

انتشار آکوستیکی و تشخیص سیگنال ناشی با نرخ جریان کم با استفاده از

روش CFAR

علی اصغر علیزاده	عبدالرضا اوحدی همدانی*	محمد زارعی نژاد	حمیدرضا امین داور
دانشجوی دکتری	استاد	استادیار	استاد
دانشگاه صنعتی امیرکبیر	دانشگاه صنعتی امیرکبیر	دانشگاه صنعتی امیرکبیر- پژوهشکده فناوری‌های نو	دانشگاه صنعتی امیرکبیر
a_alizadeh@aut.ac.ir	a_r_ohadi@aut.ac.ir	mzare@aut.ac.ir	hamidami@aut.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۷/۲۱

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۲/۰۳

چکیده

آکوستیک غیرفعال به عنوان یک استراتژی مهم جهت تشخیص و نظارت طولانی مدت بر ناشی گاز زیر آب در سایت‌های طبیعی یا در خطوط لوله گاز زیر آب شناخته شده است. توانایی یک سیستم آکوستیکی برای تشخیص ناشی گاز در زیر آب اساساً توسط نسبت سیگنال به نوفه (SNR^1) صداهای حباب کنترل می‌شود. در پژوهش حاضر سعی می‌شود تا با استفاده از روش $CFAR^2$ امکان تشخیص سیگنال ناشی با نرخ جریان کم و در حضور نوفه شدید فراهم شود. در این راستا از نرم‌افزار "بل‌هپ"^۳ جهت مدل‌سازی کانال آکوستیکی زیر آب استفاده شده است. مطابق پژوهش‌های پیشین، حداقل نرخ جریان ناشی قابل شناسایی برای روش تشخیص مبتنی بر آستانه برابر ۲ لیتر بر دقیقه (در فاصله حداکثر ۰/۵ متری از محل ناشی) و SNR مورد نیاز این روش جهت تشخیص نیز برابر ۶ دسی‌بل است. با توجه به قدرت کمتر سیگنال با نرخ جریان کم و در نتیجه SNR پایین‌تر نسبت به نرخ بالای جریان ناشی، در سناریوی شبیه‌سازی شده نشان داده می‌شود که با استفاده از روش $CFAR$ می‌توان سیگنال آکوستیکی ناشی با شار پایین را نیز شناسایی کرد. از طرفی عملکرد روش $OS-CFAR^4$ بسیار بهتر از روش‌های دیگر است و در مقادیر بسیار پایین SNR (تا $SNR = -10$ dB) نیز امکان شناسایی سیگنال ناشی با شار پایین را فراهم می‌کند.

واژگان کلیدی: انتشار آکوستیکی، سیگنال ناشی، آکوستیک غیرفعال، $CFAR$ ، بل‌هپ

۱. مقدمه

آن جلوگیری دائمی از نشت CO_2 در مخازن زمین‌شناسی زیر بستر دریا است [۴-۱]. نشت یک خط لوله گاز طبیعی زیر دریا و یا نشت مخازن ذخیره دی اکسید کربن در زیر آب (CCS) باعث ایجاد خطرات زیست محیطی می‌شود و باید هر چه سریع‌تر تشخیص و مکان‌یابی ناشی انجام شود [۵]. از آنجایی که ناشی گاز زیر آب معمولاً با تولید حباب همراه است [۶-۷]، سیگنال‌های آکوستیکی حباب می‌تواند در مسافت طولانی زیر آب منتقل شود که این امر بستر کاربردی

افزایش گازهای گلخانه‌ای در جو منجر به گرم شدن کره زمین و در نتیجه تغییر اقلیم شده است که تهدیدی جدی برای زیست‌پذیری کره زمین است. در سال ۲۰۱۹، فعالیت‌های انسانی منجر به انتشار ۳۷ میلیارد تن CO_2 در جو شد. برای کاهش تأثیر انتشار CO_2 ناشی از فعالیت‌های انسانی، جذب و ذخیره دی اکسید کربن دریایی^۵ (CCS) به عنوان یک استراتژی مهم شناسایی شده است که هدف

خوبی در زمینه تشخیص و مکان‌یابی منبع ناشی فراهم می‌کند [۸-۱۰].

دانش آکوستیک و فناوری‌های مربوطه یک راه‌حل کلیدی برای تشخیص و مکان‌یابی ناشی است که از هر دو نوع آکوستیک فعال [۱۱-۱۳] و غیرفعال [۱۴-۱۵] می‌توان بدین منظور استفاده کرد. هر دو رویکرد برای درک ناشی گاز در زیر سطح بستر دریا و ستون آب مورد استفاده قرار گرفته‌اند و به نوعی مکمل یکدیگر هستند، به‌صورتی که از روش‌های آکوستیک فعال به‌عنوان ابزاری مؤثر برای شناسایی و مکان‌یابی گاز در ستون آب استفاده می‌شود و روش‌های سونار غیرفعال برای نظارت طولانی‌مدت بر مناطق کوچک، ارائه تخمینی از شار گاز و توزیع اندازه حباب مناسب هستند [۱۶].

تئوری آکوستیکی مبتنی بر حباب‌ها بسیار پیش‌تر توسعه یافته است و محققان مطالعات متعددی را در مورد فرایند تشکیل حباب‌ها انجام داده‌اند. در ابتدا مینارت^۶ مکانیزم تولید سیگنال‌های آکوستیکی را در فرایند تشکیل حباب پیشنهاد کرد [۱۷]. وازکز و همکاران [۱۸] با توجه به فرایند تولید حباب، سه مرحله رشد یک حباب را مشخص و نیروهای وارد بر حباب را محاسبه کردند. همچنین آنها اشاره کردند که پالس آکوستیکی حباب‌ها از گلوبی^۷ نشأت می‌گیرد. در سال‌های اخیر، مطالعات زیادی در مورد اندازه‌گیری جریان گاز در شرایط ریز-نشت براساس ویژگی‌های آکوستیکی حباب‌ها انجام شده است. ژانگ و همکاران [۱۹] یک روش استخراج فرکانس مشخصه آکوستیکی غیرفعال تطبیقی را برای حل مشکل نسبت سیگنال به نوفه کم سیگنال‌های آکوستیکی حباب پیشنهاد نمودند. این روش توانایی محاسبه نرخ جریان ناشی را در شرایط سرعت ثابت و متغیر دارا است. در واقع نسبت سیگنال به نوفه و پایداری این روش را می‌توان از طریق تجزیه مود تجربی^۸ و فرکانس تطبیقی بهبود بخشید.

در مطالعات قبلی، از یک هیدروفون برای اندازه‌گیری سیگنال آکوستیکی حباب‌هایی که از بستر دریا بیرون می‌آیند، استفاده شده است [۱۵] که به‌عنوان نمونه می‌توان به آزمایش انتشار گاز کنترل‌شده (پروژه QICS) در سواحل غربی اسکاتلند [۲۰، ۱۴] و سایت‌های نشت گاز طبیعی [۱۵، ۱۳] اشاره کرد. با این حال، SNR سیگنال آکوستیکی، که توسط هیدروفون دریافت می‌شود، می‌تواند به دلیل نوفه پس‌زمینه زیر آب، مثل نوفه سطح دریا و نوفه کشتی، کم باشد [۲۱]. این امر موجب کاهش احتمال تشخیص سیگنال ناشی در فواصل نسبتاً دورتر از مکان ناشی می‌شود و امکان تشخیص ناشی با نرخ جریان کم اصلاً وجود ندارد. لایتون و وایت [۲۲] پیشنهاد کردند که آرایه‌ای از هیدروفون‌ها می‌تواند برای افزایش SNR اندازه‌گیری شده کل و مکان‌یابی منابع استفاده شود.

تحقیقات فعلی در مورد حباب عمدتاً بر مدل نظری حباب و اندازه‌گیری ناشی متمرکز است. با این حال، مطالعات کمی در مورد تشخیص و مکان‌یابی آکوستیکی حباب وجود دارد. همچنین سیگنال آکوستیکی حباب‌ها یک سیگنال غیرایستا با میرایی مثبت است و با توجه به مقالات پیشین، احتمال شناسایی سیگنال ناشی با نرخ جریان کم در محیط واقعی زیر آب با وجود نوفه پس‌زمینه بسیار پایین می‌باشد. لذا باید از روشی استفاده شود که تشخیص ناشی با نرخ جریان کم را ممکن سازد.

شناسایی اهداف وظیفه اساسی یک سیستم راداری و یا آکوستیکی است. به‌عنوان یک روش مؤثر برای تشخیص هدف، فناوری نرخ هشدار نادرست ثابت (CFAR) می‌تواند احتمال تشخیص را به حداکثر برساند و در عین حال احتمال هشدار نادرست ثابت را حفظ کند [۲۳-۲۴]. در مطالعات قبلی، چندین نوع پردازنده CFAR براساس مکانیزم پنجره مرجع کشویی^۹ پیشنهاد شده است.

استفاده شده است. همچنین اثر ناهموازی‌های سطح و کف دریا بر روی نحوه انتشار سیگنال نشتی و میزان افت انتقال آن لحاظ شده است. در این پژوهش از روش سونار غیرفعال و روش تشخیص CFAR جهت شناسایی سیگنال نشتی با نرخ جریان کم استفاده می‌شود و حداکثر فاصله ممکن میان هیدروفون و محل نشتی به منظور انجام عملیات تشخیص محاسبه می‌گردد.

۲. مدل‌سازی نشتی و کانال آکوستیکی زیر آب

در این بخش به مدل‌سازی آکوستیکی نشتی و همچنین کانال آکوستیکی زیر آب پرداخته خواهد شد.

۲-۱. مدل‌سازی نشتی

حباب در فرایند تشکیل همیشه در حال ارتعاش است و ارتعاش آن نزدیک به ارتعاش هارمونیک ساده با دامنه کم است. ارتعاشات دیواره حباب، سیگنال فشار آکوستیکی را به بیرون تابش می‌کند که در فواصل طولانی منتشر می‌شود و می‌توان آنها را توسط آرایه‌ای از هیدروفون‌ها که برای جمع‌آوری سیگنال‌های آکوستیکی حباب تعبیه شده است، اندازه‌گیری و شناسایی کرد [۲۱].

ویژگی‌های سیگنال‌های آکوستیکی حباب جمع‌آوری شده توسط هیدروفون‌ها براساس مدل تئوری دینامیکی تحلیل می‌شوند. پس از ورود گاز به مایع، محیط آب اطراف حباب را احاطه می‌کند. با توجه به ویسکوزیته آب، دیواره حباب ایجاد شده تمایل به حفظ موقعیت فعلی و عدم تغییر موقعیت دارد، در نتیجه باعث ارتعاش دیواره حباب می‌شود. مقدار لحظه‌ای شعاع حباب برابر $R(t)$ است که حول مقدار تعادلی R_0 نوسان می‌کند. جابه‌جایی دیواره $R_\varepsilon(t)$ به صورت هارمونیک و با دامنه $R_{\varepsilon 0}(t)$ و فرکانس ω نوسان می‌کند به طوری که شعاع حباب نامیرا را می‌توان به صورت زیر بیان کرد [۲۱]:

$$\begin{aligned}
 R(t) &= R_0 + R_\varepsilon(t) \\
 &= \text{Re}\{R_0 - R_{\varepsilon 0}e^{j\omega(t-t_0)}\}
 \end{aligned}
 \quad (1)$$

این روش‌ها تجزیه و تحلیل آماری را روی پس‌زمینه نوفه انجام می‌دهند، آستانه‌های دینامیکی را محاسبه می‌کنند و با سلول تحت آزمایش^{۱۰} (CUT) مقایسه می‌کنند تا تشخیص خودکار اهداف را محقق کنند. شناخته شده‌ترین پردازنده‌ها شامل CFAR میانگین سلولی^{۱۱} (CA-CFAR) [۲۵]، بزرگ‌ترین CFAR^{۱۲} (GO-CFAR) [۲۶] و کوچک‌ترین CFAR^{۱۳} (SO-CFAR) [۲۷] است که در کل پردازنده‌های سطح میانگین نامیده می‌شوند. با این حال، هنگامی که این روش‌ها بر روی یک پس‌زمینه با نوفه نسبتاً شدید اعمال می‌شوند، عملکرد تشخیص بهینه ممکن است، به ویژه در مورد اهداف متعدد، به دست نیاید. اگر یک یا چند هدف تداخلی در پنجره مرجع قرار گیرند، به دلیل پدیده شدید پوشاندن هدف، احتمال از دست دادن اهداف افزایش می‌یابد. برای کاهش این اثر نامطلوب، یک راه‌حل عملی، ایجاد یک استراتژی تخمین دقیق‌تر برای سطح پس‌زمینه نوفه‌ای است. در نتیجه، به دنبال پردازنده‌های سطح میانگین، دسته‌ای از پردازنده‌های مبتنی بر مرتب‌سازی نیز برای تشخیص CFAR اعمال می‌شوند، مانند آمار ترتیبی CFAR (-OS CFAR) [۲۸] و آشکارساز سطح میانگین سانسور شده^{۱۴} CFAR (CMLD-CFAR). این روش‌ها مقادیر نمونه پنجره مرجع را به ترتیب صعودی مرتب می‌کنند و سپس سلول مرجع مرتب شده را با یک پارامتر از پیش تعیین شده انتخاب می‌کنند یا بخشی از سلول‌های مرجع با دامنه بالا را برای نشان دادن میانگین قدرت نوفه حذف می‌کنند. به این ترتیب، هنگام تخمین سطح پس‌زمینه، اهداف تداخلی و نوفه‌های قوی دریا در پنجره مرجع به عنوان نقاط پرت حذف می‌شوند. عملکرد شناسایی پردازنده‌های مبتنی بر مرتب‌سازی بهتر از CA، SO، و GO-CFAR در سناریوهای چند هدفه است.

در مقاله پیش‌رو شبیه‌سازی آکوستیکی نشتی گاز زیر آب در حضور نوفه‌های محیطی مورد بررسی قرار گرفته و به منظور مدل‌سازی کانال آکوستیکی زیر آب از نرم‌افزار "بل‌هاپ"

واحد متغیر است که به رفتار گاز اعم از رفتار آدیاباتیک، هم-دما^{۱۵} و یا چیزی بین این دو بستگی دارد. ترکیب معادلات فوق انتشار تک‌قطبی شناسایی شده در میدان دور از یک حباب را به صورت معادله ۴ نتیجه می‌دهد [۲۱]:

$$P_{b1}(t) \approx \rho_0 \frac{(\omega_0 R_0)^2}{r} R_{\varepsilon 0i} e^{-\frac{\omega_0 \delta_{tot}(t-t_i)}{2}} H(t-t_i) \cos \omega_0(t-t_i) \quad (4)$$

که در آن ρ_0 [kg/m³] چگالی مایع محیط و r فاصله مرجع از مرکز آکوستیکی حباب است، که در این پژوهش ۱ متر فرض شده است.

اگر انتشار آکوستیکی حباب‌ها به یکدیگر وابسته نباشند، می‌توان خصیصه آکوستیکی میدان دور^{۱۶} ابر حباب (شار گاز) را به صورت معادله ۵ بیان کرد:

$$P_{b1}(t) = \sum_{i=1}^{N_b} P_{b1}^{R_0}(t, t_i), \quad t_i \in [0, T_b] \quad (5)$$

که در آن N_b تعداد حباب‌های تولید شده و T_b بازه زمانی تولید حباب می‌باشد. از طرفی با توجه به تصادفی بودن ماهیت حباب‌های تولید شده در بستر دریا و همچنین جهت اعمال دقت بیشتر در حل مسأله، تولید شعاع حباب به صورت تصادفی مدل‌سازی شده و تابع چگالی احتمال شعاع حباب^{۱۷} به صورت یک توزیع لگاریتمی نرمال^{۱۸} در نظر گرفته می‌شود [۲۱].

۲-۲. مدل‌سازی کانال آکوستیکی زیر آب

همان‌طور که در شکل ۱ نشان داده شده است، در پژوهش حاضر فرض بر آن است که نشستی مورد نظر در کف دریا وجود دارد. با توجه به مدل‌سازی نوفه‌های محیطی در بازه فرکانسی سیگنال آکوستیکی حباب سعی می‌شود که تا حد ممکن کانال آکوستیکی زیر آب به صورت واقعی شبیه‌سازی گردد. بازه طیفی حباب‌های آزاد شده از بستر دریا معمولاً از چند صد هرتز تا ۲۵ کیلوهرتز را تشکیل می‌دهد که در این

علامت منفی نشان می‌دهد که در شرایط شبه استاتیک یک فشار مثبت اعمال شده منجر به فشرده‌سازی خواهد شد. عامل t_v برای زمان انتشار بین نوسانات حباب و سیگنال فشاری متناظر، که در فاصله r شناسایی شده است، در نظر گرفته می‌شود.

در واقعیت حباب در زمانی مشخص شروع می‌کند به نوسان کردن و پس از مدتی این نوسانات تلف (میرا) می‌شود. برای حباب‌هایی که در فرایند نشستی گاز به عنوان مثال در خطوط لوله گاز زیر آب وجود دارند، معادله ۲ تقریبی مناسب از وابستگی زمانی با در نظر گرفتن میرایی را فراهم می‌کند [۲۱]:

$$R(t) = \operatorname{Re} \left\{ R_0 - R_{\varepsilon 0i} e^{j\omega_0(t-t_v)} e^{-\frac{\omega_0 \delta_{tot}(t-t_v-t_i)}{2}} H(t-t_v-t_i) \right\} \quad (2)$$

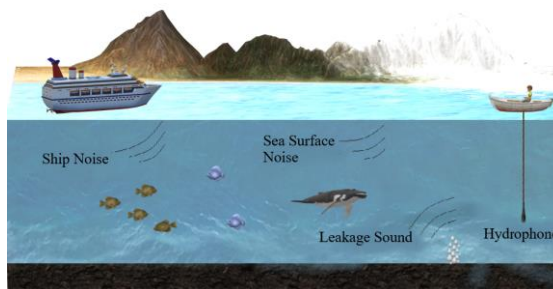
که در آن H همان تابع پله‌ای Heaviside، و t_i لحظه‌ای است که سیگنال آکوستیکی برای بار اول شناسایی می‌شود و $t_i - t_v$ لحظه‌ای است که حباب شروع به نوسان می‌کند. کاهش نمایی حباب که در فرکانس طبیعی ω_0 خود و دامنه دیواره اولیه $R_{\varepsilon 0i}$ نوسان می‌کند، توسط ثابت میرایی بی‌بعد کل δ_{tot} محاسبه می‌شود. ترم ω_0 فرکانس زاویه‌ای طبیعی حباب است که توسط رابطه ۳ محاسبه می‌شود [۲۱]:

$$\omega_0 = \frac{1}{R_0 \sqrt{\rho_0}} \sqrt{3k \left(p_0 - p_v + \frac{2\sigma}{R_0} \right) - \frac{2\sigma}{R_0} + p_v - \frac{4\eta^2}{\rho_0 R_0^2}} \quad (3)$$

این معادله با فرکانس معروف مینارت مطابقت دارد که شامل اثرات فشار محیطی p_0 ، فشار بخار p_v ، تنش سطحی σ و ویسکوزیته برشی η است. شاخص k بین مقادیر γ (نسبت گرمای ویژه گاز در فشار ثابت به مقدار آن در حجم ثابت) و

بازه فرکانسی فقط نوفه‌های محیطی سطح دریا و نوفه کشتی تأثیرگذار هستند [۲۱].

از طرفی به منظور تشخیص سیگنال آکوستیکی ناشی فرض می‌شود که هیدروفون در فاصله‌ای مشخص از محل ناشی قرار دارد. در واقع سعی می‌شود که با استفاده از روش CFAR تا حد ممکن بتوان ناشی را از فواصل دورتری شناسایی کرد و مقدار SNR مورد نیاز جهت تشخیص ناشی را کاهش داد. (نوشته‌های داخل شکل خوانا نیست)



شکل ۱. شماتیک سناریوی شبیه‌سازی شده

در آکوستیک زیر آب، اتلاف انتشار^{۱۹} معیاری برای سنجش کاهش شدت صوت با توجه به دور شدن از منبع صوتی زیر آب است که این امر خود موجب کاهش SNR در فواصل دورتر می‌شود. اتلاف انتشار به‌عنوان تفاوت بین سطح منبع و سطح فشار آکوستیکی دریافتی توسط هیدروفون تعریف می‌شود. میزان تضعیف شدت صوت به عوامل مختلفی از جمله هندسه کانال آکوستیکی، پروفیل سرعت صوت و فرکانس موج آکوستیکی وابسته است. به همین دلیل مدل‌سازی اتلاف انتشار آکوستیکی با استفاده از روش‌های پیشین نظیر قانون انتشار کروی^{۲۰} خیلی دقیق نیست.

در سال‌های اخیر به‌منظور شبیه‌سازی کانال آکوستیکی زیر آب با در نظر گرفتن تمامی پارامترهای فوق و همچنین سیگنال‌های بازتابی و چند مسیره^{۲۱}، نرم‌افزار "بل‌هپ" توسعه داده است که براساس مدلی مبتنی بر پرتو^{۲۲} است. همچنین به کمک این مدل می‌توان ناهمواری‌های کف و سطح دریا را نیز مدل کرد که در پژوهش حاضر از نرم‌افزار

"بل‌هپ" جهت شبیه‌سازی نسبتاً دقیق انتشار آکوستیکی سیگنال ناشی در محیط زیر آب استفاده شده است.

۳. روش تشخیص CFAR

ویژگی اصلی یک پردازنده CFAR، تشخیص یا عدم تشخیص یک هدف در حضور نوفه با تعیین آستانه دینامیکی^{۲۳} است. در این روش ابتدا یک احتمال هشدار نادرست مشخص در نظر گرفته می‌شود و سپس با توجه به مقدار نوفه پس‌زمینه در اطراف سلول CUT، آستانه دینامیکی جهت تشخیص سیگنال آکوستیکی محاسبه می‌شود. سپس با مقایسه مقدار CUT و آستانه محاسبه شده مختص آن می‌توان حضور و یا عدم حضور سیگنال هدف را بررسی کرد.

همان‌طور که در شکل ۲ نشان داده شده است، سیگنال بازگشتی مختلط با اجزای درون فاز و مربع‌بندی^{۲۴}، پس از اعمال فیلتر تطبیقی، توسط قانون مربع^{۲۵} پردازش می‌شود و خروجی‌های متوالی این روش بر روی یک پنجره کشویی^{۲۶} که شامل سلول‌های مرجع، سلول‌های محافظ^{۲۷} و CUT است، اجرا می‌شود. فرض کنید نمونه‌های موجود در سلول‌های مرجع شامل $\{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ در پنجره پیش‌رو و $\{x_{n+1}, x_{n+2}, \dots, x_{2n}\}$ در پنجره پس‌رو است، که در آن $N = 2n$ به طول پنجره مرجع اشاره دارد. پنجره پیش‌رو و پنجره پس‌رو با توجه به سلول CUT متقارن هستند. با توجه به همبستگی مکانی-زمانی پژواک سیگنال، منطقی است که از سلول‌های مرجع اطراف CUT برای تخمین سطح نوفه پس‌زمینه استفاده شود. علاوه‌براین، به‌منظور حذف تأثیر سیگنال هدف توسعه‌یافته در CUT بر روی مقدار نوفه محاسبه شده از سلول‌های کناری، تعداد کمی از سلول‌های محافظ در کنار هر دو طرف CUT در برخی از پردازنده‌های CFAR مانند CA، GO و SO-CFAR قرار می‌گیرند. با نمونه‌های موجود در پنجره مرجع، مقدار سطح

$$\leq x(k) \leq \dots \leq x(N), \quad k \leq N$$

پس از آن، آستانه تشخیص T را می‌توان با ضرب سطح نوفه تخمینی پس زمینه Z در ضریب آستانه α محاسبه کرد، یعنی:

$$T = \alpha Z \quad (10)$$

در نهایت، مقدار واقعی CUT (با برچسب x_0) و آستانه تشخیص T از یک مقایسه کننده عبور داده می‌شود تا نتیجه تشخیص به دست آید. معیار تصمیم‌گیری به آزمایش فرضیه باینری^{۲۸} خلاصه می‌شود:

$$\begin{matrix} H_1 \\ x_0 \geq T \\ H_0 \end{matrix} \quad (11)$$

که در آن فرضیه H_1 وجود یک هدف در CUT فعلی را نشان می‌دهد و H_0 نشان‌دهنده عدم حضور هدف است.

نوفه پس‌زمینه در اطراف سلول CUT (Z) را می‌توان براساس روش‌های مختلف تشخیص ارزیابی کرد.

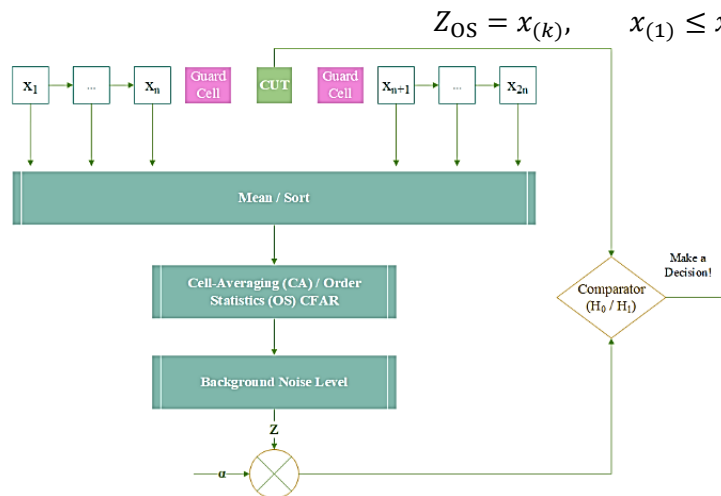
به‌عنوان مثال، چند نمونه از پردازنده‌های سطح متوسط و مبتنی بر مرتب‌سازی در روش CFAR به شرح زیر توصیف می‌شوند [۳۰]:

$$Z_{CA} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{2n} x_i \quad (6)$$

$$Z_{GO} = \max \left(\frac{2}{N} \sum_{i=1}^n x_i, \frac{2}{N} \sum_{i=n+1}^{2n} x_i \right) \quad (7)$$

$$Z_{SO} = \min \left(\frac{2}{N} \sum_{i=1}^n x_i, \frac{2}{N} \sum_{i=n+1}^{2n} x_i \right) \quad (8)$$

$$Z_{OS} = x(k), \quad x_{(1)} \leq x_{(2)} \leq \dots \quad (9)$$



شکل ۲. الگوریتم روش CFAR

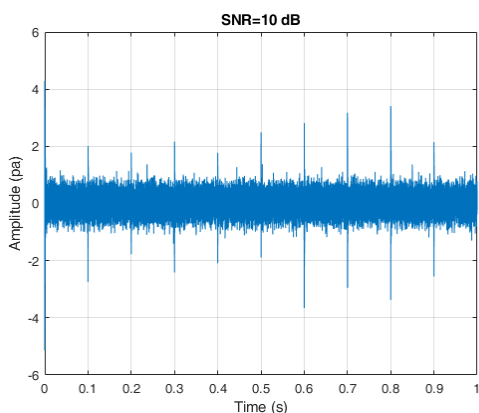
که سیگنال نشتی در بستر دریای شمال^{۲۹} وجود دارد. همچنین با توجه به سطح انرژی پایین سیگنال نشتی با نرخ جریان کم و در نتیجه احتمال بسیار ضعیف تشخیص آن، فرض می‌شود که شار گاز خروجی از کف دریا به اندازه کافی کم باشد تا اینکه بتوان عملکرد روش CFAR را در تشخیص سیگنال نشتی در فواصل دور به خوبی نشان داد.

۴. نتایج شبیه‌سازی

در بخش پیش‌رو، نتایج حاصل از روش تشخیص CFAR به‌منظور شناسایی سیگنال آکوستیکی نشتی شبیه‌سازی شده ارائه می‌شود. همچنین عملکرد روش تشخیص CFAR با روش تشخیص مبتنی بر آستانه مقایسه می‌گردد. از طرفی شرایط محیطی دریای شمال به‌منظور شبیه‌سازی کانال آکوستیکی زیر آب در نظر گرفته شده است و فرض می‌شود

از حباب‌ها به صورت مجزا قابل تشخیص هستند و سیگنال آکوستیکی حباب‌ها با یکدیگر هم‌پوشانی ندارد.

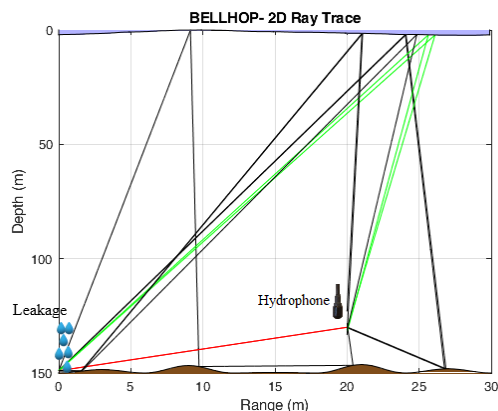
از طرفی به منظور تشخیص سیگنال ناشی از روش‌های CA-CFAR و OS-CFAR استفاده شده است که نتایج مربوطه در ادامه ارائه خواهد شد. لازم به ذکر است که با توجه به فرکانس سیگنال آکوستیکی حباب، که معمولاً از چند صد هرتز تا ۲۵ کیلو هرتز است، فرکانس نمونه‌گیری از سیگنال ناشی برابر ۴۸ کیلو هرتز انتخاب شده است تا اینکه بتواند تمامی بازه فرکانسی مورد نظر را پوشش دهد.



شکل ۴. سیگنال زمانی ناشی با نرخ جریان کم در حضور نوفه

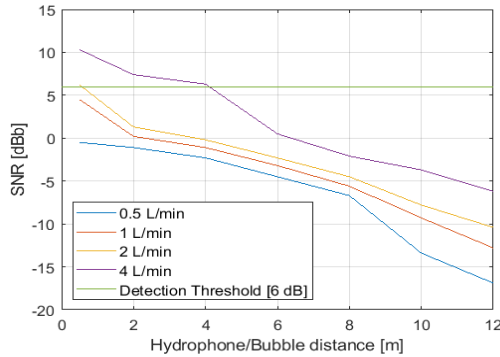
شکل ۵ افت انتقال ناشی از انتشار سیگنال ناشی در محیط زیر آب و در فرکانس ۸ کیلو هرتز را نشان می‌دهد که با توجه به قطر حباب‌های تولید شده فرکانس رزونانس ناشی نیز است. با توجه به این شکل مشخص است که تغییرات افت انتقال سیگنال ناشی در فواصل مختلف به نسبت زیاد است و این امر در اندازه‌گیری و تشخیص سیگنال ناشی اهمیت فراوانی دارد. همچنین مقدار افت انتقال سیگنال ناشی در فواصل مختلف و در فرکانس‌های گوناگون محاسبه شده و به عنوان یک فیلتر FIR به سری زمانی سیگنال ناشی اعمال می‌گردد. با توجه به اینکه مقدار افت انتقال در جهت تضعیف سیگنال ناشی عمل می‌کند، با هر چه دورتر شدن فاصله هیدروفون از محل ایجاد ناشی، امکان تشخیص سیگنال ناشی در حضور نوفه‌های محیطی کمتر خواهد شد.

با توجه به عمق ۱۵۰ متری کف دریای شمال، کانال آکوستیکی سناریوی شبیه‌سازی مورد نظر در شکل ۳ ترسیم شده است. فرض می‌شود که ناشی در عمق ۱۴۹ متری ایجاد شده و به منظور مدنظر قرار دادن ناهمواری‌های سطح و کف دریا، شبیه‌سازی سیگنال‌های بازتابی و محاسبه افت انتقال سیگنال ناشی و نوفه از نرم‌افزار بل‌هپ استفاده شده است. همچنین به منظور مدل‌سازی امواج سطح دریا از مدل طیفی پیرسون-موسکویتز^{۳۰} با در نظر گرفتن سرعت باد استفاده شده است و ناهمواری‌های کف دریا نیز به صورت توابع سینوسی تصادفی در نظر گرفته می‌شود [۳۱]. همان‌طور که از این شکل پیدا است فرض می‌شود که یک هیدروفون در فاصله افقی ۲۰ متری از محل ایجاد ناشی قرار دارد و انتشار تمامی سیگنال‌های چند مسیره ممکن را می‌توان به وضوح مشاهده کرد.



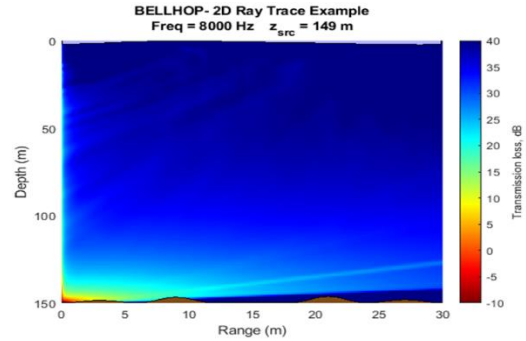
شکل ۳. انتشار سیگنال ناشی به همراه مدل‌سازی ناهمواری‌های سطح و کف دریا

شکل ۴ سیگنال زمانی حباب را به همراه نوفه در نرخ جریان کم ناشی و با SNR=10 dB نشان می‌دهد. همان‌طور که در بخش ۲ نیز بیان شد، افت انتقال سیگنال ناشی و نوفه توسط نرم‌افزار بل‌هپ محاسبه شده و به صورت یک فیلتر FIR^{۳۱} به همراه نوفه سطح دریا و نوفه کشتی بر روی سیگنال زمانی ناشی اعمال می‌شود. با توجه به این شکل مشخص است به دلیل فرض نرخ جریان کم ناشی، هر یک



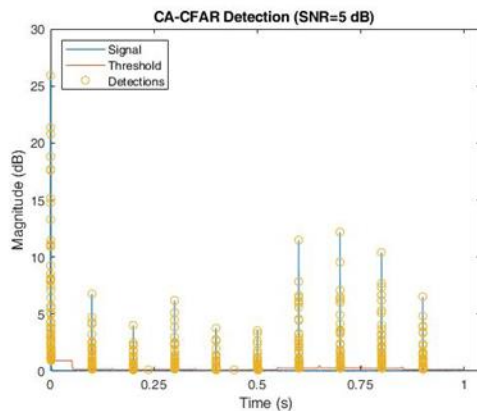
شکل ۶. نسبت سیگنال به نوفه حباب در نرخ‌های جریان مختلف و همچنین در فواصل مختلف هیدروفون و محل نشی [۲۱، ۳۲]

شکل ۷-الف تشخیص سیگنال نشی با نرخ جریان کم را در $SNR=10$ dB و با استفاده از روش CA-CFAR نشان می‌دهد. همان‌طور که از این شکل مشخص است، این روش در SNR های نسبتاً بالا به خوبی جواب می‌دهد و امکان تشخیص سیگنال نشی با نرخ جریان پایین را برای ما به ارمغان می‌آورد. اما با توجه به قدرت کم سیگنال نشی با شار پایین، باید از روشی استفاده شود که توانایی تشخیص سیگنال حباب را در SNR های بسیار پایین‌تر داشته باشد. همان‌طور که در شکل ۷-ب نشان داده شده است، با افزایش نوفه و کاهش مقدار سیگنال به نوفه به مقدار ۵ دسیبل، روش CA-CFAR در تشخیص سیگنال نشی با خطا مواجه می‌شود. لذا به منظور تشخیص سیگنال نشی در فواصل دورتر، که میزان سیگنال به نوفه کمتر است، از روش پیشرفته‌تر OS-CFAR جهت شناسایی سیگنال نشی استفاده خواهد شد.

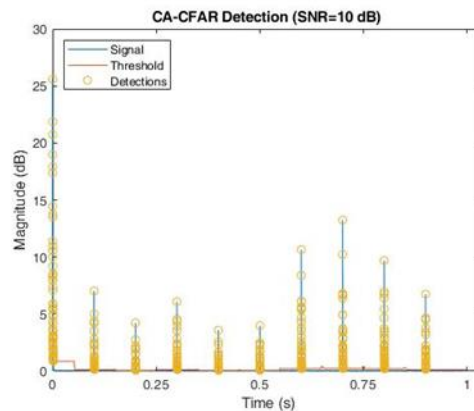


شکل ۵. افت انتقال سیگنال نشی در فرکانس ۸ کیلوهرتز

به منظور انجام اعتبارسنجی از نتایج به دست آمده در مقالات پیشین استفاده شده است و تمامی سیگنال‌های شبیه‌سازی شده مورد ارزیابی قرار گرفته‌اند. با توجه به نتایج مقالات پیشین [۲۱، ۳۲]، SNR مورد نیاز جهت تشخیص سیگنال نشی در حضور نوفه برابر ۶ دسیبل است. همچنین واضح است که قدرت سیگنال نشی با نرخ جریان بالا بیشتر از سیگنال مورد نظر با شار کم است که این امر خود موجب کاهش SNR سیگنال نشی با نرخ جریان پایین نسبت به نرخ‌های بالای جریان نشی می‌شود. در شکل ۶ مقدار SNR محاسبه شده برای سیگنال نشی در حضور نوفه و در نرخ‌های جریان مختلف نسبت به آستانه تشخیص ۶ دسیبل نشان داده شده است. همان‌طور که از این شکل مشخص است با استفاده از روش تشخیص مبتنی بر آستانه، امکان تشخیص سیگنال نشی در محیط واقعی زیر آب با نرخ جریان پایین حتی در فواصل بسیار نزدیک به محل ایجاد نشی نیز وجود ندارد [۳۲]. لذا به منظور تشخیص سیگنال نشی با نرخ جریان کم بهتر است که از روش CFAR استفاده شود که موضوع مورد بحث پژوهش حاضر است.



شکل ۷-ب. SNR=5 dB

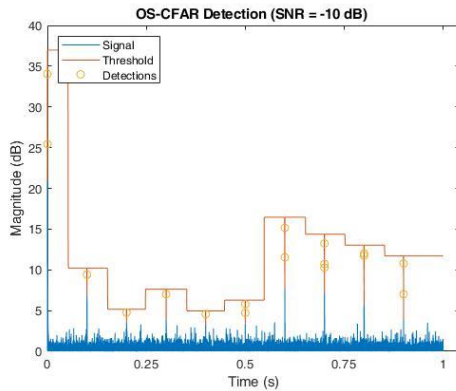


شکل ۷-الف. SNR=10 dB

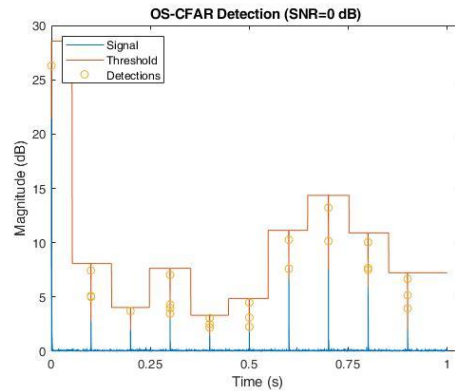
شکل ۷. تشخیص سیگنال ناشی با نرخ جریان کم در حضور نوفه با روش CA-CFAR

نتایج بسیار خوبی حاصل می‌شود. لازم به ذکر است که در روش تشخیص مبتنی بر آستانه امکان شناسایی سیگنال ناشی با شار پایین اصلاً وجود نداشته و صرفاً سیگنال‌های با نرخ جریان بالا و با حداقل مقدار آستانه ۶ دسیبل قابل شناسایی بوده است [۳۲، ۲۱]. در شکل ۸-ج و شکل ۸-د با کاهش بیشتر مقدار SNR مشاهده می‌شود که اگرچه احتمال تشخیص سیگنال حباب در روش OS-CFAR کم می‌شود، اما برخلاف روش CA-CFAR (شکل ۷-ب) شناسایی سیگنال ناشی به صورت اشتباه انجام نمی‌شود، بلکه صرفاً برخی از سیگنال‌های حباب با توجه به نوفه زیاد محیط قابل شناسایی نیستند.

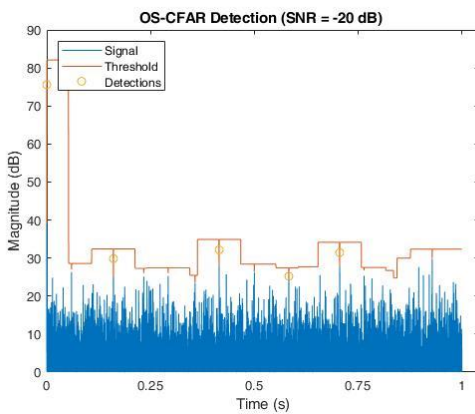
در شکل ۸-الف از روش OS-CFAR جهت تشخیص سیگنال ناشی در SNR=0 dB استفاده شده است. از طرفی با افزایش فاصله هیدروفون از محل ناشی، افت انتقال سیگنال دریافتی، افزایش و در نتیجه مقدار SNR کاهش می‌یابد. بنابراین با توجه به این شکل می‌توان گفت که این روش در فواصل نسبتاً دور از مکان ناشی و در SNRهای پایین نیز به خوبی جواب می‌دهد و می‌توان از آن به عنوان روشی مؤثر جهت تشخیص سیگنال ناشی با نرخ جریان کم در حضور نوفه بالا و فواصل دور استفاده کرد. همچنین با توجه به شکل ۸-ب پرواضح است که روش OS-CFAR تا میزان نسبت سیگنال به نوفه خیلی پایین و فواصل نسبتاً دور از محل ناشی را نیز به صورت کامل پوشش می‌دهد و



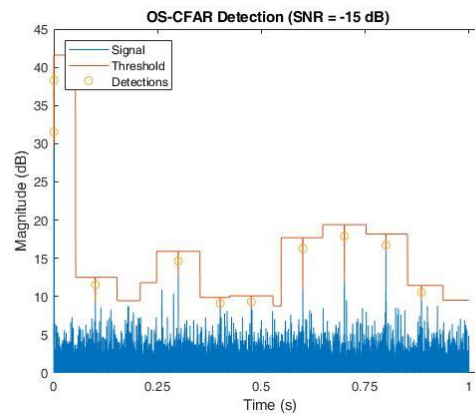
شکل ۸-ب. SNR= -10 dB



شکل ۸-الف. SNR=0 dB



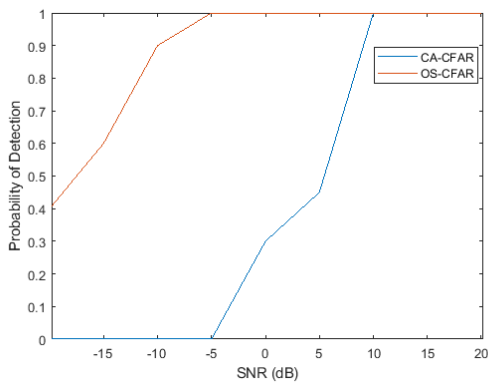
شکل ۸-د. SNR= -20 dB



شکل ۸-ج. SNR= -15 dB

شکل ۸. تشخیص سیگنال ناشی با نرخ جریان کم در حضور نوفه با روش OS-CFAR

نشی را در فواصل دورتر شناسایی کرد.



شکل ۹. احتمال تشخیص سیگنال ناشی در SNR های مختلف

توسط روش های OS-CFAR و CA-CFAR

همچنین احتمال تشخیص سیگنال ناشی در SNR های مختلف با روش های OS-CFAR و CA-CFAR در شکل ۹ نشان داده شده است. همان طور که از این شکل پیدا است، احتمال تشخیص صد در صد سیگنال ناشی با نرخ جریان کم با استفاده از روش OS-CFAR تا مقدار SNR=-10 dB وجود دارد، در صورتی که این احتمال برای روش CA-CFAR حداکثر تا SNR=10 dB است. در SNR های پایین تر نیز احتمال تشخیص سیگنال ناشی با استفاده از روش OS-CFAR نسبت به روش CA-CFAR بیشتر است. از طرفی مقدار SNR کمتر بیانگر فاصله دورتر هیدروفون نسبت به ناشی است، لذا می توان گفت که عملکرد روش OS-CFAR بسیار بهتر از روش CA-CFAR است و با استفاده از این روش می توان سیگنال

۵. نتیجه‌گیری

در این مقاله تشخیص سیگنال آکوستیکی ناشی با نرخ جریان کم در حضور نوفه‌های محیطی با استفاده از روش آکوستیک غیرفعال و روش تشخیص CFAR در دریای شمال مورد بررسی قرار گرفته است. برای این منظور از نرم‌افزار "بل‌هپ" به منظور مدل‌سازی دقیق‌تر کانال آکوستیکی زیر آب، ناهمواری‌های کف و سطح دریا و افت انتقال سیگنال‌های ناشی و نوفه استفاده شده است. در این پژوهش نشان داده شد که با توجه به شرایط محیطی، عمق دریا و پروفیل سرعت صوت، تشخیص سیگنال ناشی با استفاده از روش OS-CFAR در فواصل دورتری قابل دستیابی است. لذا تشخیص سیگنال آکوستیکی ناشی با شار پایین در دریای شمال با استفاده از روش OS-CFAR نسبت

به روش‌های تشخیص مبتنی بر آستانه و CA-CFAR محتمل‌تر است. با توجه به محاسبات انجام شده در مقالات پیشین و مقدار SNR مورد نیاز جهت شناسایی سیگنال ناشی، در دریای شمال امکان شناسایی نرخ جریان ناشی ۲ لیتر بر دقیقه در فاصله ۰/۵ متری از مکان ناشی وجود دارد و تشخیص سیگنال ناشی با نرخ جریان کمتر با استفاده از روش تشخیص مبتنی بر آستانه امکان‌پذیر نیست. در صورتی که با استفاده از روش OS-CFAR امکان تشخیص سیگنال ناشی با نرخ جریان کم (حدود ۵۰ میلی‌لیتر بر دقیقه) حتی در حضور نوفه‌های محیطی شدید و با نسبت سیگنال به نوفه خیلی پایین ($SNR = -10$ dB) نیز وجود دارد.

۶. مأخذ

- [1] Pachauri, Rajendra K., Myles R. Allen, Vicente R. Barros, John Broome, Wolfgang Cramer, Renate Christ, John A. Church et al., "Climate change 2014: synthesis report. Contribution of Working Groups I, II and III to the fifth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change". Ipc, 2014.
- [2] Roelofse, Chantelle, Tiago M. Alves, Joana Gafeira, and O. Omosanya Kamal'deen, "An integrated geological and GIS-based method to assess caprock risk in mature basins proposed for carbon capture and storage", *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 2019, Vol.80, pp.103-122.
- [3] Caserini, Stefano, Giovanni Dolci, Arianna Azzellino, Caterina Lanfredi, Lucia Rigamonti, Beatriz Barreto, and Mario Grosso, "Evaluation of a new technology for carbon dioxide submarine storage in glass capsules", *International journal of greenhouse gas control*, 2017, Vol.60, pp.140-155.
- [4] Vielstädte, Lisa, Peter Linke, Mark Schmidt, Stefan Sommer, Matthias Haeckel, Malte Braack, and Klaus Wallmann, "Footprint and detectability of a well leaking CO2 in the Central North Sea: implications from a field experiment and numerical modelling", *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 2019, Vol.84, pp.190-203.
- [5] Stork, Anna L., Claire Allmark, Andrew Curtis, J-Michael Kendall, and Don J. White, "Assessing the potential to use repeated ambient noise seismic tomography to detect CO2 leaks: Application to the Aquistore storage site", *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 2018, Vol.71, pp.20-35.
- [6] Roelofse, Chantelle, Tiago M. Alves, Joana Gafeira, and O. Omosanya Kamal'deen, "An integrated geological and GIS-based method to assess caprock risk in mature basins proposed for carbon capture and storage", *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 2019, Vol.80, pp.103-122.
- [7] Liu, Jingting, Ning Chu, Shijie Qin, and Dazhuan Wu, "Numerical simulations of bubble formation and acoustic characteristics from a submerged orifice: The effects of nozzle wall configurations", *Chemical Engineering Research and Design*, 2017, Vol.123, pp.130-140.

- [8] Berges, Benoit JP, Timothy G. Leighton, and Paul R. White, "Passive acoustic quantification of gas fluxes during controlled gas release experiments", *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 2015, Vol.38, pp.64-79.
- [9] Leighton, T. G., and P. R. White, "Quantification of undersea gas leaks from carbon capture and storage facilities, from pipelines and from methane seeps, by their acoustic emissions", *Proceedings of the royal society A: mathematical, physical and engineering sciences*, 2012, Vol.468, no.2138, pp.485-510.
- [10] Ingraham, J. M., Z. D. Deng, Xinya Li, Tao Fu, G. A. McMichael, and B. A. Trumbo, "A fast and accurate decoder for underwater acoustic telemetry", *Review of Scientific Instruments*, 2014, Vol.85, no.7.
- [11] Nikolovska, Aneta, Heiko Sahling, and Gerhard Bohrmann, "Hydroacoustic methodology for detection, localization, and quantification of gas bubbles rising from the seafloor at gas seeps from the eastern Black Sea", *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 2008, Vol.9, no.10.
- [12] Leblond, Isabelle, Carla Scalabrin, and Laurent Berger, "Acoustic monitoring of gas emissions from the seafloor. Part I: quantifying the volumetric flow of bubbles", *Marine Geophysical Research*, 2014, Vol.35, pp.191-210.
- [13] Leifer, Ira, and Dajun Tang, "The acoustic signature of marine seep bubbles", *The Journal of the Acoustical Society of America*, 2007, Vol.121, no.1, EL35-EL40.
- [14] Berges, Benoit JP, Timothy G. Leighton, and Paul R. White, "Passive acoustic quantification of gas fluxes during controlled gas release experiments", *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 2015, Vol.38, pp.64-79.
- [15] Li, Jianghui, Paul R. White, Ben Roche, Jonathan M. Bull, John W. Davis, Timothy G. Leighton, Michele Deponte, Emiliano Gordini, and Diego Cotterle, "Natural seabed gas leakage--variability imposed by tidal cycles", In *OCEANS 2019 MTS/IEEE SEATTLE*, IEEE, 2019, pp.1-6.
- [16] Von Deimling, J. Schneider, Jens Greinert, N. R. Chapman, Wolfgang Rabbel, and Peter Linke, "Acoustic imaging of natural gas seepage in the North Sea: Sensing bubbles controlled by variable currents", *Limnology and Oceanography: Methods*, 2010, Vol.8, no.5, pp.155-171.
- [17] Minnaert, Marcel, "XVI. On musical air-bubbles and the sounds of running water," *The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science*, 1933, Vol.16, no.104, pp.235-248.
- [18] Vazquez, A., Ira Leifer, and R. M. Sánchez, "Consideration of the dynamic forces during bubble growth in a capillary tube", *Chemical Engineering Science*, 2010, Vol.65, no.13, pp.4046-4054.
- [19] Zhang, Yu, Zhu Feng, Xiaobo Rui, Bingpu Wang, Hao Feng, and Xinjing Huang, "Underwater gas flow measurement based on adaptive passive acoustic characteristic frequency extraction", *Chemical Engineering Science*, 2021, Vol.240, p.116663.
- [20] Blackford, Jerry, Henrik Stahl, Jonathan M. Bull, Benoît JP Bergès, Melis Cevatoglu, Anna Lichtschlag, Douglas Connelly et al., "Detection and impacts of leakage from sub-seafloor deep geological carbon dioxide storage", *Nature climate change*, 2014, Vol.4, no.11, pp.1011-1016.
- [21] Li, Jianghui, Paul R. White, Jonathan M. Bull, and Timothy G. Leighton, "A noise impact assessment model for passive acoustic measurements of seabed gas fluxes", *Ocean Engineering*, 2019, Vol.183, pp.294-304.
- [22] Leighton, T. G., and P. R. White, "Quantification of undersea gas leaks from carbon capture and storage facilities, from pipelines and from methane seeps, by their acoustic emissions", *Proceedings of the royal society A: mathematical, physical and engineering sciences*, 2012, Vol.468, no.2138, pp.485-510.

- [23] Gandhi, Prashant P., and Saleem A. Kassam, "Analysis of CFAR processors in nonhomogeneous background", *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic systems*, 1988, Vol.24, no.4, pp.427-445.
- [24] Zhao, Jiafei, Rongkun Jiang, Hao Yang, Xuetian Wang, and Hongmin Gao, "Reconfigurable hardware architecture for mean level and log-t CFAR detectors in FPGA implementations", *IEICE Electronics Express*, 2019, Vol.16, no.21, pp.20190584-20190584.
- [25] Weiss, M., "Analysis of some modified cell-averaging CFAR processors in multiple-target situations", *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 1982, Vol.1, pp.102-114.
- [26] Hansen, V. Gregers, and James H. Sawyers, "Detectability loss due to "greatest of" selection in a cell-averaging CFAR", *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 1980, Vol.1, pp.115-118.
- [27] Trunk, Gerard V., "Range resolution of targets using automatic detectors", *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 1978, Vol.5, pp.750-755.
- [28] Rohling, Hermann, "Radar CFAR thresholding in clutter and multiple target situations", *IEEE transactions on aerospace and electronic systems*, 1983, Vol.4, pp.608-621.
- [29] Rickard, John T., and George M. Dillard, "Adaptive detection algorithms for multiple-target situations", *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 1977, Vol.4, pp.338-343.
- [30] Zhao, Jiafei, Rongkun Jiang, Xuetian Wang, and Hongmin Gao, "Robust CFAR detection for multiple targets in K-distributed sea clutter based on machine learning", *Symmetry*, 2019, Vol.11, no.12, p.1482.
- [31] Pierson Jr, Willard J., and Lionel Moskowitz, "A proposed spectral form for fully developed wind seas based on the similarity theory of SA Kitaigorodskii", *Journal of geophysical research*, 1964, Vol.69, no.24, pp.5181-5190.

[۳۲] علیزاده، ع.، اوحدی همدانی، ع.، زارعی نژاد، م.، "مدل سازی انتشار آکوستیکی و تشخیص سیگنال نشتی با استفاده از روش آکوستیک غیرفعال در خلیج فارس"، *دوازدهمین کنفرانس بین المللی آکوستیک و ارتعاشات*، آذر ۱۴۰۱.

پی نوشت

-
1. Signal to Noise Ratio
 2. Constant False Alarm Rate (CFAR)
 3. Bellhop
 4. Ordered Statistics CFAR (OS-CFAR)
 5. Carbon dioxide Capture and Storage (CCS)
 6. Minnaert
 7. Necking
 8. Empirical Mode Decomposition
 9. Sliding reference window
 10. Cell Under Test (CUT)
 11. Cell Averaging CFAR (CA-CFAR)
 12. Greatest-of CFAR (GO-CFAR)
 13. Smallest-of CFAR (SO-CFAR)
 14. Censored Mean Level Detector (CMLD)
 15. Isothermal
 16. Far-Field
 17. Bubble Radius Probability Density Function (BRPDF)
 18. Lognormal
 19. Propagation Loss
 20. Spherical Spreading Law
 21. Multipath Signal
 22. Rays
 23. Dynamic Threshold

-
24. In-phase and quadrature components
 25. Square-Law
 26. Sliding window
 27. Guard cells
 28. Binary Hypothesis
 29. North Sea
 30. Pierson-Moskowitz
 31. Finite Impulse Response