



Sensing and detecting changes due to displacement, pressure, or dynamic vibration in an optical fiber, based on fiber Specklegram

M. Ghezel Ayagh ^{1*}, M.Talebpour Ardakani ², H. goodarzi³, O.pakdel azar⁴

Associate Professor, Imam Hossein University, Tehran, Iran

((Received: 2023/04/06, Revised: 2023/07/17, Accepted: 2023/08/03, Published: 2023/07/06))

DOR: [https://dorl.net/dor/ 20.1001.1.23224347.1402.11.3.9.4](https://dorl.net/dor/20.1001.1.23224347.1402.11.3.9.4)

Abstract:

In the field of electronic warfare, acquiring information, detecting, localization, and tracking the target is one of the most important topics in the support sector. Concealment and anti-jamming are significant needs in this sector. This research, by designing and analyzing the radiation-free structure of optical fiber sensing, took advantage of the property of the formation of speckle light spots in the output of the multi-mode optical fiber, and in addition to detecting the deformation of the optical fiber, which can be due to pressure or displacement, By processing the output signal of a photodiode placed at a suitable distance from the end of the fiber, the dynamic changes caused by mechanical vibration was detected and measured. In addition to the frequency, the vibration amplitude is also extracted. In this research, dynamic change was applied to a part of the optical fiber length by using a shaker drive device that can be controlled in terms of amplitude and frequency, and the signal output after amplification and filtering was detected and identified. The frequency range from 5 to 91 Hz and the displacement range of the fiber from 50 μm to above were tested. The frequency and amplitude of the shaker correspond to the output electrical signal, and the sensitivity was studied based on the fiber Specklegram. The detection and extraction of the frequency parameter of the mechanical stimulus and the displacement of the fiber through the processing of the speckle spots at the end of the optical fiber along with the sensitivity measurement towards the amplitude and low frequency are reported in this article.

Keywords: Optical fiber sensor, speckle pattern, dynamic change detection, Multimode fiber.

This article is an open-access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license.

Publisher: Imam Hussein University

Authors



*Corresponding Author Email: ghezel@gmail.com

حسگری و آشکارسازی تغییرات در اثر جابجایی، فشار یا لرزش دینامیکی در یک فیبر نوری بر مبنای اسپکلگرام فیبری

محمدحسین قزل‌ایاغ^{۱*}، محسن طالب‌پور اردکانی^۲، امید پاکدل آذر^۳، حسین گودرزی^۴

۱- دانشیار، ۲- دانشجوی دکترا، ۳- استادیار، ۴- مربی، دانشگاه جامع امام حسین (ع)، تهران، ایران

(دریافت: ۱۴۰۲/۰۱/۱۷، بازنگری: ۱۴۰۲/۰۴/۲۶، پذیرش: ۱۴۰۲/۰۵/۱۲، انتشار: ۱۴۰۲/۰۷/۰۶)

DOR: <https://dorl.net/dor/20.1001.1.23224347.1402.11.3.9.4>



* این مقاله یک مقاله با دسترسی آزاد است که تحت شرایط و ضوابط مجوز (CC BY) Creative Commons Attribution توزیع شده است.

نویسندگان ©

ناشر: دانشگاه جامع امام حسین (ع)

چکیده

در حوزه جنگ الکترونیک، کسب اطلاعات، آشکارسازی، مکان‌یابی و رهگیری هدف، از مباحث مهم و حائز اهمیت در بخش پشتیبانی می‌باشد. پنهان‌سازی و ضد جمینگ بودن از نیازهای قابل توجه در این بخش می‌باشد. در این تحقیق، با طراحی و تحلیل ساختار بدون تشعشع حسگری فیبر نوری، از خاصیت تشکیل لکه‌های نوری اسپکل در خروجی فیبر نوری چند حالتی (مالتی مد) بهره گرفته و علاوه بر تشخیص تغییر شکل فیبر نوری که می‌تواند بر اثر فشار یا جابجایی باشد، با پردازش سیگنال خروجی یک فوتو دیود که در فاصله مناسبی از انتهای فیبر قرار گرفته، تغییرات دینامیکی ناشی از ارتعاش مکانیکی را تشخیص داده و علاوه بر فرکانس، دامنه ارتعاش نیز استخراج شده است. در این تحقیق با استفاده از یک دستگاه محرک شیکر قابل کنترل از نظر دامنه و فرکانس، به بخشی از طول فیبر نوری تغییر دینامیکی اعمال شد و خروجی سیگنال پس از تقویت و فیلتر از نظر دامنه و فرکانس، آشکارسازی و شناسایی گردید. محدوده فرکانسی از ۵ تا ۹۱ هرتز و دامنه جابجایی فیبر از ۵۰ میکرومتر به بالا مورد آزمایش قرار گرفت. فرکانس و دامنه شیکر با سیگنال الکتریکی خروجی مطابقت دارد و حساسیت سنجی بر مبنای اسپکلگرام فیبری مورد مطالعه قرار گرفت. تشخیص، آشکارسازی و استخراج پارامتر فرکانسی محرک مکانیکی و میزان جابجایی فیبر از طریق پردازش لکه‌های اسپکل در انتهای فیبر نوری به همراه حساسیت سنجی نسبت به دامنه و فرکانس کم در این مقاله گزارش شده است.

کلیدواژه‌ها: حسگر فیبر نوری، الگوی لکه‌ای اسپکل، آشکارسازی تغییرات دینامیکی، فیبر چند حالتی

۱. مقدمه

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 تشخیص می‌دهند که در اقدام جهت نفوذ اجتناب‌ناپذیر است [۱-۳]. نوع دیگری از حسگر فیبر نوری تغییر در حالت قطبش نور را در اثر تغییر حالت فیبر نوری چندحالتی تشخیص می‌دهد. حسگر فیبر نوری با استفاده از الگوی لکه‌ای اسپکل^۱

تاکنون 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

ناشی از تداخل بین حالت‌های انتشار، حساسیت بسیار بالایی دارد [۴-۵]. در سال‌های اخیر حسگرهای فیبر نوری به دلیل مزایا و قابلیت‌های متعددشان در کاربردهای استراتژیک مختلفی از جمله پایش سلامت سازه‌ها، خطوط انتقال (نفت، گاز، آب و برق)، مرزداری و آشکارسازی تردد و ورود، بکار گرفته می‌شوند.

از قابلیت‌های حسگرهای فیبر نوری به‌عنوان نمونه می‌توان به حساسیت بالا، قابلیت پایش بلادرنگ، حسگری چند متغیره، دامنه دینامیکی گسترده، مصونیت در برابر تداخلات الکترومغناطیسی، مقاومت در برابر خوردگی، پایش محیطی^۱، 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 دو دسته‌ی گسسته (نقطه‌ای) و توزیع‌شده تقسیم‌بندی کرد. در کاربرد مرزداری، مکان‌یابی تغییرات دینامیکی و آشکارسازی تردد، بیشتر، حسگرهای توزیع‌شده فیبر نوری، پیشنهاد می‌شوند. برای نظارت از راه دور بر امواج صوتی ایجادشده توسط اختلالات خارجی، سیستم حسگر آکوستیک فیبر نوری مناسب است. [۱-۲]. در بخش پشتیبانی در حوزه جنگ الکترونیک، کسب اطلاعات، آشکارسازی، مکان‌یابی^۲ و رهگیری هدف؛ از مباحث مهم و حائز اهمیت می‌باشد که قابلیت ضد جمینگ بودن و پنهان‌سازی در حوزه حسگر فیبر نوری از نکات قابل توجه در این بخش می‌باشد که می‌توان با طراحی و تحلیل ساختار بدون تشعشع (به‌نوعی غیرفعال^۳) در حوزه حسگری فیبر نوری، تغییرات دینامیکی ناشی از ارتعاش مکانیکی را تشخیص داده و به این هدف نائل شد. حسگرهای فیبر نوری به دلیل مزیت‌هایی از جمله دقت و حساسیت بالا، کم‌مصرف بودن، اندازه‌ی کوچک، مصونیت در برابر تداخلات الکترومغناطیسی، با قابلیت عدم تشعشع، سرعت پاسخ‌دهی بالا و توانایی اندازه‌گیری چند پارامتر به‌صورت هم‌زمان، می‌توانند انتخاب خوبی جهت سنجش تغییرات، اعم از فشار، دینامیک و حرکت، موج آکوستیک و پارامترهای محیطی باشند. تحقیقات

اخیر نشان می‌دهد که سنجش فیبر نوری صوتی توزیع شده^۴ به‌طور گسترده در بسیاری از سامانه‌های نظارت بر امنیت 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 [۱-۳]. 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 الکتریکی یا مغناطیسی، به‌صورت زیر خواهد بود:

- ائتلاف پایین سیگنال
- مصونیت در برابر امواج الکترومغناطیسی و خوردگی شیمیایی (از آنجاکه فیبرهای نوری از مواد دی‌الکتریک ساخته شده‌اند لذا حسگرهای فیبر نوری از تداخل‌های 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 الکتریکی 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

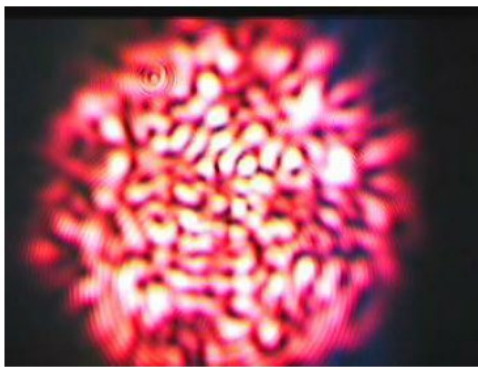
¹ Environmental monitoring

² Localization

³ Passive

در برخی از کاربردها، مانند تصویربرداری با نور همدوس^۷، اسپیکل یک پدیده مزاحم و ناخوشایند است و به دنبال راه‌هایی برای کاهش یا حذف آن هستند. در کاربردهای دیگر، مانند تداخل سنجی یا کاربرد حسگری، از اسپیکل استفاده می‌شود و حداکثر نمودن آن مطلوب می‌باشد.

فیبر چندحالتی از نقطه نظر اپتیک هندسی، پرتوهای مختلف نور ورودی در زوایای مختلف را نسبت به محور کابل فیبر منتشر می‌کنند. بسته به زاویه انتشارشان، پرتوها فواصل مختلفی را طی می‌کنند و در نتیجه با عبور از ورودی به خروجی فیبر دچار تأخیر فازهای مختلفی می‌شوند. تجزیه و تحلیل دقیق‌تر نشان می‌دهد که حالت‌های انتشار بسیاری وجود دارد، و این حالت‌ها با انواع سرعت‌های فاز مختلف منتشر می‌شوند. به این دلایل، نور در هر نقطه روی صفحه خروجی فیبر از مجموع انبوهی از تداخل میدانی تشکیل شده است. اگر تأخیرهای فاز متحمل شده توسط این تداخل‌ها بیش از 2π رادیان متفاوت باشد، و اگر منبع به اندازه کافی همدوس باشد، اثرات تداخل در توزیع شدت در انتهای فیبر دیده می‌شود. شکل (۱) عکسی از اسپیکل نور بیرون آمده از یک فیبر چندحالتی را نشان می‌دهد. [۸-۹]



شکل (۱): تصویری از اسپیکل نور بیرون آمده از یک فیبر چندحالتی [۹]

۲-۱. حسگرهای فیبر اسپیکلگرام (FSS^۸)

حسگرهای فیبر اسپیکلگرام (FSS) دسته‌ای از حسگرهای فیبر نوری هستند که از تجزیه و تحلیل تداخل چندحالتی برای بازیابی اطلاعات در مورد وضعیت موجبر استفاده می‌کنند. هنگامی که یک نور همدوس از طریق یک فیبر چندحالتی منتقل

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. در نهایت دسته‌ی سوم حسگرهای مدوله‌کننده‌ی فاز هستند که بر پایه‌ی تداخل نور عمل می‌کنند و چهار نوع تداخل‌سنج مایکلسون (MI)^۱، ماخ-زندر^۲، ساگاناک (SI)^۳ و فابری-پرو (FPI)^۴ در این دسته آورده شده است. [۴-۵]

۲- (تشریح الگوی لکه‌ای) اسپیکل در فیبرهای چندحالتی^۵

در اوایل دهه ۱۹۶۰ میلادی، زمانی که لیزرهای موج پیوسته برای اولین بار به صورت تجاری در دسترس قرار گرفت، محققانی که با این ابزار کار می‌کردند متوجه پدیده‌ای عجیب در آن زمان شدند. هنگامی که نور لیزر از سطحی مانند کاغذ یا دیوار آزمایشگاه منعکس می‌شود، توسط یک ناظر که به نقطه پراکندگی نگاه می‌کند، یک الگوی دانه‌ای با کنتراست بالا و در مقیاس ریز دیده می‌شود. [۶-۸]

علاوه بر این، اندازه‌گیری شدت بازتاب‌شده از چنین نقطه‌ای نشان داد که این چنین نوساناتی در مقیاس بسیار ریز در فضا وجود دارد، حتی اگر روشنایی نقطه نسبتاً یکدخت به نظر آید. این نوع دانه‌بندی به عنوان لکه یا اسپیکل^۶ شناخته شد. منشأ این نوسانات مشاهده شده، زبری "تصادفی" سطوحی است که نور از آن منعکس می‌شود. در فیبر چندحالتی (MM)، نور هدایت شده در طول فیبر نوری در اثر ناهمگونی‌های ضریب شکست در مرز بین مغزی فیبر و پوشش محافظ، با یکدیگر تداخل می‌کنند، که حاصل آن، یک تصویر یا الگوی لکه‌ای در انتهای خروجی فیبر می‌باشد. [۹] به این روش، آنالیز الگوی لکه‌ای یا تداخل بین وجهی می‌گویند. هرگونه اغتشاش خارجی که بر روی فیبر وارد می‌شود درحالی که نور از آن عبور می‌کند، باعث تغییر تصویر و در نتیجه تشخیص اختلال می‌شود.

^۱Michelson

^۲ Mach-zehnder

^۳ Sagnac

^۴ Fabry-perot

^۵ Multimode Fibers

^۶speckle

^۷ coherent

^۸ Fiber specklegram sensors

می‌شود، یک الگوی تداخل مودها در خروجی تولید می‌شود.

به دلیل تغییرات فاز بین حالت‌های انتشار، از آنجایی که ویژگی‌های مکانی و زمانی میدان لکه تحت تأثیر شرایط هدایت نور قرار می‌گیرد، می‌توان تغییرات اسپکلگرام را با اندازه یک محرک خارجی اعمال شده بر روی فیبر نوری مرتبط کرد. FSS ها حساسیت بسیار بالایی دارند (مقایسه با تداخل‌سنج‌های دو بازویی) و می‌توانند با یک چیدمان نسبتاً ساده پیاده‌سازی شوند. علاوه بر این، می‌توان با استفاده از روش‌های مختلف، سنجش چندگانه یا شبه توزیع شده را انجام داد. [۷-۸]

آشکارسازی سیگنال FSS معمولاً نیاز به استفاده از تکنیک‌های پردازشی دارد، زیرا تغییرات در الگوهای لکه‌ای را نمی‌توان به‌درستی با میانگین ساده شدت نور تعیین کرد.

۳- معادلات و روابط حاکم

هنگامی که نور همدوس به یک فیبر چندحالتی ارسال می‌شود، یک الگوی لکه خروجی در وجه انتهایی فیبر تشکیل می‌شود. این اثر به دلیل تداخل بین حالت‌های منتقل شده از طریق ناحیه هسته ایجاد می‌شود، که تعداد لکه‌های مرتبط با تعداد حالت‌های انتشار است [۱۰]. میدان لکه تحت تأثیر تغییرات فازهای نسبی و توزیع انرژی حالت‌های نور قرار می‌گیرد و باعث ایجاد نوسانات در مکان و شدت نقطه‌های خروجی می‌شود [۸]، بنابراین نویز مودال را ایجاد می‌کند که یک عامل محدودکننده برای سامانه‌های ارتباطی نوری است. اما از سوی دیگر، الگوهای لکه‌ای ویژگی‌های جالبی را از نظر سنجش فیبری نشان می‌دهند، زیرا خواص حالت‌های انتشار را می‌توان توسط محرک‌های خارجی اعمال شده در طول فیبر مشخص کرد. در این حالت، اسپکلگرام در پاسخ به اختلالات حرارتی یا مکانیکی (مانند لرزش) تغییر می‌کند. تغییرات وضعیت فیبر را چون خمش یا ارتعاشات را با الگوی تصویر خروجی می‌توان مرتبط کرد. [۱۱-۱۲]

با توجه به اسپکلگرام خروجی نمایش داده شده بر روی یک صفحه xy ، شدت نور شناسایی شده $I(x, y)$ را می‌توان این‌گونه بیان کرد:

$$I(x, y) = \sum_{m=0}^M \sum_{n=0}^M a_m a_n \exp[j(\phi_m - \phi_n)] \quad (1)$$

که در آن M تعداد مدها، و a و ϕ به ترتیب دامنه و فاز مدهای m یا n ام هستند. با این حال، اگرچه پیکربندی الگوی لکه‌ای تحت تأثیر اعمال محرک‌های خارجی قرار می‌گیرد، میانگین شدت تغییرات قابل توجهی را در وضعیت فیبر نشان نمی‌دهد [۱۳]. از این نظر، فرانسسیس و همکاران [۶] تجزیه و تحلیل میدان لکه را بر اساس ارزیابی حاصل ضرب درونی شدت

نرمال شده اسپکلگرامها ($NIPC^1$)، ارائه داده‌اند.

$$NIPC = \frac{\iint I_0 dx dy}{(\iint I_0^2 dx dy \iint I^2 dx dy)^{\frac{1}{2}}} \quad (2)$$

که $I(x, y)$ و $I_0(x, y)$ شدت برای وضعیت فیبر اندازه‌گیری شده و مرجع، و $0 \leq NIPC \leq 1$ است. با توجه به معادله (۲)، با انحراف الگوی لکه از الگوی مرجع، $NIPC$ کاهش می‌یابد، که امکان کمی کردن تغییرات نسبی در وضعیت فیبر با حساسیت بالا را فراهم می‌کند. از سوی دیگر، این رویکرد محدودیت‌هایی را در مورد محدوده دینامیکی ارائه می‌کند، زیرا مقدار $NIPC$ به دلیل افزایش شدید سیگنال مدولاسیون، به دلیل انحراف فاز مودال و تضعیف نور، با یک مقدار حداقل اشباع می‌شود. [۸-۹]

تعداد حالت‌های پشتیبانی شده توسط یک فیبر چندحالتی با عبارت گام شاخص نشان داده می‌شود:

$$M \approx \frac{2\pi}{\lambda_0} (NA)a \quad (3)$$

که در آن a شعاع هسته فیبر، λ_0 طول موج نور در هوا و NA روزنه عددی فیبر^۲ است. روزنه عددی فیبر، به نوبه خود با ضریب شکست هسته و روکش فیبر مرتبط است:

$$NA \approx n_1 \sqrt{2\Delta} \quad (4)$$

روزنه عددی (NA) یک فیبر به عنوان سینوس بزرگترین زاویه‌ای که یک پرتو تابشی می‌تواند برای بازتاب داخلی کل در هسته داشته باشد تعریف می‌شود که در آن n_1 ضریب شکست هسته است.

$$\Delta = \frac{n_1 - n_2}{n_1} \quad (5)$$

و n_2 ضریب شکست روکش است. در اینجا تقریب مستلزم این فرض است که $D \ll 1$ باشد و بدین ترتیب

$$M = \frac{2\pi n_1 a}{\lambda_0} \sqrt{2\Delta} \quad (6)$$

فیبر دارای نمایه شاخصی است که با رابطه زیر بدست می‌آید [۹]:

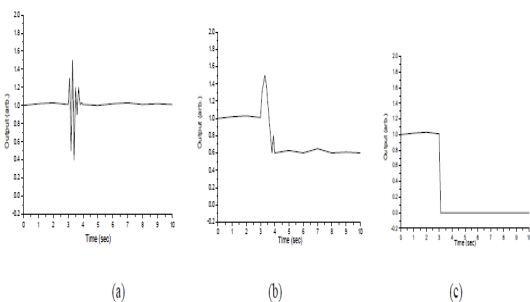
$$n(r) = \begin{cases} n_1 [1 - 2\Delta(r/a)^\alpha]^{1/2} & r < a \\ n_2 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (7)$$

الگوی لکه‌ای اسپکل در انتهای فیبر، در آشکارساز نوری، هیچ تغییری در توان کل را نمایش نخواهد داد. با یک تقریب خوب برای یک فیبر کم تلفات، تمام توان وارد شده به فیبر بدون توجه به وضعیت شرایط محیطی بازیابی می‌شود.

با این حال، اگر آشکارساز، تنها در بخشی از هسته ادغام شود، بخشی از توان خروجی تشخیص داده نمی‌شود و با تغییر الگوی لکه‌ای در انتهای فیبر تحت محرک‌های پیرامونی، نوسان‌هایی در

1 normalized intensity inner product of specklegrams
2 numerical aperture

داده شده است، تغییر می‌کند. هنگامی که محرک، فیبر نوری چندحالتی را تکان می‌دهد، سیگنال خروجی سیگنال‌های تصادفی نشان داده شده در شکل ۳ a را نشان می‌دهد. با این حال، هنگامی که محرک باعث خم شدن فیبر می‌شود، همان‌طور که در شکل ۳ b نشان داده شده است، سطح سیگنال خروجی کاهش می‌یابد. اگر فیبر چندحالتی توسط محرک خارجی قطع شود، خروجی به‌طور کامل ناپدید می‌شود که در شکل ۳ c نشان داده شده است.

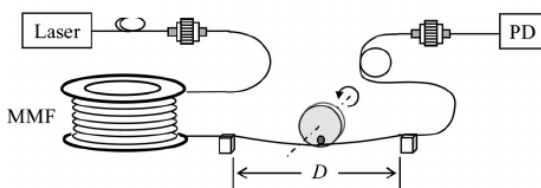


شکل (۳) ویژگی‌های سیگنال‌های حسگر، a تکان دادن فیبر، خم شدن فیبر و c برش فیبر. [۱۲-۱۳]

۴- متدولوژی و روش انجام آزمایش

متدولوژی و هدف انجام تحقیق و آزمون حساسیت سنجی فیبر نوری از منظر میزان دامنه نوسان و فرکانس نوسان ناشی از عامل تغییر و محرک به روش تحلیل لکه‌های نوری اسپیکل می‌باشد.

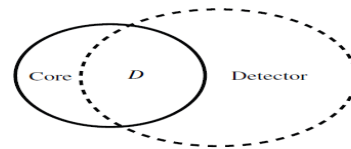
جهت انجام آزمون، چیدمان بستر آزمایش و تجهیزات مورد استفاده، مطابق با شکل (۴) طراحی و ساخته شده است.



شکل (۴) شماتیکی از چیدمان بستر آزمایش [۱۱].

در این چیدمان از یک منبع لیزر ۱۰ میلی وات با طول موج 650nm استفاده شده است که یک کابل فیبر نوری چندحالتی (MM) به عنوان انتقال دهنده نور و حسگر در نظر گرفته می‌شود. در خروجی فیبر نوری، یک فوتو دیود با زمان صعود و نزول ۵۰ ns به‌صورت معکوس بایاس شده است. در مسیر فیبر نوری، عامل محرک توسط یک دستگاه شیکر با قابلیت

توان اندازه‌گیری شده رخ می‌دهد، که جهت کاربرد حسگری از فیبر و اسپیکل مفید است. [۱۴-۱۵].



شکل (۲)- یک توان کل ثابت در داخل هسته منتشر می‌شود که با دایره توپر نشان داده می‌شود. ناحیه حساس به نور آشکارساز با دایره خطچین نشان داده می‌شود. [۹]

هنگامی که محرک بیرونی، تغییراتی در الگوی لکه‌های فیبر نوری چندحالتی ایجاد می‌کند، فیبر نوری تک‌حالتی یا فوتو دیود در نقطه‌ای از خروجی تنها می‌تواند بخش کوچکی از لکه‌ها را دریافت کند.

W ، مجموع توان نوری موجود در ناحیه D از هسته‌ای را که آشکارساز روی آن یکپارچه می‌شود را نشان می‌دهد.

$$W = \iint_D I(x,y) dx dy \quad (8)$$

مجموع توان W_T خروجی از فیبر ثابت است،

$$W_T = \iint_{core} I(x,y) dx dy \quad (9)$$

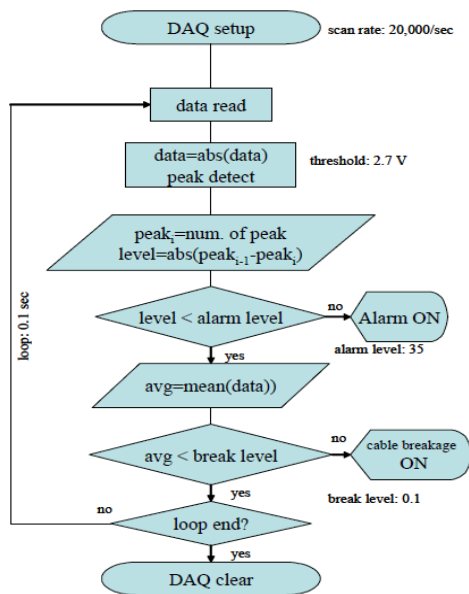
توجه به این نکته ضروری است که اگرچه تغییرات در شرایط محیطی به‌عنوان تغییرات اسپیکل ذکر شده است، اما ناپایداری فرکانس منبع لیزر نیز می‌تواند باعث ایجاد چنین نویزهایی در شرایطی شود. [۹-۱۰]

۳-۱. اغتشاش ارتعاشات دینامیکی و اثرات آن بر روی

اسپیکل فیبر نوری

اگر محرک بیرونی مقداری اغتشاش کوچک مثل خم کردن فیبر یا اعمال فشار، روی فیبر ایجاد کند، الگوی لکه تغییر می‌کند. به‌منظور شناسایی، حسگر فیبر نوری باید بتواند تغییر الگوی لکه‌ای ایجاد شده توسط برخی از تحریکات را حس کند. جهت تحقق این هدف می‌توان مقطع یک فیبر نوری چندحالتی با یک فیبر نوری تک‌حالتی در تماس باشد [۱۱-۱۲]. معمولاً قطر فیبر نوری چندحالتی (حدود ۷۰ میکرومتر)، بزرگ‌تر از قطر فیبر نوری تک‌حالتی (حدود ۸ میکرومتر) است. حسگر پیشنهادی، دارای فیبر نوری چندحالتی به‌عنوان فیبر حسگر است. تغییرات در الگوی لکه‌های فیبر نوری چندحالتی توسط محرک بیرونی، ایجاد می‌شود که فیبر نوری تک‌حالتی یا فوتو دیود در نقطه‌ای از خروجی، تنها می‌تواند بخش کوچکی از لکه‌ها را دریافت کند. بنابراین، خروجی نور فیبر نوری همان‌طور که در شکل (۳) نشان

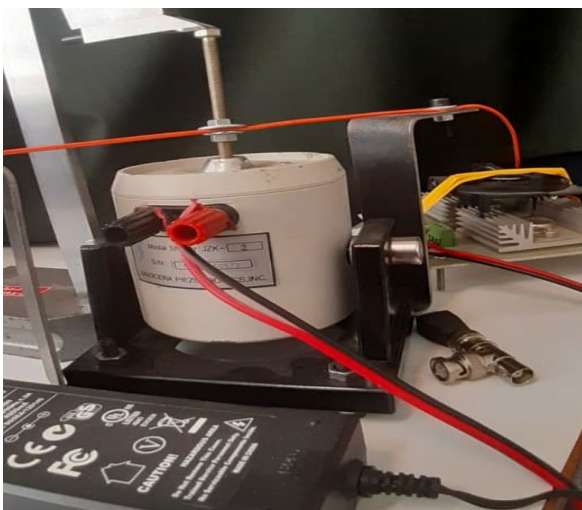
پیک در خروجی می‌شود. مرحله دوم پردازش سیگنال برای تشخیص شکستگی شبکه فیبر نوری است. شکستگی شبکه فیبر نوری را می‌توان به راحتی با مقایسه سطح DC سیگنال دیود با سطح آستانه تشخیص داد. بنابراین، میانگین داده‌های نمونه به دست آمده را با سطح آستانه مقایسه کرده تا سیگنال هشدار برای شکستن فیبر ایجاد شود.



شکل (۵): الگوریتم پردازش سیگنال برای تشخیص محرک بیرونی

۶- نتایج و ارزیابی

در این تحقیق با تشکیل چیدمان آزمایشگاهی، حس‌گری در حوزه جابجایی و ارتعاش مکانیکی با دامنه‌ها و فرکانس‌های مختلف در فیبر نوری چند حالت (مالتی مد) مورد ارزیابی قرار گرفت. همچنین با جابجا کردن محل اعمال محرک، در طول فیبر، اثر بخشی و نتایج خروجی مورد بررسی قرار گرفت. شکل (۶) نحوه کالیبراسیون و حساسیت سنجی فیبر نوری با دستگاه محرک شیکر را نشان می‌دهد.



تنظیم دقیق دامنه و فرکانس، بخشی از فیبر را تحریک می‌کند. فوتو دیود به صورت معکوس بایاس شده و خروجی آن، جهت ثبت تغییرات کوچک در لکه اسپکل، با یک مدار تقویت کننده به برد مبدل آنالوگ به دیجیتال متصل می‌شود. جابجایی قسمتی از فیبر موجب تغییر شکل لکه‌های نوری در انتهای فیبر شده که این تغییر شدت، در بخشی از این لکه نوری اسپکل، توسط فوتو دیود، تبدیل به سیگنال خروجی می‌شود.

خروجی فیبر نوری و اسپکل تشکیل شده به وسیله فوتو دیود PD438 آشکارسازی و پس از تقویت ثبت می‌گردد. فوتو دیود بصورت معکوس بایاس شده تا نسبت به تغییرات نوری و لکه‌های اسپکل، بیشترین حساسیت را داشته و شدت نور به جریان الکتریکی تبدیل شود.

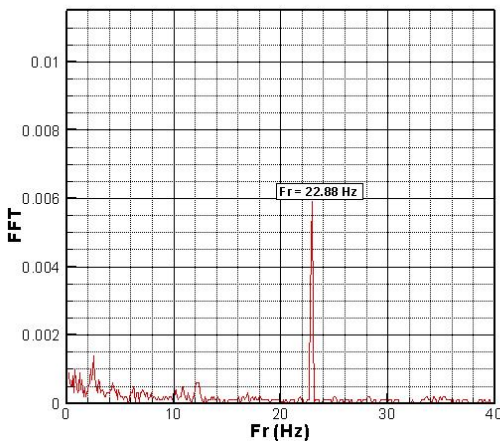
۵- روش‌های پردازش سیگنال داده حسگر

در بخش سخت افزاری، مدار تقویت کننده تفاضلی برای خروجی حسگر فوتو دیود طراحی و ساخته شد تا بتوان سیگنال ناشی از خمش‌ها و نوسانات خیلی کوچک را تقویت کرده و با تقویت سیگنال خروجی، قادر به افزایش سیگنال به نویز و آشکارسازی سیگنال در میان نویز محیطی باشیم.

فوتو دیود در فاصله مناسبی از انتهای فیبر در جعبه تاریک، تنظیم شده و ثابت می‌شود. تغییرات خروجی در لکه نوری فیبر به سیگنال الکتریکی تبدیل شده و سیگنال خروجی فوتو دیود تقویت می‌گردد. با اتصال به برد مبدل آنالوگ به دیجیتال با مشخصات ۱۶ بیت قدرت تفکیک و فرکانس داده برداری ۱۰ کیلو هرتز، داده‌ها جهت پردازش ثبت می‌گردد.

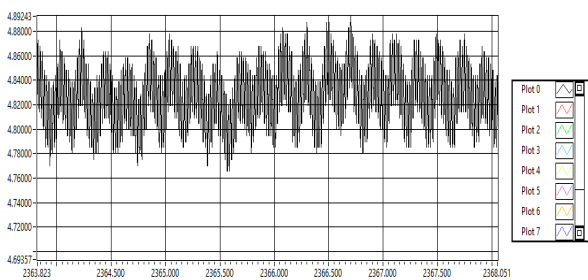
یکی از الگوریتم‌های پردازش سیگنال برای تشخیص محرک در شکل (۵) نشان داده شده است. [۱۳] اولین مرحله پردازش سیگنال برای تشخیص خمش کم با استفاده از الگوریتم تشخیص بیشینه دامنه سیگنال انجام می‌شود. در مرحله اول، داده برداری با سرعت ۲۰۰۰ نمونه در ثانیه انجام شده و نمونه‌ها ثبت می‌شود. اگر مقدار سطح آستانه آشکار سازی که کمی بیشتر از سیگنال زمینه تنظیم شود و داده‌های پیک را که بیش از سطح آستانه هستند پردازش شوند، می‌توان محرک بیرونی را تشخیص و اعلام کرد. اما در این مورد، به راحتی می‌توان به دلیل یک اختلال محیطی دیگر مثل شوک حرارتی، سیگنال کاذب ایجاد کرد. بنابراین، با الگوریتم پردازش سیگنال در این مقاله، از تعداد داده‌های پیک در سطح آستانه استفاده می‌شود. داده‌های پیک دور قبلی را ثبت کرده و تعداد داده‌های پیک دوره فعلی را از آن کم می‌کنیم تا داده‌های سطح برای اعلام هشدار وجود محرک، ایجاد شود. اگر تلاشی از محرک بیرونی وجود داشته باشد که خمشی را به فیبر نوری اعمال کند، منجر به تعداد زیادی داده

شکل (۶): نصب و حساسیت سنجی فیبر نوری با دستگاه محرک شیکر



شکل (۸): تبدیل فوریه FFT از روی سیگنال اصلی و استخراج فرکانس پدیده 22.9hz

جهت بررسی پدیده در فرکانس پایین هم این آزمایش صورت پذیرفت که نمونه‌ای از آن در فرکانس ۵ هرتز در شکل (۹) نمایش داده شده است.

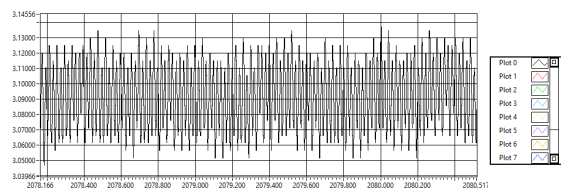


شکل (۹): خروجی فوتو دیود بصورت ولتاژ از سیگنال ۵ هرتز اعمالی به فیبر نوری توسط شیکر.

تبدیل فوریه FFT از خروجی سیگنال و استخراج فرکانس ۴/۸۶ با تحلیل داده فوتو دیود در شکل (۱۰) نشان داده شده است که نشان از استخراج دقیق مشخصه فرکانسی عامل محرک می‌باشد.

۶-۱- حساسیت سنجی نسبت به دامنه حرکتی و فرکانس عامل محرک بیرونی

حساسیت سنجی لکه‌های نوری اسپیکل در خروجی انتهای فیبر چند حالتی، نسبت به دامنه حرکتی و فرکانس ارتعاش آن مورد تحقیق و آزمایش قرار گرفت. در این بخش از تحقیق بوسیله یک دستگاه شیکر، دامنه‌های ۵۰ میکرومتر به بالا و فرکانس‌های ۱ تا ۹۱ هرتز در حالات مختلف به بخشی از بدنه فیبر نوری اعمال شده و خروجی تقویت شده‌ی فوتو دیود، ثبت گردیده است. چند نمونه از حالات تست و نتایج بدست آمده و پردازش و تحلیل فرکانسی سیگنال ثبت شده، نیز تشریح شده است. در این حالت با استفاده از شیکر، دامنه ۰/۸ میلی‌متری با فرکانس ۲۲/۹ هرتز به بخش کوچکی از کابل اعمال شده و تغییرات اسپیکل خروجی فیبر نوری، پدیده را آشکار کرده است. سیگنال اصلی خروجی فوتو دیود بایاس معکوس و تقویت‌شده در نمودار شکل (۷) نمایش داده شده است.

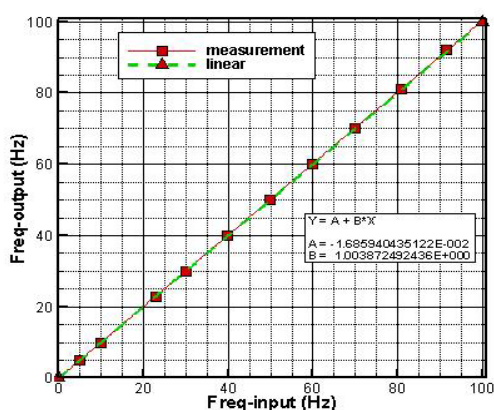


شکل (۷): خروجی فوتو دیود در فرکانس ۲۲/۹ هرتز ناشی از محرک شیکر

از داده‌های حوزه زمان با تبدیل فوریه و عملیات FFT، فرکانس غالب پدیده استخراج شده است که به صورت کامل فرکانس پدیده مکانیکی اعمال شده به حسگر با استفاده از دستگاه شیکر با خروجی تحلیل فرکانسی داده منطبق است. شکل (۸) خروجی پردازش سیگنال در حوزه فرکانس را نشان می‌دهد. این حساسیت سنجی نسبت به فرکانس و دامنه جابجایی صورت پذیرفته است.

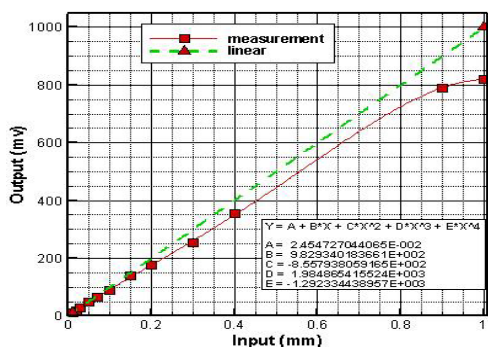
دقت ۱ میکرون، بصورت ایستا، دامنه حرکتی به بخشی از طول فیبر اعمال و اندازه‌گیری صوت پذیرفت. با سخت افزار موجود به ازای هر ۱۰ میکرومتر جابجایی در فیبر، ۱۰ میلی ولت اختلاف ولتاژ در خروجی مدار تقویت‌کننده ثبت گردید که می‌توان از خروجی ثبت شده علاوه بر فرکانس، دامنه حرکتی عامل تحریک مکانیکی و ارتعاش را شناسایی و آشکار کرد. دامنه‌ی سیگنال خروجی رابطه خطی با میزان جابجایی فیبر داشته و در آزمایش انجام شده جهت حرکت فیبر نیز با افزایش یا کاهش ولتاژ خروجی قابل تشخیص است.

نمودار شکل (۱۳) رابطه بین فرکانس ورودی به عامل محرک (شیکر) و فرکانس خروجی حاصل از پردازش سیگنال ولتاژ تقویت شده از فوتو دیود نشان داده شده است. انحراف کوچک بوجود آمده، می‌تواند ناشی از محدودیت‌های مکانیکی سخت‌افزار در شیکر باشد که سیگنال ورودی را باید به حرکت مکانیکی تبدیل کند.

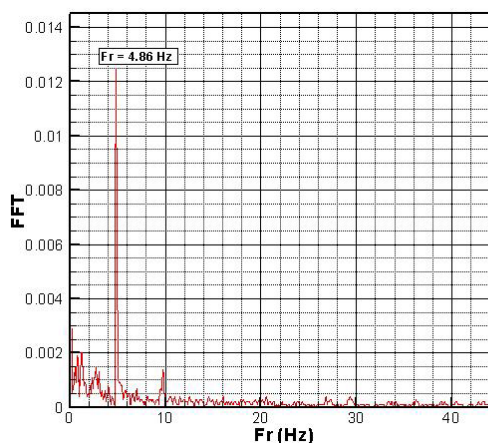


شکل (۱۳): رابطه بین فرکانس ورودی به عامل محرک (شیکر) و فرکانس خروجی حاصل از پردازش سیگنال

شکل (۱۴) رابطه بین میزان جابجایی فیبر نوری توسط عامل محرک (شیکر) و میزان ولتاژ خروجی حاصل از پردازش سیگنال ولتاژ تقویت شده از فوتو دیود نشان داده شده است.

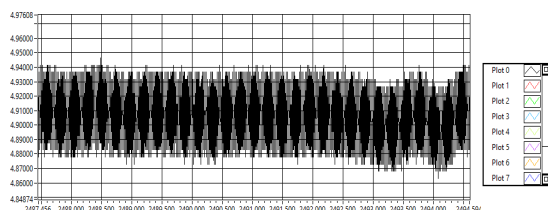


شکل (۱۴): رابطه بین میزان جابجایی فیبر نوری توسط عامل محرک (شیکر) و میزان ولتاژ خروجی



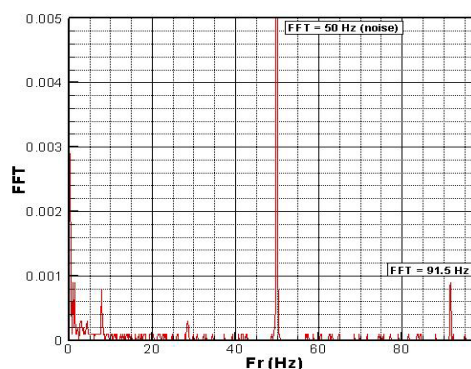
شکل (۱۰): تبدیل فوریه FFT از خروجی سیگنال و استخراج فرکانس ۴/۸۶ هرتز با تحلیل داده فوتو دیود

فرکانس شیکر ۹۱ هرتز دامنه ۵۰ میکرومتر نیز جهت دامنه ارتعاش پایین و فرکانس بالا تنظیم شد که خروجی سیگنال و تبدیل فوریه FFT از خروجی در شکل (۱۱) نمایش داده شده است.



شکل (۱۱): خروجی فوتو دیود بصورت ولتاژ از سیگنال ۹۱ هرتز اعمالی به فیبر نوری توسط شیکر.

تبدیل فوریه FFT از خروجی سیگنال و استخراج فرکانس ۹۱ هرتز با تحلیل داده فوتو دیود در شکل (۱۲) نشان داده شده است که نشان از استخراج دقیق مشخصه فرکانسی عامل محرک می‌باشد.



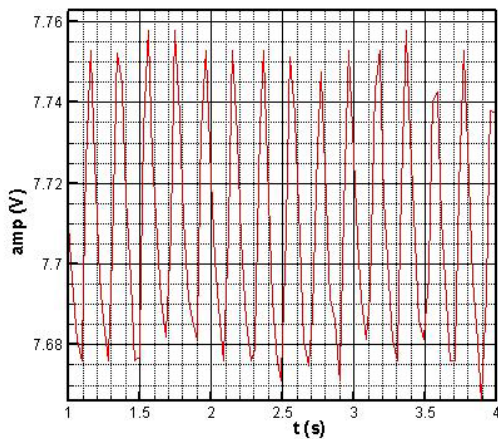
شکل (۱۲): تبدیل فوریه FFT از خروجی سیگنال و استخراج فرکانس ۹۱/۵ هرتز با تحلیل داده فوتو دیود

جهت حساسیت سنجی نسبت به دامنه، با یک کولیس با

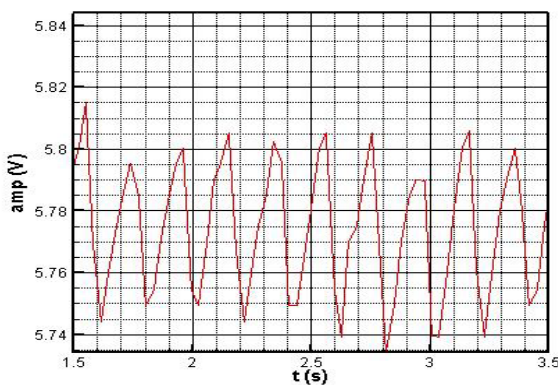
استخراج شده و محل اعمال تحریک در آشکارسازی و حسگری میزان فرکانس، اثرگذار نبوده است.

در آزمایشی دیگر، اثر طول کابل فیبر نوری مورد بررسی قرار داده شد. دو کابل مشابه با مبدل f_c به f_c به یکدیگر متصل شده و طول کابل ۲ برابر گردید. در نتایج بدست آمده سطح سیگنال خروجی در کابل بلندتر به دلیل افزایش طول کابل و تضعیف اتصال دهنده، در خروجی سیگنال الکتریکی مشهود بود. ولی میزان تغییرات در سیگنال خروجی هنگام اعمال محرک دینامیکی در کابل بلندتر مقدار ناچیزی کمتر بود. شکل (۱۶) سیگنال خروجی در فیبر نوری کوتاه‌تر و شکل (۱۷) سیگنال خروجی در فیبر نوری بلندتر را نمایش می‌دهد.

این امر می‌تواند به دلیل اثر تشکیل لکه‌های نوری و جابجایی آن در خروجی فیبر ایجاد شده باشد.



شکل (۱۶) تغییرات دامنه ولتاژ در کابل فیبر نوری کوتاه‌تر



شکل (۱۷) تغییرات دامنه ولتاژ در کابل فیبر نوری بلندتر

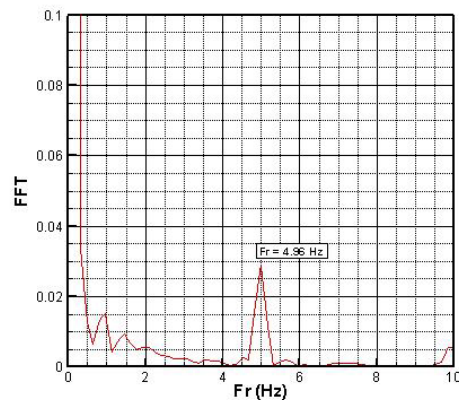
در بررسی رابطه میزان جابجایی و ولتاژ خروجی، شیب کالیبراسیون در دو حالت کابل بلند و کوتاه متفاوت بود. همچنین با جابجایی بیش از ۲ میلی‌متر، جهت تغییرات ولتاژ عکس شده و منحنی سهموی مطابق با شکل (۱۸) تشکیل می‌شود. رابطه خطی در محدوده خاصی بوجود می‌آید. دلیل این تغییر در روند ولتاژ،

مقداری انحراف از حالت خطی می‌تواند ناشی از خطای دستگاه اندازه‌گیری و میزان تفکیک برد که ۱۲ بیت است باشد و همچنین در مقادیر زیاد جابجایی فیبر نوری، شکل لکه نوری خروجی تغییری غیرخطی داشته باشد.

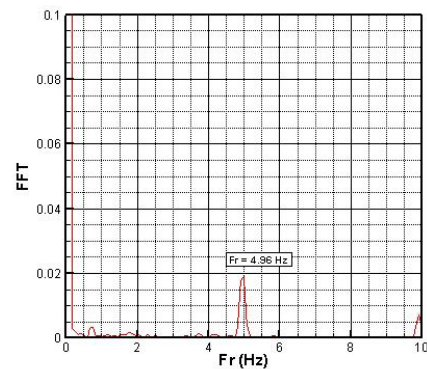
۲-۶- حساسیت سنجی نسبت به محل اعمال محرک و طول فیبر نوری

در قسمتی از پژوهش، محل اعمال تغییر و ارتعاش روی فیبر جابجا گردیده و در ۲ نقطه‌ی مجزا، آزمایشات تکرار گردید. تحلیل نتایج بر روی میزان فرکانس عامل محرک، تغییری نسبت به تشخیص فرکانس با توجه به محل اعمال محرک به همراه نداشت. و روش حسگری فیبر نوری بر مبنای اسپیکل به محل اعمال محرک وابسته نبود. شکل (۱۵) مقایسه تحلیل فرکانسی خروجی فیبر که در ۲ نقطه جدا، اختلال با فرکانس ۵ هرتز به آن وارد شده را نشان می‌دهد.

نقطه ۱



نقطه ۲



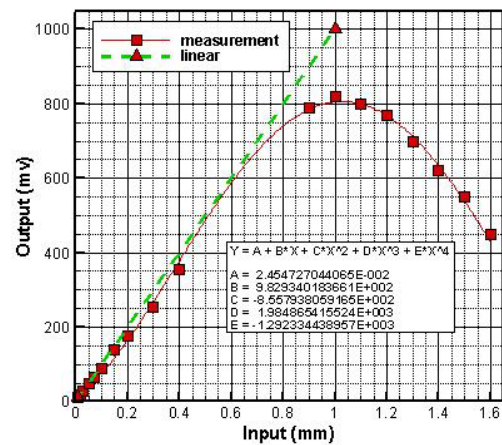
شکل (۱۵): مقایسه تحلیل فرکانسی خروجی فیبر که در ۲ نقطه جدا، اختلال با فرکانس ۵ هرتز

در هر دو حالت، فرکانس پدیده اعمال شده به درستی

مراجع .

- [1] Y. Wang et al.: "A Comprehensive Study of Optical Fiber Acoustic Sensing" IEEE Access, June 24, 2019.
- [2] Abdallah, Adel, Mohamed M. Fouad, and Hesham N. Ahmed. "Low-cost real-time fiber optic sensor for intrusion detection." Sensor Review (2021).
- [3] Francis, T.S.; Wen, M.; Yin, S. Submicrometer displacement sensing using inner-product multimode fiber speckle fields. Appl. Opt. 1993, 32, 4685–4689.
- [4] Lu, Ping, et al. "Distributed optical fiber sensing: Review and perspective." Applied Physics Reviews 6.4 (2019): 041302.
- [5] Hartog, Arthur H. An introduction to distributed optical fiber sensors. CRC Press, 2017.
- [6] Yu, F.T.S.; Zhang, J.; Pan, K. Fiber vibration sensor that uses the speckle contrast ratio. Opt. Eng. 1995, 34, 236–239.
- [7] Wu, S.; Yin, S.; Yu, F.T.S. Sensing with fiber specklegrams. Appl. Opt. 1991, 30, 4468–4470.
- [8] Fujiwara, Eric, Murilo Ferreira Marques Dos Santos, and Carlos Kenichi Suzuki. "Optical fiber specklegram sensor analysis by speckle pattern division." Applied optics 56.6 (2017) pp. 1585-1590
- [9] Goodman, Joseph W. Speckle phenomena in optics: theory and applications. Bellingham, Washington: SPIE Press, 2020.
- [10] N. Takai and T. Asakura, "Statistical properties of laser speckles produced under illumination from a multimode optical fiber," J. Opt. Soc. Am. 2, 1282–1290 (1985).
- [11] Li, Jun, et al. "Specklegram in a multiple-mode fiber and its dependence on longitudinal modes of the laser source." Applied optics 46.17 (2007)
- [12] E. Ronnekleiv and K. Blotekjar, "Distributed fiber sensor for location of disturbances," 9th Int. Conf. on Optical Fiber Sensors, 461-464 (1993).
- [13] J. P. Dakin, "Distributed optical fiber sensors," 7th Int. Conf. on Optical Fiber Sensors, 377-385 (1990).
- [14] Kwon, Il-Bum, et al. "Two step signal processing of optical fiber mesh for intruder detection." Optics and Photonics in Global Homeland Security IV. Vol. 6945. SPIE, 2008.
- [15] Redding, Brandon, Sebastien M. Popoff, and Hui Cao. "All-fiber spectrometer based on speckle pattern reconstruction." Optics express 21.5 (2013): 6584-6600.

جابجا شدن لکه نوری پس از مقداری جابجایی و تغییر حالت روشن و تاریک در اسپکل خروجی فیبر می‌باشد.



شکل (۱۸) رابطه بین میزان جابجایی فیبر نوری توسط عامل محرک (شیکر) و میزان ولتاژ خروجی در دامنه زیاد

۷. نتیجه‌گیری

این مطالعه نشان داد درحالی که تنها یک تغییر کوچک در دامنه سیگنال به دلیل خم شدن ریز فیبر از یک محرک بیرونی وجود دارد، چرخش قابل توجهی در الگوی لکه‌ای اسپکل که مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت وجود داشت. این تکنیک از تقویت‌کننده تفاضلی برای تبدیل سیگنال به یک ولتاژ قابل استفاده، در فوتو دیود استفاده می‌کند. در این مقاله پیشنهاد شد که یک آستانه باید برای به حداقل رساندن تعداد اندازه‌گیری‌های کاذب استفاده شود، به طوری که فقط سیگنال‌هایی که از مقدار آستانه فراتر می‌روند، هشدار را فعال کنند.

همچنین حساسیت سنجی فیبر در حالات ارتعاش و تغییر دینامیکی با دامنه حرکتی حداقل ۵۰ میکرومتر و فرکانس ۵ تا ۹۱ هرتز به روش اسپکلگرامی مورد آزمایش قرار گرفت که آشکارسازی و استخراج مشخصات فرکانسی پدیده قابل استخراج و شناسایی بود. دامنه‌ی سیگنال خروجی در محدوده مشخصی رابطه نسبتاً خطی با میزان جابجایی فیبر داشته و در آزمایش انجام شده جهت حرکت فیبر نیز با افزایش یا کاهش ولتاژ خروجی قابل تشخیص است.

از این قابلیت می‌توان در کاربرد برای یک فیبر مدفون در اعماق مختلف نیز استفاده کرد و یک عامل محرک بیرونی که به فیبر نوری مدفون در خاک، فشار وارد می‌کند را آشکارسازی کرد.