
Combination of Phase and Frequency Correlation in the Brillouin Dynamic Grating Sensor to Achieve Millimeter Spatial Resolution Over 17 km of Optical Fiber

A. Malakzadeh^{*1}, M. Ahmadi²

^{*}Iranian National Observatory, Institute for Research in Fundamental Sciences

(Received: 17/07/2020; Accepted: 15 /06/2021)

Abstract

Extensive applications of distribution fiber sensors in various industries have led researchers to make great efforts to improve the properties of these sensors. Spatial resolution and sensing length are considered among the most important parameters in fiber optic distribution sensor by engineers and users of these sensors. Among these fiber sensors, Rayleigh scattering-based sensors due to their very long sensing length and Brillouin scattering sensors due to their high spatial resolution, each cover a specific range of applications. Among Brillouin sensors, Brillouin dynamic grating (BDG) sensor has the highest spatial resolution, but the short sensing length of this sensor is one of its major disadvantages. For this reason, trying to increase the sensing length in this sensor is one of the priorities for researchers in this field. In this paper, using a new method called the combination of phase and frequency correlation, the maximum sensing length in the BDG sensor is simulated for spatial resolution in the range of millimeters. The simulation results show that with the help of this sensor, a spatial resolution of 9 mm over 17.7 km of the measurement fiber can be achieved.

Keywords: Optical Fiber Sensor, Brillouin Scattering, Brillouin Dynamic Grating, Spatial Resolution, Sensing Length

¹ Corresponding author E-mail: afard77@gmail.com

علمی-پژوهشی

ترکیب همبستگی فازی و فرکانسی در حسگر توری دینامیکی بریلوئن برای رسیدن به توان تفکیک فضایی در محدوده میلی‌متر در بیش از ۱۷ کیلومتر از فیبر نوری

عبدالله ملک‌زاده^{۱*}، محسن منصورسمائی^۲

۱- استادیار، رصدخانه ملی، پژوهشگاه دانش‌های بنیادی ۲- دانشجوی دکتری، دانشگاه جامع امام حسین (ع)

(دریافت: ۱۳۹۹/۰۴/۲۷، پذیرش: ۱۴۰۰/۰۲/۲۵)

چکیده

کاربردهای بسیار زیاد حسگرهای توزیعی فیبر نوری در صنایع مختلف منجر شده تا تلاش‌های زیادی برای بهبود خواص این حسگرها توسط محققان انجام شود. دقت تفکیک فضایی و طول سنجش از جمله مهم‌ترین پارامترهای موجود در حسگرهای توزیعی فیبر نوری هستند که همواره مورد توجه مهندسان و کاربران این حسگرها بوده است. در بین این حسگرهای فیبری، حسگرهای بر مبنای پراکندگی رابلی به دلیل طول سنجش بسیار زیاد و حسگرهای بر مبنای پراکندگی بریلوئن به دلیل دقت فضایی بالا، هر یک طیف خاصی از کاربردها را پوشش می‌دهند. در میان حسگرهای بریلوئن، حسگر توری دینامیکی بریلوئن (BDG) دارای بیشترین توان تفکیک فضایی است ولی کم بودن طول سنجش در این حسگر از جمله معایب آن به حساب می‌آید. به همین دلیل تلاش برای افزایش طول سنجش در این حسگر یکی از اولویت‌ها برای محققانی است که در این زمینه مشغول مطالعه هستند. در این مقاله به کمک روشی جدید به نام ترکیب همبستگی فازی و فرکانسی، بیشترین طول سنجش در حسگر BDG برای دقت تفکیک فضایی در محدوده میلی‌متر شبیه‌سازی شده است. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که می‌توان به کمک این حسگر به دقت تفکیک فضایی ۹ میلی‌متر در ۱۷/۷ کیلومتر از فیبر سنجش دست پیدا کرد.

کلیدواژه‌ها: حسگر فیبر نوری، پراکندگی بریلوئن، توری دینامیکی بریلوئن، دقت تفکیک فضایی، طول سنجش

۱. مقدمه

حساسیت بسیار زیاد امواج نوری منتشرشده درون موج‌بر فیبر نوری به تغییرات محیطی که در اطراف آن اتفاق می‌افتد منجر شده تا از فیبرهای نوری به عنوان حسگرهای محیطی بسیار دقیق استفاده شود. در بین حسگرهای فیبری، حسگرهای توزیعی فیبر نوری به دلیل کاربردهای گسترده در زمینه‌های مختلف از جمله صنایع نظامی، عمرانی، پزشکی و بسیاری از کاربردهای صنعتی و مکانیکی از مقبولیت بیشتری برخوردارند [۵-۱].

حسگرهای توزیعی فیبر نوری را معمولاً به چهار دسته اصلی، حسگرهای بر مبنای پراکندگی رابلی، رامان، بریلوئن و حسگرهای توری براگ فیبری (FBG^۱) تقسیم می‌کنند. هر یک از این حسگرها با توجه به خصوصیاتی که دارند در کاربردهای مختلف مورد استفاده قرار می‌گیرند. برای مثال مزیت حسگرهای رابلی، طول سنجش بسیار زیاد آن‌ها است [۶-۷] و حسگرهای

رامان اغلب به عنوان حسگرهای دمایی مورد استفاده قرار می‌گیرند [۹-۸]. همچنین حسگرهای FBG به دلیل مقرون به صرفه بودن و راحتی در نصب، بیشتر در سازه‌های عمرانی و صنعتی استفاده می‌شوند [۱۱-۱۰]. در این بین حسگرهای بر مبنای پراکندگی بریلوئن که به عنوان حسگرهای فیبری با دقت فضایی بسیار بالا شناخته می‌شوند، اغلب در مواردی استفاده می‌شوند که تشخیص مکان دقیق تغییرات محیطی از درجه اهمیت بیشتری برخوردار باشد [۱۲]. در بین حسگرهای فیبری بریلوئن، حسگر توری دینامیکی بریلوئن (BDG^۲) با دقت فضایی در محدوده میلی‌متر به عنوان دقیق‌ترین حسگر بریلوئن شناخته می‌شود [۱۳].

حسگر توری دینامیکی بریلوئن اولین بار در سال ۲۰۰۸ به عنوان ایده‌ای جدید در میان حسگرهای بریلوئن مطرح شد [۱۴]. در این حسگر، توری دینامیکی یا همان موج آکوستیکی به کمک دو موج پمپ نوری پیوسته و با قطبش یکسان، که اختلاف فرکانسی به اندازه فرکانس بریلوئن ($\nu_B = 10 \text{ GHz}$) دارند تولید

* نویسنده پاسخگو: afard77@gmail.com

^۱ Fiber bragg grating

^۲ Brillouin dynamic grating

هیچ اختلالی در آن‌ها وجود ندارد به راحتی حذف می‌شوند و آن حوزه‌ای که اختلال در آن تشخیص داده شود را به بازه‌های کوچک و کوچک‌تر تقسیم می‌کنند [۱۹].

با وجود اینکه حسگر BDG دقت فضایی منحصر به فردی دارد اما در مقایسه با سایر حسگرهای فیبری که طول سنجش ده‌ها و صدها کیلومتری دارند، کم بودن طول سنجش در این حسگر از مهم‌ترین معایب آن به حساب می‌آید. همین عامل منجر شده تا تحقیقات بسیاری برای افزایش طول سنجش در حسگر BDG انجام شود.

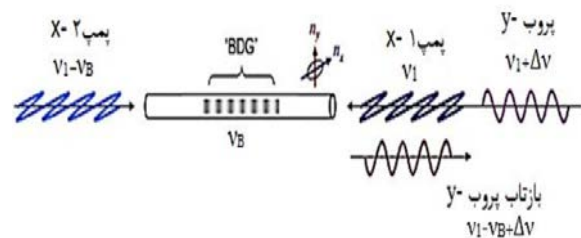
از سال ۲۰۰۸ که سانگ^۳، حسگر BDG را برای اولین بار معرفی کرد تا سال ۲۰۱۳ میلادی، بهترین توان تفکیک فضایی گزارش شده در این حسگر به میزان یک سانتی‌متر در حدود ۴۰ متر از فیبر سنجش بود [۱۹]. تا اوایل سال ۲۰۱۵ تنها از روش همبستگی فرکانسی برای بهبود توان تفکیک فضایی و طول سنجش در این حسگرها استفاده می‌شد تا اینکه پریمراف در اکتبر ۲۰۱۵ گزارش داد که می‌توان با روش همبستگی فازی، به توان تفکیک فضایی در حد میلی‌متر برای ۲۹۵ متر از فیبر سنجش دست یافت [۱۶]. سپس خود او در ادامه با روشی پیچیده و الکترونیک محور، به نام روش همبستگی فازی-دروازه زمانی^۴، که معادلات و مفروضات ریاضی بسیاری را در برمی‌گرفت و الگوریتم‌ها و پردازش سیگنال‌های پیچیده‌ای را شامل می‌شد، به طول سنجش ۱۷/۵ کیلومتر با همان دقت در محدوده میلی‌متر دست یافت [۱۳]. نهایتاً در سال ۲۰۲۰، ملک‌زاده و همکارانش به کمک روشی سراسرت به نام ترکیب همبستگی فازی و همبستگی فرکانسی (CPFC^۵)، به دقت فضایی ۹ میلی‌متر در ۱۷/۷ کیلومتر از فیبر سنجش دست یافتند [۲۰].

در این مقاله، تئوری CPFC که بر اساس ترکیب همبستگی فازی و همبستگی فرکانسی بنا شده است را به‌طور کامل توصیف کرده و نشان می‌دهیم که می‌توان به کمک این روش و بدون نیاز به معادلات و روابط پیچیده، به توان تفکیک فضایی میلی‌متر برای بیش از ۱۷ کیلومتر از فیبر نوری دست یافت. برای درک بهتر این روش لازم است هر یک از روش‌های همبستگی فرکانسی و فازی را به‌صورت جداگانه مورد بررسی قرار دهیم.

۲. همبستگی فرکانسی

برای ایجاد همبستگی فرکانسی باید دو موج پمپ با فرکانس‌های ω_{p1} و ω_{p2} را به‌صورت یکسان مدوله کرد تا در اثر تداخل با هم، یک پیک همبستگی فرکانسی حاصل شود. یکی از مرسوم‌ترین

می‌شود. با توجه به شکل (۱) ابتدا موج پمپ اول (ν_1) از یک سر فیبر نوری نگهدارنده قطبش (PMF^1)، که ضریب شکست در دو راستای X و Y در آن متفاوت است، وارد فیبر شده و یک موج استوکس ضعیفی در جهت برگشت تولید می‌کند. موج استوکس با موج پمپ اولیه تداخل کرده و یک موج آکوستیکی که فرکانسی برابر با اختلاف فرکانس بین موج پمپ و استوکس دارد را تولید می‌کند. در ادامه موج پمپ دوم با قطبشی مشابه موج اول و فرکانسی برابر با موج استوکس، از سمت دیگر فیبر وارد شده و موج آکوستیکی را تقویت می‌کند. برهمکنش این موج با محیط فیبر نوری، باعث ایجاد و تقویت نوسانات چگالی و یا همان توری دینامیکی درون فیبر می‌شود. در ادامه موج پروب سوم با قطبشی عمود بر قطبش دو موج اولیه وارد فیبر PM شده و به توری ساخته شده برخورد کرده و از آن بازتاب می‌شود [۱۵].



شکل (۱): شماتیکی از عملکرد توری دینامیکی بریلوئن در فیبر PM

فرکانس موج پروب نسبت به فرکانس موج پمپ اول یک جابجایی ($\Delta\nu$) دارد و وقتی هیچ اختلالی در محیط وجود نداشته باشد این جابجایی در موج بازتابی پروب نیز وجود خواهد داشت زیرا در اثر برهمکنش این موج با توری تنها مقدار ν_B از فرکانس آن کم می‌شود. ولی وقتی اختلالی همچون تغییرات دما و یا فشار در محیط اطراف فیبر وجود داشته باشد، ضریب شکست در دو راستای مختلف فیبر PM تغییر خواهد کرد و در نتیجه دو موج پمپ اول و دوم نمی‌توانند موج آکوستیکی با فرکانس ν_B بسازند. بنابراین موج بازتابی پروب تغییر خواهد کرد که نشان‌دهنده بروز اختلال در طول فیبر خواهد بود [۱۶].

حسگر توری دینامیکی بریلوئن برپایه حسگرهای در حوزه همبستگی [۱۷] بنا شده است. در حسگرهای حوزه همبستگی فاصله‌ی بین دو قله همبستگی متوالی، طول سنجش و پهنا در نصف مقدار بیشینه ($FWHM^2$)، قدرت تفکیک فضایی را نشان می‌دهد [۱۸]. همچنین یکی از مزیت‌های بارز حسگرهای در حوزه همبستگی، زمان پاسخ‌دهی اندک آن‌ها است زیرا در این حسگرها دیگر لازم نیست مانند سایر حسگرهای فیبری تک تک نقاط به‌طور جداگانه مورد بررسی قرار بگیرند بلکه با در نظر گرفتن محدوده‌هایی بزرگ از فیبر سنجش، آن حوزه‌هایی که

³ Song

⁴ Time-gated phase correlation

⁵ Combination of Phase and Frequency Correlation

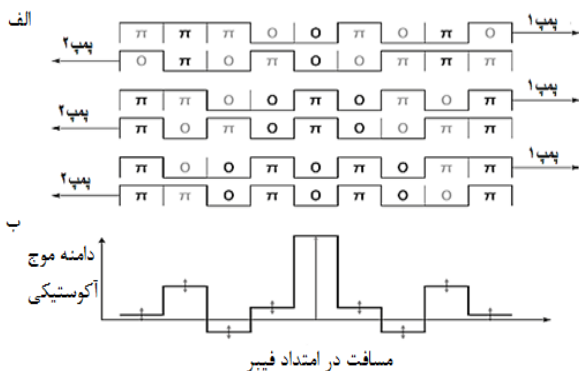
¹ Polarization-maintaining fiber

² Full width at half maximum

[۲۳]. با افزایش طول سنجش به ۵۰۰ متر، دقت فضایی ۱۷ سانتی‌متر نیز به‌دست آمده است [۲۴]. در شکل (۲) طیف حاصل از یک حسگر BDG با روش همبستگی فرکانسی که دارای دقت فضایی ۱/۲ متر در ۱۱۰ متر از فیبر نوری است نشان داده شده است [۲۵]. پایین بودن دقت فضایی در روش همبستگی فرکانسی منجر شده تا روش همبستگی فازی پیشنهاد شود.

۳. همبستگی فازی

در این روش امواج پمپ ۱ و ۲ توسط یک مدولاتور فازی^۱ PRBS که یک شیفت فازی دوره‌ای به اندازه ۰ و π اعمال می‌کند مدوله می‌شوند. منظور از دوره‌ای بودن این است که بعد از یک تعداد خاصی از بیت‌های ۰ و π ، دوباره یک دوره‌ی دیگر با همان شکل مدولاسیون به وجود می‌آید و هر کدام از این بیت‌های فازی، یک بازه زمانی مشخص (T_{bit}) را اشغال می‌کنند. در شکل (۳) این مدولاسیون فازی در سه زمان مختلف در یک مکان نشان داده شده است [۱۶].



شکل (۳): (الف) دو موج نوری پمپ ۱ و ۲ کدگذاری شده فازی، در جهات مخالف هم منتشر می‌شوند. فاز دو موج همیشه در قله همبستگی (حروف سیاه) است و خارج از آن‌ها بین همان مقدار و مخالف آن تغییر می‌کند (حروف خاکستری)؛ (ب) دامنه موج صوتی در قله همبستگی ثابت دارد و در خارج از آن نوسان می‌کند [۱۶].

برای پیدا کردن چگونگی تغییرات موج آکوستیکی در زمان و چگونگی برهمکنش با امواج نوری، f_{PRBS} به این‌صورت تعریف می‌شود [۱۶]:

$$f_{PRBS}(t) = \sum_q \xi_q \Pi\left(\frac{t - qT_{bit}}{T_{bit}}\right) \quad (۶)$$

که q شمارنده بیت در یک دوره از بیت‌ها است، ξ_q دنباله شبه تصادفی صفرها و یک‌ها با دوره‌ای برابر با T_{bits} است که معادل است با $\xi_q \equiv \xi_q + T_{bits}$. نهایتاً به کمک این نوع مدولاسیون

انواع مدولاسیون فرکانسی، مدولاسیون سینوسی برای فرکانس امواج پمپ (ω_{mp1} و ω_{mp2}) است. زمانی که مدولاسیون سینوسی به کار می‌رود، بیشینه طول اندازه‌گیری (فاصله بین پیک‌های همبستگی متوالی L_f) و توان تفکیک فضایی (Δz_f) به‌صورت زیر به‌دست می‌آیند [۲۱]:

$$L_f = \frac{V_g}{2f_m} \quad (۱)$$

$$\Delta z_f = \frac{V_g \Delta V_B}{2f_m \Delta f} \quad (۲)$$

که در آن V_g سرعت گروه نور در فیبر نوری، ΔV_B پهنای باند طیف بهره بریلوئن (حدود ۳۰ MHz)، f_m فرکانس مدولاسیون لیزر و Δf دامنه مدولاسیون می‌باشند. در نتیجه مدولاسیون فرکانسی امواج پمپ در راستای انتشار z بدین‌صورت تعیین می‌شود [۲۱]:

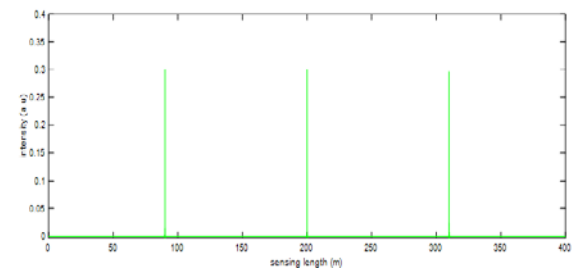
$$\omega_{mp1} = \omega_{p1} + 2\pi\Delta f \sin(2\pi f_m t - k_m z) \quad (۳)$$

$$\omega_{mp2} = \omega_{p2} + 2\pi\Delta f \sin(2\pi f_m t - k_m (L - z)) \quad (۴)$$

که در آن $k_m = n_{eff} \cdot 2\pi f_m / c$ ثابت انتشار، n_{eff} ضریب شکست مؤثر فیبر و L طول فیبر PM است. نهایتاً معادله موج آکوستیک یا همان توری دینامیکی را می‌توان این‌گونه در نظر گرفت [۲۲]:

$$E_{ac} = \frac{\gamma_e q^2}{4\pi} \frac{A_{p1} A_{p2}^*}{\Omega_B^2 - \Omega^2 - i\Omega\Gamma_B} \exp(i(k_{ps} z - \Omega t)) \quad (۵)$$

که در آن γ_e ضریب الکتروتنگش، $q = n_{eff} \Omega / c$ پارامتر Ω اختلاف فرکانس بین پمپ ۱ و ۲ و $\Omega_B = 2\pi\nu_B$ که ν_B برابر شیفت فرکانس بریلوئن بوده که برای یک فیبر تک مد سیلیکاتی برابر ۱۱-۱۰ گیگاهرتز است [۲۲]. A_{p1} و A_{p2} دامنه امواج پمپ، $\Gamma_B = n_{eff}(\omega_{mp1} - \omega_{mp2}) / c$ پهنای خط بهره بریلوئن است.



شکل (۲): موج آکوستیکی خروجی از حسگر BDG با طول سنجش ۱۱۰ متر که ناشی از مدولاسیون سینوسی امواج پمپ است [۲۵].

به کمک روش همبستگی فرکانسی، بالاترین دقت فضایی یعنی ۵ سانتی‌متر در تنها ۵ متر از فیبر نوری گزارش شده است

^۱ Pseudo-random bit sequence

رابطه (۱۰) به دست می‌آید که در واقع ترکیبی از روابط (۵) و (۷) است:

$$E_{ac} = \frac{\gamma_e q^2}{4\pi} \frac{A_{p1} A_{p2}^*}{\Omega_B^2 - \Omega^2 - i\Omega\Gamma_B} \exp\left[i\left((k_{ps} z - \Omega t) + \pi\left[f_{PRBS}(t-t_{p1}(z)) - f_{PRBS}(t-t_{p2}(z))\right]\right)\right] \quad (10)$$

همان‌طور که می‌دانیم نقطه پیک همبستگی نقطه‌ای است که در آن اختلاف فاز بین دو موج پمپ ۱ و ۲ مقداری ثابت است [۱۶] یعنی خط دوم رابطه (۱۰) باید در نقطه همبستگی مقداری ثابت باشد. در روش ترکیب همبستگی فازی و فرکانسی امواج پمپ توسط یک مدولاتور فرکانسی مدوله فرکانسی شده و توسط PRBS که یک مدولاتور فازی است، مدوله فازی می‌شوند و این دو مدولاسیون کاملاً مستقل از هم هستند.

با نرمالیزه کردن رابطه (۱۰) و با ترکیب دو همبستگی فازی و فرکانسی، تنها قسمت فاز آن‌ها است که با هم جمع می‌شوند. حاصل جمع این مدولاسیون‌ها باعث می‌شود، نقاطی که نقطه پیک همبستگی فازی هستند ولی نقطه پیک همبستگی فرکانسی نیستند به‌عنوان پیک همبستگی اصلی در روش ترکیبی پیشنهادی انتخاب نشوند، زیرا همان‌طور که گفتیم در نقطه پیک همبستگی اختلاف فاز بین دو موج پمپ ۱ و ۲ باید مقداری ثابت باشد درحالی‌که در این حالت اختلاف فاز ناشی از مدولاسیون فازی بین امواج پمپ مقداری ثابت ولی اختلاف فاز ناشی از مدولاسیون فرکانسی بین این امواج همواره در حال تغییر است. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که این نقطه نمی‌تواند نقطه پیک همبستگی اصلی در روش ترکیب همبستگی فازی و همبستگی فرکانسی باشد.

برعکس همین اتفاق نیز ممکن است رخ دهد یعنی ممکن است نقطه‌ای، نقطه‌ی پیک همبستگی فرکانسی باشد ولی نقطه پیک همبستگی فازی نباشد، در نتیجه این نقطه نیز نمی‌تواند نقطه‌ی پیک همبستگی اصلی در روش ترکیبی ما باشد. بنابراین نقطه‌ای می‌تواند به‌عنوان نقطه‌ی پیک همبستگی اصلی در این روش انتخاب شود که هم نقطه‌ی پیک همبستگی فازی و هم پیک همبستگی فرکانسی باشد. بنابراین در این روش، از بین پیک‌های همبستگی فازی تنها آن‌هایی به‌عنوان پیک اصلی انتخاب می‌شوند که پیک همبستگی فرکانسی نیز با آن‌ها انطباق داشته باشد. این امر موجب کنار گذاشتن خیلی از پیک‌های همبستگی فازی شده و در نهایت فاصله بین دو پیک همبستگی متوالی در حسگرهای توری دینامیکی بریلوئن را به میزان چشمگیری افزایش می‌دهد.

حال با مشخص شدن نقطه پیک همبستگی و طول سنجش در این روش باید توان تفکیک فضایی را مشخص کرد. از آنجایی

فازی که به تفصیل در مراجع [۲۶ و ۱۶] به آن پرداخته شده است، معادله موج آکوستیک یا همان توری دینامیکی مرتبط است با:

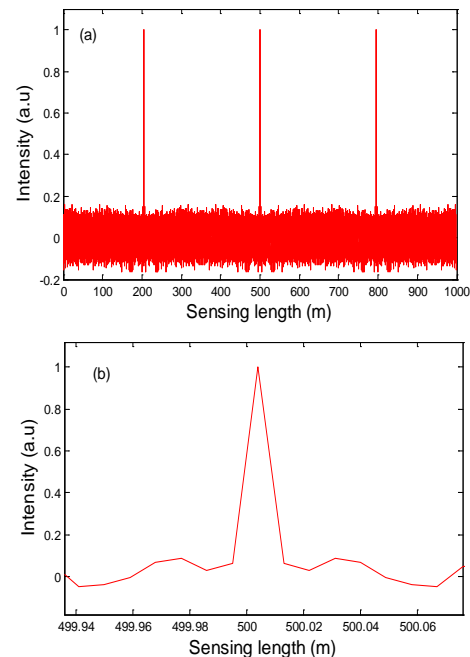
$$E_{ac} \sim \exp(i\pi [f_{PRBS}(t-t_{p1}(z)) - f_{PRBS}(t-t_{p2}(z))]) \quad (7)$$

که در آن زمان انتشار برای امواج پمپ ۱ و ۲ هستند. با رسم این معادله موج آکوستیکی می‌توان مطابق تمام روش‌های همبستگی، دقت فضایی (Δz_p) را با FWHM و طول سنجش (L_p) را با فاصله بین دو پیک همبستگی فازی به‌دست آورد [۲۶].

$$L_p = \frac{c}{2n_{eff}} N_{bit} T_{bit} \quad (8)$$

$$\Delta z_p = 1 \times T_{bit} \times \frac{c}{2n_{eff}} \quad (9)$$

شکل (۴) بهترین دقت فضایی گزارش شده از روش همبستگی فازی یعنی ۹ میلی‌متر در ۲۹۵ متر از فیبر نوری را نشان می‌دهد [۲۶].



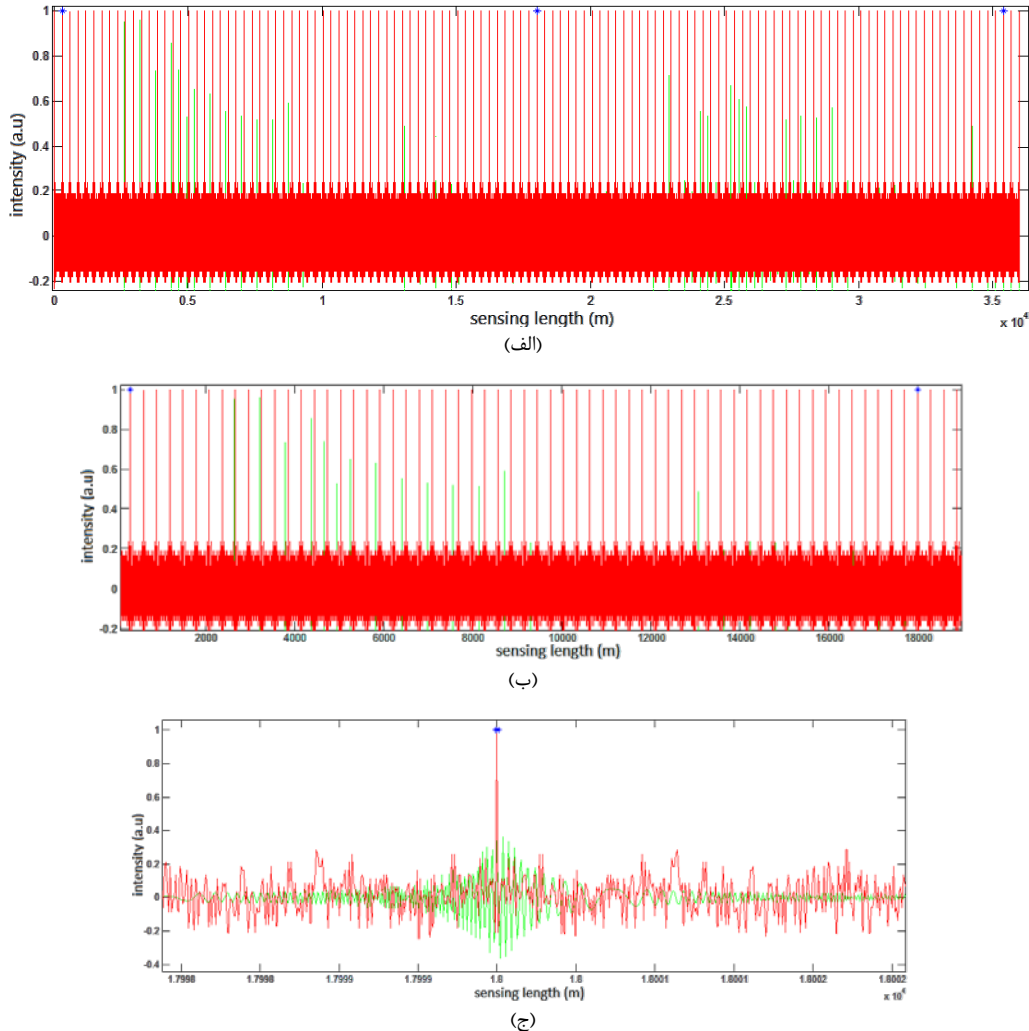
شکل (۴): طیف خروجی از حسگر BDG به ازای (a) طول سنجش ۲۹۵ متر و (b) دقت فضایی ۹ میلی‌متر [۲۶]

۴. ترکیب همبستگی فازی و فرکانسی

وقتی دو موج پمپ ۱ و ۲ هم از نظر فرکانسی و هم فازی مدوله شوند، یعنی به‌عبارتی در چیدمان حسگر توری دینامیکی بریلوئن، هم مدولاتور فازی و هم مدولاتور فرکانسی استفاده شود، معادله موج آکوستیک یا همان توری دینامیکی به‌صورت

پیک همبستگی فازی که برابر ۹ میلی‌متر است به‌دست آورد. بنابراین نقش همبستگی فرکانسی در این روش پیشنهادی تنها افزایش طول سنجش بوده است.

که دقت فضایی روش همبستگی فازی بسیار بیشتر از همبستگی فرکانسی است، با مشخص شدن مکان پیک همبستگی در این روش ترکیبی، به‌راحتی می‌توان توان تفکیک فضایی را از پهنای



شکل (۵): طیف خروجی از حسگر BDG با روش ترکیب همبستگی فازی و فرکانسی در الف) ۳۶ کیلومتر از فیبر نوری ب) ۱۸ کیلومتر ابتدایی و ج) مکان دقیق انطباق دو پیک فازی و فرکانسی در مرکز فیبر [۲۰]

تمام پیک‌ها باید معیار رایلی [۲۷] که در رابطه (۱۱) مشخص شده، رعایت شود.

$$|L_p - L_f| = \frac{\Delta z_p + \Delta z_f}{2} \quad (11)$$

بنابراین در این مقاله ما نمونه‌ای از همبستگی فازی را که دارای بهترین دقت فضایی است یعنی ۹ میلی‌متر (Δz_p) در ۲۹۵ متر (L_p) را با یک نمونه از همبستگی فرکانسی که دارای فرکانس مدولاسیون (f_m) ۳۳۳ کیلوهرتز و عمق مدولاسیون (Δf) ۰/۹ گیگاهرتز است که با توجه به روابط (۱) و (۲) متناظر است با طول سنجش ۳۰۰ متر (Δz_f) با دقت فضایی حدود ۱۰ متر (L_f) ترکیب می‌کنیم. با توجه به رابطه (۱۱) و یا همان معیار رایلی

از آنجایی که توان تفکیک فضایی در روش همبستگی فرکانسی هیچ تأثیری در روش ترکیبی ندارد بنابراین می‌توان از نمونه‌هایی از مدولاسیون فرکانسی استفاده کرد که طول سنجش بالا و دقت فضایی اندکی دارند تا بتوان طول سنجش در روش ترکیب همبستگی فازی و فرکانسی را تا حد ممکن بالا برد. البته باید توجه داشت که پهنای پیک در روش همبستگی فرکانسی نباید به حدی زیاد باشد که دو پیک فازی را هم‌زمان پوشش دهد. نکته دیگری که باید در این زمینه رعایت کرد این است که در طول مسیر فیبر نقاطی وجود نداشته باشد که دو پیک فازی و فرکانسی بیش از حد به یکدیگر نزدیک شوند که تشخیص منطبق بودن یا نبودن آن‌ها با مشکل مواجه شود یا به‌عبارتی در

- [2] A. Malakzadeh and M. Mansoursamaei, "Fiber Bragg Grating Optical Sensors a novel tool for rehabilitation and improve the movement disorders," Third National Conference on Nervous Musculoskeletal Disorders, 2018. (In Persian)
- [3] A. Malakzadeh, M. Mansoursamaei, and S. Nouri Jouybari, "Distributional fiber optic sensors a new method to reduce damages caused by various disasters and incidents in Tehran's urban constructions," Disaster prevention and management knowledge quarterly, vol. 7, no. 4, pp. 320-331, 2018. (In Persian)
- [4] M. Karimi, "Analysis of photonic crystal fibers using finite difference frequency domain method," Journal of Applied Electromagnetics, vol. 6, no. 2, pp. 33-42, 2019. (In Persian)
- [5] M. Mansoursamaei, J. Babagoli, A. Malakzadeh, and A. Bidokhti, "Use of fiber optic sensors to increase the security of the Strait of Hormuz against the passage of submarines," The Second National Conference on New Marine Technologies, 2016. (In Persian)
- [6] A. Malakzadeh, R. Pashaie, and M. Mansoursamaei, "Gain and noise figure performance of an EDFA pumped at 980 nm or 1480 nm for DOFSs," Optical and Quantum Electronics, vol. 52, no. 2, pp. 1-16, 2020.
- [7] A. Malakzadeh, R. Pashaie, and M. Mansoursamaei, "150 km ϕ -OTDR sensor based on erbium and Raman amplifiers," Optical and Quantum Electronics, vol. 52, no. 6, pp. 1-8, 2020.
- [8] A. Malakzadeh, M. Didar, and M. Mansoursamaei, "SNR enhancement of a Raman distributed temperature sensor using partial window-based non local means method," Optical and Quantum Electronics, vol. 53, no. 3, p. 147, 2021.
- [9] A. Malakzadeh, M. Didar, and M. Mansoursamaei, "Increasing the temperature resolution of fiber optic distribution sensors based on Raman scattering by digital image processing," Seventh National Conference on the Defense of Modern Wars, 2017. (In Persian)
- [10] A. Malakzadeh, M. Mansoursamaei, and R. Pashaie, "Fiber Bragg grating sensor's passive defense applications to decrease vulnerability of dams, bridges and buildings," Fifth National Conference on Defense Science and Engineering, 2019. (In Persian)
- [11] A. Malakzadeh, M. Mansoursamaei, R. Pashaie, and M. Didar, "Fiber Bragg grating sensor as the most effective distributed optical fiber sensor in defense applications of civil structures," Passive Defense Quarterly, vol. 10, no. 3, 2019. (In Persian)
- [12] Bao Xiaoyi and Liang Chen, "Recent progress in Brillouin scattering based fiber sensors," Sensors, vol. 11, no. 4, pp. 4152-4187, 2011.
- [13] A. Denisov, M. A. Soto, and L. Thévenaz, "Going beyond 1000000 resolved points in a Brillouin distributed fiber sensor theoretical analysis and experimental demonstration," Light: Science & Applications, vol. 5, no. 5, p. e16074, 2016.
- [14] K. Y. Song, W. Zou, Z. He, and K. Hotate, "All-optical dynamic grating generation based on Brillouin scattering in polarization-maintaining fiber," Opt. let, vol. 33, no. 9, pp. 926-928, 2008.
- [15] Dong, Yongkang, et al., "Long-range and high-spatial-resolution distributed birefringence measurement of a polarization-maintaining fiber based on brillouin dynamic grating," Journal of lightwave technology, vol. 31, no. 16, pp. 2681-2686, 2013.
- [16] A. Denisov, "Brillouin dynamic gratings in optical fibres for distributed sensing and advanced optical signal processing," PHD Thesis, EPFL, Oct. 2015.

برای حد تشخیص دو پیک مجاور، می‌بینیم که فاصله ۵ متری بین دو پیک فازی و فرکانسی، فاصله معقولی برای بیشترین افزایش طول سنجش و دورترین انطباق و همپوشانی بین دو پیک فازی و فرکانسی می‌باشد.

همان‌طور که در شکل (۵) مشخص است در یک فیبر نوری به طول ۳۶ کیلومتر تنها سه نقطه از کل فیبر وجود دارد که دو پیک فازی و فرکانسی بر هم منطبق شده‌اند که فاصله آن‌ها با هم ۱۷/۷ کیلومتر است. در این شکل نقاطی که با ستاره آبی نشان داده شده‌اند، نقاطی است که دو پیک فازی و فرکانسی بر هم منطبق هستند. مطابق شکل (۵)، پیک شماره ۵۹ از روش همبستگی فرکانسی با پیک ۶۰ ام از روش همبستگی فازی با یکدیگر منطبق شده‌اند و با هم همپوشانی دارند که نشان می‌دهد فاصله بین دو پیک همبستگی در روش ترکیب همبستگی فازی و فرکانسی برابر با ۱۷/۷ کیلومتر است. با مشخص شدن مکان دقیق پیک همبستگی در این روش ترکیبی، به راحتی می‌توان دقت فضایی را با روش فازی و برابر با ۹ میلی‌متر به دست آورد. بنابراین بدون اینکه نیاز به حل معادلات پیچیده و پردازش سیگنال‌های سنگین و الکترونیک محور داشته باشیم، به کمک روشی کاملاً فیزیکی و سراسر، به دقت فضایی و طول سنجشی تقریباً مشابه و البته کمی بیشتر از روش همبستگی فازی-دروازه زمانی رسیده‌ایم.

۵. نتیجه گیری

از آنجا که روش‌های همبستگی فازی و همبستگی فرکانسی هر یک محدودیت‌هایی در توان تفکیک فضایی و طول سنجش داشتند چندان مورد توجه کاربران حسگرهای فیبری قرار نمی‌گرفتند. با معرفی روش همبستگی فازی-دروازه زمانی که طول سنجش را به ۶/۴۹۰ کیلومتر و دقت فضایی را به محدوده میلی‌متر رساند جهش عظیمی در این حسگرها به وجود آمد. پیچیدگی‌های بسیار زیاد روش الکترونیک محور همبستگی فازی-دروازه زمانی در روابط و مفروضات ریاضی و همچنین الگوریتم پردازش سیگنال‌های بسیار زیاد در این روش، فهم آن را بسیار سخت کرده است. در این مقاله به کمک روشی سراسر و جدید به نام ترکیب همبستگی فازی و فرکانسی و بدون نیاز به الگوریتم‌های پیچیده و روابط سنگین، طول سنجش ۶/۴۹۰ کیلومتر با توان تفکیک فضایی ۹ میلی‌متر برای حسگر توری دینامیکی بریلوئن به دست آمده است.

۶. مراجع

- [1] Bao Xiaoyi and Liang Chen, "Recent progress in distributed fiber optic sensors," sensors, vol. 12, no. 7, pp. 8601-8639, 2012.

- [23] Zou, Weiwen, Zuyuan He, and Kazuo Hotate, "One-laser-based generation/detection of Brillouin dynamic grating and its application to distributed discrimination of strain and temperature," *Optics express*, vol. 19, no. 3, pp. 2363-2370, 2011.
- [24] R. K. Yamashita, Z. He, and K. Hotate, "Spatial resolution improvement based on intensity modulation in measurement of Brillouin dynamic grating localized by correlation domain technique," In *OFS2012 22nd International Conference on Optical Fiber Sensors*, vol. 8421, p. 84219H, International Society for Optics and Photonics, 2012.
- [25] Zou, Weiwen, et al, "Correlation-based distributed measurement of a dynamic grating spectrum generated in stimulated Brillouin scattering in a polarization maintaining optical fiber," *Optics letters*, vol. 34, no. 7, pp. 1126-1128, 2009.
- [26] A. Malakzadeh and M. Mansoursamaei, "New matrix solution of the phase-correlation technique in a Brillouin dynamic grating sensor," *Journal of Optical Technology*, vol. 85, no. 10, pp. 644-647, 2018.
- [27] Comesaña, D. Fernandez, K. R. Holland, and E. Fernandez-Grande, "Spatial resolution limits for the localization of noise sources using direct sound mapping," *Journal of Sound and Vibration*, vol. 375, pp. 53-62, 2016.
- [17] Li, Mengwen, et al, "True random coding for Brillouin optical correlation domain analysis," *OSA Continuum*, vol. 2, no. 7, pp. 2234-2243, 2019.
- [18] S. Chin, N. Primerov, and L. Thevenaz, "Sub-centimeter spatial resolution in distributed fiber sensing based on dynamic Brillouin grating in optical fibers," *IEEE Sensors Journal*, vol. 12, no. 1, pp. 189-94, 2011.
- [19] N. Primerov and L. Thévenaz, "Generation and application of dynamic gratings in optical fibers using stimulated Brillouin scattering," *PHD Thesis*, EPFL, Fév. 2013.
- [20] A. Malakzadeh, M. Mansoursamaei, and R. Pashaie, "A novel technique in BDG sensors: combination of phase and frequency correlation techniques," *Optical and Quantum Electronics*, vol. 52, no. 9, pp. 1-10, 2020.
- [21] S. N. Jouybari, H. Latifi, and F. Farahi, "Reflection spectrum analysis of stimulated Brillouin scattering dynamic grating," *Measurement Science and Technology*, vol. 23, no. 8, p. 085203, 2012.
- [22] Jouybari, S. Nouri, et al, "Spatial resolution enhancement for Brillouin optical time domain analysis distributed sensor by use of correlation peak," *Optical Measurement Systems for Industrial Inspection VI*, vol. 7389, p. 73892T, International Society for Optics and Photonics, 2009.