

حسگر توزیع شده فیبر نوری با تفکیک پذیری فضایی میلیمتری

سارا توفیقی^۱، نفیسه پیش بین^۲ و علیرضا بهرامپور^۳

^۱ پژوهشکده فناوری ارتباطات، مرکز تحقیقات مخابرات ایران، تهران، ایران

^۲ واحد بین الملل، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران

^۳ دانشکده فیزیک، دانشگاه صنعتی شریف، تهران، ایران

چکیده - برای پایش سلامت بدنه هواپیما، روش‌های حسگری با تفکیک پذیری میلیمتری مورد نیاز است. در انواع مختلف حسگرهای فیبر نوری مبتنی بر پراکندگی بریلوئن یک تقابل بین بهبود تفکیک پذیری فضایی و برد دینامیکی حسگر وجود دارد. در این مقاله روشی جدید برای دستیابی به تفکیک-پذیری فضایی میلیمتری در حسگرهای توزیع شده فیبر نوری با برد دینامیکی چند ده کیلومتری پیشنهاد می‌شود. از مزایای دیگر این روش می‌توان به زمان اندازه‌گیری کوتاه اشاره کرد. اساس روش پیشنهاد شده بر پایه‌ی پدیده انباشت فونون‌های آکوستیکی است که در نتیجه‌ی عبور پالس‌های پیکوثانیه پی در پی در فیبر حسگر تحریک می‌شوند.

کلیدواژه- حسگر توزیع شده فیبر نوری، پراکندگی بریلوئن با چندین پالس کوتاه، تفکیک پذیری فضایی میلیمتری، بازه دینامیکی کیلومتری

Distributed Fiber Sensor With mm Spatial Resolution

Sara Tofighi^{1,3}, Nafiseh Pishbin², and Ali Reza Bahrampour³

^۱Communication Technology Institute, Iran Telecommunication Research center, Tehran, Iran

^۲International Campus, Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran

^۳Physics department, Sharif University of Technology, Tehran, Iran

Abstract- In order to monitor the structural health of an aircraft, sensing method with millimeter spatial resolution is required. Brillouin-based optical fiber sensors often suffer from a tradeoff between their spatial resolution enhancement and their dynamic range. In this paper a new method is proposed that can achieve a mm-order spatial resolution in distributed fiber optic sensors with a dynamic range as long as several tens of kilometers. As an added advantage, this method has a shorter measurement time. The principle of the proposed technique is based on the accumulation of acoustic phonons which are stimulated due to the passage of successive pico-second pulses along the sensing fiber.

Keywords: distributed optical fiber sensor, multiple pulse Brillouin scattering, mm spatial resolution, km dynamic range

این مقاله در صورتی دارای اعتبار است که در سایت www.opsi.ir قابل دسترسی باشد.

۱- مقدمه

در سال‌های اخیر حسگرهای فیبر نوری به دلیل کاربردهای فراوانی که در حوزه‌های مختلف از جمله لرزه نگاری، دیدبانی خطوط انتقال نفت، دیدبانی مرزها و پایش سلامت سازه‌ها دارند به شدت مورد توجه قرار گرفته‌اند. علاوه بر این، حسگرهای فیبر نوری به دلیل قابلیت شبکه‌شدن و انتقال ایمن اطلاعات به فواصل دور، ایمنی در برابر تداخل‌های الکترومغناطیسی، مقاومت در برابر خوردگی، حساسیت بالا و ابعاد کوچک در مبحث اینترنت اشیا جایگاه ویژه‌ای پیدا کرده‌اند. اصول کار انواع مختلف حسگر فیبر نوری بر اساس انواع پراکندگی در فیبر نوری استوار است. با توجه به این‌که جابه‌جایی فرکانس بریلوئن به‌طور خطی با تغییرات درجه حرارت و کرنش رابطه دارد، حسگرهای فیبر نوری مبتنی بر پراکندگی بریلوئن قادرند تغییرات درجه حرارت و کرنش را در امتداد فیبر حسگر اندازه‌گیری کنند. اندازه‌گیری هم-زمان تغییرات درجه حرارت و کرنش محیط مستلزم بکارگیری کابل حسگر درجه حرارت و کابل حسگر کرنش در سیستم آشکارسازی است. در تکنیک‌های حوزه زمان مبتنی بر پراکندگی بریلوئن از پالس نوری برای پایش فیبر حسگر به طول چند صد کیلومتر استفاده می‌شود. به عنوان مثال در تکنیک BOTDA پرتو پمپ به صورت پالسی از یک سر فیبر ($z=0$) و پرتو استوکس به صورت پیوسته از سر دیگر ($z=L$) به فیبر تزریق می‌شوند. از لحظه ورود پالس پمپ به فیبر، طیف بهره پرتو استوکس پس-پراکنده شده بر حسب زمان اندازه‌گیری می‌شود. در صورتی که در یک لحظه از زمان تغییری در طیف پرتو استوکس پس-پراکنده شده مشاهده شود، می‌توان به وجود تغییرات دما/کرنش در نقطه متناظر از فیبر حسگر پی برد. تفکیک‌پذیری مکانی این تکنیک به عرض پالس پمپ بستگی دارد. عرض پالس پمپ حداقل باید برابر طول عمر فونون‌های آکوستیکی فیبر نوری (حدود 10 ns) باشد تا پراکندگی بریلوئن با بهره قابل توجه اتفاق بیفتد. بنابراین تفکیک‌پذیری مکانی این روش از مرتبه چند متر است [1]. در برخی از کاربردها هم‌چون پایش سلامت خطوط انتقال نفت و مرزداری، برد دینامیکی چند صد کیلومتری ضروری است و تفکیک‌پذیری فضایی از مرتبه چند متر کفایت می‌کند. استفاده از تکنیک BOTDA در این موارد گزینه مناسبی است. با این وجود در کاربرد پایش سلامت سازه‌ها از جمله بدنه هواپیما تفکیک-پذیری میلیمتری و برد دینامیکی چند ده کیلومتری مورد نیاز است و روش BOTDA پاسخگوی نیاز این کاربردها نمی‌باشد. برای افزایش تفکیک‌پذیری حسگرهای توزیع‌شده فیبر نوری مبتنی بر پراکندگی بریلوئن روش‌های مختلفی پیشنهاد شده است. به عنوان مثال در تکنیک حوزه هم‌بستگی (BOCDA) تفکیک‌پذیری مکانی از مرتبه یک میلی‌متر قابل دستیابی است ولی در عوض برد دینامیکی حداکثر حدود چند صد متر است [1]. بنابراین یک تقابل بین افزایش تفکیک‌پذیری و طول بازه

اندازه‌گیری در تکنیک‌های جایگزینی که تا کنون پیشنهاد شده است وجود دارد. علاوه بر این، در روش‌های حوزه زمان به دلیل زمان اندازه‌گیری نسبتاً زیاد، امکان آبی آشکارسازی تغییرات محیط وجود ندارد. زیرا در این روش‌ها برای بدست آوردن توزیع طیف بهره استوکس لازم است چندین بار و به ازای اختلاف فرکانس‌های مختلف پمپ و استوکس، فیبر حسگر پایش شود که این کار چندین دقیقه طول می‌کشد. در این مقاله روشی جدید پیشنهاد می‌شود که بر اساس آن بتوان تفکیک‌پذیری و طول دینامیکی حسگر فیبر نوری را به‌صورت بهینه افزایش داد و زمان اندازه‌گیری را به طرز قابل ملاحظه‌ای کاهش داد.

۲- اصول کار

در پراکندگی بریلوئن برانگیخته (SBS) پرتوهای پمپ و استوکس که در جهات مخالف هم منتشر می‌شوند با فونون‌های آکوستیکی محیط برهم‌کنش می‌کنند. اختلاف فرکانس بین پمپ و استوکس (Ω) میزان برهم‌کنش غیرخطی را تعیین می‌کند. در حالت ماندگار بیشترین توان بین پمپ و استوکس در فرکانس بریلوئن (ω_B) منتقل می‌شود که در فیبر مخابراتی مقدار آن تقریباً برابر است با ($2\pi \times 11\text{GHz}$). در واقع میرایی آهسته فونون‌های آکوستیکی فیبر منجر به پهنای باند کوچک SBS می‌شود ($\Gamma_B = 1/T_B \cong 1/10\text{ns}$). همان‌طور که قبلاً ذکر شد، تفکیک‌پذیری مکانی حسگر فیبر نوری در تکنیک BOTDA توسط عرض پالس معین می‌شود. بهره‌گذاری پالس‌های پمپ با عرض کوتاه‌تر از T_B به‌طور قابل ملاحظه نسبت به بهره حالت ماندگار کاهش می‌یابد و باعث می‌شود یک تقابل بین تفکیک‌پذیری مکانی و تفکیک‌پذیری فرکانسی در این تکنیک‌ها وجود داشته باشد. از طرف دیگر نشان داده شده است که با ایجاد برهم‌کنش بین پالس‌های پمپ کوتاه‌تر از T_B با محیطی که نوسانات فونون‌های آن قبلاً برانگیخته شده، می‌توان بر کاهش بهره بریلوئن غلبه کرد [3,2]. در صورت استفاده از قطاری از پالس‌های کوتاه متوالی ($T_p \ll T_B$) با نرخ تکرار τ_r ، هر یک از پالس‌های کوتاه با محیطی که فونون‌های آن به‌طور کامل به حالت واهلش نرسیده برهم‌کنش می‌کند و باعث برانگیختگی بیشتری برای پالس‌های بعدی می‌شود. به صورت تحلیلی و تجربی نشان داده شده است که در صورت تزریق قطاری از پالس‌های پمپ کوتاه به فیبری با طول کوتاه ($L < c\tau_p/n_0$)، پرتو استوکس پس پراکنده شده نیز به صورت قطاری از پالس‌های کوتاه خواهد بود که شدت هر یک از پالس‌ها نسبت به پالس قبلی بیشتر است (شکل ۱ الف) [3,2]. بر همین اساس در این مقاله روشی برای پایش درجه حرارت/کرنش در فیبرهای حسگر با طول بلند (چند ده کیلومتر) با استفاده از قطار پالس کوتاه پیشنهاد شده است. در این روش در هر بار پایش فیبر حسگر،

به سایر بخش‌ها کم‌تر تقویت می‌شوند. بنابراین در صورت وقوع هر اختلال در ناحیه کوچکی از فیبر حسگر، یک سری پالس‌های متناوب در نمودار شدت استوکس پس پراکنده شده، ظاهر می‌شود. دامنه پالس‌های ایجاد شده به میزان تغییرات درجه حرارت/کرنش بستگی دارد. هر چه تغییرات درجه حرارت/کرنش بیشتر باشد، دامنه پالس‌های اختلالی ایجاد شده بر روی نمودار شدت استوکس-زمان بزرگ‌تر است. با بررسی زمان ایجاد پالس-های کوچک می‌توان موقعیت اختلالات درجه حرارت/کرنش در امتداد فیبر حسگر را تعیین کرد. با توجه به اینکه پالس‌های استوکس پی در پی در نتیجه‌ی انباشت فونون‌های آکوستیکی محیط به وجود می‌آیند، بهتر است موقعیت اختلالات درجه حرارت/کرنش z_0 با استفاده از زمان برگشت آخرین و بزرگ‌ترین پالس محاسبه شود.

$$T_N = \frac{2n_0 z_0}{c} + N\tau_p + (N-1)\tau_p \quad (1)$$

کم‌ترین تفکیک‌پذیری قابل دست‌یابی در این روش متناسب با عرض پالس‌های کوتاه پمپ است. بنابراین تفکیک‌پذیری میلیمتری در این روش امکان‌پذیر است که نسبت به سایر روش‌های حوزه زمان پیشنهادشده دو مرتبه بزرگی بهبود یافته است. در ضمن در حسگرهای توزیع شده فیبر نوری با قطار پالس کوتاه، با یک بار پایش فیبر می‌توان تمام اطلاعات توزیع درجه حرارت/کرنش محیط را بدست آورد و نیازی به تکرار فرایند به ازای Ω ‌های مختلف نیست. در نتیجه زمان اندازه‌گیری نیز در این روش نسبت به سایر روش‌ها کاهش می‌یابد.

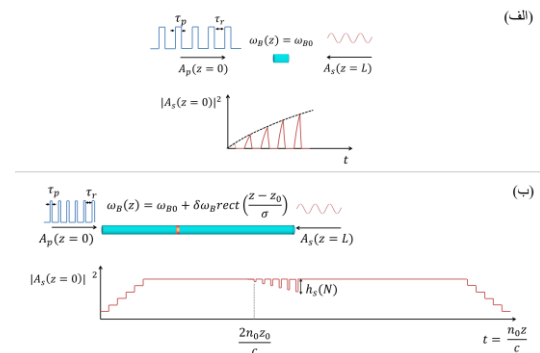
۳- نتایج حل عددی

معادلات دینامیکی پراکندگی بریلوئن در تقریب تغییرات آهسته پوش به صورت زیر بیان می‌شوند [4].

$$\begin{aligned} \frac{\partial A_p}{\partial t} + \frac{c}{n_0} \frac{\partial A_p}{\partial z} &= \frac{i\gamma_e \omega_p}{2n_0^2 \rho_0} Q A_s \\ \frac{\partial A_s}{\partial t} + \frac{c}{n_0} \frac{\partial A_s}{\partial z} - \frac{i\gamma_e \omega_s}{2n_0^2 \rho_0} Q^* A_p & \\ \frac{\partial Q}{\partial t} &= -\Gamma_A(\omega_B, \Omega) Q + \frac{\gamma_e \epsilon_0 q_B^2}{\Gamma_B - 2i\Omega} A_s^* A_p \end{aligned} \quad (2)$$

که در آن A_p ، A_s و Q به ترتیب دامنه پمپ، استوکس و موج آکوستیکی می‌باشند. $\gamma_e = 0.902$ و $\rho_0 = 2210 \text{ kg/m}^3$ به ترتیب ثابت الکترونگش و چگالی غیر اختلالی فیبر نوری با ضریب شکست $n_0 = 1.45$ می‌باشند. $q_B = \omega_B / v_a$ بردار موج آکوستیکی و پارامتر ناکوکی $\Gamma_A(\omega_B, \Omega) = (\omega_B^2 - \Omega^2 - i\Omega\Gamma_B) / (\Gamma_B - 2i\Omega)$ می‌باشند [5]. سرعت نور و گذردهی خلا به ترتیب با C و ϵ_0 نشان داده شده‌اند. برای شبیه سازی فرایند حسگری در فیبر نوری دستگاه معادله با مشتقات جزئی (۲) را به روش مشخصه (characteristic) حل می‌کنیم. همان طور که در شکل ۱ (ب)

قطاری از پالس‌های پمپ کوتاه (از مرتبه پیکونانیه) به داخل فیبر حسگر فرستاده می‌شود و در خروجی، شدت پرتو استوکس پس-پراکنده شده بر حسب زمان اندازه‌گیری می‌شود. با توجه به اینکه در این روش از پالس‌های کوتاه پیکونانیه استفاده می‌شود تفکیک‌پذیری مکانی میلیمتری حاصل می‌شود که نسبت به روش‌های قبلی حدود دو مرتبه بزرگی افزایش یافته است. اصول کار حسگر توزیع شده فیبر نوری با قطار پالس کوتاه به صورت نمادین در شکل ۱ (ب) نشان داده شده است. برای توصیف عملکرد این حسگر، ابتدا حالتی را در نظر بگیرید که درجه حرارت/کرنش در امتداد فیبر نوری ثابت است $(\omega_B(z) = \omega_{B0})$. یک فیبر نوری طویل را می‌توان به صورت مجموعه‌ای پی در پی از فیبرهای با طول کوتاه تصور کرد. با ورود پالس کوتاه m پمپ به اولین بخش کوچک فیبر، شدت پرتو استوکس پس پراکنده شده افزایش می‌یابد. وقتی پالس پمپ از اولین بخش فیبر خارج می‌شود در همان لحظه وارد بخش کوچک دوم می‌شود. بنابراین برخلاف فیبرهای کوتاه که با خروج پالس پمپ از آن شدت استوکس پس پراکنده شده صفر می‌شد (شکل ۱ الف))، در این حالت شدت استوکس تا قبل از ورود پالس پمپ $m+1$ به فیبر در یک حد ثابت باقی می‌ماند. روند افزایشی پلکانی شدت استوکس تا ورود تمام پالس‌های پمپ به فیبر ادامه می‌یابد و از آن پس شدت استوکس پس پراکنده شده مقدار ثابتی باقی می‌ماند. با خروج پالس‌های پمپ از انتهای فیبر شدت استوکس پس پراکنده شده به صورت پلکانی کاهش می‌یابد.



شکل ۱- نمودار شدت پرتو استوکس بر حسب زمان در اثر عبور قطار پالس (الف) از یک فیبر کوتاه (ب) از یک فیبر طویل که در بخش کوچکی از آن درجه حرارت/کرنش تغییر کرده است.

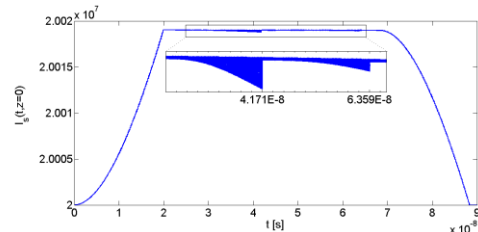
حال مطابق شکل ۱ (ب) حالتی را در نظر بگیرید که در یک نقطه مشخص از فیبر حسگر (z_0) ، درجه حرارت/کرنش در بازه‌ی $(\sigma = c\tau_p / (2n_0))$ تغییر کرده باشد $\omega_B(z) = \omega_{B0} + \delta\omega_B \text{rect}(\frac{z-z_0}{\sigma})$ که در آن rect تابع مستطیلی با عرض σ حول z_0 است. اگر اختلاف فرکانس پمپ و استوکس با فرکانس بریلوئن فیبر غیراختلالی برابر باشد $\Omega = \omega_{B0}$ ، پالس‌های پمپ با ورود به بخش اختلالی نسبت

پیشین کوتاه تر است که امکان آشکارسازی آنی تغییرات محیط را می دهد.

مراجع

- [1] C. A. Galindez-Jamioy and J. M. Lopez-Higuera, Hindawi Publishing Corporation, Journal of Sensors, Article ID 204121 (2012).
- [2] A. Corvo and A. Gavrielides, J. Appl. Phys. 64 No. 2, 489–495(1988).
- [3] N. I. Minkovski and T. P. Mirtchev, Pure Appl. Opt.1, 301–305 (1992).
- [4] G. Agrawal, *Nonlinear fiber optics*, 5 ed., USA: Academic Press, (2013).

نشان داده شده است، شرط مرزی پرتو استوکس را در $z=L$ به صورت ثابت و شرط مرزی پرتو پمپ در $z=0$ را به صورت قطار موج شامل $N=100$ پالس با عرض $\tau_p = 50 ps$ و نرخ تکرار $\tau_p = 3\tau_p$ در نظر می گیریم. در شبیه سازی عددی پرتو استوکس و توان هر پالس پمپ به ترتیب ۱ میلی وات و ۳۰ میلی وات در نظر گرفته شده است. شکل ۲ نتایج حل عددی را در فیبری به طول ۷ متر نشان می دهد که در دو نقطه مختلف $z_1 = 2.26m$ و $z_2 = 4.52m$ از آن به ترتیب اختلالات درجه حرارت به بزرگی $\Delta T_1 = 20$ و $\Delta T_2 = 10$ در بازه ای به طول $\sigma = c\tau_p / (2n_0) = 5mm$ اتفاق افتاده است. لازم به ذکر است که به ازای طول های بلندتر فیبر می توان نتایج مشابهی بدست آورد ولی به دلیل محدودیت قدرت پردازش کامپیوتر در شبیه سازی انجام شده، طول فیبر نسبتاً کوتاه در نظر گرفته شده است.



شکل ۲- نمودار شدت استوکس پس پراکنده شده در اثر عبور قطار پالس های کوتاه از فیبری که در درجه حرارت دوناخیه کوتاه از آن اختلال وارد شده. همان طور که در شکل ۲ نشان داده شده است در نمودار شدت استوکس بر حسب زمان، در اثر حضور اختلالات درجه حرارت یک سری پالس کوچک با دامنه افزایشی ظاهر شده است. طبق رابطه (۱) زمان دریافت آخرین پالس در هر سری دقیقاً با موقعیت اختلالات در فیبر سازگار است. همان طور که انتظار داشتیم تغییرات بیشتر درجه حرارت منجر به تولید پالس های اختلالی با دامنه بزرگتر شده است. با اندازه گیری نرخ تغییرات دامنه قطار پالس پس پراکنده شده و مقایسه نتایج با جدولی از پیش تعیین شده که دامنه تغییرات پالس ها را بر حسب درجه حرارت/کرنش مشخص می کند، می توان درجه حرارت/کرنش ناحیه اختلالی را بدست آورد. با توجه به اینکه انرژی فوتون های نور از افت و خیزهای درجه حرارت در فیبر بسیار بزرگتر است، بنابراین نوبه حرارتی نمی تواند باعث ایجاد خطا در سیستم شود. در صورت بکارگیری آشکارساز نوری مناسب می توان از حذف اثر نوبه های حرارتی در اندازه گیری ها اطمینان حاصل کرد.

۴- نتیجه گیری

در این مقاله روشی جدید پیشنهاد شده که بر اساس آن از قطار پالس های کوتاه برای پایش فیبر حسگر استفاده می شود. در این روش برد دینامیکی کیلومتری و تفکیک پذیری میلیمتری قابل دست یابی است. علاوه بر این زمان اندازه گیری نسبت به روش های