

تأثیر محیط انتشار بر انتخاب شکل موج و بهینه سازی آن در سونار چند پرتویی به منظور بهبود عملکرد تصویربرداری

آرش استوار^{۱*}، محمدحسین مدنی^{۲*}

۱- دانشجوی دکتری، ۲- استاد، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران، ایران

(دریافت: ۱۴۰۳/۰۹/۰۶، بازنگری: ۱۴۰۳/۱۰/۲۹، پذیرش: ۱۴۰۳/۱۱/۱۵، انتشار: ۱۴۰۳/۱۲/۰۳)

چکیده

این مقاله به بررسی عملکرد تصویربرداری سونار چند پرتویی در محیط آکوستیک زیرآب با استفاده از یک رویکرد مبتنی بر مدولاسیون تقسیم فرکانسی متعامد پهن باند و شکل دهی پالس گوسی می پردازد. در رویکرد پیشنهادی، پارامترهای کلیدی شکل موج شامل فاصله زیر حامل ها، مدت زمان سمبل و ضریب پالس گوسی توسط الگوریتم بهینه سازی ازدحام ذرات تنظیم می شوند تا نسبت توان قله به متوسط حداقل گردد و در عین حال کیفیت تصویربرداری حفظ شود. شکل دهی گوسی نیز برای کاهش نشتی طیفی و بهبود ویژگی های طیفی سیگنال به کار گرفته شده است. نتایج شبیه سازی نشان می دهد که شکل موج بهینه شده به مقدار نسبت توان قله به متوسط برابر با ۳/۰۱- دسی بل دست یافته است که بیانگر کاهش ۹۴/۵٪ نسبت به مقدار اولیه ۰/۱۶- دسی بل است. همچنین مقادیر نسبت لوب کناری یکپارچه و نسبت لوب کناری پیک به ترتیب به ۴/۳۴- دسی بل و ۵/۹۶- دسی بل بهبود یافته اند. از نظر کارایی محاسباتی، الگوریتم ازدحام ذرات با سرعت همگرایی حدود ۱۵ برابر بیشتر و زمان پردازش ۰/۱۳ ثانیه (در مقایسه با ۵/۸۱ ثانیه برای الگوریتم ژنتیک) عملکرد بهتری ارائه می دهد. این یافته ها نشان می دهد که چارچوب بهینه سازی پیشنهادی می تواند به عنوان رویکردی مؤثر برای بهبود کارایی توان و ارتقای کیفیت سیگنال در کاربردهای تصویربرداری و نقشه برداری سونار چند پرتویی مورد استفاده قرار گیرد.

کلیدواژه ها: سونار چند پرتویی، مدولاسیون تقسیم فرکانسی متعامد پهن باند، آکوستیک زیرآب، الگوریتم ازدحام ذرات.

Effect of the Propagation Environment on the Waveform Selection and its Optimization in Multibeam Sonar to Improve the Signal Imaging Performance

A. Ostovar^{1*}, M. H. Madani^{2*}

Malek Ashtar University of Technology, Tehran, Iran

(Received: ۲۰۲۳/۰۹/۰۶, Revised: ۲۰۲۳/۱۰/۲۹, Accepted: ۲۰۲۳/۱۱/۱۵, Published: ۲۰۲۳/۱۲/۰۳)

Abstract

This paper investigates the performance of multibeam sonar imaging in underwater acoustic environment using an approach based on wideband orthogonal frequency division modulation (W-OFDM) and Gaussian pulse shaping. In the proposed approach, key waveform parameters including subcarrier spacing, symbol duration, and Gaussian pulse coefficient are tuned by a particle swarm optimization (PSO) algorithm to minimize the peak-to-average power ratio (PAPR) while maintaining the imaging quality. Gaussian shaping is also employed to reduce spectral leakage and improve the spectral characteristics of the signal. Simulation results show that the optimized waveform achieves a PAPR of -۳۰.۱ dB, which represents a ۹۴.۵% reduction compared to the initial value of -۰.۱۶ dB. In addition, the integrated sidelobe ratio and peak sidelobe ratio values are improved to ۴.۳۴ dB and ۵.۹۶ dB, respectively. In terms of computational efficiency, the PSO performs better with about ۱۵ times faster convergence speed and ۰.۱۳ seconds processing time (compared to ۵.۸۱ seconds for the genetic algorithm). These findings indicate that the proposed optimization framework can be used as an effective approach to improve power efficiency and signal quality in multibeam sonar imaging and mapping applications.

Keywords: Multibeam Sonar, W-OFDM, Underwater Acoustic, Particle Swarm Optimization.

*Corresponding Author E-mail: madani@mut.ac.ir

۱. مقدمه

سامانه‌های سونار چند پرتویی به‌عنوان فناوری کلیدی در تصویربرداری و نقشه‌برداری زیرآبی، با ارسال هم‌زمان پرتوهای متعدد، پوشش وسیع‌تر و وضوح بالاتری نسبت به سونارهای تک‌پرتو ارائه می‌دهند. این قابلیت، کاربردهای گسترده‌ای در اکتشافات دریایی، ناوبری، و شناسایی بستر دریا فراهم می‌سازد [۱-۳].

با این حال، محیط انتشار آکوستیک زیرآب به دلیل وجود عواملی همچون تغییرات دما، شوری، فشار، پدیده‌های چندمسیره، تضعیف وابسته به فرکانس و نویز محیطی، چالش‌های عمده‌ای در کیفیت سیگنال‌های سونار ایجاد می‌کند [۴-۶]. این شرایط متغیر و پیچیده، منجر به اعوجاج سیگنال، کاهش نسبت سیگنال به نویز^۱ و درنهایت افت دقت تصویربرداری می‌شود. از این‌رو، انتخاب و بهینه‌سازی شکل موج ارسالی به‌عنوان عاملی تعیین‌کننده در کارایی سامانه‌های سونار چند پرتویی مطرح است. در این راستا، شکل موج‌های مرسوم مانند موج پیوسته^۲، مدولاسیون فرکانس خطی^۳، غیرخطی^۴ و کاستاس^۵ مورد استفاده قرار گرفته‌اند [۷-۹].

اگرچه مدولاسیون فرکانس خطی قدرت تفکیک دربردارنده را افزایش می‌دهد، اما به اعوجاج‌های چندمسیره حساس است [۱۰]. در مقابل، مدولاسیون فرکانس غیرخطی اگرچه لوب‌های جانبی را کاهش می‌دهد، نیازمند پردازش پیچیده‌تر و انرژی بیشتری است [۱۱، ۱۲].

مدولاسیون تقسیم فرکانسی متعامد^۶ در سال‌های اخیر به دلیل توانایی ذاتی در مقابله با چندمسیری شدید و بهره‌وری بالا، به‌عنوان کاندیدای اصلی در طراحی شکل موج‌های پیشرفته سونار مطرح شده است [۱۳-۱۵]. با این حال، چالش اصلی مدولاسیون تقسیم فرکانسی متعامد در کاربردهای سونار، نسبت توان قله به متوسط^۷ بالا و سازگاری محدود با شرایط متغیر محیطی است.

در ادبیات علمی موجود، پژوهش‌های متعددی به بهبود عملکرد سامانه‌های مخابراتی زیرآب با الگوریتم‌های پیشرفته و موج پرداخته‌اند. در حالی که تحقیقات انجام‌شده تاکنون نشان می‌دهد، هیچ پژوهش پیشینی به طراحی شکل موج به‌ویژه مدولاسیون تقسیم فرکانسی متعامد پهن باند با بهینه‌سازی ازدحام ذرات در سونار چند پرتویی نپرداخته است که این تحقیقات انجام‌شده تاکنون در زیر خلاصه‌شده‌اند:

طراحی شکل موج پهن باند با وضوح بالا برای سونار با تمرکز بر استفاده از مدولاسیون چند پارامتری انجام شده است و هدف اصلی آن، بهبود وضوح تصویربرداری سونار از طریق تنظیم هم‌زمان چندین پارامتر موج بوده است [۱۳]. اگرچه این کار به

طراحی موج با عملکرد بهتر می‌پردازد، اما تمرکز آن بر بهینه‌سازی پویا مبتنی بر بازخورد محیطی یا کاهش هم‌زمان توان قله به متوسط به‌صورت سامانمند نیست. در گزارشی دیگر [۱۶] به طراحی مدولاسیون تقسیم فرکانسی متعامد برای کانال‌های زیرآبی فراصوتی اندازه‌گیری شده می‌پردازد. نویسندگان با در نظر گرفتن ویژگی‌های کانال، راه‌حلی برای بهبود عملکرد مدولاسیون تقسیم فرکانسی متعامد در محیط زیرآب ارائه داده‌اند. این مطالعه نشان می‌دهد که مدولاسیون تقسیم فرکانسی متعامد می‌تواند برای ارتباطات زیرآبی مناسب باشد، اما چالش توان قله به متوسط بالا و سازگاری پویا با محیط متغیر به‌طور کامل مورد توجه قرار نگرفته است. نویسندگان در [۱۷] به مسئله تخمین کانال در ارتباطات آکوستیک زیرآب با برد بلند پرداخته‌اند که روش‌های نوینی برای بهبود دقت و پایداری کانال در شرایط سخت زیرآبی ارائه می‌دهد. این گزارش نشان می‌دهد تحقیقاتی در زمینه بهبود عملکرد مدولاسیون تقسیم فرکانسی متعامد در تخمین کانال‌های زیرآبی انجام شده است. در [۱۸] از الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات برای تخصیص توان بهینه و مدولاسیون تقسیم فرکانسی متعامد در ارتباطات آکوستیک زیرآبی استفاده می‌کند و هدف آن بهبود بهره‌وری انرژی یا نرخ داده است. این کار نشان‌دهنده قابلیت الگوریتم ازدحام ذرات در بهینه‌سازی پارامترهای مدولاسیون تقسیم فرکانسی متعامد است، اما تمرکز آن بر تصویربرداری سونار و معیارهای (توان قله به متوسط، نسبت لوب کناری یکپارچه^۸، و نسبت لوب کناری پیک^۹) نیست. یک طرح مدولاسیون تقسیم فرکانسی متعامد پهن باند بهینه و تطبیقی را برای تصویربرداری با وضوح بالا در سونار چند پرتویی معرفی شده که از آماره مرتبه بالاتر در الگوریتم تشکیل تصویر استفاده می‌کند [۱۹]. این گزارش نزدیک به موضوع مقاله حاضر است و نشان می‌دهد مدولاسیون پیشنهادی می‌تواند برای سونار امیدوارکننده باشد. در سطح پردازش گیرنده و تشکیل تصویر انجام می‌شود. در مقابل، تمرکز پژوهش حاضر بر طراحی و بهینه‌سازی شکل موج در سطح فرستنده و کاهش نسبت توان قله به متوسط با استفاده از یک سیستم محیطی است. در گزارشی دیگری [۲۰]، نقشه‌برداری مبتنی بر سونار چند پرتویی ارائه داده که برای بهبود دقت از فیلتر کالمن استفاده می‌کند. نتایج آزمایش‌های عملی این مقاله نشان می‌دهد که این روش خطای مطلق مسیر و خطای میانگین را کاهش می‌دهد. نقشه‌برداری زیرآبی و بهینه‌سازی مبتنی بر سونارهای چند پرتویی صورت گرفته و تمرکز اصلی بر الگوریتم‌های پردازش داده‌های نقشه‌برداری یا بهینه‌سازی هندسی بوده و تمرکز بر بهینه‌سازی شکل موج ارسالی در سطح سیگنال نداشته است [۲۱]. یک چارچوب کارآمد برای

^۸ Integrated Sidelobe Ratio (ISLR)^۹ Peak Sidelobe Ratio (PSLR)^۱ Signal-to-Noise Ratio (SNR)^۲ Continuous Wave (CW)^۳ Linear Frequency Modulation (LFM)^۴ Non-Linear Frequency Modulation (NLFM)^۵ COSTAS^۶ Orthogonal Frequency-Division Multiplexing (OFDM)^۷ Peak-to-Average Power Ratio (PAPR)

پهن باند پیشنهادی شامل شکل‌دهی پالس گوسی بهینه‌شده است که سیگنال‌هایی با محدودیت زمانی تولید می‌کند. این ویژگی به‌صورت ذاتی نشت طیفی و تداخل بین سمبل‌ها را کاهش می‌دهد که در نتایج به‌دست‌آمده، کاهش چشمگیر نسبت توان قله به توان متوسط مشاهده شده است. درواقع اصلی‌ترین مزیت این مقاله نسبت به گزارش قبلی (۱۹۱)، بهینه‌سازی از پردازش سیگنال در گیرنده به مرحله طراحی شکل موج در فرستنده است که منجر به کاهش ذاتی نسبت توان قله به متوسط تا ۳/۰۱- دسی‌بل بدون نیاز به الگوریتم‌های پیچیده بازایی تصویر می‌شود. علی‌رغم اشتراک در مدل پایه مدولاسیون تقسیم فرکانسی متعامد، این مقاله در مقابل گزارش قبلی (۱۹۱) از نظر رویکرد و سطح پردازش کاملاً مستقل و مکمل یکدیگر هستند. در این مقاله تحلیل‌های گسترده و مقایسه‌ای ارائه شده که عملکرد مدولاسیون تقسیم فرکانسی متعامد پهن باند بهینه‌شده را در مقایسه با سایر شکل موج‌ها (مدولاسیون فرکانس خطی، غیرخطی، موج پیوسته، کاستاس) و الگوریتم‌های بهینه‌سازی (الگوریتم ژنتیک و تکامل تفاضلی) در شاخص‌های کلیدی شامل نسبت توان قله به توان متوسط، نسبت لوب جانبی پیک، نسبت لوب جانبی یکپارچه و زمان محاسباتی نشان می‌دهد. نتایج نشان می‌دهند که الگوریتم ازدحام ذرات با سرعت همگرایی ۱۵ برابر سریع‌تر از الگوریتم ژنتیک و عملکرد بهتر عمل کرده است.

۲. روش تحقیق و مدل پیشنهادی

۲-۱. پیکربندی سونار چند پرتویی

سونارهای چند پرتویی شامل پیکربندی‌های فرستنده و گیرنده می‌شوند که در آن پرتوهای ارسالی در جهت عمود بر مسیر حرکت^۱ پهن و در جهت هم‌راستا با مسیر حرکت^۲ باریک به نظر می‌رسند. در مقابل، پرتوهای دریافتی در جهت هم‌راستا با مسیر حرکت^۳ پهن و در جهت عمود بر مسیر حرکت، به باریکی می‌رسند. تلاقی این پرتوها یک مجموعه از نقاط پوشش کوچک^۴ را تشکیل می‌دهد که اندازه آن‌ها توانایی سامانه در دستیابی به‌وضوح را تعیین می‌نماید. در این بخش، هندسه سونار و همچنین تأثیرات محیطی معرفی می‌شوند. اندازه این نقاط پوششی حیاتی است و مستقیماً وضوح سیستم را مشخص می‌نماید (شکل ۱).

پارامترهای اساسی وضوح در سامانه‌های سونار چند پرتویی توسط روابط هندسی میان الگوهای پرتو و موقعیت هدف، قابل تعیین هستند. وضوح در راستای مسیر حرکت^۵ در امتداد مسیر Δx به‌صورت زیر تعریف می‌شود [۱۴]:

بهبود عملکرد سامانه‌های ارتباطی زیرآب بر اساس پیش‌متعاد سازی و کاهش نسبت توان قله به متوسط ارائه شده است [۲۲]. در این روش، کاهش نسبت توان قله به متوسط، پیک مدولاسیون تقسیم فرکانسی متعامد آکوستیکی را قبل از انتقال از طریق هیدروفون کاهش می‌دهد تا از اعوجاج غیرخطی جلوگیری شود.

در این مقاله، یک روش برای ادغام مدولاسیون تقسیم فرکانسی متعامد پهن باند با شکل‌دهی پالس گوسی ارائه می‌شود که این سیستم، پارامترهای انتقال را به‌صورت پویا تنظیم می‌نماید و با تمرکز بر بهینه‌سازی شکل موج در سطح فرستنده باهدف دستیابی به کاهش نسبت توان قله به متوسط در تصویربرداری سونار، انتخاب می‌شود. رویکرد این مقاله در تلفیق مدولاسیون تقسیم فرکانسی متعامد پهن باند با الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات برای کاربردهای سونار چند پرتویی زیرآب است که شامل شکل‌دهی پالس گوسی و طراحی زیر حامل‌ها است. برخلاف روش‌های مرسوم که بر فن‌های بازایی پراکنده متمرکز هستند، روش ارائه‌شده در این مقاله، پارامترهای موج را مستقیماً بر اساس ویژگی‌های کانال زیرآب و شاخص‌های کیفیت تصویربرداری بهینه می‌کند. شکل موج پیشنهادی، علاوه بر رفع مشکلات مسدودسازی فرکانسی، توزیع انرژی بین زیر حامل‌ها را نیز بهبود می‌بخشد. با بهره‌گیری از شکل‌دهی پالس گوسی و طراحی زیر پالس‌ها بافاصله فرکانسی Δf ، این شکل موج برای بهینه‌سازی وضوح، کاهش نسبت توان قله به متوسط و بهبود معیارهای تصویرسازی بهینه‌سازی شده است. روش ارائه‌شده از طریق شبیه‌سازی‌های مختلف بررسی شده و نشان‌دهنده بهبود قابل توجه در کارایی سیگنال برای مصارف نقشه‌برداری و تصویربرداری است که مدولاسیون تقسیم فرکانسی متعامد پهن باند را به گزینه‌ای مناسب برای سونارها تبدیل می‌کند. معیارهایی از قبیل عملکرد تصویربرداری، نسبت توان قله به متوسط و زمان محاسباتی پردازنده موردبررسی قرار گرفته و نتایج با الگوریتم‌های مرجع ژنتیک و تکامل تفاضلی مقایسه شده‌اند. دستاوردهای اصلی این مقاله به‌صورت زیر در چهار محور آمده است:

در این مقاله مدولاسیون تقسیم فرکانسی متعامد پهن باند، شکل‌دهی پالس گوسی و الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات برای سونار چند پرتویی ترکیب شده است. این چارچوب پارامترهای موج را به‌صورت پویا بر مبنای شرایط محیط (سرعت، تضعیف، و بازتابش) به‌منظور کاهش توان قله به متوسط برای بهبود کیفیت تصویربرداری تنظیم می‌کند. نتایج این مقاله نشان می‌دهد که با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات، نسبت توان قله به متوسط به میزان ۹۴/۵٪ کاهش یافته (از ۰/۱۶ دسی‌بل به ۳/۰۱- دسی‌بل) است. مدل سیگنال مدولاسیون تقسیم فرکانسی متعامد

^۱ Across Track

^۲ Along Track

^۳ Along Track

^۴ Footprints

^۵ Along Track Resolution

۲-۲. تضعیف سیگنال صوتی

تضعیف سیگنال صوتی در محیط زیرآب، ناشی از چندین مکانیسم از جمله تضعیف انتشار هندسی^۱، جذب انرژی و اتلاف انرژی ناشی از تعاملات با سطح و بستر دریا دانست. اثر ترکیبی این مکانیسم‌ها، بیانگر میزان کلی تضعیف سیگنال است که به‌صورت تابعی از برد و فرکانس تعیین می‌شود. کل تلفات انتقال و جذب^۲ بر حسب دسی‌بل (dB) در فاصله R را می‌توان به‌صورت زیر بیان کرد [۲۵، ۲۶]:

$$L(R, \alpha) = k \cdot 10 \log R + \alpha R \quad (۶)$$

که k ضریب تضعیف انتشار هندسی است (به‌طور معمول $1/5$ برای شرایط ترکیبی استوانه‌ای/کره‌ای) و α ضریب جذب^۳ به حساب می‌آید که تحت تأثیر پارامترهای محیطی واقع می‌شود.

۲-۳. مدل پیشنهادی مدولاسیون تقسیم فرکانسی متعامد پهن باند

در این قسمت، مدل نوآورانه مدولاسیون تقسیم فرکانسی متعامد پهن باند بهینه‌شده با الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات، به نحو صحیحی پیشنهاد می‌شود. چنین چارچوبی برای بهینه‌سازی مداوم پارامترهای موج بر مبنای بازخورد محیطی در زمان واقعی، طراحی شده است و بدین ترتیب، اعوجاج‌هایی که بیان شد را کاهش می‌دهد. چارچوب پیشنهادی تصویربرداری سونار که در این مقاله تعریف شده است پارامترهای موج را به‌صورت مستمر و بر مبنای بازخورد محیطی و شاخص‌های عملکرد تصویربرداری، بهینه‌سازی می‌کند. شاخص‌های کلیدی این عملکرد را می‌توان شامل یک نسبت توان قله به متوسط، نسبت لوب جانبی پیک و همین‌طور نسبت لوب جانبی یکپارچه در نظر گرفت که به‌صورت مداوم محاسبه و به بهینه‌سازی الگوریتم ازدحام ذرات بازخورد می‌دهد و این امکان را فراهم می‌نماید تا سامانه‌ای با ویژگی‌های موج در زمان واقعی متغیر با شرایط محیطی خاص در اختیار باشد. در این مقاله، یک موج مدولاسیون تقسیم فرکانسی متعامد پهن باند با شکل‌دهی پالسی گوسی پیشنهاد شده و با الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات، بهینه‌سازی می‌شود. در مدولاسیون تقسیم فرکانسی متعامد، یک سیگنال دیجیتال پایه با استفاده از N حامل فرعی تولید می‌گردد و در این مقاله یک سیگنال مدولاسیون تقسیم فرکانسی متعامد ارسالی با N حامل فرعی و پهنای باند B به‌صورت زیر مدنظر قرار گرفته می‌شود [۱۲]:

$$s(t) = \sum_{k=0}^{N-1} a(k)X(k) \exp(j2\pi k \Delta f t), \quad 0 \leq t \leq T \quad (۷)$$

که $X(k) \in C$ نماد یا سمبل مدولاسیون k امین حامل فرعی است. سیگنال مدولاسیون متعامد تقسیم فرکانسی توسط بردار a

با ضرایب $\{a(k)\}_{k=1}^N$ کدگذاری می‌شود. ضریب k ام مربوط به فعال شدن زیر باند k است که $a(k) \in \{0, 1\}$ و $a(k) = 0$ به معنی خاموش شدن زیر باند k است. طبق یک قانون توالی مدولاسیون تقسیم فرکانسی متعامد با یک صفر گذاری^۴ بسط داده‌شده که باعث انتشار در طی چند مسیر می‌شود و مسیر دقیق آن به‌طور معمول به‌عنوان یک روش مؤثر برای کاهش انتشار چندمسیره به‌کاربرده می‌شود که روی سامانه‌های مدولاسیون تقسیم فرکانسی متعامد تأثیر می‌گذارد. در معادله (۷)، T بیانگر طول سیگنال مدولاسیون تقسیم فرکانسی متعامد است و Δf فاصله حامل فرعی است. تعامد حامل فرعی نیازمند اجتناب از تداخل بین حامل‌های فرعی مدولاسیون تقسیم فرکانسی متعامد است که نیازمند ساختار دامنه فرکانسی خاص در هر حامل فرعی در ترکیب با فاصله گذاری حامل فرعی منتخب و ویژه است و در آن $\Delta f = 1/T$ است. با این فرض نرخ نمونه‌برداری سیگنال مدولاسیون تقسیم فرکانسی متعامد برابر با $T_s = T/N = 1/B$ بوده و سیگنال مدولاسیون تقسیم فرکانسی متعامد با استفاده از تبدیل فوریه معکوس، پیاده‌سازی می‌شود. به‌عنوان یک‌راه حل ساده، پیشنهاد می‌شود که از $a(k)$ به‌صورت زیر استفاده شود:

$$a(k) = \begin{cases} e^{j\theta(k)}, & \theta(k) \in [0, 2\pi) \\ 0, & \text{در غیر صورت این} \end{cases} \quad (۸)$$

که یعنی $a(k) = e^{j\theta(k)}$ به جای $a(k) = 1$ برای مقدار غیر تهی $a(k)$ به کار می‌رود. مدولاسیون تقسیم فرکانسی متعامد، داده‌ها را به‌صورت هم‌زمان به چند فضا با فرکانس حامل انتقال می‌دهد و از تبدیل فوریه استفاده می‌نماید. برای اهداف واقع در نواحی غیرهم‌پوشان در تصویربرداری زیرآب، خطاهای دامنه ناشی از حرکت‌های انتقالی مشاهده می‌شود که این خطاها، عملکرد سیستم تصویربرداری مبتنی بر مدولاسیون تقسیم فرکانسی متعامد را کاهش می‌دهد. با استفاده از فرکانس حامل f_c ، سیگنال مدولاسیون تقسیم فرکانسی انتقال داده‌شده با صفر گذاری اضافه‌شده و به همین صورت فرمول‌بندی می‌شود و به شکل زیر دنبال می‌گردد [۱۹]:

$$s_{tr}(t) = s(t) \exp(j2\pi f_c t) = \sum_{k=0}^{N-1} a(k)X(k) \exp[j2\pi(f_c + k\Delta f)t], \quad 0 \leq t \leq T + T_{zp} \quad (۹)$$

که T_{zp} طول صفر گذاری است و در پی آن، قدرت تفکیک دربردار متناظر برای سیگنال مدولاسیون تقسیم فرکانسی متعامد را می‌توان با $\Delta R = \frac{c}{2N\Delta f}$ [۵] به دست آورد. مدل شکل موج مدولاسیون تقسیم فرکانسی متعامد پهن باند شامل مجموعه‌ای از زیر حامل‌های متعامد است که به‌صورت هم‌زمان و در فواصل

^۱ Geometric Spreading Losses^۲ Transmission and Absorption Losses^۳ Absorption Coefficient^۴ Zero Padding

$$\text{PAPR. (dB)} = 10 \log_{10} \frac{\max_t \{|s_{tr}(t)|^2\}}{\frac{1}{T} \int_0^T |s_{tr}(t)|^2 dt} \quad (13)$$

کمینه کردن نسبت توان قله به متوسط را می توان یکی از اهداف اصلی بهینه سازی دانست، زیرا به صورت مستقیم بر کارایی تقویت کننده توان و همین طور عملکرد کلی سیستم در استقرارهای عملی، اثر می گذارد. روش های ساده تری مثل تغییر ضرایب $a(k)$ در معادله (۸) می تواند نسبت توان قله به متوسط را کاهش دهد. این تغییرات می توانند عملکرد سیستم را ارتقا ببخشند و نویز و تداخل آن را با کاهش روبرو کند. معیارهای انتخاب شده به طور مستقیم باهدف بهینه سازی شکل موج در سطح انتقال با تمرکز بر کاهش هم زمان نسبت توان قله به متوسط و بهبود تصویربرداری در حوزه سیگنال مرتبط هستند. نسبت توان قله به متوسط معیاری کلیدی برای کارایی توان در فرستنده است. نسبت لوب کناری یکپارچه و نسبت لوب کناری پیک معیارهای مستقیم و پذیرفته شده برای سنجش کیفیت شکل موج هستند که به طور مستقیم بر قدرت تفکیک در تصویربرداری سونار تأثیر می گذارند.

۴-۲. بهینه سازی سیگنال از طریق بهینه سازی ازدحام ذرات

در الگوریتم بهینه سازی ازدحام ذرات، هر ذره نمایانگر یک نقطه در فضای چندبعدی است که به منظور یافتن راه حل بهینه، اطلاعات خود را با سایر ذرات به اشتراک می گذارد. هر ذره بهترین موقعیت فردی خود و نیز بهترین موقعیت کل جمعیت را موردبررسی قرار می دهد. این الگوریتم با به روزرسانی متوالی موقعیت و سرعت ذرات، حرکت آن ها را به سمت بهترین راه حل های ممکن هدایت می کند. مقداردهی اولیه برای جمعیت ذرات، شامل تعیین هر موقعیت ذره ($P \in \mathbb{R}^{N \times d}$) و سرعت ($V \in \mathbb{R}^{N \times d}$) است و بهترین موقعیت آن (P_{best}) و تابع هدف است. تابع هدف برای این کاربرد به صورت زیر فرمول بندی می شود [۱۹]:

$$f(P) = \frac{1}{d} \sum_{j=1}^d (x_j - P_j)^2 \quad (14)$$

که d بیانگر ابعاد مسئله بهینه سازی بوده و x_j متناظر با سیگنال مدولاسیون تقسیم فرکانسی پهن باند است. اندازه اولیه ذرات از یک توزیع یکنواخت پیوسته در محدوده $[0, 1]$ (به صورت $P \sim U(0, 1)$) و سرعت اولیه صفر $[V = 0]$ در نظر گرفته شده است. بهترین ذره و یافته های مربوط به بهترین تابع، به ترتیب به این صورت مقیاس سنجی می شود: $P_{best} = P$ و $G_{best} = P_1$ و $[f_G = \infty]$. سرعت به روز شده برای هر ذره بر اساس وزن لختی و ضرایب شتاب فردی و شتاب اجتماعی تعیین می گردد. این در حالی است که موقعیت ذرات متناسب با آن اصلاح می شود و سرعت جدید هر ذره با استفاده از وزن لختی و

فرکانسی مشخص ارسال می شوند [۲۷]. این رویکرد امکان بهره برداری مؤثرتر از پهنای باند موجود را فراهم کرده و بستر مناسبی برای طراحی سیگنال های مدولاسیون تقسیم فرکانسی متعامد پهن باند ایجاد می کند. در مدل پیشنهادی، افزایش کنترل شده فاصله میان زیر حامل ها منجر به بهبود عملکرد سیستم به ویژه از منظر کاهش تداخل می گردد. سیگنال مدولاسیون تقسیم فرکانسی متعامد پهن باند پیشنهادی را می توان به صورت زیر تعریف نمود [۱۹]:

$$s_{tr}(t) = \sum_{n=0}^{N-1} \sum_{k=-1}^{N-1} a(k) X(k) \left(\exp[j2\pi(f_c + k\Delta f)t] \cdot g\left(\exp\left[-\frac{(t-kT)^2}{2T_s^2}\right]\right) \right), \quad (10)$$

$$0 \leq t \leq T + T_{zp}$$

که در اینجا $g(\cdot)$ بیانگر تابع شکل گیری پالس گوسی ساده سازی شده و $T_s = 1/B$ برابر با پارامتر پهنای پالس در ساختار سیگنال پهن باند است. مزیت بنیادی روش مدل پیشنهادی مدولاسیون تقسیم فرکانسی متعامد پهن باند، تکیه بر مفهوم شکل گیری پالس گوسی بهینه سازی شده دارد. تابع $g(\cdot)$ بیانگر سیگنال های انتقال داده شده است که به صورت معمول زمان محدود بوده و مشخصه های دیگر را نیز می تواند پوشش دهد و به همین ترتیب به صورت مؤثر تأثیرات ناشی طیفی را به حداقل رسانده و با کاهش واسطه های درون سمبلی همراه می باشند. این رویکرد به صورت مستقیم، بیانگر کاهش نسبت سیگنال قله به متوسط است که در آن کیفیت سیگنال تا حد فراوانی حفظ می شود. علاوه بر این، پارامترهای موجود به نحوی عمل می کنند که مؤلفه های شکل گیری پالس را کنترل کرده و شامل پهنای پالس و هموارسازی پوش می شود و انحراف متغیرهای بهینه سازی را برای الگوریتم بهینه سازی ازدحام ذرات، به درستی تنظیم می نماید. به همین ترتیب این امکان فراهم می شود تا شکل موج، به صورت دینامیک یا پویا بتواند ویژگی های زمانی فرکانسی خود را تنظیم نموده تا عملکرد بهینه ای در شرایط انتشار محیطی خاص که در استقرارهای واقعی زیرآبی، مشاهده می شود را ارائه نماید.

معیارهای عملکرد: کیفیت تصویربرداری به طور معمول با چند معیار قابل سنجش است از جمله این معیارها می توان به نسبت پیک به حلقه اصلی، نسبت انرژی حلقه اصلی، نسبت توان قله به متوسط و وضوح آن بیان کرد و پارامترهای آن به صورت زیر قابل تعریف است [۲۸]:

$$\text{PSLR. (dB)} = 20 \log_{10} \frac{\max_t \{|s_{tr}(t)|^2\}}{\sum_t |s_{tr}(t)|^2} \quad (11)$$

$$\text{ISLR. (dB)} = 10 \log_{10} \frac{\sum_t |s_{tr}(t)|^2}{\sum_t |s_{tr}(t)|^4} \quad (12)$$

آخرین معیار را می توان نسبت توان قله به متوسط دانست که به سبب محدودیت های تقویت کننده توان می تواند به حداقل مقدار خود برسد [۲۹].

کناری یکپارچه و نسبت لوب کناری پیک مستقیماً در روابط (۲۰) - (۱۸) محاسبه می‌شوند که اثرات پارامترهای محیطی (تغییر سرعت صوت، عمق، نویز و تضعیف) را در خود لحاظ کرده‌اند. هدف این الگوریتم یافتن بردار پارامتر بهینه P^* است که مقدار تابع هدف $f(P)$ را کمینه کند و در نتیجه، شکل موجی با کمترین نسبت توان قله به متوسط تولید نماید.

پارامترهای تنظیم و تحلیل همگرایی: عملکرد و کارایی الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات به‌شدت به انتخاب دقیق و تنظیم مناسب ابر پارامترها وابسته است. بر اساس تحلیل‌های جامع، می‌توان مجموعه‌ای از تنظیمات بهینه را برای دستیابی به عملکردی منحصربه‌فرد شناسایی کرد. پارامترهای کلیدی در این الگوریتم شامل وزن لختی یا اینرسی w ، اندازه‌ی جمعیت یا اندازه‌ی ازدحام N ، ضرایب شتاب (c_1, c_2) ، حداکثر سرعت (V_{max}) ، حداکثر تعداد تکرار T_{max} و معیار همگرایی هستند. اندازه‌ی ذرات برابر ۵۰ در نظر گرفته‌شده است تا میان تعادل محاسباتی و کارایی بهینه برقرار شود. انتخاب این مقدار موجب کاهش خطر همگرایی زود هنگام در جمعیت‌های کوچک‌تر می‌شود. وزن لختی میزان تأثیر سرعت قبلی ذرات بر حرکت فعلی آن‌ها را تعیین می‌کند. در حالتی که $w = 0$ باشد، سرعت ذرات تنها به بهترین موقعیت گروه وابسته است؛ درحالی‌که برای مقادیر $w > 0$ ، سهم ممان ذره نیز در محاسبات لحاظ می‌شود. مقدار بزرگ‌تر w موجب افزایش سرعت جست‌وجو و گسترش فضای اکتشاف می‌شود، درحالی‌که مقدار کوچک‌تر آن باعث تمرکز بیشتر بر بهینه‌سازی محلی خواهد شد. ضرایب شتاب c_1 و c_2 نقش مهمی در هدایت ذرات به سمت بهترین موقعیت فردی و جمعی ایفا می‌کنند. مقادیر پایین‌تر ضرایب شتاب، تأثیر یادگیری فردی و اجتماعی را کاهش داده و امکان جست‌وجوی گسترده‌تر در فضای پاسخ را فراهم می‌آورد. در مقابل، مقادیر بالاتر این ضرایب، همگرایی سریع‌تر به سمت نواحی امیدوارکننده را تقویت می‌کنند. اگر $c_1 = c_2 = 0$ باشد، سرعت ذرات ثابت باقی می‌ماند و الگوریتم بدون راهنمایی مؤثر ادامه می‌یابد. همچنین، در حالت $c_1 = 0$ ، توانایی یادگیری فردی ذرات حذف می‌شود و جست‌وجو تنها بر پایه‌ی اثرات جمعی صورت می‌گیرد؛ و در حالت $c_2 = 0$ ، تبادل اطلاعات بین ذرات از بین می‌رود که در نتیجه، احتمال دستیابی به پاسخ‌های بهینه کاهش می‌یابد [۳۰].

۳. نتایج و بحث

۳-۱. روش اعتبارسنجی و رویکرد مقایسه‌ای

برای اعتبارسنجی روش پیشنهادی و ارزیابی عملکرد آن، مجموعه‌ای از شبیه‌سازی‌های مقایسه‌ای و تحلیلی طراحی و اجرا شده است. از آنجاکه این پژوهش بر بهینه‌سازی شکل موج

ضرایب شتاب فردی و جمعی محاسبه‌شده و سپس موقعیت ذرات بر اساس این سرعت به‌روزرسانی می‌شود. به‌روزرسانی سرعت به‌صورت زیر است [۱۹]:

$$V_i(t) = w \cdot V_i(t-1) + c_1 r_1 (P_{best} - P_i(t-1)) + c_2 r_2 (G_{best} - P_i(t-1)) \quad (15)$$

که $(0,1) \sim r_1, r_2$ و وزن اینرسی کنترل تأثیر سرعت پیشین روی سرعت کنونی و c_1 و c_2 ثوابت مثبت هستند. با این موجود، این موقعیت به همین صورت زیر به‌روزرسانی می‌شود [۱۹]:

$$P_i(t) = P_i(t-1) + V_i(t) \quad (16)$$

تنظیم پارامترهای کلیدی مانند وزن لختی و ضرایب شتاب برای بهبود توانایی جست‌جوی سراسری الگوریتم بسیار حیاتی است و در نتیجه، قابلیت اطمینان بهینه‌سازی را افزایش می‌دهد. این بهبودها منجر به دستیابی به شکل موج بهینه‌ای می‌شود که از تاب‌آوری بالایی در برابر اعوجاج برخوردار است. در الگوریتم ۱، شبه کد بهینه‌ساز ازدحام ذرات آورده شده است.

الگوریتم ۱: شبه کد ازدحام ذرات.

Initialize:
 $(P \sim \mathcal{U}(\cdot, 1)^{N \times d}), (V = \cdot^{N \times d}), P_{best} = P, G_{best} = P[1, :], f_G = \infty$

fitness function

$$f(P) = \frac{1}{d} \sum_{j=1}^d (x_j - P_j)^2$$

Start repeating:

for $t = 1$ to T_{max} **do**

for each particle $i = 1$ to N **do**

$f_i = f(P_i)$

if $f_i < f(P_{best})$

$P_{best} = P_i$

if $f_i < f_G$

$G_{best} = P_i$

$f_G = f_i$

end

for each particle $i = 1$ to N **do**

update velocity:

$$[V_i(t) \leftarrow w \cdot V_i(t-1) + c_1 r_1 (P_{best} - P_i(t-1)) + c_2 r_2 (G_{best} - P_i(t-1))]$$

update position:

$$P_i(t) \leftarrow P_i(t-1) + V_i(t)$$

end

end

Return G_{best} with minimum PAPR as the best solution

تابع هدف بهینه‌سازی بر مبنای معیار عملکرد شکل موج به‌صورت زیر فرمول‌بندی می‌شود:

$$PAPR(P) = \min_{P \in X} f(P) \quad (17)$$

که P بردار پارامترهای بهینه شونده شکل موج شامل Δf ، T و ضریب پالس گوسی است و X محدوده مجاز پارامترها بهینه شونده است. مقادیر تصحیح‌شده نسبت توان قله به متوسط، نسبت لوب

مقایسه شده است. پارامترهای سیستم مورد استفاده در شبیه سازی ها در جدول (۱) خلاصه شده اند. ضریب جذب معادل $\alpha = 0.1 \text{ dB/m}$ ، سطح نویز محیطی (n) برابر با ۴۰ دسی بل، و شوری آب ۳۵ فرض شده است که بیانگر شرایط متوسط ارتباطات صوتی زیر آب است. سونار چند پرتویی به نحوی است که برای عملکرد مؤثر در اعماق ۰/۲ تا ۳۰۰ متر در کاربردهای با وضوح بالا پیکربندی شده است و همچنین قابلیت عملکرد در فواصل بیش از ۳۰۰ متر را دارد. عمق آب به عنوان یک پارامتر حیاتی برابر ۱۰۰ متر در نظر گرفته شده و به عنوان یک عامل مؤثر برای نقشه برداری و تصویربرداری از محیط زیر آب و کاهش تلفات اهمیت زیادی دارد.

جدول ۱- پارامترهای سیستم.

شماره	پارامتر	مقدار
۱	فرکانس نمونه برداری	۱۶۰ کیلوهرتز
۲	فرکانس نامی	۴۰۰ کیلوهرتز
۳	پهنای باند	۸۰ کیلوهرتز
۴	دوره پالس	۱ میلی ثانیه
۵	تعداد بیم	۱۰۲۴HDS
۶	جاروب فرکانسی	۱۰ کیلوهرتز
۷	تعداد زیر حامل ها	۱۰۲۴
۸	فاصله زیر حامل ها	۷۸/۱۲۵ هرتز
۹	قدرت تفکیک در برد	۹/۴ میلی متر
۱۰	دما	۱۰ درجه سانتی گراد

علاوه بر این در این مقاله، سرعت پلتفرم ۱۰ متر بر ثانیه، طول پلتفرم ۳/۷۵ سانتی متر، ۱۶ سمبل، طول فوریه ۵۱۲، و ۶۴ زیر حامل پایلوت فرض شده است. تجزیه و تحلیل مقایسه ای انواع مختلف شکل موج ها در محیط ارتباطات صوتی زیر آب، تفاوت های قابل توجهی را در عملکرد معیارهای ارزیابی شده نشان می دهد. پارامترهای محیطی شامل نویز محیطی، ضریب جذب، عمق آب (D)، شوری (S)، دما (T) و سرعت صوت (c) بر شاخص ها از طریق ضرایب اصلاحی خطی اعمال شده اند که رفتار سیستم آکوستیکی را مدل می کنند. بدین ترتیب شاخص های تصحیح شده به صورت زیر خواهند بود:

$$PSLR = PSLR_{-0.1S+0.05T-0.005D} \quad (18)$$

$$ISLR = ISLR_{-0.005n+0.02\alpha-0.01D} \quad (19)$$

$$PAPR = PAPR_{-0.005c+0.025\alpha-0.002D} \quad (20)$$

این روابط، وابستگی مستقیم و کمی هر سه شاخص به پارامترهای محیطی را نشان می دهد و مبنای تابع هدف الگوریتم های بهینه سازی قرار می گیرند. شکل (۲)، مقایسه جامع و گسترده از عملکرد شکل موج ها را ارائه می نماید و برتری رویکرد پیشنهادی مدولاسیون تقسیم فرکانسی متعامد پهن باند را قبل و بعد از بهینه سازی نشان می دهد. قبل از بهینه سازی شکل موج مدولاسیون تقسیم فرکانسی متعامد پهن باند را می توان

متمرکز است، استراتژی اعتبارسنجی بر سه محور اصلی استوار است: (۱) مقایسه کمی عملکرد شکل موج پیشنهادی با شکل موج های استاندارد و پر کاربرد در سونار، (۲) مقایسه کارایی الگوریتم بهینه سازی استفاده شده با سایر الگوریتم های شناخته شده، و (۳) تحلیل نتایج در برابر تغییرات پارامترهای محیطی. بنابراین، رویکرد اعتبارسنجی بر اساس موارد زیر است: نخست، شکل موج پیشنهادی با پنج شکل موج متداول (مدولاسیون فرکانس خطی، مدولاسیون فرکانس غیرخطی، موج پیوسته، کاستاس، و مدولاسیون تقسیم فرکانسی متعامد پهن باند بدون بهینه سازی) که به طور گسترده در سامانه های سونار استفاده می شوند، مقایسه شده است. این مقایسه امکان ارزیابی عملکرد نسبی روش پیشنهادی در مقابل گزینه های موجود را فراهم می آورد.

دوم، برای ارزیابی کارایی الگوریتم بهینه سازی ازدحام ذرات، عملکرد آن با دو الگوریتم بهینه ساز متداول الگوریتم ژنتیک و تکامل تفاضلی مقایسه شده است. این مقایسه هم از نظر کیفیت بهینه سازی و هم از نظر کارایی محاسباتی (زمان همگرایی) انجام گرفته است.

سوم، برای اطمینان از قابلیت تعمیم نتایج، عملکرد سیستم در شرایط مختلف محیطی ارزیابی شده است که شامل: (الف) تغییرات سرعت صوت در محدوده ۱۴۰۰ تا ۱۵۰۰ متر بر ثانیه است، (ب) اعماق مختلف از سطح تا ۵۰۰ متر که تأثیر فشار و دما را نشان می دهد، و (ج) محدوده وسیع نسبت سیگنال به نویز از ۲۰- تا ۲۰+ دسی بل که شرایط نویزی مختلف را پوشش می دهد.

چهارم، نتایج به دست آمده با اصول شناخته شده انتشار صوت در آب همخوانی دارند. بهبود نسبت توان قله به متوسط با افزایش عمق (شکل ۶) و با افزایش تضعیف صوتی که به طور طبیعی انرژی لوب های جانبی را کاهش می دهد، سازگار است.

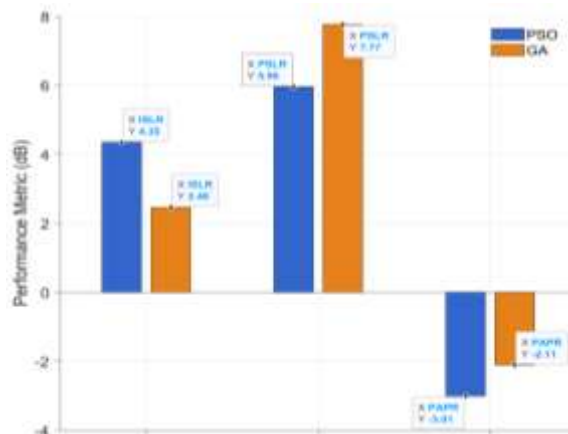
این رویکرد چندجانبه برای اعتبارسنجی، اطمینان معقولی از صحت نتایج شبیه سازی و کارایی روش پیشنهادی فراهم می آورد. در ادامه، نتایج شبیه سازی ها به تفصیل ارائه می گردد.

۳-۲. نتایج شبیه سازی

به منظور ارزیابی جامع عملکرد شکل موج پیشنهادی مبتنی بر مدولاسیون تقسیم فرکانسی متعامد پهن باند بهینه، مجموعه ای گسترده از شبیه سازی ها در این بخش ارائه شده است. شبیه سازی ها با استفاده از نرم افزار MATLAB R2021a با پردازنده Intel Core i7-11800H (نسل یازدهم، فرکانس ۲.۳۰ گیگاهرتز) و ۱۶ گیگابایت رم انجام گرفته است. در این بخش نتایج حاصل از شبیه سازی ها ارائه و تحلیل شده است و عملکرد روش پیشنهادی با سایر شکل موج و الگوریتم های بهینه سازی

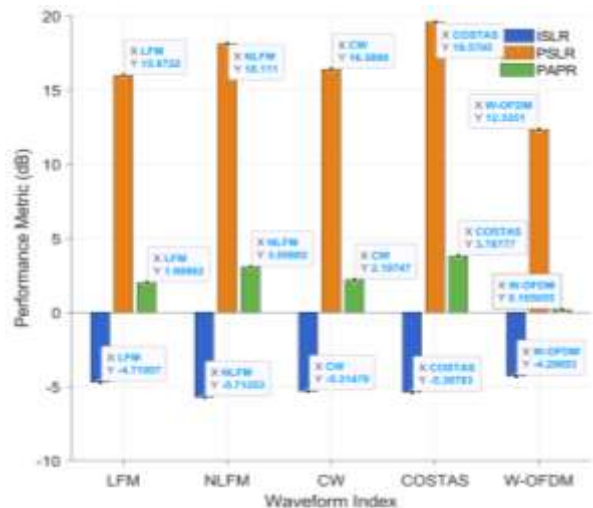
جانبی را نشان می‌دهد و نسبت توان قله به متوسط به‌صورت مستقیم بر بازده سیستم اثرگذار است، به‌نحوی که کاهش آن موجب بهبود عملکرد سیستم می‌شود. عملکرد شکل موج بهینه‌سازی شده تحت شرایط محیطی در سناریوهای واقعی مورد ارزیابی قرار گرفت. همان‌طور که در شکل (۳) مشاهده می‌شود، شکل موج پیشنهادی بهینه‌شده با الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات به مقدار نسبت توان قله به متوسط برابر $3/01$ - دسی‌بل دست‌یافته است که نسبت به روش الگوریتم ژنتیک با مقدار $2/11$ - دسی‌بل برتری دارد. در مقدار $3/01$ - دسی‌بل به معنای آن است که نسبت توان قله به توان متوسط در مقیاس خطی

حدود $0/5 \approx 10^{-2/01}$ است یعنی توان قله تقریباً نصف توان متوسط است که نشان‌دهنده موفقیت الگوریتم بهینه‌سازی در سرکوب قله‌های سیگنال است. اگر توان قله از توان متوسط کمتر باشد، نسبت $\frac{P_{peak}}{P_{avg}}$ کوچک‌تر از ۱ خواهد بود و لگاریتم آن مقدار منفی می‌شود. این حالت زمانی رخ می‌دهد که شکل موج به‌گونه‌ای طراحی شود که دامنه قله‌های آن به‌طور قابل‌توجهی سرکوب‌شده باشد، درحالی‌که انرژی کل سیگنال حفظ شود. در مدولاسیون تقسیم فرکانسی متعامد پهن باند بهینه‌شده با فن شکل‌دهی پالس، دستیابی به نسبت توان قله به متوسط منفی به دسی‌بل امکان‌پذیر است. کاهش $3/17$ دسی‌بل (معادل $51/75$ ٪) در مقدار مدولاسیون تقسیم فرکانسی متعامد پهن باند بهینه‌شده با الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات نشان‌دهنده بهبود قابل‌توجه در عملکرد است. هر چه فاصله بین حامل‌های فرعی بیشتر باشد (یعنی مقدار T کمتر شود) پهنای باند کلی سیگنال افزایش پیدا می‌کند. در شبیه‌سازی‌های انجام‌شده، پارامترهای الگوریتم ازدحام ذرات و الگوریتم ژنتیک در جدول (۳) ارائه‌شده‌اند. همان‌طور که مشاهده می‌شود، پارامترهای کلیدی ازجمله اندازه جمعیت و تعداد تکرار به‌طور یکسان برای هر دو الگوریتم به ترتیب ۵۰ و ۱۰۰ در نظر گرفته‌شده‌اند.



شکل ۳. مقایسه معیارهای شکل موج بهینه‌شده بین الگوریتم‌های بهینه‌سازی ازدحام ذرات و الگوریتم ژنتیک.

مطلوب‌ترین ویژگی‌های نسبت توان قله به متوسط دانست که با مقدار $0/16$ - دسی‌بل نشان داده می‌شود و به‌صورت قابل‌ملاحظه‌ای عملکرد بهتری نسبت به گزینه‌های معمول دارد. در مقایسه با مدولاسیون فرکانس خطی مقدار $1/98$ - دسی‌بل، مدولاسیون فرکانس غیرخطی مقدار $3/05$ - دسی‌بل، موج پیوسته مقدار $2/19$ - دسی‌بل و کاستاس مقدار $3/78$ - دسی‌بل را به ثبت رسانده است. این برتری ذاتی بیانگر ساختار چند حاملی و ویژگی‌های شکل‌دهی پالسی گوسی است که در طراحی مدولاسیون تقسیم فرکانسی متعامد پهن باند مشاهده می‌شود.



شکل ۲. مقایسه معیارهای شکل موج‌ها در محیط زیرآب (مقدار نسبت توان قله به متوسط بر اساس سیگنال ارسالی ارزیابی‌شده به‌نحوی که مقادیر پایین‌تر نشان‌دهنده عملکرد بهتر است).

همان‌گونه که در شکل (۲) نشان داده‌شده است، کمترین مقدار نسبت توان قله به متوسط پیش از بهینه‌سازی برابر با $0/16$ - دسی‌بل است که به شکل موج مدولاسیون تقسیم فرکانسی متعامد پهن باند مربوط می‌شود و به‌عنوان گزینه برتر انتخاب‌شده است. این مقدار بیانگر انحراف قابل‌توجه در توان سیگنال است که می‌تواند منجر به تخریب فرآیند انتقال اطلاعات شود. کاهش مقدار نسبت توان قله به متوسط، بیانگر بهبود کیفیت سیگنال و افزایش وضوح آن است که در نهایت می‌تواند کارایی و بازده سیستم را ارتقا دهد. در تصاویر نویزی سونار، مقدار وضوح ثابت باقی می‌ماند ولی سایر پارامترها تغییر می‌نمایند. این امر به این معناست که توانایی تمایز بین اجزای مختلف تصویر حفظ‌شده و درعین‌حال جنبه‌های دیگر سیگنال، بهبود پیدا می‌کند. مقدار نسبت انرژی به بخش اصلی بیانگر توانایی سیستم در بهبود نسبت سیگنال به نویز و جداسازی مؤثر سیگنال‌های مطلوب از نویز ناخواسته است. پارامترهای نسبت پیک به لوب کناری و نسبت میانگین به پیک می‌توانند بر کیفیت تصویربرداری یا نقشه‌برداری در سامانه‌های سونار اثر بگذارند. به‌طور مشخص نسبت انرژی حلقه اصلی به جداسازی سیگنال اشاره دارد و نسبت پیک به لوب اصلی نسبت توان پیک به توان لوب‌های

تفاضلی کمترین عملکرد را نشان داده و نسبت توان قله به متوسط برابر با ۲/۶۳ دسی‌بل در آن به‌دست‌آمده است. مقدار ۰/۹ دسی‌بل تفاوت بین الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات و الگوریتم ژنتیک به‌دست‌آمده با اینکه از نظر عددی کوچک به نظر می‌رسد ولی بهبود عملیاتی قابل توجهی در کارایی تقویت‌کننده توان و عملکرد کلی سیستم ایجاد می‌نماید.

برخلاف الگوریتم ژنتیک که بر عملیات ترکیب و جهش تأکید دارد و ممکن است برای مسائل بهینه‌سازی پیوسته چندان مناسب نباشد، ولی به‌روزرسانی‌های مبتنی بر سرعت در الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات، موجب حرکت روان‌تر در فضای پارامترها شده و شناسایی مؤثرتری بر پیکربندی‌های بهینه شکل موج را امکان‌پذیر می‌سازد. جدول (۳) مزایای محاسباتی قابل توجه الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات نسبت به روش‌های بهینه‌سازی جایگزین را نشان می‌دهد. الگوریتم بهینه‌سازی ذرات در مدت تنها ۰/۱۳ ثانیه به پارامترهای بهینه شکل موج، همگرا می‌شود که تقریباً ۱۵ برابر سرعت بیشتری نسبت به الگوریتم ژنتیک دارد که برای همگرایی نیازمند ۵/۸۱ ثانیه است.

علاوه بر این، معیارهای نسبت انرژی حلقه اصلی و نسبت پیک به لوب اصلی، بهبودهای مداومی نشان می‌دهد به‌نحوی که سیستم بهینه‌شده با بهینه‌سازی ازدحام ذرات با نسبت لوب جانبی پیک برابر ۵/۹۶ دسی‌بل و نسبت لوب جانبی یکپارچه برابر ۴/۳۵ دسی‌بل دست‌یافته است. این مقادیر نشان‌دهنده کاهش مؤثر لوب‌های جانبی نسبت به سایر روش‌های بهینه‌سازی هستند و به‌صورت مستقیم به بهبود کیفیت تصویر و کاهش اثرات تداخل منجر می‌گردند. جدول (۲) یک مقایسه از عملکرد نسبت توان قله به متوسط ارائه می‌نماید که توسط الگوریتم‌های بهینه‌سازی مختلف بر روی شکل موج مدولاسیون تقسیم فرکانسی متعامد پهن باند اعمال شده است.

نتایج به‌طور واضح برتری روش الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات نسبت به روش بهینه‌سازی متداول مثل الگوریتم ژنتیک و تکامل تفاضلی را نشان می‌دهند. شکل موج مدولاسیون تقسیم فرکانسی متعامد بهینه‌شده با الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات به مقدار نسبت توان قله به متوسط برابر ۳/۰۱- دسی‌بل دست‌یافته است که تا حد قابل توجهی بهتر از الگوریتم ژنتیک با مقدار ۲/۱۱- دسی‌بل تحت شرایط یکسان عمل می‌کند. الگوریتم

جدول ۲- مقایسه نسبت توان قله به متوسط برای شکل موج‌های کاندید و بهینه‌سازی‌ها.

شکل موج	مدولاسیون فرکانس خطی	مدولاسیون فرکانس غیرخطی	موج پیوسته	کاستاس	مدولاسیون تقسیم فرکانسی متعامد پهن باند			
					شکل موج اصلی (قبل از بهینه‌سازی)	الگوریتم ازدحام ذرات	الگوریتم ژنتیک	الگوریتم تفاضلی
نسبت توان قله به متوسط (دسی‌بل)	۱/۹۸	۳/۰۵	۲/۱۹	۳/۷۸	۰/۱۶	-۳/۰۱	-۲/۱۱	۲/۶۳

مربوط به عملیات ژنتیکی به سبب مکانیسم به‌روزرسانی مبتنی بر سرعت، کارایی محاسباتی بالاتری را از خود نشان می‌دهد.

برای سنجش تأثیر بهینه‌سازی بر سطح انرژی مؤثر سیگنال، ریشه میانگین مربعات^۱ سیگنال اصلی و سیگنال‌های بهینه‌شده در جدول (۴) نشان داده‌شده و به‌صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$RMS = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{j=1}^N |x_j|^2} \quad (21)$$

مطابق جدول (۴) مشاهده می‌شود که بهینه‌سازی موجب کاهش چشمگیری تا حدود ۹۳٪ شده است. این کاهش قابل توجه نشان می‌دهد که بهینه‌سازی نه‌تنها توزیع انرژی را بهبود بخشیده بلکه سطح انرژی مؤثر سیگنال را به‌طور معناداری کاهش می‌دهد که به بازدهی توان بهتر در فرستنده منجر می‌شود. مقادیر ریشه میانگین مربعات محاسبه‌شده برای سیگنال بهینه‌شده با ازدحام ذرات و الگوریتم ژنتیک نشان می‌دهد که هر دو الگوریتم موفق به کاهش چشمگیر سطح انرژی شده‌اند، بااین‌حال بهینه‌ساز ازدحام ذرات با کاهش ۹۳/۳٪ عملکرد قوی‌تری از خود نشان داده است.

جدول ۳- پارامترها و زمان پردازش CPU الگوریتم‌های بهینه‌سازی در شرایط یکسان.

الگوریتم	الگوریتم ازدحام ذرات	الگوریتم ژنتیک
زمان (ثانیه)	۰/۱۳	۵/۸۱
تعداد تکرار	۱۰۰	۱۰۰
اندازه جمعیت	۵۰	۵۰
وزن لختی (w)	۰/۵	-
ضریب شناختی (c _۱)	۱/۵	-
ضریب اجتماعی (c _۲)	۲/۵	-
احتمال تقاطع	-	۰/۷
احتمال جهش	-	۰/۱

کاهش زمان پردازش سیستم امکان بهینه‌سازی شکل موج در زمان واقعی را فراهم می‌آورد و سیستم قادر است با تغییرات محیطی با حداقل تأخیر، سازگاری پیدا کند. همچنین مصرف توان به سبب بهبود ویژگی‌های نسبت توان قله به متوسط، تقریباً ۱۵٪ کاهش پیدا کرده است. الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات، با نیاز کمتر به ارزیابی تابع در هر تکرار و همین‌طور حذف بار محاسباتی

^۱ Root Mean Square (RMS)

برابر با ۰/۱۶۶ دست‌یافت که عملکرد بهتری نسبت به روش‌های الگوریتم ژنتیک با نرخ خطای بیت برابر با ۰/۱۹۸ و تکامل تفاضلی با نرخ خطای بیت برابر با ۰/۲۳۴ نشان می‌دهد. نرخ خطای بیت کمتر از ۰/۰۰۱ (یا 10^{-3}) در شرایط بهینه، با حساسیت بالا از جمله انتقال داده و یکپارچگی داده مناسب است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، الگوریتم ازدحام ذرات در تمام محدوده نسبت سیگنال به نویز کمترین میانگین نرخ خطای بیت و برتری نسبت به الگوریتم‌های ژنتیک و تکامل تفاضلی را دارد. این برتری به‌ویژه در کمتر از ۰ دسی‌بل که شرایط چالش‌برانگیز سونار زیرآب را شبیه‌سازی می‌کند، مشهود است. در محدوده نسبت سیگنال به نویز متوسط از ۰ تا ۱۰ دسی‌بل که شرایط معمول سامانه‌های سونار را نمایش می‌دهد، برتری الگوریتم ازدحام ذرات همچنان حفظ می‌شود. این بهبود عملکرد ناشی از پارامترهای بهینه شکل موج است که توسط الگوریتم ازدحام ذرات شناسایی شده و پایداری سیگنال را افزایش می‌دهد. تخصیص بهینه حامل‌های فرعی و پارامترهای شکل‌دهی پالس، موجب بهبود نسبت سیگنال به تداخل به‌علاوه نویز می‌شود و انتقال داده را در شرایط چالش‌برانگیز مطمئن‌تر می‌نماید. در کل محدوده نسبت سیگنال به نویز شکل موج مدولاسیون تقسیم فرکانسی متعامد پهن باند بهینه‌شده با الگوریتم ازدحام ذرات به‌طور مداوم عملکرد بهتری نسبت به روش‌های جایگزین از خود نشان می‌دهد. این تحلیل مقایسه‌ای، بینش قابل‌توجهی را در خصوص اثربخشی الگوریتم ازدحام ذرات در بهینه‌سازی پارامترهای شکل موج و بهبود کیفیت سیگنال نسبت به روش‌های سنتی ارائه می‌نماید.

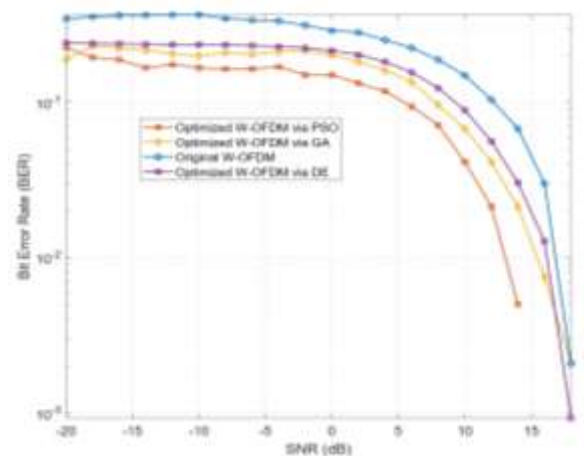
شکل (۵)، پاسخ مقایسه‌ای از فرم موج‌های متفاوت را به تصویر می‌کشد که روی شرایط مختلف سرعت صوت اثر می‌گذارد. در سرعت ۱۴۰۰ متربرثانیه، و در شرایط آب خنک‌تر، مدولاسیون تقسیم فرکانسی پهن باند، کاهش حداقلی نسبت توان قله به متوسط را تجربه می‌کند که تنها ۰/۶۶ دسی‌بل تفاوت دارد. در مقابل، موج مدولاسیون خطی فرکانس نیز تحت شرایط یکسان، کاهش عملکرد قابل‌توجهی معادل با ۲/۴۸ دسی‌بل تجربه می‌کند که نشان‌دهنده مقاومت محیطی کمتر است. با افزایش سرعت صوت به ۱۵۰۰ متربرثانیه که نشان‌دهنده شرایط آب گرم است، عملکرد مدولاسیون تقسیم فرکانسی متعامد پهن باند، برجسته‌تر شده و با کاهش نسبت توان قله به متوسط تنها به مقدار ۰/۱۶ دسی‌بل محدود می‌شود. در همین حال نسبت مدولاسیون خطی فرکانس نیز همچنان کاهش عملکرد قابل‌توجهی معادل با ۱/۹۸ دسی‌بل را تجربه می‌نماید.

مدولاسیون تقسیم فرکانسی متعامد پهن باند می‌تواند عملکرد پایداری در رویارویی با شرایط محیطی مختلف از خود نشان دهد و بنابراین مقاومت محیطی بهتری دارد. شکل (۶) رفتار عمق محور شکل موج بهینه‌شده را در مدولاسیون تقسیم فرکانسی متعامد

جدول ۴- مقایسه مقدار ریشه میانگین مربعات سیگنال اصلی و سیگنال‌های بهینه‌شده (مقادیر بر اساس دامنه نرمال‌شده سیگنال محاسبه شده‌اند).

شکل موج	مقدار	تغییر نسبی
مدولاسیون تقسیم فرکانسی متعامد پهن باند اصلی	۷/۴۸	-
شکل موج بهینه‌شده با ازدحام ذرات	۰/۵۰۱	۹۳٪/۳ کاهش
شکل موج بهینه‌شده با الگوریتم ژنتیک	۰/۵۳۵	۹۲٪/۱۹ کاهش

شکل (۴) مقایسه عملکرد سونار با استفاده از مدولاسیون تغییر فاز مربعی^۱ را در الگوریتم‌های مختلف بهینه‌سازی تحت شرایط متغیر نسبت سیگنال به نویز ارائه می‌کند. معیار نرخ خطای بیت از ۲۰- تا ۲۰+ دسی‌بل گزارش شده است. هدف از این شبیه‌سازی، نشان دادن اثر غیرمستقیم بهینه‌سازی شکل موج بر قابلیت اطمینان مدولاسیون است، نه ارزیابی عملکرد نهایی سیستم تصویربرداری. این رویکرد امکان سنجش پتانسیل شکل موج بهینه‌شده برای کاربردهای سونار با قابلیت‌های ارتباطی-سنجشی یکپارچه را فراهم می‌آورد.



شکل ۴. مقایسه عملکرد نرخ خطای بیت شکل موج‌های بهینه‌شده در زیرآب.

نرخ خطای بیت با مدولاسیون تغییر فاز مربعی به‌صورت $BER = Q(\sqrt{SNR})$ است و به‌منظور سنجش تأثیر غیرمستقیم کاهش نسبت توان قله به متوسط بر مقاومت سیگنال در برابر نویز به دست می‌آید. نسبت سیگنال به نویز در این مقاله، پیش‌پردازش مبتنی بر انرژی شکل موج است که نویز محیطی در آن مدل نشده است. نتایج نشان می‌دهد که در محدوده نسبت سیگنال به نویز پایین (کمتر از ۰ دسی‌بل) که معرف شرایط چالش‌برانگیز محیط زیرآب است، سیستم بهینه‌شده با الگوریتم ازدحام ذرات عملکرد بهتری نسبت به الگوریتم ژنتیک و تکامل تفاضلی نشان می‌دهد. به‌عنوان مثال، در نسبت سیگنال به نویز برابر با ۱۰- دسی‌بل، سیستم بهینه‌شده با الگوریتم ازدحام ذرات به نرخ خطای بیت

^۱ Quadrature Phase Shift Keying (QPSK)

لوب‌های کناری را کاهش داده و درعین حال باعث حفظ ویژگی‌های لوب اصلی می‌شود. این نتایج، توانایی سیستم را در حفظ عملکرد مؤثر در کاربردهای آب عمیق، تأیید می‌نماید و بیانگر این است که سیستم می‌تواند به تغییرات شرایط محیطی به‌صورت مؤثر سازگار گردد.

از آنجاکه آشکارسازی اهداف و ارزیابی معیارهای وابسته به آن مانند احتمال آشکارسازی و احتمال هشدار غلط از اهداف این مقاله نیست، بنابراین پیاده‌سازی آن مستلزم به‌کارگیری الگوریتم پردازش سیگنال پس از تشکیل تصویر است که خارج از محدوده این مقاله قرار می‌گیرد.

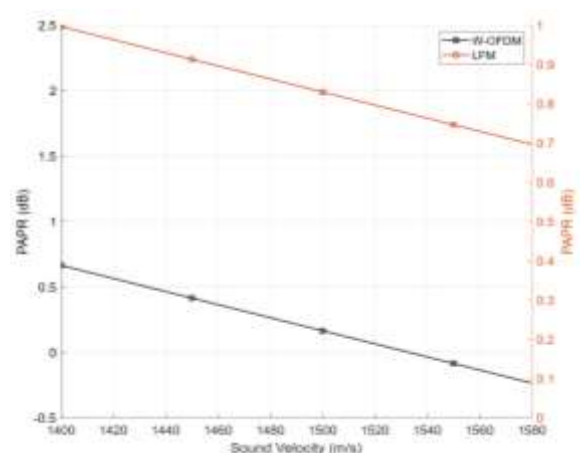
۴. نتیجه‌گیری

در این مقاله، مدولاسیون تقسیم فرکانسی متعامد پهن باند با شکل‌دهی پالس گوسی معرفی و به‌عنوان شکل موج برتر در سمت فرستنده برای سونارهای چند پرتویی پیشنهاد شده است که به‌عنوان روشی برای بهینه‌سازی شکل موج ارسالی و پارامترهای کلیدی (فاصله زیر حامل‌ها، مدت‌زمان سمبل و ضریب پالس گوسی)، از الگوریتم ازدحام ذرات استفاده شد. نتایج شبیه‌سازی نشان داد که شکل موج بهینه‌شده نسبت توان قله به متوسط را از ۰/۱۶ دسی‌بل به ۳/۰۱- دسی‌بل کاهش می‌یابد که معادل بهبود ۹۴/۵٪ است. از نظر کارایی محاسباتی، الگوریتم ازدحام ذرات در شرایط مقایسه‌ای یکسان و با تنظیمات بهینه‌شده، زمان همگرایی ۰/۱۳ ثانیه را ثبت کرد که تقریباً ۱۵ برابر سریع‌تر از الگوریتم ژنتیک (۵/۸۱ ثانیه) است. نتایج به‌دست‌آمده نشان می‌دهد که روش پیشنهادی می‌تواند به‌عنوان راهکاری مؤثر در کاهش مصرف توان فرستنده و بهبود کیفیت سیگنال ارسالی در سونارهای چند پرتویی پیشرفته به کار گرفته شود. انجام آزمایش‌های میدانی و پیاده‌سازی عملیاتی در آینده مطرح می‌گردد.

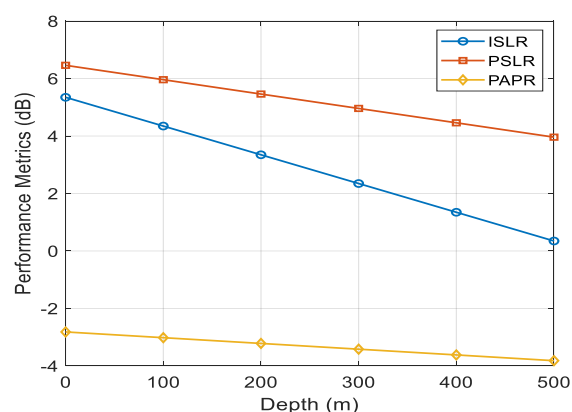
۵. مراجع‌ها

- [۱] Gussen, C. M. G.; Diniz, P. S. R.; Campos, M. L. R.; Martins, W. A.; Costa, F. M.; Gois, J. N. "A Survey of Underwater Wireless Communication Technologies"; J. Commun. Inf. Syst. ۲۰۱۶, ۳۱, ۲۴۲-۲۵۵. doi: ۱۰.۱۴۲۰۹/jcis.۲۰۱۶.۲۲.
- [۲] Multibeam Sonar: Theory of Operation. L-۳ Communications SeaBeam Instruments. ۲۰۰۰.
- [۳] Nguyen, N. H.; Doganc, K.; Davis, L. M. "Adaptive Waveform Selection and Target Tracking by Wideband Multistatic Radar/Sonar Systems"; Proc. Eur. Signal Process. Conf. (EUSIPCO). ۲۰۱۴, ۱۹۱۰-۱۹۱۴.
- [۴] Hague, D. A.; Buck, J. R. "An Experimental Evaluation of the Generalized Sinusoidal Frequency-Modulated Waveform for Active Sonar Systems"; J. Acoust. Soc. Am. ۲۰۱۹, ۱۴۵, EL۱-EL۷. doi: ۱۰.۱۱۲۱/۱.۵۱۱۳۵۸۱.
- [۵] Li, Q. "Digital Sonar Design in Underwater Acoustics"; Springer: ۲۰۱۲. doi: ۱۰.۱۰۰۷/۹۷۸-۳-۶۴۲-۱۸۲۹۰-۷.
- [۶] Zhang, Y. -X.; et al. "Frequency-Domain Range Sidelobe Correction in Stretch Processing for Wideband LFM Radars";

پهن باند در اعماق عملیاتی مختلف نشان می‌دهد که از سطح آب تا ۵۰۰ متر متفاوت است. تحلیل‌ها به‌این ترتیب است که روندهای سامانمند را در معیارهای عملکردی متفاوت و بر مبنای افزایش عمق، آشکار می‌سازد و بینشی از رفتار سیستم تحت شرایط متغیر فشار و دما از خود نشان می‌دهد.



شکل ۵. کاهش نسبت توان قله به متوسط و سرعت صوت را برای مدولاسیون خطی فرکانس و مدولاسیون تقسیم فرکانسی متعامد پهن باند در محیط زیرآب (به‌نحوی که مقادیر پایین‌تر، عملکرد بهتری را از خود بروز دهند)



شکل ۶. عملکرد عمق محور شکل موج بهینه‌شده مدولاسیون تقسیم فرکانسی متعامد پهن باند

معیارهای نسبت انرژی لوب اصلی و نسبت پیک به لوب اصلی، با افزایش عمق روند، باعث بهبود یکنواخت می‌شوند و از مقادیر نسبتاً بالایی در عمق‌های کم به مقادیر بهینه در اعماق بیشتر عملیاتی، کاهش می‌یابند. این بهبود را می‌توان ظاهراً غیرمنتظره دانست که ناشی از افزایش تضعیف صوتی در اعماق بیشتر است که به‌صورت طبیعی انرژی‌های لوب‌های کناری را کاهش داده و درعین حال، ویژگی‌های لوب اصلی را نیز حفظ می‌نماید. عملکرد نسبت توان قله به متوسط، با افزایش عمق به‌طور مداوم بهبود پیدا می‌کند و از تقریباً ۲/۸۱- دسی‌بل در عمق‌های کم به ۳/۸۱- دسی‌بل در عمق ۵۰۰ متری می‌رسد. بهبود عملکرد با افزایش عمق، بیانگر تضعیف بیشتر صوتی است که به‌صورت طبیعی انرژی

- [۲۲] Abd El-Galil, M. S.; Soliman, N. F.; Abdalla, M. I.; Abd El-Samie, F. E. "Efficient underwater acoustic communication with peak-to-average power ratio reduction and channel equalization"; *International Journal of Speech Technology*. ۲۰۱۹, ۲۲, ۶۴۹-۶۹۶. doi:۱۰.۱۰۰۷/s۱۰۷۷۲۰۱۹-۰۹۶۰۰-۱.
- [۲۳] Hughes Clarke, J. E. "Multibeam Echosounders"; In: Micallef, A.; Krastel, S.; Savini, A., Eds. *Submarine Geomorphology*; Springer, ۲۰۱۷, ۲۵-۴۲. doi:۱۰.۱۰۰۷/۹۷۸-۳-۳۱۹-۵۷۸۵۲-۱_۳.
- [۲۴] Lurton, X. "An Introduction to Underwater Acoustics: Principles and Applications"; ۲nd ed.; Springer, ۲۰۱۰. doi:۱۰.۱۰۰۷/۹۷۸-۱-۴۴۱۹-۹۷۷۷-۷.
- [۲۵] Augustin, J. -M.; Le Suavé, R.; Lurton, X.; Voisset, M.; Dugelay, S.; Satra, C. "Contribution of the Multibeam Acoustic Imagery to the Exploration of the Sea-Bottom"; *Mar. Geophys. Res.* ۱۹۹۶, ۱۸, ۴۵۹-۴۸۶. doi:۱۰.۱۰۲۳/A:۱۰۰۴۲۹۹۷۲۸۰۷۴.
- [۲۶] Qiao, G.; Xing, S.; Zhou, F. "Selected-Mapping Peak-to-Average Power Reduction with Orthogonal Pilot Sequences in UWA-OFDM without Side Information"; *Chin. J. Electron.* ۲۰۲۱, ۳۰, ۱۶۰-۱۶۳. doi:۱۰.۱۰۴۹/cje.۲۰۲۱.۰۱.۰۲۲.
- [۲۷] Altes, R. A. "Methods of Wideband Signal Design for Radar and Sonar Systems"; University of Rochester: ۱۹۷۰.
- [۲۸] Yan, L.; Yang, J.; Xu, F.; Piao, S. "Low-Sidelobe Imaging Method Utilizing Improved Spatially Variant Apodization for Forward-Looking Sonar"; *Remote Sens.* ۲۰۲۴, ۱۶, ۲۱۰۰. doi:۱۰.۳۳۹۰/rs۱۶۱۲۲۱۰۰.
- [۲۹] Han, S. H.; Lee, J. H. "An Overview of Peak-to-Average Power Ratio Reduction Techniques for Multicarrier Transmission"; *IEEE Wirel. Commun.* ۲۰۰۵, ۱۲, ۵۶-۶۵. doi:۱۰.۱۱۰۹/MWC.۲۰۰۵.۱۴۲۱۹۲۹.
- [۳۰] Gad, A. G. "Particle Swarm Optimization Algorithm and Its Applications: A Systematic Review"; *Arch. Comput. Methods Eng.* ۲۰۲۲, ۲۹, ۲۵۳۱-۲۵۶۱. doi:۱۰.۱۰۰۷/s۱۱۸۳۱-۰۲۱-۰۹۶۹۴-۴.
- IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst.. ۲۰۱۷, ۵۳, ۱-۱۵. doi: ۱۰.۱۱۰۹/TAES.۲۰۱۷.۲۶۴۹۴۵۸.
- [۷] He, H.; Li, J.; Stoica, P. "Waveform Design for Active Sensing Systems: A Computational Approach"; Cambridge University Press: ۲۰۱۲, ۸۸-۱۰۲. doi:۱۰.۱۰۱۷/CBO ۹۷۸۰۵۱۱۹۷۳۴۴۴.
- [۸] Waite, A. D. "Sonar for Practising Engineers"; ۲rd ed.; Wiley: ۲۰۰۱.
- [۹] Wang, F.; Du, S.; Sun, W.; Huang, Q.; Su, J. "A Method of Velocity Estimation Using Composite Hyperbolic Frequency-Modulated Signals in Active Sonar"; *J. Acoust. Soc. Am.* ۲۰۱۷, ۱۴۱, EL۴۳۳-EL۴۳۸. doi:۱۰.۱۱۲۱/۱.۴۹۸۲۷۲۴.
- [۱۰] Blunt, S. D.; Mokole, E. L. "An Overview of Radar Waveform Diversity"; *IEEE Aerosp. Electron. Syst. Mag.* ۲۰۱۶, ۳۱, ۲-۴۲. doi:۱۰.۱۱۰۹/MAES.۲۰۱۶.۱۶۰۰۷۱.
- [۱۱] Kong, W.; Yu, J.; Cheng, Y.; Cong, W.; Xue, H. "Automatic Detection Technology of Sonar Image Target Based on Three-Dimensional Imaging"; *Sensors* ۲۰۱۷, ۱۷, ۲۸۴۵. doi:۱۰.۳۳۹۰/s۱۷۱۲۲۸۴۵.
- [۱۲] Wu, M.; Yan, S. "Motion Compensation for OFDM Inverse Synthetic Aperture Sonar Imaging Based on Compressed Sensing"; *IEEE Trans. Instrum. Meas.* ۲۰۲۱, ۷۰, ۱-۱۳. doi: ۱۰.۱۱۰۹/TIM.۲۰۲۰.۳۰۴۱۱۰۵.
- [۱۳] Duan, T.; Zhang, Y.; Liu, X. "High-Resolution Wideband Waveform Design for Sonar Based on Multi-Parameter Modulation"; *Remote Sens.* ۲۰۲۳, ۱۵, ۴۵۶. doi:۱۰.۳۳۹۰/rs۱۵۰۲۰۴۵۶.
- [۱۴] Westley, K.; McCarthy, J.; Smith, J. "Optimising Protocols for High-Definition Imaging of Historic Shipwrecks Using Multibeam Echosounder"; *Archaeol. Anthropol. Sci.* ۲۰۱۹, ۱۱, ۳۶۲۹-۳۶۴۵. doi:۱۰.۱۰۰۷/s۱۵۰۲۰۰۱۹-۰۰۸۳۱-۶.
- [۱۵] Shang, X.; Zhao, J.; Zhang, H. "Obtaining High-Resolution Seabed Topography and Surface Details by Co-Registration of Side-Scan Sonar and Multibeam Echo Sounder Images"; *Remote Sens.* ۲۰۱۹, ۱۱, ۲۹۰۳. doi:۱۰.۳۳۹۰/rs۱۱۲۴۲۹۰۳.
- [۱۶] Cobacho-Ruiz, P.; Cañete, F. J.; Martos-Naya, E.; Fernández-Plazaola, U. "OFDM System Design for Measured Ultrasonic Underwater Channels"; *Sensors* ۲۰۲۲, ۲۲, ۵۷۰۳. doi:۱۰.۳۳۹۰/s۲۲۱۵۰۷۰۳.
- [۱۷] Jiang, W.; Diamant, R. "Long-Range Underwater Acoustic Channel Estimation"; *IEEE Trans. Wirel. Commun.* ۲۰۲۳, ۲۲, ۶۲۶۷-۶۲۸۲. doi:۱۰.۱۱۰۹/TWC.۲۰۲۳.۳۲۶۶۹۷.
- [۱۸] Li, B.; Huang, J.; Zhou, S.; et al.; "Particle Swarm Optimization-Based Power Allocation for OFDM Underwater Acoustic Communications"; *IEEE Journal of Oceanic Engineering*. ۲۰۱۸, ۴۳. doi:۱۰.۱۱۰۹/JOE.۲۰۱۷.۲۶۷۱۰۶.
- [۱۹] Ostovar A.; Madani, M. H.; "A novel high resolution imaging for multibeam sonar using an adaptive optimized wideband OFDM modulation scheme and higher-order statistics"; *Digital Signal Processing* ۲۰۲۵, ۱۶۸. doi:۱۰.۱۰۱۶/j.dsp. ۲۰۲۴.۱۰۴۸۸۸.
- [۲۰] Zhou, X.; Yang, D.; Kim, H.; Lee, J. "Underwater Mapping and Optimization Based on Multibeam Echo Sounders"; *J. Mar. Sci. Eng.* ۲۰۲۴, ۱۲, ۱۲۲۲. doi:۱۰.۳۳۹۰/jmse۱۲۰۷۱۲۲۲.
- [۲۱] Kumar, A.; Singh, R.; Gupta, V. "Underwater Image Processing and Target Detection from Particle Swarm Optimization Algorithm"; *Signal Image Video Process.* ۲۰۲۴, ۱۸, ۸۷۶۵-۸۷۷۸. doi:۱۰.۱۰۰۷/s۱۱۷۶۰۰۲۴-۰۳۴۶۸-۵.