دسته بندی و شناسائی اهداف زیرآبی بر اساس اصوات منتشره

حسن صیادی[۱*] ، محمدسعید سیف[۲]، علی اصغر آب نیکی [۳]

[۱] استاد، قطب علمی هیدرودینامیک و دینامیک متحرکهای دریایی، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی شریف؛ sayyaadi@sharif.edu
[۲] استاد، قطب علمی هیدرودینامیک و دینامیک متحرکهای دریایی، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی شریف؛ seif@sharif.edu
[۳] دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی شریف؛ aliasghar_abniki@yahoo.com

اطلاعات مقاله

تاریخچه مقاله:
تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۵/۰۸/۱۸
تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۶/۱۰/۰۲

کلمات کلیدی:
سونار
نویز
تبدیل موجک
تبدیل هیلبرت هوانگ
ماشین بردار پشتیبان

چکیده

در این مقاله یک سیستم دسته‌بندی اهداف دریایی با استفاده از نویز منتشره از آن‌ها ارائه می‌شود. این سیستم برای استفاده در محیط‌های آبی کم‌عمق همچون خلیج فارس پیشنهاد شده است. در محیط‌های آبی نویز محیط غیر گوسی بوده و به علت نزدیک بودن سطح و کف محیط پخش‌شدگی محیط بالاست. نویزهای آکوستیکی به سبب خاصیت محیطی غیر خطی و ایستا هستند. که این حقیقت کیفیت سیستم دسته‌بندی را تحت تاثیر قرار می‌دهد. برای دسته‌بندی نویز منتشره از اهداف دریایی از یک سیستم شناسایی اهداف دریایی استفاده می‌شود که از یک بخش استخراج ویژگی بر مبنای روش تحلیل سیگنال هیلبرت هوانگ و بخش دسته‌بندی ماشین بردار پشتیبان طراحی شده است. سپس عملکرد روش ارائه شده با استفاده از شبیه‌سازی مورد آزمایش قرار می‌گیرد. شبیه‌سازی‌ها بر روی دو گروه از سیگنال‌ها ضورت می‌گیرد. گروه اول نویز مربوط به ۳ شناور که از سیگنال‌های موجود در اینترنت استفاده شده است و گروه دوم نویز مربوط به یک دسته شنارو سبک و یک دسته شناور سنگین، که از نمونه‌های موجود در خلیج فارس استفاده شده است. نتایج دسته بندی نشان می‌دهد که روش پیشنهادی عملکرد بهتری را در مقایسه با روش مبتنی بر تبدیل موجک دارد.

Classification and Identification of Underwater Targets based on Sound Propagation

Hassan Sayyaadi[1*], Mohammad Saeed Seif[2], Aliasghar Abniki[3]

[1] Professor, Center of Excellence in Hydrodynamics and Dynamics of Marine Vehicles, School of Mechanical Engineering, Sharif University of Technology, sayyaadi@sharif.edu
[2] Professor, Center of Excellence in Hydrodynamics and Dynamics of Marine Vehicles, School of Mechanical Engineering, Sharif University of Technology, seif@sharif.edu
[3] Ph.D Student, School of Mechanical Engineering, Sharif University of Technology, aliasghar_abniki@yahoo.com

ARTICLE INFO

Article History:
Received: 8 Nov. 2016
Accepted: 23 Dec. 2017

Keywords:
SONAR
Noise
Wavelet Transform
Hilbert Huang Transform
Support Vector Machine

ABSTRACT

In this paper, an underwater targets classification system is presented using the noise released from them. This system is proposed for shallow water environments such as Persian Gulf. Acoustic noise is non-Gaussian and due to the near-surface and properties of the environment acoustic noise is nonlinear and nonstationary. This fact affects the quality of the classification system. To classify acoustic noise, a target identification system is developed using a feature extraction section based on Hilbert Huang's Transform (HHT) and Support Vector Machine (SVM). Then the performance of the proposed method is illustrated using simulation results. Simulations take on two groups of signals. The first group of noise was related to three different type of vessels, and the second group of noise was related to a number of heavy and a number of light vessels, which were used in the Persian Gulf. Classification results show that the proposed method has a better performance than the wavelet transform method.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2025-07-11]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1396.13.26.4.2]

۱ - مقدمه

سونار[1] تکنیکی است که با استفاده از سیگنال‌های صوتی جهت رهیابی، آشکارسازی و مخابرات به کار می‌رود. دو روش اصلی سونار وجود دارد[۱]:

۱. سونار فعال
۲. سونار غیرفعال

در یک سیستم سونار فعال یک پالس کوتاه مدت از طریق محیط به سوی هدف ارسال می‌شود و انعکاس این سیگنال از هدف که توسط یک هیدروفون[2] ثبت می‌شود برای شناسایی نوع هدف به کار می‌رود. از سوی دیگر، در سونار غیرفعال از یک هیدروفون جهت ثبت سیگنال‌های تولید شده توسط یک منبع تولید صوت در محیط استفاده می‌کنند. شکل ۱ نحوه‌ی عملکرد کلی سونار فعال و غیرفعال را نمایش می‌دهد. تفاوت این دو روش را می‌توان در شکل به طور واضح مشاهده کرد. شکل سمت چپ سونار فعال را نمایش می‌دهد که از یک فرستنده و یک گیرنده تشکیل می‌شود، شکل سمت راست سونار غیرفعال را نمایش می‌دهد که از یک گیرنده برای ثبت صدای تولید شده توسط اهداف به کار می‌رود. سونار غیر فعال در محیط‌های آبی کم عمق، نسبت به سونار فعال کارایی بهتری دارد. از سوی دیگر استفاده از سونار فعال منجر به شناسایی فرستنده و در نهایت شناسایی سیستم شناسایی می‌شود. بنابراین در سیستم‌های سناسایی شناورهای دریایی سونار غیرفعال بیشتر مورد توجه قرار می‌گیرد.

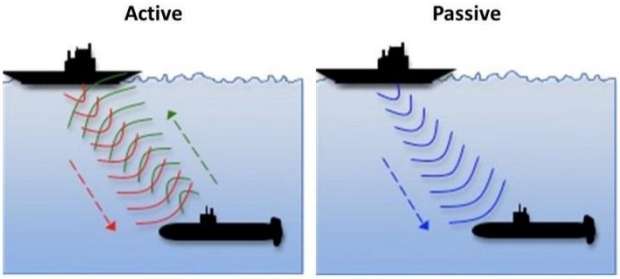
هدف این مقاله ارائه یک سیستم دسته‌بندی کننده اهداف دریایی است. به طور کلی سیستم‌های دسته‌بندی اهداف دریایی از سه بخش اصلی تشکیل می‌شوند. ابتدا سیگنال نویز ساطع شده از شناور به وسیله‌ی یک هیدروفون ضبط می‌شود. صدای ضبط شده به خودی خود نمی‌تواند به عنوان ورودی سیستم دسته‌بند مورد استفاده قرار گیرد، بنابراین در این میان از یک سیستم اسخراج ویژگی استفاده می‌شود. سیستم استخراج ویژگی صدای ضبط شده را دریافت کرده و یک بردار ویژگی را در اختیار سیستم دسته‌بند قرار می‌دهد. سیستم دسته‌بند نیز بر اساس بردار ویژگی دریافتی تعیین می‌کند که شناور به کدام دسته نزدیکتر است. در این مقاله هدف ارائه یک سیستم دسته‌بندی کننده برای محیط‌های آبی کم عمق است.

۱-۲ مشخصات سیگنال نویز ساطع شده از شناور

نویز ساطع شده از کشتی‌ها و اهداف زیر آب را می‌توان به دو دسته‌ی متفاوت تقسیم کرد. یک دسته نویزهای پهن‌باند است که دارای طیف پیوسته هستند دسته‌ی دیگر نویزهای صوتی باند باریک هستند که طیف گسسته دارند[۱].

نویز های هیدرودینامیکی (آبی) همچون برخورد آب به بدنه‌ی کشتی، حباب های هوا و کاواک‌زایی (حباب های خلا که در اثر چرخش پروانه‌ی کشتی در آب ایجاد می‌شوند) پیوسته هستند. اگر چه نمایش طیف نویزهای مکانیکی، همچون نویز ناشی از صدای موتور و پروانه در فرکانس‌های گسسته اتفاق می‌افتد[۱].

تمامی شواهد حاکی از این است که نویز زیر آب ناشی از عبور شناورهای سطحی از فاصله‌ی دور، تولید کننده‌ی نویز فرکانس پایین در فرکانس‌های ۲۰ هرتز تا صدها هرتز هستند. این نویز می‌تواند ناشی از عبور شناورها حتی تا فاصله‌ی ۱۰۰۰ کیلومتر باشد، حتی اگر عبور شناور، نویز با فرکانس بالا تولید کند، عبور نویز در آب طی چند کیلومتر مولفه های فرکانس بالا را از بین می‌برد و تنها صدای مربوط به مولفه های فرکانس پایین باقی می‌ماند. صدای ناشی از عبور شناورها در فاصله‌ی نزدیک طیف فرکانسی متفاوتی در مقایسه با طیف فرکانسی صدای ناشی از عبور شناورها در فاصله‌ی دور خواهد داشت[۲].



شکل ۱: نمایش سونار فعال (چپ) و سونار (غیرفعال)[۱].

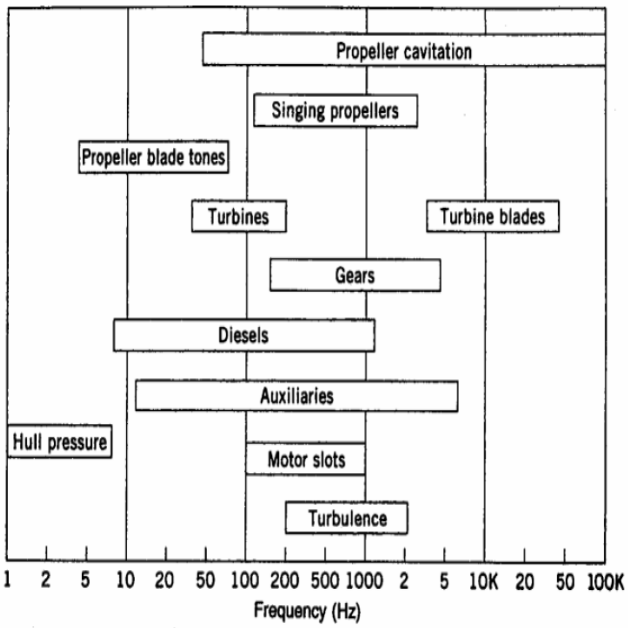
توان صوتی تولید شده توسط شناور کسر کوچکی از توان مورد استفاده برای حرکت کشتی است. به عنوان مثال یک زیردریایی مدرن که با سرعت پایین حرکت می‌کند توان صوتی از مرتبه‌ی ۱۰ میلی وات را تولید می‌کند. در حالی که توان صوتی هر شناور با توجه به وزن محموله‌ای که حمل می‌کند، می‌تواند در محدوده‌ی توانی وسیعی تغییر کند[۲].

از جمله مهم‌ترین منابع تولید صدای ناشی از شناورها را می‌توان سیستم پیشرانی شناور، پروانه‌ی شناور و نویز هیدرودینامیکی[3] در نظر گرفت. سیستم پیشرانی از زیربخش‌هایی هم‌چون پره‌های بزرگ، چرخ‌دنده، موتور پیشران، توربین ها یا قدرت الکتریکی چرخش موتور تشکیل می‌شود. هر گونه عدم تعادل در این سیستم منجر به تولید نیرویی می‌شود که از طریق زیرساخت‌ها و بدنه‌ی شناور به آب منتقل می شود. صداهای تولید شده به این صورت معمولا باند باریک هستند و معمولا در فرکانس چرخش سیستم یا هارمونیک‌های آن اتفاق می‌افتد. نویز ناشی از پروانه‌ی شناور یکی از مهمترین انواع نویز در بین نویز ناشی از شناورها است، چرا که عوامل بسیاری در یک شناور نویز تولید می‌کنند ولی نویز ناشی از پروانه‌ی شناور در نویز برآیند کلی تاثیر بیشتری دارد.[۲]. شکل ۲ بازه‌ی فرکانسی مربوط به منابع متفاوت تولید نویز در یک شناور را نشان می‌دهد مشاهده می‌کنید که نویز مربوط به پره‌های شناور یک نویز باند باریک است که در فرکانس‌های پایین رخ می‌دهد.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2025-07-11]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1396.13.26.4.2]

۲ – پیشینه‌ی تحقیق

در این قسمت پیشینه‌ای از کارهای انجام شده تا کنون برای شناسایی اهداف دریایی و روش‌های مورد استفاده در این زمینه را ارائه خواهیم داد. تبدیل فوریه کوتاه زمان[۵] از نخستین روش‌های مورد استفاده در این زمینه بوده است[۳].



شکل ۲: بازه‌ی فرکانسی مربوط به منابع مختلف تولید کننده‌ی نویز شناورها[۱].

تبدیل ویگنر ویل[۶] را می‌توان از نخستین روش‌های مورد استفاده برای تحلیل سیگنال در حوزه زمان‌فرکانس دانست[۴]. از جمله مهمترین روش‌های تحلیل سیگنال در حوزه زمان‌فرکانس می‌توان روش تبدیل موجک[۷] را نام برد [۵]. [۶] از یک روش زمان‌فرکانس بر اساس تبدیل S[۸] استفاده کرده است.

دسته‌ای از روش‌ها با الهام گرفتن از سیستم شنوایی انسان، سیگنال را در حوزه فرکانس مورد تحلیل قرار می‌دهند[۷]، [۸]، [۹]، [۱۰]. از روش‌های دیگر تحلیل سیگنال در حوزه‌ی فرکانس می‌توان روش‌های مبتنی بر تخمین طیف فرکانسی سیگنال را نام برد [۱۱]. در [۱۲] از جمله روش‌های موفق حوزه زمان‌فرکانس می‌توان روش‌های مبتنی بر تبدیل هیلبرت هوانگ[۹] را نام برد که در سال‌های گذشته مورد توجه فراوان قرار گرفته است[۱۳].

تبدیل‌های حوزه‌ی زمان‌فرکانس از جمله تبدیل موجک و تبدیل موجک بسته‌ای[۱۰] [۱۴] به عنوان روش موثری برای بررسی پدیده‌های غیر ایستا به کار می‌روند. تحلیل‌های مبتنی بر فرکانس معمولا برای کلاس‌بندی سیگنال‌های ایستا به کار می‌روند. تبدیل فوریه برای استخراج سیگنال‌های با پهنای باند باریکی که بازه‌ی زمانی آنها نسبت به پنجره‌ی تبدیل فوریه بیشتر یا برابر باشد مورد استفاده قرار می‌گیرد، برای تحلیل فوریه معمولا از تحلیل فوریه کوتاه زمان استفاده می‌شود[۵].

بدیهی است ویژگی‌هایی که در اختیار سیستم دسته‌بندی کننده قرار می‌گیرد تاثیر زیادی بر روی عملکرد دسته‌بندی خواهد داشت. روش‌های زیادی برای استخراج ویژگی از نویز تولید شده توسط اهداف، پیشنهاد شده‌اند این روش‌ها را می‌توان در سه دسته‌ی زیر جای داد

۱. روش‌های مبتنی بر حوزه‌ی زمان
۲. روش‌های مبتنی بر حوزه‌ی فرکانس
۳. روش‌های مبتنی بر حوزه‌ی زمان‌فرکانس

ترکیب ویژگی‌های استخراج شده از سیگنال حوزه‌ی زمان و ویژگی-های استخراج شده از سیگنال در حوزه‌ی فرکانس ویژگی‌های مناسب‌تری را برای تحلیل سیگنال‌های غیر ایستا در اختیار خواهد گذاشت. بدیهی است که این حوزه بیشترین توجه را به خود جلب کرده است. تا کنون روش‌های متعددی همچون تبدیل موجک و تبدیل هیلبرت هوانگ برای استخراج ویژگی پیشنهاد شده‌اند[۱۵]. روش‌هایی نیز مانند شبکه‌های عصبی[۱۱]، مدل‌های مارکف مخفی[۱۲] و ماشین بردار پشتیبان[۱۳] برای شناسایی اهداف زیر آب ارائه شده‌اند. از آن جا که سیگنال‌های آغشته به نویز زیر آب متغیر با زمان و غیر ایستا هستند بنابراین روش‌های معمول استخراج ویژگی برای کلاس-بندی آن‌ها مناسب نخواهد بود. در این میان تبدیل موجک و تبدیل هیلبرت هوانگ نشان داده‌اند که می‌توانند روش‌های زمان فرکانسی مناسب‌تری برای تحلیل سیگنال‌های غیر ایستا باشند. از دیگر سو تحقیقات نشان داده‌اند که به طور کلی ماشین بردار پشتیبان عملکرد بهتری را در در بین روش‌های کلاس‌بندی از خود نشان داده است. تحقیقات کارایی مناسب این روش را برای دسته‌بندی سیگنال‌های صوتی، نشان می‌دهد[۱۶].

۳-استخراج ویژگی با تبدیل هیلبرت هوانگ

تبدیل هیلبرت هوانگ یک روش تجربی برای تحلیل سیگنال است، که پایه‌های مورد استفاده برای بسط دادن سیگنال در این روش به صورت وفقی تعیین می‌شود. این حقیقت کمک می‌کند که این روش امکان خوبی را برای سیگنال‌های غیرخطی و غیر ایستا فراهم آورد. به دلیل وفقی بودن تحلیل پایه‌ها تحلیل ریاضی این روش کمی دشوار بوده و این روش بیشتر به صورت یک روش تجربی شناخته می‌شود.

روش‌های قدیمی تجزیه و تحلیل سیگنال همگی بر اساس ایستا بودن وخطی بودن سیگنال عمل می‌کردند. تنها در سال‌های اخیر روش-های محدودی برای تحلیل سیگنال‌های غیرخطی و غیر ایستا مطرح شده‌اند به عنوان مثال تبدیل موجک و تابع توزیع ویگنرویل برای سیگنال‌های خطی و غیر ایستا در نظر گرفته شده‌اند. همچنین

[Downloaded from marine-eng.ir on 2025-07-11]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1396.13.26.4.2]

روش‌های زمانی زیادی برای تحلیل سیگنال‌های غیرخطی و ایستا در نظر گرفته شده‌اند. متاسفانه در بسیاری از سیستم‌های واقعی (انسانی یا طبیعی) سیگنال معمولا هم غیر خطی و هم غیر ایستا است. یک شرط لازم برای نمایش سیگنال‌های غیرخطی و غیر ایستا تعیین پایه‌ها به صورت وفقی است. بنابراین یک پایه‌ی از پیش تعیین شده نمی‌تواند به عنوان یک پایه‌ی مناسب برای تحلیل این سیگنال-ها در نظر گرفته شود هرچند خیلی دقیق تعیین شده باشد. تمام روش‌های توصیف شده تاکنون برای داده‌های ایستا تعیین شده‌اند. برای داده‌های غیرخطی و غیر ایستا روش وفقی را نمی‌توان یافت.

تبدیل هیلبرت هوانگ از دو بخش تعیین می‌شود تجزیه حالت تجربی[۱۳] [۱۵]، [۱۶] و تحلیل طیف هیلبرت[۱۵] این روش برای تحلیل سیگنال‌های غیرخطی و غیر ایستا بسیار موفق بوده است، خصوصا برای نمایش سیگنال در حوزه‌ی زمان-فرکانس-انرژی در تمامی مطالعات تبدیل هیلبرت هوانگ نتایج بسیار بهتری از سایر روش‌های تحلیل سیگنال در این حوزه داشته است. این روش یک روش تجربی است و برای آشکار شدن جنبه‌های مختلف آن نیاز است که بسیاری از مسائل مربوط به این روش مورد تحلیل قرار گیرد.

انگیزه‌ی توسعه‌ی تبدیل هیلبرت هوانگ ناشی از نیاز به تحلیل سیگنال‌های تحریف شده به صورت غیر خطی، که با توجه به تغییرات این سیگنال‌ها به طور معمول به صورت غیر ایستا رخ می‌دهد. فرآیندهای فیزیکی به طور معمول غیرخطی و غیرایستا هستند که روش‌های کنونی امکانات بسیار محدودی را جهت تحلیل این سیگنال‌ها فراهم می‌کنند. همانگونه که اشاره شد روش‌های کنونی برای سیگنال‌های خطی اما غیر ایستا یا سیگنال‌های خطی اما ایستا و از لحاظ آماری معین مورد استفاده قرار می‌گیرند. برای تحلیل سیگنال‌های غیرخطی غیر ایستا و اتفاقی به روش‌های جدیدی نیاز است. روش‌های گذشته که از یک ساختار خطی برای تحلیل یک سیگنال غیرخطی استفاده می‌کرد کافی نیست و علاوه بر دوره‌ی تناوب اطلاعات دقیق‌تری از فرآیند باید تعیین شود. چرا که یکی از مشخصه‌های اصلی فرآیندهای غیرخطی فرکانس مدولاسیون موج داخلی آنهاست که تعیین کننده‌ی فرکانس لحظه‌ای سیگنال است که این فرکانس با تغییرات فرکانس مدولاسیون تغییر می‌کند.[۱۷]. نویز منتشره در آب‌های کم عمق به سبب خاصیت محیطی، غیرخطی و غیرایستا و غیرگوسی است. حال آنکه تبدیل‌های محدودی وجود دارند که در تحلیل سیگنال‌های غیرایستا عملکرد خوبی را از خود نشان می‌دهند، علاوه بر این خاصیت غیرخطی بودن نیز این تبدیل‌ها را محدودتر می‌کند. با توجه به ویژگی‌های تبدیل هیلبرت‌هوانگ می‌توان این تبدیل را مناسب‌ترین روش تحلیل موجود برای این سیگنال‌ها مورد آزمایش قرار داد که نتایج شبیه‌سازی این برتری را بر روش موجک که خود یک روش شناخته‌شده است، نشان می‌دهد.

در تبدیل هیلبرت‌هوانگ پایه‌های متعامد برای تجزیه سیگنال با روش تجزیه مد ذاتی به صورت وفقی و از روی خود سیگنال ساخته می‌شود، در صورتی که در تبدیل موجک پایه‌ها از پیش تعیین شده‌اند و مستقل از سیگنال هستند که این موضوع باعث برتری تبدیل هیلبرت‌هوانگ است علاوه بر این تبدیل هیلبرت‌هوانگ یک تبدیل غیرخطی است که این موضوع باعث می‌شود که این تبدیل از این جهت نیز بر تبدیل موجک برتری یابد چرا که تبدیل هیلبرت‌هوانگ در تحلیل سیگنال‌های غیرخطی بهتر عمل می‌کند.

همانگونه که توسط هوانگ اشاره شده است تجزیه تجربی حالت‌های سیگنال یک امر واجب برای یک سیگنال غیر ایستا و غیر خطی است در مقایسه با روش‌های موجود قبلی این روش یک روش شهودی و وفقی است که پایه بعد از تجزیه سیگنال و بر اساس سیگنال تولید می‌شود. این روش بر پایه‌ی این فرضیه استوار است که هر سیگنال از تعدادی حالت نوسانی درونی تشکیل می‌شود. هر حالت درونی (خطی و غیرخطی) یک حالت نوسانی را تشکیل می‌دهد که تعداد نقاط اکسترمم آن با تعداد دفعات عبور سیگنال از محور افقی برابر است. همچنین این حالت نوسانی نسبت به میانگین محلی در در هر بازه‌ی زمانی دلخواه متقارن خواهد بود. هر کدام از این حالت‌های نوسانی به وسیله‌ی یک تابع حالت درونی[۱۶] با ویژگی‌های زیر نمایش داده می‌شود[۱۷].

۱. تعداد نقاط اکسترمم و تعداد دفعات عبور سیگنال از محور افقی باید برابر باشد یا حداقل یک اختلاف داشته باشند.
۲. میانگین پوش تعیین شده توسط نقاط بیشینه و پوش تعیین شده توسط نقاط کمینه صفر خواهد بود.

هر تابع حالت درونی یک حالت نوسانی را نشان می‌دهد که جزیی از سیگنال اصلی است که مشخصات بیشتری را نسبت به روش‌های گذشته نشان می‌دهد.

مراحل استخراج توابع حالت درونی از سیگنال به صورت زیر است:

۱. مشخص کردن نقاط کمینه و بیشینه سیگنال.
۲. درونیابی[۱۷] کردن نقاط کمینه و بیشینه برای به دست آوردن پوش بالایی و پوش پایینی سیگنال.
۳. محاسبه میانگین نقطه به نقطه‌ی پوش بالایی و پوش پایینی.
۴. کم کردن سیگنال میانگین از سیگنال اصلی.
۵. بررسی اینکه سیگنال حاصل شرایط یک تابع حالت درونی را دارد (شرایط ۱ و ۲ در پاراگراف قبل) در صورتی که سیگنال حاصل این شرایط را دارا نباشد، مراحل ۱ تا ۵ را آنقدر تکرار نموده که این شرایط را حاصل نماید.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2025-07-11]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1396.13.26.4.2]

جدول ۱: مقایسه‌ی تبدیل هیلبرت هوانگ با تبدیل موجک و تبدیل فوریه [۱۷].

	تبدیل فوریه	تبدیل موجک	تبدیل هیلبرت‌هوانگ
نوع پایه‌ها	از پیش تعیین شده	از پیش تعیین شده	وفقی
نمایش	انرژی-فرکانس	انرژی-زمان-فرکانس	انرژی-زمان-فرکانس
غیر خطی	خیر	خیر	بله
ایستا	خیر	بله	بله

۶. زمانی که یک تابع حالت درونی حاصل شد آن را از سیگنال اصلی کم کرده و اختلاف آن‌ها را به عنوان سیگنال اصلی در نظر گرفته و دوباره همین مراحل را تکرار نموده تا توابع حالت درونی بعدی به دست آید.

عمل تجزیه تا زمانی ادامه می‌یابد که مقدار باقیمانده از یک مقدار کوچک از پیش تعیین شده کمتر شود. استخراج توابع درونی را می‌توان تا جایی ادامه داد که مقدار باقیمانده ناچیز و قابل صرف‌نظر باشد. معمولا تعداد توابع درونی به صورت انتخابی تعیین می‌شود و بسته به تجمع انرژی در توابع درونی این تعداد انتخاب می‌شود. معمولا اکثر انرژی سیگنال در چند تابع درونی اول قرار می‌گیرند و بقیه توابع درونی درصد ناچیزی از انرژی سیگنال را در خود جای می‌دهند، به همین دلیل معمولا چند تابع درونی اول برای استخراج ویژگی در نظر گرفته می‌شوند. در این جا ۱۰ تابع درونی از سیگنال استخراج شده که برای بحث استخراج ویژگی ۴ تابع درونی اول که بیشترین انرژی را در خود جای می‌دهند مورد استفاده قرار می‌گیرند. سپس تحلیل طیفی هیلبرت بر روی توابع حالت درونی اعمال می‌شود که در نتیجه توابع دامنه لحظه‌ای و فاز لحظه‌ای به صورت زیر استخراج می‌شود.

$$z(t) = IMF(t) + jH\big(IMF(t)\big) = a(t)e^{j\phi(t)} \quad (۱)$$

$$H\big(IMF(t)\big) = IMF(t) * \frac{1}{\pi t} = \frac{1}{\pi}\int_{-\infty}^{+\infty}\frac{IMF(\tau)}{t-\tau}d\tau \quad (۲)$$

$$a(t) = \Big[IMF(t)^2 + H\big(IMF(t)\big)^2\Big]^{\frac{1}{2}} \quad (۳)$$

$$\phi(t) = \tan^{-1}\frac{H\big(IMF(t)\big)}{IMF(t)} \quad (۴)$$

در رابطه (۲) * بیانگر کانولوشن است. جدول ۱ روش تبدیل هیلبرت هوانگ را با تبدیل موجک و تبدیل فوریه مقایسه می‌کند. می‌توان مشاهده نمود که این روش بر خلاف دو روش دیگر کارایی مناسب‌تری را برای سیگنال‌های غیر ایستا وغیر خطی خواهد داشت همچنین روش تبدیل موجک نیز کارایی بهتری را نسبت به تبدیل فوریه برای سیگنال‌های غیر ایستا دارد[۱۷].

استخراج توابع درونی را می‌توان تا جایی ادامه داد که مقدار باقیمانده ناچیز و قابل صرف‌نظر باشد. معمولا تعداد توابع درونی به صورت انتخابی تعیین می‌شود و بسته به تجمع انرژی در توابع درونی این تعداد انتخاب می‌شود. معمولا اکثر انرژی سیگنال در چند تابع درونی اول قرار می‌گیرند و بقیه توابع درونی درصد ناچیزی از انرژی سیگنال را در خود جای می‌دهند، به همین دلیل معمولا چند تابع درونی اول برای استخراج ویژگی در نظر گرفته می‌شوند. در این جا ۱۰ تابع درونی از سیگنال استخراج شده که برای بحث استخراج ویژگی ۴ تابع درونی اول که بیشترین انرژی را در خود جای می‌دهند مورد استفاده قرار می‌گیرند.

۴- دسته‌بندی

به طور کلی ماشین بردار پشتیبان در دسته‌بندی سیگنال صوتی عملکرد بهتری را در مقایسه با سایر روش‌های دسته‌بندی از خود نشان می‌دهد. بنابراین در این مقاله ماشین بردار پشتیبان را به عنوان دسته‌بند در سیستم شناسایی اهداف دریایی در نظر می‌گیریم. ماشین بردار پشتیبان در ابتدا توسط وپنیک[۱۸] معرفی شد [۱۸]، [۱۹]، [۲۰]. ماشین بردار پشتیبان از جمله دسته‌بندهای خطی است، اما با استفاده از روش هسته می‌توان آن را برای دسته‌بندی غیر خطی مورد استفاده قرار داد. به این صورت که به جای استفاده‌ی مستقیم آن بر روی داده‌ی ورودی، ابتدا داده‌ی ورودی به فضای هسته نگاشت شده و سپس ماشین بردار پشتیبان بر روی آن اعمال می‌گردد. برای این منظور هسته‌ی گوسی را به صورت زیر در نظر می‌گیریم

$$k(x,y) = exp(-\gamma\|x-y\|^2) \quad (۵)$$

بردار ماشین پشتیبان از یک سری داده جهت آموزش استفاده می‌کند و پس از اینکه الگوریتم تحت آموزش قرار گرفت می‌توان آن را برای دسته‌بندی مورد استفاده قرار داد. به این ترتیب N مجموعه از داده‌های $\{x_i, y_i\}$، هسته‌ی گوسی و پارامتر C را در نظر بگیرید. ماشین بردار پشتیبان در طی مراحل آموزش بهترین صفحه‌ی جدا کننده را با توجه به داده‌های $x_i \in \Re^n$ و دسته‌های $y_i \in \{-1,+1\}$ پیدا کرده و آن را برای دسته‌بندی مورد استفاده قرار می‌دهد. این عمل با یافتن α^* به صورت زیر صورت می‌گیرد.

$$\alpha^* = \underset{\alpha}{\operatorname{argmax}}\, W(\alpha) \quad (۶)$$

[Downloaded from marine-eng.ir on 2025-07-11]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1396.13.26.4.2]

که

$$W(\alpha) = \sum_{i=1}^{N} \alpha_i - \frac{1}{2}\sum_{i=1}^{N}\sum_{j=1}^{N} \alpha_i \alpha_j y_i y_j k(x_i, x_j) \qquad (۷)$$

تحت شرایط $\sum_{i=1}^{N} \alpha_i y_i = 0$ و $0 < \alpha_i < C,\ \forall i$. خروجی ماشین بردار پشتیبان را می‌توان به صورت زیر در نظر گرفت.

$$S(x) = \sum_{i=1}^{N} \alpha_i^* y_i k(x_i, x) + b \qquad (۸)$$

که $S(x) > 0$ نشان می‌دهد که x به دسته‌ی $+1$ تعلق دارد.

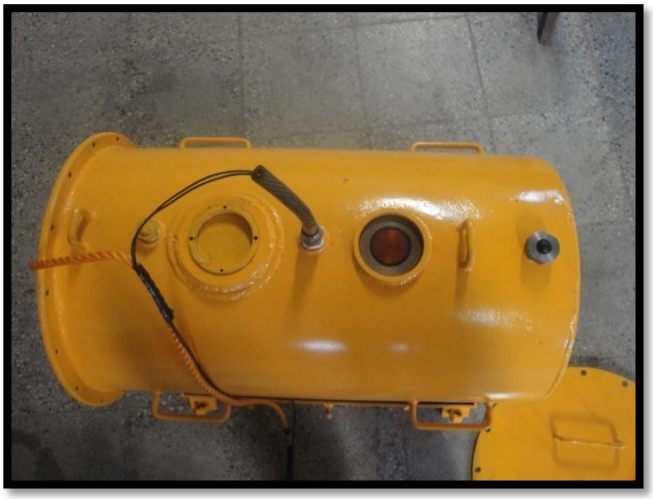
۵-تشکیل بانک داده

الگوریتم‌های شناسایی، مبتنی بر یک پایگاه داده شامل اصوات تعداد وسیعی از ادوات مختلف می‌باشند. با توجه به رویکرد نظامی، واضح به نظر می‌رسد که امکان دستیابی به مجموعه مناسبی از اصوات شناورها، زیردریایی‌ها و اژدرها میسر نمی‌باشد. به همین منظور ایجاد یک پایگاه داده مناسب ضروری می‌باشد. به همین دلیل نخست مجموعه درهمی از اصوات مختلف از اینترنت استخراج شده است. این اصوات اغلب مربوط به نیروی دریایی آمریکا می‌باشد. از این اصوات برای آموزش نیروی انسانی متخصص و به منظور ایجاد قابلیت تفکیک اهداف با گوش کردن به صوت دریافتی از آن‌ها استفاده می‌شود. این اصوات شامل صداهای مختلی بوده که تعدادی از آن‌ها مناسب و تعدادی غیرمفید می‌باشند[۲۱].

سپس زمان زیادی برای گوش کردن به هر یک از این اصوات، جدا کردن قسمت‌های مناسب و استخراج ویژگی مربوط به آن صدا صرف شده است. در این مرحله سرعت حرکت جسم ارسال‌کننده صوت، عمق آن (برای زیردریایی‌ها) و فاصله جسم از هیدروفون به عنوان مشخصه آن صوت ثبت شده‌اند. این مجموعه شامل صدای زیردریایی، شناور، مین‌روب، کشتی باری، ناوشکن، جانداران دریایی و غیره می‌باشد. این پایگاه داده، یک پایگاه داده به نسبت غنی است که تهیه آن را می‌توان یک گام بسیار مثبت دانست به نحوی که شامل بیش از ۲۰ نوع از اصوات ادوات و جانداران دریایی می‌باشد. مدت زمان این اصوات از چند ثانیه تا چند دقیقه متفاوت است[۲۱].

سه دسته از این اصوات با عنوان کلاس A[۱۹]، B[۲۰]، C[۲۱] در این مقاله استفاده شده است. از سیگنال‌های استخراج ویژگی صورت گرفته است و سپس ویژگی‌های استخراج شده برای دسته بندی سه شناور A، B و C استفاده شده است. از هر شناور ۵ نمونه سیگنال نویز در نظر گرفته شده است که یک سیگنال برای آموزش و ۴ سیگنال برای تست در نظر گرفته شده‌اند. انرژی به هنجار شده‌ی دامنه لحظه‌ای به دست آمده از ۴ مد ذاتی ابتدایی به عنوان ویژگی استفاده شده‌اند. در شبیه‌سازی‌ها از روش ماشین بردار پشتیبان برای دسته بندی استفاده شده است.

در این قسمت روش تهیه بانک داده واقعی در خلیج فارس و روش اندازه‌گیری نویز تشعشعی از شناورهای مدنظر دارای طول بدنه ، آبخور و سرعت متفاوت بیان می‌گردد. جهت اندازه گیری از هیدروفون استاندارد ۸۱۰۴ استفاده گردید. کالیبراسیون هیدروفون مطابق با استاندارد IEC60565 انجام گرفت. در این اندازه‌گیری با استفاده کابل و طناب، سیستم هیدروفون به وسیله بویه چسبیده به کف بسته می‌شود و هیدروفون استاندارد ۸۱۰۴ شرکت B&K (شکل۴) (V/µpa ۲۰۵-) با پاسخ فرکانسی تخت (با ریپل کمتر از ۲ دسی‌بل) در بازه ۱ تا۱۰۰ کیلو هرتز مورد استفاده قرار می‌گیرد(شکل۶) و نتایج در فرکانس نمونه‌برداری ۲۴۰ کیلوهرتز انجام می‌گردد. همه داده‌های آکوستیکی توسط هیدروفون کالیبره شده تحت استاندارد ثبت می‌شوند و همه اندازه‌گیری‌ها از یک سمت شناورها در مانوری موسوم به منحنی ولیلیامسون انجام می گیرد(شکل۸). هیدروفون و دستگاه داده برداری(شکل۵) بوسیله کپسول داده برداری(شکل۳) که قابلیت تحمل فشار استاتیک تا ۱۰ بار در زیر آب را دارا می باشد، درکف دریا قرارداده می‌شود. عبور هر شناور با سرعت و شرایط اپراتوری ثابت و در مسیری مشخص انجام می‌گردد. برطبق اصول استاندارد اندازه‌گیری، در زمان تست تمام شرایط عملیاتی باید ثابت باشند. داده‌ها به صورت دسی‌بل نسبت به فشار مرجع (یک میکروپاسکال) بیان می‌شوند. عبور هر شناور با سرعت مشخص می باشد.



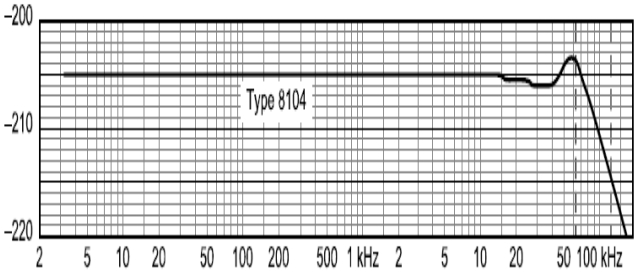
شکل ۳: کپسول داده برداری

[Downloaded from marine-eng.ir on 2025-07-11]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1396.13.26.4.2]

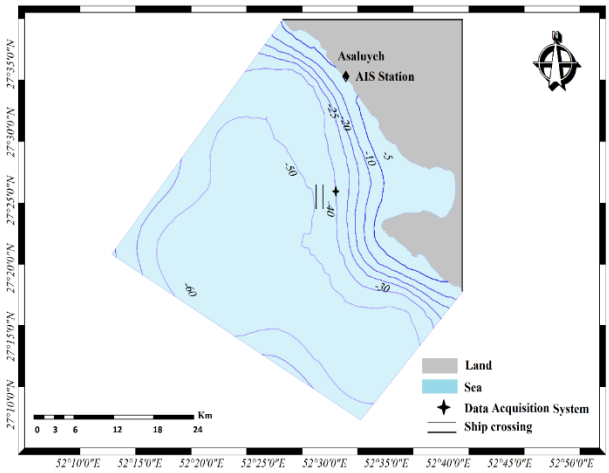
شکل ۴: هیدروفون ۸۱۰۴.

شکل ۵: دستگاه داده برداری LAN-XI شرکت B&K.

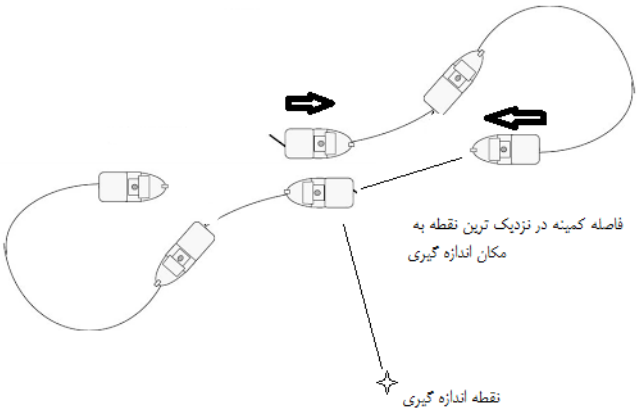


شکل ۶: مشخصات هیدوفون استاندارد B&K ۸۱۰۴.

زمان داده برداری ۵ دقیقه بوده و اندازه گیری ها در قسمت غرب خلیج فارس و در شمال غربی جزیره خارک انجام پذیرفته است. (شکل۷)



شکل ۷: نقشه موقعیت قرارگیری سامانه داده‌برداری و مسیر عبور کشتی‌ها.



شکل ۸: نحوه مانور شناورها بر اساس منحنی ویلیامسون.

۶-نتایج دسته‌بندی

در این قسمت نتایج دسته‌بندی بررسی می‌شود. برای آزمایش روش معرفی شده، این روش را در دو مرحله با داده‌های اینترنتی و داده‌های واقعی مورد آزمایش قرار می‌گیرد. که ابتدا آزمایش مربوط به داده‌های اینترنتی و سپس آزمایش مربوط به داده‌های واقعی شرح داده می‌شود.

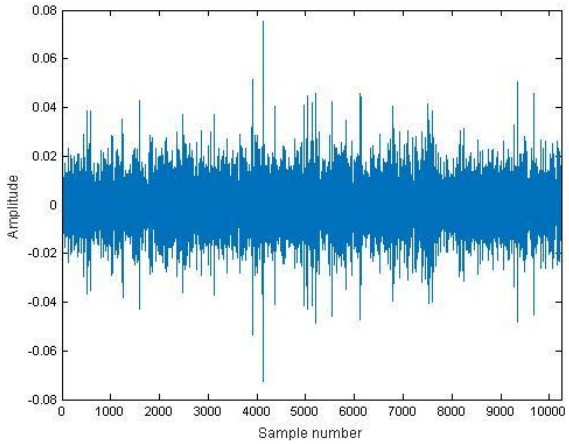
در آزمایش مربوط به داده‌های اینترنتی ابتدا صدای ضبط شده دریافت می‌شود و با فرکانس نمونه برداری ۸۰۰۰ هرتز از آن نمونه برداری می‌کند سپس این سیگنال‌ها برای استفاده در تبدیل هیلبرت هوانگ برای استخراج ویژگی مورد استفاده قرار می‌گیرند. بردار ویژگی متشکل از انرژی نرمالیزه شده‌ی توابع دامنه‌ی لحظه‌ای است که به طور کلی انرژی ۴ تابع دامنه لحظه‌ای نخستین به عنوان بردار ویژگی انتخاب می‌شود. در اینجا دو روش برای استخراج ویژگی استفاده می‌شود. یک روش با استفاده از تبدیل هیلبرت هوانگ و روش دیگر با استفاده از تبدیل موجک (تبدیل موجک با استفاده از فیلتر دوبیشس ۵ و عمق درخت ۳) در نهایت انرژی سیگنال حاصل در باندهای فرکانسی مختلف به عنوان ویژگی استفاده می‌شود. از بین

[Downloaded from marine-eng.ir on 2025-07-11]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1396.13.26.4.2]

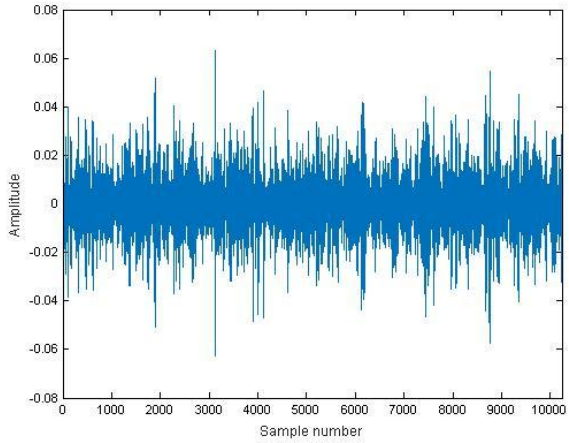
موجک‌های مولد متفاوت، انواع مختلف استفاده شده است و بهترین عملکرد در نظر گرفته شده‌است. علاوه بر این هر چه سطح تجزیه موجک افزایش یابد دقت و پیچیدگی بیشتر می‌شود که با توجه به این موضوع و نتیجه نهایی این مقدار از طریق شبیه‌سازی انتخاب شده‌است.

در این گزارش برای دسته‌بندی از دو روش استخراج ویژگی بر مبنای روش تبدیل موجک و روش تبدیل هیلبرت هوانگ استفاده می‌شود. نتایج شبیه‌سازی برتری استفاده از تبدیل هیلبرت هوانگ را بر تبدیل موجک نشان می‌دهد همانگونه که قبلا ذکر شد این تبدیل توانایی بیشتری در بررسی سیگنال‌های غیر خطی و غیر ایستا دارد.

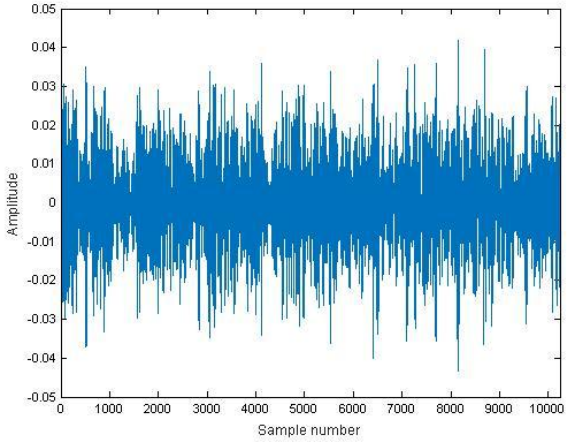
شکل ۹ نمایش حوزه زمان یک سیگنال نمونه را نشان می‌دهد که توابع حالت درونی آن را می‌توان در شکل‌های بعدی ملاحظه کرد. شکل ۱۰ تا شکل ۱۵ توابع حالت درونی استخراج شده از روی سیگنال نمونه از شناور دریایی را نشان می‌دهد که به صورت تصادفی انتخاب شده است. همانگونه که ملاحظه می‌شود تعداد نقاط اکسترمم و مقدار آن‌ها به تدریج کاهش می‌یابد به گونه‌ای که توابع حالت درونی به سمت صفر میل خواهند کرد.



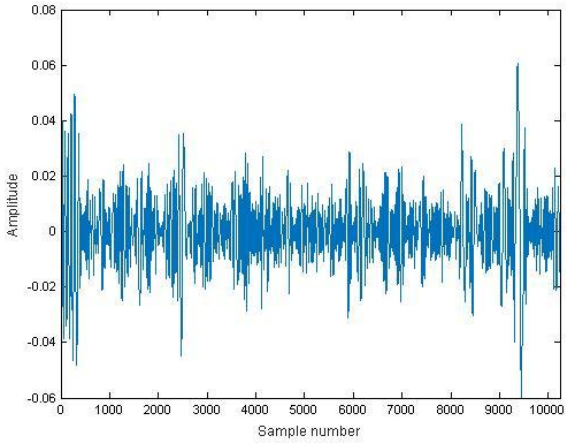
شکل ۹: نمایش یک سیگنال نمونه از شناور.



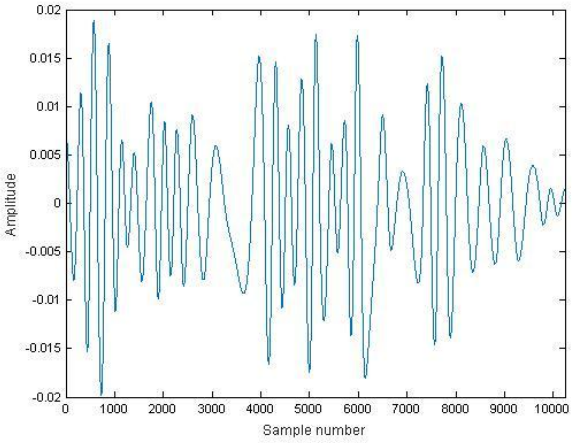
شکل ۱۰: اولین تابع حالت درونی استخراج شده از روی سیگنال نمونه.



شکل ۱۱: دومین تابع حالت درونی استخراج شده از روی سیگنال نمونه.



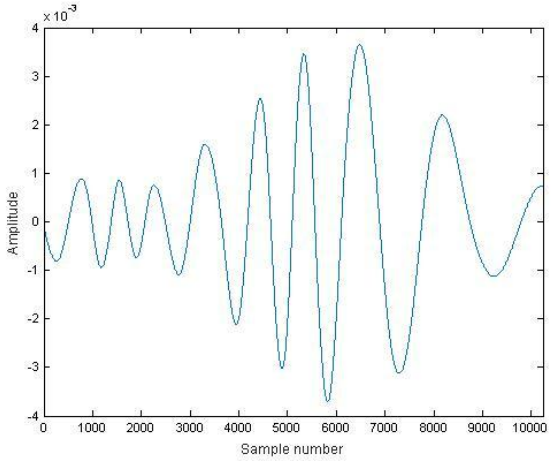
شکل ۱۲: چهارمین تابع حالت درونی استخراج شده از روی سیگنال نمونه.



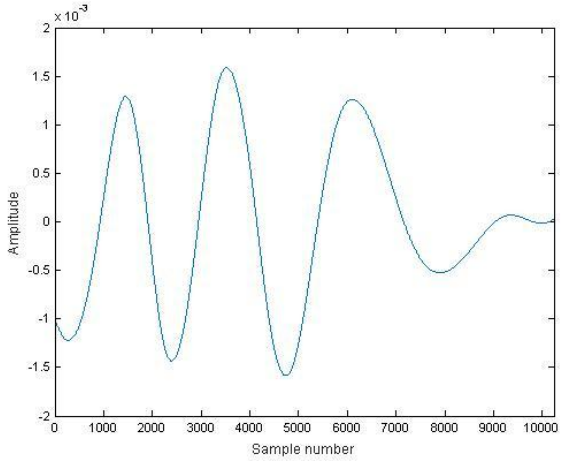
شکل ۱۳: هفتمین تابع حالت درونی استخراج شده از روی سیگنال نمونه.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2025-07-11]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1396.13.26.4.2]

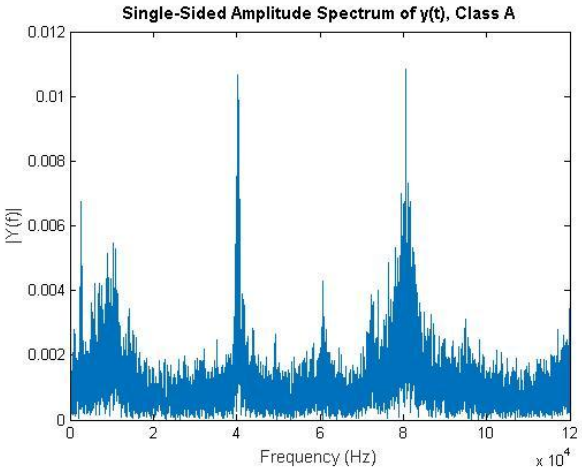


شکل ۱۴: نهمین تابع حالت درونی استخراج شده از روی سیگنال نمونه.

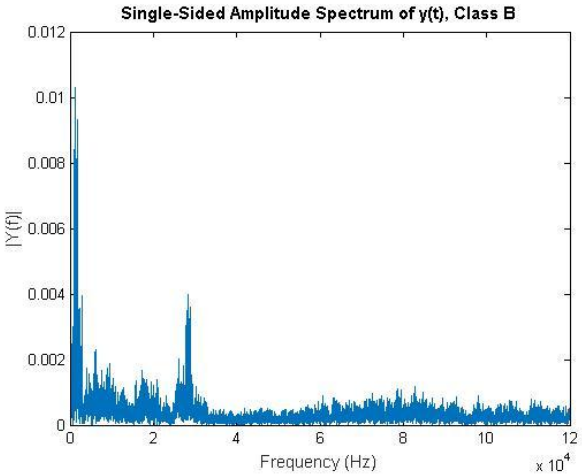


شکل ۱۵: دهمین تابع حالت درونی استخراج شده از روی سیگنال نمونه.

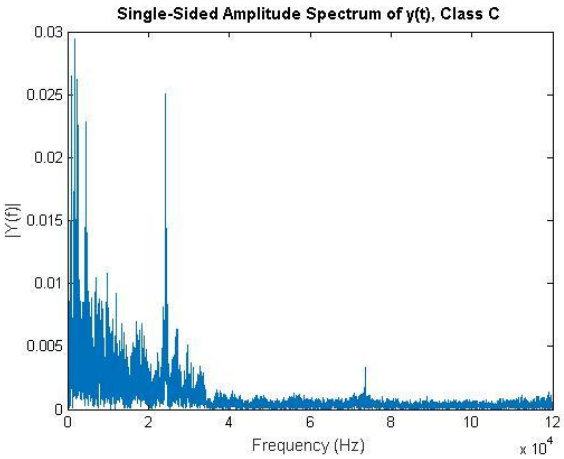
شکل‌های ۱۶ تا ۱۸ پریودوگرام سیگنال نویز شناورهای مختلف را نمایش می‌دهد. با مقایسه پریودوگرام سیگنال‌ها می‌توان تفاوت آن‌ها را ملاحظه نمود. با مقایسه پریودوگرام سیگنال‌ها می‌توان فرکانس‌هایی که بیشترین انرژی متمرکز شده‌اند را برای هر سیگنال تشخیص داد. همانگونه که ملاحظه می‌شود بین پریودوگرام دو سیگنال A و C یک تشابه نسبی وجود دارد. بیشترین انرژی هر دو سیگنال در فرکانس‌های ۱-۱۰۰۰۰ هرتز متمرکز شده‌اند و تمرکز انرژی برای هر دو سیگنال در فرکانس‌های مشابهی صورت گرفته است. در صورتی که پریودوگرام سیگنال B کاملا متمایز از دو سیکنال دیگر است. بنابراین انتظار می‌رود که الگوریتم در شناسایی سیگنال B عملکرد بهتری در مقایسه با دو سیگنال دیگر داشته باشد.



شکل ۱۶: پریودوگرام مربوط به نویز شناور A.



شکل ۱۷: پریودوگرام مربوط به نویز شناور B.



شکل ۱۸: پریودوگرام مربوط به نویز شناور C.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2025-07-11]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1396.13.26.4.2]

جدول ۲: درصد دسته بندی صحیح با استفاده از تبدیل هیلبرت هوانگ و تبدیل موجک.

	تبدیل موجک	تبدیل هیلبرت هوانگ
شناور A	۵۰	۶۲,۵
شناور B	۱۰۰	۱۰۰
شناور C	۲۵	۶۲,۵

جدول ۲ درصد دسته بندی صحیح با استفاده از تبدیل هیلبرت هوانگ و تبدیل موجک نمایش می‌دهد. همانگونه که ملاحظه می‌شود تبدیل هیلبرت هوانگ عملکرد بهتری را در مقایسه با تبدیل موجک نشان می‌دهد.

در این قسمت آزمایش مربوط به داده‌های واقعی شرح داده می‌شود. برای دسته‌بندی از دو دسته سیگنال نویز شناورهای دریایی استفاده می‌شود. یک دسته مربوط به شناورهای سبک و یک دسته مربوط به شناورهای سنگین. در هر دسته ۳۰ سیگنال در اختیار است که از ۲۵ سیگنال جهت آموزش الگوریتم و از ۵ سیگنال برای آزمایش الگوریتم استفاده می‌شود. فرکانس نمونه‌برداری ۲۴۰ کیلوهرتز و طول سیگنال‌ها ۶ ثانیه در نظر گرفته‌شده است. پس از تبدیل هیلبرت‌هوانگ، انرژی به هنجار شده بدست آمده از توابع دامنه لحظه‌ای به عنوان بردار ویژگی انتخاب می‌شود. از آنجایی که انرژی به هنجار شده توابع درونی با افزایش شماره تابع درونی به تدریج کاهش می‌یابد، بیشتر انرژی در توابع درونی اولیه متمرکز می‌شود بنابراین معمولا انرژی دامنه لحظه‌ای توابع درونی اولیه به عنوان بردار ویژگی انتخاب می‌شود.

جدول ۳: درصد دسته بندی صحیح با استفاده از تبدیل هیلبرت هوانگ و تبدیل موجک بر اساس داده واقعی.

	تبدیل موجک	تبدیل هیلبرت هوانگ
شناور متوسط	۶۰	۶۰
شناور سبک	۸۰	۱۰۰

جدول ۳ درصد دسته بندی صحیح با استفاده از تبدیل هیلبرت هوانگ و تبدیل موجک را بر اساس داده‌های نمونه برداری شده در خلیج فارس نمایش می‌دهد. همانگونه که ملاحظه می‌کنید تبدیل هیلبرت هوانگ عملکرد بهتری را در مقایسه با تبدیل موجک نشان می‌دهد.

۶ – نتیجه گیری

در این مقاله یک سیستم شناسایی اهداف دریایی برای دسته‌بندی نویز منتشره از شناورها در محیط‌های آبی کم‌عمق همچون خلیج فارس معرفی شد. از آنجا که در محیط‌های آبی کم‌عمق نویز محیط غیرگوسی بوده و سیگنال غیرخطی و ایستاست، بنابراین برای طراحی دسته‌بند استفاده از روش‌های معمول به صرفه نخواهد بود. در این مقاله برای طراحی استخراج ویژگی از تبدیل هیلبرت‌هوانگ استفاده شد. این روش یک تبدیل غیرخطی است که پایه‌های متعامد آن به صورت وفقی از سیگنال به دست می‌آید. این امر موجب می‌شود که این تحلیل برای بررسی سیگنال‌های غیرخطی مورد توجه بیشتری قرار گیرد. بردار ویژگی با استفاده از انرژی توابع دامنه لحظه‌ای تعیین می‌شود. انرژی بهینه شده چند تابع لحظه‌ای ابتدایی به عنوان بردار ویژگی در نظر گرفته شد. برای بررسی عملکرد روش پیشنهادی، این روش در آزمایش با روش موجک مقایسه شد. در آزمایش اول سیگنال‌های مربوط به ۳ شناور دریایی A، B و C استفاده شد که پریودوگرام شناورهای A و C شباهت نسبی داشتند. ملاحظه شد که روش هیلبرت‌هوانگ عملکرد بهتری را در مقایسه با تبدیل موجک دارد و به طور کلی شناور B با درصد موفقیت بالاتری نسبت به دو شناور دیگر دسته‌بندی شد.

در آزمایش دیگر از سیگنال‌های واقعی نمونه‌برداری شده در خلیج فارس استفاده شد. این سیگنال‌ها از یک دسته سیگنال مربوط به شناورهای سبک و یک دسته سیگنال شناورهای سنگین تسکیل شده‌اند. نتایج شبیه‌ساری نشان داد که تبدیل هیلبرت‌هوانگ درصد دسته‌بندی بالاتری را در مقایسه با تبدیل موجک نتیجه می‌دهد. بنابراین با برتری تبدیل هیلبرت هوانگ در تحلیل سیگنال‌های غیر خطی و غیرایستا این روش برای تحلیل نویز محیط‌های آبی کم‌عمق پیشنهاد می‌شود. علاوه بر این، آزمایش اول نشان می‌دهد که این روش در دسته‌بندی سیگنال‌های نویز معمول نیز در مقایسه با تبدیل موجک کارایی بالاتری دارد.

کلید واژگان

1- SONAR(Sound Navigation and Ranging)
2- Hydrophone
3- Hydrodynamic
4- Cavitation
5- Short Time Fourier Transform(STFT)
6- Vigner-Wille Transform
7- Wavelet Transform
8- S-Transform
9- Hilbert Huang Transform
10-Wavelet Packet Transform
11- Neural Networks
12- Hidden Markov Models
13- Support Vector Machine
14- Experimental Mode Decomposition
15- Hilbert Spectral Analysis
16- Intrinsic Mode Function
17- Interpolation
18- Vapnik
19- American fleet type submarine (S-20)
20- American fleet type submarine (USS Bluegill)
21- Small (Old) Submarine (High Speed)

[Downloaded from marine-eng.ir on 2025-07-11]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1396.13.26.4.2]

۷ – مراجع

1- Suwal, P. S., (2012), *Passive acoustic vessel localization*, MA thesis, Department of Electrical and Computer Eng. Portland state Univ.

2- Bjørnø, L., (1989), *Sources of Low-Frequency Sound in the Sea*, Underwater Acoustic Data Processing, Springer Netherlands, pp. 25-37.

3- Goo, G. and Au, W. W. L., (1996), *Detection and identification of buried objects in shallow water*, in Proc. SPIE Inter. Symp. Aerospace/Defense Sensing Contr., vol. 2765, Orlando, FL, Apr, pp. 201–214.

4- Boashash B. and O'Shea, P., (1990), *A methodology for detection and classification of some underwater acoustic signals using time-frequency analysis techniques*, acoustics, Speech and Signal Processing, IEEE Transactions on , vol.38, no.11, pp.1829-1841.

5- Learned, R. E. and Willsky, Alan S., (1995), *A wavelet packet approach to transient signal classification.* Applied and Computational Harmonic Analysis, vol. 2, no. 3, pp. 265-278.

6- Guo-jun, Zh. Pan-pan, W., Peng, W., (2010), *Feature extraction of underwater target based on the time-frequency analysis*, Signal Processing Systems (ICSPS), 2010 2nd International Conference on, vol.3, pp. V3-208-V3-211,

7- Wu, Y., Yang, Y., Tao, C., Li, P., Yang, L., (2014), *A study on underwater target recognition applying auditory slow feature analysis*, OCEANS 2014 - TAIPEI, pp.1-5. 8- Lim, T., Bae, K., Hwang, Ch., Lee, H., (2007), *Classification of underwater transient signals using MFCC feature vector*, Signal Processing and Its Applications, 2007. ISSPA 2007. 9th International Symposium on, pp.1-4.

9- He, F., Wang, X., Zhou, G., (2013), *Feature extraction of shaft-rate electric field in the far field, Microwave*, Antenna, Propagation and EMC Technologies for Wireless Communications (MAPE), 2013 IEEE 5th International Symposium on, pp.189-192.

10- Wu, Y., Yang, Y., Tian, F., Yang, L., (2013), *Robust target feature extraction based on modified cochlear filter analysis model*, Signal Processing, Communication and Computing (ICSPCC), 2013 IEEE International Conference on, pp.1-5.

11- Kang, Ch., et al. (2004), *Underwater acoustic targets classification using welch spectrum estimation and neural networks*, Advances in Neural Networks–ISNN 2004. Springer Berlin Heidelberg, pp. 930-935.

12- Yang, L., (2009), *A empirical mode decomposition approach to feature extraction of ship-radiated noise*, Industrial Electronics and Applications, ICIEA 2009. 4th IEEE Conference on, pp. 3682-3686.

13- Wang, Sh., and Zeng, X., (2014), *Robust underwater noise targets classification using auditory inspired time–frequency analysis*, Applied Acoustics, vol. 78, pp. 68-76.

14- Jian, L., Zhong, L., and Ying, X., (2010), *Underwater target recognition based on WPT and SVM*, *2010 International Conference On Computer and Communication Technologies in Agriculture Engineering (CCTAE)*, vol. 1.

15- Yang, L., (2009), *A empirical mode decomposition approach to feature extraction of ship-radiated noise*, Industrial Electronics and Applications, 2009. ICIEA 2009. 4th IEEE Conference on, pp. 3682-3686.

16- Bao, F., et al. (2010), *Ship classification using nonlinear features of radiated sound: An approach based on empirical mode decomposition*, The Journal of the Acoustical Society of America, vol. 128, no. 1, pp. 206-214.

17- Huang, Norden Eh, and Shen, Samuel S, (2005), *Hilbert-Huang transform and its applications*. Vol. 5. World Scientific.

18- Vapnik, Vladimir, (2013), *The nature of statistical learning theory*, Springer Science and Business Media.

19- Vapnik, Vladimir N., (1998), *Statistical learning theory*, New York: Wiley.

20- Vladimir, Vapnik, (2006), *Estimation of dependences based on empirical data*, Springer Science & Business Media.

21- San Francisco Maritime National Park Association, (2017), "*Historic naval sound and video*", Available from: https://maritime.org/sound/index.htm.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2025-07-11]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1396.13.26.4.2]