

## شبیه‌سازی روش همبستگی فازی در حسگرهای توری دینامیکی بریلوئن برای رسیدن به قدرت تفکیک فضایی در حد میلی‌متر

عبداله ملک‌زاده<sup>۱\*</sup>، محسن منصورسمائی<sup>۲</sup>، سودابه نوری جویباری<sup>۳</sup>

۱- استادیار، ۲- دانشجوی دکتری دانشگاه امام حسین (ع)، ۳- استادیار دانشگاه مازندران

(دریافت: ۹۵/۱۲/۰۷، پذیرش: ۹۶/۰۲/۱۹)

### چکیده

حساسیت و دقت فوق‌العاده‌ی حسگرهای نوظهور فیبر نوری توزیعی سبب توجه ویژه به آن‌ها و استفاده روز افزون از آن‌ها در صنایع نوین و بخصوص کاربردهایی نظیر پایش امنیت مرزها و نشت لوله‌های انرژی، نظارت ایمنی سازه‌های عظیم شهری، خطوط راه آهن و .. شده است. قدرت تفکیک فضایی و طول اندازه‌گیری، دو پارامتری هستند که همواره مورد توجه محققان در این زمینه بوده است. آشکار است که در امور نظامی و عمرانی هر چه دقت فضایی بهتر باشد ایمنی بیشتر و خسارات کمتری مشاهده خواهد شد. بهترین دقت فضایی در این نوع حسگرها، در حسگرهای توری دینامیکی بریلوئن ثبت شده است که کمتر از ۱ سانتی‌متر می‌باشد. در این حسگرها از دو موج پمپ برای ساختن توری و یک موج گمانه برای مشاهده تغییرات آن استفاده می‌شود. چنین دقتی با استفاده از روش همبستگی فازی به‌دست آمده است که در آن امواج پمپ به کمک یک مدولاتور فازی PRBS که بر روی این امواج اختلاف فاز صفر و  $\pi$  به صورت تصادفی و البته دوره‌ای اعمال می‌کند، مدوله می‌شوند. البته از معایب این روش، پردازش سیگنال‌های سنگین و روابط ریاضی پیچیده حاکم بر آن است که درک این روش را بسیار سخت کرده است. در این مقاله به کمک روابط سراسر و قابل فهم ماتریسی، روش همبستگی فازی شبیه‌سازی شده و ابتدا دقت فضایی و سپس طول اندازه‌گیری محاسبه شده است. درنهایت با این روش ابداعی، دقت فضایی ۹ میلی‌متر برای طول اندازه‌گیری ۲۹۵ متر و دقت فضایی ۱۴ میلی‌متر برای طول اندازه‌گیری ۴۶۰ متر به‌دست آمده که کاملاً مطابق با نتایج حاصل از روش همبستگی فازی است بدون این‌که پیچیدگی‌های این روش را داشته باشد.

**کلید واژه‌ها:** حسگر توری دینامیکی بریلوئن، حسگرهای توزیعی فیبر نوری، روش همبستگی فازی، شبیه‌سازی ماتریسی همبستگی فازی.

## Simulation of Phase Correlation Technique in Brillouin Dynamic Grating Sensors to Achieve Spatial Resolution in the Millimeter Range

A. Malakzadeh\*, M. Mansoursamaei, S. Nouri Jouybari

Imam Hossein University

(Received: 25/02/2017; Accepted: 09/05/2017)

### Abstract

The high sensitivity and precision of the distribution optical fiber newfound sensors led to special attention to them and use them in the modern industry, and in particular applications such as monitoring of borders security and leakage of energy pipes, monitoring the safety of large urban structures, Railway lines and so on. The spatial resolution and sensing length are two basic characteristic parameters for researchers. It is obvious that in the military and industrial affairs, whatever the spatial resolution is better will be observed more safety and less damages. The highest obtained spatial resolution between the Brillouin scattering sensors is corresponds to Brillouin dynamic grating sensors which is less than 1 cm. In this sensors, grating was generated by two pump waves and was read by probe wave that senses the intruder. This spatial resolution is achieved using phase correlation technique. In this technique pump waves are modulated by a phase modulator PRBS that generated a periodic and random phase shift equal to 0 or  $\pi$ . Of course, the heavy signal processing and complicated mathematical equations are disadvantages of this technique. In this article, we simulate phase correlation technique using a straightforward matrix relations and calculated first, spatial resolution and then sensing length. finally, with this innovative technique is obtained 9 mm spatial resolution over a 295 m of sensing length and 14 mm spatial resolution over a 460 m of sensing length that is full matching with the results of phase correlation technique without having its complexities.

**Keywords:** Brillouin Dynamic Grating Sensor, Distributed Optical Fiber Sensors, Phase Correlation Technique, Matrix Simulation of Phase Correlation

## ۱. مقدمه

می‌شود [۲]، هر چه دقت فضایی بهتر باشد ایمنی بیشتر و خسارات کمتری را موجب خواهد شد.

در بین حسگرهایی که بر مبنای پراکندگی بریلوئن کار می‌کنند، حسگر توری دینامیکی بریلوئن [۱۵] بیشترین دقت فضایی را دارد. این حسگر بر پایه حسگرهای در حوزه همبستگی [۱۶] بنا شده است و دارای دقت کمتر از ۱ سانتی‌متر می‌باشد. این دقت فضایی با تکیه بر روش همبستگی فازی و با اعمال مدولاسیون فازی بر روی امواج پمپ به دست آمده است. برای درک چگونگی اعمال مدولاسیون فازی در این روش، پردازش سیگنال‌های سنگین و روابط ریاضی بسیار پیچیده‌ای نیاز است که فهم روش همبستگی فازی را به شدت سخت کرده است [۱۷]. در این مقاله ما قصد داریم برای درک بهتر روش همبستگی فازی، مدولاسیون فازی پیچیده حاکم بر این روش را با استفاده از روش سراسر و قابل فهم ماتریسی شبیه‌سازی کرده و نتایج حاصل از آن را با نتایج به دست آمده با روش پیچیده همبستگی فازی مقایسه کنیم. برای معرفی ماتریس مورد نظر ابتدا لازم است روش همبستگی فازی را بیشتر مورد بررسی قرار گیرد.

## ۱-۱. همبستگی فازی

در حسگرهای توری دینامیکی بریلوئن، توری دینامیکی به کمک دو موج پمپ نوری پیوسته که اختلاف فرکانسی به اندازه فرکانس بریلوئن (۱۰ مگاهرتز) دارند تولید می‌شود. ابتدا موج پمپ ۱ (با طول موج ۱۵۵۰ نانومتر) از یک سر فیبر به داخل آن وارد شده و به دلیل وجود اثرات حرارتی و نقاط صفر کوانتومی درون فیبر، یک موج استوکس ضعیفی در جهت برگشت تولید می‌شود. 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 نتیجه می‌دهد. سپس موج پمپ دوم که فرکانسی برابر با موج استوکس دارد از سمت دیگر وارد فیبر شده و موج آکوستیکی را تقویت می‌شود. برهمکنش این موج آکوستیکی با محیط فیبر، باعث ایجاد و تقویت نوسانات چگالی و یا همان توری درون محیط می‌شود [۱۰].

در روش همبستگی فازی، امواج پمپ ۱ و ۲ توسط یک مدولاتور فازی (PRBS) که یک شیفت فازی دوره‌ای به اندازه  $\pi$  صفر یا اعمال می‌کند مدوله می‌شوند. منظور از دوره‌ای بودن این است که بعد از یک تعداد خاصی از بیت‌های صفر و  $\pi$ ، دوباره یک دوره دیگر با همان شکل مدولاسیون به وجود می‌آید. هر کدام از این بیت‌های فازی، یک بازه زمانی مشخص را اشغال

بعد از دو دهه تحقیق و بررسی در حوزه حسگرهای توزیعی فیبر نوری، اکنون این حسگرها به پیشرفت‌های قابل توجهی رسیده‌اند. کاربردهای فراوان این حسگرها در زمینه‌های مختلف نظامی، پدافندی و صنعتی منجر به مقبولیت بیش از پیش این حسگرها شده است. حفاظت از مرزهای بین‌المللی کشورها در مقابل ورود و خروج افراد متجاوز [۱]، پایش مراکز و تأسیسات مهم همچون مراکز هسته‌ای و محل زندگی اشخاص مهم برای افزایش امنیت در اطراف آن‌ها، ایمنی بیشتر سازه‌های بشری از جمله لوله‌ها و مخازن انرژی، پالایشگاه‌ها، سدها، پل‌ها و... [۲]، چند نمونه از کاربردهای نوین این حسگرها در زمینه فناوری‌های پدافندی و دفاع در مقابل دشمن به شمار می‌آیند. دقت فوق‌العاده بالا و زمان پاسخ‌دهی اندک از جمله عواملی هستند که حتی بسیاری از کشورهای پیشرفته دنیا استفاده از این فناوری را به بسیاری از روش‌های دیگر ترجیح داده‌اند [۳ و ۴].

دقت فضایی<sup>۱</sup> و طول سنجش یا برد<sup>۲</sup> دو پارامتر مهم در حسگرهای توزیعی فیبر نوری هستند که اغلب تحقیقات در این زمینه به بهبود این دو پارامتر معطوف بوده است. برای مثال حسگرهای بر پایه پراکندگی بریلوئن همچون BOTDR<sup>۳</sup> [۵ و ۶] و BOTDA<sup>۴</sup> [۷-۹] که از مهم‌ترین و پرکاربردترین انواع حسگرهای توزیعی فیبر نوری به حساب می‌آیند در چند ده کیلومتر از طول سنجش دارای دقت فضایی چندین متر هستند. حسگر مورد استفاده در این مقاله نیز حسگری بسیار دقیق می‌باشد که بر پایه پراکندگی بریلوئن بنا شده است.

پراکندگی بریلوئن پراکندگی غیر الاستیک نور از نوسانات چگالی ماده می‌باشد. اگر این نوسانات چگالی از اثرات حرارتی و یا اثرات نقاط صفر کوانتومی<sup>۵</sup> ناشی شود، یعنی به طور ذاتی در فیبر وجود داشته باشد، این پراکندگی‌ها خود به خودی می‌باشند ولی در صورتی که این نوسانات چگالی ناشی از میدان نور فرودی به فیبر باشند این پراکندگی‌ها القایی می‌باشند [۱۰]. حسگرهای توزیعی فیبری که بر پایه پراکندگی بریلوئن القایی کار می‌کنند نسبت به سایر حسگرهای فیبری دارای دقت فضایی بیشتری هستند، به همین دلیل معمولاً در مواردی که دقت فضایی خیلی مهم باشد از این نوع حسگرها استفاده می‌شود.

یکی از بهترین دقت‌های فضایی که در حسگر BOTDA به دست آمده است دقت فضایی در حد چند سانتی‌متر بوده که برای طول‌های کمتر از ۵ کیلومتر ثبت شده است [۱۱-۱۴]. در بسیاری از کارهای نظامی و عمرانی که از این حسگرها استفاده

<sup>1</sup> Spatial Resolution

<sup>2</sup> Sensing Length

<sup>3</sup> Brillouin Optical Time Domain Reflectometry

<sup>4</sup> Brillouin Optical Time Domain Analysis

<sup>5</sup> Zero-Point Effects

<sup>6</sup> Pseudo-Random Bit Sequence

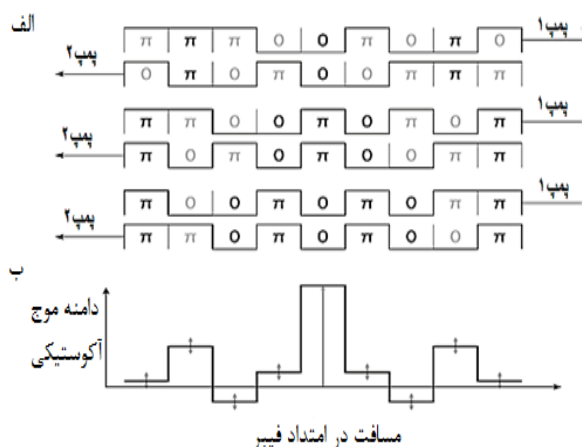
که در آن،  $n_{eff}$  ضریب شکست مؤثر فیبر و معمولاً برابر  $1/5$ ،  $c$  سرعت نور و ضریب  $\frac{1}{2}$  به خاطر حرکت دو موج به سمت یکدیگر است [۱۸]. در نهایت به کمک این روش برای ۴۶۰ و ۲۹۵ متر از فیبر سنجش به ترتیب قدرت تفکیک فضایی ۱۴ و ۹ میلی‌متر به دست آمده است.

## ۲. روش تحقیق

همان‌طور که گفته شد، در این مقاله برای نشان دادن مدولاسیون فازی دو موج پمپ، از روش ماتریسی استفاده شده است. در این روش برای موج پمپ ۱ تعداد ستون‌های ماتریس برابر تعداد بیت‌های مدولاسیون مورد نظر است و اگر دوره‌های مدولاسیون بعدی هم ظاهر شوند همه آن‌ها در سطر اول و در ستون‌های بعدی قرار خواهند گرفت. همچنین برای اینکه بتوان مدولاسیون فازی امواج پمپ ۱ و ۲ را در زمان‌های مختلف مشاهده و بررسی کرد، سطرهای این دو ماتریس را طوری تعریف شده است که هر سطر از سطر بالایی خود به اندازه یک بیت جلوتر باشد یعنی هر سطر به اندازه  $T$  جلوتر از سطر قبلی خود است. تعداد سطرهای این ماتریس‌ها برابر تعداد زمان‌هایی است که باید بررسی شود. هر چه تعداد سطرهای ماتریس بیشتر باشد دقت شبیه‌سازی بیشتر و قله‌های همبستگی مشخص‌تر خواهند شد. در این روش، ماتریس مورد نظر ماتریسی مربعی است و تعداد زمان‌های مورد بررسی معادل تعداد بیت‌ها در نظر گرفته شده است. بنابراین به طور خلاصه می‌توان گفت، وقتی یک ستون را در سطرهای مختلف بررسی می‌کنیم یعنی اینکه ما در حال بررسی یک مکان از طول فیبر، در زمان‌های مختلف هستیم. در این روش دو موج پمپ ۱ و ۲ که توری دینامیکی را می‌سازند به یک شکل، مدوله فازی شده‌اند. با توجه به اینکه این دو موج برای تولید توری به صورت رو در رو باهم برخورد می‌کنند، این امر باعث شده تا دو ماتریس طوری انتخاب شوند که هر دو به یک شکل مدوله فازی شده ولی نسبت به ستون وسط ماتریس، قرینه یکدیگر باشند. برای درک بهتر این روش، ماتریس این دو موج را به همان شکل ولی در مقیاس کوچک‌تر نشان داده شده است:

$$p1 = \begin{pmatrix} 0 & \pi & \pi & \pi & \dots & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & \pi \\ \pi & \pi & \pi & 0 & \dots & \pi & \dots & 0 & 0 & \pi & \pi \\ \pi & \pi & 0 & \pi & \dots & 0 & \dots & 0 & \pi & \pi & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & 0 & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \pi & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \pi & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & \pi & \pi & \pi & \dots & 0 & \dots & \pi & 0 & \pi & 0 \end{pmatrix} \quad (3)$$

می‌کنند. در طول فیبر هر جا که اختلاف فاز بین دو موج پمپ با گذشت زمان ثابت بماند در آن نقطه، قله همبستگی بین دو موج ایجاد خواهد شد [۱۷]. در شکل (۱) این مدولاسیون فازی در سه زمان مختلف در یک مکان نشان داده شده است [۱۸].



شکل ۱. 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 [۱۸]

به دلیل برهمکنش‌های مؤثر بین دو موج پمپ ۱ و ۲ در قله همبستگی، توری دینامیکی نیز تنها در همین نقطه تشکیل خواهد شد. در حسگرهای حوزه همبستگی فاصله بین دو قله همبستگی متوالی، طول سنجش و FWHM<sup>۱</sup>، قدرت تفکیک فضایی را نشان می‌دهد [۱۸]. با توجه به اینکه هر چه طول توری کوچک‌تر باشد دقت فضایی در این حسگرها بیشتر می‌شود، می‌توان نتیجه گرفت که هر چه پهنای قله همبستگی کمتر باشد، طول توری کوچک‌تر و در نتیجه دقت فضایی حسگر بالاتر می‌رود. در حسگرهای بر پایه همبستگی همواره سعی می‌شود برای بهتر کردن دقت فضایی، FWHM را کاهش دهند [۱۹]. اگر دوره زمانی هر یک از بیت‌های فازی را با  $T$  و تعداد هر بیت در یک دوره مدولاسیون را با  $N$  نشان داده شود، می‌توان قدرت تفکیک فضایی ( $\Delta z$ ) و فاصله بین دو قله متوالی یا همان طول سنجش ( $x$ ) را به این صورت به دست آورد:

$$\Delta z = 1 \times T \times \frac{c}{2n_{eff}} \quad (1)$$

$$x = \frac{c}{2n_{eff}} N \times T \quad (2)$$

<sup>1</sup> Full Width at Half Maximum

با مدولاسیون فازی، معادله توری دینامیکی بریلوئن به شکل معادله (۸) در خواهد آمد:

$$ma = A_{p1}A_{p2} * e^{j(qz - \Omega t)} \left\langle e^{j\pi [f_{PRBS}(t-t_{p1}(z)) - f_{PRBS}(t-t_{p2}(z))]} \right\rangle \quad (۸)$$

که در آن،  $\Omega$  اختلاف فرکانس بین دو موج پمپ و  $q$  اختلاف بردار موج بین این دو موج است. به دلیل اینکه در این روش از مدولاسیون فرکانسی استفاده نشده است  $A_{p1}A_{p2} * e^{j(qz - \Omega t)}$  یک مقدار ثابتی خواهد بود و قسمتی که مربوط به مدولاسیون فازی است یعنی  $\left\langle e^{j\pi [f_{PRBS}(t-t_{p1}(z)) - f_{PRBS}(t-t_{p2}(z))]} \right\rangle$  همواره در

حال تغییر است [۱۸]. که نشان دهنده این مطلب است که در یک زمان و مکان خاص مقدار فاز دو موج پمپ ۱ و ۲ از هم کم شده است. با دقت به ماتریس‌های قبلی می‌توان دید که تنها در مرکز فیبر اختلاف فاز بین دو موج صفر می‌شود در حالی که همین عبارت برای مکان‌های دیگر گاهی صفر و گاهی  $\pm 1$  خواهد شد. با توجه به اینکه این حاصل تفریق در قسمت نمایی رابطه (۸) حضور دارد، می‌توان نتیجه گرفت که در مرکز فیبر (چون  $T_{delay}=0$ ) همواره رابطه (۸) که نشان دهنده موج آکوستیکی است در تمام زمان‌ها در بیشترین مقدار خود قرار خواهد داشت. در واقع یعنی قله همبستگی در این مکان تشکیل خواهد شد.

برای رسم معادله موج آکوستیکی و به‌دست آوردن نقاط قله همبستگی یا همان نقاط تشکیل توری، رابطه (۸) به هنجار شده و سپس رسم می‌شود. در محاسبات انجام شده با روش پیچیده همبستگی فازی معمولاً با تنظیم مدوله کننده PRBS، دو مقدار ۹۰ و ۱۴۰ پیکوثانیه برای زمان هر بیت و دو مقدار ۱۰۲۳ (۱) و ۳۲۷۶۷ (۱ - ۲) برای تعداد بیت‌های هر دوره مدولاسیون فازی در نظر گرفته می‌شود زیرا کاهش و یا افزایش بیش از حد این دو پارامتر منجر به افزایش نویز در سامانه خواهد شد [۱۸]. در این مقاله هر چهار حالت ممکن برای زمان هر بیت و تعداد بیت‌های یک دوره مدولاسیون فازی بررسی شده است. با توجه به روابط (۱ و ۲) و اطلاعات داده شده در مورد زمان هر بیت و تعداد بیت‌های یک دوره مدولاسیون می‌توان دقت فضایی و طول سنجش را به‌دست آورد. دقت فضایی برای زمان هر بیت برابر با ۹۰ و ۱۴۰ پیکوثانیه:

$$\Delta z = 1bit \times 90 \times 10^{-12} \times \frac{3 \times 10^8}{2 \times 1.5} = 9mm \quad (۹)$$

$$\Delta z = 1bit \times 140 \times 10^{-12} \times \frac{3 \times 10^8}{2 \times 1.5} = 14mm$$

$$p2 = \begin{bmatrix} \pi & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & \dots & \pi & \pi & \pi & 0 \\ \pi & \pi & 0 & 0 & \dots & \pi & \dots & 0 & \pi & \pi & \pi \\ 0 & \pi & \pi & 0 & \dots & 0 & \dots & \pi & 0 & \pi & \pi \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & 0 & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & \pi & 0 & \pi & \dots & 0 & \dots & \pi & \pi & \pi & 0 \end{bmatrix} \quad (۴)$$

اگر تأخیر زمانی بین دو موج وجود نداشته باشد، دو موج در مرکز فیبر به یکدیگر می‌رسند. در لحظه اول که دو موج به هم می‌رسند، ماتریس حاصل از تداخل آن‌ها در مرکز فیبر به این صورت نشان داده می‌شود:

$$\begin{bmatrix} 0 & \pi & \pi & \pi & \dots & 0 & 0 & 0 & \dots & \pi & \pi & \pi & 0 \\ \pi & \pi & \pi & 0 & \dots & 0 & 0 & \pi & \dots & \pi & 0 & 0 & \pi \\ \pi & \pi & 0 & \pi & \dots & 0 & \pi & \pi & \dots & \pi & \pi & 0 & \pi \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & \pi & \pi & \pi & \dots & \pi & 0 & \pi & \dots & \pi & 0 & \pi & 0 \end{bmatrix} \quad (۵)$$

در لحظه بعد یعنی وقتی به اندازه زمان T می‌گذرد:

$$\begin{bmatrix} 0 & \pi & \pi & \pi & \dots & 0 & \dots & \dots & \dots & \pi & \pi & \pi & 0 \\ \pi & \pi & \pi & 0 & \dots & 0 & \dots & \dots & \dots & 0 & \pi & \pi & \pi \\ \pi & \pi & 0 & \pi & \dots & 0 & \dots & \dots & \dots & \pi & 0 & \pi & \pi \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & \pi & \pi & \pi & \dots & \pi & 0 & \pi & \dots & \pi & 0 & \pi & 0 \end{bmatrix} \quad (۶)$$

همان‌طور که مشخص است در مرکز فیبر همیشه اختلاف فاز بین دو موج یک مقدار ثابتی است یعنی وقتی تأخیری بین دو موج وجود ندارد همواره قله همبستگی در مرکز فیبر تشکیل خواهد شد و با گذشت زمان نیز این اختلاف فاز در مرکز تغییر نخواهد کرد. برای نشان دادن اختلاف فاز بین این دو موج، وقتی که آن‌ها به طور کامل بر روی یکدیگر قرار می‌گیرند، می‌توان ماتریس آن را به صورت ماتریس رابطه (۷) نشان داد:

$$p12 = p1 - p2 = \pi \times \begin{bmatrix} -1 & 1 & 1 & 1 & \dots & 0 & \dots & -1 & -1 & -1 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & \dots & 0 & \dots & 0 & -1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & -1 & 1 & \dots & 0 & \dots & -1 & 1 & 0 & -1 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & 0 & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & 1 & 0 & \dots & 0 & \dots & 0 & -1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (۷)$$

که همچنان اختلاف فاز بین دو موج در مرکز فیبر مقداری ثابت خواهد ماند. با توجه به رابطه موج آکوستیکی [۲۰] و ترکیب آن

محاسبه شده است. حال می‌توان قدرت تفکیک به‌دست آمده از طریق این شبیه‌سازی را در حالت‌های مختلف مشاهده کرد. همان‌طور که مشخص است دقت فضایی در این نمودارها کاملاً با مقادیر محاسبه شده مطابقت دارد.

برای تعداد ۱۰۲۳ بیت در هر دوره مدولاسیون و ۱۰ متر از فیبر نمودارهای ارائه شده در شکل‌های (۲) و (۳) برای به ترتیب هر بیت ۹۰ و ۱۴۰ پیکو ثانیه حاصل می‌شود. برای تعداد ۳۲۷۶۷ بیت در هر دوره مدولاسیون و ۱۰۰ متر از فیبر نمودارهای ارائه شده در شکل‌های (۴) و (۵) برای به ترتیب هر بیت ۹۰ و ۱۴۰ پیکو ثانیه حاصل می‌شود.

برای تعداد ۱۰۲۳ بیت در هر دوره مدولاسیون، نمودارهای ارائه شده در شکل (۶) (هر بیت ۹۰ پیکو ثانیه در ۳۰ متر از فیبر) و شکل (۷) (هر بیت ۱۴۰ پیکو ثانیه در ۵۰ متر از فیبر) حاصل می‌شود. برای تعداد ۳۲۷۶۷ بیت در هر دوره مدولاسیون، نمودارهای ارائه شده در شکل (۸) (هر بیت ۹۰ پیکو ثانیه در ۱۰۰ متر از فیبر) و شکل (۹) (هر بیت ۱۴۰ پیکو ثانیه در ۱۵۰ متر از فیبر) حاصل می‌شود.

طول اندازه‌گیری برای ۱۰۲۳ بیت در یک دوره مدولاسیون فازی:

$$x = \frac{3 \times 10^8}{2 \times 1.5} \times 90 \times 10^{-12} \times 1023 \approx 9m \tag{10}$$

$$x = \frac{3 \times 10^8}{2 \times 1.5} \times 140 \times 10^{-12} \times 1023 \approx 14m$$

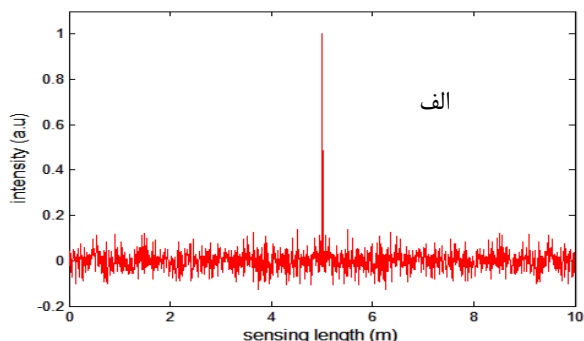
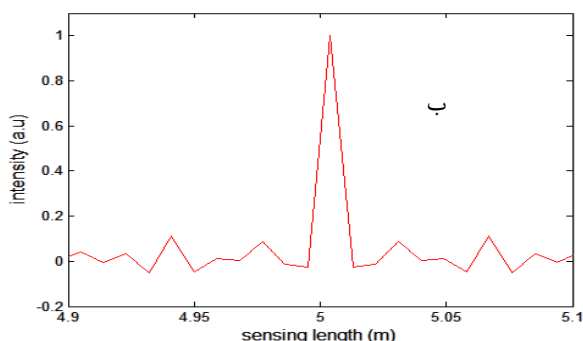
طول اندازه‌گیری برای ۳۲۷۶۷ بیت در یک دوره مدولاسیون فازی:

$$x = \frac{3 \times 10^8}{2 \times 1.5} \times 90 \times 10^{-12} \times 32767 \approx 295m \tag{11}$$

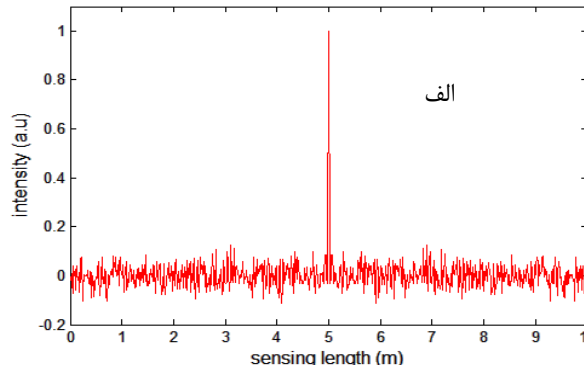
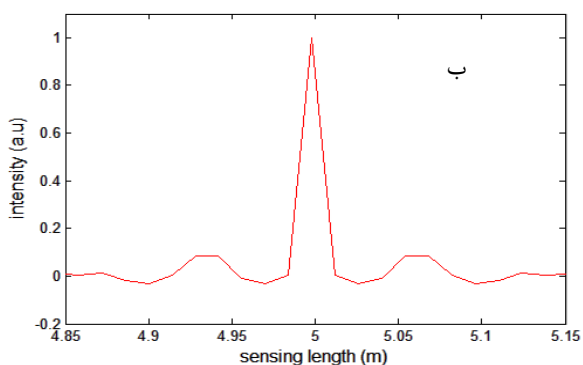
$$x = \frac{3 \times 10^8}{2 \times 1.5} \times 140 \times 10^{-12} \times 32767 \approx 460m$$

### ۳. نتایج و بحث

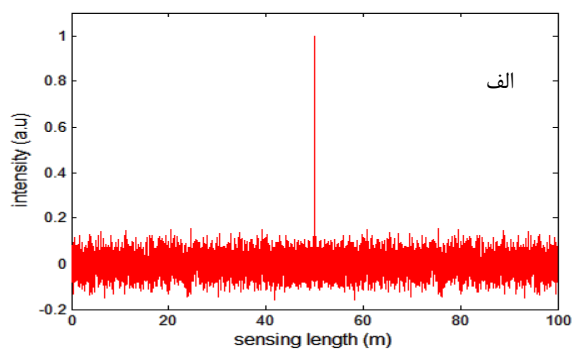
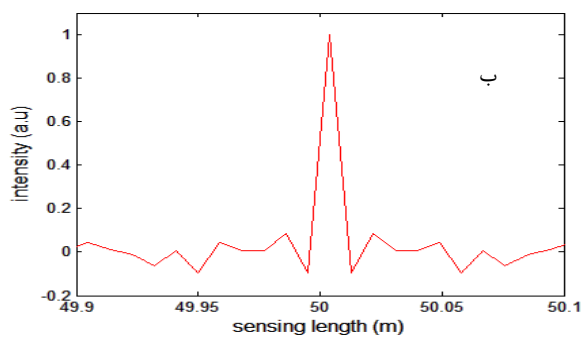
ابتدا با فیبرهایی با طول کم، نتیجه این شبیه‌سازی برای تنها یک قله همبستگی بررسی شده و میزان قدرت تفکیک فضایی به‌دست آمده است. در ادامه با در نظر گرفتن طول‌های بزرگ‌تر، تشکیل پیک‌های همبستگی بعدی را نشان داده و بیشترین طول سنجش



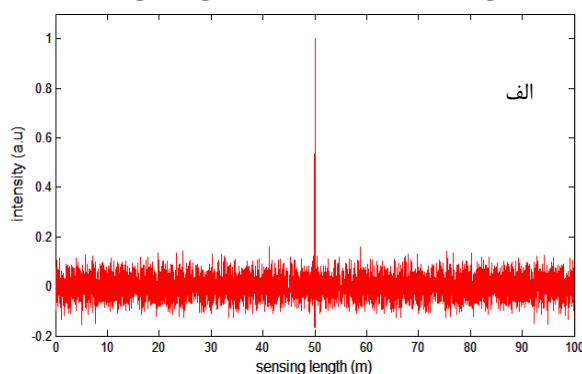
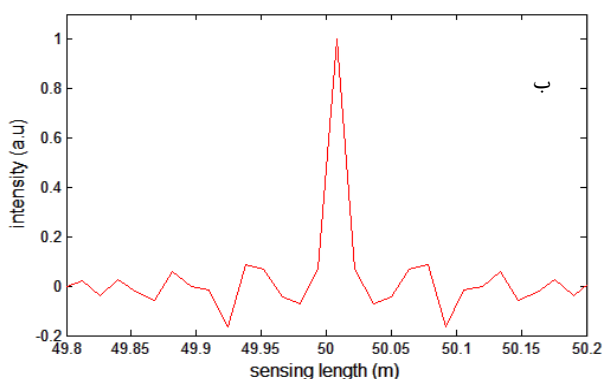
شکل ۲. الف) قله همبستگی فازی برای ۱۰۲۳ بیت در هر دوره مدولاسیون و زمان هر بیت ۹۰ پیکو ثانیه در ۱۰ متر از فیبر. ب) مکان و پهنای دقیق قله همبستگی فازی در شکل (الف) با دقت فضایی ۹ میلی‌متر



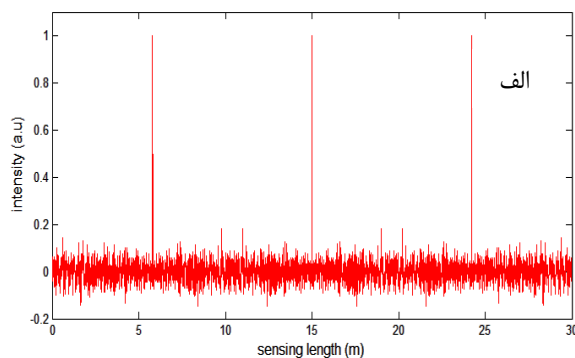
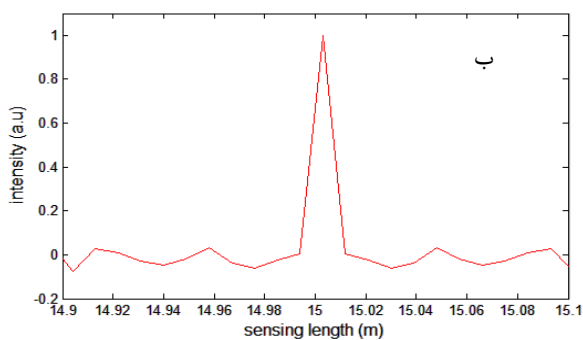
شکل ۳. الف) قله همبستگی فازی برای ۱۰۲۳ بیت در هر دوره مدولاسیون و زمان هر بیت ۱۴۰ پیکو ثانیه در ۱۰ متر از فیبر. ب) مکان و پهنای دقیق قله همبستگی فازی در شکل (الف) با دقت فضایی ۱۴ میلی‌متر



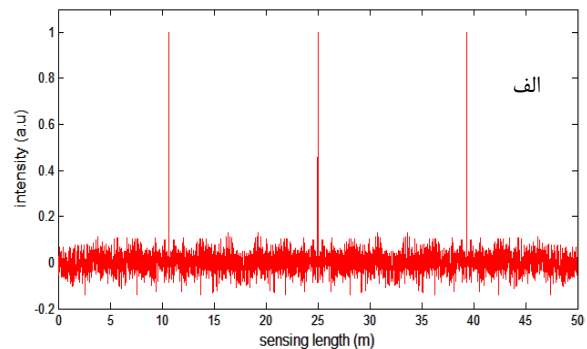
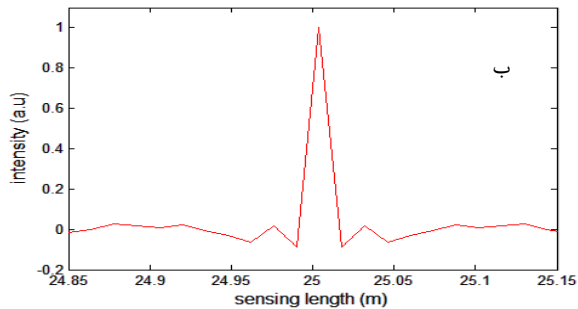
شکل ۴. الف) قله همبستگی فازی برای ۳۲۷۶۷ بیت در هر دوره مدولاسیون و زمان هر بیت ۹۰ پیکوثانیه در ۱۰۰ متر از فیبر. ب) مکان و پهنای دقیق قله همبستگی فازی در شکل (الف) با دقت فضایی ۹ میلی‌متر



شکل ۵. الف) قله همبستگی فازی برای ۳۲۷۶۷ بیت در هر دوره مدولاسیون و زمان هر بیت ۱۴۰ پیکوثانیه در ۱۰۰ متر از فیبر. ب) مکان و پهنای دقیق قله همبستگی فازی در شکل (الف) با دقت فضایی ۱۴ میلی‌متر



شکل ۶. الف) قله همبستگی فازی برای ۱۰۲۳ بیت در هر دوره مدولاسیون و هر بیت ۹۰ پیکوثانیه در ۳۰ متر از فیبر. ب) مکان و پهنای دقیق قله همبستگی فازی مرکزی در شکل (الف) با دقت فضایی ۹ میلی‌متر

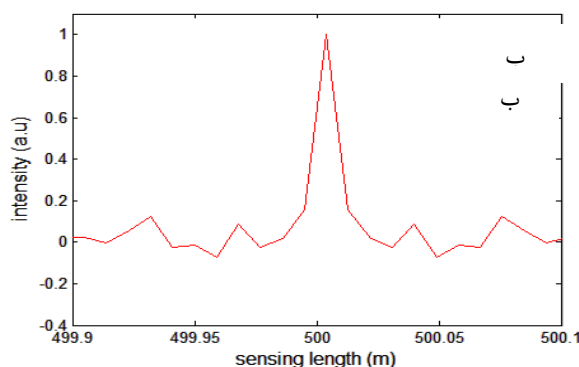
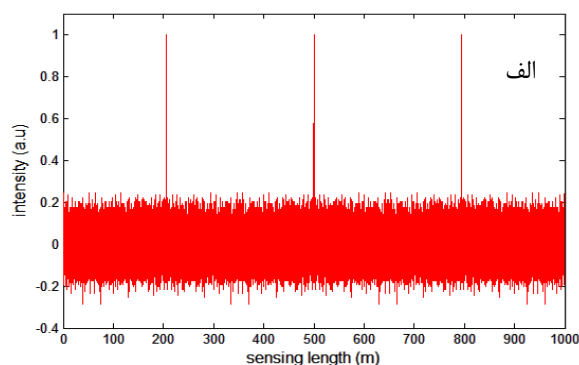


شکل ۷. الف) پیک‌های همبستگی فازی برای ۱۰۲۳ بیت در هر دوره مدولاسیون و زمان هر بیت ۱۴۰ پیکوثانیه در ۵۰ متر از فیبر. ب) مکان و پهنای دقیق قله همبستگی فازی مرکزی در شکل (الف) با دقت فضایی ۱۴ میلی‌متر

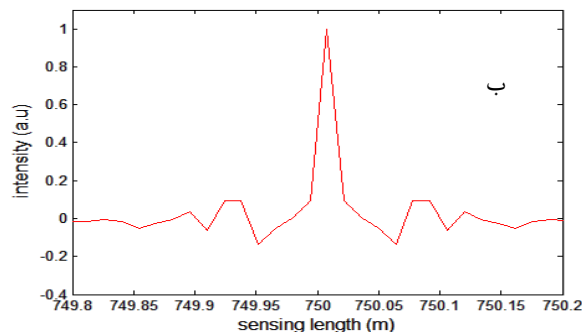
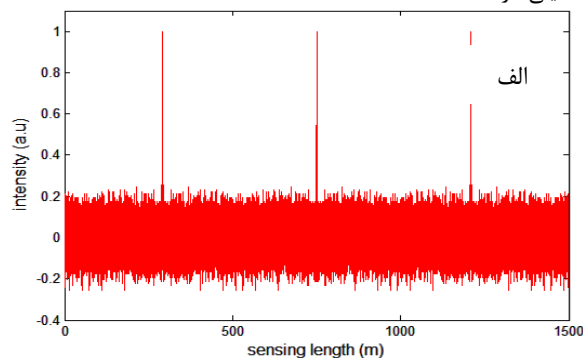
مطابق انتظار با افزایش تعداد بیت‌های هر دوره مدولاسیون فازی، قدرت تفکیک فضایی بدون تغییر می‌ماند، زیرا این پارامتر تنها به دوره زمانی هر بیت بستگی دارد و فقط طول سنجش است که با افزایش تعداد بیت‌ها افزایش می‌یابد، البته مقداری به نویز سامانه هم افزوده می‌شود [۱۸]. همان‌طور که گفته شد شکل مدولاسیون فازی اعمال شده، به صورت دوره‌ای تکرار می‌شود، یعنی اگر طول فیبر تحت آزمایش از طول فضایی یک دوره مدولاسیون فازی بیشتر باشد، این امر موجب می‌شود بعد از اینکه تمام بیت‌های یک دوره مدولاسیون فازی به اتمام رسید، دوباره یک مدولاسیون فازی دیگر به همان شکل مدولاسیون اولی تشکیل شود. در حسگر توری دینامیکی بریلوئن طول سنجش حسگر تا جایی می‌تواند زیاد شود که قله همبستگی بعدی که همان مکان تشکیل توری دینامیکی بعدی است ظاهر نشود. بنابراین همواره بیشترین طولی که می‌تواند برای ساخت این نوع حسگرها استفاده شود، مقداری کمتر از فاصله بین دو قله همبستگی فازی متوالی است. اکنون می‌توان با افزایش طول فیبر نمودارهایی را رسم کرد که از چند قله همبستگی تشکیل شده باشند تا به کمک آن‌ها طول سنجش حسگر فیبری و فاصله بین دو قله را به دست آورد. همان‌طور که مشخص است طول سنجش، کاملاً با محاسبات انجام شده تطابق دارد. مطابق انتظار طول سنجش در این نمونه‌ها برابر ۲۹۵ متر و ۴۶۰ متر به دست آمده است ولی همان‌طور که مشخص است وقتی تعداد بیت‌ها خیلی زیاد می‌شود میزان نویز افزایش می‌یابد [۱۸].

#### ۴. نتیجه‌گیری

دقت فضایی کمتر از ۱ سانتی‌متر در حسگرهای توری دینامیکی بریلوئن یکی از مهم‌ترین و جدیدترین دستاوردها در حوزه حسگرهای توزیعی فیبر نوری می‌باشد که با روش همبستگی فازی به دست آمده است. اما معایب این روش از جمله پیچیده بودن روابط ریاضی و پردازش سیگنال‌های زیاد حاکم بر آن، درک این روش را بسیار سخت کرده است. در این مقاله با استفاده از روش سراسر و قابل فهم ماتریسی، بسیاری از این روابط پیچیده را کنار گذاشته و درک بهتری از مدولاسیون فازی ایجاد شد. به کمک این روش ابداعی، دقت فضایی ۹ میلی‌متر برای طول اندازه‌گیری ۲۹۵ متر و دقت فضایی ۱۴ میلی‌متر برای طول اندازه‌گیری ۴۶۰ متر به دست آمده که کاملاً مطابق با نتایج حاصل از روش همبستگی فازی است بدون اینکه پیچیدگی‌های این روش را داشته باشد. همچنین این روش هیچ محدودیتی بیشتر از روش مرسوم همبستگی فازی نداشته و در تمام شرایط جوابی مشابه با آن خواهد داشت. شاید سراسر و روان بودن این شبه‌سازی باعث شود کمی از مفاهیم و مبانی فیزیکی این موضوع فاصله گرفته شود ولی با اطمینان می‌توان گفت که این



شکل ۸. الف) پیک‌های همبستگی فازی برای ۳۲۷۶۷ بیت در هر دوره مدولاسیون و دوره هر بیت ۹۰ پیکوثانیه در ۱۰۰۰ متر از فیبر. ب) مکان و پهنای دقیق قله همبستگی فازی مرکزی در شکل (الف) با دقت فضایی ۹ میلی‌متر



شکل ۹. الف) پیک‌های همبستگی فازی برای ۳۲۷۶۷ بیت در هر دوره مدولاسیون و دوره هر بیت ۱۴۰ پیکوثانیه در ۱۵۰۰ متر از فیبر. ب) مکان و پهنای دقیق قله همبستگی فازی مرکزی در شکل (الف) با دقت فضایی ۱۴ میلی‌متر

- [10] Boyd, R. W. "Nonlinear Optics"; Academic Press, 2003.
- [11] Kishida, K.; Che-Hien, L.; Nishiguchi, k. "Pulse pre-Pump Method for cm-Order Spatial Resolution of BOTDA"; Int. Society for Optics and Photonics 2005, 559-562.
- [12] Wenhai, L.; Bao, X.; Yun, L.; Chen, L. "Differential Pulse-Width Pair BOTDA for High Spatial Resolution Sensing"; Optics Express 2008, 16, 21616-21625.
- [13] Kalosha, V. P.; Ponomarev, E. A.; Chen, L.; Bao, X. "How to Obtain High Spectral Resolution of SBS-Based Distributed Sensing by Using Nanosecond Pulses"; Optics Express 2006, 14, 2071-2078
- [14] Foaleng-Mafang, S.; Beugnot, J. C.; Thévenaz, L. "Optimized Configuration for High Resolution Distributed Sensing Using Brillouin Echoes"; 20<sup>th</sup> Int. Conf. on Optical Fibre Sensors 2009, 75032C.
- [15] Yamashita, R. K.; He, Z.; Hotate, K. "Spatial Resolution Improvement Based on Intensity Modulation in Measurement of Brillouin Dynamic Grating Localized by Correlation Domain Technique"; 22<sup>nd</sup> Int. Conf. on Optical Fiber Sensor 2012, 84219H.
- [16] Song, K. Y.; Zou, W.; He, Z.; Hotate, K. "All-Optical Dynamic Grating Generation Based on Brillouin Scattering in Polarization-Maintaining Fiber"; Optics Letters 2008, 33, 926-928.
- [17] Jouybari, S. N.; Latifi, H.; Ahmadi, A.; Karami, M. "Spatial Resolution Enhancement for Brillouin Optical Time Domain Analysis Distributed Sensor by Use of Correlation Peak"; SPIE Europe Optical Metrology, Int. Society For Optics and Photonics 2009, 73892T.
- [18] Denisov, A. "Brillouin Dynamic Gratings in Optical Fibres for Distributed Sensing and Advanced Optical Signal Processing"; Ph.D. Thesis, École Polytechnique Federale de Lausanne, 2015.
- [19] Denisov, A.; Soto, M. A.; Thévenaz, L. "Going Beyond 1000000 Resolved Points in a Brillouin Distributed Fiber Sensor: Theoretical Analysis and Experimental Demonstration"; Light: Science & Applications 2016, 5, 16074.
- [20] Jouybari, S. N.; Latifi, H.; Farahi, F. "Reflection Spectrum Analysis of Stimulated Brillouin Scattering Dynamic Grating"; Measurement Sci. and Tech. 2012, 23, 085203.

شبیه‌سازی ماتریسی منجر به درک شهودی و قابل لمس‌تری از روش همبستگی فازی خواهد شد و همین امر امکان توسعه آن و رسیدن به دقت‌های فضایی کمتر یا طول‌های سنجش بیشتر را فراهم خواهد کرد.

## ۵. مراجع

- [1] Juarez, J. C.; Taylor, H. F. "Distributed Fiber Optic Intrusion Sensor System for Monitoring Long Perimeters"; Defense and Security, Int. Society for Optics and Photonics 2005, 692-703.
- [2] Bao, X.; Chen, L. "Recent Progress in Brillouin Scattering Based Fiber Sensors"; Sensors 2011, 11, 4152-4187.
- [3] National Institute of Building Sciences, "Provide Security for Building Occupants and Assets"; [http://www.wbdg.org/design/provide\\_security.php](http://www.wbdg.org/design/provide_security.php), 2007.
- [4] GlobalSecurity.org "US-Mexico Border Fence"; <http://www.globalsecurity.org/security/systems/mexico-wall.htm>, 2007.
- [5] Maughan, S. M.; Kee, H. H.; Newson, T. P. "57-Km Single-Ended Spontaneous Brillouin-Based Distributed Fiber Temperature Sensor Using Microwave Coherent Detection"; Opt. Lett. 2001, 26, 331-333.
- [6] Alahbabi, M. N.; Cho, Y. T.; Newson, T. P. "150-km-Range Distributed Temperature Sensor Based on Coherent Detection of Spontaneous Brillouin Backscatter and in-Line Raman Amplification"; J. Opt. Soc. Am. B 2005, 22, 1321-1324.
- [7] Horiguchi, T.; Tateda, M. "Optical-Fiber-Attenuation Investigation Using Stimulated Brillouin Scattering Between a Pulse and a Continuous Wave"; Opt. Lett. 1989, 14, 408-410.
- [8] Culverhouse, D.; Farahi, F.; Pannell, C. N.; Jackson, D. A. "Potential of Stimulated Brillouin Scattering as Sensing Mechanism for Distributed Temperature Sensors"; Electron. Lett. 1989, 25, 913-915.
- [9] Bao, X.; Dhliwayo, J.; Heron, N.; Webb, D. J.; Jackson, D. A. "Experimental and Theoretical Studies on a Distributed Temperature Sensor Based on Brillouin Scattering"; J. Lightwave Tech. 1995, 13, 1340-1348.