بیستمین کنفرانس اپتیک و فوتونیک ایران
و ششمین کنفرانس مهندسی و فناوری فوتونیک ایران
۸ تا ۱۰ بهمن ماه۱۳۹۲ - دانشگاه صنعتی شیراز

استفاده از تکنیک ماره و پردازش تصویر برای تعیین متریک دقیق جهت اتصال فیبر و موجبر

سهیلا جوادیان ورجوی[۱و۲]، خسرو معدنی پور[۱و۲] و رضا اسدی[۳]

[۱] پژوهشکده اپتیک، لیزر و فوتونیک،دانشگاه صنعتی امیرکبیر
[۲] آزمایشگاه مرکزی، اندازه‌گیری اپتیکی،دانشگاه صنعتی امیرکبیر
[۳] مجتمع برق و الکترونیک دانشگاه مالک اشتر تهران

چکیده – در این کار پس از طراحی و ساخت توری‌هایی در کنار یک موجبر، از تکنیک ماره و پردازش تصویر برای تعیین دقیق موقعیت دو موجبر و یا فیبر و موجبر نسبت به همدیگراستفاده شده است. نتایج بدست آمده دقت بالای تکنیک ماره اپتیکی را برای اندازه‌گیری موقعیت عرضی و طولی موجبرها تأیید می‌کند. در حالی که برای اندازه‌گیری زاویه، تحلیل مستقیم تصویر توری‌ها دقت خوبی را در پی دارد.

کلید واژه- اندازه‌گیری، پردازش تصویر، تکنیک ماره، موجبر

Using Moire Technique and Image Processing for Precise Metric Determination in Fiber and Waveguide Connection

Soheila Javadian Varjovi[1], Khosro Madanipour[2] and Reza Asadi[3]

[1]Optic, Laser and Photonic Institute, Amirkabir University
[2] Central Lab, Optical measurement ,Amirkabir University
[3] Electronic department, Malekashtar University

Abstract- In this work we create a grating beside the waveguide. Then we use moiré technique and image processing for precise metric determination of fiber and waveguide position. Results confirm that optical moiré method have high precision in Longitudinal and Transverse position measurement. while analysis of grating images yield well precision for angle measurements .

Keywords: Image processing, Measurement, Moiré technique, Waveguide

[Downloaded from opsi.ir on 2025-12-08]

۱- مقدمه

یکی از چالش‌های مهم در فوتونیک و مخابرات فیبر نوری، اتصال دقیق فیبرها و موجبرهاست که باید منجر به کمترین هدر رفت و پاشندگی شود. ناهماهنگی در پارامترهای هندسی و اپتیکی در اتصال دو فیبر، عامل اساسی پایین آمدن توان انتقال نور توسط فیبر است [1] . ناهماهنگی بین دو فیبر در سه بعد اتفاق می‌افتد: فاصله بین دو فیبر (ناهماهنگی طولی)، انحراف عمودی از محور هسته (ناهماهنگی عرضی) و وجود زاویه بین دو هسته فیبر. ناهماهنگی‌های عرضی و زاویه‌ای کوچک می‌توانند باعث افت توان بالایی در انتقال اطلاعات در فیبرها گردد. این مسئله در فیبرهای با قطر کمتر از ۱۵۰ میکرون که بیشتر برای ارتباطات مخابراتی کاربرد دارند، اهمیت بیشتری پیدا می‌کند[2] .

روشهای مختلفی برای اتصال دقیق با اتلاف کم بین فیبر و موجبر وجود دارد[3-5]. مسئله اساسی در تمامی این روش‌ها بحث متریک و اندازه‌گیری جابجایی‌های خطی و زاویه‌ای با دقت بسیار بالاست. البته این مسئله در تنظیم فعال که مبتنی بر اندازه‌گیری صورت می‌گیرد حائز اهمیت‌تر است[6] .

در این کار با ایجاد الگوهایی خطی به موازات فیبر و به موازات موجبر، متریکی برای اندازه گیری زاویه و جابجایی نسبی فیبر-موجبر به دست می آید. با تصویرگیری از این الگوهای خطی در حین تنظیم و تحلیل تصاویر مربوطه به صورت همزمان، سیگنالی جهت تنظیم دقیق بدست می آید.

به دلیل ابعاد پیکسل دوربین تصویرگیر، تحلیل مستقیم تصویر خطوط، محدودیت در دقت اندازه‌گیری جابجایی وجود دارد. بنابراین از تکنیک ماره برای افزایش دقت اندازه گیری جابجایی و زاویه استفاده می‌شود.

۲- مبانی نظری

بر هم نهی دو توری با گام‌های متفاوت و یا با وجود زاویه بین آنها، منجر به شکل‌گیری الگوهای ماره می‌شود که به شدت به حرکت توری‌ها حساس است. در صورتی که بر هم نهی فیزیکی باشد، ماره اپتیکی و اگر بر هم نهی از طریق برنامه‌نویسی و بصورت دیجیتالی انجام شود ماره دیجیتالی نامیده می‌شود.

برهم نهی دو توری با گامهای مساوی که نسبت به هم زاویه‌دار قرار گرفته‌اند، ایجاد فریزهای ماره‌ای خطی عمود بر خطوط اولیه توری می‌نماید. گام ماره وابسته به زاویه بین توری‌ها است.

$$d_M = \frac{d}{2\sin(\theta/2)} \qquad (۱)$$

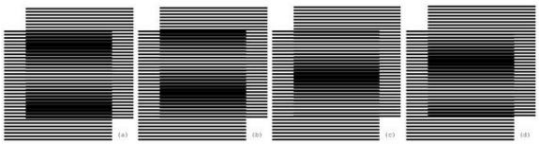
که در آن θ زاویه بین دو توری، d و d_M به ترتیب گام توری و گام ماره است [7].

جابجایی یکی از توری‌ها در راستایی عمود بر خطوط منجر به جابجایی بزرگتر ماره در راستایی عمود بر حرکت توری می‌گردد. این مسئله را می‌توان به صورت زیر نشان داد

$$\frac{\delta x}{\delta y} = \frac{d}{dM} \qquad (۲)$$

که در آن δx و δy به ترتیب میزان جابجایی توری و ماره، d گام توری و d_M ماره است. با توجه به رابطه اخیر با تشکیل ماره‌ای با گام بزرگتر از گام توری، جابجایی‌های کوچک توری با ضریب تبدیل $\frac{dM}{d}$ بزرگ شده و تبدیل به جابجایی بزرگتر فریزهای ماره خواهد شد.

در شکل (۱) نحوه برهم نهی و جابجایی نسبی توری‌ها و فریزهای ماره آمده است:



شکل ۱: حرکت خطوط ماره به ازای حرکت توری متحرک. جابجایی توری به اندازه گام توری منجر به جابجایی ماره به اندازه گام توری خواهد شد. الف- جابجایی صفر، ب- جابجایی d/4، ج- d/2 و د- 3d/4

طبق رابطه (۲) می‌توان دقت جابجایی را بدست آورد.

$$\Delta(\delta y) = \frac{dM}{d}\Delta(\delta x) \qquad (۳)$$

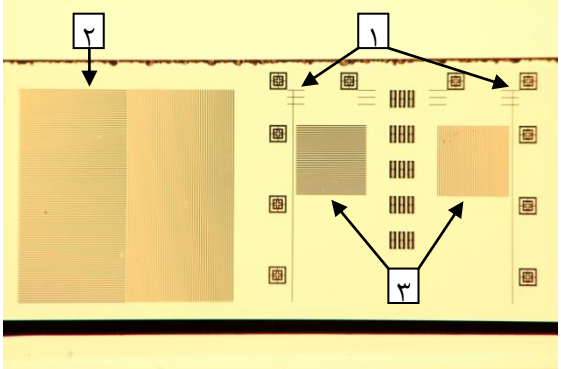
به طور خلاصه با استفاده از رابطه (۱) می توان زاویه بین دو توری و با استفاده از رابطه (۲) جابجایی نسبی دو توری را بدست آورد.

۳- کارها و نتایج تجربی

برای تنظیم اتصال فیبر به موجبر، الگوهای خطی به موازات موجبر و فیبر باید ایجاد شوند. الگویی از خطوط بر روی موجبر ایجاد می‌گردد. الگویی مشابه بر روی صفحه دیگری ایجاد می‌شود که می‌بایست بر روی

[Downloaded from opsi.ir on 2025-12-08]

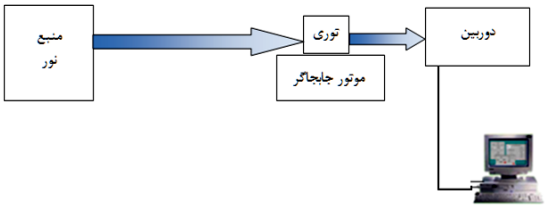
جابجاگر سوار شده و حامل فیبر نوری باشد. در شکل (۱) الگوی موردنظر برای ایجاد متریک در کنار موجبر و فیبر نوری نشان می‌دهد.



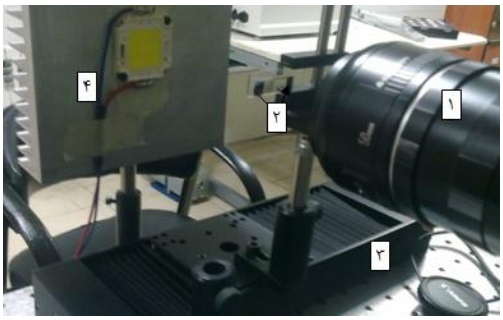
شکل ۲:تصویرموجبر (۱) در کنار توری‌ها (۲) و (۳).

برای انجام اندازه‌گیری‌های خطی و تهیه تصویر، از سیستم‌ها و ابزارهای زیر استفاده می‌شود: توری با ابعاد ۶×۶ میلیمترمربع و گام ۵۰ میکرون، دوربین Cannon با رزولوشن ۱۸ مگاپیکسل واندازه پیکسل ۴/۶ میکرون، عدسی، آداپتور عدسی به دوربین، موتور جابجاگر با دقت ۱۰ میکرون، گونیومتر با دقت ۰/۰۴ درجه، منبع نور، ابزارهای اپتومکانیکی و رایانه.

شماتیکی از چیدمان اپتیکی بکار رفته برای اندازه‌گیری با تحلیل مستقیم و خطوط ماره دیجیتال در شکل ۴ و تصویر واقعی چیدمان در شکل ۵ آمده است. برای اندازه-گیری و تهیه تصویر ماره اپتیکی باید توری دوم روبروی توری اول و بصورت مماس بر آن قرار گیرد.



شکل ۳: چیدمان مربوط به تصویرگیری از جابجایی خطی توری.



شکل ۴:چیدمان مربوط به تهیه تصویر از جابجایی توری. ۱- دوربین، ۲- توری، ۳- موتور جابجاگر و ۴- منبع نور .

برای اندازه‌گیری، توری بر روی موتور سوار گردیده و به ازای جابجایی توری به اندازه ۱۰ میکرون، تصویر توری ثبت و ذخیره می‌شود. جابجایی با گام ۱۰ میکرون با استفاده از موتور انجام شد و از طریق برنامه‌نویسی میزان جابجایی توری سنجیده شد. با پردازش تصویر توری از طریق برنامه Matlab، مقادیر جابجایی‌های انجام شده محاسبه گردید که در جدول ۱ آورده شده است.

برای اندازه‌گیری میزان جابجایی از الگوریتم یافتن لبه استفاده شد. در محاسبه میزان جابجایی، اندازه بزرگنمایی اپتیک دوربین لحاظ شده است. با در دست داشتن گام توری‌ها ۲۰ میکرون بود، ضریب کالیبراسیون تبدیل پیکسل به فاصله ۳/۳ µm/pixel بدست آمد.

جدول ۱:مقادیر جابجایی‌های انجام شده و نتایج حاصل از پردازش تصویر مستقیم توری.

جابجایی توری (میکرون)	۱۰	۲۰	۳۰	۴۰	۵۰
تعداد پیکسل‌های جابجا شده	۴	۸	۱۲	۱۶	۲۱
جابجایی محاسبه شده از برنامه (میکرون)	۱۲	۲۴	۳۶	۴۸	۶۳
درصد خطا	۲۰	۲۰	۲۰	۲۰	۲۶

با استفاده از برنامه‌نویسی مطلب جابجایی تصاویر از طریق ماره دیجیتال مورد ارزیابی قرار گرفت که نتایج حاصل از آن در جدول ۲ آورده شده است.

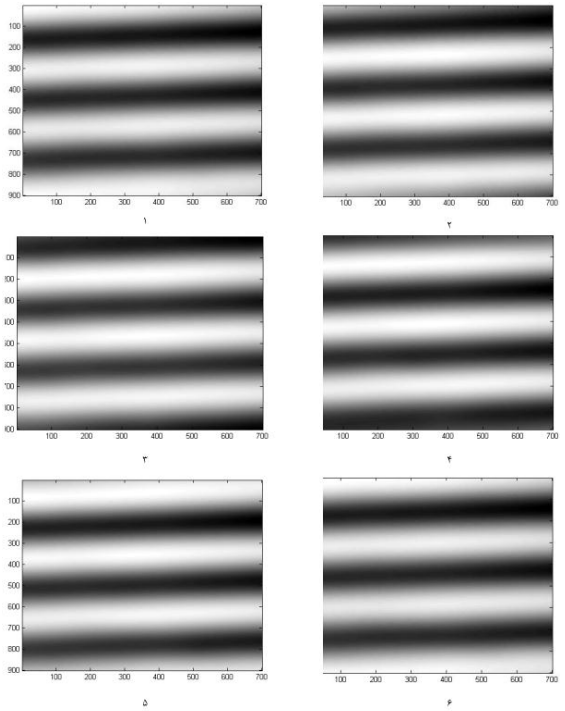
جدول ۲:مقادیر جابجایی‌های انجام شده و نتایج حاصل از بر هم نهی تصاویر توری و تشکیل ماره دیجیتال.

جابجایی توری (میکرون)	۱۰	۲۰	۳۰	۴۰	۵۰
جابجایی ماره (میکرون)	۲۵۱/۱	۵۰۸/۴	۷۵۳/۵	۹۵۰/۱	۱۱۴۶/۸
جابجایی توری حاصل از اندازه-گیری جابجایی ماره (میکرون)	۱۴/۴	۲۹/۲	۴۳/۳	۵۴/۶	۶۵/۹
درصد خطا	۴۴	۴۶	۴۴	۳۶	۳۲

جداول (۱) و(۲) نشان می‌دهد که میزان خطا در تعیین جابجایی به روش تحلیل مستقیم خطوط و ماره دیجیتال روش مناسبی نمی‌باشد. بنابراین سراغ ماره اپتیکی می-رویم.

برای تعیین دقت ماره اپتیکی نیاز به بر هم نهی فیزیکی توری‌هاست. با استفاده از تحلیل تصاویر تهیه شده، رفتار ماره اپتیکی در مقابل جابجایی‌های کوچک مورد بررسی قرار گرفت. شکل ۵ جابجایی ماره به ازای جابجایی توری با گام ۱۰ میکرون را نشان می‌دهد.

[Downloaded from opsi.ir on 2025-12-08]



شکل۵:تصویر جابجایی مارههای تشکیل شده در اثر جابجایی توری

نتایج حاصل از اندازهگیری به روش اپتیکی در جدول ۳ قابل مشاهده است.

جدول ۳:مقادیر جابجاییهای انجام شده و نتایج حاصل از بر هم نهی تصاویر توری و تشکیل ماره اپتیکی

گام ماره	۷۹۵/۶	۸۱۴/۸	۸۳۶/۸	۸۳۶/۸	۸۱۹/۱
جابجایی توری(میکرون)	۱۰	۲۰	۳۰	۴۰	۵۰
جابجایی ماره(میکرون)	۱۵۰/۰	۳۲۰/۶	۴۷۹/۴	۶۳۲/۳	۷۹۱/۲
جابجایی توری حاصل از اندازه-گیری جابجایی ماره (میکرون)	۹/۳	۱۹/۸	۲۹/۶	۳۹	۴۸/۸
درصد خطا	۷/۴	۱/۱	۱/۴	۲/۴	۲/۳

نتایج این جدول نشان میدهد که ماره اپتیکی روش مناسبی برای اندازهگیری جابجایی از مرتبه میکرون می-باشد.

همانگونه که گفته شد زاویه سهم مهمی در بالا بردن بهره جفت شدگی بین فیبر و موجبر داراست. برای تعیین دقت اندازهگیری زاویه، از گوینیومتر برای تغییر زاویه استفاده شد. با در نظر گرفتن ابعاد توری، ابعاد پیکسلهای دروبین و بزرگنمایی عدسی، کوچکترین زاویهای که توسط پردازش تصویر قابل دستیابی است برابر با ۰/۰۳ درجه است. تغییرات زاویهای اعمال شده، با استفاده از برنامه نویسی مورد ارزیابی قرار گرفت که نتایج آن در جدول ۴ خلاصه شده است.

جدول ۴:مقایسه مقادیر اندازهگیری شده و مقادیر حاصل از برنامه.

نتیجه برنامه	۰/۰۴۱	۰/۰۸۷	۰/۱۲۵	۰/۱۴۹	۰/۱۹۰	۰/۲۵۴
زاویه گوینیومتر	۰/۰۴	۰/۰۸	۰/۱۲	۰/۱۶	۰/۲	۰/۲۴
درصد خطا	۲/۵	۸/۷۵	۴/۲	۶/۹	۶	۵/۸

۴- نتیجهگیری

آنچه از مباحث مطرح شده میتوان دریافت این است که از بین سه روش مطرح شده برای اندازهگیری جابجایی خطی، روش ماره اپتیکی دقت بالاتری دارد. این مسئله از آنجا ناشی میشود که در ماره اپتیکی تصویر از نتیجه بر هم نهی دو توری تهیه میگردد و خطای حاصل از ابعاد محدود پیکسلها فقط یکبار بر محاسبات و نتایج تأثیر میگذارد و در حالی که خطا ثابت است، بزرگنمایی که ماره دارد باعث بالارفتن دقت میشود. با توجه به رابطه ۳ و با درنظر گرفتن متوسط گام ماره در جدول ۳، کوچکترین ابعادی که از طریق ماره قابل اندازهگیری می-باشد،۰/۶ میکرون است. مقادیر کمتر از ۰/۶ میکرون با کوچکتر کردن زاویه چرخش تورىها نسبت به همدیگر و بزرگتر کردن گام ماره امکانپذیر خواهد بود.

اندازهگیری زاویه با تحلیل مستقیم تغییر زاویه دقت قابل قبولی در پی داشت. بنابراین در این سیستم به ازای دقتهای تا ۰/۰۳ درجه میتوان از تحلیل مستقیم استفاده کرد. اما در صورت نیاز به دقتهای بالاتر استفاده از تکنیک ماره اجتناب ناپذیر است.

مراجع

[1] T. Montalbo, Fiber to Waveguide Couplers for Silicon Photonics, 2004.

[2] "Optical fiber connection: joints,couplers and isolators".

[3] N. Hirose and O. Ibaragi, "Optical Component Coupling using Self-Written Waveguides," *SPIE* , vol. 5355.

[4] C. D. Anderson, "Photopolymer Waveguide to Fiber Coupling via 3D Direct-Write Lithography," University of Portland, 2002.

[5] K. Chang Song, J. Uk Bu a, Y. Sam Jeon a, C. Keun Park, J. Hoon Jeong, H. Joon Koh and M. Ho Choi, "Micromachined Silicon Optical Bench for the Low Cost Optical Module".

[6] A. D. Yablon, Optical Fiber Fusion Splicing, Springer, 2005.

[7] E. Gabrielyan, "Moiré pointer for measurement instruments," *Institute of Technology, Lausanne (EPFL).*

[8] W. Osten, " Digital Image Processing for Optical Metrology," in *Springer Handbook of Experimental Solid Mechanics*, Springer.

[Downloaded from opsi.ir on 2025-12-08]