] و هولوگرافی صوتی[۶] می باشد[۱]. در این مقاله به بررسی سونارهای کنارنگر[۷] پرداخته می شود که مهمترین انواع آن عبارتند از: سونارهای اسکن جانبی و سونارهای روزنه مصنوعی. امروزه از سونارهای کنارنگر به دلیل قابلیت تصویربرداری با رزولوشن بالا در کاربردهای گوناگونی همچون تجهیزات نظامی مستقر در کرانه های ساحلی، یافتن مینهای دریایی، شناسایی و نقشه برداری بستر دریا، نصب بر روی انواع وسایل زیرآبی خودکار(AUV) به منظور شناسایی محیط زیر آب و ... بکار می‌رود[۲].

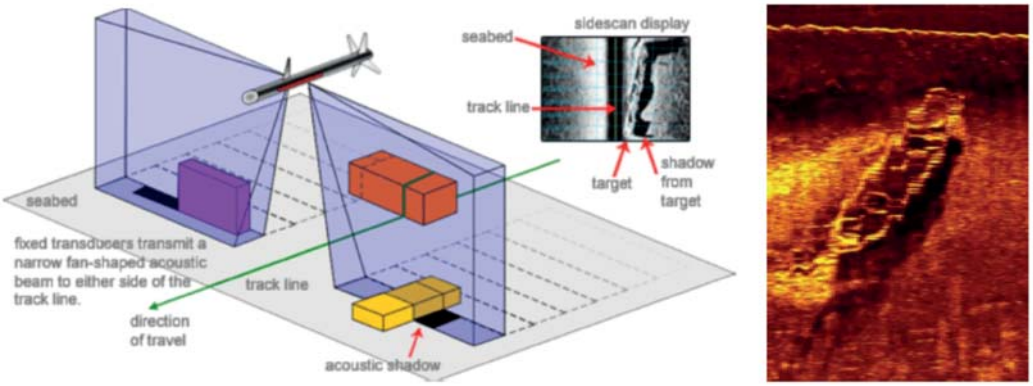
در ادامه مقاله ابتدا به بررسی سونارهای اسکن جانبی و روزنه مصنوعی و مزایا و معایب هر یک پرداخته می‌شود. سپس نحوه طراحی سونار روزنه مصنوعی با قابلیت تصویربرداری با رزولوشن بالا بیان می‌شود تا امکان تصویربرداری از اجسام زیر آب را دارا باشد. در انتها نتایج و تصاویر بدست آمده از این گونه سونارها که تا کنون در مراجع مختلف به آن اشاره شده است، ارائه می‌گردد. از آنجا که این سونارها اخیرا در سطح دنیا به صورت محدودی بکار گرفته شده اند، آشنایی با قابلیتها و امکانات این گونه سونارها در مقایسه با سونارهای معمول، متولیان و پژوهشگران حوزه زیرسطحی و سونار را ترغیب خواهد نمود تا با تمرکز بیشتر بر این موضوع، از مزایای این فناوری در حال توسعه بهره مند گردند.

---

[1] Side Scan Sonar
[2] Synthetic Aperture Sonar
[3] Active Sonar
[4] Multi-beamforming
[5] Acoustic Lensing
[6] Acoustical Holography
[7] Side Looking Sonars

سونار اسکن جانبی

سونار اسکن جانبی سوناری است که پالس خود را به سمت کنار خود می‌فرستد و اکوهای بازگشتی را پردازش می‌کند. پیکربندی آرایه این سونار معمولا از دو آرایه مشابه موازی تشکیل شده است که در دو طرف حامل سونار و به موازات مسیر حرکت نصب شده است. با این هندسه بکارگیری، امواج صوتی به صورت صفحه عمود بر مسیر حرکت منتشر می‌گردد لذا اکوهای بازگشتی فقط از کنار دریافت می‌گردند. از آنجا که یک سونار کنارنگر نوعی اکوهای بازگشتی را تنها در دو نقطه از صفحه پرتو دریافت می‌کند، لذا در هر لحظه از زمان فقط یک سیگنال را دریافت می‌کند. این بدان معنی است که اگر در یک لحظه دو اکو به گیرنده برسد، این اکوها اثر هم را خنثی می‌کنند و مسیر سیگنال مشخص نخواهد شد. در نتیجه تصویر بدست آمده در بسترهای ناهموار نامرغوب خواهد بود بنابراین سونارهای کنارنگر برای تصویربرداری از زمینهای نسبتا هموار مناسب می‌باشند. از دیگر معایب این سونارها این است که با ارسال سیگنال به کنار، بخشی از پرتو ارسالی به زمین برخورد کرده و با انعکاس از زمین باعث ابهام در فاز می‌گردد[۳].



شکل ۱: مثالی از نحوه عملکرد سونار اسکن جانبی و تصویر بدست آمده از کشتی غرق شده[۴]

تصاویر بستر دریا ایجادی از سونار کنارنگر معمولا دارای مجموعه ای از خطوط، ایجاد شده در هر سیکل ارسال و دریافت پالس، می‌باشد که عمود بر مسیر پیمایش است. در هر سمت از مسیر حرکت، یک پاره‌خط نشانگر اکوهای دریافتی از بستر دریا از پالس ارسالی است که تابعی از فاصله اریب[۸] (زمان) و یا فاصله افقی در صورت اعمال اصلاحات موردنیاز ناشی از انکسار امواج و توپوگرافی محیط می‌باشد. به علاوه، یک بهره متغیر با زمان، افت انتقال ناشی از انتشار کروی و جذب امواج صوت در آب را جبران می کند. حال اگر هیچ تصحیحی اعمال نشود، تصویر ایجادی دارای اعوجاجات و اثرات تصنعی فراوانی خواهد بود که از آن جمله می‌توان به انواع نویز و تداخلات خارجی ناشی از سایر دستگاههای آکوستیک موجود در منطقه، غیر مستقیم بودن مسیر حرکت و تغییر زوایا و حالت حامل با زمان، غیر یکنواخت بودن پترن پرتو ارسالی از سونار در زوایای موردنظر و وجود لوبهای جانبی در آن اشاره کرد[۵]. برای رفع این مشکلات، تعدادی از روشهای پردازش تصویر مانند فیلتر کردن نویز، تصحیحات رادیومتریک، افزایش کنتراست، رفع محوشدگی و تصحیحات ناوبری بر روی داده های موجود اعمال می‌گردد.

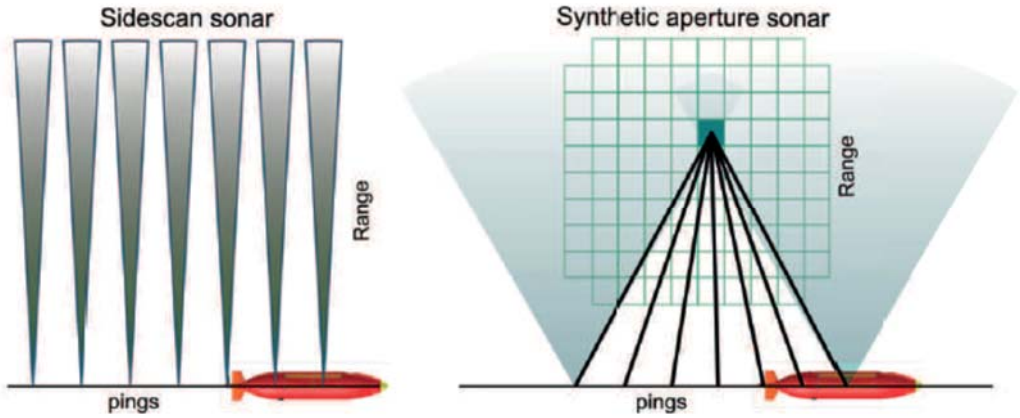
سونار روزنه مصنوعی

سونار روزنه مصنوعی که از رادار روزنه مصنوعی الهام گرفته شده، نوعی سونار کنارنگر توسعه یافته است که تصویری با کیفیت و مشابه تصاویر اپتیکی از بستر دریا ایجاد می‌کند. این تصویر نمایشی از شدت امواج صوتی بازگشتی از بستر دریا در فاصله، عمق و زاویه انحرافی مشخص است. در یک سونار اسکن جانبی معمولی، هر اکو بازگشتی به صورت مستقل پردازش می‌شود و مشکل اصلی در تصویر این است که رزولوشن در امتداد مسیر[۹] (یا رزولوشن زاویه ای) با افزایش فاصله (برد) بدتر می‌شود.

در روش روزنه مصنوعی با استفاده از جمع همدوس[۱۰] پالسهای دریافتی متعدد، روزنه (دریچه) ای ایجاد می‌گردد که اندازه آن با فاصله افزایش می‌یابد و رزولوشن زاویه‌ای را ثابت نگه می‌دارد. برای اینکه جمع همدوس پالسهای مختلف ممکن باشد و بتوان به یک هدف چندین برخورد پالس صورت پذیرد، باید پهنای بیم افقی فرستنده و گیرنده بزرگتر (بیش از ۳۰ درجه) از پهنای بیم سونار اسکن جانبی (حدود ۱ درجه) باشد[۶]. در واقع در این گونه سونارها، از حرکت حامل استفاده می گردد تا بجای داشتن آنتنی با طول مشخص(روزنه واقعی)، آنتنی با طول بزرگتر (روزنه مصنوعی) داشته باشیم.

---

[8] Slant Range
[9] Along-track Resolution
Coherent



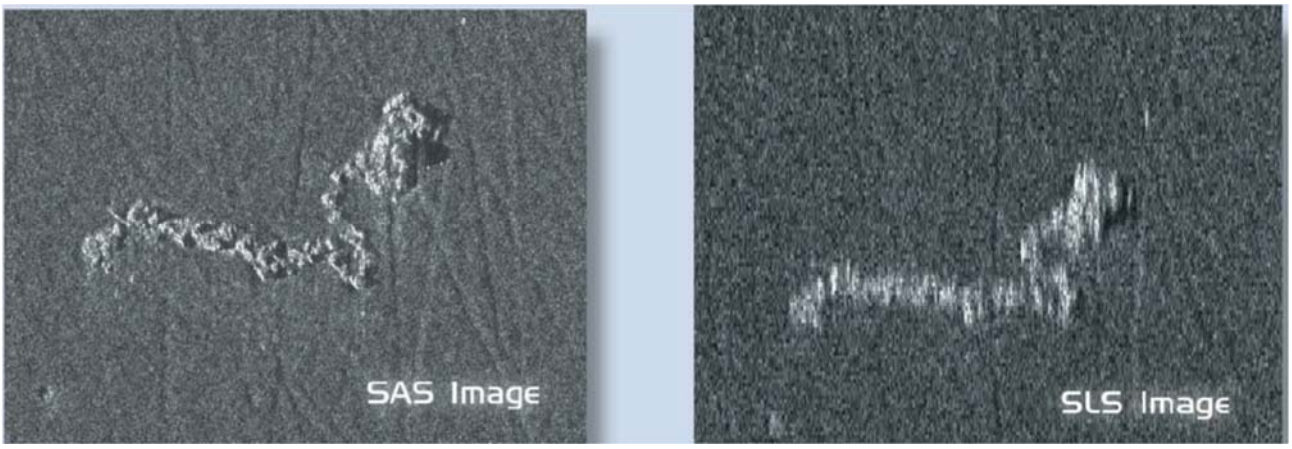
شکل ۲: تفاوت پالسهای ارسالی از سونار اسکن جانبی و سونار روزنه مصنوعی[۷]

سونار فعال روزنه مصنوعی یک سونار تصویربردار با رزولوشن بالا است که پالسهای بازگشتی متعدد را با هم ترکیب می‌کند تا یک روزنه (آنتن) آکوستیکی بزرگ را ایجاد کند. در این سونار با پردازشهایی مشابه پردازشهای رادار روزنه مصنوعی، تصاویر سوناری با رزولوشن بی نظیر مستقل از فاصله و فرکانس بدست می‌آید. در این سونار رزولوشن زاویه‌ای در تمامی فواصل از نظر تئوری برابر با نصف اندازه جانبی المان گیرنده (d) است. با توجه به الزامات نمونه برداری، حداکثر سرعت حامل (V_{SAS}) برای یک تصویر بدون اعوجاج، تابعی از طول روزنه (آنتن) فیزیکی (L) و دوره تکرار پالس[۱۱] (PRI) به صورت زیر است[۸]:

$$V_{SAS} \le \frac{L}{2PRI} \qquad (۱)$$

این رابطه بدین معنی است که فاصله طی شده بین دو پالس متوالی نباید از نصف طول روزنه فیزیکی تجاوز نماید. برای آنتنهای تک المان (L=d)، این رابطه شدیدا سرعت حامل را محدود می‌کند اما برای سیستمهای چند المانی، سرعت تا نصف کل آرایه(L) در هر پالس افزایش می‌یابد اما رزولوشن زاویه‌ای به اندازه d/2 باقی می‌ماند.

سونار روزنه مصنوعی هر دو جنبه مصالحه بین برد سونار و رزولوشن را برآورده می کند. با افزایش برد سونار، نرخ پوشش منطقه افزایش می‌یابد که به طور چشمگیری زمان پویش را کاهش می‌دهد. افزایش رزولوشن عموما با آرایه بزرگتر یا بکارگیری فرکانس بالاتر در سونار میسر می‌شود. آرایه بزرگتر باعث افزایش وزن، حجم و توان و نهایتا هزینه می‌گردد. از طرف دیگر افزایش فرکانس باعث کاهش برد می شود. تنها پردازش روزنه مصنوعی همراه با مشخصات آرایه‌ای و فرکانسی مناسب باعث می‌شود تصاویر با رزولوشن عالیتر و نرخ پوشش منطقه ای بهتر نسبت به سونار اسکن جانبی ایجاد شود.



شکل ۳: مقایسه تصاویر بدست آمده از سونار اسکن جانبی و سونار روزنه مصنوعی[۸]

رزولوشن در برد سونار روزنه مصنوعی بیش از ۲۵ برابر بهتر از سونارهای اسکن جانبی است در حالیکه پوشش منطقه‌ای نیز ۳۰۰ درصد افزایش می‌یابد. برای دستیابی به تصاویر با رزولوشن بالا در سونار روزنه مصنوعی لازم است دقت ناوبری در حد یک شانزدهم طول موج صوت باشد[۸]. به

[11] Pulse Repetition Interval

عنوان مثال برای سیستم ۱۲۰ کیلوهرتزی، این مقدار معادل دقت ناوبری در حد یک میلی متر است. امروزه بـا رشـد فزاینـده سیسـتمهای نـوین ناوبری مانند سیستمهای ناوبری اینرسی دقیق، سرعت سنجهای داپلری(DVL)[۱۲]، شمال‌یابهای دقیق و گیرنده های GPS ایـن امـر امکـان‌پـذیر شده است. در نتیجه چنین سیستمهای ناوبری دقیقی بخش جداناپذیری از سونارهای روزنه مصنوعی می‌باشد.
با قابلیتهای ذکر شده برای سونارهای روزنه مصنوعی کاربردهای فراوانی در اعماق آبها برای این سونار وجود دارد که از آن بین می‌توان به استخراج نقشه‌های زمین شناسی، مکان‌یابی اشیاء غرق شده مانند کابلهای مخابراتی، خطوط لوله و شناورهای مغروق اشاره کـرد. از دیگـر کاربردهـای ایـن سونارها به شناسایی مینهای دریایی قرار گرفته در بستر دریا و یا پنهان شده در رسوبات اشاره کرد.

طراحی یک سونار روزنه مصنوعی

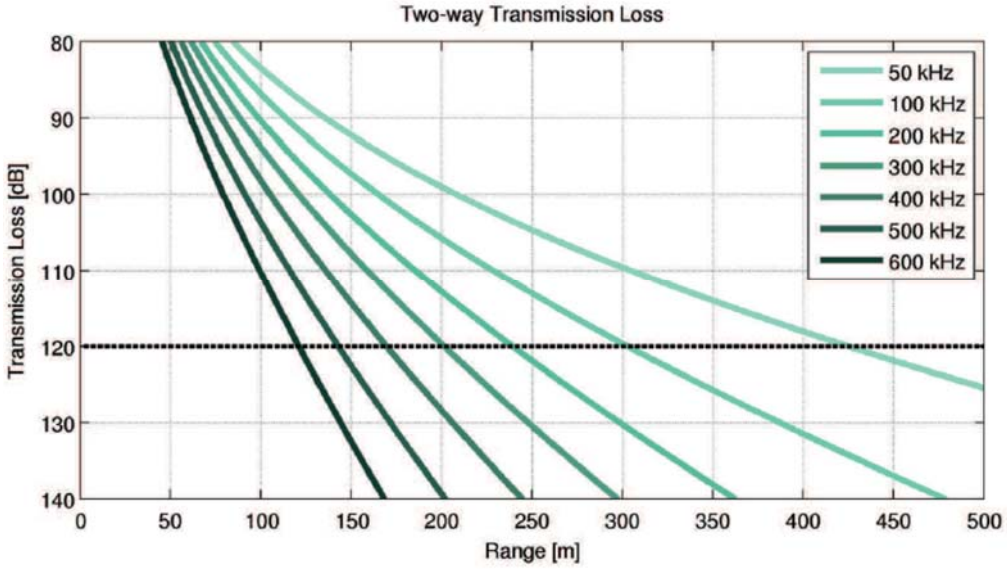
روال طراحی سونار روزنه مصنوعی با سونارهای مرسوم در حوزه هایی مانند مقدار رزولوشن و وابستگی به فرکانس متفاوت است. از آنجا که طراحی و ساخت سونارهای روزنه مصنوعی عمر کوتاهی دارد و در مراکز پژوهشی و صنعتی در سطح دنیا به صورت معدود و پراکنده به آن پرداختـه شـده است لذا در این بخش به تدوین چگونگی محاسبه مهمترین پارامترهای سونار روزنه مصنوعی با استفاده از مراجع مختلف پرداختـه شـده اسـت. در جدول و شکل زیر پارامترهای اصلی در طراحی یک سونار روزنه مصنوعی آمده است:

جدول ۱: پارامترهای طراحی سونار روزنه مصنوعی

ردیف	پارامتر طراحی	پارامترهای وابسته	رابطه ([۹] و [۷])
۱	رزولوشن در برد	پهنای باند سیستم	$R_R = \frac{c}{2B}$
۲	رزولوشن زاویه‌ای	اندازه المان (آنتن)	$CR_R = \frac{d}{2}$
۳	نرخ پوشش منطقه‌ای	طول آرایه گیرنده	$ACR = \frac{cL}{8}$
۴	حداکثر برد	طول آرایه گیرنده و سرعت (حامل)	$R_{\max} = \frac{cL}{4V}$
۵	نسبت سیگنال به نویز	فرکانس، هندسه قرارگیری و حداکثر برد	با توجه به شکل۴
۶	پایداری[۱۳]	پهنای باند نسبی و افزونگی[۱۴]	
۷	پیچیدگی	عرض پرتو(بیم)، تعداد المانها(ی آنتن) و پهنای باند نسبی	
۸	توان عملیاتی[۱۵]	پهنای باند، تعداد المانهای گیرنده	

همان گونه که مشاهده می‌شود نکات اصلی در طراحی سونار روزنه مصنوعی که باید به آنها توجه ویژه ای شود، عبارتند از:
۱- با استفاده از حرکت حامل سونار، طول آنتن گیرنده (به صورت روزنه مصنوعی) افزایش می‌یابد و باعث افزایش رزولوشن زاویه‌ای میشود.
۲- رزولوشن مستقل از برد و فرکانس سونار خواهد بود.
۳- اطلاعات مکانی و فرکانسی در تصویر سونار حفظ خواهد شد.
۴- انتخاب فرکانس سونار مستقل از رزولوشن خواهد بود.

[12] Doppler Velocity Log
[13] Robustness
[14] Redundancy
[15] Throughput



شکل۴: افت انتقال دوطرفه در فرکانسهای معمول در سونار روزنه مصنوعی[۷]

فرض می کنیم برای یک شناور زیرسطحی (مثلا یک AUV)، یک سونار روزنه مصنوعی با مشخصات زیر مدنظر بوده است:

- رزولوشن: بهتر از ۵×۵ سانتی متر
- برد: ۱۷۵تا۲۰۰ متر در سرعت ۴ نات، ۲۳۰ تا ۲۶۰ متر در سرعت ۳ نات یا ۱۰ برابر ارتفاع حرکت حامل
- زاویه تحت پوشش: ۲۰ تا ۴۰ درجه

برای طراحی این سونار، آرایه هیدروفون فرستنده- گیرنده با ۱۶ المان درنظر گرفته می‌شود. در هر سمت AUV یک آرایه به طول ۱.۲ متر قرار داده می‌شود. آرایه های هیدروفون با زاویه ۲۲ درجه در دو طرف AUV نصب می‌شود.

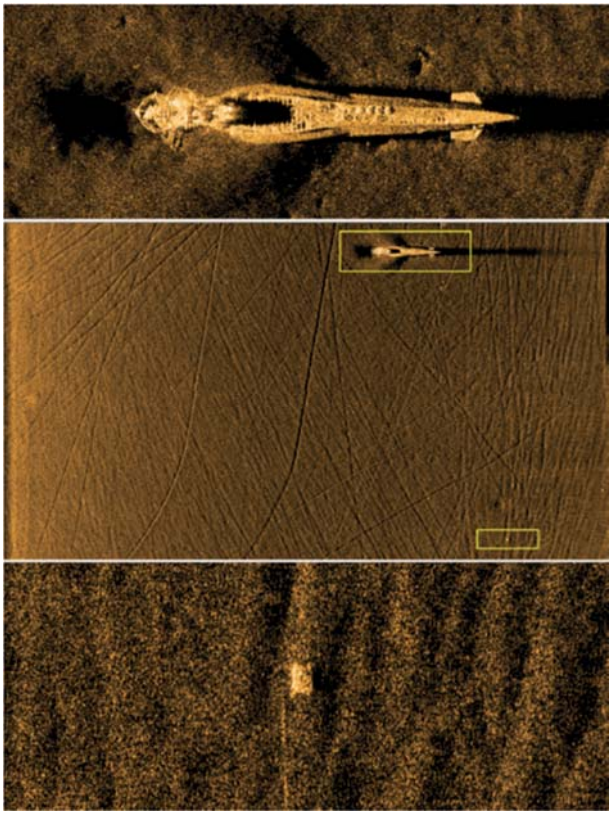
فرکانس سونار به صورت قابل تنظیم بین ۵۰ تا ۱۲۰ کیلوهرتز در نظر گرفته می‌شود. پهنای باند سیستم قابل تنظیم تا ۵۰ کیلوهرتز تعیین می‌گردد. حافظه با ظرفیت ۱.۲ ترابایت در نظر گرفته می‌شود تا بتواند به طور متوسط ۶۰ گیگابایت در ساعت داده ذخیره نماید.

از آنجا که سرعت حامل برد عملکردی سونار را تعیین می کند، با فرض سرعت ۲ متر بر ثانیه، برد سونار ۲۰۰ متر خواهد بود و با سرعت ۱.۵ متر بر ثانیه، برد سونار ۲۷۵ متر خواهد بود. با طراحی انجام شده برای این سونار، نرخ پوشش منطقه تقریبا ۷۵۰ مترمربع بر ثانیه در دو طرف خواهد بود و رزولوشن بدست آمده بهتر از ۵×۵ سانتی متر در کل منطقه تحت پوشش خواهد بود.

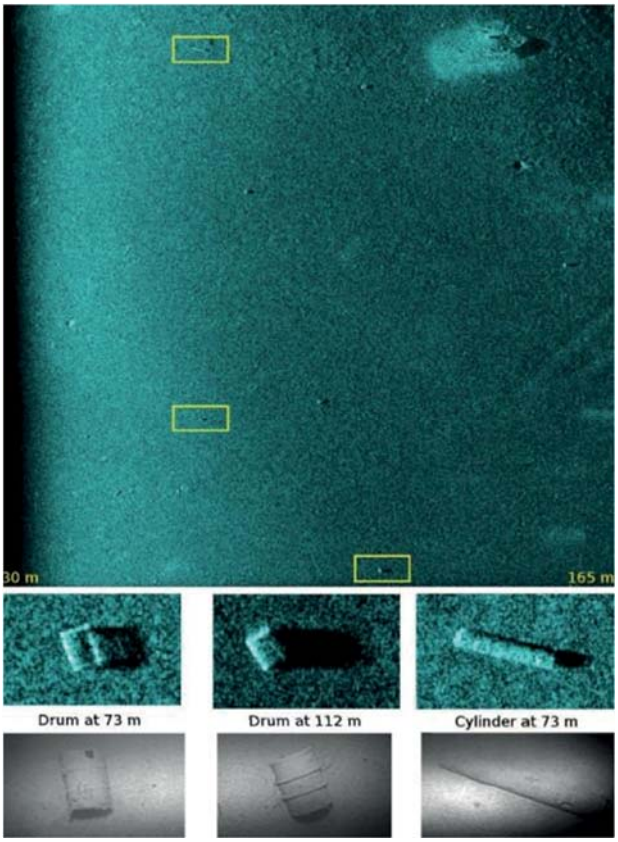
نتایج

پس از بکارگیری سونارهای طراحی شده در سطح دنیا در سناریوهای عملکردی مختلف، تصاویری بدست آمده است که نشانگر موفقیت این گونه سونارها در تصویربرداری آکوستیکی زیر آب با کیفیت و رزولوشن بالا می‌باشد. شفافیت و رزولوشن این تصاویر در مقایسه با سونارهای معمول پیشرفت قابل ملاحظه ای را نشان می دهد به گونه ای که می توان تصور کرد این تصاویر با استفاده از دوربینهای اپتیکی گرفته شده است. توجه به این نکته ضروری است که با استفاده از تجهیزات اپتیکی حداکثر می توان تا فاصله ۱۰متری زیر آب را تصویربرداری کرد در حالیکه با تغییر پارامترهای طراحی می توان سونارهای روزنه مصنوعی را به گونه ای طراحی کرد تا فاصله ها صدها متر و حتی در شرایط خاص تا بیش از ۲ کیلومتر را تصویر برداری نماید. در ادامه تصاویری از سونارهای روزنه مصنوعی، در شرایط مشابه با طراحی فرضی فوق، که از مراجع موجود و در دسترس اخذ شده، آمده است.

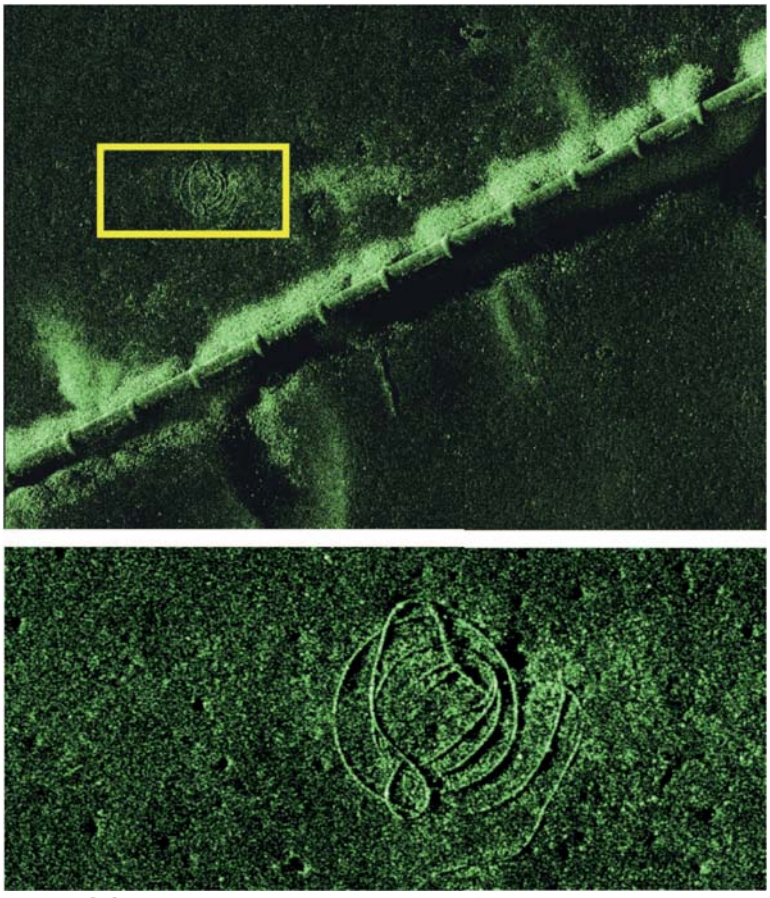
شکل۵: تصویر بدست آمده از هواپیمای سقوط کرده مدفون در رسوبات در عمق ۳۴ متری[۱۰]



شکل۶: تصویر بدست آمده از یک مکعب و زیردریایی مغروق به ترتیب در فواصل ۲۰۵ تا ۲۴۵ متر، ۲۵ تا ۳۲۵ متر و ۲۷۵ متر با سرعت حامل ۲.۳ نات و ارتفاع ۴۰ متر[۱۰]



شکل۷: تصویر بدست آمده از اشیاء قرار گرفته در بستر دریا در فواصل مختلف[۱۰]



شکل۸: تصویر بدست آمده از یک قطعه طناب در کنار خط لوله[۷]

جمع‌بندی

در این مقاله پس از بررسی سونارهای اسکن جانبی با قابلیت تصویربرداری زیر آب، به مزایا و معایب آن پرداخته شد و در ادامه با معرفی سونار روزنه مصنوعی، به بررسی نحوه عملکرد و قابلیت تصویربرداری با رزولوشن بالا در آن پرداخته شد. سپس مهمترین پارامترهای طراحی یک سونار روزنه مصنوعی برشمرده شد و برای یک کاربرد مشخص به چگونگی طراحی سونار روزنه مصنوعی موردنظر اشاره شد. در نهایت نتایج حاصل از عملکرد سونار های طراحی شده در سطح دنیا در کاربردهای مختلف و با استفاده از مراجع در دسترس ارائه گردید.

مراجع

[1] GUO Haitao, LI Renping, XU Feng and LIU Liyuan, ‘‘Review of research on sonar imaging technology in China,’’ Chinese Journal of Oceanology and Limnology, 2013.

[2] Tsaprazis, K., Design and Analysis of Side-Looking-Sonar Experiments, Master’s Thesis, Naval Postgraduate School Monterey, CA, December 2006.

[3] Moustier, C., ‘‘State of the art in swath bathymetry survey systems,’’ International Hydro-graphic Review, 2(65):25–54, July 1988.

[4] Hendriks, L. A., Image Processing Techniques for Sector Scan Sonar, Master’s Thesis, University of Stellenbosch, South Africa, 2009.

[5] Cervenka, P., and Moustier, C., ‘‘Side scan Sonar Image Processing Techniques,’’ IEEE Journal of Oceanic Engineering, Vol. 18, No. 2, April 1993.

[6] Hayes, M. P., and Gough, P. T., ‘‘Synthetic Aperture Sonar: A Review of Current Status,’’ IEEE Journal of Oceanic Engineering, Vol. 34, No. 3, July 2009.

[7] Hansen, R. E., et.al. , ‘‘Sonar Systems,’’ edited by N., Kolev, InTech press, 2011.

[8] Sternlicht, D., and Pesaturo, J. F., ‘‘Synthetic Aperture Sonar: Frontiers in Underwater Imaging,’’ Compass Publications Inc. Sea Technology, 2004.

[9] Pinto, M., ‘‘Design of synthetic aperture sonar systems for high-resolution seabed imaging,’’ OCEANS’06 MTS/IEEE, Boston, Massachussets, USA, September 2006.

[10] Hansen, R. E., ‘‘HUGIN AUV SAS achievements,’’ FFI Norwegian Defence Research Establishment, December 2009.