

## بهبود تصویرسازی سه بعدی در سونار روزنه مصنوعی معکوس چندپایه

سید علی عرفانی<sup>۱</sup>، سید علیرضا سیدین<sup>۲\*</sup>

۱- دانشجوی دکتری مهندسی مخابرات سیستم و ۲- دانشیار گروه مهندسی برق دانشکده مهندسی دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران  
(دریافت: ۱۳۹۹/۰۵/۰۱، پذیرش: ۱۳۹۹/۰۸/۱۷)

### چکیده

تعیین بعد سوم اهداف زیر آب، توسط سامانه سوناری، می‌تواند در تصویرسازی سه بعدی و تشخیص هدف نقش مهمی ایفا نماید. در این مقاله، به کارگیری سونار روزنه مصنوعی معکوس و استفاده از منبع مجازی بستر دریا و یک حسگر دوم، بعد سوم اهداف به دست آمده است. جهت به دست آوردن بعد سوم، از فاصله بین پراکنده ساز و دو آرتیفکت اصلی متناظر با آن در تصویر دو بعدی استفاده شده است. در صورت داشتن دو سامانه سونار، که دارای هر دو نقش فرستندگی و گیرندگی باشند، تفکیک پذیری به دست آوردن بعد سوم نسبت به حالت تک پایه که در مقاله قبلی نگارندگان مورد بررسی قرار گرفته است، به نحو چشمگیری افزایش یافته است. علاوه بر این، به دلیل داشتن این دو حسگر، تعداد بیشتری از پراکنده سازهای هدف در معرض دید حسگرها قرار می‌گیرند. با استفاده از اطلاعات دریافتی از این طریق می‌توان به دقت بیشتر در محاسبه بعد سوم و ساخت یک تصویر سه بعدی از هدف دست یافت. به علت اهمیت نظارت زیر آب، با استفاده از شیوه پیشنهادی، می‌توان از این سامانه جهت تشخیص دقیق تر اهداف در مقابله با تهدیدات و جهت کاربردهای پدافندی استفاده کرد.

**کلیدواژه‌ها:** سونار روزنه مصنوعی معکوس، تصویرسازی سه بعدی، منابع مجازی، تداخل سنجی، پدافند زیر آب.

### ۱- مقدمه

بزرگی امکان پذیر نیست، روش روزنه مصنوعی معرفی شده است که با استفاده از آن می‌توان از یک روزنه آنتن کوچک، یک روزنه آنتن بزرگ را به طور مصنوعی ساخت [۱].

سونار روزنه مصنوعی بر پایه این فرض استوار است که هدف در بازه جمع آوری داده ثابت می‌ماند؛ در حالی که، آنتن سونار، جهت ساخت یک روزنه آنتن بزرگ، از یک موقعیت به موقعیت بعدی حرکت می‌کند. از طرف دیگر، می‌توان روزنه آنتن بزرگ تر را بر پایه این فرض ایجاد کرد که هدف حرکت می‌کند و سونار ثابت است که به آن سونار روزنه مصنوعی معکوس می‌گویند [۱].

استفاده از امواج الکترومغناطیس جهت تصویربرداری زیر آب، به علت خواص جذب و پراکندگی آب دریا، کارآمد نیست. هر چند، پیشرفت‌های اخیر در سخت افزار، نرم افزار و روش‌های الگوریتمی منجر به پیشرفت قابل توجه در برد عملیاتی سامانه شده است [۲]؛ اما، همچنان، چالش‌ها وجود دارد. به طور نمونه، ضریب تضعیف مربوط به جذب آب، با افزایش فرکانس، به سرعت افزایش می‌یابد [۳].

سونار، ابزاری جهت فاصله یابی و ناوبری در زیر آب توسط امواج صوتی است. این ابزار، در انواع مختلف موجود است؛ یکی از این انواع به صورت سونار روزنه مصنوعی معکوس<sup>۱</sup> است. سونار روزنه مصنوعی معکوس بسیار شبیه به رادار روزنه مصنوعی معکوس<sup>۲</sup> است. بنابراین با بررسی رادار روزنه مصنوعی معکوس و طرز کار و روابط در آن، می‌توان برای حل مسائل سونار روزنه مصنوعی معکوس ایده گرفت.

تصویربرداری سوناری نیاز به تفکیک پذیری<sup>۳</sup> بالا دارد. تفکیک پذیری بالا در برد با داشتن پهنای باند وسیع و در برد متقاطع<sup>۴</sup> با داشتن روزنه آنتن وسیع محقق می‌شود. روزنه آنتن وسیع را می‌توان به صورت مصنوعی با روش SAR/SAS و یا ISAR/ISAS ایجاد کرد [۱].

از آن جا که جهت داشتن روزنه آنتن وسیع، نیاز به داشتن آنتنی بزرگ است و از آن جا که ساخت و حمل چنین آنتن واقعی

\* نویسنده مسئول: seyedin@um.ac.ir

<sup>1</sup> Inverse Synthetic Aperture Sonar: ISAS

<sup>2</sup> Inverse Synthetic Aperture Radar: ISAR

<sup>3</sup> Resolution

<sup>4</sup> Cross Range

برخی تفاوت‌های SAR (یا ISAR) با SAS (یا ISAS)، در جدول (۱) آمده است:

از مسائل مهم که در پردازش سیگنال دریافتی سونار مورد توجه واقع شده است، مسأله انعکاسات موج برخوردی به زمین (بستر دریا) است. به انعکاسات زمین و سطوح دیگر، چندمسیرگی<sup>۴</sup> می‌گویند.

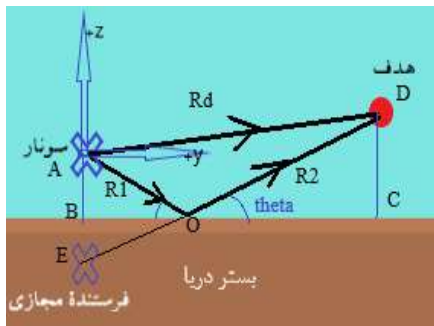
البته، بیشتر مقالات در زمینه چندمسیرگی، در زمینه حذف اثرات چندمسیرگی است. برای اولین بار، Palmer [۶] استفاده از اثرات بازتابی کلاتر<sup>۵</sup> دریا را مورد بحث قرار داده است. با ایده گرفتن از [۶]، سوناری که از چندمسیرگی جهت بهره‌مندی از مزایای حالت دوپایه<sup>۶</sup> استفاده می‌کند، سونار شبه دوپایه<sup>۷</sup> نام دارد.

در این تحقیق، جهت به‌دست آوردن میدان صوتی ناشی از یک منبع نقطه‌ای، از نظریه اشعه<sup>۸</sup> استفاده کرده‌ایم. نظریه اشعه، یک تخمین فرکانس بالا و هندسی از معادله موج هلم هولتز<sup>۹</sup> مربوط به منبع نقطه‌ای است [۷]. نمونه‌ای از ردیابی اشعه در زیر آب، با استفاده از این نظریه، در انتهای بخش دوم از این مقاله نشان داده شده است.

در مرجع شماره [۸]، به تصویربرداری با استفاده از سونار روزنه مصنوعی معکوس تک‌پایه<sup>۱۰</sup> و منابع مجازی پرداخته شد. جهت یافت بعد سوم پراکنده‌سازهای هدف از [۹] ایده گرفته شد.

هندسه تک‌پایه پیشنهادی جهت به‌دست آوردن بعد سوم در آب‌های کم عمق در شکل (۲) آورده شده است. در این شکل، سونار و هدف، به ترتیب، با ضربدر آبی رنگ و نقطه قرمز رنگ نشان داده شده‌اند.

مسیر بازتاب آینه‌ای، کوتاه‌ترین مسیر بازتابی بین فرستنده و گیرنده است [۱۰].



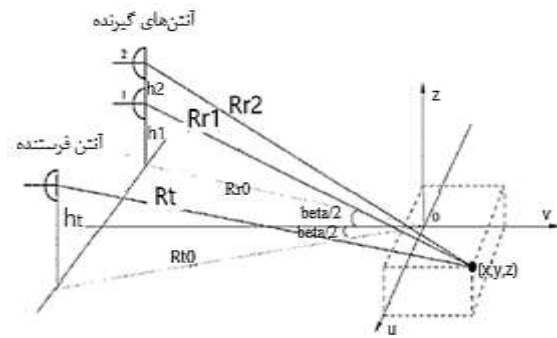
شکل (۲): هندسه تک‌پایه پیشنهادی جهت به‌دست آوردن بعد سوم در آب‌های کم عمق.

جدول (۱): برخی تفاوت‌های SAR با SAS [۴].

SAR	SAS	
سرعت نور	۱۵۰۰ متر بر ثانیه	سرعت انتشار سیگنال در محیط
۰/۴۵ تا ۱۰ گیگاهرتز	۵ تا ۶۵۰ کیلوهرتز	محدوده فرکانسی
تا سرعت اهداف فضایی	کمتر از ۲۰ گره دریایی <sup>۱</sup>	سرعت مجاز هدف
تا فاصله در حدود ماهواره‌ها	۱۰ متر تا ۱۰ کیلومتر	فاصله مجاز هدف

در این مقاله، به تحلیل تصویربرداری و تداخل‌سنجی با سامانه‌های صوتی سونار روزنه مصنوعی معکوس و محاسبه بعد سوم از زوایای دید مختلف پرداخته شده است. از اطلاعات به‌دست آمده می‌توان برای تصویرسازی سه بعدی از هدف استفاده نمود. تداخل سنجی<sup>۲</sup>، یکی از روش‌های معمول جهت به‌دست آوردن تصاویر سه بعدی از موانع و اهداف زیر آب است.

جهت تداخل‌سنجی، می‌توان از سونارهای چندپایه استفاده کرد. هندسه سامانه تصویربرداری سه بعدی در شکل (۱) آورده شده است. ملاحظه می‌شود که در آن از یک آنتن فرستنده و دو آنتن گیرنده استفاده شده است. جهت یافت بعد سوم پراکنده‌سازهای هدف، از اختلاف فاز سیگنال‌های دریافتی در آنتن‌های گیرنده استفاده می‌شود. این اختلاف فاز، با اختلاف زمانی سیگنال‌های دریافتی و در نتیجه با اختلاف طول مسیرهای پیموده شده مرتبط است. می‌توان با استفاده از روابط مثلثاتی، از این اختلاف طول، بعد سوم پراکنده‌سازها را به‌دست آورد. تصویربرداری سونار چندپایه همدوس<sup>۳</sup> بر پایه گسترش الگوریتم‌های ISAR/ISAS تک‌پایه فعلی به محیط چندپایه است.



شکل (۱): هندسه سامانه تصویربرداری سه بعدی [۵].

<sup>۱</sup> گره (knot)، یکی از واحدهای اندازه‌گیری سرعت است و مقدار آن برابر است با مایل دریایی بر ساعت. هر مایل دریایی برابر با ۱۸۵۲ متر می‌باشد. برای تبدیل سرعت بر حسب گره دریایی به واحد سرعت بر حسب متر بر ثانیه از ضریب ۱/۹۴۳ استفاده می‌شود. بنابراین، ۲۰ گره دریایی، تقریباً برابر با ۳۷ کیلومتر بر ساعت است.

<sup>۲</sup> Interferometry

<sup>۳</sup> Coherent

<sup>۴</sup> Multipath

<sup>۵</sup> Clutter

<sup>۶</sup> Bistatic

<sup>۷</sup> Emulated Bistatic Radar (Sonar) (EBR)

<sup>۸</sup> Ray Theory

<sup>۹</sup> Helmholtz equation

<sup>۱۰</sup> Monostatic

معرض دید حسگرها قرار می‌گیرند و دقت به‌دست آوردن بعد سوم، با کمک این حسگر اضافه شده و منابع مجازی، به نحو چشمگیری افزایش می‌یابد. در این مقاله، میزان دقت در محاسبه بعد سوم، با حالت تک‌پایه مقایسه گشته است.

در مقایسه با یک سامانه تجاری روزنه مصنوعی معکوس ساخت شرکت Kongsberg از کشور نروژ (سامانه HISAS 1030 [۱۵]) تفکیک‌پذیری به‌دست آوردن بعد سوم در سامانه ما، برخی شرایط، بسیار بالاتر است.

می‌توان از سامانه ارائه شده در این مقاله، جهت شناسایی و ردیابی دقیق‌تر زیردریایی‌ها و یا غواص‌ها و یا کشف مین، استفاده کرد.

به این علت که مقالات مرتبط با زمینه تصویرسازی سه بعدی توسط سونار روزنه مصنوعی معکوس، بسیار نادر است و به علت کاربردهای نظامی چاپ نشده‌اند و موضوع و روش کار مقالات موجود بسیار متفاوت است، نتایج این مقاله با روش‌های مرسوم دیگر مقایسه نشده است.

قسمت‌های بعدی از متن مقاله به این شرح است؛ در ابتدا قسمت مقدماتی دوم آورده شده است. در قسمت دوم، شرایط مسأله را بیان کرده‌ایم؛ این شرایط، شامل حرکت هدف و شرایط کانال آبی می‌شود. در قسمت سوم، روابط پردازش سه بعدی توسط منابع مجازی را ارائه می‌دهیم. در قسمت چهارم، شبیه‌سازی سه بعدی برای اهداف تک پراکنده‌ساز و مکعب انجام گرفته است. در نهایت، نتیجه‌گیری و مراجع آورده شده‌اند.

## ۲- شرایط مسأله

تصویر تشکیل شده از هدف متحرک زیر آب وابسته به مشخصات هدف، همانند نحوه حرکت هدف است. این مسأله، در زیربخش اول از این قسمت شرح داده شده است. شرایط کانال آبی همانند افت پخش<sup>۴</sup>، افت جذبی<sup>۵</sup>، سرعت صوت در زیر آب، شرایط سطح و بستر دریا و ردیابی اشعه در زیر آب، در زیربخش دوم از این فصل، مورد بحث قرار گرفته است.

### ۲-۱- حرکت هدف

حرکت یک هدف متحرک، دارای شش درجه آزادی، شامل سه حرکت خطی در طول سه محور و سه حرکت زاویه‌ای در حول سه محور، است. در ساختار روزنه مصنوعی معکوس، تنها حرکات زاویه‌ای، ایجاد تصویر می‌کنند. در صورتی که هدف دارای حرکت انتقالی باشد، سرعت و شتاب حرکت را می‌توان به دو مولفه تجزیه کرد. یک مولفه، در طول خط دید<sup>۶</sup> هدف و دیگری عمود بر آن

می‌توان جهت به‌دست آوردن بعد سوم از روابط دقیق و یا تقریبی بهره جست. می‌توان جهت به‌دست آوردن بعد سوم در زوایای ارتفاع پایین، به‌طور تقریبی، از رابطه (۱) استفاده کرد که اثبات آن در [۱۱] آورده شده است (جهت ملاحظه شاخص‌های این رابطه به شکل (۲) مراجعه شود).

$$\Delta R = R_1 + R_2 - R_d = \frac{2z_s z_t}{R_0(t)} \quad (1)$$

$R_0(t)$ ، طول بردار حاصل از انعکاس بردار برد  $R$  بر روی صفحه  $xy$  است.  $z_t$  و  $z_s$ ، ارتفاع سونار و پراکنده‌ساز هدف از بستر دریاست. دقت شود که در معادله (۱)، ارتفاع پراکنده‌ساز هدف مجهول است. البته روش ما در شبیه‌سازی‌ها، جهت به‌دست آوردن ارتفاع پراکنده‌ساز هدف، استفاده از روابط دقیق است که در فصل چهارم از این مقاله مورد بحث قرار خواهد گرفت.

در این روش، از فاصله پراکنده‌ساز و آرتیفکت<sup>۱</sup> اصلی مربوط به آن در دو جهت برد و برد متقاطع برای تعیین اختلاف طول دو مسیر مستقیم و غیرمستقیم و در نتیجه به‌دست آوردن ارتفاع پراکنده‌ساز استفاده می‌شود. البته، با در نظر گرفتن نقطه زمانی مرکزی، تنها به‌دست آوردن فاصله در یک بعد (جهت برد) کفایت می‌کند.

در [۱۲]، از اختلاف فاز تصویر اصلی و آرتیفکت، جهت به‌دست آوردن مولفه ارتفاع استفاده می‌شود.

هر چند اختلاف فاز در واقع از روی فاصله محاسبه می‌شود؛ اما در [۱۲]، اشاره‌ای به روش این محاسبه نشده است. با استفاده از نتایج [۹]، می‌توان، با دقت بیشتر، مسأله ارائه شده در [۱۲] را پیاده‌سازی کرد.

مطلب مهمی که در [۱۳] به آن اشاره شده است این است که می‌توان، با استفاده از برش<sup>۲</sup>، از آرتیفکت‌ها تصاویر مجزا و متمرکز<sup>۳</sup> تشکیل داد. بنابراین، در این روش که از به‌دست آوردن فاصله آرتیفکت و پراکنده‌ساز استفاده می‌کند، در صورت داشتن تصویر عالی و متمرکز از پراکنده‌سازها، می‌توان به نحو بسیار بهتری بین آرتیفکت و پراکنده‌ساز متناظر آن تناظر یک به یک برقرار کرد.

موضوع [۱۴]، استفاده از چندمسیرگی در سونار روزنه مصنوعی معکوس است؛ اما در آن از چندمسیرگی، تنها به منظور بهبود کیفیت تصویر دو بعدی استفاده شده است. در این مقاله، با استفاده از روشی متفاوت، از چندمسیرگی جهت تشکیل تصویر سه بعدی می‌توان بهره گرفت.

داشتن یک حسگر اضافی، دارای مزایایی غیرقابل چشم‌پوشی است؛ به این ترتیب، تعداد پراکنده‌سازهای بیشتری از جسم در

<sup>4</sup> Spreading Loss

<sup>5</sup> Absorption Loss

<sup>6</sup> Line of Sight (LOS)

<sup>۱</sup> آرتیفکت: همان تصویر غیرواقعی و ضعیف‌تر است که در کنار تصویر اصلی تشکیل می‌شود.

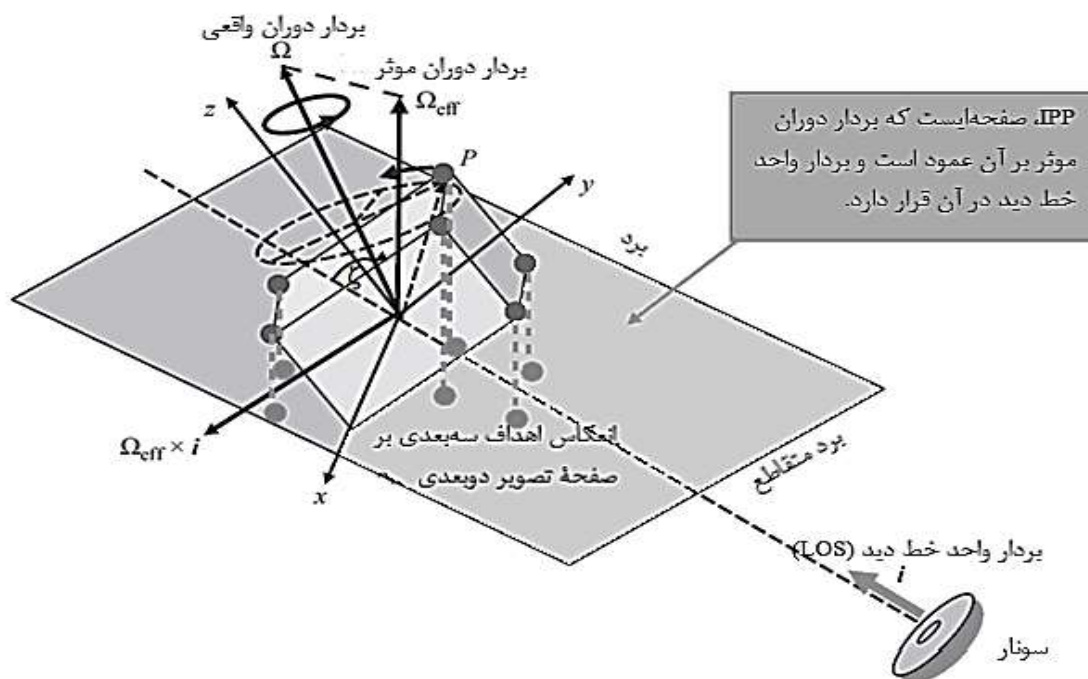
<sup>۲</sup> Crop

<sup>۳</sup> Focused

یکسان واقع خواهند شد و با انجام تصحیح فاز<sup>۸</sup> (جبران سازی حرکت ظریف<sup>۹</sup>)، یک جابجایی فرکانس داپلر ثابت، باقی خواهد ماند. بنابراین، پس از انجام جبران سازی حرکت، به علت یک جابجایی فرکانس داپلر ثابت، تمام پراکنده سازه های هدف با سرعت مشابه و به علت برد ثابت در یک مسیر داپلری حرکت خواهد کرد. اگر هدف دارای یک حرکت نرم باشد، روش جبران سازی حرکت استاندارد بر پایه تبدیل فوریه، برای ایجاد یک تصویر متمرکز از هدف کفایت می کند. اگرچه، در صورتی که هدف دارای حرکات پیچیده باشد، روش استاندارد بر پایه تبدیل فوریه برای ایجاد یک تصویر مناسب کفایت نمی کند. در این شرایط، می بایست از روش های پیچیده تر استفاده شود. هر چند، غالباً، اهداف دریایی دارای حرکات پیچیده نیستند.

است. مولفه در طول خط دید، ایجاد تغییر در فرکانس داپلر می کند؛ اما مولفه عمود بر خط دید، ایجاد تغییر در زاویه دید می کند، که دارای تأثیر مشابه حرکت دورانی هدف است.

هنگامی که هدف دارای حرکات نوسانی yaw، pitch، roll و yaw است نشانگر نوسان<sup>۱</sup> حول سه محور مختصات طولی<sup>۲</sup>، عرضی<sup>۳</sup> و عمودی<sup>۴</sup> است. بردار دوران ترکیبی  $\Omega$ ، فرکانس داپلر یک پراکنده ساز مشخص در هدف را تعیین می کند. بر طبق شکل (۳)، بردار دوران موثر  $\Omega_{eff}$  برداری عمود بر  $i$  (بردار واحد خط دید) است و در صفحه ای واقع است که بردارهای واحد  $\Omega$  و  $i$  در آن واقع اند. بنابراین، سطح بازتابی تصویر<sup>۵</sup> به عنوان سطحی تعریف می شود که  $\Omega_{eff}$  بر آن عمود است و بردار  $i$  در آن قرار دارد. در فرایند جبران سازی حرکت استاندارد، با انجام تصحیح برد<sup>۶</sup> (جبران سازی حرکت عمده<sup>۷</sup>)، پراکنده سازه ها، در سلول های برد



شکل (۳): صفحه انعکاس تصویر (IPP) در سونار روزنه مصنوعی معکوس [۱].

## ۲-۲- شرایط کانال آب

**افت پخش:**  
در حوزه انتشار موج صوتی، یکی از موثرترین پدیده ها، افت ایجاد شده به علت انتشار هندسی امواج زیر آب است. این افت در آب عمیق، کروی و در آب کم عمق، استوانه ایست. در عمل، این افت بر طبق فاصله از نقطه منبع، به دو دسته کروی و استوانه ای تقسیم می شود.

تصویرسازی هدف متحرک زیر آب از طریق سونار روزنه مصنوعی معکوس، وابسته به شرایط کانال آب است. مهم ترین شاخص های کانال آب موثر بر تشکیل تصویر در عنوان های زیر شرح داده شده اند:

<sup>۸</sup> Phase Adjustment

<sup>۹</sup> Fine

<sup>۱</sup> Oscillation

<sup>۲</sup> Longitudinal

<sup>۳</sup> Transversal

<sup>۴</sup> Vertical

<sup>۵</sup> Image Projection Plane (IPP)

<sup>۶</sup> Range Alignment

<sup>۷</sup> Coarse

بررسی میزان بازتابش و یا پراکندگی توسط سطح دریا، شاخص رایلی<sup>۳</sup> است که در رابطه (۲) آورده شده است [۱۸].

$$R = kH \sin \theta \quad (2)$$

در این رابطه،  $k$  عدد موج  $\frac{2\pi}{\lambda}$  است؛  $H$ ، میزان جذر میانگین مربع<sup>۴</sup> ارتفاع موج است و  $\theta$ ، زاویه<sup>۵</sup> نشیب<sup>۵</sup> مربوط به برخورد موج صوتی با سطح آب است. هنگامی که  $R \ll 1$ ، سطح آب ایجاد یک بازتابش همدوس در زاویه<sup>۵</sup> آینه‌ای برابر با زاویه<sup>۵</sup> برخورد می‌کند. هنگامی که  $R \gg 1$ ، سطح به صورت یک پراکنده کننده عمل کرده و انرژی ناهمدوس را در تمامی جهات پخش می‌کند.

سطح دریا را می‌توان به شکل مسطح، سینوسی [۶] و یا با استفاده از بعضی توابع ریاضی [۱۹] نمونه‌سازی کرد.

در فرکانس‌های کاری سونار روزنه مصنوعی، شاخص رایلی بزرگ است و بنابراین، سطح دریا به‌عنوان پراکنده کننده امواج صوتی عمل می‌کند و نمی‌توان از بازتاب آینه‌ای آن استفاده کرد. پژوهش‌های ما با استفاده از بسته نرم‌افزاری COMSOL نیز موید این مطلب است، که در عنوان بعدی (نظریه<sup>۵</sup> ردیابی اشعه در زیر آب)، به آن اشاره خواهد شد. بنابراین، در این پژوهش، به بررسی اثرات انعکاسی بستر دریا که به‌عنوان منبع مجازی عمل می‌کند، اکتفا شده است.

بستر دریا، دارای اثر مشابه سطح دریاست. اگرچه، بستر دریا به‌علت وجود لایه‌های چندگانه و متنوع دارای پیچیدگی بیشتر است. در شرایط یکسان، هرچه بستر دریا صاف‌تر و سخت‌تر شود، میزان بازتابش بیشتر خواهد شد [۱۸].

### نظریه<sup>۵</sup> ردیابی اشعه در زیر آب

معادله<sup>۵</sup> موج که بیانگر انتشار صوت است، از معادلات هیدرودینامیک به‌دست می‌آید. معادله<sup>۵</sup> موج برای فشار  $p$  در مختصات استوانه‌ای، برای یک ناحیه<sup>۵</sup> بدون منبع، در رابطه<sup>۵</sup> (۳) آورده شده است [۷].

$$\nabla^2 p(\mathbf{r}, z, t) - \frac{1}{c^2(\mathbf{r}, z)} \frac{\partial^2 p(\mathbf{r}, z, t)}{\partial t^2} = 0 \quad (3)$$

در این معادله، مختصات برد با  $\mathbf{r} = (x, y)$  و مختصات عمق با  $z$  که جهت مثبت آن، رو به پایین است، نشان داده شده‌اند.  $c(\mathbf{r}, z)$ ، سرعت صوت در محیط انتشار موج است. می‌توان با فرض یک پاسخ با وابستگی فرکانسی به شکل  $e^{-i\omega t}$ ، معادله<sup>۵</sup> بالا را در حوزه<sup>۵</sup> فرکانس حل کنیم تا معادله<sup>۵</sup> هلم هولتز را به شکل رابطه<sup>۵</sup> (۴) به‌دست آوریم [۷].

$$\nabla^2 p(\mathbf{r}, z) + K^2 p(\mathbf{r}, z) = 0 \quad (4)$$

در صورتی که انتشار عمودی به حد خود که توسط کف دریا و سطح دریا تحمیل می‌شود برسد، از آن‌جا به بعد، انتشار استوانه‌ای برای انتشار افقی آغاز می‌شود. در مورد افت کروی، تضعیف سیگنال متناسب با معکوس مربع فاصله است و در مورد افت استوانه‌ای، تضعیف سیگنال متناسب با معکوس فاصله است [۱۶]. در مطالب این مقاله، با توجه به استفاده از نمونه<sup>۵</sup> ساده نظریه<sup>۵</sup> اشعه، از محاسبات مربوط به افت پخش، صرف نظر شده است.

### افت جذبی:

در طول انتشار صوت در زیر آب، بخشی از انرژی صوتی توسط آب جذب می‌شود. نرخ جذب، وابسته به فرکانس موج و مشخصات محیط انتشار، همانند چسبندگی آب خالص و میزان سولفات منیزیم<sup>۱</sup> و اسید بوریک<sup>۲</sup> در آب، است [۳].

در کل، می‌توان چنین بیان کرد که تأثیرات جذب در فرکانس‌های منبع کمتر از ۱ کیلوهرتز قابل چشم‌پوشی است؛ در فرکانس منبع حدود ۱۰ کیلوهرتزی تا فاصله<sup>۵</sup> ده‌ها کیلومتر قابل چشم‌پوشی است؛ در فرکانس منبع در حدود ۱۰۰ کیلوهرتز تا فاصله<sup>۵</sup> حدود یک کیلومتری قابل چشم‌پوشی است و در نهایت در فرکانس‌های منبع مگاهرتزی تا فاصله<sup>۵</sup> کمتر از صد متر قابل چشم‌پوشی است [۳].

در فرکانس‌ها و فواصل این مقاله می‌توان از افت جذبی صرف نظر کرد.

### سرعت صوت در زیر آب:

مشخصات آکوستیک زیر آب همانند مسیرهای صوتی، به معنای مسیرهایی که صوت ساطع از منبع طی می‌کند، در اصل وابسته به ساختار سرعت صوت در زیر آب است. سرعت صوت در زیر آب را می‌توان با استفاده از روابط متنوعی به‌دست آورد. در [۱۷]، ارسال‌های صوتی برد طولانی، جهت آزمایش دقت معادلات مورد استفاده جهت محاسبه<sup>۵</sup> سرعت، انجام شده است. سرعت صوت، تابعی از عمق آب ( $z$ )، دما ( $T$ ) و شوری ( $S$ ) است. یک فرمول ساده جهت محاسبه<sup>۵</sup> سرعت صوت در [۱۸] آورده شده است.

در این تحقیق، با در نظر گرفتن عمق کم و فواصل کوتاه، از تغییرات سرعت صوت صرف نظر شده است.

### شرایط سطح دریا و بستر دریا:

سطح دریا و بستر دریا، می‌توانند به‌عنوان بازتابگر و یا پراکنده کننده امواج صوتی عمل کنند. میزان بازتابش و یا پراکندگی توسط سطح دریا، بستگی به ارتفاع موج دریا، فرکانس صوت و زاویه<sup>۵</sup> برخورد موج با سطح دارد. یک معیار کمی برای

<sup>3</sup> Rayleigh parameter

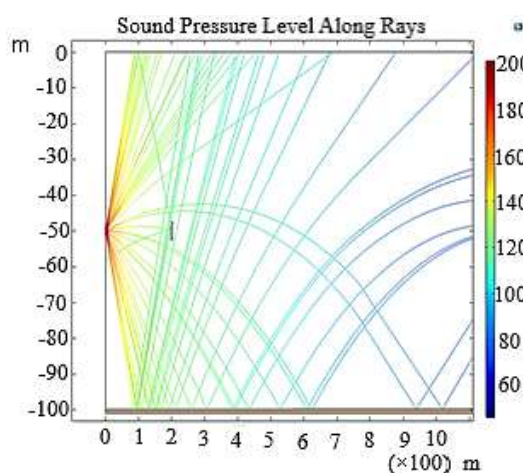
<sup>4</sup> Root Mean Square (RMS)

<sup>5</sup> Grazing angle

<sup>1</sup> Magnesium Sulfate

<sup>2</sup> Boric acid

نمودار شکل (۴)، با استفاده از سرعت در چند عمق نمونه و درونیابی<sup>۳</sup> به دست آمده است. در شکل (۵)، سطح فشار صوت در طول اشعه‌ها رسم شده است. البته، نمونه‌سازی مورد استفاده، یعنی آکوستیک اشعه‌ای، قادر به توضیح تمامی پدیده‌های صوتی نمی‌باشد. در قسمت‌های بعدی این مقاله، از تغییرات سرعت صوت صرف نظر شده است.



شکل (۵): سطح فشار صوت در طول اشعه که با استفاده از شاخص‌های جدول (۲) حاصل شده است.

از شکل (۵)، ملاحظه می‌شود که در فرکانس ۱۰۰ کیلوهرتز، و البته می‌توان نشان داد که به‌طور عمومی در محدوده فرکانس‌های کاری سونار روزنه مصنوعی، توان بازتابی سطح دریا بسیار پایین است. اگرچه در فرکانس‌های پایین (به‌طور مثال ۱۰۰ هرتز)، سطح دریا اشعه صوتی را بازتاب می‌دهد. علاوه بر این، بررسی شاخص رایلی که در بخش شرایط سطح دریا و بستر دریا توضیح داده شد نیز، موید این موضوع است.

اگر آنچنان که در شکل (۵) ملاحظه می‌شود، یک شی مربعی یا در واقع شی مکعب در ابعاد سه بعدی با طول ضلع ۵ متر را در فاصله ۲۰۰ متری از منبع قرار دهیم، اشعه‌های صوتی ارسالی از منبع و بازتابی از بستر دریا، پس از برخورد به جسم، به سمت حسگر بازتاب می‌شوند. اگرچه، نمونه آکوستیک اشعه‌ای ساده در نظر گرفته شده، به دقت، پدیده بازتاب را نشان نمی‌دهد.

ردیابی اشعه در زیر آب، به‌طور دقیق، در پروژه Bellhop مورد بررسی قرار گرفته است که جهت بررسی آن می‌توان به [۲۰-۲۱] مراجعه نمود.

### ۳- روابط مربوط به پردازش سه بعدی در صورت وجود منابع مجازی

هندسه سامانه تصویرسازی سه بعدی در شکل (۱) آورده شد. اختلاف فاز سیگنال‌های دریافتی گیرنده‌های ۱ و ۲، به تفاضل دو

که در مورد رابطه (۴)، میزان  $K$  از رابطه (۵) به دست می‌آید [۷].

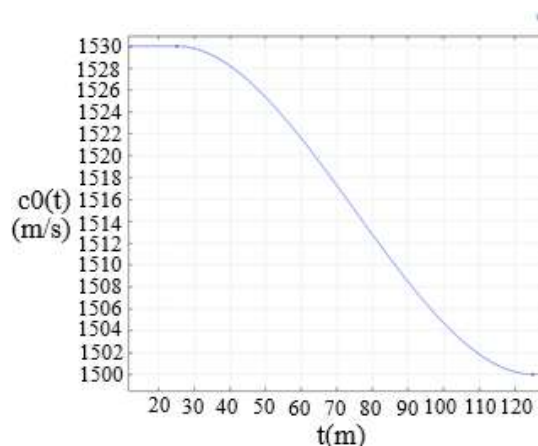
$$K^2(\mathbf{r}, z) = \frac{w^2}{c^2(\mathbf{r}, z)} \quad (5)$$

میدان صوتی از یک منبع نقطه‌ای، یا با حل مسأله مقدار مرزی مربوط به معادله موج منبع نقطه‌ای (روش طیفی یا حالات معمولی<sup>۱</sup>) و یا با تقریب این معادله با استفاده از یک مسأله مقدار اولیه (نظریه اشعه، معادله پارابولیک<sup>۲</sup>)، حاصل می‌شود [۷]. نظریه اشعه، یک پاسخ تقریبی هندسی و فرکانس بالا به رابطه مربوط به میدان صوتی از یک منبع نقطه‌ای است و در این مقاله از این نظریه جهت حل مسأله و شبیه‌سازی بهره گرفته شده است. در این بخش، شناسایی تابش صوتی در زیر آب را با استفاده از بسته نرم‌افزاری COMSOL ۵/۴ مورد بررسی قرار می‌دهیم. شاخص‌های شبیه‌سازی با نرم‌افزار COMSOL در جدول (۲) آورده شده است.

جدول (۲): شاخص‌های شبیه‌سازی با نرم‌افزار COMSOL.

فرکانس منبع	۱۰۰ کیلوهرتز
عمق آب	۱۰۰ متر
شوری آب	۳۵ گرم در لیتر
چگالی آب	۱۰۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب
دمای آب	۸ درجه سانتی‌گراد
میزان pH آب	۸
عرض حوزه آب	۲ کیلومتر
مقدار rms ارتفاع موج	۱ متر
سرعت صوت در ماده زیرین	۱۵۷۵ متر بر ثانیه
چگالی ماده زیرین	۱۷۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب
میزان تضعیف ماده زیرین	۰/۰۰۶۶ (معکوس متر)
زمان شبیه‌سازی	۵ ثانیه

میزان تغییرات سرعت صوت بر حسب عمق آب در شکل (۴) رسم شده است.



شکل (۴): تغییرات سرعت صوت بر حسب عمق آب.

<sup>۳</sup> Interpolation

<sup>۱</sup> Normal Mode (NM)

<sup>۲</sup> Parabolic Equation (PE)

می‌آوریم [۹].  $P_0$  را که برابر با حاصل ضرب  $g(\theta_2)FDS$  است، در شبیه‌سازی با نرم‌افزار متلب، برابر با  $0/3$  فرض کرده‌ایم.

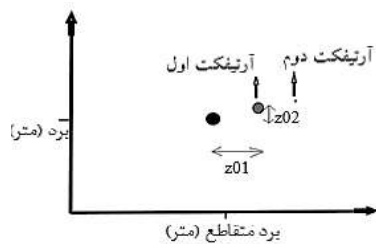
پس از به‌دست آوردن  $F_W$  برای جاروب‌های زمانی و پله‌های فرکانسی مختلف، با گرفتن معکوس تبدیل فوریه دو بعدی از آن،  $f'_W(z_1, z_2)$  حاصل می‌شود [۹].

سپس می‌توان با استفاده از رابطه (۷)، پاسخ ضربه را به دست آورد [۹].

$$f_W(z_1, z_2) = f'_W\left(\frac{z_2}{r_{z2}B}, \frac{z_1}{r_{z1}T_{obs}}\right) \quad (7)$$

در رابطه (۷)،  $r_{z1}$  و  $r_{z2}$  به ترتیب، برابر با تفکیک‌پذیری در ابعاد برد متقاطع و برد است.  $B$ ، پهنای باند سیگنال مورد استفاده است و  $T_{obs}$ ، زمان مشاهده حسگر است.

نتیجه کلی پاسخ ضربه در حالت تک پراکنده‌ساز در شکل (۶) آورده شده است.



شکل (۶): تصویر حاصل از شبیه‌سازی حالت تک پراکنده‌ساز در حضور چندمسیرگی؛ در کنار پراکنده‌ساز، آرتیفکت اول به وضوح ملاحظه می‌شود.

حال می‌خواهیم با استفاده از شکل (۶) مقدار جابجایی آرتیفکت اول (اصلی) را در دو جهت برد و برد متقاطع نسبت به پراکنده‌ساز<sup>۳</sup> اصلی به‌دست آوریم. یعنی  $z_{01}$  و  $z_{02}$  را به دست آوریم تا از آن‌جا مقدار اختلاف طول مسیرهای غیرمستقیم و مستقیم حاصل شود.

طبق روابط (۹ و ۱۰) و از طرفی به‌علت برقراری معادله (۸)، به‌دست آوردن  $z_{01}$  و  $z_{02}$ ،  $\alpha_0$  و  $\beta_0$  و از آن‌جا  $\Delta R$  در زمان‌های مختلف حاصل می‌شود [۹]. دقت شود که در صورتی که زمان را به‌طور متقارن حول زمان صفر فرض کنیم، در وسط زمان مشاهده یعنی زمان صفر، می‌توان از مولفه دو بسط تیلور ( $\beta_0$ ) نیز صرف نظر کرد.

$$\Delta R = \alpha_0 + \beta_0 t \quad (8)$$

$$z_{01} = \frac{\beta_0 T_{obs} r_{z1}}{\lambda_0} \quad (9)$$

$$z_{02} = \frac{\alpha_0}{2} \quad (10)$$

فاصله  $Rr1$  و  $Rr2$  مرتبط است و سپس با استفاده از روشی که جزئیات آن در [۵] آورده شده است و استفاده از سری تیلور، بعد سوم هر نقطه از هدف توسط یک معادله درجه دوم به اختلاف فاز سیگنال‌ها مرتبط می‌شود.

در این مقاله، روشی جدید جهت تصویربرداری سه بعدی در سونار روزنه مصنوعی معکوس ارائه می‌شود. در ابتدا فرض می‌کنیم که می‌خواهیم با به‌کارگیری تنها یک فرستنده واقعی و یک گیرنده و استفاده از خاصیت بازتابشگری بستر دریا و نوشتن بسط روابط، با ارسال تنها یک سیگنال به یک تصویر سه بعدی از هدف دست یافت. ساختار پیشنهادی در شکل (۲) نشان داده شد.

مسئله مهم، مربوط به جداسازی سه سیگنال مربوط به چهار مسیر از هم است. این سه سیگنال مربوط به مسیرهای ADA-1، ADA-2 یا ADOA-3، AODOA است. با توجه به مباحث قسمت قبلی، از انعکاسات سطح دریا صرف نظر شده است. اما مسأله‌ای که می‌خواهیم روی آن بحث کنیم این است که می‌توان بدون جداسازی این سیگنال‌ها، به پردازش تداخل‌سنجی و تشکیل تصویر سه بعدی دست یافت. به این منظور، ابتدا، رابطه (۶) تعریف می‌شود [۹].

$$F(f, R) = [1 + g(\theta_2)FDSexp(j\gamma)] \quad (6)$$

در رابطه (۶)،  $F$  فاکتور انتشار الگو<sup>۱</sup> نام دارد. در صورت حرکت هدف در زاویه ارتفاع پایین و بر روی یک سطح بازتابشگر، تأثیراتی مانند بازتابش و انکسار<sup>۲</sup> با در نظر گرفتن این کمیت مختلط که به‌صورت نسبت بین میدان مغناطیسی برخورد کننده به هدف در شرایط انتشار چندمسیرگی و فضای آزاد تعریف می‌شود، لحاظ می‌شوند.  $R$  برداریست که موقعیت هدف را مشخص می‌کند.  $f$ ، فرکانس سیگنال است.  $\theta_2$ ، زاویه بین خط دید سونار و مسیر غیرمستقیم است (زاویه بین AO و AD در شکل (۲) مشاهده می‌شود).  $g(\theta)$ ، تابع الگوی تشعشع آنتن است.  $\gamma$ ، تاخیر فاز مربوط به اختلاف طول مسیرهای مستقیم و بازتابی است.  $\Gamma$ ، ضریب فرنل است، که بازتاب از یک صفحه مسطح نرم را به‌طور کمی بیان می‌کند (البته شاخص‌ها و روابط آن در محیط سوناری، با شاخص‌ها و روابطی که در مرجع شماره [۹]، برای امواج الکترومغناطیس بیان شده است، متفاوت است و در مورد آن برای امواج صوتی، قطبش عمودی و افقی تعریف نمی‌شود).  $D$ ، ضریب واگرایی است، که تأثیر انحنای زمین را لحاظ می‌کند و در ابعاد سوناری تأثیر آن ناچیز است و از آن صرف نظر می‌شود و  $k$ ، مقدار جذر میانگین مربع ضریب بازتاب آینه‌ای است [۹].

سپس  $F_W$  را که برابر با توان دوم  $F(f, R)$  در یک پنجره زمانی و فرکانسی است، به ازای هر زمان و هر فرکانس، به‌دست

<sup>۳</sup> Scatterer

<sup>۱</sup> Pattern Propagation Factor

<sup>۲</sup> Refraction and Diffraction

ارتباط فاصله آرتیفکت و پراکنده‌ساز با اختلاف مسیرهای مستقیم و غیرمستقیم تغییر نمی‌کند.

پس از به‌دست آمدن اختلاف طول مسیرهای مستقیم و غیرمستقیم، با توجه به معلوم بودن ارتفاع حسگرها، ارتفاع پراکنده‌ساز حاصل می‌شود. البته، در حالت دوپایه، ارتفاع پراکنده‌سازها از دو طریق حاصل می‌شود. یکی از چالش‌ها این است که بدانیم کدام آرتیفکت متناظر با مسیر غیرمستقیم از فرستنده به هدف و کدام آرتیفکت متناظر با مسیر غیرمستقیم از هدف به گیرنده است. می‌توان از روی اختلاف بیشتر دو ارتفاع حاصل شده، در اثر انتخاب اشتباه، به عدم صحت آن پی برد.

#### ۴- شبیه‌سازی جهت تصویرسازی سه بعدی

جهت شبیه‌سازی حالت سوناری در نرم‌افزار متلب از شکل موج فرکانس پله‌ای استفاده می‌کنیم. الگوریتم تصویرسازی مورد استفاده در این شبیه‌سازی‌ها، الگوریتم برد داپلر است. در شبیه‌سازی‌ها، سرعت صوت ثابت و برابر با ۱۵۰۰ متر بر ثانیه فرض می‌شود. شبیه‌سازی برای هدف ساده تک پراکنده‌ساز و هدف مکعب، در زیر بخش‌های اول و دوم از این بخش، آورده شده است.

##### ۴-۱- شبیه‌سازی هدف تک پراکنده‌ساز

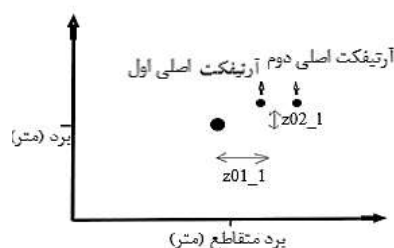
شاخص‌های شبیه‌سازی هدف تک پراکنده‌ساز در جدول (۳) آمده است؛ البته توجه شود که در شبیه‌سازی هدف تک پراکنده‌ساز، شاخص موقعیت هدف، متغیر است و شاخص آورده شده در جدول (۳)، تنها، مربوط به یکی از حالات شبیه‌سازی است.

جدول (۳): شاخص‌های شبیه‌سازی جهت تصویرسازی سه بعدی هدف تک پراکنده‌ساز.

موقعیت فرستنده	موقعیت مرجع (۰،۰،۰) - موقعیت مرجع
موقعیت هدف نسبت به فرستنده	(۰،۱۰۰،۴۰) متر
موقعیت گیرنده ثابت نسبت به فرستنده	(۰،۰،۱۰) متر
سرعت هدف	۱۶/۲ گره دریایی (۳۰ کیلومتر بر ساعت)
میزان دوران حول محور طولی (PHI)	۰
میزان دوران حول محور عرضی (NI)	۰
میزان دوران حول محور عمودی (MU)	۹۰ درجه
فرکانس مرکزی	۲۵ کیلوهرتز
پهنای باند	۲/۵ کیلوهرتز
تعداد پله‌های فرکانسی	۱۰۰۱
تعداد جاروب‌های زمانی	۱۰۰۱
زمان مشاهده	۰/۵ ثانیه
ارتفاع فرستنده، گیرنده و هدف از بستر دریا	۵۰ و ۶۰ و ۱۰ متر
ضریب بازتاب آینه‌ای بستر دریا ( $P_0$ )	۰/۳
شاخص‌های نوسانی (pitch, roll, yaw)	(۰،۰،۰)

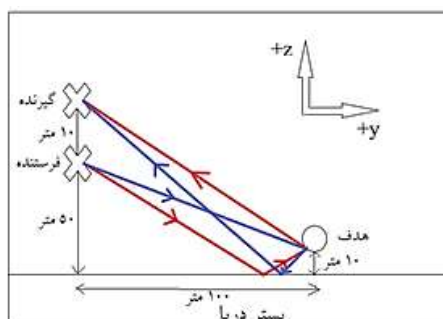
$\lambda_0$  طول موج متناظر با فرکانس مرکزی مورد استفاده است، سپس، جهت به‌دست آوردن بعد سوم، از روابط مثلثاتی، استفاده می‌شود.

در مرحله بعدی فرض می‌کنیم که حسگرهای فرستنده و گیرنده در یک موقعیت قرار ندارند (سونار دوم را به مسأله اضافه می‌کنیم)؛ در این حالت، در صورت استفاده از منبع مجازی بستر دریا، به ازای هر پراکنده‌ساز دو آرتیفکت اصلی در تصویر دو بعدی برد داپلر ملاحظه خواهد شد. نمونه‌ای از این حالت در شکل (۷) نشان داده شده است. در این شکل، به جهت اختصار، مقادیر فواصل مربوط به آرتیفکت اصلی دوم (یعنی  $z_{01\_2}$  و  $z_{02\_2}$ ) نشان داده نشده است. دقت شود که میزان شدت دو آرتیفکت اصلی اول و دوم برابر است و این برخلاف شکل (۶) است که در آن آرتیفکت دوم مربوط به مسیر اشعه صوتی غیرمستقیم - غیرمستقیم و دارای شدت بسیار ضعیف است. دو آرتیفکت بسیار ضعیف در مورد حالت استفاده از دو سونار نیز وجود دارند که در شکل (۷)، جهت اختصار، از نشان دادن آن‌ها صرف نظر شده است.



شکل (۷): تصویر تک پراکنده‌ساز با استفاده از سونار دوپایه و در حضور چندمسیرگی.

یکی از آرتیفکت‌های شکل (۷)، مربوط به حالتی است که برخورد به بستر دریا در مسیر بین فرستنده و هدف صورت گیرد و آرتیفکت دوم مربوط به حالتی است که برخورد به بستر دریا در مسیر بین هدف و گیرنده صورت گیرد؛ این دو مسیر به ترتیب با رنگ‌های قرمز و آبی در شکل (۸) نشان داده شده است.



شکل (۸): مسیرهای طی شده از فرستنده به گیرنده با برخورد به بستر دریا.

هرچند شدت دو آرتیفکت اصلی ایجاد شده از شدت تک آرتیفکت اصلی، در حالت تک‌پایه، کمتر است؛ اما، روابط مربوط به

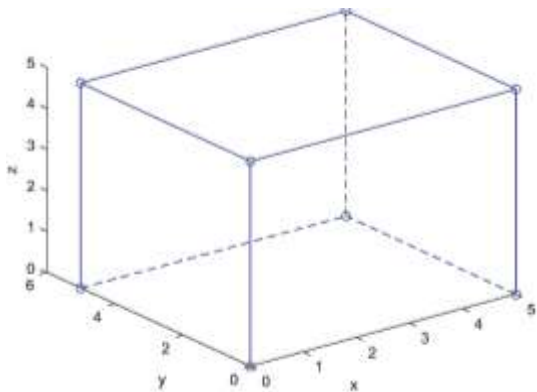


به طور مثال، درحالی که ارتفاع پراکنده ساز از بستر دریا ۵۰ متر باشد، مقدار جابجایی آرتیفکت های اصلی اول و دوم نسبت به پراکنده ساز اصلی، در بعد برد، به ترتیب برابر با ۲۰/۷ و ۲۴/۰۷ است.

بنابراین، پس از استفاده از روابط مثلثاتی، مقادیر ارتفاع پراکنده ساز از بستر دریا، به ترتیب برابر با، ۴۹/۹۶۹۸ و ۴۹/۹۸۵۸ است. در صورتی که آرتیفکت های متناظر با مسیرهای رفت و برگشت به اشتباه (برعکس) انتخاب شوند، مقادیر ارتفاع تک پراکنده ساز برابر با ۴۲/۱۸ و ۵۹/۹۸ به دست می آید. از روی اختلاف بیشتر دو ارتفاع حاصل شده، در اثر این انتخاب اشتباه، به عدم صحت آن پی برده می شود.

#### ۲-۴- شبیه سازی هدف مکعب

در این بخش، می خواهیم یک هدف سه بعدی مکعب با هشت پراکنده ساز را شبیه سازی کنیم. از آن جا که گیرنده سونار، تصویر دو بعدی را در ابعاد برد و برد متقاطع به دست می دهد، جهت به دست آوردن بعد سوم پراکنده سازها از روش ارائه شده در این مقاله استفاده می کنیم و سپس توسط الگوریتم های نسبت دهی، هر ارتفاع یافت شده را به پراکنده ساز متناظر آن نسبت می دهیم. مکعبی که می خواهیم آن را شبیه سازی کنیم، به ضلع ۵ متر است. نمای هدف مکعب در شکل (۹) آورده شده است.



شکل (۹): نمای هدف مکعب.

در این سناریو فرض شده است، که دو سونار مجهز به فرستنده و گیرنده در دو محل ثابت شده اند و از طریق یک مرکز کنترل و محاسبات با یکدیگر ارتباط تعاملی دارند و اطلاعات دریافتی از طریق یک پیوند مخابراتی مناسب برای مرکز محاسبات ارسال می شود. به دلیل مستقل بودن موضوع پیوند مخابراتی و سامانه تعامل بین دو سونار از موضوع بحث در این مقاله، به آن پرداخته نشده است.

نمای آرایش و ابعاد در نظر گرفته شده برای این مسأله در شکل (۸) نشان داده شده است. خطای به دست آوردن بعد سوم، در صورتی که برخورد با بستر دریا در مسیر رفت (از فرستنده تا هدف) و یا برگشت (از هدف تا گیرنده) صورت گیرد و با تغییر موقعیت هدف، در جدول (۴) آورده شده است. درصد خطا، با استفاده از رابطه (۱۱) حاصل می شود.

$$error - percent = \frac{|h_{simulated} - h_{real}| \times 100}{h_{real}} \quad (11)$$

که در معادله (۱۱)، error-percent، نشانگر درصد خطا و  $h_{simulated}$ ، نشانگر ارتفاع پراکنده ساز حاصل از شبیه سازی و  $h_{real}$ ، نشانگر ارتفاع واقعی پراکنده ساز است. ارتفاع حاصل از شبیه سازی، با استفاده از معادله (۱۲) به دست می آید.

$$proj \left\{ \sqrt{\left(1 + \left(\frac{h_{sonar} + h_{simulated}}{proj}\right)^2\right)} - \sqrt{\left(1 + \left(\frac{h_{sonar} - h_{simulated}}{proj}\right)^2\right)} \right\} = \alpha_0 \quad (12)$$

در معادله (۱۲)،  $proj$  برابر با طول بردار حاصل از انعکاس پراکنده ساز بر روی صفحه  $xy$  است.  $h_{sonar}$  برابر با ارتفاع سونار از بستر دریا است و  $\alpha_0$  برابر با مولفه اول بسط تیلور اختلاف مسیرهای مستقیم و غیرمستقیم است که در اینجا از روی اختلاف فاصله پراکنده ساز و آرتیفکت در بعد برد حاصل می شود.

جهت اثبات این رابطه، به این مطلب دقت شود که این رابطه در وسط بازه مشاهده یعنی در لحظه زمانی صفر به دست آمده است؛ بنابراین، با در نظر گرفتن معادله (۸)، سمت راست معادله (۱۲) که همان اختلاف طول مسیرهای مستقیم و غیرمستقیم است، در این لحظه برابر با مولفه اول بسط تیلور آن یعنی  $\alpha_0$  است. جهت اثبات معادله (۱۲)، از روابط مثلثاتی بهره گرفته شده است. با در نظر گرفتن شکل (۲)، میزان شاخص  $proj$  برابر با طول پاره خط  $BC$  در این شکل است. جهت اختصار، از اثبات کامل معادله (۱۲) در متن مقاله صرف نظر شده است.

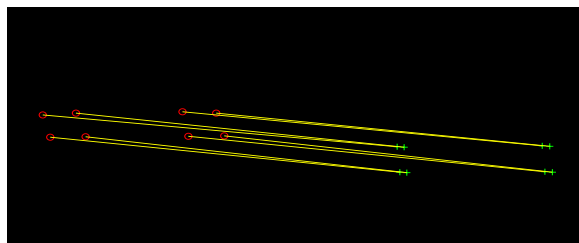
جدول (۴): خطای به دست آوردن بعد سوم در صورتی که برخورد به بستر دریا در مسیر رفت یا برگشت صورت گیرد.

ارتفاع پراکنده ساز از بستر دریا	درصد خطا در صورت برخورد در مسیر رفت	درصد خطا در صورت برخورد در مسیر برگشت
۱۰ متر	۰/۹۵	۲/۸
۲۰ متر	۰/۲۲	۰/۲۱
۳۰ متر	۰/۰۷	۰/۵۸
۴۰ متر	۰/۰۴	۰/۰۲
۵۰ متر	۰/۰۶	۰/۰۳

جهت یافتن بعدها سوم، در ابتدا، نقاط با روشنایی حداکثر را می‌یابیم. این هشت نقطه، رأس‌های مکعب هستند. سپس، هشت نقطه روشن‌تر بعدی را می‌یابیم. این هشت نقطه، آرتیفکت‌های اول متناظر پراکنده‌سازهای اصلی هستند. سپس، بین هشت پراکنده‌ساز اصلی و آرتیفکت‌هایشان، تناظر یک به یک برقرار می‌کنیم. این تناظر باید به نحوی باشد که در صورتی که فاصله پراکنده‌سازها از آرتیفکت‌های متناظرشان را در یک مجموعه قرار دهیم، این مجموعه دارای حداقل واریانس باشد. همچنین می‌توان جهت برقراری تناظر از دستوره‌های جعبه ابزار پردازش تصویر نرم‌افزار متلب جهت انطباق ویژگی‌های دو تصویر جدا شده مربوط به پراکنده‌سازها و آرتیفکت‌ها استفاده کرد.

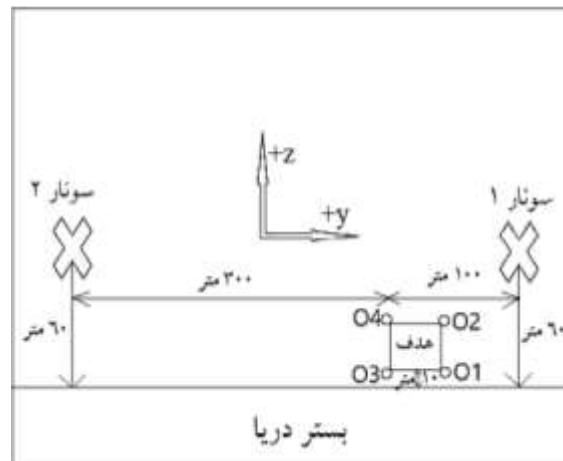
نمونه‌ای از عمل استفاده از جعبه ابزار پردازش تصویر نرم‌افزار متلب، در مورد حالت تک‌پایه (وجود یک آرتیفکت متناظر برای هر پراکنده‌ساز)، برای هدف مکعب (شکل ۹) در شکل (۱۱) نشان داده شده است.

در شکل (۱۱)، نقاط پراکنده‌ساز با استفاده از دوایر قرمز رنگ و نقاط آرتیفکت‌ها، با استفاده از ضربدرهای سبز رنگ نشان داده شده است. به‌منظور به دست آوردن شکل (۱۱)، در ابتدا، با تعریف یک میزان آستانه، نقاط مربوط به پراکنده‌سازهای اصلی را جدا می‌کنیم؛ سپس، آن‌ها را در یک تصویر مجزا قرار می‌دهیم. بعد از این مرحله، با حذف پراکنده‌سازها از تصویر، به تعداد پراکنده‌سازهای یافت شده، نقاط با شدت بالا یا همان آرتیفکت‌ها را یافته و آن‌ها را در یک تصویر مجزا قرار می‌دهیم. در نهایت با استفاده از دستوره‌های جعبه ابزار پردازش تصویر متلب، بین ویژگی‌های این دو تصویر، تناظر یک به یک برقرار می‌کنیم. لازم به ذکر است که جهت وضوح تصویر، در این شکل‌ها، به هدف شاخص دورانی NI را افزوده‌ایم تا پراکنده‌سازها و آرتیفکت‌ها، نسبت به هم، در بعد برد متقاطع نیز دارای فاصله باشند.



شکل (۱۱): برقراری تناظر یک به یک بین نقاط پراکنده‌سازها و آرتیفکت‌ها با استفاده از جعبه ابزار پردازش تصویر نرم‌افزار متلب شاخص‌های شبیه‌سازی، جهت شبیه‌سازی هدف مکعب در جدول (۵) آمده است.

در ابتدا، روش‌های به‌دست آوردن بعد سوم از طریق آرایش مسأله، که مقطع دو بعدی آن در شکل (۱۰) نشان داده شده است، را بیان می‌کنیم.



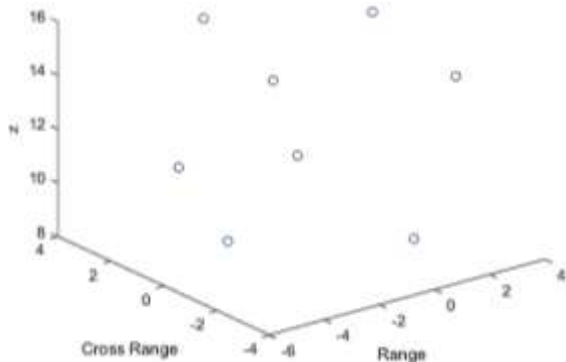
شکل (۱۰): آرایش دوپایه در نظر گرفته شده در صورتی که دو حسگر در دو طرف هدف قرار گیرند.

در صورتی که استفاده از منابع مجازی مقدور باشد می‌توان، با استفاده از هر یک از حسگرهای تک‌پایه و منابع مجازی، بعد سوم را به‌دست آورد. علاوه بر این، با استفاده از یک حسگر به‌عنوان فرستنده و حسگر دیگر به‌عنوان گیرنده (حالت دوپایه) و منابع مجازی، بعد سوم پراکنده‌سازها به‌دست می‌آید. همچنین، می‌توان با استفاده توأم آرایش‌های تک‌پایه و دوپایه و بدون استفاده از منابع مجازی، بعد سوم پراکنده‌سازها را به‌دست آورد و البته این مطلب در صورتی است که دچار مسأله ابهام فاز نشویم؛ در نهایت می‌توان با استفاده توأم از دو آرایش دوپایه ممکن و بدون استفاده از منابع مجازی بعد سوم پراکنده‌سازها را به‌دست آورد. بنابراین، در کل می‌توان به هفت روش، میزان بعد سوم پراکنده‌سازها را به‌دست آورد.

غالباً، استفاده از آرایش دوپایه، جهت یافتن بعد سوم پراکنده‌سازها، دارای بیشترین دقت و تفکیک‌پذیری است؛ اما بهترین روش جهت یافتن بعد سوم پراکنده‌ساز (در شکل ۱۰)، استفاده از سونار دوم به‌صورت تک‌پایه به‌همراه منبع مجازی بستر دریا است؛ زیرا، غالب تشعشعات بازگشتی از این پراکنده‌ساز به سونار اول نمی‌رسد. به‌طور مشابه، در مورد پراکنده‌ساز  $O_3$ ، از آرایش تک‌پایه سونار اول به‌همراه منبع مجازی بستر دریا بهره می‌جویم. در مورد پراکنده‌سازهای  $O_2$  و  $O_4$ ، بهترین روش استفاده از آرایش دوپایه به‌همراه منبع مجازی بستر دریا است که نتیجه استفاده از آن، دقت بالاتر به‌دست آمده است.

جدول (۵): شاخص‌های شبیه‌سازی جهت تصویرسازی سه بعدی هدف مکعب.

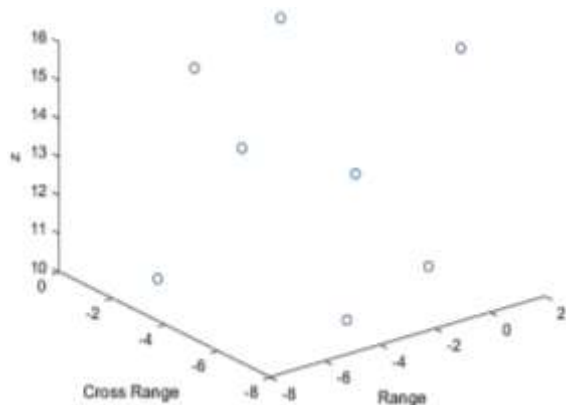
موقعیت فرستنده (متعلق به سونار ۱)	(۰,۰,۰)
موقعیت هدف نسبت به سونار ۱	متر (۰,۳۰۰-۵۰)
موقعیت سونار ۲ نسبت به سونار ۱	متر (۰,۴۰۰,۰)
سرعت هدف	۵/۴ گره دریایی (۱۰ کیلومتر بر ساعت)
میزان دوران حول محور طولی (PHI)	.
میزان دوران حول محور عرضی (NI)	.
میزان دوران حول محور عمودی (MU)	۷۵ درجه
فرکانس مرکزی	۱۰۰ کیلوهرتز
پهنای باند	۱۰ کیلوهرتز
تعداد پله‌های فرکانسی	۱۰۰۱
تعداد جاروب‌های زمانی	۱۰۰۱
زمان مشاهده	۱/۵ ثانیه
ارتفاع فرستنده، گیرنده و هدف از بستر دریا	۶۰ و ۶۰ و ۱۰ متر
ضریب بازتاب آینه‌ای بستر دریا (P <sub>a</sub> )	۰/۳
شاخص‌های نوسانی (pitch,roll,yaw)	(۰,۰,۰)



شکل (۱۲): نتیجه بازسازی سه بعدی هدف با استفاده از آرایش تک‌پایه حسگر ۱ و منابع مجازی

پس از محاسبه خطای بعد سوم تمام پراکنده‌سازها، متوسط خطای بعد سوم این پراکنده‌سازها برابر با حدود ۰/۶ متر به دست می‌آید.

در مرحله بعدی، سونار ۱ را کنار می‌گذاریم؛ نتیجه تصویر سه بعدی حاصل از شبیه‌سازی آرایش تک‌پایه سونار ۲ و منابع مجازی ناشی از فرستنده آن در شکل (۱۳) آورده شده است.



شکل (۱۳): نتیجه بازسازی سه بعدی هدف با استفاده از آرایش تک‌پایه سونار ۲ و منابع مجازی

در این حالت، متوسط قدر مطلق خطای بعد سوم برابر با ۰/۷ متر است.

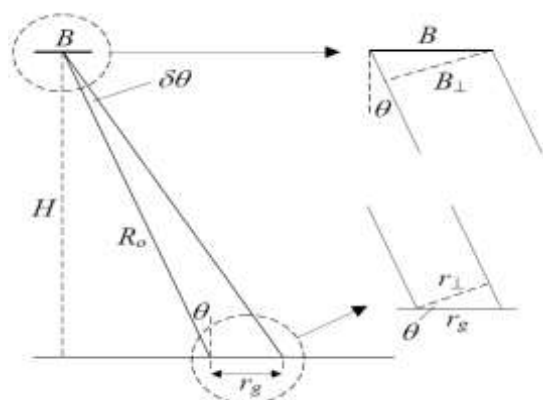
دقت شود که، فرض شده است که وجوه مکعب وجوه فرضی هستند و سیگنال ارسالی می‌تواند بدون انعکاس از آنان عبور نماید. این موضوع در مقالات معمول است. یعنی در شبیه‌سازی، اهداف شامل چند هدف نقطه‌ای در نظر گرفته می‌شوند و برای آنان وجوه دارای انعکاس در نظر نمی‌گیرند.

سپس استفاده از دو سونار را به صورت فرستنده در موقعیت سونار ۱ و گیرنده در موقعیت سونار ۲ مد نظر قرار گرفته شد. نتیجه تصویر سه بعدی حاصل از شبیه‌سازی آرایش دوپایه با منابع مجازی، در شکل (۱۴) نشان داده شده است.

نما و ابعاد مربوط به این آرایش در شکل (۱۰) آورده شده است.

نتیجه تصویر سه بعدی حاصل از شبیه‌سازی آرایش تک‌پایه سونار ۱ و منابع مجازی و بدون استفاده از سونار دوم، با استفاده از نرم‌افزار متلب، در شکل (۱۲) آورده شده است. در این شکل، به طور حدودی، هدف مکعب تشخیص داده می‌شود. در این شکل و همچنین شکل‌های (۱۳ و ۱۴)، با بهره‌گیری از مقادیر بعد سوم حاصل از شبیه‌سازی، به تصویر دوبعدی در ابعاد برد و برد متقاطع، عمق داده شده است. با توجه به تعریف مقدار آستانه، جهت به دست آوردن مکان پراکنده‌ساز، به ازای هر هدف نقطه‌ای، یک نقطه تمیز و بدون لب کناری<sup>۱</sup> ایجاد شده است.

<sup>۱</sup> Side Lobe



شکل (۱۵): هندسه مورد استفاده جهت محاسبه طول خط پایه بحرانی [۲۲].

در نهایت، می‌توان، جهت بازیابی دقیق شکل سه بعدی مکعب (شکل ۹)، از روی تصاویر دیده شده با زوایا و آرایش‌های مختلف (شکل‌های ۱۲، ۱۳، ۱۴) و به‌دست آوردن یک تصویر سه بعدی واحد، از روش‌های ارائه شده در [۲۳] استفاده کرد.

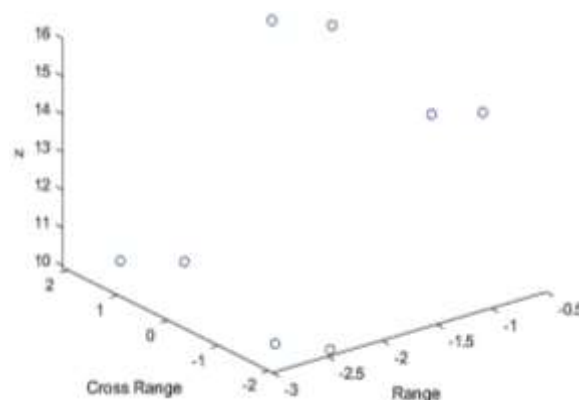
## ۵- نتیجه‌گیری

هدف از این پژوهش، استفاده از سونار روزنه مصنوعی معکوس برای محاسبه بعد سوم نقاط پراکنده‌ساز یک هدف بوده است. از این اطلاعات می‌توان برای تشکیل تصویر سه بعدی از هدف استفاده نمود.

نوآوری ما در این پژوهش نسبت به [۸] مربوط به بررسی تأثیر داشتن اطلاعات کسب شده از زوایای دید مختلف است. ملاحظه می‌شود که می‌توان با استفاده از اطلاعات کسب شده از زوایای دید مختلف، تصویر سه بعدی هدف را با دقت بیشتری تشکیل داد.

در این مقاله ملاحظه شد که نتایج با استفاده از دو سونار و در نظر گرفتن منابع مجازی آن‌ها رضایت بخش است و دقت به دست آمده در محاسبه بعد سوم را تا بیش از پنج برابر بهبود می‌دهد. شایان ذکر است که این مقاله فعلا در صدد اثبات کارایی این روش است و مباحث مربوط به پیاده سازی عملی نیازمند کار پژوهشی بیشتر است.

برنامه آتی ما، بازیابی دقیق شکل مکعب و به دست آوردن یک تصویر سه بعدی واحد است که در انتهای بخش قبل به آن اشاره شد. همچنین سعی در به دست آوردن روش‌های ساده‌تر جهت انطباق آرتیفکت‌ها و پراکنده‌سازها داریم، که نمونه‌ای از آن، توسط نرم افزار متلب انجام شد. علاوه بر این سعی در یافت منابع خطای ریاضی و عملی و افزایش تفکیک‌پذیری بعد سوم پراکنده‌سازها داریم.



شکل (۱۴): نتیجه بازسازی سه بعدی هدف با استفاده از آرایش دوپایه و منابع مجازی.

در این حالت، متوسط قدر مطلق خطای بعد سوم برابر با ۰/۱۲ متر است. دقت شود که میزان خطا در صورت بهره‌گیری از آرایش تک‌پایه (شکل (۱۲)) و با یکسان فرض کردن بقیه شاخص‌ها برابر با ۰/۶ متر است و در مورد شکل (۱۳)، میزان خطا برابر با ۰/۷ متر است. بنابراین، با استفاده از یک سونار اضافی، میزان خطا حداقل تا پنج برابر کاهش یافت.

در صورتی‌که فرستنده را از سونار ۲ و گیرنده را سونار ۱ استفاده کنیم، به علت تقارن، نتیجه کاملا یکسان است.

در صورتی‌که از منابع مجازی استفاده نشود و جهت به دست آوردن بعد سوم پراکنده‌سازها، از تلفیق آرایش‌های تک‌پایه و دوپایه استفاده کنیم، به علت دور بودن سونارها از هم مشکل ابهام فاز ایجاد خواهد شد. در مورد آرایش مورد بحث در مسأله ما (آرایش شکل (۱۰))، طول خط پایه بحرانی<sup>۱</sup>، که میزان حداکثر مجاز طول خط پایه جهت اجتناب از ابهام فاز است، تقریبا برابر با ۲۲ متر است و بنابراین، در این حالت که طول خط پایه برابر با ۴۰۰ متر است، بازیابی فاز بسیار دشوار است. برای محاسبه طول خط پایه بحرانی از روابط [۲۲] بهره گرفته‌ایم.

طول خط پایه بحرانی از رابطه (۱۳) که برای شاخص‌های نشان داده شده در شکل (۱۵) نوشته شده است، به‌دست می‌آید.

$$B_{critical} = \frac{\lambda H}{2r_g \cos^2(\theta)} \quad (13)$$

در مورد آرایش مورد بحث در مسأله ما (شاخص‌های جدول (۵))،  $\lambda$  برابر با ۱/۵ سانتی‌متر، اندازه سلول برد  $(r_g)$  برابر با  $\frac{0.5c}{B \sin \theta}$  یا ۰/۸۴ متر و کسینوس زاویه  $\theta$ ، برابر با ۰/۴۴۷ است.

<sup>1</sup> Critical Baseline

<sup>2</sup> Phase Unwrapping

## ۶- مراجع

- [12] X. Cao, F. Su, H. Sun and G. Xu, "Three-Dimensional In-ISAR Imaging via the Emulated Bistatic Radar," Second IEEE Conf. Ind. Electron. Appl. Harbin, China, 2007.
- [13] J. Palmer, J. Homer, I. D. Longstaff, M. Martorella and B. Littleton, "ISAR Imaging Using an Emulated Multistatic Radar System," IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst. vol. 41, no. 4, 2005.
- [14] J. Taghizadeh and S. A. Seyedin, "Underwater Moving Target Imaging using Multistatic Inverse Synthetic Aperture Sonar (MISAS) with Virtual Resources," J. Radar, vol. 2, no. 4, pp. 51-62, 2015 (In Persian).
- [15] "HISAS 1030 High Resolution Interferometric Synthetic Aperture Sonar," <https://www.kongsberg.com/globalassets/maritime/km-products/product-documents/high-resolution-inferferometric-synthetic-aperture-sonar-hisas>
- [16] E. Epcacan, "Underwater Channel Modeling for Sonar Applications," M.Sc. Thesis, The Graduate School of Nat. Appl. Sci. Middle East Tech. Univ. 2011.
- [17] B. Dushaw, P. Worcester, B. Cornuelle, and B. Howe, "On Equations for the Speed of Sound in Seawater," J. Acoust. Soc. Am. pp. 255-275, 1993.
- [18] R. Urick, "Principles of Underwater Sound," third Ed. McGraw-Hill, 1983.
- [19] F. Berizzi, E. Dalle Mese and G. Pinelli, "One-Dimensional Fractal Model of the Sea Surface," IEE Proc. Radar, Sonar and Navig. pp. 55-64, 1999.
- [20] M. Porter, "The Bellhop Manual and User's Guide: Preliminary Draft, Heat," Light and Sound Research, Inc. 2011.
- [21] "Underwater Target Detection with an Active Sonar System," MATLAB 2019 Help.
- [22] J. A. Richards, "Remote Sensing with Imaging Radar," Springer Ser. Signals Commun. Technol. 2009.
- [23] R. Hartley and A. Zisserman, "Multiple View Geometry in Computer Vision," Second Ed. Cambridge Univ. Press, 2003.
- [1] V. C. Chen and M. Martorella, "Inverse Synthetic Aperture Radar Imaging Principles, Algorithms and Applications," Scitech Publishing, 2014.
- [2] F. M. Caimi, D. M. Kocak, F. Dalgeish and J. Watson, "Underwater Imaging and Optics: Recent Advances," IEEE Ocean. Eng. Soc. Mag. pp. 21-29, 2010.
- [3] X. Lurton, "An Introduction to Underwater Acoustics: Principles and Applications," Second Ed. Springer, 2010.
- [4] J. Taghizadeh, "Multi-static Inverse Synthetic Aperture Sonar Imaging," Ph.D. Thesis, Ferdowsi Univ. Mashhad, 2015 (In Persian).
- [5] X. Xu and R. M. Narayanan, "Three-Dimensional Interferometric ISAR Imaging for Target Scattering Diagnosis and Modeling," IEEE Trans. Image Process. vol. 10, no. 7, 2001.
- [6] J. Palmer, J. Homer and B. Mojarabi, "Improving on the Monostatic Radar Cross Section of Targets by Employing Sea Clutter to Emulate a Bistatic Radar," IEEE Int. Geosci. Remote Sens. Symp. Toulouse, France, 2003.
- [7] W. Kuperman, and P. Roux, "Springer Handbook of Acoustics; Chapter 5: Underwater Acoustics," 2014.
- [8] S. A. Erfani, and S. A. Seyedin, "Underwater Three Dimensional Imaging Using Inverse Synthetic Aperture Sonar," Int. Conf. Acoust. Vib. Tehran, Iran, 2019 (In Persian).
- [9] F. Berizzi and M. Diani, "Multipath Effects on ISAR Image Reconstruction," IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst. vol. 34, no. 2, 1998.
- [10] R. Yang, Y. Bar-Shalom and G. W. Ng, "Altitude Estimation Using Multipath with a 2D Radar over Spherical Earth," IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst. 2017.
- [11] T. Lo and J. Litva, "Use of a Highly Deterministic Multipath Signal Model in Low-Angle Tracking," IEE Proc. F. vol. 138, no. 2, 1991.

## Three Dimensional Imaging Improvement in Multistatic Inverse Synthetic Aperture Sonar

S. A. Erfani, S. A. Seyyedini<sup>\*</sup>

<sup>\*</sup> Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran

(Received: 22/07/2020, Accepted: 07/11/2020)

### Abstract

Determining the third dimension of the underwater targets, by the sonar system, can play an important role in three dimensional imaging and target recognition. In this paper, by applying the inverse synthetic aperture sonar and using the seabed virtual source and a second sensor, the third dimension of the targets is obtained. For obtaining the third dimension, we use the distance between the scatterer and its two main corresponding artifacts in the two dimensional image. In the case of having two sonar systems, with both the transmitting and receiving roles, the third dimension resolution is increased obviously, compared to the monostatic case explained in our previous paper. In addition, because of having these two sensors, more target scatterers will be in the view of sensors. By using the information obtained in this way, it is possible to achieve more accuracy in calculating the third dimension and create a three-dimensional image of the target. Because of the importance of the underwater monitoring, using the proposed scenario, we can use this system for more accurate identification of the targets to counter the threats and for the defence applications.

**Keywords:** Inverse Synthetic Aperture Sonar, Three Dimensional Image Formation, Virtual Sources, Interferometry, Underwater Defence

---

<sup>\*</sup> Corresponding author E-mail: seyedin@um.ac.ir