

## طراحی سونار دارای قابلیت حذف نویزهای آکوستیکی

## مداخله گر پس زمینه با استفاده از فیلتر تطبیقی

حمید امیری آرا<sup>۱\*</sup>، محمد آخوندی درزی کلایی<sup>۲</sup>، ابوالفضل اکبر نیا<sup>۳</sup>

h.m.amiri@stu.nit.ac.ir

<sup>۱\*</sup> نویسنده مسئول، دانشجوی دکتری مخابرات سیستم، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، بابل

m.akhondi@stu.nit.ac.ir

<sup>۲</sup> دانشجوی دکتری مخابرات سیستم، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، بابل

a.akbarnia@gmail.com

<sup>۳</sup> کارشناسی ارشد، پژوهشکده علوم و فناوری دفاعی شمال، دانشگاه صنعتی مالک اشتر

تاریخ پذیرش: ۹۸/۰۳/۲۶

تاریخ دریافت: ۹۷/۱۲/۲۶

## چکیده

نویز محیطی اقیانوس یک ویژگی مهم آکوستیکی است که از عوامل مؤثر و مهم در کاهش عملکرد سیستم‌های سونار است. نویز محیطی تحت تأثیر عواملی از قبیل وضعیت سطح (مانند موج بودن، سرعت باد و...)، فضای بالای سطح، تغییرات و ساختار پوسته زمین در کف، رفتار جانوران آبی و به ویژه نویز حاصل از کشتیرانی است. استفاده از راه‌حل شکل‌دهی پرتو برای حذف نویز برای افزایش کارایی سیستم‌های سوناری (شناسایی اهداف آکوستیکی) مناسب نیست. زیرا در صورت استفاده از این روش، سیستم تنها قادر به پوشش محدوده خاصی از محیط است. درحالی که تمامی امواج رسیده برای شناسایی اهداف اهمیت دارند و نباید از دریافت آن‌ها جلوگیری شود. راهکار مطرح شده در این مقاله، استفاده از حذف نویز تطبیقی برای تفکیک امواج آکوستیکی رسیده از اهداف سونار در محیط‌هایی با نویزهای مداخله گر پس زمینه در سیستم‌های سوناری، برای کاربرد در شناورها، زیردریایی‌ها و... است. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که سیستم سوناری پیشنهادی قادر خواهد بود، امواج آکوستیکی رسیده از اهداف را به‌طور کامل از نویز محیط تشخیص داده و احتمال آشکارسازی اهداف را تا حد زیادی بهبود دهد.

واژه‌های کلیدی: فیلترهای تطبیقی، سیستم سونار، حذف نویز فعال آکوستیکی

## ۱. مقدمه

یکی از اهداف شناورهای موجود در اقیانوس‌ها شناسایی اهداف موجود دشمن در زیر آب است، از مشکلات عمده در شناسایی این اهداف در اقیانوس‌ها، نویز محیطی درون آن است که به شدت بر عملکرد سیستم سونار اثر می‌گذارد. حذف نویز، فرایندی برای از بین بردن نویز پس‌زمینه از سیگنال آکوستیکی رسیده از اهداف است. افت انرژی

سیگنال در حضور نویز باعث سختی کار پردازش سیگنال در کاربردهایی مانند تشخیص هدف و دسته‌بندی آن می‌شود [۱].

هدف از بهبود عملکرد سیستم‌های سوناری، حذف یا کاهش نویز آکوستیکی از ترکیب سیگنال به اضافه نویز و رسیدن به سیگنال مطلوب است. در سال‌های اخیر، محققان و مهندسان روش‌های مختلفی برای برطرف کردن این مشکل پیشنهاد

نویز نیز تابعی از فرکانس بر حسب  $kHz$  بوده و به صورت زیر است:

$$NL_{turb}(f) = 30 - 30 \log(f) \quad (2)$$

(ج) نویز موقعیت دریا<sup>۳</sup>  
امواج سطحی و باد سهم بزرگی در ایجاد نویز دارند. این نویز تحت تأثیر سرعت باد بر حسب knots بوده و تابعی از فرکانس بر حسب  $kHz$  است.

$$NL_{ss}(f, v_w) = 40 + 10 \log \left( \frac{v_w^2}{1 + f^{5/3}} \right) \quad (3)$$

(د) نویز حرارتی<sup>۴</sup>  
جنبش و آشفتگی مولکولی موجب تولید این نویز می‌شوند.

$$NL_{Therm}(f) = -15 + 20 \log(f) \quad (4)$$

در این رابطه  $f$  فرکانس و بر حسب  $kHz$  است.  
نویزهای معرفی شده در بالا با فرکانس کاری  $f$  در ارتباط هستند و برای هر کدام از آن‌ها رابطه‌ای تعریف شد. علاوه بر این نویزها، دسته دیگری از نویزها وجود دارند، مانند نویز خود وسایل<sup>۵</sup> که حامل فرستنده و گیرنده هستند (با ایجاد جاب و سروصدا) و نویز بیولوژیکی<sup>۶</sup> که به دلیل وجود ماهی‌ها و جانوران زیر آب است.

بنابراین کل نویز محیطی را می‌توان به صورت زیر و بر حسب dB نشان داد:

$$NL = NL_{traffic} + NL_{turb} + NL_{vessel} + NL_{bio} + NL_{ss} + NL_{therm} \quad (5)$$

شکل ۱ نویز کشتیرانی، نویز اغتشاشات، نویز موقعیت دریا و نویز حرارتی به همراه نویز برآیند را در فرکانس‌های مختلف نمایش می‌دهد. همان‌طور که مشخص است، در فرکانس‌های  $10 Hz$  تا  $100 Hz$ ، نویز ناشی از کشتیرانی و اغتشاشات، نویزهای غالب هستند و نویز حرارتی در فرکانس‌های کمتر از حدود  $100 kHz$  تأثیر ناچیزی بر نویز کل دارد. نویز موقعیت دریا در فرکانس‌های کمتر از  $1 kHz$  ثابت بوده و پس از آن با افزایش فرکانس کاهش می‌یابد. در ضمن، مقدار این نویز در فرکانس‌های پایین به سرعت باد بستگی دارد. همچنین، با افزایش فرکانس فقط نویز حرارتی زیاد شده و نقش سایر نویزها کاهش می‌یابد. در فرکانس‌های حدود  $1 kHz$  تا  $100 kHz$ ، نویز برآیند و نویز موقعیت دریا تقریباً برهم منطبق می‌شوند. از آنجا که نویز موقعیت دریا تابعی از سرعت باد است، می‌توان بیان کرد در این فرکانس‌ها نویز برآیند با افزایش سرعت باد، افزایش می‌یابد.

کرده‌اند؛ ولی تاکنون به خاطر پیچیدگی سیگنال رسیده از اهداف زیر آب، این قسمت از تحقیقات با مشکلاتی همراه بوده است. به‌طور معمول کاهش نویز بدون ایجاد اعوجاج در سیگنال رسیده به سختی امکان‌پذیر است، بنابراین عملکرد سیستم‌های سوناری به ارتباط میان اعوجاج و کاهش نویز محدود می‌شود.

سیستم‌های حذف نویز می‌توانند بر مبنای تعداد کانال‌های ورودی (یک/دو/چند) و نوع الگوریتم (تطبیقی/غیرتطبیقی) تقسیم‌بندی شوند [۲-۵].

در این مقاله، سعی در کاهش اثر نویز محیط برسیگنال دریافتی هدف با استفاده از فیلتر تطبیقی حذف‌کننده نویز در سیستم‌های سوناری شده است. در بخش دوم، نویزهای پس‌زمینه در اقیانوس بررسی می‌شوند. در بخش سوم، طرح سیستم سونار پیشنهادی مقاله مطرح می‌شود. در بخش چهارم، فیلترهای تطبیقی مرسوم معرفی شده و از میان آن‌ها فیلتر مطلوب برای پیاده‌سازی در طرح پیشنهادی برگزیده می‌شود. در این بخش با استفاده از نرم‌افزار متلب، الگوریتم‌های فیلتر تطبیقی برای سیستم سونار پیشنهادی شبیه‌سازی شده است. در بخش انتهایی مقایسه روش پیشنهادی با روش‌های متداول حذف نویز آورده شده است.

## ۲. معرفی نویز پس‌زمینه اقیانوس

نویز محیطی تحت تأثیر عواملی از قبیل وضعیت در سطح (مواج بودن، سرعت باد و کشتی‌ها)، فضای بالای سطح، تغییرات و ساختار پوسته زمین در کف، رفتار جانوران آبی و ... است [۶]. در ادامه، نویزهای محیطی در چند گروه قرار داده شده و برای هر کدام رابطه‌ای بیان شده است.

### (الف) نویز کشتیرانی<sup>۱</sup>

علت این دسته از نویز، فرستنده کشتی‌ها و زیردریایی‌ها هستند و به‌طور معمول این اصوات شامل چندین مؤلفه از منابع مختلف مانند کاویتاسیون پروانه کشتی، ارتعاشات بدنه کشتی، ماشین آلات دوار داخلی و ... هستند [۳]. این نویز تابعی از فرکانس  $f$  بر حسب  $kHz$  بوده و به شکل زیر است:

$$NL_{traffic}(f) = 10 \log \left( \frac{3 \times 10^8}{1 + f^4 \times 10^4} \right) \quad (1)$$

### (ب) نویز اغتشاشات<sup>۲</sup>

انفجارها و عوامل مشابه آن علت این نوع نویز هستند. این

آن‌ها با توجه به خصوصیات نویز و امکانات سخت‌افزاری در دسترس، ما را در انتخاب فیلتر مناسب یاری خواهد نمود. در این مقاله سعی بر این است که با بررسی تعدادی از فیلترهای مرسوم در مقاله‌ها و بررسی خصوصیات آن‌ها به یک سیستم مناسب حذف فعال نویز آکوستیکی برای استفاده در سیستم سونار هوشمند پیشنهادی برسیم.

#### ۴. مروری بر فیلترها و ساختار آن‌ها

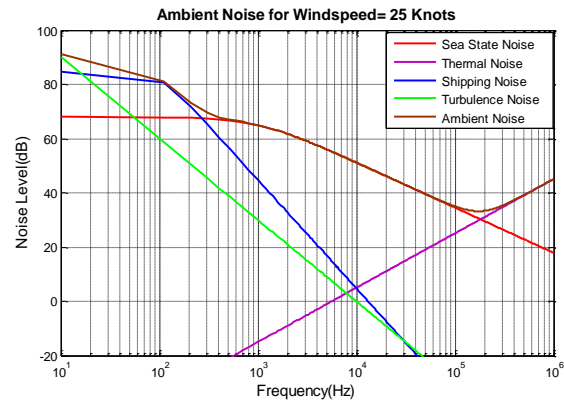
فیلتر درحوزه زمان به سامانه‌ای گفته می‌شود که با پردازش نمونه‌های تأخیر یافته و وزن‌دار ورودی، طبق قواعدی معین خروجی را تولید می‌کند. همچنین فیلتر در حوزه فرکانس را می‌توان به صورت سامانه‌ای که بر اساس ویژگی‌های مطلوب خروجی، بازه فرکانسی مشخصی از ورودی را عبور و مابقی را حذف می‌کند، تعریف نمود. به طور خلاصه در یک سیستم از فیلتر برای تغییر سیگنال ورودی برای دستیابی به سیگنال خروجی مطلوب استفاده می‌شود [۸].

در شکل ۲ نمودار بلوکی کلی فیلترهایی که در سیستم‌های مختلف برای تخمین سیگنال مطلوب استفاده می‌شوند، نمایش داده شده است. مهم‌ترین وظیفه تنظیم وزن‌های فیلتر به صورتی است که بتوان بیشترین تطبیق بین خروجی فیلتر و سیگنال مطلوب را ایجاد نمود. برای حل این مسئله و دستیابی به بهترین وزن‌ها از الگوریتم بهینه‌سازی تابع هدف<sup>۱۲</sup> استفاده می‌شود. این الگوریتم می‌تواند به صورت آماری<sup>۱۳</sup> یا قطعی<sup>۱۴</sup> تعریف شود. از جمله مهم‌ترین توابع هدف آماری که بیشتر در مسائل حذف نویز کاربرد دارد، حداقل سازی تابع متوسط مربع خطا<sup>۱۵</sup> (MSE) است.



شکل ۲. ساختار کلی یک فیلتر تطبیقی

در شکل ۳ ساختار تراگذر<sup>۱۶</sup> که یکی از معمول‌ترین ساختارها در پیاده‌سازی فیلترهای تطبیقی است، نمایش داده شده است. در این شکل  $x(n)$ ،  $y(n)$  و  $d(n)$  به ترتیب بیان‌گر سیگنال‌های ورودی، خروجی و سیگنال مطلوب هستند. همان‌طور که از شکل ۳ مشخص است، در این فیلتر سیگنال خروجی ( $y(n)$ ) با ترکیب نمونه‌های وزن‌یافته



شکل ۱. نویز محیطی در اقیانوس برحسب فرکانس‌های مختلف

همان‌طور که از شکل ۱ مشخص است نویز برآیند محیطی در اکثر فرکانس‌ها مقدار قابل توجهی دارد و با استفاده از فیلترهای سنتی (غیر تطبیقی) امکان حذف یا تضعیف آن امکان‌پذیر نیست [۶].

#### ۳. طرح پیشنهادی

راهکار مطرح‌شده در این مقاله استفاده از دو میکروفون درون آبی (هیدروفون<sup>۷</sup>) به عنوان ورودی و فیلتر تطبیقی<sup>۸</sup> برای تفکیک نویز پس‌زمینه از سیگنال اصلی است. استفاده از این فناوری در سیستم سونار، یک سیستم سونار هوشمند را تشکیل می‌دهد که قادر خواهد بود، امواج آکوستیکی رسیده از هدف را از نویز محیط تشخیص داده و آن را آشکار سازد. امکان پیاده‌سازی عملی این طرح از فاکتورهای مهم آن است، زیرا الگوریتم‌های حذف و کاهش نویز پس‌زمینه در کاربردهای بلادرنگ<sup>۹</sup> و قابل‌حمل<sup>۱۰</sup> از جمله شناورها، زیردریایی‌ها و ... به کار گرفته می‌شوند.

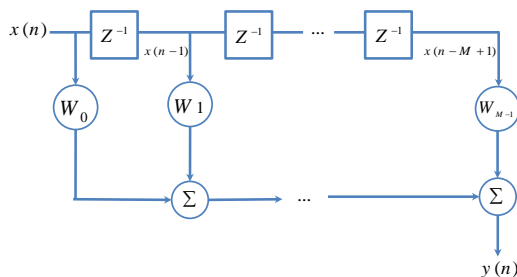
در این طرح، در جانمایی هیدروفون اول سعی شده محل قرارگیری آن از منابع نویز دورتر باشد تا در سیگنال دریافتی، نسبت سیگنال به تداخل و نویز<sup>۱۱</sup> (SINR) که همان توان سیگنال مطلوب (سیگنال رسیده از هدف)، به توان سیگنال تداخل (نویز آکوستیکی محیط) است، بیشتر از هیدروفون دوم باشد یعنی به عنوان مثال در یک شناور می‌توان هیدروفون اول را در سینه شناور و هیدروفون دوم (نویز حاصل از کشتی در پاشنه بیشتر از سینه است) را در پاشنه قرار داد.

از آنجاکه اجرای این روش مستلزم استفاده از فیلتر تطبیقی در آن است و فیلترهای تطبیقی مختلفی در مقاله‌ها مطرح شده است، آگاهی از عملکرد هر کدام از این فیلترها و معرفی

$$y(n) = \sum_{i=0}^{M-1} W_i(n)x(n-i) \quad (7)$$

که در آن  $M$  طول فیلتر است. در شکل ۵ ساختار یک فیلتر غیر بازگشتی FIR نمایش داده شده است. این فیلترها پایدار هستند، از آنجا که اعمال تابع هدف MSE به این نوع فیلترها تنها به یک مقدار مینیمم مطلق منجر می شود، الگوریتم بدون امکان گرفتار شدن در کمینه محلی به راحتی وزن های بهینه ای که به کمینه مطلق منجر می شود را به دست می آورد.

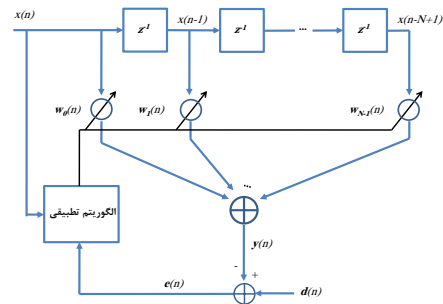
با توجه به دلایل بیان شده در هسته فیلترهای تطبیقی، اغلب فیلترهای FIR به کار گرفته می شوند و طراحان به منظور تنظیم وزن های فیلتر FIR از الگوریتم های تطبیقی بهره می گیرند. الگوریتم های تطبیقی در واقع روش های جستجوگر تکرار شونده هستند. از جمله این روش ها می توان به الگوریتم های نیوتن، میانگین مربع خطا (MSE)، حداقل مربع خطا<sup>۱۹</sup> (LMS) و ... اشاره نمود [۹، ۱۰].



شکل ۵. ساختار یک فیلتر با پاسخ ضربه محدود (FIR)

روش های LMS، MSE و NLMS به دلیل سادگی پیاده سازی شان نسبت به سایر روش ها تحقق پذیری بیشتری دارند. در بخش بعد توضیح داده خواهد شد که روش های LMS و NLMS به عنوان تخمینی از الگوریتم MSE، پیچیدگی محاسباتی و میزان فضای حافظه مورد نیاز برای پیاده سازی را تا حد زیادی کاهش می دهند و در نتیجه قابلیت استفاده در کاربردهای بلادرنگ را دارند. همچنین سرعت همگرایی الگوریتم NLMS نسبت به الگوریتم NLMS بیشتر است و خروجی آن با تغییر سیستم سریع به مقدار بهینه همگرا می شود [۱۱]. در نتیجه در سونار هوشمند پیشنهادی این مقاله حذف نویز آکوستیکی از اهداف در کانال متغیر اقیانوس به صورت بلادرنگ، روش NLMS نسبت به MSE اولویت بیش تری دارد.

خروجی  $(x(n))$  تولید می شود.  $W_i(n)$  نشان دهنده وزن های فیلترند که متغیر با زمان تغییر هستند.



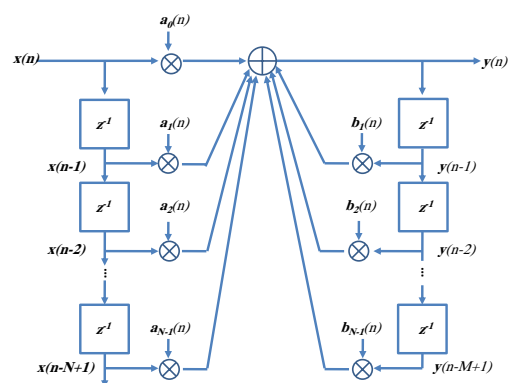
شکل ۳. نمودار بلوکی فیلتر تراگذر تطبیقی

هسته ساختار تراگذر معرفی شده برای فیلتر تطبیقی در شکل ۳ از نوع ساختارهای غیر بازگشتی با پاسخ ضربه محدود<sup>۱۷</sup> (FIR) است که برای محاسبه سیگنال خروجی سازوکار بازخوردی ندارد. اما ساختار در فیلترهای با پاسخ ضربه نامحدود (IIR<sup>۱۸</sup>) به صورت بازگشتی است.

ساختار یک فیلتر IIR در شکل ۴ نمایش داده شده است و معادله تفاضلی این نوع فیلترها به صورت

$$y(n) = \sum_{i=0}^{N-1} a_i(n)x(n-i) + \sum_{i=0}^{M-1} b_i(n)y(n-i) \quad (6)$$

قابل بیان است. کاربرد عملی فیلترهای IIR به دلیل طول عمر نامحدود و عدم امکان تنظیم وزن در فیلترهای تطبیقی محدودیت هایی دارد، همچنین استفاده از فیلترهای IIR ممکن است باعث ایجاد ناپایداری در سامانه و تولید کمینه های محلی گوناگونی شود.



شکل ۴. ساختار یک فیلتر با پاسخ ضربه نامحدود (IIR)

فیلترهای FIR برخلاف فیلترهای IIR در حوزه زمان پاسخ ضربه محدود و ساختار بازگشتی دارند. خروجی یک فیلتر FIR از رابطه ۷ به دست می آید:

ورودی اصلی و همچنین ورودی مرجع همبستگی داشته باشند. اما جزء تداخل سیگنال اصلی و ورودی مرجع می‌تواند با یکدیگر همبسته بوده و تابع همبستگی آن‌ها  $p(k)$  باشد.

فیلترهای تطبیقی از فیدبک سیگنال خطا

$$e(n) = d(n) - y(n) \quad (12)$$

برای تصحیح کردن تابع تبدیل فیلتر، برای تطبیق پارامترهای در حال تغییر استفاده می‌کند. اغلب، فرایند تطبیقی از یک تابع هزینه استفاده می‌کند که ملاکی برای کارایی بهینه فیلتر است. تعیین این که الگوریتم چگونه تابع تبدیل فیلتر را اصلاح کند تا هزینه در تکرار بعدی کم شود، مسئله‌ای تأثیرگذار در کارایی فیلتر است. بسته به اینکه تابع تبدیل فیلتر به وسیله چه تابعی هزینه اصلاح شود، فیلترهای تطبیقی متفاوتی مطرح شده است که در ادامه به معرفی آن‌ها می‌پردازیم.

#### ۱-۵. فیلتر وینر<sup>۲۰</sup>

در این فیلتر، سیستم طوری طراحی می‌شود که، سیگنال خروجی تا آنجا که ممکن است نزدیک به سیگنال مطلوب باشد. این هدف را با محاسبه میانگین مربع خطای تخمین و کاهش آن تا حد ممکن انجام می‌دهیم، به عبارت دیگر فیلتر بهینه، خطای تخمین را به حداقل می‌رساند. اگر تابع هزینه  $J$  طبق رابطه

$$J = E[e^2(n)] = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} e^2(n) \quad (13)$$

به صورت متوسط مربعات خطا ( $MSE$ ) تعریف شود، کمینه‌سازی تابع هزینه به معادله‌های

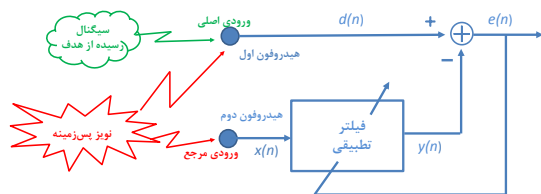
$$\sum_{l=0}^{M-1} W_l(n) r_{xx}(i-l) = 2r_{dx}(i), \quad i = 0, \dots, M-1 \quad (14)$$

منجر می‌شود که به معادله‌های وینر-هوب شناخته می‌شوند و فیلتری که از این تابع هزینه برای تطبیق وزن‌ها استفاده می‌نماید، فیلتر وینر نامیده می‌شود. در رابطه (۱۴)،  $r_{xx}(i)$  تابع خودهمبستگی ورودی مرجع و  $r_{xx}(i-l)$  تابع همبستگی متقابل بین ورودی مرجع و اصلی است. این رابطه به  $M$  معادله خطی منجر می‌شود که با حل آن‌ها می‌توان  $M$  وزن بهینه مربوط به فیلتر FIR را در زمان  $n$  به دست آورد.

#### ۵. استفاده از فیلترهای تطبیقی برای کاهش تداخل

همان‌طور که در بخش قبل بیان گردید، یکی از روش‌های حذف نویز مداخله‌گر از سیگنال هدف، استفاده از فیلتر تطبیقی است. زمانی که سیگنال به تداخل (نویز، چندمسیری<sup>۱۹</sup> و...) آغشته می‌شود، با استفاده از فیلتر تطبیقی می‌توان سیگنال مطلوب را از تداخل تفکیک نمود. به عبارت دیگر، فیلتر تطبیقی فیلتر دیجیتال خود اصلاح‌گری است که وزن‌های آن با توجه به معیار حداقل شدن تابع هزینه تنظیم می‌شود. تابع هزینه به صورت تابعی از تفاضل خروجی فیلتر و سیگنال مطلوب تعریف می‌شود.

ساختار کلی فیلتر تطبیقی پیشنهادی در شکل ۶ نشان داده شده است، که در آن سیگنال ورودی  $x(n)$  سیگنال خروجی  $d(n)$  و همچنین سیگنال مطلوب است. همچنین سیگنال خطا  $e(n)$  از رابطه  $d(n) - y(n)$  به دست می‌آید و در ادامه خطا برای تشکیل تابع عملکردی یا تابع هدف استفاده می‌شود. کم کردن تابع هدف ایجاب می‌کند که سیگنال خروجی فیلتر تطبیقی با سیگنال مطلوب مطابقت پیدا کند.



شکل ۶. شماتیک فیلتر تطبیقی.  $x(n)$  سیگنال مرجع ورودی،  $d(n)$  سیگنال مطلوب و  $e(n)$  سیگنال خطا است.

سیگنال  $d(n)$  ترکیبی از سیگنال مطلوب  $S(n)$  و تداخل  $x'(n)$

$$d(n) = S(n) + x'(n) \quad (8)$$

و ورودی  $x(n)$  نیز تنها شامل تداخل است. به منظور حذف تداخل از سیگنال اولیه و دستیابی به سیگنال مطلوب در خروجی فیلتر تطبیقی، باید قیود

$$E[S(n)x'(n-k)] = 0, \quad (9)$$

$$E[S(n)x(n-k)] = 0, \quad (10)$$

$$E[x(n)x'(n-k)] = p(k), \quad (11)$$

در مورد سیگنال‌ها برقرار باشند، که در آن منظور از  $E[\cdot]$  عملگر میانگین آماری است. به عبارت دیگر روابط بالا بدین معنا هستند که جزء سیگنال مطلوب موجود در ورودی با جزء

به دست می‌آید، که در آن  $N$  طول سیگنال ورودی است. مقداری از  $M$  که به حداقل شدن MDL منجر می‌شود، بیانگر طول بهینه فیلتر FIR است.

۳-۵. فیلتر حداقل مربع خطای نرمالیزه<sup>۱۱</sup> (NLMS)

الگوریتم NLMS گسترش یافته روش LMS است. در این روش وزن‌ها مشابه الگوریتم LMS از رابطه

$$W_i(n) = W_{i-1}(n) + \mu(n) e(n)x(n-i) \quad (17)$$

محاسبه می‌شود، درحالی که گام پیشرفت الگوریتم  $\mu(n)$  با زمان متغیر است. این تغییر گام بر پایه نرمالیزه نمودن گام پیشرفت الگوریتم با هر نمونه دریافتی از ورودی به صورت

$$\mu(n) = \frac{\bar{\mu}}{\varepsilon + \|x(n)\|^2} \quad (18)$$

است، که در آن  $\|x(n)\|^2$  بردار نرمال ورودی و  $\bar{\mu}$  و  $\varepsilon$  مقادیر مثبت هستند. مقدار ثابت  $\varepsilon$  برای ایجاد پایداری در زمانی که ورودی خیلی کوچک می‌شود، قرار داده شده است.

ثابت  $\bar{\mu}$  می‌تواند به عنوان کنترل گام باشد، که نرخ همگرایی الگوریتم را کنترل می‌کند. فیلتر NLMS زمانی پایدار است که گام پیشرفت الگوریتم در بازه زیر باشد.

$$0 \leq \mu \leq 2 + \frac{2\varepsilon}{\|x(k)\|^2} \quad (19)$$

جدول ۱ خلاصه‌ای از الگوریتم NLMS را به نمایش می‌گذارد.

جدول ۱. خلاصه‌ای از الگوریتم NLMS

$y(n) = w^T(n)x(n)$ $= \sum_{i=0}^{M-1} W_i(n)x(n-i)$	۱- فیلتر کردن:
$e(n) = d(n) - y(n)$	۲- تخمین خطا:
$w(n+1) = w(n) + \frac{\bar{\mu}}{\varepsilon + \ x(n)\ ^2} e(n)x(n)$	۳- به روز کردن بردار وزن فیلترها:

## ۶. تبیین طرح پیشنهادی

یکی از روش‌های حذف نویز استفاده از فیلترهای وقتی در زمان است، اما تاکنون این روش برای حذف نویزهای آکوستیکی پس‌زمینه برای تفکیک اهداف-آکوستیکی به کار گرفته نشده است. در اینجا فرض بر این است که سیگنال اولیه و مرجع (ورودی‌های فیلتر تطبیق) ترکیبی از سیگنال

اگر روابط (۹-۱۱) برقرار باشند، سیگنال  $S(n)$  تحت تأثیر فیلتر FIR قرار نخواهد گرفت و حداقل نمودن  $J$  به معنای حداقل شدن  $x'(n) - y(n)$  است. هر قدر  $x'(n)$  با  $x(n)$  همبستگی بیشتری داشته باشد، مقدار  $x'(n) - y(n)$  به صفر نزدیک‌تر خواهد شد. در نتیجه تنها، جزء تداخل موجود در سیگنال اصلی در خروجی ظاهر می‌شود و فیلتر عملکرد بهتری خواهد داشت. در مقابل اگر  $x'(n)$  با  $x(n)$  همبستگی نداشته باشد،  $E[d(n)x(n-k)] = 0$  می‌شود و طبق رابطه (۱۴) ورودی  $d(n)$  به خروجی راه می‌یابد، در نتیجه خروجی بدون تغییر باقی می‌ماند.

چون در الگوریتم MSE برای به دست آوردن ضرایب بهینه نیاز به محاسبه تابع خود همبستگی سیگنال مرجع و تابع همبستگی متقابل سیگنال اولیه و مرجع داریم، همه نمونه‌ها از ابتدای شروع به کار الگوریتم تا لحظه حال مورد نیاز است. بنابراین از فیلتر وینر در کاربردهای بلادرنگ نمی‌توان بهره برد.

## ۵-۲. فیلتر حداقل مربع خطا (LMS)

با توجه به استاتیک بودن سیگنال ورودی، از الگوریتم LMS به عنوان تخمینی از الگوریتم MSE استفاده می‌شود. در فیلتر LMS برای کاهش تابع هدف و دستیابی به ضرایب بهینه از شیوه گرادیان نزولی به منظور کمینه کردن تابع هزینه استفاده می‌شود. عملیات تطبیقی فیلتر برای تنظیم وزن‌های فیلتر FIR به‌طور کامل با رابطه بازگشتی

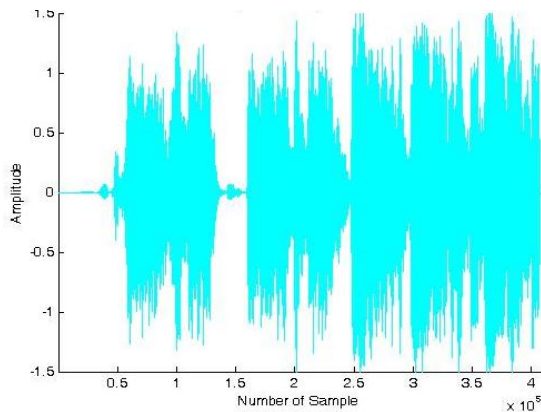
$$W_i(n) = W_{i-1}(n) + \mu e(n)x(n-i) \quad (15)$$

توصیف می‌شود که در آن بردار وزن‌های فیلتر است که در زمان  $n$  محاسبه می‌شود. همچنین  $\mu$  گام پیشرفت الگوریتم را مشخص می‌کند که در واقع تعیین کننده سرعت همگرایی الگوریتم است. انتخاب مقادیر بزرگ برای گام پیشرفت سبب همگرایی سریع الگوریتم می‌شود، اما در مواردی نیز ناپایداری سامانه را به دنبال خواهد داشت. اگر طول فیلتر وقتی را  $M$  و توان سیگنال مرجع را  $P_x$  در نظر بگیریم، برای پایدار ماندن سامانه،  $\mu$  باید در بازه  $0 < \mu < \frac{1}{10MP_x}$  انتخاب شود. همچنین طول فیلتر نیز یکی از پارامترهای قابل تنظیم است که مقدار کمینه آن که می‌تواند نیازهای مسئله را برآورده نماید، از رابطه

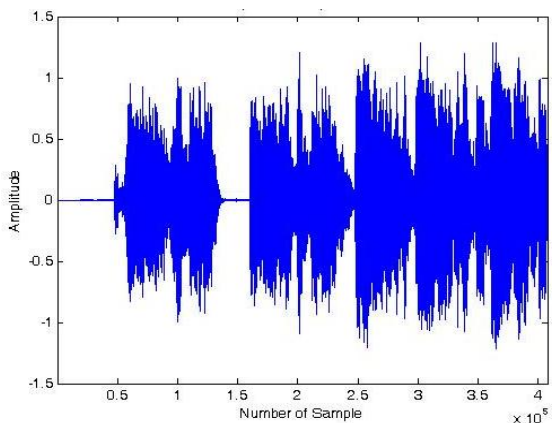
$$MDL(M) = -L(\theta) + \frac{1}{2}M \ln(N) \quad (16)$$

رسیده از هدف و نویز مداخله گر پس زمینه است. (شکل ۲) همان طور که در بخش قبل توضیح داده شد، فیلتر تطبیقی دو ورودی سیگنال اصلی  $x(n)$  و ورودی سیگنال مرجع  $d(n)$  دارد، که به ورودی سیگنال اصلی ترکیبی از سیگنال مطلوب با تداخل وارد و به ورودی سیگنال مرجع، جزء تداخل به تنهایی وارد می شود. در مورد سیگنال های آکوستیکی دریافتی توسط هیدروفون ها جزء تداخل به تنهایی در دسترس نیست و ترکیب آن با سیگنال مطلوب در اختیار است. بنابراین در روش پیشنهادی به جای استفاده از جزء تداخل، در ورودی مرجع از سیگنال مطلوب آغشته به نویز آکوستیکی مداخله گر پس زمینه استفاده می کنیم. اما به علت قرار گیری ورودی نزدیک به منبع نویز سیگنال رسیده به ورودی مرجع از سیگنال مطلوب (با توان کم) نسبت به سیگنال نویز (با توان زیاد) می توان صرف نظر نمود. بنابراین سیگنال های اصلی و مرجع به ترتیب از روابط

شکل ۷. سیگنال دریافتی از هیدروفون اول که دورتر از منبع نویز قرار دارد



شکل ۷. سیگنال دریافتی از هیدروفون اول که دورتر از منبع نویز قرار دارد



شکل ۸. سیگنال دریافتی از هیدروفون دوم، هیدروفون نزدیک تر به منبع نویز

شکل ۸. سیگنال دریافتی از هیدروفون دوم، هیدروفون نزدیک تر به منبع نویز

در تمام شبیه سازی ها، طول فیلتر تطبیقی استفاده شده برابر  $M = 32$  و تعداد کل نمونه ها برابر  $N = 400000$  نمونه در نظر گرفته شده است. توان سیگنال مطلوب برابر  $45W$  و توان سیگنال نامطلوب برابر  $25KW$  است.

برای تعیین کارایی الگوریتم پیشنهادی از معیار کیفیت تطبیق پذیری<sup>۲۲</sup> که با میزان مربع خطا اندازه گیری می شود، استفاده شده است. در این قسمت به بررسی کارایی سیستم سونار پیشنهادی در حذف فعال نویز آکوستیکی با استفاده از فیلتر ایده آل وینر به عنوان الگوریتم فیلتر تطبیقی می پردازیم. شکل ۹ سیگنال

$$d(n) = S(n) + Noise(n) \quad (20)$$

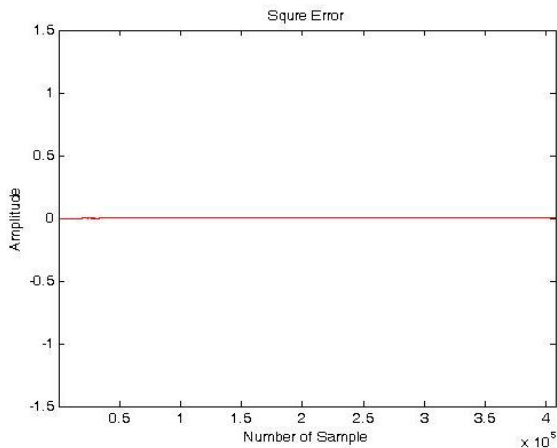
$$x(n) \approx Noise'(n) \quad (21)$$

به دست می آیند. که در آن  $S(n)$  سیگنال های رسیده از هدف است و  $Noise(n)$  و  $Noise'(n)$  نیز نویزهای آکوستیکی پس زمینه مداخله گر هستند. با توجه به اینکه الگوریتم NLMS الگوریتم بلادرنگ است و سرعت همگرایی بیش تری نسبت به روش LMS دارد، در این مقاله از فیلتر تطبیقی NLMS در ساختار سیستم سونار پیشنهادی استفاده می کنیم.

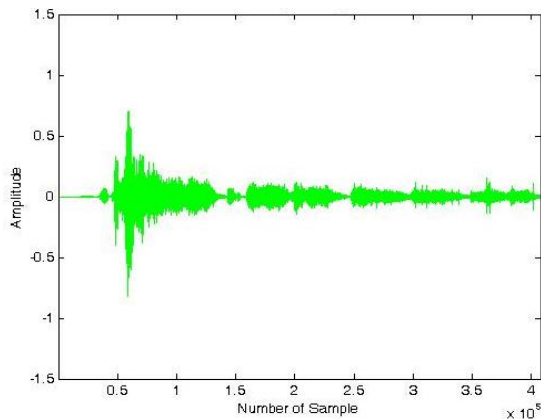
## ۷. نتایج شبیه سازی

در این بخش، شبیه سازی در محیط نرم افزار متلب انجام شده تا میزان اثربخشی سیستم سونار پیشنهادی تعیین شود. شبیه سازی انجام شده بر سیگنال رسیده از یک هدف، که در یک محیط با نویز زیاد (نویز آزمایش شده نویز صوتی ایجاد شده از موتور شناور به علاوه نویز محیط دریا) در حال دریافت است، در نظر گرفته شده که با فرکانس  $8 \text{ KHz}$  نمونه برداری شده است. نمودار نمایش داده شده در شکل ۷ سیگنال دریافتی از هیدروفون اول که از منبع نویز دورتر است را نشان می دهد. طبق اندازه گیری های انجام شده سیگنال رسیده به این هیدروفون نسبت سیگنال به تداخل و نویز (SINR) که همان توان سیگنال مطلوب (سیگنال صوتی رسیده از هدف)، به توان سیگنال تداخل (نویز آکوستیکی

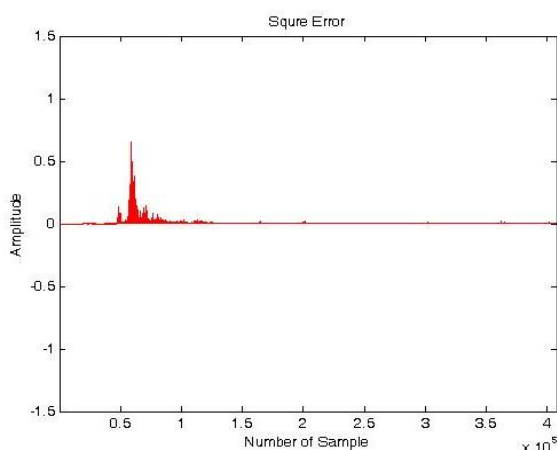
NLMS را نشان می‌دهد؛ همچنین شکل ۱۳ میزان مربع خطای سیگنال آشکار شده با فیلتر NLMS را نمایش می‌دهد.



شکل ۱۰. مربع خطای سیگنال آشکار شده با فیلتر Wiener نسبت به سیگنال مطلوب

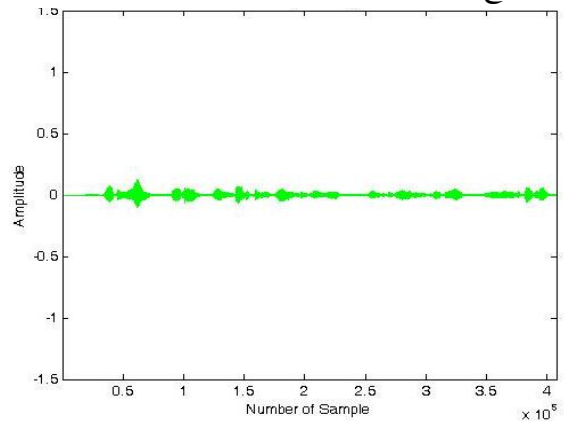


شکل ۱۱. سیگنال مطلوب استخراج شده توسط سیستم سونار پیشنهادی با فیلتر LMS



شکل ۱۲. میزان مربع خطای سیگنال آشکار شده با سیستم سونار پیشنهادی با فیلتر LMS

آشکار شده از هدف با فیلتر وینر را نشان می‌دهد و شکل ۱۰ میزان مربع خطای این سیگنال آشکار شده را نمایش می‌دهد.



شکل ۹. سیگنال مطلوب استخراج شده توسط سیستم سونار پیشنهادی با فیلتر Wiener

همان‌طور که در شکل ۱۰ مشخص است میزان مربع خطای سیگنال آشکار شده با فیلتر وینر بسیار کم است و سیستم پیشنهادی با استفاده از فیلتر وینر با دقت بسیار خوبی سیگنال رسیده از هدف را آشکار می‌کند. اما همان‌طور که در بخش قبل بیان شد، در این الگوریتم همه نمونه‌ها از ابتدای شروع به کار الگوریتم تا لحظه حال مورد نیاز است. بنابراین از فیلتر وینر در کاربردهای تشخیص اهداف به صورت بلادرنگ نمی‌توان بهره برد.

شکل ۱۱ سیگنال بازبازی شده از هدف به وسیله سیستم سونار پیشنهادی در صورت استفاده از فیلتر LMS با کمک دو سیگنال دریافت شده از هیدروفون اول و دوم را نشان می‌دهد. همچنین شکل ۱۲ میزان مربع خطای سیگنال آشکار شده با این روش را نمایش می‌دهد.

همان‌طور که در شکل ۱۲ مشخص است بعد از گذشت چندین نمونه فیلتر خود را کامل تطبیق می‌دهد و تا حد قابل قبولی سیگنال نامطلوب را حذف می‌کند و سیگنال رسیده از هدف قابل تشخیص خواهد بود. از آنجا که سرعت تطبیق فیلتر LMS کند است برای سیستم پیشنهادی قابل استفاده نیست، زیرا با تغییر محیط یا تغییر منابع نویز، کانال در حال تغییر خواهد بود و در هر لحظه فیلتر باید خود را به‌روز نماید که این باعث کاهش کارایی سیستم پیشنهادی خواهد شد.

در بخش آخر به بررسی کارایی حذف فعال نویز آکوستیکی سیستم سونار پیشنهادی با استفاده از الگوریتم فوقی NLMS می‌پردازیم. شکل ۱۳ سیگنال آشکار شده از هدف با فیلتر



در پایان نتایج حاصل از طرح پیشنهادی با فیلتر NLMS را که به عنوان فیلتری مناسب برای استفاده در طرح پیشنهادی برگزیدیم، با روش‌های متداول حذف نویز شامل روش KEMI، HMM و LASE مقایسه می‌کنیم.

معیار نسبت کلی سیگنال به نویز (OSNR) نسبت بین انرژی سیگنال دریافتی از هدف به خطا را نشان می‌دهد و از رابطه

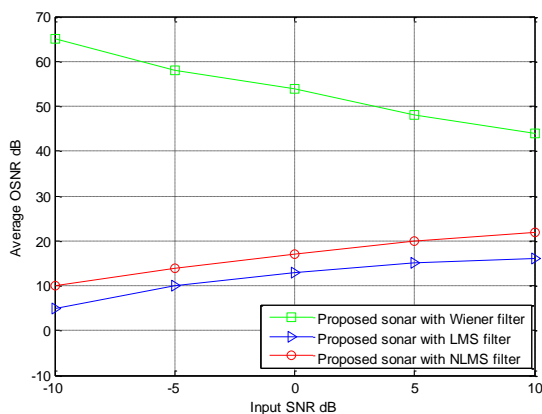
$$OSNR_{dB} = 10 \times \log \left[ \frac{\sum_n S^2(n)}{\sum_n [S(n) - \hat{S}(n)]^2} \right] \quad (22)$$

قابل محاسبه است، به طوری که  $S(n)$  سیگنال آکوستیکی هدف تمیز بوده و  $\hat{S}(n)$  سیگنال خروجی پس از حذف نویز است [۱۲].

اگر این معیار مقدار زیادی داشته باشد نشان‌دهنده آن است که مجذور اختلاف بین سیگنال تخمینی رسیده از هدف و سیگنال آکوستیکی بدون نویز هدف کوچک است. به وضوح پیداست که این معیار ملاک معتبری برای قابلیت تشخیص اهداف و کیفیت حذف نویز محیط از سیگنال رسیده از هدف است.

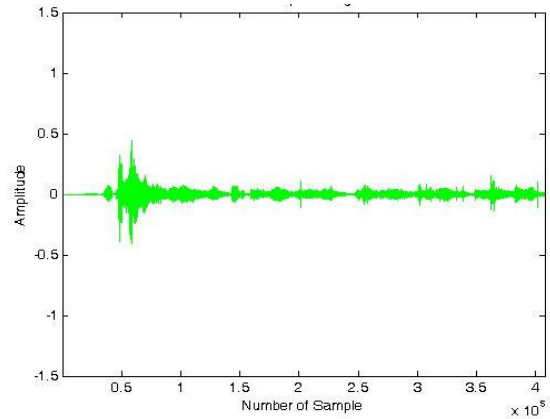
همان‌طور که مشخص است OSNR بالاتر نشانه مانده نویز پس زمینه کمتری بر سیگنال است. OSNR را می‌توان یکی از مهم‌ترین نشانه‌ها برای عملکرد یک الگوریتم دانست.

شکل ۱۵ کیفیت سیگنال مطلوب آشکار شده با طرح پیشنهادی با فیلترهای تطبیقی Wiener، LMS و NLMS برای مقادیر سیگنال به نویزهای ورودی متفاوت با معیار SNR کلی، نشان می‌دهد.



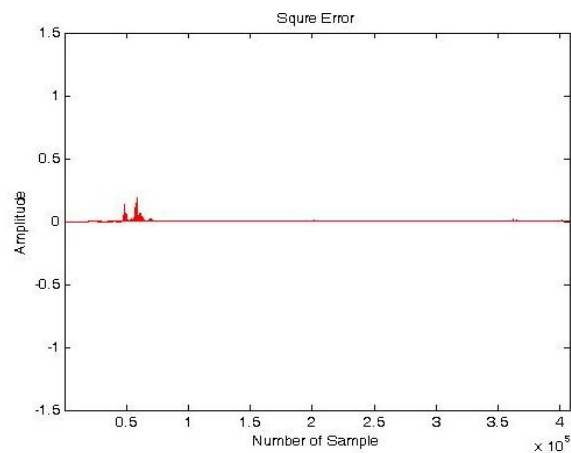
شکل ۱۵. کیفیت سیگنال آشکار شده

با سونار پیشنهادی با فیلترهای تطبیقی Wiener، LMS و NLMS



شکل ۱۳. سیگنال مطلوب استخراج شده

با سیستم سونار پیشنهادی با فیلتر NLMS



شکل ۱۴. میزان مربع خطای سیگنال آشکار شده

با سونار پیشنهادی با فیلتر NLMS نسبت به سیگنال مطلوب

همان‌طور که از مقایسه نتایج حاصل از سیستم پیشنهادی با الگوریتم LMS شکل ۱۲ و الگوریتم NLMS شکل ۱۳ مشخص است سرعت همگرایی فیلتر NLMS بیشتر از LMS است و در صورت تغییر کانال، خطای کمتری در سیستم ایجاد شده و کارایی سیستم با استفاده از این الگوریتم بسیار بهتر عمل می‌کند.

## ۸. ارزیابی کارایی سیستم پیشنهادی

برای تعیین کارایی سیستم‌های سوناری پیشنهاد شده برخی از اندازه‌گیری‌ها ریاضی است. در این مقاله با استفاده از روش SNR کلی که به عنوان معیاری مهم در مقاله‌ها بیشتر به کار می‌رود، کیفیت سیگنال آشکار شده از هدف با طرح پیشنهادی را برای توان نویزهای ورودی مختلف محاسبه می‌کنیم.

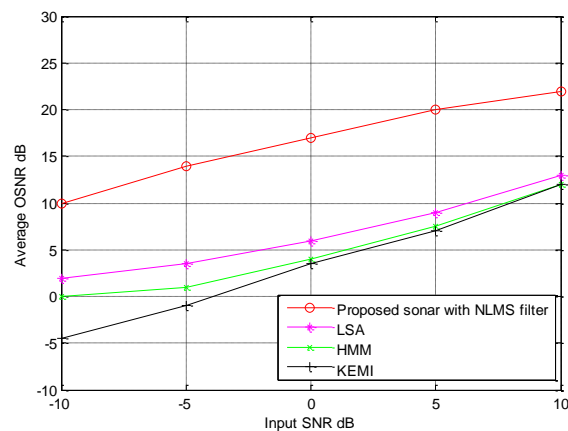
از سیگنال می‌تواند باعث افزایش کارایی و بهبود شناسایی اهداف شود. عملکرد بلادرنگ، همگرایی سریع و سادگی در پیاده‌سازی این طرح از فاکتورهای مهم آن است که می‌توان آن را در سیستم‌های سوناری به کار گرفت. راستی آزمایشی روش پیشنهادی روی مجموعه داده‌های آکوستیکی انجام شد و نتایج، کارایی مطلوب الگوریتم پیشنهادی نسبت به روش‌های متداول بهبود تشخیص اهداف-سوناری را نشان داده است.

## مراجع

- [1] Urick RJ. Principles of Underwater Sound. 3rd ed. McGraw-Hill; 1983. p. 15-25.
- [2] William S, Manoel J, Pereira L. Principal component analysis for classifying passive sonar signals. In: ISCAS 2001. The 2001 IEEE International Symposium on Circuits and Systems; 2001; Sydney, NSW. IEEE; 2001. p.592-95.
- [3] Esquef P, Biscainho L, Valimaki V, Karjalainen M. Removal of long pulses from audio signals using two-pass split-window filtering. In: Audio Engineering Society Convention 112. Audio Engineering Society; 2002.
- [4] De Seixas JM, De Moura NN. Preprocessing passive sonar signals for neural classification. IET radar, sonar & navigation. 2011 Jul 1;5(6):605-12.
- [5] Soares-Filho W, Seixas J, Caloba L. Enlarging neural class detection capacity in passive sonar systems. In: 2002 IEEE International Symposium on Circuits and Systems. Proceedings (Cat. No. 02CH37353). IEEE; 2002.
- [6] Wu H, Siegel M, Khosla P. Vehicle sound signature recognition by frequency vector principal component analysis. In: IMTC/98 Conference Proceedings. IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference. IEEE; 1998. p. 429-34.
- [7] Chin-Hsing C, Jiann-Der L, Ming-Chi L. Classification of underwater signals using wavelet transforms and neural networks. Mathematical and computer modelling. 1998 Jan 1;27(2):47-60.
- [8] Boroujeny F. Adaptive Filters: Theory and Applications. 2nd ed. John Wiley & Sons, Ltd; 2013. p. 55-60.
- [9] Gevorkov Y, Yefanov O, Barty A, White TA, Mariani V, Brehm W, et al. XGANDALF—extended gradient descent algorithm for lattice finding. Acta Crystallographica Section A: Foundations and Advances. 2019 Sep 1;75(5):694-704.

در این نمودار نکته قابل توجه این است که در حالت استفاده از فیلتر وینر مجموع مربعات خطا، با افزایش توان سیگنال مطلوب به طور خطی افزایش می‌یابد. یعنی هرچه میزان توان سیگنال نامطلوب بیشتر باشد، فیلتر قابلیت تشخیص بهتر نویز را دارد و باعث بهبود کیفیت سیگنال آشکارشده می‌شود.

شکل ۱۶ مقایسه میزان بهبود گفتار با استفاده از طرح پیشنهادی با فیلتر NLMS و روش‌های مرسوم حذف نویز آکوستیکی، شامل روش KEMI، روش HMM، LASE نمایش می‌دهد [۱۲-۱۴].



شکل ۱۶. مقایسه طرح پیشنهادی مطرح شده با استفاده از فیلتر تطبیقی NLMS با روش HMM و روش LASE

همان‌طور که در شکل مشخص است عملکرد طرح پیشنهادی بسیار بهتر از روش‌های مطرح شده در مقاله‌هاست اما از لحاظ سخت‌افزاری در طرح پیشنهادی این مقاله نیاز به دو هیدروفون (دو ورودی) است.

## ۹. نتیجه‌گیری

در این مقاله یک سیستم سونار هوشمند با استفاده از فیلتر تطبیقی NLMS به منظور تفکیک امواج آکوستیکی رسیده از اهداف-سونار در محیط‌هایی با نویزهای مداخله‌گر پس‌زمینه اقیانوس، برای کاربرد بر روی شناورها، زیردریایی‌ها و ... پیشنهاد شد. فیلتر تطبیقی یک تجزیه‌کننده سیگنال است که قادر است بخش همسان و ناهمسان سیگنال‌های ورودی دو هیدروفون را از هم جدا نماید. بخش همسان که خروجی فیلتر FIR است، از ورودی اصلی کم شده و بخش ناهمسان را در خروجی فیلتر کلی تولید می‌کند که همان سیگنال هدف-آکوستیکی تمیز است. سونار پیشنهادی با حذف نویز

- [10] Gill PE, Murray W, Wright MH. Practical optimization. Society for Industrial and Applied Mathematics; 2019.
- [11] Zhang L, Li K, Bai EW. A new extension of newton algorithm for nonlinear system modelling using RBF neural networks. IEEE Transactions on automatic control. 2013 Apr 18;58(11):2929-33
- [12] Schölkopf B, Smola A, Müller KR. Nonlinear component analysis as a kernel eigenvalue problem. Neural computation. 1998 Jul 1;10(5):1299-319.
- [13] Howell B, Wood S. Passive sonar recognition and analysis using hybrid neural networks. Oceans 2003. Celebrating the Past... Teaming Toward the Future (IEEE Cat. No. 03CH37492); 2003; San Diego, CA, USA. IEEE; 2003. p. 1917-24.
- [14] Bagheri V, Izadi V, Davoodi K. Noise-Resistant Feature Extraction from Measured Data of a Passive Sonar. Journal of Soft Computing and Decision Support Systems. 2019 Nov 29;7(1):1-6.

#### پی‌نوشت

1. Shipping noise
2. Turbulence noise
3. Sea state noise
4. Thermal noise
5. Self-noise
6. Biological noise
7. hydrophone
8. Adaptive Filter
9. Real-Time
10. Portable
11. Signal-to-interference-plus-noise ratio
12. Performance function
13. Stochastic
14. Deterministic
15. Mean Square Error
16. Transversal
17. Finite Impulse Response
18. Infinite Impulse Response
19. Multi path
20. Wiener
21. Normalized Least Square Error
22. Adaptation