بیست و ششمین کنفرانس اپتیک و
فوتونیک ایران و دوازدهمین کنفرانس
مهندسی و فناوری فوتونیک ایران،
دانشگاه خوارزمی،
تهران، ایران.
۱۵-۱۶ بهمن ۱۳۹۸

استخراج پروفایل ضریب شکست از شکل فازی فیبرهای نوری با استفاده از تبدیل معکوس رادون

محمدرضا جعفرفرد[۱]، ناهید گرامی فرد[۱]

دانشکده فیزیک دانشگاه علم وصنعت ، نارمک ، تهران

چکیده – در این مقاله یک روش محاسباتی برای استخراج اطلاعات ضریب شکست یک فیبر نوری با استفاده از اندازه گیری عکس فاز آن فیبر ارائه می شود. در این روش مشخصات ضریب شکست، توسط الگوریتم فیلتر بک پروجکشن بدست می‌آید که تبدیل رادون معکوس، بر روی ماتریس مشخصات فازی اعمال می‌شود. اطلاعات فاز یک فیبر تک مد با مشخصات ضریب شکست معین با استفاده از روش میکروسکپی پراشی فاز بدست آمد. سپس توسط روش تبدیل رادون معکوس ضریب شکست این فیبر از عکس فاز به آن استخراج شد. نتایج نشان می دهد که مشخصات اندازه‌گیری شده برای این تار تک مد، به خوبی با نمایه ضریب شکست تعیین شده توسط یک آنالایزور پیش‌فرض طراحی فیبر، مطابقت دارد.

کلید واژه- میکروسکوپ تداخلی، اندازه‌گیری فاز، فیبر نوری

Derivation of the refractive index profile of optical fibers from the phase image using inverse Radon transformation

Mohammad Reza Jafarfard[1] mrjafarfard@iust.ac.ir Nahid Gerami fard[1]

[1] *Department of Physics, Iran University of science and technology, Tehran*

Abstract- We present a computational method for the extraction of refractive index profile of an optical fiber using measurement of fiber phase image. **In this method the refractive index profile of fiber will be obtained by the filtered back projection algorithm that apply Radon transformation on the phase image matrix.** The phase information of a single mode fiber was obtained by the diffraction phase microscopy. Then the refractive index profile of this fiber was extracted using the inverse Radon transformation. The measured profile is well agreed with index profile of the preform, which had been designed by a preform analyzer before the fiber being fabricated from the preform.

Keywords: Interference microscopy, Phase measurement, optical fiber

[Downloaded from opsi.ir on 2026-11-18]

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

مقدمه

از آنجایی که خصوصیات تار نوری مانند مشخصات مد، پاشندگی و طول موج قطع را می‌توان از مشخصات ضریب شکست آن استخراج کرد، اندازه‌گیری دقیق نمایه‌ی ضریب شکست، از دهه‌های گذشته به یک موضوع مهم تبدیل شده است. چندین روش برای تعیین نمایه‌ی ضریب شکست تار نوری ارائه شده است. یکی از پر کاربردترین روش‌ها، روش شکست میدان نزدیک (refracted near field) یا RNF می‌باشد که به یک ابزار استاندارد صنعتی برای مشخص کردن ضریب شکست تبدیل شده است. با این وجود، این روش قادر به اندازه‌گیری تغییرات سریع ضریب شکست در امتداد محور تار نیست. همچنین برای استفاده از این روش تار نوری باید منقطع شود و از این جهت می‌تواند مخرب باشد. علاوه بر RNF، روش‌های دیگری مانند: معکوس شکست از اندازه‌گیری میدان مد اصلی و مطالعه‌ی پراکندگی نور با تار، وجود دارند که برای مشخص شدن نمایه‌ی ضریب شکست تارهای نوری استفاده می‌شوند اما همچنان از معایب سرعت پایین و مخرب بودن رنج می‌برند[1,2]. از میان این روش‌ها، تداخل سنجی می‌تواند روش مفیدی در تشخیص نمایه‌ی ضریب شکست تار نوری باشد زیرا از دقت و سرعت بالایی برخوردار است و همچنین غیر مخرب می‌باشد. در این روشها ابتدا با استفاده از میکروسکوپ کمی فاز از، اطلاعات فاز فیبر را بدست آورده و سپس با استفاده از روش تبدیل آبل اطلاعات ضریب شکست را بدست می آورند[3]. استخراج مقدار عددی ضریب شکست از شکل فاز کار چالش برانگیزی است. از آنجا که فرمول کلاسیک تبدیل معکوس آبل (Abel)، ممکن است خطاهای بزرگ اندازه‌گیری را در مجاورت مبدا تولید کند[3]، ما الگوریتم فیلتر بک پروجکشن (filtered back projection algorithm) را به عنوان یک طرح نوین برای استخراج مشخصات ضریب شکست تار نوری از ماتریس تصویر فازی اندازه گیری شده پیشنهاد می‌کنیم.

تئوری

در سیستم‌های تصویربرداری فاز کمی، فاز اندازه‌گیری شده‌ی $\Phi(x,y)$ می‌تواند به صورت زیر بیان شود:

$$\Phi(x,y)=\frac{2\pi}{\lambda}\int \delta n(x,y,z)dx \qquad (2)$$

که λ طول موج منبع نوری و $\delta n(x,y,z)$ اختلاف توزیع فضایی ضریب شکست سه‌بعدی بین نمونه و محیط اطراف آن است. در یک بازسازی توموگرافی (tomographic) استاندارد، باید توزیع فاز مسطح دو بعدی، جهت‌گیری‌های مختلف نمونه را پوشش دهد و همه‌ی ۱۸۰ درجه‌ی چرخش را ثبت کند. بر اساس قضیه برش فوریه (Fourier slice)، جمع‌بندی تبدیل فوریه‌ی فاز از همه جهت‌ها، ضریب شکست سه بعدی $n(x,y,z)$ در حوزه فرکانس است. بنابراین با تبدیل معکوس فوریه از این جمع، می‌توان ضریب شکست سه بعدی نمونه را بدست آورد:

$$n(x,y,z)=\frac{\lambda}{2\pi}FT^{-1}\sum_{\theta=0}^{180}FT(\Phi_\theta(x,y)) \qquad (3)$$

که FT تبدیل فوریه و $\Phi_\theta(x)$ اندازه‌گیری فاز در جهت θ است. این روش یک تکنیک شناخته شده تصویر برداری توموگرافی با اشعه X است[4]. محاسبات را می‌توان با استفاده از تبدیل رادون معکوس استاندارد انجام داد. غلاف تارهای نوری معمولاً توسط شیشه سیلیکا با ضریب شکست شناخته شده و ثابت در فضا، ساخته می‌شود. با این حال، هسته تارهای نوری دارای ضریب شکست ناشناخته و متغیردر فضا هستند و معمولا در جهت سمتی متقارن هستند. بنابراین $\Phi(x)$ که یک سطح مقطع از تصویر فاز است، می‌تواند با تبدیل آبل به صورت زیر نوشته شود:

$$\Phi(x)=\frac{4\pi}{\lambda}\int_x^R \delta n(r)\frac{rdr}{\sqrt{r^2-x^2}}=$$
$$\frac{4\pi}{\lambda}\int_x^a \delta n'(r)\frac{rdr}{\sqrt{r^2-x^2}}+\frac{4\pi.\delta n_0}{\lambda}\int_x^R\frac{rdr}{\sqrt{r^2-x^2}} \qquad (4)$$

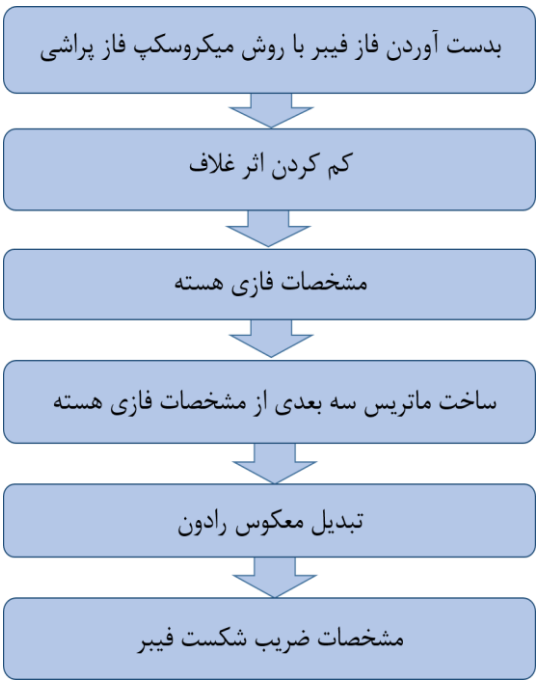
این مقاله درصورتی دارای اعتبار است که در سایت www.opsi.ir قابل دسترسی باشد.

[Downloaded from opsi.ir on 2026-11-18]

که a و R به ترتیب شعاع مغزی و غلاف تار هستند. پارامتر δn_0 اختلاف ضریب شکست بین غلاف و محیط و $\delta n'$ اختلاف ضریب شکست هسته و غلاف است. انتگرال دوم به سادگی برابر با $\Phi_0(x)=\frac{4\pi.\delta n_0}{\lambda}\sqrt{R^2-x^2}$ می‌شود. بنابراین، فاز مربوط به مغزی می‌تواند با تفریق فاز محاسبه شده‌ی غلاف از فاز اندازه‌گیری شده‌ی $\Phi'(x)=\Phi(x)-\Phi_0(x)$ بدست آید. استفاده از تبدیل معکوس آبل برای بدست آوردن نمایه‌ی تار از تصویر فاز، توسط رابطه‌ی زیر مرسوم است:

$$n(r)=-\frac{\lambda}{2\pi^2}\int_r^a\frac{\partial\Phi'(x)}{\partial x}(R^2-x^2)^{-\frac{1}{2}}dx \qquad (5)$$

با این‌حال، به دلیل داشتن پارامتر متغیر x، این انتگرال عددی ممکن است منجر به خطاهای اندازه‌گیری بزرگ در مجاورت مبدا شود. برای جلوگیری از بروز چنین مشکلی، ما الگوریتم‌های فیلتر بک پروجکشن را به عنوان یک روش جایگزین و قوی برای نمایه ضریب شکست تارهای نوری پیشنهاد می‌کنیم. با فرض این واقعیت که اکثر تارهای نوری در جهت سمتی متقارن هستند، اندازه‌گیری تصویر فازی در تارها در تمامی جهت‌ها باید یکسان باشد. بنابراین، با اندازه‌گیری یک تصویر فاز و قرار دادن آن در معادله‌ی (۳)، ضریب شکست تار را برای کلیه‌ی جهت‌ها می‌توان به دست آورد. در عین حال برای تارهای غیر متقارن، باید تار را چرخاند و فاز تار را در همه‌ی زوایای ۱۸۰ درجه اندازه‌گیری کرد. فرآیند به دست آوردن نمایه ی ضریب شکست از تصویر فاز برای تارهای نوری در شکل ۱ توضیح داده شده است. پس از بدست آوردن تصویر فاز میکروسکوپ فاز پراشی [5]، روش همسان‌سازی منحنی برای محاسبه $\Phi_0(x)$ استفاده می‌شود. این محاسبه به سادگی با آگاهی از ضریب شکست سیلیکا در غلاف تار انجام می‌شود. با کم کردن تصویر فاز اندازه‌گیری شده از غلاف محاسبه شده، می توان فاز مرتبط با هسته فیبر را استخراج کرد. سرانجام، پس از تعیین فاز مغزی، یک ماتریس سه بعدی با تصویر فاز مغزی تار ساخته می‌شود. از تبدیل معکوس رادون ماتریس، می‌توان برای تولید نمایه‌ی ضریب شکست تار استفاده کرد.



شکل ۱- روش بدست آوردن پروفایل ضریب شکست فیبر

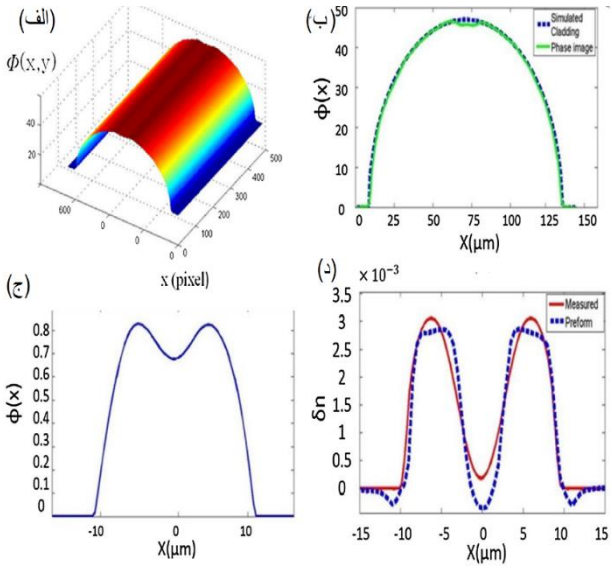
آزمایش

در شکل۲ (الف) مشاهده می‌شود که تصویر فاز نهایی به شکل استوانه‌ای است که مربوط به غلاف می‌باشد و شامل دو فرورفتگی ناشی از مغزی است. این شکل همچنین یک سطح مقطع از مشخصات تصویر فاز اندازه‌گیری شده‌ی تار را در $\lambda=532nm$ نشان می‌دهد. در قسمت (ب) فاز محاسبه شده‌ی $\Phi_0(x)$ برای غلاف (خطوط نقطه چین) نشان داده شده است. قسمت (ج) مقدار کاسته شده از تصویر فاز اندازه‌گیری شده برای غلاف که برابر با تصویر فاز مغزی می‌باشد و (د) مشخصات ضریب شکست اندازه‌گیری شده از نمونه آزمایش شده تار که توسط الگوریتم فیلتر بک پروجکشن بدست آمده است. مشخصات ضریب شکست

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

[Downloaded from opsi.ir on 2026-11-18]

مغزی که قبل از ساخت تار توسط آنالایزور طراحی به دست آمده، با خط کامل نشان داده شده است. توجه داشته باشید که حداکثر اختلاف ضریب شکست بین مغزی و غلاف تار مورد آزمایش ۰,۰۰۳ است که بسیار کوچک است. در نتیجه سیستم و الگوریتم پیشنهادی را برای اندازه گیری اختلاف کم ضریب شکست مغزی و غلاف، تایید می‌کند. مقایسه‌ی بین دو نتیجه نشان می‌دهد که مشخصات آنالایزور پیش فرض به خوبی با مشخصات ضریب شکست اندازه‌گیری شده ما مطابقت دارد. با این حال، عدم تطابق جزئی بین دو نتیجه دیده می‌شود. علت اصلی عدم همخوانی ناشی از وضوح محدود مکانی میکروسکوپ بود. از آنجا که برای تار، میدان دید بزرگ مورد نیاز است، اما یک مقدار کم از NA برای عدسی ($NA=.25$) استفاده شده است که برای وضوح مناسب در این آزمایش رزولیشن برابر ۱,۲m μ تخمین زده می‌شود.



شکل۲ الف) فاز فیبر اندازه گیری شده از طریق روش میکروسکوپ فازی پراشی ب) سطح مقطعی از تصویر فازی و غلاف شبیه سازی شده(خط شکسته) ج) تصویر فازی از مغزی د) مشخصات ضریب شکست اندازه گیری شده از مغزی (خط قرمز) و نمایه ی از پیش تعیین شده ی آن (خط چین آبی)

نتیجه‌گیری

در این مقاله یک روش جدید برای استخراج ضریب شکست فیبر نوری از عکس فاز آن معرفی شد. به دلیل اینکه اطلاعات فاز اندازه گیری شده حاصل ضرب ضخامت در ضریب شکست نمونه است، الگوریتم فیلتر بک پروجکشن و تبدیل معکوس رادون برای استخراج مشخصات ضریب شکست تار از تصویر فازی پیشنهاد شد. برای تایید درستی روش پیشنهادی توانایی شناسایی مشخصات ضریب شکست تار را با یک تار نوری تک مد نشان داده شد. نتایج توافق خوبی را بین دو روش اندازه‌گیری اندازه گیری ما و پروفایل طراحی فیبر از نظر شکل کلی نمایه‌ی ضریب شکست نشان داد.

مرجع‌ها

[1] Y. Park, N. H. Seong, Y. Youk and D.Y Kim, “Simple scanning fiber-optic confocal microscopy for the refractive index profile measurement of an optical fibre,” Meas. Sci Technol. 13, 695-699, 2002.

[2] D. J. Butler, K. A. Nugent and A. Roberts, “Characterisation of optical fibres using near-field scanning optical microscopy,” J. Appl. Phys. 75, 2753-2756, 1994.

[3] A Roberts, E. Ampem-Lassen, A. Barty, K. A. Nugent, G. W. Baxter, N. M. Dragomir and S. T. Huntington, “Refractive-index profiling of optical fibers with axial symmetry by use of quantitative phase microscopy,” Opt. Lett. **27**, 2061-2063, 2002.

[4] Kak, A. & Slaney, M. “Principles of Computerized Tomographic Imaging.” Academic Press, New York, 1999.

[5] M. R. Jafarfard, S. Moon, B. Tayebi, and D. Y. Kim, “Dual-wavelength diffraction phase microscopy for simultaneous measurement of refractive index and thickness,” Opt. Lett. **39**, 2908–2911, 2014.

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

[Downloaded from opsi.ir on 2026-11-18]