بیست و سومین کنفرانس اپتیک و فوتونیک و نهمین کنفرانس مهندسی و فناوری فوتونیک ایران
دانشگاه تربیت مدرس
۱۲-۱۴ بهمن ۱۳۹۵
23rd Iranian Conference on Optics and Photonics and 9th Conference on Photonics Engineering and Technology
Tarbiat Modares University, Tehran, Iran
January 31- February 2, 2017

حسگر فیبر براگ مرزبانی

فرشته اسماعیل زاده نوغانی [۱]، سارا توفیقی [۲] و علیرضا بهرامپور [۱]

[۱] دانشکده فیزیک، دانشگاه صنعتی شریف

[۲] پژوهشکده فناوری ارتباطات، مرکز تحقیقات مخابرات ایران

چکیده – در این مقاله روشی جدید برای آشکارسازی متجاوزین در کاربرد مرزبانی با استفاده از حسگرهای توزیع شده فیبر براگ پیشنهاد شده است. اساس این روش بر مبنای برانگیختگی مدهای آکوستیکی فیبر براگ تحت تاثیر عبور متجاوزین در مرزها استوار است. تغییرات مولفه شعاعی بردار جابه‌جایی مدهای آکوستیکی باعث تغییر ضخامت لایه‌های غلاف می‌شود. در نتیجه شرط لایه ربع موج نقض می‌شود و افت نور در محل عبور متجاوز افزایش می‌یابد. با بررسی نمودار حاصل از روش بازتاب سنجی حوزه زمان در فیبر براگ می‌توان مکان عبور متجاوز در مرز را تعیین کرد.

کلید واژه- افت، بازتاب سنجی حوزه زمان نوری، حسگر، فیبر براگ، مرزبانی

Border Protection Bragg Fiber Sensor

Fereshteh Esmail Zadeh Noghani[1], Sara Tofighi[2], and Ali Reza Bahrampour[1]

[1] Physics Department, Sharif University of Technology Tehran, Iran

[2] Communication Technology Institute, Iran Telecommunication Research Center, Tehran, Iran

Abstract-In this paper a new method for intruder detection in border protection application using distributed Bragg fiber sensors is proposed. This method is based on exciting the acoustic modes of Bragg fiber under the influence of intruders' passing in borders. The changes in radial component of displacement vector of acoustic modes cause the thickness of Bragg fiber's claddings to change. As a result the quarter wave stack condition is violated and the light loss in place of intruder's passing is increase. By investigating the resulting trace of Optical Time Domain Reflectometry method in Bragg fiber, it is possible to determine the position of intruder's passing in borders.

Keywords: Bragg Fiber, Border Protection, Loss, Optical Time Domain Reflectometry, Sensor

[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-11-03]

این مقاله به شرط در دسترس بودن در وبگاه *www.opsi.ir* معتبر است.

۱- مقدمه

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 متجاوزین بکار گرفته می‌شوند. از قابلیت‌های حسگرهای فیبر نوری به عنوان نمونه می‌توان به حساسیت بالا، قابلیت پایش بلادرنگ و همه‌جا، حسگری چند پارامتری، برد دینامیکی گسترده، مصونیت در برابر تداخل‌های الکترومغناطیسی، مقاومت در برابر خوردگی، قابلیت شبکه شدن و انتقال اطلاعات به فواصل دور اشاره کرد. به‌طور کلی حسگرهای فیبر نوری را می‌توان به دو دسته گسسته و توزیع‌شده تقسیم‌بندی کرد. در کاربرد مرزداری و آشکارسازی متجاوزین، حسگرهای توزیع‌شده فیبر نوری پیشنهاد می‌شوند.

هرچند فیبرهای نوری معمولی در حوزه ارتباطات عملکرد بسیار خوبی از خود نشان داده اند، ویژگی‌های ذاتی سیلیکا محدودیت‌هایی را بر این ساختار تحمیل می‌کند. به همین دلیل در سال‌های اخیر فیبرهای بلور فوتونی به شدت مورد توجه محققین حوزه‌های ارتباطات و حسگری فیبر نوری قرار گرفته‌اند. به‌طور کلی فیبرهای بلور فوتونی متشکل از یک هسته مرکزی و یک ساختار متناوب یک یا دو بعدی به عنوان غلاف می‌باشند. بسته به اینکه ضریب شکست هسته بیشتر یا کمتر از ضریب شکست موثر غلاف باشد، ساز و کار انتشار نور در فیبرهای بلور فوتونی می‌تواند بر اساس بازتاب کلی یا اثر گاف فوتونی باشد. از مزایای فیبرهای گاف فوتونی نسبت به فیبرهای سیلیکایی معمولی می‌توان به افت کم‌تر، اثرات غیرخطی کم‌تر و مشخصات پاشندگی ویژه آنها اشاره کرد. فیبرهای براگ نوع خاصی از فیبرهای گاف فوتونی می‌باشند. ساختار فیبر براگ از یک هسته محصور شده با لایه‌های دی-الکتریک هم‌مرکز تشکیل شده است که ضریب شکست‌شان به‌صورت تناوبی تغییر می‌کند. ویژگی‌های نوری فیبرهای براگ توسط تعداد، ضخامت و ضریب شکست لایه ها تعیین می‌شود.

ساز و کار هدایت نور در این ساختارها بر اساس بازتاب فرنل از مرزها است. اگر تداخل نهایی پرتوهای بازتاب شده از مرزها سازنده باشد، تحدید نور در هسته بیشینه بوده و در نتیجه افت تابش به بیرون از غلاف، حداقل می‌شود. هرچند میدان نور در هر لایه توسط یک موج رونده توصیف می‌شود اما نمایه عرضی کلی شدت میدان در جهت شعاعی به طرف خارج به صورت نمایی در حال افت است که نشان دهنده تحدید موج درون هسته فیبر براگ است. *[1]*.

از جمله مزایای فیبر براگ نسبت به سایر فیبرهای گاف فوتونی می‌توان به طراحی و ساخت ساده آنها اشاره کرد. علاوه بر این، فیبر براگ می‌تواند به نحوی طراحی شود که وابستگی محوری تک مد هدایت شونده نداشته باشد. بر خلاف فیبرهای معمولی که در آنها مد اصلی همیشه تبهگنی دوگانه دارد، این نوع مدهای هدایت شونده در فیبر براگ واقعاً تک مد هستند. در نتیجه، بسیاری از اثرات وابسته به قطبش می‌تواند در این ساختارها به طور کامل حذف شوند*[2]*.

حسگرهای فیبر براگ تا به حال برای کاربردهای متعددی از جمله حوزه زیستی به کار گرفته شده‌اند. در این مقاله قابلیت فیبرهای براگ در کاربرد مرزداری برای آشکارسازی متجاوزین مورد بررسی قرار گیرد.

در بخش دوم مقاله، اصول کار حسگر متجاوز فیبر براگ به تفصیل شرح داده شده است. در بخش سوم نتایج شبیه‌سازی و حل عددی مسئله آورده شده است و در انتها به تحلیل نتایج بدست آمده از شبیه‌سازی پرداخته شده است.

۲- اصول کار

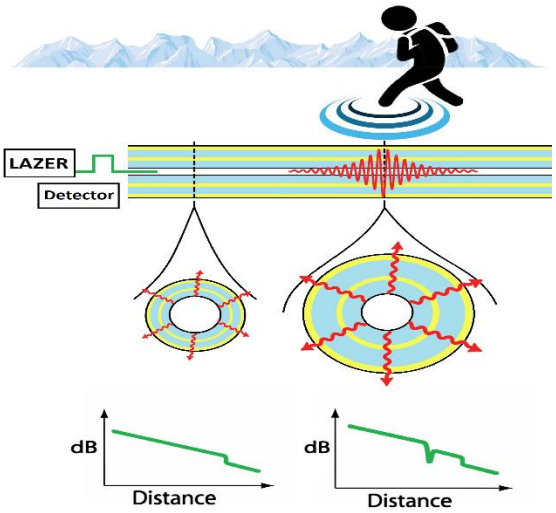
بازتاب‌سنجی حوزه زمان نوری (*OTDR*)، یکی از ساده‌ترین روش‌های حسگری توزیع‌شده فیبر نوری است که بر اساس پراکندگی ریلی استوار است و روشی موثر برای تعیین تغییرات موضعی در طول فیبر از جمله توزیع افت، مکان شکستگی‌ها و اتصالات محسوب می‌شود. روش کار *OTDR* بدین صورت است که یک پالس نوری کوتاه و پرتوان به درون فیبر فرستاده می‌شود و انرژی سیگنال ریلی پس پراکنده شده بر حسب زمان اندازه‌گیری می‌شود. ناهمگنی‌های ضریب شکست در طول فیبر سبب می‌شود تا در هر نقطه از فیبر قسمتی از توان پالس ارسالی پس‌پراکنده شود. نمودار شدت نور پس پراکنده شده بر حسب زمان پیوسته است و هر نقطه از آن متناظر با فاصله مشخصی از طول فیبر است که نور از آن پراکنده شده است. با استفاده از این نمودار می‌توان اطلاعات حسگری مورد نیاز در هر نقطه از فیبر را استخراج کرد.*[3]*

سیستم‌های *OTDR* با فیبر معمولی که در کاربرد آشکارسازی متجاوزین بکار گرفته می‌شوند، بر مبنای اثر الاستواپتیک کار می‌کنند. در حسگر متجاوز فیبر براگ علاوه بر اینکه اثر الاستواپتیک باعث ایجاد تغییرات در نمودار *OTDR* می‌شود؛

این مقاله به شرط در دسترس بودن در وبگاه *www.opsi.ir* معتبر است.

[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-11-03]

برانگیختگی مدهای آکوستیکی فیبر براگ و تغییر ضخامت لایه‌های غلاف باعث افزایش افت و تغییرات بیشتر نمودار *OTDR* می‌شود. در نتیجه امکان آشکارسازی متجاوزین در حسگرهای فیبر براگ افزایش می‌یابد.



شکل۱: اصول کار حسگر متجاوز فیبر براگ

اصول کار حسگر متجاوز فیبر براگ در شکل۱ نشان داده شده است. نحوه‌ی آشکارسازی متجاوز بدین صورت است که حسگر فیبر براگ در فاصله معنی زیر سطح زمین دفن می‌شود. سپس پالس نوری با فرکانس و ثابت انتشار مشخصی که در رابطه پاشندگی فیبر براگ صدق می‌کند به ابتدای فیبر تزریق می‌شود و شدت نور پس پراکنده شده به ابتدای فیبر بر حسب زمان اندازه‌گیری می‌شود. در غیاب متجاوز ضخامت لایه‌های غلاف فیبر در شرط لایه ربع موج صدق می‌کنند. در نتیجه بخش غالب توان نور در هسته فیبر براگ، تحدید و منتشر می‌شود. عبور متجاوزین بر روی سطح زمین باعث تولید و انتشار امواج آکوستیکی در خاک می‌شود که می‌تواند مد آکوستیکی فیبر براگ را برانگیخته کند.

به‌طور کلی بردار جابه‌جایی مدهای آکوستیکی در سه جهت شعاعی، زاویه‌ای و محوری (u_ρ, u_φ, u_z) مولفه دارند که مولفه شعاعی آن می‌تواند باعث تغییر ضخامت لایه‌های غلاف و نقض شرط لایه ربع موج شود. در نتیجه افت نور در ناحیه عبور متجاوز زیاد خواهد شد که به صورت کاهش در شدت نور پس پراکنده‌شده قابل آشکارسازی است.

در حالت کلی دو نوع افت در ساختار فیبر براگ وجود دارد: یکی افت تابشی یا تحدید که مربوط به اختلاف ضریب شکست غلاف‌ها و ضخامت لایه هاست و دیگری افت مربوط به جذب مواد که در مقایسه با مورد اول بسیار ناچیز است [4]. افت تحدید در این مقاله با روش تقسیم چندلایه محاسبه شده است[5]. در این روش ابتدا مولفه‌های محوری میدان‌های الکترومغناطیسی در لایه iام را به صورت زیر در نظر می‌گیریم:

$$H_z = \left[A_i H_\nu^{(2)}(\kappa_i r) + B_i H_\nu^{(1)}(\kappa_i r)\right] sin(\nu\theta + \theta_{in})\, e^{i(\omega t-\beta z)}$$

$$E_z = \left[C_i H_\nu^{(2)}(\kappa_i r) + D_i H_\nu^{(1)}(\kappa_i r)\right] cos(\nu\theta + \theta_{in})\, e^{i(\omega t-\beta z)}$$

که در آن $A_i - D_i$ ضرایب دامنه در لایه iام، β ثابت انتشار و κ_i ثابت انتشار مجانبی در لایه iام است که به صورت $k_0\sqrt{n_i^2 - (\beta/k_0)^2}$ تعریف می‌شود. در نتیجه میدان‌ها به‌صورت ماتریسی به شکل زیر نمایش داده می‌شوند:

$$\begin{pmatrix} H_z \\ iE_\theta \\ E_z \\ iH_\theta \end{pmatrix}_r = e^{i(\omega t-\beta z)} D_i(r) \begin{pmatrix} A_i \\ B_i \\ C_i \\ D_i \end{pmatrix}$$

با استفاده از پیوسته بودن مولفه‌های مماسی H_z ، E_θ ، E_z و H_θ در مرز هرلایه، می‌توان مولفه‌های مماسی میدان آخرین لایه را به مولفه‌های مماسی میدان اولین لایه به صورت زیر مرتبط ساخت:

$$\begin{pmatrix} H_z \\ iE_\theta \\ E_z \\ iH_\theta \end{pmatrix}_{r=r_N} = F_N(r_N, r_1) \begin{pmatrix} H_z \\ iE_\theta \\ E_z \\ iH_\theta \end{pmatrix}_{r=r_1}$$

با اعمال شرط متناهی بودن میدان‌ها در مرکز هسته یعنی $A_1 = B_1$ و $C_1 = D_1$ ، صفر شدن میدان‌ها در بی‌نهایت یعنی $D_{N+1} = B_{N+1}$ و کمی بازآرایش معادلات بالا به این معادله می‌رسیم:

$$[S]_{4*4} \begin{pmatrix} A_1 \\ A_{N+1} \\ C_1 \\ C_{N+1} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}$$

با صفر قرار دادن دترمینان ماتریس ضرایب S، معادله ویژه‌مقداری را حل کرده که با استفاده از آن رابطه پاشندگی بین فرکانس ω و ثابت انتشار فیبر براگ β بدست می‌آید. برای سادگی ، محاسبات عددی وشبیه‌سازی بر اساس پایین‌ترین مد TE_{00} یعنی $\nu = 0$ و $\theta_{in} = \pi/2$ انجام شده است.

در نهایت با استفاده از قسمت موهومی ثابت انتشار (β_I) می‌توان افت تحدید فیبر براگ را به صورت زیر محاسبه کرد[6]

$$\alpha\left[\frac{dB}{km}\right] = -\frac{20}{ln\,10} 10^9 \beta_I[\mu m^{-1}]$$

به دلیل استخراج افت تحدید از نمودار پاشندگی، این کمیت به ویژگی های ساختاری فیبر براگ از جمله تعداد و ضخامت غلاف ها بستگی دارد.

این مقاله به شرط در دسترس بودن در وبگاه *www.opsi.ir* معتبر است.

[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-11-03]

۳- نتایج حل عددی

پارامترهای مورد استفاده در محاسبات عددی، درجدول ۱ نشان داده شده است.

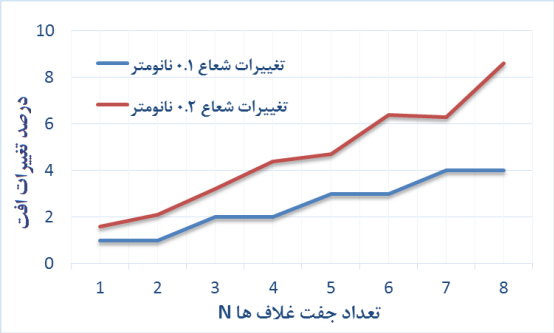
جدول ۱: پارامترهای برنامه

متغیر	مقدار
طول موج	۱۵۵۰ nm
ضریب شکست هسته (SiO_2)	۱,۴۴۴
ضریب شکست غلاف ۱	۲
ضریب شکست غلاف ۲	۱,۹۵
ضریب شکست بیرونی ترین لایه	۱
شعاع هسته	۱,۷۳ μm
ضخامت غلاف ۱	۰,۲۶۰۴۶ μm
ضخامت غلاف ۲	۰,۲۷۹۲۱ μm

به‌منظور تخمین مرتبه بزرگی تغییر ضخامت لایه‌های فیبر براگ در نتیجه عبور متجاوز، می‌توان کرنش وارد شده توسط متجاوز را حدود ۲۰ $\varepsilon\mu$ و شعاع فیبر براگ را حدود ۵ $m\mu$ در نظر گرفت. در این حالت مرتبه بزرگی تغییرات ضخامت لایه ها از حدود ۰,۱ nm می‌شود.

درصد تغییرات افت تحدید فیبر براگ ($|\Delta\alpha|$) بر حسب تعداد جفت غلاف‌ها، برای دو حالت افزایش ضخامت لایه‌ها به میزان ۰,۱ و ۰,۲ نانومتر نسبت به مقادیر شرط لایه ربع موج در شکل ۱ داده شده است.

مطابق شکل ۲، همان طور که انتظار داشتیم با افزایش تغییر ضخامت لایه‌های غلاف، تغییرات افت شدت نور برگشتی در نتیجه نقض شرط لایه ربع موج بیشتر می‌شود. هر چند که با افزایش تعداد غلاف‌ها تحدید نور در هسته بیشتر شده و مدهای نوری به مدهای هدایت شونده نزدیک‌تر می‌شوند اما با افزایش تعداد لایه‌ها، تغییرات افت تحدید نیز افزایش می‌یابد. لازم به ذکر است درصورتی‌که تغییرات افت در حد ۱ درصد باشد، توسط سیستم *OTDR* قابل آشکارسازی می‌باشد.



شکل۲: تغییرات افت برحسب تعداد جفت های غلاف

۴- نتیجه‌گیری

در این مقاله روشی جدید برای آشکارسازی متجاوزین با استفاده از بررسی تغییرات زمانی افت فیبر براگ پیشنهاد شده است. در غیاب متجاوز و حالتی که ضخامت لایه‌های غلاف فیبر براگ در شرط براگ صدق می‌کند، رابطه پاشندگی مدهای نوری فیبر براگ استخراج شد. سپس افت تحدید نور برای پایین‌ترین مد با استفاده از قسمت موهومی ثابت انتشار محاسبه شد. در نتیجه عبور متجاوزین مدهای آکوستیکی فیبر براگ تحریک می‌شود. به دلیل وجود مولفه شعاعی مدهای آکوستیکی تحریک‌شده، ضخامت لایه‌های غلاف تغییر می‌کند که باعث نقض شرط براگ و افزایش افت شدت نور برگشتی می‌شود. این تغییرات افت با استفاده از روش *OTDR* قابل آشکارسازی است. همان طور که انتظار می‌رفت این تغییرات افت با افزایش تعداد غلاف‌ها و میزان تغییر ضخامت آن‌ها افزایش می‌یابد.

مراجع:

[1] *C. M. de Sterke, I. M. Bassett, and A. G. Street, "Differential losses in Bragg fibers," J. Appl. Phys. 76, 680, 1994.*

[2] *Y. Xu, G.X. Ouyang, R.K. Lee, and A. Yariv, "Asymptotic matrix theory of Bragg fibers" J. Lightwave Technol., 20, 428, 2002.*

[3] *Anderson G., Johnson and Florian G., "Troubleshooting Optical Fiber Networks" San Diego: Elsevier Academic Press, 2004*

[4] *Safaai-Jazi A., Jen C.K., Farnell G.W. "Analysis of weakly guiding fiber acoustic waveguide", IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. Freq. Control., 33, 1, 1986,*

[5] *J. Sakai and H. Niiro, "Confinement loss evaluation based on a multilayer division method in Bragg fibers," Optics Express 16, 1885-1892, 2008.*

[6] *Sakai J., and Nishida N. "Confinement loss, including cladding material loss effects in Bragg fibers", Optical Society of America, Vol. 28, No. 3, 379-386, 2011*

این مقاله به شرط در دسترس بودن در وبگاه *www.opsi.ir* معتبر است.

[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-11-03]