دوفصلنامهٔ هیدروفیزیک
دورهٔ پنجم، شمارهٔ اول (بهار و تابستان ۱۳۹۸)
مقالهٔ پژوهشی

اندازه‌گیری چندمسیری در دریا، شبیه‌سازی و تخمین کانال آکوستیکی

عباس اسدزاده[۱]، سیدمحمد علوی[۲*]، محمود کریمی[۳]، هادی امیری[۴]

[۱] دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی فناوری اطلاعات و ارتباطات، دانشگاه جامع امام حسین(ع)، تهران aasadzadeh@ihu.ac.ir

[۲*] نویسندهٔ مسئول، دانشیار، دانشکده مهندسی فناوری اطلاعات و ارتباطات، دانشگاه جامع امام حسین (ع)، تهران malavi@ihu.ac.ir

[۳] استاد، دانشکده مخابرات و الکترونیک، دانشگاه شیراز، شیراز karimi@shirazu.ac.ir

[۴] استادیار، دانشکده علوم مهندسی، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران، تهران hadi.amiri@ut.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۰۱/۲۴ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۰۳/۲۰

چکیده

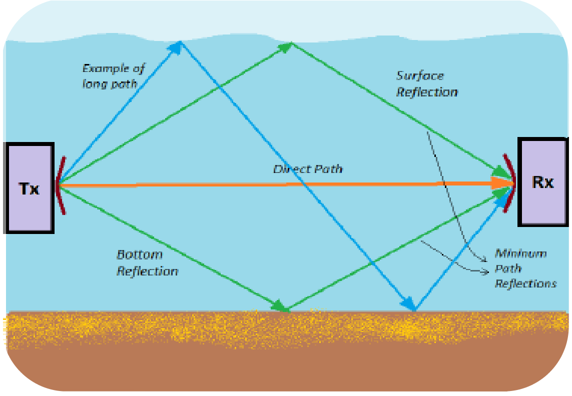
اهمیت شناخت کانال آکوستیک زیرآب و اثرات آن روی سیگنال‌های آکوستیکی، با توجه به کاربردهای فراوان آن در زمینه‌های مختلف مانند پایش محیط، اکتشاف در اقیانوس‌ها و عملیات نظامی، روزبه‌روز در حال افزایش است. در مقالهٔ حاضر به شبیه‌سازی اثر چند مسیری در محیط زیر آب، بر اساس مدل‌سازی‌ها پرداخته و با حل معادله‌های سیگنال دریافتی در یک آرایه چندسنسوری، نتایج حاصله در خصوص تابع توزیع چگالی احتمال، کشیدگی، چولگی، کپستروم، تابع پراکندگی، تأخیر پخش‌شدگی کانال و میزان انعکاس موجود در کانال ارائه شده است. رفتار سیگنال در یک آرایه خطی، نسبت به یک منبع ثابت با مدل‌سازی سیگنال دریافتی بررسی و تحلیل شده است. همچنین اندازه‌گیری‌های میدانی در خصوص بررسی پدیدهٔ چند مسیری در دریا صورت پذیرفته و سناریوی اندازه‌گیری، تحلیل سیگنال و نتایج در خصوص پاسخ ضربه و رفتار آماری سیگنال در آزمون میدانی ارائه شده است. نتایج حاصل از تحلیل داده‌های واقعی، تطابق مناسبی با توزیع ناکاگامی برای اندازه سیگنال آکوستیکی عبوری از دریا نشان داده است.

واژه‌های کلیدی: انتشار امواج آکوستیک، پردازش سیگنال آکوستیکی، چند مسیری، آرایه گیرنده، سیگنال چیرپ.

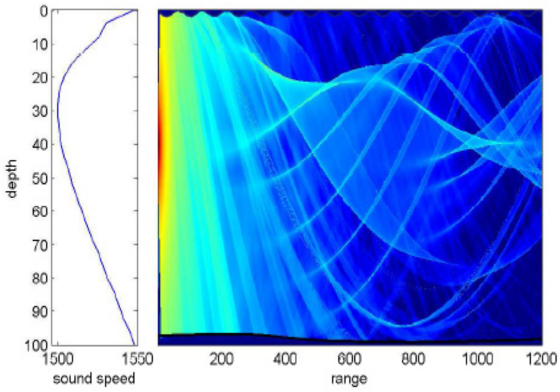
۱. مقدمه

محیط زیر آب به دلایل زیادی نسبت به محیط هوا ناشناخته‌تر است. مشخصهٔ محیط زیر آب، تأخیر زیاد، تلفات انتقال بالا، پهنای باند کم، طنین، پراش، شکست، تداخل و واگرایی در محیط، چند مسیری[۱] (مطابق شکل (۱))، نویز، تغییرات زمانی و مکانی شدید است. تلفات انتقال و نویز عوامل مؤثر در محاسبه برد، پهنای باند قابل‌دسترس و نسبت سیگنال به نویز است. به خاطر نویزهای محیطی غالب و تلفات انتشار، پهنای باند کانال زیاد نیست و میزان تلفات انتقال نیز با افزایش فرکانس و برد انتقال زیاد می‌شود. اغلب در رابطه با بررسی کانال‌های صوتی زیر آب مثل شکل (۲)، مدل مشخصی برای کانال وجود ندارد و تست‌های استاندارد زیادی نیز در این

رابطه گزارش نشده است[۱]. مطالعه رفتار امواج صوتی و فیزیک آن‌ها در زیرآب، در مباحث هیدروآکوستیک (آکوستیک زیرآبی)کاربرد حائز اهمیتی دارند.



شکل ۱. پدیده چندمسیری در کانال آکوستیکی زیر آب [۳]



شکل ۲. نوعی از انتشار امواج در کانال آکوستیکی زیر آب [۴]

سیستم سونار سامانه‌ای است که بر اساس ارسال، دریافت و پردازش امواج آکوستیکی کار می‌کند و برای تجهیزات مختلف در حوزه‌های تجاری و نظامی زیرآبی مورداستفاده قرار می‌گیرد. یکی از مهم‌ترین و پرکاربردترین نوع سامانه‌های سوناری، سونارهای غیرفعال[۲] متشکل از آرایه‌های هیدروفونی هستند که در اشکال مختلف به‌کار می‌روند. مؤثرترین پارامتر در انتشار امواج آکوستیکی در زیرآب سرعت صوت است. سرعت صوت در عمق‌های مختلف دریا بین ۱۴۵۰ تا ۱۵۴۰ متر بر ثانیه متغیر است که اغلب حد وسط آن ۱۵۰۰ متر بر ثانیه را در نظر می‌گیرند. این سرعت در مقایسه با سرعت نور به‌مراتب پایین‌تر است و سبب می‌شود تا گسترش تأخیر کانال در حدود ده‌ها یا صدها میلی ثانیه باشد. با وجود کم بودن تغییرات سرعت صوت، همین تغییرات، تأثیر شگرفی بر انتشار صوت در محیط دارد. سرعت صوت، برحسب متر بر ثانیه، اغلب طبق فرمول تجربی زیر محاسبه می‌شود[۲]:

$$c = 1449.2 + 4.6 \times tm - 0.055 \times tm^2 + 0.00029 \times tm^3 + (1.34 - 0.010 \times tm)(s - 35) + 0.016z \quad (۱)$$

در رابطه (۱) tm دمای محیط برحسب $°C$، S درجه شوری و z بیانگر عمق است.

پدیده‌های چندمسیری و طنین در طراحی و پردازش سیگنال تأثیرگذار هستند و اغلب محدودیت‌های سختی را بر کارایی سیستم اعمال می‌نمایند[۵]. پدیدهٔ چند مسیری ناشی از دو عامل مهم انعکاس و انکسار صوت است. انعکاس صوت، متأثر از برخورد سیگنال صوتی با کف و سقف محیط انتقال است که بیشتر در آب‌های کم‌عمق اتفاق می‌افتد و انکسار بیشتر در محیط‌های پرعمق که سرعت صوت با عمق تغییر می‌کند؛ رخ می‌دهد. در یک سیستم سوناری در کنار طنین و نویز محیطی که به ساختار فیزیک محیط بستگی دارند، نویزها و سیگنال‌های ناخواسته دیگری مانند نویزهای موتوری، نویز پیشرانه (کاویتاسیون در حول پره‌ها) و نویز هیدرودینامیک مربوط به انواع شناورها و سیگنال‌های مربوط به موجودات زیر آب را نیز باید به‌عنوان منابع سیگنالی در گیرنده لحاظ نمود[۶]. هر یک از این منابع، پاسخ فرکانسی مختص به خود را دارد و ممکن است ازنظر خواص آماری نیز کاملاً متفاوت عمل نمایند. بنابراین هرچه شناخت ما از رفتار کانال و تغییرات سیگنال در آن بهتر باشد، مشکلات سامانه‌های زیرآبی راحت‌تر قابل تحلیل و رفع خواهد بود. در مرجع [۷] نویسندگان با مدولاسیون او. اف. دی. ام[۳]، فیدینگ کانال را بررسی کردند و به این نتیجه رسیدند که می‌توان از توزیع‌های رایلی و رایسین برای توصیف آماری تغییرات زمانی مسیرهای انتشاری در کانال آکوستیکی کم‌عمق استفاده نمود. در مرجع[۲] بر اساس اندازه‌گیری‌های انجام‌شده در دریای مالزی پارامتر تابع پروفایل شدت چندمسیری در فرکانس‌های بالا حدود ۴۰کیلوهرتز و با زمان

۱۶ میلی‌ثانیه در کانال ۱۰۰متری به دست آمده است. در مرجع [۸] نیز از روش چند ورودی چند خروجی[۴] برای شناسایی تغییرات زمانی پاسخ ضربه کانال در فرکانس خیلی بالا (۳۰۰ کیلوهرتز) استفاده شد و زمان ۲۵میلی‌ثانیه در منحنی‌ها ثبت شد. مزیت روش ما در مقالهٔ حاضر نسبت به مراجع [۲، ۸] این است که نخست اندازه‌گیری‌ها متعلق به دریاهای ایران است و در فرکانس‌های پایین انجام گرفته است، در ضمن در این مقاله ابعاد مختلف کانال تحلیل شده است. همچنین نتایج شبیه‌سازی‌ها با اندازه‌گیری‌های انجام‌شده مقایسه شده‌اند و بر این اساس اعتبار شبیه‌سازی‌های انجام‌شده و نتایج اندازه‌گیرهای عملی بررسی شده است. برای این منظور در بخش دو مدل سیگنال در کانال، فرستنده و گیرنده معرفی شده است، سپس در بخش سه کانال آکوستیکی مطابق بخش دو، شبیه‌سازی شده و پردازش سیگنال با ارائه نتایج جدید بیان شده است. در بخش چهارم اندازه‌گیری میدانی در دریا تشریح شده است و نتایج تحلیل با بخش سه مقایسه شده است و درنهایت در بخش پنج، بحث و نتیجه‌گیری ارائه شده است.

۲. مبانی نظری و مدل سیگنال

۲-۱. فرم پاسخ ضربه

پاسخ ضربه یک کانال آکوستیکی زیر آب در تحلیل ریاضی به شکل رابطه (۲) بیان می‌شود [۹]:

$$h(\tau,t)=\sum_{k=1}^{K}\alpha_k(t)\delta(\tau-\tau_k) \qquad (۲)$$

در رابطه (۲)، کانال به‌صورت یک فیلتر *با پاسخ ضربه محدود*[۵] خطی است که از مجموعه‌ای از ضربه‌ها، در زمان‌های مختلف تشکیل شده است، در این رابطه t زمان، τ تأخیر، α تضعیف دامنه، δ تابع ضربه واحد و h پاسخ ضربه کانال است. بر اساس این مدل، کانال متغیر با زمان، شامل K مسیر است که هر مسیر تضعیف و تأخیر خاص خود را دارد. در مقاله‌ها اغلب α را تضعیف مسیر مستقیم در نظر گرفته و مدل توزیع رایسین یا رایلی برای دامنه و توزیع نمایی دوطرفه برای زمان ورود هر پرتو تشعشعی فرض می‌شود. در بیشتر حالت‌های معمول پردازش سیگنال زیر آب، فرض می‌شود که شرایط ارگادیک[۶] حاکم است [۷، ۱۰، ۱۱]. با این فرض می‌توان در پردازش‌هایی مانند میانگین گیری آماری، از فرایند میانگین گیری مبتنی بر نمونه‌ها (در حوزه زمان) به‌جای حل تحلیلی بهره جست. فرض مهم دیگر حاکم بودن شرایط ایستایی است که خود شامل دو بخش مهم ایستایی تام و شبه ایستایی[۷] است. در فرض اول مشخصات آماری سیگنال در بازه زمانی مشاهده سیگنال به‌طور وسیعی ثابت است ولی در فرض دوم مشخصات آماری سیگنال برحسب یک دوره تناوب ثابت در نظر گرفته می‌شود. در حالت کلی پاسخ ضربه کانال $h(\tau, t)$ رفتار متغیر با زمان دارد. اگر میانگین پاسخ ضربه برابر صفر باشد، اغلب توزیع آماری دامنه سیگنال به‌صورت گوسی و پوش آن $|h(\tau, t)|$ دارای توزیع رایلی خواهد بود [۷]. فرمول رایلی از رابطه (۳) پیروی می کند [۱۲]:

$$p(r)=\frac{r}{\sigma^2}exp\left(-\frac{r^2}{2\sigma^2}\right) \qquad (۳)$$

که در آن σ^2 مجموع توان در سیگنال چند مسیری و r پوش سیگنال است. درصورتی‌که میانگین $h(\tau, t)$ صفر نباشد؛ نتیجه می‌شود که در انتقال از فرستنده به گیرنده، مؤلفهٔ مسیر مستقیم دارای توان قابل توجهی است که در این صورت مدل پوش کانال $|h(\tau, t)|$ با توزیع رایسین[۸] شناخته می‌شود[۱۲].

$$p(r)=\frac{r}{\sigma^2}exp\left(-\frac{r^2+s^2}{2\sigma^2}\right)I_0\left(\frac{r\times s}{\sigma^2}\right) \qquad (۴)$$

در رابطهٔ (۴)، s^2 توان مؤلفهٔ مسیر مستقیم بوده و I_0 تابع بسل اصلاح‌شده نوع اول از مرتبه صفر است. در بیشتر تحلیل‌ها، مدل کانال به‌صورت یک سیستم خطی متغیر با زمان در نظر گرفته می‌شود. درواقع پاسخ ضربه، اشاره به پاسخ کانال به یک ضربه در لحظهٔ $t\text{-}\tau$ است که در زمان t، مشاهده می‌شود. پرانرژی‌ترین قسمت پاسخ ضربه می‌تواند در ابتدای آن، در آخر آن یا جایی در بین آن باشد. طیف توان داپلر نیز ممکن است متقارن یا نامتقارن، گوسی یا با دم کشیده[۹]، متمرکز روی فرکانس صفر یا روی یک فرکانس دیگر باشد. پخش‌شدگی داپلر ممکن است برای همه مسیرها یکسان یا برای هر مسیر یک مقدار کاملاً متفاوت داشته باشد. بعضی از کانال‌ها ممکن است با ویژگی‌های قطعی[۱۰] و بعضی از آن‌ها با محوشدگی[۱۱] با توابع توزیع احتمال مختلف مانند محوشدگی رایلی [۱۳-۱۵]، رایسین [۱۵- ۱۶]، ناکاگامی-m

[۱۶] و توزیع-K [۱۷]، توصیف شوند. تابع توزیع ناکاگامی با رابطه (۵) توصیف می‌شود[۱۶]:

$$f(x)=2\left(\frac{\mu^{\mu}}{\omega}\right)\frac{1}{\Gamma(\mu)}x^{(2\mu-1)}\exp\{\frac{-\mu}{\omega}x^{2}\};\quad x>0, \qquad (۵)$$

که در آن (Γ) تابع گاما، μ و ω هم پارامترهای توزیع ناکاگامی هستند. در برخی از مدل‌سازی‌ها نیز، تضعیف هر پرتو ورودی را به‌طور مستقل از پرتوهای دیگر که مقدار آن به‌طور تصادفی انتخاب می‌شود؛ در نظر گرفته‌اند. به محوشدگی کانال در مقیاس بزرگ، ناحیه سایه در انتشار امواج می گویند[۱۸].

۲-۲. مدل سیگنال در گیرنده

با توجه به رابطهٔ (۲) مدل سیگنال دریافتی در گیرنده به این صورت خواهد بود [۹، ۱۲].

$$r(t)=\sum_{k=1}^{K}\alpha_k(t)\,s(t-\tau_k)+n_i(t) \qquad (۶)$$

که در آن $S(t)$ سیگنال حوزه زمان منبع تولید صوت و τ_k و $\alpha_k(t)$ به ترتیب تأخیر و تضعیف متناظر با مسیر kام و n_i نیز نویز جمع‌شونده است. ازنظر فضایی، انعکاس‌ها از جهت‌های مختلفی وارد سنسور می‌شوند که در یک آرایه شامل M المان، با فرض در دسترس بودن N_s نمونه زمانی از سیگنال منبع، مدل فضایی-زمانی سیگنال به‌صورت (۷) خواهد بود[۱۹- ۲۰].

$$x[n]=As[n]+n_i[n],\qquad n=1,2,\cdots,N_s. \qquad (۷)$$

که در رابطهٔ (۷)، x با ابعاد $M\times 1$ بردار سیگنال دریافتی است و ماتریس منیفولد[۱۲] آرایه A اطلاعات جهت را در خود دارد. در این مقاله آرایه خطی هفت سنسوره به‌عنوان گیرنده، شبیه‌سازی شده است.

۲-۳. مدل سیگنال در فرستنده

نوع سیگنال ارسالی در این مقاله چیرپ در نظر گرفته شده است. سیگنال‌های مختلفی برای تحلیل و بررسی پاسخ کانال به کار می‌روند که یکی از آن‌ها سیگنال چیرپ[۱۳] است. این سیگنال یک سیگنال باند پهن بوده که به‌عنوان ورودی در حوزهٔ تخمین کانال[۱۴] کاربردهای فراوانی دارد [۲۱]. تابع سیگنال چیرپ به‌صورت یک سیگنال سینوسی متغیر با زمان است که فرکانس آن در زمان به‌صورت خطی مدوله شده (LFM[۱۵]) و فاز آن، دارای فرم درجه دو است. تابع ریاضی این سیگنال به‌صورت رابطهٔ (۸) بیان می‌شود [۲۲].

$$x(t)=\alpha\cos\left(at^{2}+\beta t+\gamma\right) \qquad (۸)$$

که در آن α دامنهٔ سیگنال و t بیانگر زمان بوده و فرکانس لحظه‌ای به‌صورت $f(t)=2at+\beta$ است. مطابق با $f(t)$ می‌توان نتیجه گرفت که فرکانس سیگنال با زمان تغییر می کند. همچنین γ ، β ، a ضرایب مستقل هستند. تابع خودهمبستگی[۱۶] این سیگنال شبیه به یک تابع ضربه است. پس با استفاده از آن می‌توان پاسخ ضربه و به‌تبع آن پاسخ فرکانسی کانال را تخمین زد [۲۳].

۳. شبیه‌سازی کانال آکوستیکی زیرآب

در این بخش رفتار سیگنال، بر اساس نتایج شبیه‌سازی کانال آکوستیکی و سیگنال‌های دریافتی عبوری از کانال، بررسی می‌شود. مدل‌سازی کانال پهن باند باید نزدیک به واقعیت باشد و تمام اثرات فیزیکی کانال انتشار، مانند اثر فرستنده و گیرنده، گسترش فضایی، پخش‌شدگی زمانی و غیره را در بر بگیرد [۲۴].

کانال آکوستیکی در انتقال امواج آکوستیک، نوسانات شدیدی در دامنه و فاز ایجاد می‌کند. این نوسانات به تلاطم و امواج درونی، توربولانس، گرادیان حرارت، لایه‌بندی چگالی و پدیده‌هایی که با آشفتگی محلی در سرعت صوت مرتبط هستند، وابسته است. بستگی اندرکنش امواج منظم جلویی با اثرات شکست و تفرق، باعث موقتی و وابسته به فرکانس و مکان بودن نوسانات در شکل موج‌های دریافتی، می‌شود. بعلاوه در اغلب هندسه‌های انتشار زیرآبی، چند مسیر انتشاری از فرستنده به گیرنده وجود دارد.

نوسانات سیگنال دریافتی از دو عامل، یکی مقدار متوسط دامنه نوسانات سیگنال، در طول یک مسیر منفرد و دیگری، برآیند دامنهٔ سیگنال، حاصل از تداخل‌های متغیر با زمان بین چندین مسیر انتشاری حاصل می‌شود. برای پرتو انعکاس یافته از سطح، آر. ام. اس.[۱۷] نوسانات زمانی از رابطهٔ (۹) به دست می‌آید[۲۵]:

$$\left\langle (\Delta t)^2 \right\rangle^{1/2} \sim \frac{2\sigma_s (M)^{1/2}}{C} \mathrm{Sin}\,\psi \qquad (۹)$$

در رابطهٔ (۹) σ_s، آر. ام. اس. بلندی امواج سطح دریا (تلاطم)، M تعداد انعکاس‌ها و ψ زاویه پرتو انعکاسی است. در اثر این نوسانات زمانی، فیدینگ در دامنه و فاز سیگنال ایجاد می‌شود که در بهترین تخمین از رابطهٔ رایلی پیروی می‌کند، اما اگر مسیر مستقیم بین فرستنده و گیرنده وجود داشته باشد، توزیع رایسین بهتر از رایلی خواهد بود.

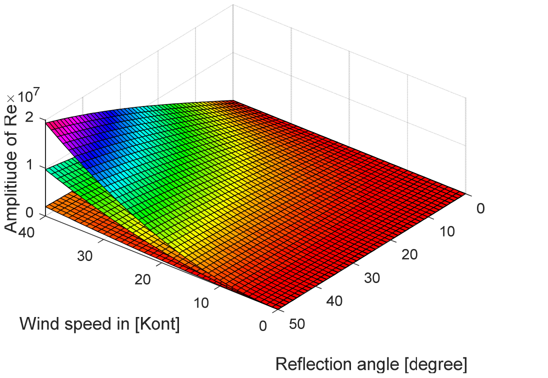
مشخصه انعکاس‌ها از مرزها به مقدار پارامتر رایلی (Re) بستگی دارد که از رابطهٔ (۱۰) به‌دست می‌آید [۲۶]:

$$\mathrm{Re} = \frac{2\pi f}{c}\sigma_s Sin\psi \qquad (۱۰)$$

به‌طوری‌که f فرکانس کار سیستم است، σ_s، آر. ام. اس بلندی امواج دریا (تلاطم) و w سرعت باد است. ارتباط بین σ_s (برحسب متر) و سرعت باد (برحسب نات) برای همه دریاها و با استفاده از دیتا استخراج شده است که به‌صورت (۱۱) است[۲۶]:

$$\sigma_s = 3.6576\times 10^{-3} w^2 \qquad (۱۱)$$

در شکل۳ رابطه (۱۰) به‌صورت سه‌بعدی ترسیم شده است. در این شکل محور عمودی مقدار عامل رایلی را نشان می‌دهد.



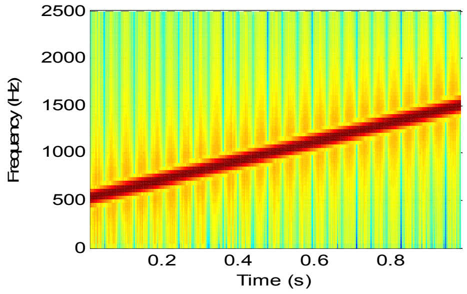
شکل ۳. نمایش عامل Re برحسب زاویه پرتو انعکاس، سرعت باد در فرکانس‌های یک، پنج و ده کیلوهرتز

در شکل ۳ سرعت باد از صفر تا ۴۰ نات و زاویه پرتو انعکاس برای هر مقدار سرعت باد از صفر تا ۵۰ درجه در نظر گرفته شده است. درنهایت سه رویه مشاهده می‌شود که رویه زیرین برای فرکانس یک کیلوهرتز، رویه وسطی در فرکانس پنج کیلوهرتز و بالایی در فرکانس ده کیلوهرتز ترسیم شده است. نواحی قرمزرنگ برای در نظر گرفتن توزیع رایلی یا رایسین، مناسب و معتبر هستند.

در این مقاله، مشخصات کانال آکوستیکی به‌صورت یک متغیر تصادفی با مدل آماری رایسین [۷، ۲۷] در نظر گرفته شده و سیگنال دریافتی، به‌صورت پاسخ کانال به سیگنال ورودی مدل شده است. ازنظر فضایی نیز در شبیه‌سازی انعکاس‌ها از جهت‌های مختلفی طبق رابطه (۷) وارد آرایه حسگرها می‌شوند.

۳-۱. پردازش سیگنال و بررسی رفتار کانال

یک پالس از سیگنال چیرپ به‌عنوان ورودی کانال آکوستیکی استفاده شده است که در آن عرض پالس برابر با ۱ ثانیه (در زمان بین صفر تا یک ثانیه) و فرکانس نمونه‌برداری برابر با ۲۰۰ کیلوهرتز در نظر گرفته شده است. فرکانس شروع سیگنال چیرپ برابر با ۵۰۰ هرتز و فرکانس اتمام آن برابر با ۱۵۰۰ هرتز در نظر گرفته شده است. شکل ۴ نمایش زمان- فرکانس سیگنال ارسالی چیرپ را نشان می‌دهد.



شکل ۴. سیگنال چیرپ حوزهٔ زمان- فرکانس

تابع چگالی احتمال

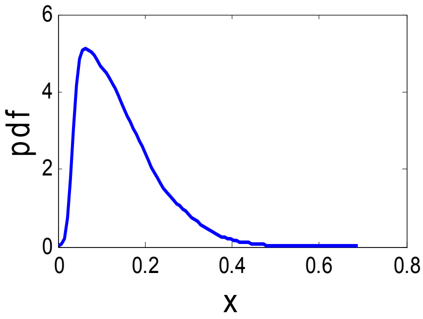
بر اساس سیگنال‌های دریافتی می‌توان تابع چگالی احتمال را محاسبه و برازش نمود. یک روش کلی این است که سیگنال را با یک تابع چگالی احتمال شناخته شده تقریب زد و این تابع را بر اساس هر یک از پارامترهای مدل پیش‌فرض، آزمایش و بهترین مقدار پارامتر مدل پیش‌فرض را برای داده برازش نمود. روش دیگر روش توزیع هسته[۱۸] است که یک

روش غیرپارامتری برای تخمین تابع چگالی احتمال، برای یک متغیر تصادفی است. درصورتی‌که روش‌های پارامتری نتوانند به‌طور دقیق داده را برازش نمایند یا در مواقعی که هیچ فرضی از نوع توزیع سیگنال در دسترس نباشد، در این صورت تابع توزیع به روش هسته تقریب زده خواهد شد. این توزیع بر اساس یک تابع هموارسازی[19] و یک عرض باند (h) که میزان همواری تابع چگالی احتمال تخمینی را کنترل می‌کند، طبق رابطه (۱۲) تعریف می‌شود [۲۸].

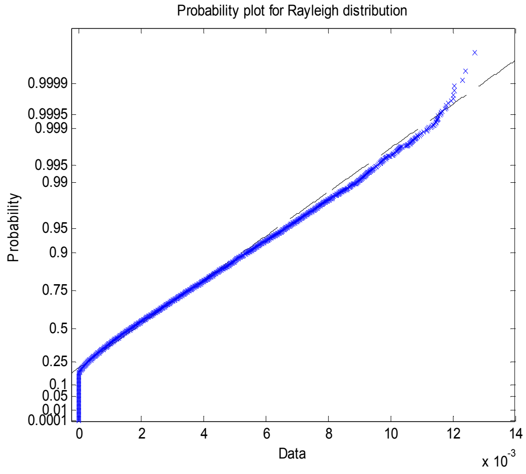
$$\hat{f}_h(x)=\frac{1}{nh}\sum_{i=1}^{n}K\left(\frac{x-x_i}{h}\right); \quad -\infty<x<\infty, \qquad (۱۲)$$

که در آن n تعداد نمونه، K تابع هسته و h پهنای باند است. در بیشتر مواقع تابع هسته به شکل تابع گوسی تعریف می‌شود.

نتیجهٔ مطابقت داده‌های سیگنال حوزهٔ زمان پس از عبور از کانال با برازش، نسبت به توزیع رایلی در شکل ۵، نمایش داده شده است.



شکل ۵. توزیع پوش سیگنال پس از عبور از کانال آکوستیکی



شکل ۶. میزان تطابق پوش سیگنال با توزیع رایلی

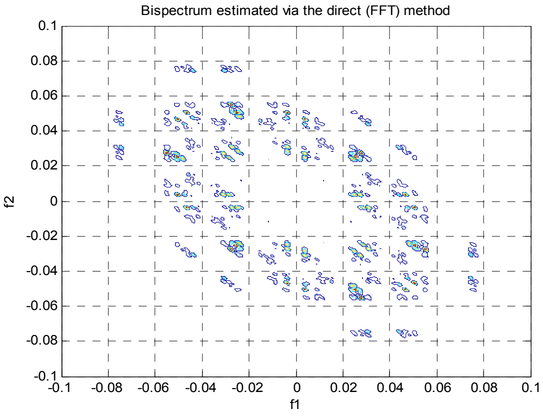
اگر با استفاده از روش کرنل، تابع چگالی احتمال تخمین زده شود، شکل۶، به دست می‌آید. با بررسی و برازش سیگنال سنسور اول (یکی از هفت سنسور آرایه خطی شبیه‌سازی‌شده) نسبت به توزیع رایلی، مطابق شکل‌های ۵ و ۶ نتیجه می‌شود که بیشتر فراوانی پوش داده‌ها منطبق بر تابع چگالی احتمال رایلی است.

بای اسپکتروم[20]

علاوه بر طیف توان مرتبهٔ دوم، طیف‌های مرتبه بالا[21] برحسب کومولان‌های مرتبه بالا تعریف شده و اطلاعاتی مانندگوسی بودن یا نبودن فرایند، خطی بودن یا نبودن، وابستگی فرکانسی و فازی المان‌های سیگنال و غیره را دربردارند [۲۹- ۳۰]. یکی از این روش‌ها، محاسبهٔ بای‌اِسپکتروم سیگنال است. برای یک فرایند کاملاً گوسی، طیف‌های مرتبهٔ بالای صفر خواهند بود؛ پس هرگونه غیر صفر بودن بای اسپکتروم به معنی انحراف از گوسی بودن خواهد بود. بای‌اِسپکتروم، اطلاعات فازی سیگنال پارامتری غیر گوسی را حفظ می‌کند، بنابراین می‌تواند برای تخمین فاز سیگنال مورداستفاده قرار گیرد. روش مستقیم برای محاسبهٔ بای اسپکتروم به شکل رابطهٔ (۱۳) است:

$$B_x(\omega_1,\omega_2)=X(\omega_1).X(\omega_2).X^*(\omega_1,\omega_2) \qquad (۱۳)$$

که در آن $X(\omega)$ تبدیل فوریه سیگنال $x(t)$ است. از صفر نبودن بای اسپکتروم مشخص می‌شود که فرایند گوسی نیست و در فرکانس‌های نرمالیزه در طیف، المان‌های وابسته به همین فرکانس‌ها وجود دارد که فاز آن‌ها، مجموع فازهای المان‌های دوبه‌دوی فرکانسی هستند. این یعنی یک فرایند غیرخطی باعث اعوجاج[22] در این فرکانس‌ها شده است. با بررسی طیف به‌دست‌آمده می‌توان به ترکیب فرکانسی سیگنال‌ها پی ببرد. شکل۷، نمایش تحلیل بای‌اسپکتروم را برای سیگنال دریافتی نشان می‌دهد. نمودار برحسب فرکانس‌های نرمالیزه شده به فرکانس مرکزی رسم شده است. با توجه به شکل ۷ می‌توان گفت که کانال اعوجاج فرکانسی نرمالیزه‌ای تا حد ۰/۰۸ ایجاد می‌کند. یعنی بیشتر اعوجاج‌ها در محدودهٔ ۸ درصد پایینی بازهٔ فرکانسی اتفاق می‌افتد.

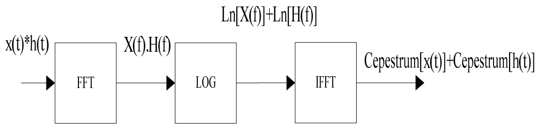


شکل ۷. تحلیل بای اسپکتروم سیگنال شبیه‌سازی

کپستروم

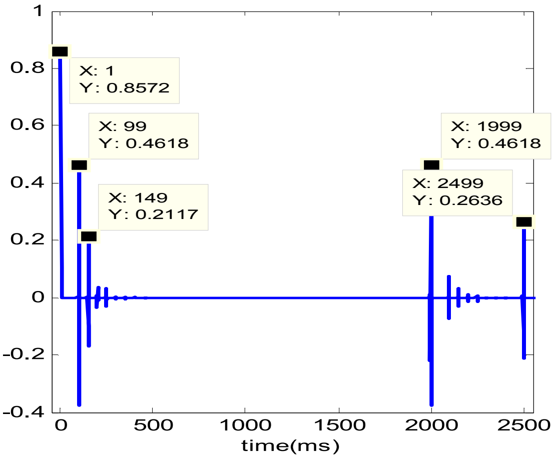
یکی دیگر از روش‌های پردازش سیگنال دریافتی، محاسبه میزان حضور تأخیرها در یک سری زمانی بر اساس تحلیل غیرخطی کپستروم است که در پردازش سیگنال‌های گفتاری بسیار کاربرد دارد [۳۱]. این روش تنها برای سیگنال‌هایی که گسترهٔ زمانی محدودی دارند، استفاده می‌شود. بلوک دیاگرام کپستروم در شکل (۸) آمده است. تئوری روش کپستروم به این صورت است که اگر سیگنال حوزه زمان به حوزهٔ فرکانس انتقال یابد، آنگاه مؤلفه‌های حاصل از کانولوشن سیگنال‌ها در حوزه زمان به مؤلفه‌های ضرب شونده در حوزه فرکانس تبدیل می‌شوند و اگر در این مرحله از داده، لگاریتم بگیریم، آنگاه می‌توان رابطهٔ سیگنال‌های همبسته با یکدیگر را به‌صورت مؤلفه‌های جمع شونده مدل کرد. ازاین‌رو با تبدیل معکوس فوریه[۲۳] می‌توان سمبل‌های حوزهٔ زمان را که به‌نوعی تبدیل یافتهٔ سمبل‌های اولیه هستند، به دست آورد؛ با این تفاوت که کانولوشن میان چند سیگنال به‌صورت جمع مؤلفه‌های سینوسی سیگنال‌ها در می‌آید. رابطهٔ (۱۴) فرمول کپستروم را بیان می‌کند [۳۲].

$$c(n) \equiv IFFT\left(\log\left|FFTx(n)\right|^2\right) \qquad (۱۴)$$



شکل ۸. بلوک دیاگرام تحلیل کپستروم [۳۲]

در رابطه (۱۴) $x(n)$ سیگنال و $c(n)$ ضرایب کپستروم است. شکل (۹) کپستروم سیگنال شبیه‌سازی را نشان می‌دهد که بیانگر تولید ۵ ضربه به معنای ۵ بار انعکاس سیگنال در کانال است.



شکل ۹. ضرایب کپسترال سیگنال شبیه‌سازی پس از کانال

کرتوسیس (کشیدگی)

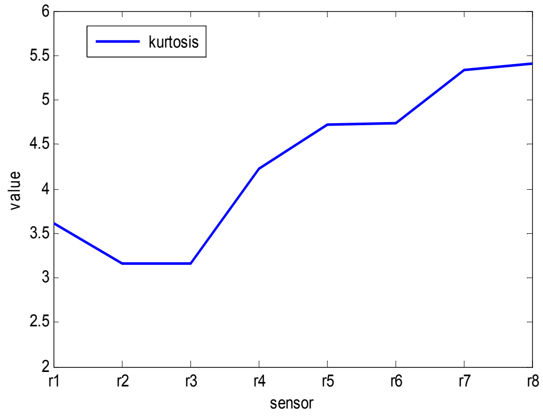
یکی از تحلیل‌ها برای پردازش سیگنال، محاسبه ممان‌ها و کومولان‌های مرتبه بالا مانند کشیدگی[۲۴] (کرتوسیس) است. رابطهٔ (۱۵)، رابطهٔ کشیدگی را نشان دهد. کومولان مرتبهٔ چهارم یا کشیدگی یکی از معیارهای اصلی رایج برای سنجش میزان گوسی بودن توزیع یک سیگنال است. برای متغیری که از توزیع گوسی برخوردار است، مقدار کشیدگی ۳ اختصاص می‌یابد و درواقع هر چه قدر مطلق کشیدگی به عدد ۳ نزدیک‌تر باشد، آن متغیر گوسی‌تر است[۳۳]. کشیدگی مطابق رابطهٔ زیر تعریف می‌شود:

$$kurt(x) = E\left[x^4\right] - 3E\left[x^2\right]^2 \qquad (۱۵)$$

که در آن، E، امید ریاضی سیگنال است. در بیشتر موارد عملی، چگالی احتمال سیگنال در دست نیست. بنابراین برای محاسبه آمارگان داده باید از تقریب میانگین زمانی به جای امید ریاضی بهره برد. با این توصیف، مقادیر کشیدگی از رابطهٔ (۱۶) به دست می‌آیند [۳۴].

$$kurt(x) = \frac{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\left(x_i - \overline{x}\right)^4}{\left[\sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\left(x_i - \overline{x}\right)^2}\right]^2} \qquad (۱۶)$$

در این رابطه، $\bar{x}$ میانگین زمانی سیگنال و n تعداد نمونه‌ها است. در شکل ۱۰ مقادیر کشیدگی در خروجی مدل‌سازی برخی سنسورها از مقادیر نزدیک ۳ به سمت ۵ تغییر می‌یابد که نشانه سوپرگوسی شدن توزیع است.



شکل ۱۰. مقادیر کشیدگی سیگنال پس از عبور از کانال

اسکیونس (چولگی)

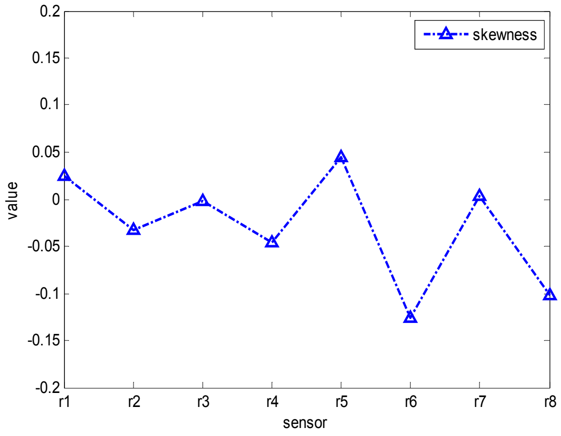
میزان چولگی[۲۵] (انحراف یا اُریب بودن توزیع سیگنال‌ها) نیز معیاری برای سنجش عدم تقارن تابع چگالی احتمال یک متغیر تصادفی بوده و درواقع، نرمالیزه شدهٔ کومولان مرتبه سوم سیگنال است. این کمیت طبق معادلهٔ زیر محاسبه می‌شود:

$$s = \frac{E\left[(x-\mu)^3\right]}{\delta^3} \qquad (۱۷)$$

در رابطهٔ (۱۷)، s میزان چولگی و μ و δ نیز به ترتیب میانگین و واریانس سیگنال هستند. در عمل باید از تقریب میانگین زمانی به‌جای امید ریاضی استفاده نمود که درنتیجه چولگی به شکل معادلهٔ (۱۸) محاسبه خواهد شد [۳۴].

$$s = \frac{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\left(x_i - \bar{x}\right)^3}{\left[\sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\left(x_i - \bar{x}\right)^2}\right]^3} \qquad (۱۸)$$

در رابطه (۱۸)، $\bar{x}$ میانگین زمانی سیگنال و n تعداد نمونه‌ها است. اگر تابع چگالی احتمال یک سیگنال متقارن باشد؛ آنگاه حاصل عبارت بالا در رابطهٔ (۱۸)، صفر شده، در غیر این صورت، مثبت شدن یا منفی شدن آن حاکی از تمایل تابع چگالی احتمال سیگنال به راست یا چپ است. شکل ۱۱تمایل چولگی به منفی را نشان می‌دهد که حاکی از تمایل به چپ توزیع گوسی است.



شکل ۱۱. مقادیر چولگی سیگنال پس از عبور از کانال

میزان انعکاس

در اصل وجود انعکاس در کانال و افزایش مقدار آن اثراتی بر سیگنال دارد که برخی پردازش‌ها مانند جهت‌یابی سیگنال را به‌شدت تحت‌تأثیر قرار می‌دهد و بسیاری از پردازش‌های مبتنی بر فاز سیگنال را مختل می‌کند، پس اینکه بدانیم در هرلحظه از زمان چه مقدار انعکاس در کانال وجود دارد، بسیار ارزشمند است. برای تخمین حجم انعکاس‌ها روی سیگنال دریافتی دو پارامتر انحراف معیار و آنتروپی را بررسی نمودیم. طبق تعریف میزان انحراف معیار برای یک متغیر تصادفی که N مشاهده از آن در دست است، به‌صورت رابطه (۱۹) محاسبه می‌شود [۳۴]:

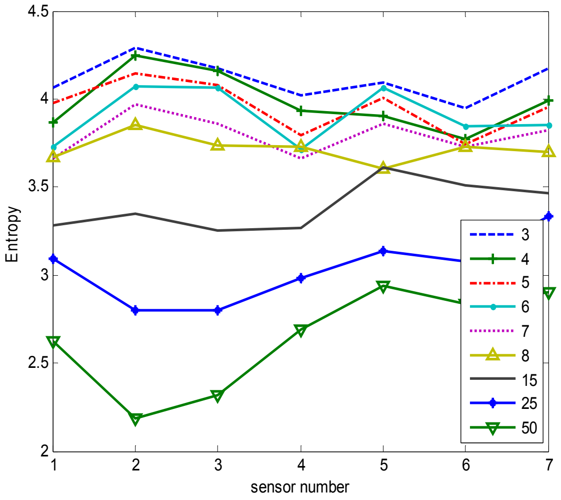
$$\mathrm{Std} = \sqrt{\frac{1}{\mathrm{N\text{-}1}}\sum_{i=1}^{N}\left|x_i - \mu\right|^2} \qquad (۱۹)$$

که در آن، Std میزان انحراف معیار و x_i و μ به ترتیب نمونه i-اُم و میانگین سیگنال هستند. مقدار آنتروپی نیز که در آمار معیاری برای سنجش میزان عدم قطعیت است، اطلاعات موجود در یک متغیر تصادفی را نشان می‌دهد؛ طبق تعریف به شکل معادلهٔ (۲۰) به دست می‌آید [۱۲].

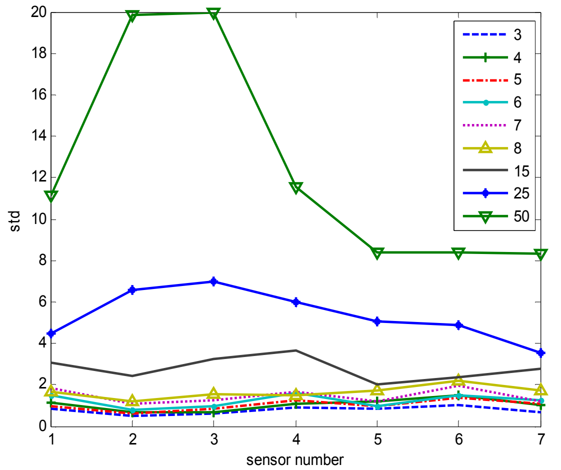
$$H(x) = -\sum_{x\in X} P\left[X = x\right]\log P\left[X = x\right] \qquad (۲۰)$$

که $P\left[X = x\right]$ احتمال متغیر تصادفی X است. در بیشتر کاربردهای عملی، به دلیل در دست نبودن تابع چگالی احتمال سیگنال، مقدار هیستوگرام سیگنال برای محاسبه

آنتروپی استفاده می‌شود. شکل‌های ۱۲ و ۱۳، به ترتیب نمودار آنتروپی و انحراف معیار سیگنال دریافتی را در یک آرایه نشان می‌دهد که در آن تعداد انعکاس‌ها با مدل‌سازی از کم به زیاد در حال تغییر است. با توجه به شکل‌ها مشخص است که در یک کانال با افزایش انعکاس‌ها از ۳ تا ۵۰ پرتو، میزان آنتروپی به خاطر دریافت بیشتر سیگنال‌های معین در همه سنسورها کاهش می‌یابد اما میزان انحراف معیار افزایش می‌یابد.



شکل ۱۲. تغییرات آنتروپی با افزایش تعداد انعکاس‌ها در ۷ سنسور آرایه



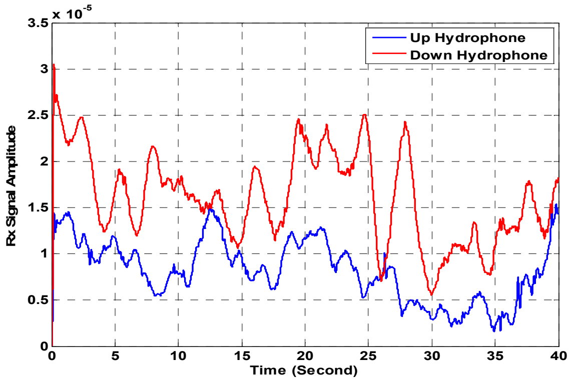
شکل ۱۳. تغییرات انحراف معیار با افزایش تعدادانعکاس‌ها در ۷ سنسور آرایه

بررسی همزمان این دو ویژگی، در موقع دریافت فریم‌های متوالی از یک سیگنال، می‌تواند مفید باشد تا بتوان در مورد کم یا زیاد بودن تعداد انعکاس‌ها یا تغییر ناگهانی آن در یک فریم خاص سیگنال، تصمیم گرفت و متناسب با آن از روش پردازشی بهینه استفاده کرد.

٤. تست میدانی و اندازه‌گیری تجربی

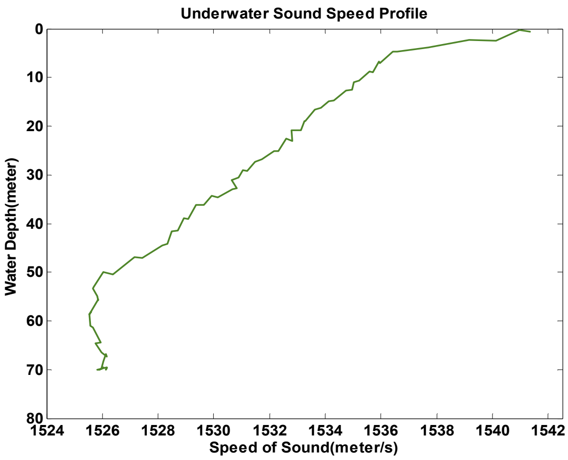
٤-١. شرایط و تجهیزات تست میدانی

به‌دست آوردن مشخصه‌های یک کانال آکوستیکی زیرآبی با انجام تست‌های میدانی در شرایط مختلف و بررسی جنبه‌های گوناگون آن امکان‌پذیر است. محل تست‌های این مقاله در دریای شیب‌دار با عمق ۱۵ تا ۲۷ متری بوده که سیگنال، با ۲ سنسور گیرنده[۲۶] دریافت می‌شد. عمق گیرنده (هیدروفون) اول برابر با ۵ متر و عمق گیرنده دوم ۱۵ متر بوده و فرستنده در عمق ۱۰ متری قرار داشت. گیرنده‌های به‌کارگرفته شده هیدروفون‌های استاندارد ۸۱۰۴، فرستنده پروژکتور لوبل[۲۷] مدل ۹۶۴۰ بوده و سیستم داده‌برداری لن ایکس آی[۲۸] متعلق به شرکت بی اند کی[۲۹] بوده است. شکل ۱۴ سیگنال‌های حوزه زمان به‌دست‌آمده در دو هیدروفون را در تست میدانی نشان می‌دهد. قبل از انجام تست ارسال و دریافت سیگنال‌های آکوستیکی، لازم است اندازه‌گیری‌های محیطی لازم با دستگاه سی. تی. دی.[۳۰] متر انجام شود.



شکل ۱۴. نمایش سیگنال به‌دست‌آمده در حوزه زمان

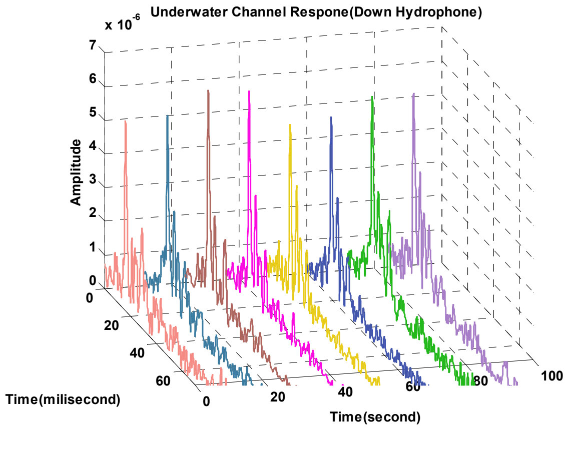
به این منظور دستگاه در نقاط مختلف محدوده جغرافیایی تست، از سطح تا کف دریا به‌طور عمودی فرو برده شد تا پروفایل سرعت صوت اندازه‌گیری شود. از مجموع اندازه‌گیری‌ها، پروفایل سرعت صوت که نقش تعیین‌کننده‌ای در نحوه انتشار امواج آکوستیکی دارد، مطابق منحنی شکل ۱۵ استخراج شد.



شکل ۱۵. پروفایل سرعت صوت اندازه‌گیری شده در محل

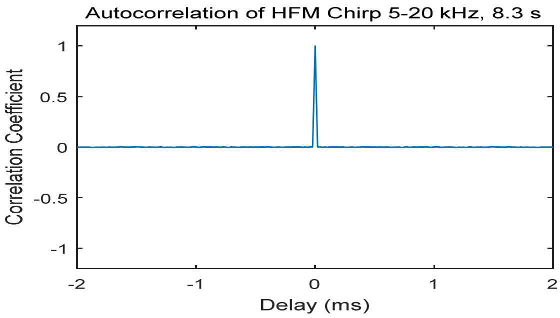
٤-۲. اندازه‌گیری تجربی پاسخ ضربهٔ کانال آکوستیکی

در این اندازه‌گیری، سیگنال نوع چیرپ با فرکانس مرکزی ۱ کیلوهرتز و پهنای باند ۱کیلوهرتز، در فاصله ۱۵۰۰ متر بین فرستنده و گیرنده، به تعداد زیاد ارسال شد. برای تأیید اعتبار آزمایش، موارد مختلف بررسی شدند و نتایج همگرا قبول و مورد تحلیل قرار گرفتند. شرایط محیطی و تجهیزات به کار رفته در این تست تغییری نکرد. فقط فاصله هیدروفون‌ها و نوع سیگنال مطابق جدول ۱ تغییر داده شد. مثلاً در شکل ۱۶ پاسخ ضربه کانال، پس از هشت بار ارسال متوالی یک پالس چیرپ در ۹۰ ثانیه محاسبه شد. نتایج به‌خوبی یکدیگر را تأیید می‌کنند و در همه منحنی‌ها ۴ ضربه غالب وجود دارد. تست‌های زیادی در فواصل مختلف انجام شد که برخی از آن‌ها در جدول (۱) گزارش شده است. نتایج درنهایت از تحلیل مجموع آزمایش‌ها حاصل شد.

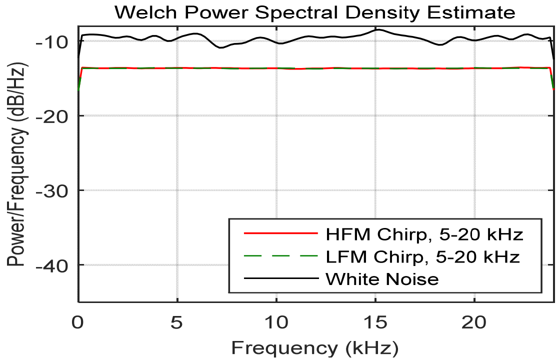


شکل ۱۶. تکرار آزمایش یک پالس چیرپ در فاصله ۵۰۰ متری

برای محاسبهٔ پاسخ ضربه کانال، باید از سیگنال ضربه استفاده کرد؛ اما ازآنجایی‌که این سیگنال در عمل، یک سیگنال غیرقابل‌تحقق است؛ بنابراین چندین سیگنال به‌صورت متداول به‌عنوان جایگزین سیگنال ضربه به‌کارگیری می‌شود. ازجملهٔ آن‌ها می‌توان به سیگنال‌هایی مانند چیرپ خطی[۳۱] و چیرپ هایپربولیک[۳۲] اشاره نمود. با توجه به شکل ۱۷ دیده می‌شود که تابع خودهمبستگی سیگنال چیرپ تقریب خوبی از تابع ضربه است و مطابق شکل ۱۸ در حوزه فرکانس نیز نسبت به نویز سفید، طیف هموارتری[۳۳] را ارائه می‌کند.



شکل ۱۷. نمایش تابع خودهمبستگی چیرپ [۲۳]



شکل ۱۸. طیف فرکانسی مربوط به سیگنال شکل (۲۱)

واضح است که پاسخ ضربه $h(t)$ یک سیستم خطی، پاسخ به ازای ورودی برابر با تابع ضربه واحد است. پاسخ یک سیستم خطی $y(t)$ به سیگنال ورودی دلخواه $x(t)$ از رابطه زیر به دست می‌آید[۱۲]:

$$y(t) = x(t) * h(t) = \int_{-\infty}^{\infty} x(\tau)\, h(t-\tau)\, d\tau \qquad (۲۱)$$

رابطهٔ (۲۱) تعریف کانولوشن $x(t)$ و $h(t)$ بوده و در آن $x(t)$ ورودی، $y(t)$ خروجی و $h(t)$ پاسخ ضربه سیستم است. هنگامی که سیگنال ورودی و خروجی مشخص باشند؛ فرایند

تخمین پاسخ ضربه یا معکوس کانولوشن[۳۴] قابل انجام است. در حوزهٔ فرکانس این تحلیل به‌صورت رابطهٔ (۲۲) بیان می‌شود [۲۳].

$$H(j\omega) = Y(j\omega)\big/X(j\omega) \qquad (۲۲)$$

که در آن $X(j\omega)$، $H(j\omega)$ و $Y(j\omega)$ فرم‌های حوزه فرکانس از سیگنال‌های $x(t)$، $h(t)$ و $y(t)$ هستند. به دلیل پیچیدگی که در حل به روش دکانولوشن وجود دارد، سنجهٔ همبستگی که مقدار تشابه دو سیگنال را می‌سنجد؛ اغلب برای اندازه‌گیری پاسخ ضربه سیگنال استفاده می‌شود. در حالت گسسته زمان، تابع همبستگی متقابل بین دو سیگنال $x[n]$ و $y[n]$ به‌صورت رابطه (۲۳) تعریف می‌شود[۲۳]:

$$r_{xy}[i] = \sum_{n=0}^{M-i-1} x[n+i]\, y^{*}[n] \qquad (۲۳)$$

که M حداکثر تعداد نمونه‌ها در سیگنال‌های x و y است. سیگنال کوتاه‌تر با اضافه کردن صفر با سیگنال طولانی‌تر هم‌طول می‌شود و علامت (*) به معنای مزدوج مختلط است. برای انجام دکانولوشن، تابع همبستگی فواید زیادی در ساده‌سازی محاسبات دارد. با فرض اینکه کانال به مفهوم وسیع ایستان[۳۵] و دارای پراکندگی ناهمبسته باشد آنگاه پاسخ ضربه کانال زیر آب $h(\tau;\ t)$ که متغیر با زمان است، طی مراحل زیر به دست می‌آید.

۱. سیگنال صوتی بارها ارسال و پس از عبور از کانال ضبط می‌شود؛
۲. قسمت مختلط سیگنال صوتی مرجع با استفاده از تبدیل هیلبرت به دست می‌آید؛
۳. همبستگی متقابل بین سیگنال دریافتی و مزدوج مختلط سیگنال مرجع محاسبه می‌شود.

جدول (۱) شرایط و برخی از نتایج این اندازه‌گیری را نشان داده است.

جدول ۱: نتایج تست سیگنال چیرپ در فواصل مختلف در دو هیدروفون بالایی و پایینی

ردیف	فاصله فرستنده و گیرنده (متر)	فرکانس تست (کیلوهرتز)	تعداد سیگنال‌های چندمسیره غالب در هیدروفون پایینی	تعداد سیگنال‌های چندمسیره غالب در هیدروفون بالایی
۱	۳۲۷	۱۰	۵	۸
۲	۳۲۷	۵	۳	۴
۳	۳۲۷	۱	۲	۳
۴	۵۰۰	۱۰	۵	۵
۵	۵۰۰	۵	۴	۵
۶	۵۰۰	۱	۴	۳
۷	۱۵۰۰	۱۰	۱	۵
۸	۱۵۰۰	۵	۱	۳
۹	۱۵۰۰	۱	۸	۵
۱۰	۴۵۰۰	۱۰	۱	۲
۱۱	۴۵۰۰	۵	۱	۳
۱۲	۴۵۰۰	۱	۶	۴

۴-۳. تابع اسکترینگ کانال

برای تحلیل پدیده چندمسیرگی، از تابع پروفایل شدت چندمسیرگی[۳۶] کانال استفاده می‌شود که از رابطهٔ (۲۴) به دست می‌آید[۱۲]:

$$\phi_h(\tau, \Delta t) = \frac{1}{T}\sum_{t=0}^{T} h_{est}(\tau, t)\, h_{est}^{*}(\tau, t+\Delta t) \qquad (۲۴)$$

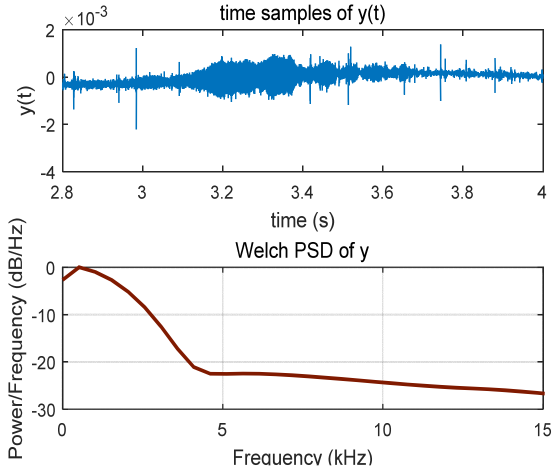
در رابطه (۲۴) $\phi_h(\tau, \Delta t)$ تابع خودهمبستگی پاسخ ضربه تخمین زده شده کانال (h_{est}) است، t زمان و τ تأخیر را نشان می‌دهد.

مفیدترین تابع، تابع اسکترینگ[۳۷] (پخش‌شدگی) کانال است و شامل اطلاعاتی در خصوص فرکانس و زمان پخش‌شدگی است. تابع اسکترینگ با تبدیل فوریه گرفتن از تابع خودهمبستگی پاسخ ضربه تخمین زده شده کانال (ϕ_h)، طبق رابطهٔ (۲۵) به دست می‌آید[۱۶، ۳۵].

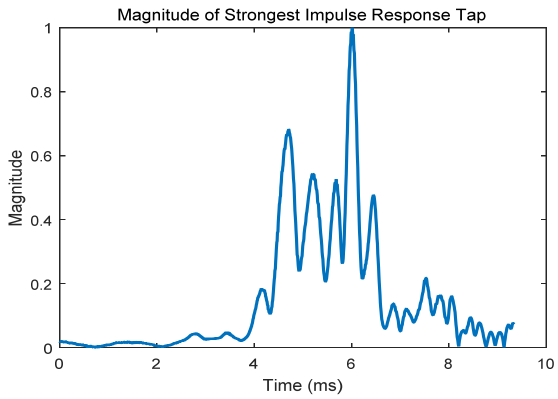
$$S(\tau,v) = FFT_{\Delta t}\{\phi_h(\tau,\Delta t)\} \quad (۲۵)$$

که در آن v بیانگر فرکانس داپلر است. تابع $S(\tau,v)$ بسیار مهم است زیرا به‌تنهایی کافی است تا تمام مشخصات کانال مثل شیفت داپلر، پخش‌شدگی داپلر و پخش‌شدگی چندمسیرگی را در اختیار بگذارد [۳۶].

شکل‌های ۱۹ تا ۲۱ مربوط به یک کانال آکوستیکی است که در مسافت ۵۰۰ متری، سیگنال‌های آن دریافت و تحلیل شده است. در شکل۱۹ چندین پالس به‌صورت سری ارسال شد و یک داده زمانی ۱۰ ثانیه‌ای ذخیره شد و برشی از داده‌ها از ۲/۸ تا ۴ ثانیه، مربوط به یک پالس نمایش داده شده است.

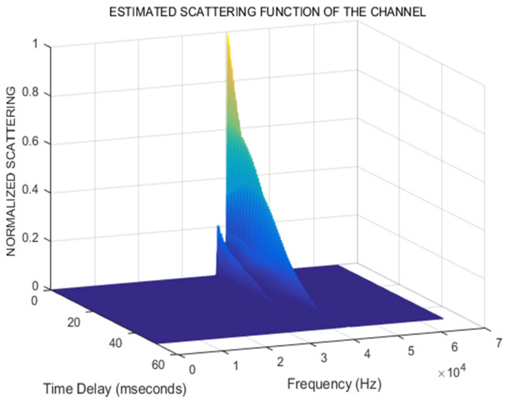


شکل ۱۹. نمایش حوزه زمان و طیف فرکانسی سیگنال تست میدانی



شکل ۲۰. نمونه‌ای دیگر از پاسخ ضربه کانال آکوستیکی در تست میدانی

شکل ۱۹ سیگنال حوزه زمان و چگالی طیف توان سیگنال واقعی را نشان می‌دهد و مشخص است که یک سیگنال چیرپ با فرکانس یک کیلوهرتز و پهنای یک کیلوهرتز برای تحلیل انتخاب شده است. شکل ۲۰ پاسخ ضربه کانال را نمایش می‌دهد که تعداد ۵ ضربه در آن مشاهده می‌شود. در شکل ۲۱ تابع پراکندگی این سیگنال کشیده شده است و پخش‌شدگی زمانی کانال به اندازه ۴۸ میلی‌ثانیه در آن مشهود است. همچنین پهنای باند همدوسی این کانال، به‌طور متوسط ۲۰ هرتز اندازه‌گیری شد.



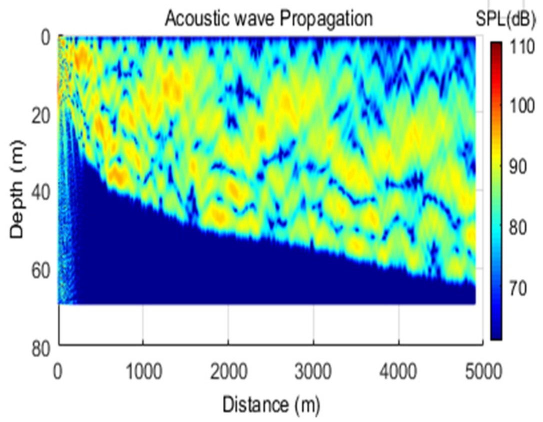
شکل ۲۱. تابع پراکندگی کانال آکوستیکی در تست میدانی

۵. بحث و مقایسه

۵-۱. اعتبارسنجی اندازه‌گیری تجربی

نتایج اندازه‌گیری عملی، با نتایج شبیه‌سازی‌های رایانه‌ای مقایسه و آنگاه سیگنال‌ها تحلیل شده‌اند زیرا نخست هنگام اندازه‌گیری واقعی هیچ چشم‌اندازی در خصوص نحوه انتشار صوت و توزیع تابع فشار آکوستیکی در دریا نداریم و این موضوع با به دست آوردن خروجی شبیه‌ساز انتشار موج تعیین می‌شود و تشکیل کانال یا محل نقاط هم گرایی موج آکوستیکی با کمک شبیه‌سازی، تخمین زده می‌شود. دوم اینکه با مطابق بودن نتایج و اعداد حاصل از اندازه‌گیری و شبیه‌سازی هم سناریوی اجرای عملیات اندازه‌گیری به لحاظ فنی تأیید می‌شود و هم اینکه نشان می‌دهد کد نرم‌افزاری مورداستفاده معتبر بوده و شرایط مرزی و پارامترهای محیطی واقعی به‌درستی در نرم‌افزار درج شده است.

مدل رایانه‌ای انتشار صوت به‌کار رفته در این بخش مقاله، یک مدل مبتنی بر روش معادلهٔ سهموی به نام مدل آر. ای. ام.[۳۸] است. پیاده‌سازی یا کدنویسی اولیه این مدل توسط میشل دی کولینز در آزمایشگاه تحقیقات نیروی دریایی آمریکا در سال ۱۹۹۳ و به زبان فرترن انجام شده است. این مدل با استفاده از روش گام مجزای پید[۳۹] در روابط ریاضی، قابلیت شبیه‌سازی انتشار صوت با زاویه خروج ±۹۰ درجه پرتوهای صوتی از منبع صوت را دارد که در سایر روش‌های به‌کار رفته در معادلهٔ سهموی چنین قابلیتی وجود ندارد و سایر روش‌ها با محدودیت زاویه مواجه هستند و ازاین‌رو، مدل‌هایی که از روش گام مجزای پید بهره می‌گیرند، جدیدترین و کامل‌ترین نوع مدل‌های مبتنی بر معادله سهموی هستند. در سال ۲۰۱۵، نسخه جدید این مدل به زبان متلب ارائه شده است [۳۷]. در ادامه اطلاعات محیط و چیدمان تست با اعداد واقعی با مدل ای. آر. ام.؛ مدل‌سازی شد.شکل انتشار امواج مانند شکل ۲۲ به دست آمد که با مقایسه اعداد به‌دست‌آمده از مدل و مقدار سیگنال‌های به‌دست‌آمده در فرکانس یک کیلوهرتز از اندازه‌گیری، صحت و دقت مدل تا یک دسی‌بل در پارامترهای فشار آکوستیکی و تلفات انتشار تأیید شد. محدوده آبی‌رنگ در پایین شکل ۲۲ بستر دریاست.



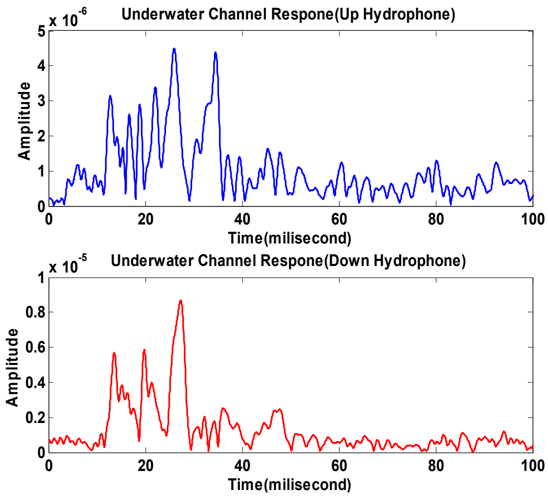
شکل ۲۲. شبیه‌سازی انتشار صوت در فرکانس ۱۰۰۰ هرتز با پارامترهای واقعی محیط تست با مدل ای. آر. ام.

که تقریباً امواج آکوستیکی در آن نفوذ نکرده‌اند و نقاط زردرنگ میزان شدت انرژی صوتی را نشان می‌دهد.

همان‌طور که نتایج مدل‌سازی نشان می‌دهد، یک کانال آکوستیکی نزدیک کف دریا و نقاط میانی تشکیل شده است که انرژی صوتی داخل آن هدایت شده و هرچه از منبع صوت دور می‌شویم، شدت انرژی آکوستیکی کاهش می‌یابد. البته به علت وجود انعکاس‌ها از سطح و کف دریا و کم‌عمق بودن ناحیه شبیه‌سازی شده، در نزدیکی فرستنده هنوز شکل کانال واضح نیست؛ اما با دقت در شکل ۲۲ به‌خصوص از فواصل ۳۵۰۰ متری به بعد تمرکز انرژی صوتی به سمت کف دریا مشهودتر است.

۵-۲. مقایسه پاسخ ضربه

شکل ۲۳ تخمین پاسخ ضربه کانال را برای سیگنال دریافتی واقعی جدول ۱ در دو حالت، یکی در هیدروفون بالایی و دیگری در هیدروفون پایینی نشان می‌دهد.



شکل ۲۳. پاسخ ضربه کانال آکوستیکی در تست میدانی

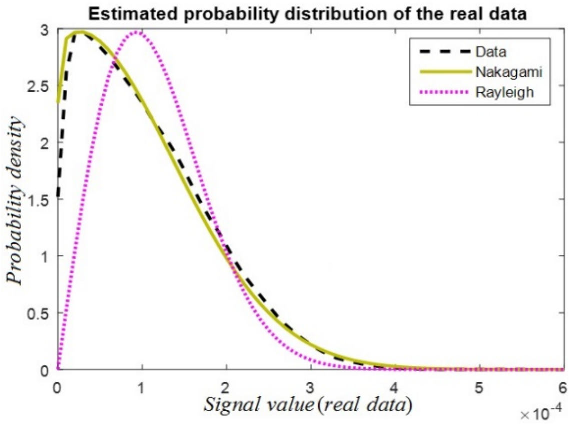
اگر کانال را به‌صورت یک کانال تنک با پاسخ ضربه به طول محدود در نظر بگیریم؛ بر اساس این منحنی می‌توان دریافت که برای کانال پایینی، طول پاسخ ضربه کمتر است. درحالی‌که کانال بالاتر مؤلفه‌های چندمسیری بیشتری دارد. در کل می‌توان برای کانال، تعداد ضربه‌ها (*tap*) را بین ۵ تا ۸ ضربه در نظر گرفت.

مقایسه شکل ۹و نتایج تحلیل کپستروم، با نتایج این اندازه‌گیری و محاسبه پاسخ ضربه در شکل ۲۳ نشان می‌دهد، تحلیل‌های تئوری و نتایج تجربی یکدیگر را تأیید می‌کنند و

مؤلفه‌های چندمسیری کانال آکوستیکی، از مرتبه ۵ ضربه است.

۳-۵. مقایسه تابع توزیع چگالی احتمال

شکل ۲۴ تحلیل آماری سیگنال دریافتی از کانال آکوستیکی واقعی را نمایش می‌دهد که توزیع سیگنال با توزیع رایلی مقایسه شده است. علی‌رغم نتایج مرجع [۵]، نتایج حاصل از داده‌های میدانی این تحقیق، حاکی از آن است که تابع توزیع چگالی احتمال پوش سیگنال آکوستیکی دریافتی از نوع ناکاگامی با پارامترهای ۱/۷ برای μ و ۰/۵۲ برای ω در رابطه (۵) است. در شکل ۲۴ داده‌های مورد تحلیل با سیگنال چیرپ ۵ کیلوهرتزی، پهنای باند یک کیلوهرتز و کانال ۵۰۰ متری، در دریای کم‌عمق به دست آمده‌اند.



شکل ۲۴. تخمین توزیع سیگنال واقعی و مقایسه آن با توزیع رایلی

مقایسه شکل‌های ۵ و ۶ با شکل ۲۴ نشان می‌دهد نتایج تئوری، توزیع رایلی را تخمین زده است اما نتایج عملی با اندکی تفاوت توزیع ناکاگامی را نشان داده است. درواقع توزیع ناکاگامی فرم دقیق‌تری از توزیع رایلی- گوسی است که در عمل ضرایب آن به دست آمد.

٦. نتیجه‌گیری

در این مقاله، رفتار یک کانال آکوستیکی با الگوگیری از شرایط تست میدانی، مدل شده و رفتار سیگنال دریافتی آرایه، به‌صورت تحلیل حوزه زمان و فرکانس و نیز بر اساس خواص آماری بررسی شده است. از مدل‌سازی کانال و تحلیل آماری آن، مشخص شد که کانال اعوجاج فرکانسی نرمالیزه‌ای تا حد ۰/۰۸ ایجاد می‌کند. نتیجه دیگر اینکه کپسترم سیگنال شبیه‌سازی بیانگر تولید ۵ ضربه است و به معنای ۵ بار انعکاس سیگنال در کانال شبیه‌سازی شده در بخش تئوری می‌باشد. نتیجه بعدی که در اثر شبیه‌سازی کانال و تحلیل آماری به دست آمد، اثر تعداد انعکاس‌ها روی سیگنال است. معلوم شد که در یک کانال با افزایش انعکاس‌ها، میزان آنتروپی در همه سنسورها کاهش می‌یابد، اما میزان انحراف معیار افزایش می‌یابد. علاوه بر نتایج شبیه‌سازی، نتیجه بررسی و تحلیل آزمایش‌های آکوستیکی زیر آب، با ارسال و دریافت سیگنال چیرپ بر اساس داده‌های تست میدانی طبق مدل‌سازی‌ها نشان می‌دهد که کانال آکوستیکی غالباً دارای پاسخ ضربه تنک بوده و سنسور بالاتر (نزدیک سطح) مؤلفه‌های چندمسیری غالب بیشتری دارد. درمجموع کانال آکوستیکی دارای تعداد انعکاس‌هایی بین ۵ تا ۸ بوده که نتایج تئوری تأیید می‌شود. تابع چگالی احتمال کانال اغلب دارای فرم ناکاگامی است درحالی‌که، در بخش تئوری تابع چگالی احتمال به فرم رایلی تخمین زده شده بود. در ضمن مشخصات آماری کانال، متغیر با زمان بوده و پخش‌شدگی زمانی کانال به اندازه ۴۸ میلی‌ثانیه است. همچنین پهنای باند همدوسی این کانال به‌طور متوسط ۲۰ هرتز اندازه‌گیری شد.

سپاسگزاری

از جناب آقای مهندس عباس فتح‌تبار که در بخش برنامه‌نویسی متلب همکاری داشتند؛ قدردانی می‌شود.

مراجع

[1] Kilfoyle DB, Baggeroer AB. The state of the art in underwater acoustic telemetry. IEEE Journal of oceanic engineering. 2000;25(1):4-27.

[2] Al_Aboosi YY, Sha'ameri AZ. Experimental Multipath Delay Profile of Underwater Acoustic Communication Channel inShallow Water. Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science. 2016;2(2):351-8.

[3] Xavier JDM. Modulation analysis for an underwater communication channel [dissertation]. Faculty of Engineering: Univ.PORTO; 2012.

[16] Borowski B, editor Characterization of a very shallow water acoustic communication channel. Proceedings of MTS/IEEE oceans; 2009.

[17] Zhang J, Cross J, Zheng YR, editors. Statistical channel modeling of wireless shallow water acoustic communications from experiment data. MILITARY COMMUNICATIONS CONFERENCE2010; 2010.

[18] Mahender K, Kumar TA, Ramesh K, editors. Analysis of multipath channel fading techniques in wireless communication systems. AIP Conference Proceedings; 2018.

[19] Zhao A, Ma L, Hui J, Zeng C, Bi X. Open-Lake Experimental Investigation of Azimuth Angle Estimation Using a Single Acoustic Vector Sensor. Journal of Sensors. 2018.

[20] Das A, Zachariah D, Stoica P. Comparison of two hyperparameter-free sparse signal processing methods for direction-of-arrival tracking in the HF97 ocean acoustic experiment. IEEE Journal of Oceanic Engineering. 2018;43(3):725-34.

[21] Yuen N, Friedlander B. DOA estimation in multipath: an approach using fourth-order cumulants. IEEE Transactions on Signal Processing. 1997;45(5):1253-63.

[22] Kronauge M, Rohling H. New chirp sequence radar waveform. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems. 2014;50(4):2870-7.

[23] Borowski BS. Application of channel estimation to underwater, acoustic communication [dissertation]. Stevens Instituteof Technology; 2011.

[24] Pajusco P, Gallée F, Malhouroux N, Burghelea R, editors. Massive antenna array for space-time channel sounding. 11th European Conference on Antennas and Propagation (EUCAP); 2017.

[25] Catipovic JA. Performance limitations in underwater acoustic telemetry. IEEE Journal of Oceanic Engineering. 1990;15(3):205-16.

[26] Zielinski A, Yoon Y-H, Wu L. Performance analysis of digital acoustic communication in a shallow water channel. IEEE journal of Oceanic Engineering. 1995;20(4):293-9.

[27] Kim SM, Byun SH, Kim SG, Lim YK, editors. Temporal variations of the statistical properties of an underwater acoustic channel measured at a shallow water in 2009. OCEANS'10 IEEE;2010; Sydney.

[4] Qarabaqi P, Stojanovic M. Statistical characterization and computationally efficient modeling of a class of underwater acoustic communication channels. IEEE Journal of Oceanic Engineering. 2013;38(4):701-17.

[5] Ainslie MA. Principles of sonar performance modelling: Springer; 2010.

[6] Wenz GM. Acoustic ambient noise in the ocean: spectra and sources. The Journal of the Acoustical Society of America. 1962;34(12):1936-56.

[7] Radosevic A, Proakis JG, Stojanovic M, editors. Statistical characterization and capacity of shallow water acoustic channels. OCEANS 2009-EUROPE; 2009.

[8] Kaddouri S, Beaujean P-PJ, Bouvet P-J. High-Frequency Acoustic Estimation of Time-Varying Underwater Sparse Channels Using Multiple Sources and Receivers Operated Simultaneously. IEEE Access. 2018;6:10569-80.

[9] Berger CR, Zhou S, Preisig JC, Willett P.Sparse channel estimation for multicarrier underwater acoustic communication: From subspace methods to compressed sensing. IEEE Transactions on Signal Processing. 2010;58(3):1708-21.

[10] Radosevic A, Fertonani D, Duman TM, Proakis JG, Stojanovic M, editors. Capacity of MIMO systems in shallow water acoustic channels. 2010 Conference Record of the Forty Fourth Asilomar Conference on Signals, Systems and Computers; 2010.

[11] Bouvet PJ, Loussert A, editors. Capacity analysis of underwater acoustic MIMO communications. OCEANS'10 IEEE;2010; Sydney.

[12] Proakis JG, Salehi M. Digital communications. McGraw-Hill; 2008.

[13] Siderius M, Porter MB, Hursky P, McDonald V, Group K. Effects of ocean thermocline variability on noncoherent underwater acoustic communications. The Journal of the Acoustical Society of America. 2007;121(4):1895-908.

[14] Chitre M. A high-frequency warm shallow water acoustic communications channel model and measurements. The Journalof the Acoustical Society of America. 2007;122(5):2580-6.

[15] van Walree PA, Otnes R. Ultrawideband underwater acoustic communication channels. IEEE Journal of Oceanic Engineering. 2013;38(4):678-88.

[28] Cao Y, He H, Man H. SOMKE: Kerneldensity estimation over data streams by sequences of self-organizing maps. IEEE transactions on neural networks and learning systems. 2012;23(8):1254-68.

[29] Li X, Yu M, Liu Y, Xu X, editors. Feature Extraction of Underwater Signals Based on Bispectrum Estimation. Wireless Communications, Networking and Mobile Computing (WiCOM), 2011 7th International Conference on; 2011.

[30] Hinich MJ, Marandino D, Sullivan EJ. Bispectrum of ship-radiated noise. The Journal of the Acoustical Society of America. 1989;85(4):1512-7.

[31] Steiglitz K, Dickinson B, editors. Computation of the complex cepstrum by factorization of the z-transform. Acoustics, Speech, and Signal Processing, IEEE International Conference on ICASSP'77; 1977.

[32] Biagetti G, Crippa P, Orcioni S, Turchetti C. Homomorphic deconvolution for MUAP estimation from surface EMG signals. IEEE journal of biomedical and health informatics. 2017;21(2):328-38.

[33] Ding Z, Nguyen T. Stationary points of a kurtosis maximization algorithm for blind signal separation and antenna beamforming. IEEE Transactions on Signal Processing. 2000;48(6):1587-96.

[34] Press W, Flannery B, Teukolsky S, Vetterling W. Moments of a distribution: Mean, variance, skewness, and so forth. Numerical Recipes. 1992:604-9.

[35] Rudander J, van Walree PA, Husøy T, Orten P. Very-High-Frequency Single-Input–Multiple-Output Acoustic Communication in Shallow Water. IEEE Journal of Oceanic Engineering. 2018(99):1-13.

[36] Dessalermos S. Undersea acoustic propagation channel estimation [dissertation]. Monterey, California: Naval Postgraduate School; 2005.

[37] Collins MD. User's Guide for RAM Versions 1.0 p. Washington, DC: Naval Research Lab;1995.Report No.:20375.

پی‌نوشت

1. Multipath
2. passive
3. OFDM
4. MIMO
5. FIR
6. ergodic
7. quasi-stationary
8. Ricieean distribution
9. Heavy-tailed
10. Deterministic
11. Fading
12. Array manifold
13. Chirp
14. Channel sounding
15. Linear Frequency Modulated
16. Autocorrelation
17. RMS
18. Kernel Density Estimator
19. Smoothing function
20. Bispectrum
21. Higher Order Spectral (HOS)
22. Intermodulation
23. IFFT
24. kurtosis
25. Skewness
26. Hydrophone
27. Lubell
28. LANXI
29. B&K
30. CTD
31. LFM chirp
32. hyperbolic frequency modulated
33. flat
34. deconvolution
35. Wide sense stationary
36. Multipath intensity profile
37. Scattering function
38. Range-dependent Acoustic Model (RAM)
39. Split-step Pade solution