

## تشخیص، آشکارسازی و مکان‌یابی تغییرات دینامیکی در فیبر نوری مبتنی بر چیدمان Boxcar Averager با روش پردازشی OTDR

محسن طالب پور اردکانی<sup>۱</sup>، مهدی نصیر<sup>۲\*</sup>، محمدحسین قزل‌ایاغ<sup>۳</sup>، حسین گودرزی<sup>۴</sup>

۱. دانشجوی دکترا، دانشکده برق و جنگ الکترونیک، دانشگاه جامع امام حسین(ع)، تهران، ایران.

۲. استادیار، دانشکده برق و جنگ الکترونیک، دانشگاه جامع امام حسین(ع)، تهران، ایران.

۳. دانشیار، دانشکده برق و جنگ الکترونیک، دانشگاه جامع امام حسین(ع)، تهران، ایران.

۴. مربی، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه جامع امام حسین(ع)، تهران، ایران.

### چکیده

در حوزه جنگ الکترونیک، کسب اطلاعات، آشکارسازی، مکان‌یابی و رهگیری اهداف از مباحث حیاتی در بخش پشتیبانی محسوب می‌شود. در این راستا، پنهان‌سازی و مقاومت در برابر اقدامات جیمینگ از نیازهای اساسی است. این تحقیق با طراحی و تحلیل یک ساختار حسگر فیبر نوری بدون تشعشع، روشی نوین برای آشکارسازی و مکان‌یابی تغییرات دینامیکی در فیبر نوری ارائه می‌دهد. روش پیشنهادی مبتنی بر چیدمان فیبر نوری با ساختار OTDR و پردازش سیگنال با استفاده از الگوریتم Boxcar Averager بهبود یافته تفاضلی است. سیستم طراحی شده شامل یک مدار راه‌انداز لیزر با پالس‌های ۲۰ نانوثانیه، فوتو-دیود برای دریافت سیگنال‌های بازگشتی و تقویت‌کننده‌ی مناسب برای بهبود سیگنال است. با اعمال الگوریتم میانگین‌گیر پنجره‌ای، نسبت سیگنال به نویز (SNR) به میزان ۱۰ دسی‌بل افزایش یافت که امکان تشخیص تغییرات کوچک و دینامیکی مانند جابجایی، فشار و لرزش در فیبر نوری را فراهم کرد. این روش بهبودیافته قادر است تغییرات موضعی در ضریب شکست، طول فیبر و تلفات نوری را با دقت مکانی بالا شناسایی کند. پردازش سیگنال‌های دریافتی از OTDR با استفاده از نرم‌افزار LabView انجام شد و از الگوریتم میانگین‌گیر پنجره‌ای برای حذف نویز و استخراج سیگنال اصلی استفاده گردید. نتایج تجربی نشان می‌دهند که سیستم پیشنهادی دقت قابل قبولی در آشکارسازی و مکان‌یابی تغییرات دینامیکی دارد و برای کاربردهایی نظیر نظارت بر سازه‌ها، امنیت و پایش تغییرات محیطی بسیار مؤثر است.

**واژه‌های کلیدی:** حسگر فیبر نوری، چیدمان OTDR، پردازش سیگنال Boxcar Averager، مکان‌یابی تغییرات دینامیکی.

## Blind Separation of Multiple Asynchronous FH Signals with Frequency Interference Based on MWC and STF Distributions

Mohsen TalebpourArdakani<sup>1</sup>, Mehdi Nasiri<sup>2</sup>, MohammadHossein Ghezelayagh<sup>3</sup>, Hossein Goodarzi<sup>4</sup>

1. Ph.D Student, Faculty of Electrical Engineering Department, Imam Hossein University, Tehran, Iran.

2. Assistant Professor, Faculty of Electrical Engineering Department, Imam Hossein University, Tehran, Iran.

3. Associate Professor, Faculty of Electrical Engineering Department, Imam Hossein University, Tehran, Iran.

3. Faculty of Electrical Engineering Department, Imam Hossein University, Tehran, Iran.

### Abstract

In the field of electronic warfare, information acquisition, detection, localization, and tracking of targets are critical aspects of support operations. In this context, concealment and resistance to jamming are fundamental requirements. This research proposes a novel method for detecting and localizing dynamic changes in optical fibers by designing and analyzing a radiation-free optical fiber sensor structure. The proposed method is based on an optical fiber arrangement with an OTDR (Optical Time-Domain Reflectometer) configuration and signal processing using the Boxcar Averager algorithm. The designed system includes a laser driver circuit with 20-nanosecond pulses, a photodiode for receiving reflected signals, and a suitable amplifier to enhance the signal. By applying the Boxcar Averager algorithm, the signal-to-noise ratio (SNR) was improved by 10 dB, enabling the detection of small and dynamic changes such as displacement, pressure, and vibration in the optical fiber. This enhanced method can accurately identify localized changes in the refractive index, fiber length, and optical losses with high spatial precision. Signal processing from the OTDR was performed using LabView software, and the Boxcar Averager algorithm was employed to eliminate noise and extract the main signal. Experimental results demonstrate that the proposed system offers reliable accuracy in detecting and localizing dynamic changes, making it highly effective for applications such as structural health monitoring, security, and environmental change detection.

**Key words:** Fiber optic sensor, OTDR layout, Boxcar Averager signal processing, dynamic change localization

الکترومغناطیسی، ایجاد جرقه و واکنش‌های شیمیایی  
مصون هستند.)

- اندازه کوچک و سبک بودن
- قابلیت اتصال به اجزا دیگر
- قابلیت حسگری توزیعی و از راه دور
- کاربرد در گستره وسیع دمایی.

این حسگرها به‌طور کلی به دو دسته‌ی حسگرهای فیبر نوری درونی و بیرونی تقسیم می‌شوند. در حسگرهای بیرونی، فیبر نوری نقشی در حسگری ندارد و صرفاً وظیفه‌ی انتقال نور از منبع به حسگر غیر فیبر نوری و همچنین از حسگر به آشکارساز را دارد؛ حسگر مورد استفاده در این‌گونه موارد می‌تواند به‌طور مثال یک حسگر الکتربیکی باشد. از سوی دیگر در حسگر فیبر نوری درونی که "حسگر تمام فیبر" نیز خوانده می‌شود، فیبر نوری علاوه بر انتقال، نقش حسگری را نیز ایفا می‌کند که مورد استفاده در این تحقیق می‌باشد. حسگرهای فیبر نوری درونی بر اساس نوع مدوله کردن نور شامل دسته‌بندی زیر می‌شوند: ۱. مدوله‌کننده‌شدت، ۲. مدوله‌کننده قطبش، ۳. مدوله‌کننده فاز. در اولین گونه از این تقسیم‌بندی که حسگرهای مدوله‌کننده‌ی شدت هستند، عامل بیرونی بر شدت نور انتقالی تأثیر گذاشته و در نهایت با توجه به شدتی که نور خروجی در آشکارساز نشان می‌دهد پارامتر موردنظر اندازه‌گیری می‌شود. اساس کار دسته‌ی دوم که حسگرهای مدوله‌کننده‌ی قطبش هستند بر پایه‌ی تغییر قطبش نور، تحت اثر عامل خارجی می‌باشد. دسته‌ی سوم حسگرهای مدوله‌کننده‌ی فاز هستند که بر پایه‌ی تداخل نور عمل می‌کنند و چهار نوع تداخل‌سنج مایکلسون (MI)، ماخ-زندر (MZ)، ساگاناک (SI) و فابری-پرو (FPI) در این دسته آورده شده است [۴ و ۵]. ارتعاشات عمدتاً توسط اختلالات مکانیکی ایجاد می‌شوند که می‌توانند ناشی از عواملی مانند صدا، نویز، موتور یا باد باشند. فناوری نظارت و تحلیل این پدیده در تحقیقات علمی و کاربردهای مهندسی از اهمیت بالایی برخوردار است. اندازه‌گیری دقیق و پیوسته ارتعاشات برای تشخیص ناهنجاری‌ها و ارائه هشدارهای اولیه در مورد آسیب‌های زیرساختی یا اندازه‌گیری کرنش ضروری است. تکنیک‌های فیبر براگ گرتینگ (FBG) و تداخل‌سنج خارجی فابری-پروت برای اندازه‌گیری پاسخ‌های دینامیکی ساختاری با موفقیت نشان داده‌شده‌اند. جین و همکاران از حسگرهای توری فیبر نوری برای اندازه‌گیری ارتعاش ناشی از جریان استفاده کرد [۷ و ۱]. بتز و همکاران یک سیستم محلی سازی و تشخیص آسیب را بر اساس الیاف براگ انجام دادند [۸ و ۱]. سنسورهای پراکندگی معکوس عمدتاً از بازتاب‌سنج حوزه فرکانس نوری (OFDR) و بازتاب‌سنج حوزه زمان نوری (OTDR) استفاده می‌کنند. فناوری تشخیص ارتعاشات توزیع‌شده در فیبر نوری به یکی از موضوعات مهم تحقیقاتی در زمینه‌های مختلف مانند سیستم‌های نظارتی امنیت پیرامونی و نظارت بر کابل‌های زیردریایی تبدیل شده است. در دهه ۱۹۷۰، فناوری سنسج فیبر نوری با توسعه ارتباطات فیبر نوری به سرعت گسترش یافت. این فناوری از

در موضوع پایش، آشکارسازی و مکان‌یابی هدف، روش‌های گوناگونی مانند سیستم‌های راداری، دوربین‌ها، حسگرهای لیزری و ... مورد استفاده قرار گرفته‌اند. از چالش‌های سامانه‌های موجود، می‌توان قابل‌رویت بودن، حساس بودن به جمینگ و نویزهای الکترومغناطیسی و سایر محدودیت‌های یک حسگر فعال را نام برد. انواع مختلفی از حسگرها، مانند سنسور IR و سنسور مغناطیسی مدفون در زیرزمین، به‌طور گسترده برای محافظت در برابر مزاحمان استفاده می‌شود. سنسورهای IR به گردوغبار و مولکول‌های آب موجود در هوا، حساس هستند. سنسورهای مغناطیسی را نمی‌توان در یک محیط که دارای تداخل الکترومغناطیسی است استفاده کرد. سنسورهای فیبر نوری چنین معایبی ندارند و برای تشخیص نفوذ در محیط پیرامونی مانند فرودگاه و ساختمان‌ها بکار گرفته می‌شوند [۱-۲]. سنسورهای فیبر نوری، از دست دادن نور مرتبط با قطع فیبر نوری را نیز تشخیص می‌دهند که در اقدام جهت نفوذ اجتناب‌ناپذیر است [۱-۳]. از قابلیت‌های حسگرهای فیبر نوری می‌توان به حساسیت بالا، قابلیت پایش بلادرنگ، حسگری چند متغیره، دامنه دینامیکی گسترده، مصونیت در برابر تداخلات الکترومغناطیسی، مقاومت در برابر خوردگی، پایش محیطی، قابلیت شبکه شدن و انتقال اطلاعات به فواصل دور اشاره کرد که می‌توانند انتخاب خوبی جهت سنجش تغییرات، فشار، دینامیک و حرکت، موج آکوستیک و پارامترهای محیطی باشند. به‌طور کلی حسگرهای فیبر نوری را می‌توان به دودسته‌ی گسسته (نقطه‌ای) و توزیع‌شده تقسیم‌بندی کرد. قابلیت ضد جمینگ بودن و پنهان‌سازی در حوزه حسگر فیبر نوری از نکات قابل‌توجه در این بخش می‌باشد که می‌توان با طراحی و تحلیل ساختار بدون تشعشع (به‌نوعی غیرفعال) در حوزه حسگری فیبر نوری، تغییرات دینامیکی ناشی از ارتعاش مکانیکی را تشخیص داده و به این هدف نائل شد. تحقیقات اخیر نشان می‌دهد که سنجش فیبر نوری صوتی و ارتعاشی توزیع‌شده به‌طور گسترده در بسیاری از سامانه‌های نظارت و حسگری و اندازه‌گیری مورد استفاده قرار می‌گیرد. پیشرفت شگرف در فناوری‌های حسگری فیبر نوری از دو دهه‌ی گذشته تاکنون بر هیچ‌کس پوشیده نیست و همچنان در حال توسعه می‌باشند [۱، ۲ و ۳]. این حسگرها برای اندازه‌گیری یک یا چند پارامتر فیزیکی مورد استفاده قرار می‌گیرند که تغییر دینامیکی صورت گرفته بر نور خروجی از حسگر تأثیر گذاشته و باعث تغییر در توان خروجی، فاز، حالت قطبش و یا محتوای طیفی می‌شود. در کل برخی از مزایای اصلی حسگرهای فیبر نوری نسبت به نمونه‌های الکتربیکی یا مغناطیسی، به‌صورت زیر خواهد بود:

- اتلاف پایین سیگنال
- مصونیت در برابر امواج الکترومغناطیسی و خوردگی شیمیایی (از آنجاکه فیبرهای نوری از مواد دی‌الکتریک ساخته‌شده‌اند لذا حسگرهای فیبر نوری از تداخل‌های

فیبر نوری به عنوان عنصر سنجش، نور به عنوان حامل اطلاعات و محیطی برای انتقال و ارتباط سیگنال استفاده می‌کند. این فناوری امکان نظارت بر نقاط سنجش فیبر نوری در ناحیه دستگاه را فراهم کرده و با دریافت تغییرات کمیت‌های فیزیکی در فیبر نوری اندازه‌گیری شده، تشخیص را انجام می‌دهد [۱۳]. از زمان ارائه این فناوری، به دلیل ویژگی‌هایی مانند پیوستگی کامل، هوشمندی شبکه، برد طولانی، ظرفیت بالا، هزینه کم و امکان انجام آزمایش‌های غیرمخرب تعبیه‌شده، به طور گسترده در مهندسی عمران، صنایع ارتباطی و برق مورد استفاده قرار گرفته است [۱۳]، [۱۴]. پس از آن، در سال ۱۹۷۶، بارنوسکی و همکاران [۱۳] فناوری بازتاب سنج نوری حوزه زمانی (OTDR) را پیشنهاد کردند که پایه فناوری سنجش توزیع‌شده فیبر نوری است. به طور خاص، فناوری فیبر نوری توزیع‌شده مبتنی بر ساختار OTDR شامل بازتاب سنج نوری حوزه زمانی بریلوئن (B-OTDR)، بازتاب سنج نوری حوزه زمانی همدوس (C-OTDR) و بازتاب سنج نوری حوزه زمانی قطبش (P-OTDR) می‌شود. پیشرفت این فناوری‌ها منجر به توسعه پررونق فناوری سنجش فیبر نوری شده است. این فناوری‌ها عمدتاً بر سنجش دما و کرنش متمرکز هستند؛ اما ارتعاش نیز یک پارامتر اساسی در کاربردهای علمی و مهندسی است؛ بنابراین، برای تشخیص ارتعاش، در سال ۱۹۹۳، تیلور و همکاران [۱۳] فناوری سنجش بازتاب نوری حساس به فاز (OTDR) را پیشنهاد کردند. عملکرد اصلی نظارت بر فیبر نوری در سیستم‌های ارتباطی، تشخیص قطعی خط فیبر نوری و تعیین نقاط شکست برای تعمیر و نگهداری با وضوح مناسب است. در سال ۱۹۹۴، جاسکایتیس و همکاران [۷] استفاده از فناوری OTDR را برای تشخیص نفوذ (ارتعاش) پیشنهاد کردند. با توسعه فناوری تقویت نوری و لیزرهای فیبر نوری، استفاده از تقویت‌کننده‌های فیبر نوری دوطرفه با اریوم (EDFA) در حال افزایش است. در سال ۲۰۰۳، چوی و همکاران [۸] از یک تقویت‌کننده فیبر نوری تمام نوری  $E_r$  همراه با یک تداخل‌سنج فابری-پرو برای دستیابی به انتشار لیزر با پهنای خط کمتر از ۳ کیلوهرتز استفاده کردند. با استفاده از یک مدولاتور الکترو-اپتیکی (EOM) در وسط سیستم OTDR، آن را پالس مدوله کردند و اثر تداخل خوبی به دست آوردند. در سال ۲۰۰۵، خوارز و همکاران [۹] بر اساس فناوری OTDR و با استفاده از یک لیزر با پهنای باند بسیار باریک و تغییر فرکانس کم به عنوان منبع نور، تشخیص ارتعاش را بر روی یک فیبر سنجش ۱۲ کیلومتری با وضوح فضایی ۱۰۰ متر انجام دادند. در سال ۲۰۰۹، لی و همکاران [۱۰] فناوری OTDR را با فناوری P-OTDR ترکیب کردند تا تشخیص اختلال را با فیبر سنجش ۱۴ کیلومتری و دقت موقعیت‌یابی ۵۰ متری انجام دهند. سپس تقویت‌کننده عملیاتی رامان دوطرفه با سیستم OTDR برد بلند ترکیب شد. این ترکیب، تلفات توان نور پراکنده ناشی از تلفات فیبر را جبران کرده و یک سیستم OTDR برد بلند را محقق ساخت. این سیستم دارای فاصله سنجش ۷۴ کیلومتر و وضوح فضایی ۲۰ متر است. در سال ۲۰۱۳، وانگ و همکاران [۱۱] یک سنسور ارتعاش فیبر نوری توزیع‌شده مبتنی بر تداخل دو پرتو

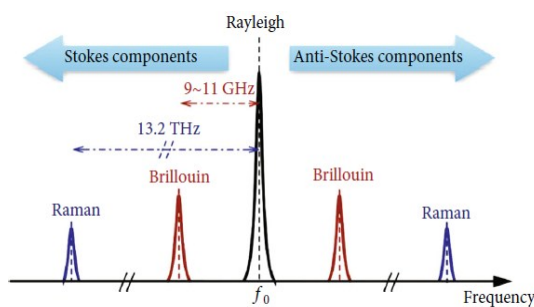
پیشنهاد کردند. بر اساس طول فیبر سنجش ۵ کیلومتر، وضوح فضایی و نسبت سیگنال به نویز سیستم به ترتیب به ۲۰ متر و ۸.۵ دسی‌بل رسید. روش‌های متعددی برای آشکارسازی و مکان‌یابی تغییرات دینامیکی در فیبر نوری پیشنهاد شده‌اند که از جمله می‌توان به روش‌های مبتنی بر تفرق نور Brillouin، تداخل‌سنجی و بازتاب‌سنجی نوری در حوزه زمان (OTDR) اشاره کرد. روش OTDR به دلیل سادگی، قابلیت تشخیص دقیق مکان و امکان استفاده در فواصل طولانی، یکی از پرکاربردترین روش‌هاست. با این حال، چالش‌های اصلی این روش‌ها شامل حساسیت کم نسبت به تغییرات کوچک، نویز بالا و دقت مکانی محدود است.

در تحقیقات پیشین، از تکنیک‌های مختلفی مانند میانگین‌گیری سیگنال، فیلترهای دیجیتال و الگوریتم‌های پردازش سیگنال پیشرفته برای بهبود عملکرد OTDR استفاده شده است. برخی مطالعات از الگوریتم‌های مبتنی بر تبدیل فوریه یا ویولت برای کاهش نویز و افزایش دقت استفاده کرده‌اند. با این حال، این روش‌ها معمولاً نیازمند محاسبات پیچیده و زمان‌بر هستند و در برخی موارد، بهبود قابل توجهی در نسبت سیگنال به نویز (SNR) ایجاد نمی‌کنند.

در این تحقیق، یک روش نوین برای آشکارسازی و مکان‌یابی تغییرات دینامیکی در فیبر نوری ارائه شده است که مبتنی بر چیدمان OTDR و الگوریتم Boxcar Averager بهبود یافته تفاضلی است. نوآوری اصلی این تحقیق در موارد زیر خلاصه می‌شود: ۱- استفاده از الگوریتم Boxcar Averager بهبود یافته تفاضلی: این الگوریتم با کاهش نویز و افزایش نسبت سیگنال به نویز (SNR) به میزان ۱۰ دسی‌بل، امکان تشخیص تغییرات کوچک و دینامیکی مانند جابجایی، فشار و لرزش را فراهم می‌کند. این بهبود در مقایسه با روش‌های سنتی، دقت مکانی و حساسیت سیستم را به طور قابل توجهی افزایش می‌دهد.

۲- طراحی مدار راه‌انداز لیزر با پالس‌های ۲۰ نانوثانیه: این طراحی باعث افزایش دقت زمانی و مکانی سیستم شده و امکان تشخیص تغییرات موضعی در ضریب شکست، طول فیبر و تلفات نوری را فراهم می‌کند. ۳- پردازش سیگنال با نرم‌افزار LabView: با استفاده از این نرم‌افزار، سیگنال‌های دریافتی از OTDR به صورت بلادرنگ پردازش می‌شوند و الگوریتم میانگین‌گیر پنجره‌ای برای حذف نویز و استخراج سیگنال اصلی به کار گرفته می‌شود.

در حوزه جنگ الکترونیک، کسب اطلاعات، آشکارسازی، مکان‌یابی و رهگیری اهداف از مباحث حیاتی در بخش پشتیبانی محسوب می‌شود. این روش بهبودیافته نه تنها دقت و حساسیت سیستم‌های مبتنی بر OTDR را افزایش می‌دهد، بلکه با کاهش پیچیدگی محاسباتی، امکان استفاده در کاربردهای بلادرنگ را نیز فراهم می‌کند.



شکل ۱: طیف نور پراکنده شده در فیبر نوری [۱۳]

نور پراکنده شده عمدتاً توسط پراکندگی رایلی، پراکندگی رامان و پراکندگی بریلوئن ایجاد می‌شود. پراکندگی رامان و بریلوئن، پراکندگی‌های غیرخطی هستند که به ترتیب دارای شیفیت فرکانسی حدود ۱۳۰۲ تراهرتز و ۱۱۰۲ گیگاهرتز هستند؛ در حالی که پراکندگی رایلی یک پراکندگی خطی است. توزیع ناهمگن ضریب شکست فیبر باعث ایجاد نور پراکنده رایلی می‌شود که فرکانس آن با فرکانس نور تابشی یکسان است. پراکندگی رایلی ناشی از برخورد کشسان بین نور و ماده است که به عنوان پراکندگی خطی طبقه‌بندی می‌شود و فرکانس نور پراکنده تغییر نمی‌کند. پراکندگی رایلی توسط فیزیکدان معروف بریتانیایی، لرد رایلی کشف و نام‌گذاری شد. هنگامی که طول موج ذرات درون فیبر نوری کمتر از یک‌دهم طول موج نور تابشی باشد، شدت پراکندگی در هر نقطه در جهت انتشار نور متفاوت خواهد بود. شدت نور پراکنده با توان چهارم طول موج نور تابشی نسبت معکوس دارد، نور پراکنده در این حالت مربوط به پراکندگی رایلی است که با ویژگی‌های زیر مشخص می‌شود: ۱. فرکانس پراکندگی رایلی با فرکانس نور تابشی یکسان است. ۲. شدت نور پراکنده رایلی با توان چهارم طول موج نور تابشی نسبت معکوس دارد. این پراکندگی عامل اصلی تلفات در فیبرهای نوری است و با طول موج نور رابطه معکوس دارد که در رابطه ۱ و به‌طور کلی در رابطه ۲ اشاره شده است.

$$I(\lambda) = \frac{1}{\lambda^4} \quad (۱)$$

$$\alpha_R = \frac{A}{\lambda^4} \quad (۲)$$

که در آن  $\alpha_R$  ضریب تضعیف ناشی از پراکندگی رایلی و  $\lambda$  طول موج A یک ثابت که بین ۰٫۷ تا ۰٫۹ دسی‌بل بر کیلومتر بر میکرومتر به توان ۴ می‌باشد که از فرمول R در رابطه ۳ به دست می‌آید.

$$R = \frac{8\pi^3}{3\lambda^4} \left( \frac{n^2 - 1}{n^2 + 2} \right)^2 \quad (۳)$$

این مقاله به پیکربندی و ارزیابی روشی نوین برای آشکارسازی و مکان‌یابی تغییرات دینامیکی در فیبر نوری می‌پردازد. این روش مبتنی بر سیستم OTDR و پردازش سیگنال با استفاده از الگوریتم Boxcar Averager است. سیستم شامل یک مدار لیزر طراحی و ساخته شده است که با یک آمپلی‌فایر و مدار تطبیق امپدانس تقویت می‌شود. پردازش سیگنال‌های دریافتی از OTDR با استفاده از نرم‌افزار LabVIEW انجام شده و از الگوریتم Boxcar Averager برای حذف نویز و استخراج سیگنال اصلی استفاده شده است تا به سیگنال به نویز بالاتری برسیم. در این مقاله، استفاده از بازتاب‌سنجی نوری حوزه زمان (OTDR) در ترکیب با تکنیک‌های پیشرفته پردازش سیگنال، به‌ویژه میانگین‌گیر باکسکار، برای افزایش حساسیت تشخیص و دقت مکان‌یابی در سیستم‌های حسگر فیبر نوری بررسی می‌شود. میانگین‌گیر باکسکار نقش مهمی در بهبود نسبت سیگنال به نویز (SNR) ایفا می‌کند، بنابراین دقت اندازه‌گیری را در محیط‌هایی که با نویز پس‌زمینه قابل توجهی مشخص می‌شوند، افزایش می‌دهد. نشان داده خواهد شد که این تکنیک محدودیت‌های موجود در سیستم‌های حسگر سنتی را هنگام قرار گرفتن در معرض سطوح بالای تداخل کاهش می‌دهد. قابلیت‌های اثبات شده حسگری فیبر نوری FOS در تشخیص دقیق اختلالات فیزیکی ناشی از فشار، جابه‌جایی و ارتعاش دینامیکی، پتانسیل آن‌ها را در جنگ الکترونیک برجسته می‌کند. تحقیقات آتی بر بهینه‌سازی عملکرد سیستم در محیط‌ها و شرایط عملیاتی متنوع متمرکز خواهد بود.

## ۲- اصول عملکردی OTDR

OTDR (بازتاب‌سنج نوری در حوزه زمان) یک ابزار پیشرفته نوری است که برای تحلیل و بررسی فیبرهای نوری استفاده می‌شود. این دستگاه با ارسال پالس‌های کوتاه نور به داخل فیبر و اندازه‌گیری نور بازتاب‌شده و پراکنده‌شده به عنوان تابعی از زمان، اطلاعات دقیقی درباره طول فیبر، تضعیف، تلفات اتصالات و نقص‌ها و تغییرات جزئی حرکتی ارائه می‌دهد. با تحلیل شدت و زمان بازگشت سیگنال‌ها، OTDR قادر است عیوب و ناهنجاری‌ها را در فیبر شناسایی و مکان‌یابی کند. شرح اصول کارکرد OTDR، نحوه تولید پالس‌های نوری، و نحوه تعامل پالس نوری با فیبر نوری در این بخش بیان می‌شود.

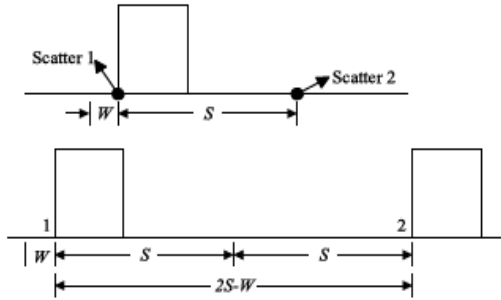
### ۱-۲ پراکندگی رایلی<sup>۱</sup>

هنگامی که نور از داخل فیبر عبور می‌کند، با ذرات ماده دی‌الکتریک فیبر برخورد می‌کند و به صورت کشسان یا غیرکشسان پراکنده می‌شود. فرض کنید یک پرتو نور با فرکانس زاویه‌ای مرکزی مشخص از داخل فیبر عبور کند، طیف پراکندگی حاصل در شکل ۱ نشان داده شده است.

<sup>۱</sup> Rayleigh Scattering

### ۳- شاخص پارامترهای عملکردی

شاخص پارامترها به لیستی از متغیرها اشاره دارد که در طول یک آزمایش یا محاسبه استفاده می‌شوند. در این سیستم، از پالس‌های نوری به عنوان نور تشخیصی استفاده می‌شود و پالس ورودی به شکل مستطیلی است که در شکل ۳ نشان داده شده است. هنگامی که پالس ارسالی از اولین نقطه پراکندگی عبور می‌کند، یک پالس پراکنده ایجاد می‌شود. هنگامی که پالس ارسالی از نقطه دوم پراکندگی عبور می‌کند، پالس پراکنده دیگری ایجاد می‌شود.



شکل ۳- نمایش وضوح فضایی و عرض پالس [۱۵-۱۳]

در این حالت، دو پالس پراکنده وجود دارد و فاصله بین آن‌ها طبق رابطه ۷ محاسبه می‌شود. این فاصله به عواملی مانند فاصله بین دو نقطه پراکندگی و عرض فضایی پالس نور بستگی دارد.

$$\Delta l = 2S - W \quad (7)$$

که در آن  $S$  فاصله بین دو نقطه پراکندگی و  $W$  عرض فضایی پالس نور است. با در نظر گرفتن حداقل فاصله قابل تشخیص بین دو نقطه پراکندگی، کوچک‌ترین فاصله‌ای که می‌توان بین دو نقطه پراکنده تشخیص داد ( $\Delta l=0$ ) با رابطه ۸ دست می‌آید.

$$S_{\min} = \frac{W}{2} \quad (8)$$

این فاصله‌ی حداقل، به عرض فضایی پالس نور وابسته است. عرض فضایی پالس نیز برابر است با حاصل ضرب سرعت انتشار نور در فیبر و عرض زمانی پالس نور. سرعت انتشار نور در فیبر به ضریب شکست فیبر بستگی دارد که مطابق با رابطه ۹ و با تقسیم سرعت نور در خلاء بر ضریب شکست فیبر محاسبه می‌شود.

$$W = vt = \left(\frac{c}{n}\right)t \quad (9)$$

عرض فضایی پالس  $W$  برابر است با حاصل ضرب سرعت انتشار نور  $v$  در فیبر و عرض زمانی پالس نور  $t$  و  $c$  سرعت نور در خلاء است. وضوح فضایی سیستم به پارامترهایی مانند عرض پالس تشخیصی و

۳. شدت نور پراکنده در جهات مختلف متفاوت است و شدت نور پراکنده راییلی به جهت پراکندگی راییلی مرتبط است. این رابطه در معادله ۴ نشان داده شده است:

$$I(\theta) = I_0 * (1 + \cos^2\theta) \quad (4)$$

که در آن  $\theta$  زاویه بین نور پراکنده و نور تابشی است و  $I_0$  شدت نور پراکنده در جهت  $\theta=\pi/2$  است. ۴. درجه قطبش نور پراکنده راییلی به زاویه بین نور پراکنده و نور تابشی بستگی دارد [۱۲].

### ۲-۲ انعکاس فرنل<sup>۱</sup>

انعکاس فرنل ناشی از شکست‌های ناگهانی شاخص شکست در محل اتصالات یا انتهای فیبر است. این پدیده باعث بازتاب نور به سمت ورودی فیبر می‌شود. میزان بازتاب فرنل به اختلاف شاخص شکست بین دو محیط بستگی دارد که در رابطه ۵ بیان شده است.

$$R = \left(\frac{n_1 - n_2}{n_1 + n_2}\right)^2 \quad (5)$$

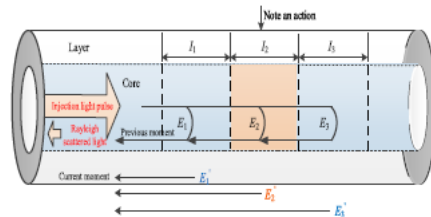
### ۲-۳ تلفات فیبر

تلفات فیبر شامل تلفات ناشی از پراکندگی و جذب است. این تلفات باعث کاهش توان نور در طول فیبر می‌شوند. تلفات فیبر به طول موج نور وابسته است. به‌طور کلی، تلفات در طول موج‌های کوتاه‌تر (مانند ۶۰۰ نانومتر) بیشتر از طول موج‌های بلندتر (مانند ۱۳۱۰ نانومتر یا ۱۵۵۰ نانومتر) است. تلفات کلی فیبر ( $\alpha$ ) به صورت مجموع تلفات پراکندگی و تلفات جذب مطابق رابطه ۶ تعریف می‌شود.

$$\alpha(\lambda) = \alpha_{\text{Rayleigh}}(\lambda) + \alpha_{\text{Absorption}}(\lambda) \quad (6)$$

### ۲-۴ روش OTDR برای حسگری خمش و لرزش

ارسال پالس نوری یک پالس نوری به داخل فیبر ارسال می‌شود. نور بازگشتی ناشی از پراکندگی راییلی و انعکاس فرنل اندازه‌گیری می‌شود. تغییرات در نور بازگشتی، خمش یا لرزش در فیبر باعث تغییر در شدت یا فاز نور بازگشتی مانند شکل ۲ می‌شود. الف) تشخیص و تأثیر خمش: خمش در فیبر باعث تغییر در ساختار فیبر و افزایش تلفات نوری می‌شود (ب) اندازه‌گیری: تغییرات در شدت نور بازگشتی می‌تواند نشان‌دهنده خمش در فیبر باشد. ج) تشخیص و تأثیر لرزش: لرزش در فیبر باعث تغییرات سریع در ساختار فیبر و تغییر در فاز نور بازگشتی می‌شود.



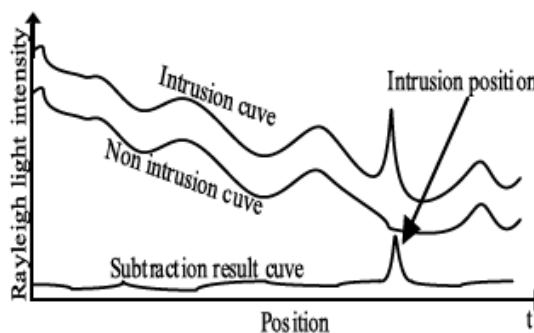
شکل ۲: نور برگشتی در فیبر نوری [۱۵]

<sup>1</sup>Fresnel Reflection

ضریب شکست فیبر بستگی دارد. فرمول وضوح فضایی سیستم به صورت رابطه ۱۰ به دست می‌آید

$$\Delta z = S_{min} = \frac{ct}{2n} \quad (10)$$

که در آن  $\Delta z$  وضوح فضایی را نشان می‌دهد. هرچه عرض پالس تشخیصی کوچک‌تر باشد، وضوح فضایی سیستم بهتر خواهد بود. این وضوح فضایی تعیین می‌کند که سیستم تا چه حد می‌تواند تغییرات کوچک در طول فیبر را تشخیص دهد. به طور کلی، وضوح فضایی سیستم یکی از مهم‌ترین پارامترهای عملکردی در سیستم‌های تشخیص ارتعاش مبتنی بر فیبر نوری است، زیرا تعیین می‌کند که سیستم تا چه حد می‌تواند نقاط اختلال را به طور دقیق مکان‌یابی کند. علاوه بر این، سرعت واقعی انتشار پالس تشخیصی در فیبر نیز با تقسیم سرعت نور در خلاء بر ضریب شکست فیبر محاسبه می‌شود. این سرعت انتشار به سیستم کمک می‌کند تا زمان بازگشت سیگنال‌های پراکنده را به دقت محاسبه کرده و موقعیت نقاط اختلال را مانند شکل ۴ را تعیین کند.



شکل ۴- مکان‌یابی محل اختلال [۱۵]

در نتیجه، این پارامترها به طور مستقیم بر دقت و عملکرد سیستم تشخیص ارتعاش تأثیر می‌گذارند.

#### ۴- معادلات و روابط حاکم بر روش OTDR

۱. رابطه کلی بازتاب نور در OTDR: هنگامی که یک پالس نوری به داخل فیبر نوری ارسال می‌شود، بخشی از نور به دلیل پراکندگی رایلی و بازتاب‌های ناشی از عیوب یا نقاط اتصال، به سمت منبع بازمی‌گردد. توان نور بازتاب‌شده (Pr) به صورت رابطه ۱۱ محاسبه می‌شود:

$$P_r = P_0 \cdot e^{-2\alpha L} \cdot S \quad (11)$$

که در آن  $P_0$  توان نور ارسالی به فیبر و  $\alpha$  ضریب تضعیف فیبر بر حسب dB/km و  $L$  طول فیبر تا نقطه بازتاب و  $S$  ضریب بازتاب یا پراکندگی در نقطه مورد نظر است.

۲. محاسبه فاصله تا نقطه بازتاب: فاصله (d) تا نقطه بازتاب یا اختلال در فیبر با استفاده از زمان بازگشت نور (t) و سرعت نور در فیبر (v) مطابق با رابطه ۱۲ محاسبه می‌شود:

$$d = \frac{v \cdot t}{2} \quad (12)$$

v سرعت نور در فیبر، که از رابطه  $v = c/n$  به دست می‌آید و در آن c سرعت نور در خلاء (3×10<sup>8</sup> m/s) و N ضریب شکست فیبر و t زمان بازگشت نور از نقطه بازتاب تا آشکارساز است.

۳. وضوح فضایی<sup>۱</sup>: وضوح فضایی ( $\Delta z$ ) حداقل فاصله‌ای است که سیستم OTDR می‌تواند بین دو نقطه بازتاب یا اختلال تشخیص دهد. این پارامتر به عرض پالس (W) و سرعت نور در فیبر بستگی دارد، W عرض پالس نوری (بر حسب ثانیه) و v سرعت نور در فیبر می‌باشد. اگر عرض پالس بر حسب طول (Wz) بیان شود، وضوح فضایی به صورت  $\Delta z = \frac{Wz}{2}$  محاسبه می‌شود.

۴. محاسبه تضعیف فیبر<sup>۲</sup>: تضعیف فیبر ( $\alpha$ ) با استفاده از توان نور بازتاب‌شده در دو نقطه مختلف ( $P_2, P_1$ ) و فاصله بین آن‌ها (L) طبق رابطه ۱۳ محاسبه می‌شود:

$$\alpha = \frac{10}{L} \cdot \log_{10} \left( \frac{P_1}{P_2} \right) \quad (13)$$

که در آن  $P_1$  توان نور بازتاب‌شده در نقطه اول و  $P_2$  توان نور بازتاب‌شده در نقطه دوم و L فاصله بین دو نقطه بر حسب کیلومتر است.

۵. توان بازتاب‌شده از نقاط محل اعمال فشار، (Pr) به ضریب بازتاب (R) و توان نور ورودی ( $P_0$ ) بستگی دارد:

$$P_r = P_0 \cdot R \cdot e^{-2\alpha L} \quad (14)$$

۶. محاسبه زمان بازگشت نور

زمان بازگشت نور (t) از نقطه بازتاب تا آشکارساز با استفاده از فاصله (d) و سرعت نور در فیبر (v) مطابق با رابطه ۱۵ محاسبه می‌شود:

$$t = \frac{2d}{v} \quad (15)$$

۷. رابطه بین عرض پالس و وضوح فضایی: عرض پالس (W) تأثیر مستقیمی بر وضوح فضایی ( $\Delta z$ ) دارد. هرچه عرض پالس کوچک‌تر

<sup>2</sup> Attenuation

<sup>1</sup> Spatial Resolution

باشد، وضوح فضایی بهتر است، اما توان نور بازتاب شده نیز کاهش می‌یابد. رابطه بین این دو به صورت  $\Delta z \propto W$  است.

۸. محاسبه توان پراکندگی رایلی

توان پراکندگی رایلی ( $P_s$ ) به توان نور ورودی ( $P_0$ )، ضریب پراکندگی رایلی ( $\alpha_s$ ) و طول فیبر ( $L$ ) بستگی دارد:

$$P_s = P_0 \cdot \alpha_s \cdot e^{-2\alpha L} \quad (16)$$

$\alpha_s$  ضریب پراکندگی رایلی حدود  $(1 - 4) \times 10^{-4}$  است؛ که بصورت کامل تر به شکل رابطه ۱۷ بیان می‌شود.

$$P_s = \frac{1}{2} \cdot v \cdot s \cdot f \cdot c \cdot \Delta t \cdot P_0 \cdot \exp(-2 \cdot \delta \cdot x) \quad (17)$$

#### ۴-۱- عوامل مؤثر بر شدت نور

علاوه بر فرمول‌ها، عوامل دیگری هم بر شدت نور برگشتی تأثیر می‌گذارند:

طول فیبر ( $L$ ): هر چه طول فیبر بیشتر باشد، نور بیشتری پراکنده می‌شود و نور برگشتی افزایش می‌یابد. با این حال، باید توجه داشت که با افزایش طول فیبر، تضعیف نور نیز افزایش می‌یابد که باعث کاهش نور برگشتی خواهد شد؛ بنابراین، طول فیبر یک عامل مؤثر است، اما رابطه مستقیمی با شدت نور برگشتی ندارد و تعادلی بین تضعیف نور و پراکندگی نور وجود دارد.

ضریب تضعیف ( $\alpha$ ): ضریب تضعیف فیبر نشان می‌دهد که چه مقدار از نور در طول فیبر جذب یا پراکنده می‌شود. فیبرهای با ضریب تضعیف بالا نور بیشتری را جذب می‌کنند و نور کمتری به عنوان پراکندگی رایلی باز می‌گردد.

ضریب شکست و نوع فیبر: تغییرات در ساختار فیبر و نوع فیبر (مانند فیبر تک حالت یا چند حالت) می‌تواند بر نسبت پراکندگی رایلی و در نتیجه بر شدت نور برگشتی تأثیر بگذارد.

دمای محیط: دما نیز می‌تواند بر ضریب شکست و در نتیجه بر میزان پراکندگی رایلی تأثیر بگذارد.

باید توجه داشت که خمش فیبر می‌تواند تغییراتی در ساختار و ضریب شکست ایجاد کرده و در نهایت بر میزان پراکندگی رایلی تأثیر بگذارد.

#### ۵- اصول عملکردی روش پردازشی میانگین گیر boxcar

چیدمان OTDR ابزاری قدرتمند برای تشخیص و مکان‌یابی عیوب و تغییرات در فیبرهای نوری است. این دستگاه با ارسال پالس‌های نوری کوتاه به داخل فیبر و اندازه‌گیری نور بازگشتی پراکنده شده در طول فیبر، پروفایل بازتاب را ثبت می‌کند. هر گونه تغییر در خواص فیبر، مانند تغییر در ضریب شکست ناشی از فشار، جابجایی یا لرزش، باعث تغییر در شدت نور پراکنده شده و در نتیجه ایجاد یک پیک یا تغییر در پروفایل

بازتاب می‌شود. با این حال، نویزهای موجود در سیستم OTDR، از جمله نویز شات و نویز حرارتی، می‌تواند به طور قابل توجهی بر دقت اندازه‌گیری تأثیر گذارد. به منظور کاهش تأثیر این نویزها و افزایش نسبت سیگنال به نویز (SNR)، از روش‌های پردازش سیگنال استفاده می‌شود. یکی از روش‌های مؤثر و رایج، روش میانگین گیر پنجره‌ای boxcar است.

روش میانگین گیر پنجره‌ای یک روش ساده و کارآمد برای میانگین‌گیری سیگنال‌های نویزدار است. در این روش، یک پنجره زمانی (BOXCAR) با عرض ثابت روی سیگنال نویزدار حرکت می‌کند. در هر موقعیت، میانگین مقادیر سیگنال در داخل پنجره محاسبه شده و به عنوان یک نقطه داده در سیگنال میانگین‌گیری شده ثبت می‌شود. با افزایش تعداد میانگین‌گیری‌ها، تأثیر نویزها به طور قابل توجهی کاهش می‌یابد. عرض پنجره BOXCAR پارامتری مهم در این روش است. عرض زیاد پنجره باعث کاهش نویز می‌شود، اما می‌تواند منجر به کاهش رزولوشن زمانی و از دست رفتن جزئیات سیگنال شود. عرض کم پنجره رزولوشن زمانی را افزایش می‌دهد، اما تأثیر کمتری در کاهش نویز دارد. انتخاب مناسب عرض پنجره به خصوصیات سیگنال و میزان نویز بستگی دارد.

در چیدمان پیشنهادی، سیگنال خروجی OTDR به عنوان ورودی به پردازنده میانگین گیر پنجره‌ای داده می‌شود. با تنظیم پارامترهای میانگین گیر پنجره‌ای، مانند عرض پنجره و تعداد میانگین‌گیری‌ها، می‌توان به نسبت سیگنال به نویز مطلوب دست یافت. سیگنال میانگین‌گیری شده نشان دهنده تغییرات در خواص فیبر نوری است. با مقایسه سیگنال میانگین‌گیری شده با سیگنال مرجع (سیگنال OTDR بدون اعمال فشار، جابجایی یا لرزش)، می‌توان تغییرات ناشی از عوامل محیطی را شناسایی و مکان‌یابی کرد. موقعیت مکانی این تغییرات با توجه به زمان تأخیر نور بازگشتی و سرعت نور در فیبر تعیین می‌شود. مزایای استفاده از روش میانگین گیر پنجره‌ای در کنار چیدمان OTDR عبارتند از: سادگی و سرعت بالا؛ این روش نسبتاً ساده بوده و می‌تواند با سرعت بالا اجرا شود.

کاهش نویز و افزایش SNR که باعث بهبود دقت اندازه‌گیری و آشکارسازی تغییرات کوچک در فیبر می‌شود.

مکان‌یابی دقیق با استفاده از زمان تأخیر نور بازگشتی، مکان دقیق تغییرات در فیبر قابل تعیین است.

هزینه پایین که پیاده‌سازی این روش نیاز به تجهیزات پیچیده و گران‌قیمت ندارد.

با این حال، محدودیت‌هایی نیز وجود دارد. به عنوان مثال، انتخاب نامناسب عرض پنجره می‌تواند منجر به کاهش رزولوشن زمانی یا از دست رفتن جزئیات مهم در سیگنال شود. همچنین، این روش برای سیگنال‌های با نویز بسیار بالا ممکن است کارایی چندانی نداشته باشد. در نهایت، استفاده از چیدمان OTDR با روش پردازشی BOXCAR AVERAGER یک روش مؤثر و کارآمد برای آشکارسازی و مکان‌یابی تغییرات در اثر جابجایی، فشار یا لرزش دینامیکی در یک

فیبر نوری است. این روش با سادگی، سرعت بالا و دقت قابل قبول، در کاربردهای مختلف حسگری فیبر نوری قابل استفاده است.

Averager یک تکنیک پردازش سیگنال است که برای بهبود SNR و کاهش نویز در سیگنال‌های تکراری یا متناوب استفاده می‌شود. این روش با میانگین‌گیری از چندین نمونه سیگنال در بازه‌های زمانی مشخص، نویزهای تصادفی را کاهش داده و سیگنال مفید را تقویت می‌کند.

اصول عملکرد و اساس روش Boxcar Averaging بر این است که با میانگین‌گیری از چندین نمونه متوالی از یک سیگنال، مؤلفه‌های تصادفی نویز کاهش یابد، در حالی که مؤلفه‌های ثابت یا آهسته سیگنال حفظ شوند. این روش با استفاده از یک پنجره زمانی (جعبه) با عرض مشخص (L) بر روی سیگنال اصلی اعمال می‌شود. مقدار خروجی، میانگین سیگنال در داخل این پنجره است.

### ۱-۵- روابط ریاضی و معادلات حاکم بر میانگین‌گیر

اگر سیگنال ورودی  $x[n]$  باشد. سیگنال خروجی،  $S[n]$  بعد از اعمال میانگین‌گیری جعبه‌ای به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$S[n] = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} x[n-k] \quad (18)$$

در این فرمول  $S[n]$  مقدار سیگنال خروجی در زمان  $n$  است.

$x[n]$  مقدار سیگنال ورودی در زمان  $n$  است.

$N$  تعداد نمونه‌هایی است که برای میانگین‌گیری استفاده می‌شود.

میانگین‌گیری پیوسته به شکل رابطه ۱۹ بیان می‌شود.

$$A(t) = \frac{1}{L} \int_{t-\frac{L}{2}}^{t+\frac{L}{2}} x(t') dt' \quad (19)$$

در این فرمول:  $A(t)$  مقدار سیگنال خروجی در زمان  $t$  است.

$x(t')$  مقدار سیگنال ورودی در زمان  $t'$  است.  $L$  پهنای پنجره میانگین‌گیری است.

### ۲-۵- مراحل پیاده‌سازی

۱. تعریف پنجره زمانی: انتخاب عرض مناسب پنجره زمانی ( $L$ ) یا تعداد نمونه‌ها ( $N$ ) برای میانگین‌گیری. این انتخاب بر اساس پهنای باند سیگنال و فرکانس نویز انجام می‌شود.

۲. حرکت پنجره زمانی: حرکت دادن پنجره زمانی به‌طور پیوسته بر روی سیگنال ورودی.

۳. میانگین‌گیری: محاسبه میانگین مقدار سیگنال در داخل پنجره زمانی برای هر موقعیت پنجره.

۴. خروجی سیگنال: ایجاد سیگنال خروجی که از میانگین مقادیر محاسبه شده در هر مرحله تشکیل شده است.

مزایای این روش در پردازش سیگنال کاهش نویز، کاهش قابل توجه نویزهای تصادفی است. افزایش نسبت سیگنال به نویز (SNR) با کاهش نویز، SNR بهبود می‌یابد. معایب این روش تأخیر در سیگنال است که به دلیل ماهیت میانگین‌گیری، سیگنال خروجی ممکن است با تأخیر نسبت به سیگنال ورودی همراه باشد. میانگین‌گیری می‌تواند باعث از دست رفتن برخی از جزئیات سیگنال شود، به ویژه اگر تغییرات سریع در سیگنال وجود داشته باشد.

### ۶- روش میانگین‌گیر پنجره‌ای بهبود یافته

در این مقاله یک روش پیشرفته برای پردازش سیگنال OTDR پیشنهاد شده که بر پایه میانگین‌گیری پنجره‌ای تکرار شونده با رویکرد تفاضلی عمل می‌کند. در این روش، به جای یک میانگین‌گیری ساده، روی کل داده‌ها، به صورت متوالی میانگین‌گیری را در هر پالس ارسالی انجام داده و تغییرات نسبت به میانگین قبلی محاسبه می‌شود. این رویکرد این امکان را می‌دهد تا:

با میانگین‌گیری در هر پنجره زمانی (هر پالس)، نویز تصادفی موجود در سیگنال کاهش می‌یابد. با جمع کردن تغییرات (اختلاف بین میانگین جدید و میانگین قبلی)، سیگنال‌های ضعیف ناشی از تغییرات کوچک در فیبر نوری تقویت می‌شوند.

تشخیص تغییرات دینامیکی: با تکرار سریع این فرآیند، تغییرات دینامیکی (به عنوان مثال تغییرات فشار یا خمش) در فیبر نوری با دقت بیشتری قابل تشخیص خواهند بود.

نوآوری‌ها و مزایای این روش، افزایش حساسیت در تشخیص تغییرات کوچک در فیبر نوری است. این امر به دلیل جمع شدن تغییرات و حذف نویزهای تصادفی در هر مرحله است.

به دلیل تکرار سریع فرآیند، این روش می‌تواند تغییرات دینامیکی (تغییرات وابسته به زمان) در فیبر نوری را به‌طور مؤثرتری تشخیص دهد که در روش‌های میانگین‌گیری ساده این امکان وجود ندارد.

کاهش خطاهای ناشی از نویز، با حذف نویز در هر مرحله، خطاهای ناشی از نویز کاهش می‌یابد و دقت اندازه‌گیری افزایش می‌یابد.

ماتریس و فرمول محاسباتی این روش بدین شرح است:

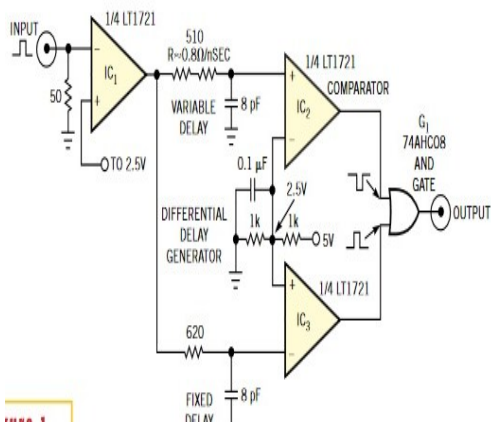
پارامترهای این پردازش:  $x_i(t)$  سیگنال برگشتی از پالس  $i$  در زمان  $t$  عرض پالس،  $T$  دوره تکرار پالس،  $N$  تعداد پالس‌ها برای میانگین‌گیری،  $S_i(t)$  سیگنال میانگین‌گیری شده پالس  $i$  در زمان  $t$ ،  $t$  اختلاف بین میانگین فعلی و قبلی در زمان  $t$ ،  $S$  سیگنال جمع شده در زمان  $t$  در این رابطه جدید می‌باشد. در این روش محاسبه میانگین برای هر پالس با فرمول رابطه ۲۰ بیان می‌شود.

$$S_i(t) = \frac{1}{W} \int_{t-\frac{W}{2}}^{t+\frac{W}{2}} x_i(t') dt' \quad (20)$$

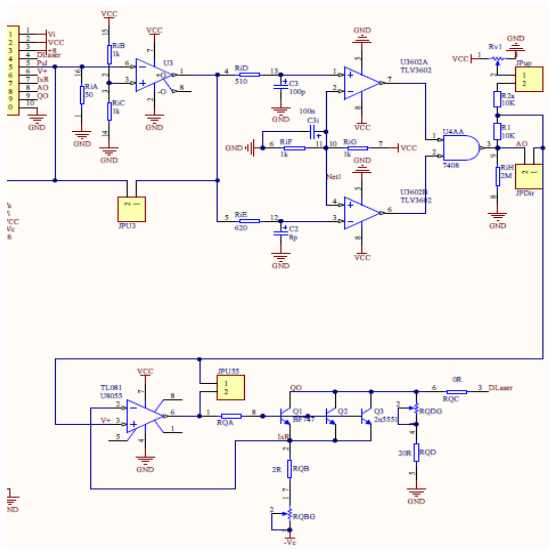
جدول ۱: مشخصات لیزر دیود

واحد	مقادیر	نماد	پارامتر
nm	510 - 530 نانومتر	$\lambda$	طول موج پیک
mW	۲۰ میلی‌وات در ۲۵°C	P	توان خروجی نوری
mA	۱۰۰ میلی‌آمپر	I	جریان کاری
MHz	حداقل ۱۰۰ مگاهرتز	f	مدولاسیون

اصول طراحی این مدار بر اساس مقایسه‌گرهای با پاسخ زمانی بالا طراحی شد که از یک موج مربع ورودی با فرکانس یک کیلو هرتز در ورودی هر مقایسه‌گر با تأخیر زمانی ۲۰ نانو ثانیه استفاده شد و در خروجی با توجه به معکوس بودن یکی از پالس‌ها با گیت AND پالس مورد نظر با تکرار قابل تنظیم ساخته شد. اصول عملکرد این طراحی در شکل ۶ و شماتیک آن در شکل ۷ نشان داده شده است. این منبع نور، پالس‌های نوری را به داخل فیبر نوری ارسال می‌کند.



شکل ۶- اصول عملکرد طراحی تولید پالس



شکل ۷- شماتیک مدار تولید پالس طراحی شده

محاسبه اختلاف میانگین‌ها با رابطه ۲۱ بیان می‌شود.

$$\Delta S_i(t) = S_i(t) - S_{i-1}(t) \quad (21)$$

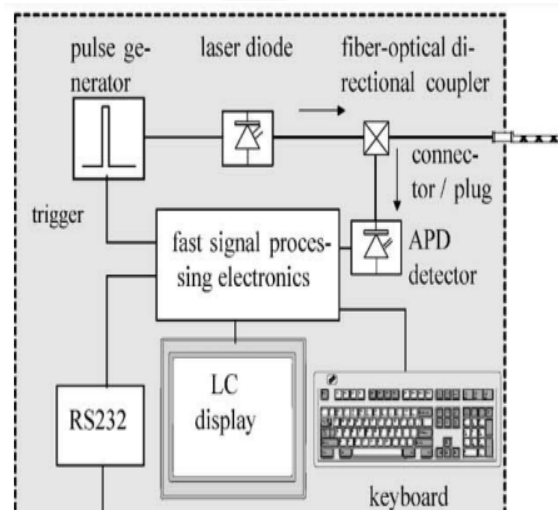
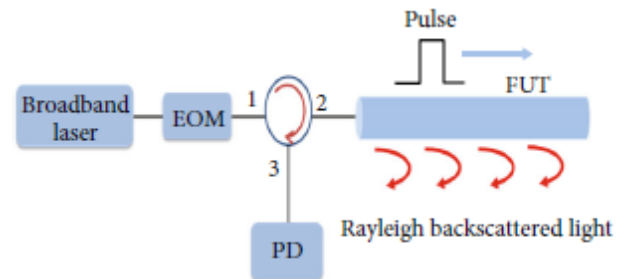
که در آن  $S_i(t)$  برابر اولین میانگین محاسبه شده در پالس اول است.

و جمع تفاضلات با رابطه ۲۲ برابر می‌شود.

$$S_{accumulated}(t) = \sum_{i=1}^N \Delta S_i(t) \quad (22)$$

## ۷- چیدمان و متدولوژی انجام آزمایش

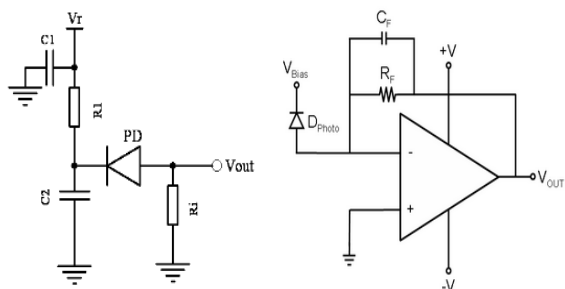
متدولوژی و هدف انجام تحقیق و آزمون حساسیت سنجی فیبر نوری برای آشکارسازی و مکان‌یابی نوسان ناشی از عامل تغییر به روش تحلیل پردازشی پیشنهادی می‌باشد. جهت انجام آزمون، چیدمان بستر آزمایش و تجهیزات مورد استفاده، مطابق با شماتیک شکل ۵ طراحی و ساخته شده است.



شکل ۵- چیدمان سامانه OTDR

تجهیزات بکار رفته در این آزمایش شامل موارد ذیل است: منبع نور پالسی (Pulsed Laser Source): یک لیزر پالسی با عرض پالس ۲۰ نانوثانیه و فرکانس تکرار ۱ کیلوهرتز که طراحی و ساخته شد. یکی از ویژگی‌های این منبع در آستانه روشن بودن با طراحی مدار پیشنهادی بود که زمان روشن شدن لیزر از عوامل خطای آزمایش حذف گردد. لیزر مورد استفاده PLT5 522EA\_Q با توان ۲۰ mw و طول موج ۵۲۰nm و جریان آستانه ۳۰ و حداکثر ۱۰۰ میلی‌آمپر است. در جدول شماره ۱ مشخصات این لیزر دیود بیان شده است.

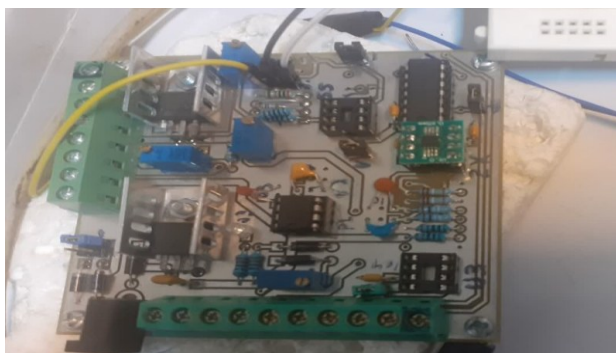
فیبر نوری با طول ۱۰۰ متر برای تست و یک اسپیلیتر ۵۰/۵۰ برای تقسیم نور ارسالی و دریافت سیگنال بازگشتی مورد استفاده قرار گرفته است. فوتو دیود سریع برای دریافت سیگنال بازگشتی که در اینجا از آوالانژ فوتو دیود برای حساسیت بیشتر استفاده شده است به نام Avalanche PhotoDiode MTAPD-06 و در جدول شماره ۲ مشخصاتش بیان شده است.



شکل ۸- مدار تقویت کننده

### ۱-۷ مراحل انجام آزمایش

مدار راه انداز و کنترل کننده جریان و عرض پالس دیود نوری که در شکل ۹ نشان داده شده است، جهت تولید پالس نوری و ارسال به فیبر نوری آماده سازی و فعال می شود. اتصالات فیبر نوری به فوتو دیود و اسپیلیتر به صورت دقیق فراهم شده است.



شکل ۹- مدار تولید و کنترل جریان پالس الکتریکی

پالس های نوری به داخل فیبر مطابق با چیدمان آزمایشگاهی قطعات که در شکل ۱۰ نشان داده شده است، ارسال می شود. سیگنال بازگشتی را با استفاده از فوتو دیود و تقویت کننده دریافت کنید.



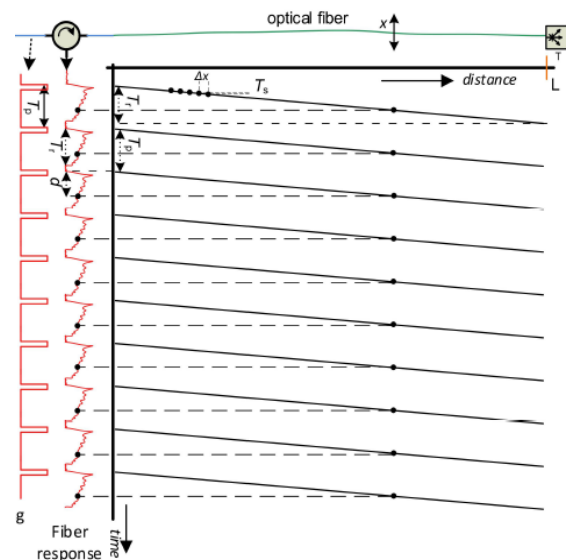
شکل ۱۰- چیدمان آزمایشگاهی otdr

جدول ۲: مشخصات آوالانژ فوتو دیود		
توضیحات	مقدار	پارامتر
مدت زمان افزایش سیگنال از ۱۰٪ به ۹۰٪ مقدار نهایی.	۰.۳ نانوثانیه	زمان صعود
فرکانس سیگنالی که دیود می تواند با آن کار کند.	۱ مگاهرتز	فرکانس کاری
مقاومت متصل به خروجی دیود.	۵۰ اهم	مقاومت بار (RL)
طول موج نوری که دیود به آن حساس است. جریان دیود در تاریکی (بدون نور).	۸۰۰ نانومتر	طول موج (λ)
بهره داخلی دیود آوالانژ. مناسب برای کاربردهای پرسرعت. برای تشخیص سیگنال های ضعیف.	۰.۰۲ نانوامپر	جریان تاریک (ID)
بهبود پاسخ فرکانسی و کاهش نویز تقویت سیگنال های ضعیف.	۱۰۰M	بهره (Gain)
بهبود پاسخ فرکانسی و کاهش نویز تقویت سیگنال های ضعیف.	۰.۳ نانوثانیه	زمان پاسخ
بهبود پاسخ فرکانسی و کاهش نویز تقویت سیگنال های ضعیف.	Ultra Low Noise	نویز بسیار کم
بهبود پاسخ فرکانسی و کاهش نویز تقویت سیگنال های ضعیف.	Low Capacitance	ظرفیت خازنی پایین
بهبود پاسخ فرکانسی و کاهش نویز تقویت سیگنال های ضعیف.	High Gain	بهره بالا

تقویت کننده ترانس امپدانس (TIA) نیز جهت تبدیل جریان به ولتاژ و تقویت با گین بالا طراحی و ساخته شد. در شکل ۸ مدار آن بیان شده است. سیستم داده برداری، اسپیلوسکوپ و نرم افزار داده برداری و پردازش سیگنال نیز تأمین و کد نویسی شده است.

## ۷-۲- پردازش سیگنال داده حسگر

با توجه به اصول مطرح شده در روش OTDR و میانگین‌گیری تفاضلی و عرض پالس ۲۰ نانو ثانیه و طول فیبر نور ۱۰۰ متر ما با رزولیشن ۲ متر پالس را با فرکانس تکرار ۱ کیلو هرتز ارسال کرده و با روش ذکر شده در هر نقطه تفاضل صورت می‌گیرد تا کمترین تغییر و فشار در مکان به دست آمده از رابطه سرعت و زمان رفت و برگشت سیگنال، آشکار و موقعیت‌یابی شود. شکل ۱۱ به صورت گرافیکی این ارسال پالس که طول فیبر به شکل افقی و پاسخ پالس نوری در محور عمودی است را نشان می‌دهد.



شکل ۱۱- طول فیبر به شکل افقی و پاسخ پالس نوری در محور عمودی

با توجه به تعداد تکرار در پردازش سیگنال عوامل مؤثر بر سیگنال به نویز در جدول ۳ نشان داده شده است.

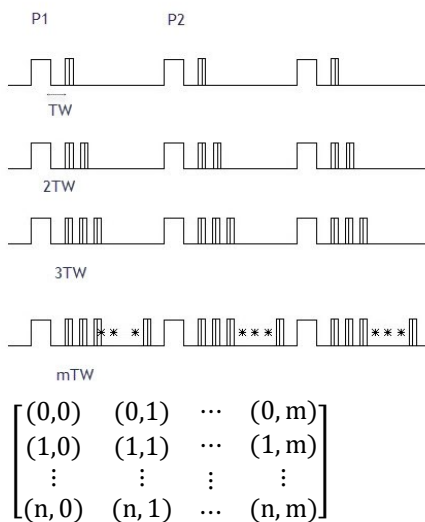
جدول ۳- عوامل مؤثر بر سیگنال به نویز		
پارامتر	شرح	اثر
پهنای پنجره	تعیین اندازه و	SNR با
میانگین‌گیری	موقعیت پنجره	افزایش پهنای
	میانگین‌گیری	پنجره بهبود
		می‌یابد
دوره‌های	تعداد نمونه‌هایی که	SNR به نسبت
میانگین‌گیری (N)	میانگین‌گیری روی	جذر N بهبود
	آن‌ها انجام می‌شود	می‌یابد به اندازه
		$\sqrt{N}$

نسبت SNR در این روش به نسبت جذر N بهبود می‌یابد ( $\sqrt{N}$ ) که در جدول ۴ مقادیر محاسباتی نشان داده شده است.

جدول ۴: سیگنال به نویز بهبود یافته

SNR نمونه	SNR نمونه	SNR اولیه	توان نویز (mW)	توان سیگنال (mW)	شرایط
۱۰۰	۱۰	-۳۰.۰۱	۲۰	۱۰	نویز بالا
۱۷	۱۰.۱۶	۷	۱۰	۵۰	نویز متوسط

ارسال پالس و ماتریس داده به دست آمده در شکل ۱۲ نشان داده شده است

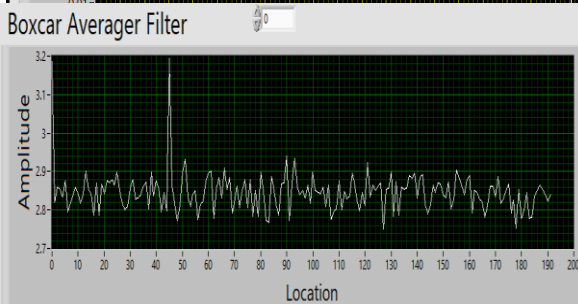
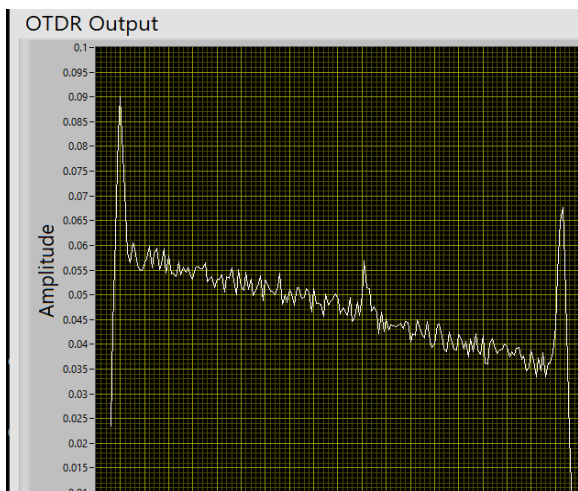


شکل ۱۲- ارسال پالس و ماتریس داده

در این شکل n تعداد پنجره (۵۰ تا در ۱۰۰ متر طول فیبر) رزولیشن مکانی و m تعداد میانگین‌گیری برای هر پنجره (۱۰۰۰) است. فلوجارت و روش محاسباتی به صورت کلی در شکل ۱۳ ترسیم گردیده است.

**مراحل پیاده‌سازی روش پردازشی پیشنهادی**

- تعریف پنجره زمانی.
- حرکت پنجره روی سیگنال.
- محاسبه میانگین در هر موقعیت.
- تفاضل میانگین فعلی و قبلی.
- جمع اختلافات برای تشخیص تغییرات دینامیکی

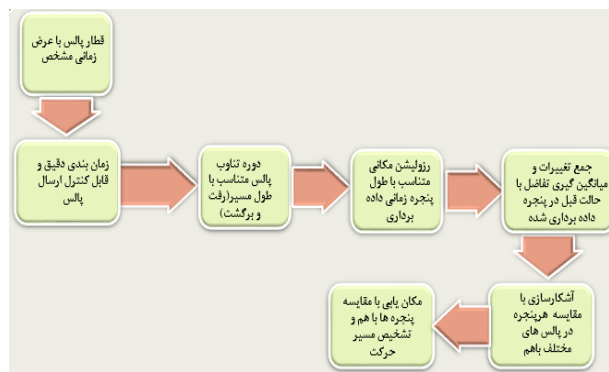


شکل ۱۵- سیگنال به نویز منفی در خروجی سیستم OTDR ثبت شده - آشکار سازی و مکان یابی سیگنال خروجی پردازش شده

### ۹- نتیجه گیری

این مطالعه نشان داد که سیستم پیشنهادی مبتنی بر چیدمان OTDR و الگوریتم پردازشی Boxcar Averager بهبود یافته تفاضلی، قابلیت تشخیص تغییرات دینامیکی کوچک در فیبر نوری را با دقت بالا فراهم می کند. نتایج تجربی حاکی از آن است که حتی تغییرات کوچک در دامنه سیگنال (ناشی از خمش های میکرونی فیبر) به طور مؤثری آشکار و مکان یابی می شوند. این سیستم با استفاده از تقویت کننده تفاضلی و پردازش سیگنال پیشرفته، سیگنال های ضعیف بازگشتی را به ولتاژهای قابل اندازه گیری تبدیل کرده و نسبت سیگنال به نویز (SNR) را تا ۱۰ دسی بل بهبود بخشید.

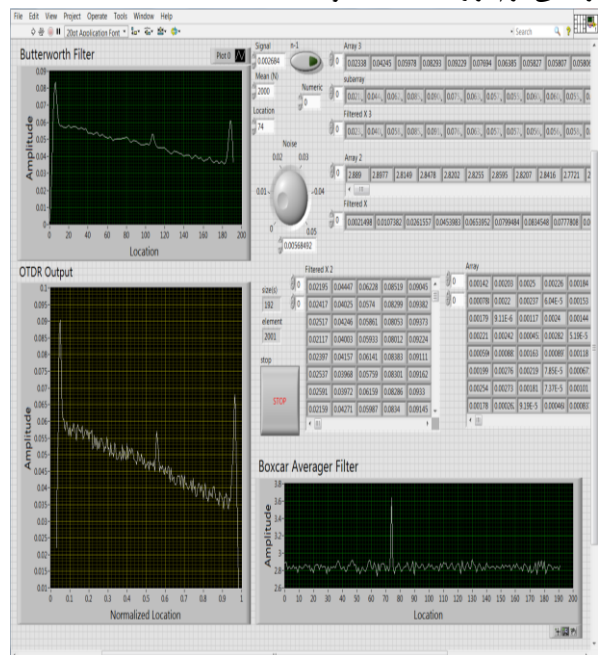
علاوه بر این، آزمایش های انجام شده بر روی فیبر نوری تحت شرایط ارتعاش و تغییرات دینامیکی با دامنه حرکتی حداقل ۵۰ میکرومتر، نشان داد که سیستم قادر به تشخیص و استخراج مشخصات فرکانسی پدیده های دینامیکی با دقت بالا است. این قابلیت، حتی در شرایطی که نسبت سیگنال به نویز منفی باشد، نیز تأیید شد. کاربردهای عملی این سیستم شامل نظارت بر سازه ها، امنیت پیرامونی و پایش تغییرات محیطی است. به طور خاص، این روش می تواند برای آشکار سازی و مکان یابی عوامل محرک بیرونی (مانند فشار یا ارتعاش) در فیبرهای نوری مدفون در خاک یا سایر محیط های پیچیده مورد استفاده قرار گیرد. این ویژگی، سیستم پیشنهادی را به عنوان یک ابزار قدرتمند در حوزه های نظامی، امنیتی و مهندسی عمران مطرح می کند.



شکل ۱۳- فلوجارت و روش محاسباتی به صورت کلی

### ۸- نتایج و ارزیابی

با این روش بهینه شده در پردازش سیگنال در چیدمان حسگری فیبر نوری، موقعیت سیگنال های بسیار ضعیف بر اثر فشار و جابجایی های میکرونی، مکان یابی و شناسایی می گردد و مدارات الکترونیکی طراحی شده اثرات خطای آستانه لیزر جهت روشن شدن و عدم حفاظت در برابر افزایش جریان ناگهانی را به حداقل رسانده است. یک نمونه از مکان یابی و افزایش دامنه سیگنال پردازشی بر اثر اعمال میان گیر گیر پنجره های تفاضلی در شکل ۱۴ نشان داده شده است که دامنه نویز از سیگنال بیشتر بوده ولی سیگنال آشکار شده است. این برنامه در محیط گرافیکی نرم افزار LabView نوشته شده است.



شکل ۱۴- نمایی از نرم افزار و سیگنال آشکار شده با سیگنال به نویز منفی

در شکل ۱۵ سیگنال به نویز منفی در خروجی سیستم در OTDR ثبت شده است که سیگنال در نقطه ۴۵ متری قابل تشخیص نیست. با روش پردازشی جدید ارائه شده در این مقاله، سیگنال بعد از پردازش Boxcar Averager تفاضلی، آشکار شده و مکان یابی صورت پذیرفته است.

[15] A. Abdallah, M. M. Fouad, and H. N. Ahmed, "Low-cost real-time fiber optic sensor for intrusion detection," *Sensor Review*, vol. 41, no. 3, pp. 234-240, 2021

در مجموع، این تحقیق گامی مهم در جهت بهبود حساسیت و دقت سیستم‌های مبتنی بر OTDR برای تشخیص تغییرات دینامیکی است و پتانسیل بالایی برای کاربرد در محیط‌های عملیاتی پیچیده دارد. تحقیقات آتی می‌تواند بر بهینه‌سازی بیشتر سیستم، افزایش دامنه تشخیص و کاهش هزینه‌های پیاده‌سازی متمرکز شود.

## مراجع

[1] قزل ایاغ، محمد حسین، طالب پور اردکانی، محسن، گودرزی، حسین، & پاکدل آذر، امید. (۱۴۰۲). حسگری و آشکارسازی تغییرات در اثر جابجایی، فشار یا لرزش دینامیکی در یک فیبر نوری بر مبنای اسپیکلگرام فیبری. پدافند الکترونیکی و سایبری، ۱۱(۳)، ۸۹-۹۹.

[2] L. Y-J and L. Fang, "Design and implementation of fiber-optic vibration positioning system based on FPGA," *Appl. Electron. Technique*, vol. 44, no. 10, pp. 60-63, 2018.

[3] Z. Yang and S. Sun, "The signal identification of optical fiber perimeter security system based on wavelet energy entropy," *J. Optoelectron.Laser*, vol. 27, no. 12, pp. 1328-1333, Dec. 2016.

[4] H. Wu, J. Wang, and B. Jia, "Parametric modeling in distributed optical fiber vibration sensing system for position determination," *Opt. Eng.*, vol. 55, no. 4, Apr. 2016, Art. no. 046104.

[5] A. H. Hartog, M. P. Gold, and A. P. Leach, "Optical time-domain reflectometry," *Appl. Opt.*, vol. 16, no. 9, pp. 2375-2379, 1977.

[6] H. F. Taylor and C. E. Lee, "Apparatus and method for fiber optic intrusion sensing," U.S. Patent 5 194 847, Mar. 16, 1993.

[7] R. Juskaitis et al., "Interferometry with Rayleigh back scattering in a single-mode optical fiber," *Opt. Lett.*, vol. 19, no. 3, p. 225, 1994.

[8] K. Nam Choi and H. F. Taylor, "Spectrally stable er-fiber laser for application in phase-sensitive optical time-domain reflectometry," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 15, no. 3, pp. 386-388, Mar. 2003.

[9] J. C. Juarez, E. W. Maier, K. Nam Choi, and H. F. Taylor, "Distributed fiber-optic intrusion sensor system," *J. Lightw. Technol.*, vol. 23, no. 6, pp. 2081-2087, Jun. 2005.

[10] L. J-Z et al., "A distributed optical fiber perturbation sensor system based on the combination of -OTDR and POTR," *Photon. J.*, vol. 38, no. 5, pp. 1113-11011, 2009.

[11] J. Wang et al., "Phase-sensitive optical time-domain reflectometer based on bidirectional Raman amplification," *J. Phys.*, vol. 62, no. 4, pp. 224-228, 2013.

[12] Z.-F. Sheng, *Research on Ultra-Long Perimeter Fiber Optic Early Warning System Based on -OTDR and MZI Composite*. Beijing, China: Beijing Jiaotong Univ., 2016.

[13] Y. Wang, X. Zhang, and L. Chen, "A Comprehensive Study of Optical Fiber Acoustic Sensing," *IEEE Access*, vol. 7, pp. 123456-123465, June 2019.

[14] A. T. Kurzych and L. R. Jaroszewicz, "Vibration sensing with the optical fibre Mach-Zehnder interferometer," *Opto-Electronics Review*, vol. 31, no 2 pp. 123-130, 2023.