بیست و یکمین کنفرانس اپتیک و فوتونیک ایران
و هفتمین کنفرانس مهندسی و فناوری فوتونیک ایران
۲۳ تا ۲۵ دی ماه ۱۳۹۳، دانشگاه شهید بهشتی

پیاده سازی و تست آزمایشگاهی وامدگردانی همودایِن غیرفعال تداخل سنج فیبری

سید هاشم عارف

دانشگاه قم، گروه فیزیک، آزمایشگاه تحقیقاتی فوتونیک

چکیده – در این پژوهش اجرا و تست آزمایشگاهی وامدگردانی غیر فعال تداخل سنج فیبری انجام شده است. برای این منظور یک تداخل سنج تمام فیبری که در آن از آینه های چرخاننده فارادی و کوپلر ۳×۳ و مدولاتور فاز *PZT* استفاده شده ساخته شده است. با توجه به اینکه دو خروجی تداخل سنج سینوسی و دارای اختلاف فاز مشخصی هستند، با حذف فاز یک منحنی بیضی تولید میشود که با درون یابی داده ها با کمترین مربعات، پارامترهای بیضی با دقت بالایی محاسبه و تغییرات فاز تداخل سنج مستقیما محاسبه می گردد. جهت تست واقعی سیستم، بخشی از تداخل سنج بر روی نمونه ای از تیوب سیلیکونی پیچانده شده و با اعمال فشار نوسانی در داخل تیوب فشار صوتی محیطی شبیه سازی شده و به تداخل سنج اعمال می گردد. نتایج بدست آمده از حسگر فشار شاهد با نتایج وامدگردانی فاز انطباق مطلوبی دارد.

کلید واژه- تداخل سنج مایکلسون فیبری، وامدگردانی غیر فعال، درون یابی داده به روش کمترین مربعات

Implementation and experimental test of passive homodyne demodulation of fiber interferometer

S. H. Aref

University of Qom, faculty of physics, Photonics Research Lab

Abstract- In this paper, implementation and experimental test of passive homodyne of fiber interferometer has been done. For this purpose, an all-fiber interferometer was made of two Faraday rotator mirrors, a 3x3 coupler and PZT phase modulator. The quadrature fringe signals trace out an ellipse when the two outputs plotted against each other. By the least-squares fitting method, ellipse unknown parameters accurately have been obtained. The phase changes of interferometer were calculated by the modified unwrapping equation. For real test of the system, some length of interferometer arms are wrapped on a silicon tube and pressure fluctuations inside the tube cause to change phase of interferometer. The phase signal of interferometer ahse been obtained and were compared with the output of electrical pressure sensor.

Keywords: Michelson fiber interferometer, passive homodyne demodulation, least-squares fitting

[Downloaded from opsi.ir on 2026-01-30]

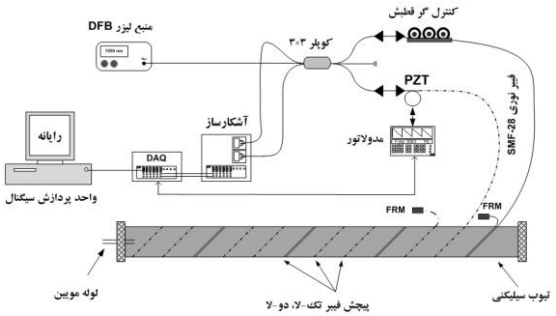
این مقاله در صورتی دارای اعتبار است که در سایت www.opsi.ir قابل دسترسی باشد.

۱- مقدمه

روش های مختلف تداخل سنج فیبری شامل ماخ زندر[۱] MZI، مایکلسون[۲] MI، فابری پرو و ساگناک از جمله مناسبترین روش ها برای پیاده سازی حسگرهای فیبر نوری برای کاربردهای مختلف و متنوع است. از جمله مزیت های آنها حساسیت بالا، دامنه دینامیکی مناسب، پهنای باند فرکانسی قابل تنظیم و عدم تاثیر پذیری نوفه های الکترومغناطیسی می باشد[1]. یکی از موانع اساسی توسعه حسگرهای تداخل سنجی فیبری مسئله محو شدگی قطبش است. محو شدگی قطبش ناشی از تغییرات دوشکستی در طول فیبر نوری در اثر عوامل محیطی نظیر دما است [2]. برای اندازه گیری امواج مکانیکی صوت بسته به فرکانس مدنظر روشهای MZI و MI هر کدام به نوبه خود با تغییراتی که در سیستم تداخل سنج اعمال شده برای اندازه گیری امواج صوتی به کار برده شده اند [1]. در MZI بدلیل محو سیگنال ناشی از ناپایداری نقطه کاری تداخل سنج و تبدیل نویز فاز منبع به نویز شدت در خروجی (در اثر طول نابرابر بازوها) و محو شدگی قطبش از اقبال کمتری برخوردار است در حالی که MI ضمن حساسیت دو برابری در شرایط مشابه، بدلیل امکان استفاده از آینه های چرخاننده فارادی[۳] FRM مشکلات محو قطبش در آن حل شده است [3]. در این مقاله، نمونه MI با استفاده از آینه های FRM پیاده سازی و بومی سازی شده و با تکنیک وامدگردانی غیرفعال فاز خروجی که متناسب با سیگنال اعمالی است بدست می آید. علاوه بر تست آزمایشگاهی در شرایط واقعی نیز سیگنال فشار از طریق شبیه ساز صوتی به تداخل سنج اعمال و با بازیابی سیگنال و مقایسه با سیگنال شاهد نتایج کارکرد حسگر مورد ارزیابی دقیق قرار می گیرد.

۲- اصول کار حسگر و روش وامدگردانی

نمایش شماتیک از حسگر MI در شکل (۱) ارائه شده است. در این حسگر از یک کوپلر ۳×۳ و دو FRM در انتهای دو بازوی تداخل سنج از PZT برای مدولاسیون فاز سیستم وامدگردانی استفاده شده است.



شکل ۱: نمایش شماتیک از حسگر MI و سیستم وامدگردانی.

نور لیزر پس از عبور از کوپلر ۳×۳ (با نسبت تزویج برابر) وارد دو بازوی متقابل خود شده و سپس از FRM ها بازتاب شده و در دو بازوی متقابل کوپلر ۳×۳ ترکیب و سیگنال تداخلی تولید می گردد. ویژگی کوپلر ۳×۳ علاوه بر تقسیم مساوی شدت نور بین بازوهای مقابل اختلاف فازی معادل $2\pi/3$ را اعمال می نماید. بنابراین انتظار می رود خروجی تداخل سنج شامل دو سیگنال بصورت زیر باشد:

$$\begin{aligned} x &= x_0 + a\sin[\phi(t) + p_0] \\ y &= y_0 + b\cos[\phi(t)] \end{aligned} \qquad (۱)$$

در این رابطه x_0 و y_0 شدت dc برای خروجی x و y است، a و b دامنه‌های دو خروجی، p_0 اختلاف فاز و بعنوان افست فاز ناشی از نوع سیستم تداخل سنج است. بررسی چگونگی تاثیر محوشدگی قطبش و بر طرف نمودن آن با استفاده از FRM در مرجع [5] بطور کامل بحث شده است. عملاً بدلیل ماهیت غیر خطی توابع سینوسی و وجود نوفه های محیطی، تغییرات فاز در بازه خطی محدودی قابل بازیافت است. در عمل با استفاده از روش های موثر وامدگردانی همودایِن و هترودایِن امکان بازیابی فاز در بازه دینامیکی وسیع امکان پذیر می گردد. یکی از روش های موثر بازیابی فاز اجرای وامدگردانی همودایِن غیر فعال و استفاده از درون یابی داده ها است. در این روش با حذف عامل $\phi(t)$ در رابطه (۱) (دو خروجی تداخل سنج) رابطه بیضی بدست می آید که دارای پنج پارامتر اساسی (x_0 ، y_0 ، a ، b ، p_0) است. این

---

[۱] Mach-Zehnder Interferometer
[۲] Michelson Interferometer
[۳] Faraday Rotator Mirror

[Downloaded from opsi.ir on 2026-01-30]

پارامترها در اثر تغییرات محیطی نظیر دما، استرس و تغییرات فشار دارای تغییرات کند و جزئی است و لذا می توان روش وامدگردانی غیر فعال را بر مبنای آن اجرا نمود. درون یابی داده ها با استفاده از داده های تجربی یک سیکل کامل بیضی و اجرای روش درون یابی داده ها به روش کمترین مربعات که به تفصیل در [4] بحث شده انجام می گردد. رابطه (۱) با کمی عملیات جبری به رابطه پارامتریک یک بیضی بصورت زیر تبدیل می شود:

$$\frac{x^2}{a^2}+\frac{y^2}{b^2}-\frac{2xy\sin p_\circ}{ab}-2x\left(\frac{x_\circ}{a^2}-\frac{y_\circ\sin p_\circ}{ab}\right)-2y\left(\frac{y_\circ}{b^2}-\frac{x_\circ\sin p_\circ}{ab}\right)=\cos^2 p_\circ-\left(\frac{x_\circ^{\,2}}{a^2}+\frac{y_\circ^{\,2}}{b^2}-\frac{2x_\circ y_\circ\sin p_\circ}{ab}\right) \quad (۲)$$

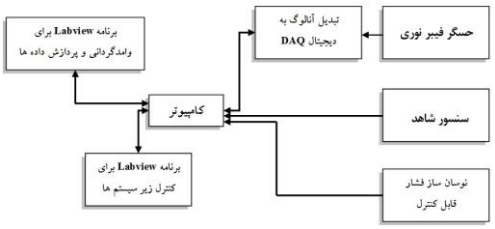
پس از انجام مرحله درون یابی داده ها و مشخص شدن پارامترهای بیضی می توان سیگنال فاز را از رابطه زیر محاسبه نمود:

$$\phi(t)=\arctan\left[\frac{\left(\frac{x-x_0}{a\cos p_0}-\frac{y-y_0}{b}\tan p_0\right)}{\frac{y-y_0}{b}}\right]\pm m\pi \quad (۳)$$

که در رابطه فوق m عدد صحیح می باشد. الگوریتم های متعدد غیر خطی برای درون یابی داده ها برای محاسبه پارامترهای بیضی وجود دارد که اولاً کند و ثانیا برای رسیدن به حالت همگرا دارای تعداد تکرارها غیر قابل پیش بینی هستند. لذا استفاده از الگوریتم های خطی بسیار مناسب تر است [5,6]. بنابراین با اعمال الگوریتم درون یابی کمترین مربعات خطی پارامترهای بیضی محاسبه و در برنامه اعمال می گردد.

۴- چیدمان آزمایش و ارائه نتایج تجربی

چیدمان آزمایش مطابق شکل (۱) است که در آن از یک لیزر DFB در طول موج ۱۵۵۰ nm، کوپلر ۳×۳، دو FRM در طول موج ۱۵۵۰nm استفاده شده است. مطابق شکل بخشی از بازوهای مرجع و سیگنال MI بر روی تیوب سیلیکونی که از یک انتها مسدود و از سمت دیگر از طریق روزنه باز است بسته می شود. نوسانات فشار از سمت باز به داخل تیوب اعمال و عملاً تغییرات مکانیکی تیوب منتج به تغییرات الاستو اپتیکی در فیبر و در نتیجه تغییر فاز نور می شود. تحلیل الاستو اپتیکی تیوب که فیبر نوری بر روی آن تحت کشش پیچانده شده نشان می دهد که تغییرات فشار درون یا بیرون تیوب با تغییرات فاز سیگنال تداخل سنج بطور خطی متناسب است. با بازیابی فاز عملا سیگنال فشار قابل محاسبه می گردد. نمایش شماتیک از اجزای مختلف سخت افزای و نرم افزاری آزمایش و ارتباط آنها با یکدیگر در شکل (۲) نشان داده شده است.



شکل ۲: نمایش شماتیک از اجزای مختلف سخت افزای و نرم افزاری حسگر.

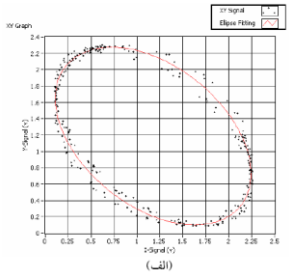
مطابق شکل (۲) از سیستم نوسان ساز فشار (ساب وفر) برای ایجاد شرایط تست واقعی استفاده شده، از تبدیل کننده آنالوگ به دیجیتال برای تبدیل داده ها و انتقال آن به کامپیوتر و پردازش داده ها استفاده شده، حسگر شاهد نیز مستقیما به کامپیوتر متصل و نهایتا توسط برنامه LABVIEW تمامی داده ها جمع آوری، درون یابی و پردازش می شوند.

جهت تست الگوریتم درون یابی، دو نمونه سیگنال سینوسی بطور مستقیم در فرکانس ۱ kHz با اختلاف فاز $\pi/2$ اعمال و تحلیل حداقل ۱۰ نمونه تست، انحراف معیاری کمتر از 10^{-4} را برای هر پنج پارامتر بیضی نشان داد. در شکل (۳) نمونه ای از بیضی حاصل از سیگنال خروجی MI و نمایش بیضی درون یابی شده بر اساس داده های تجربی و همچنین جدول مقادیر پارامترهای بیضی محاسبه شده از درون یابی نشان داده شده است.

جهت اثبات عملکرد مطلوب روش وامدگردانی و تثبیت پارامترهای درون یابی شده بیضی در هر مرحله از آزمایش پارامترهای بیضی درون یابی شده و برای محاسبات مورد استفاده قرار می گیرد. جدول (۱) نمونه ای از پارامترهای

[Downloaded from opsi.ir on 2026-01-30]

درون یابی محاسبه شده در سه فرکانس مختلف و به ازای دامنه های ولتاژ مختلف اعمال شده به سیستم تقویت کننده ساب وفر را نشان می دهد.



(ب)

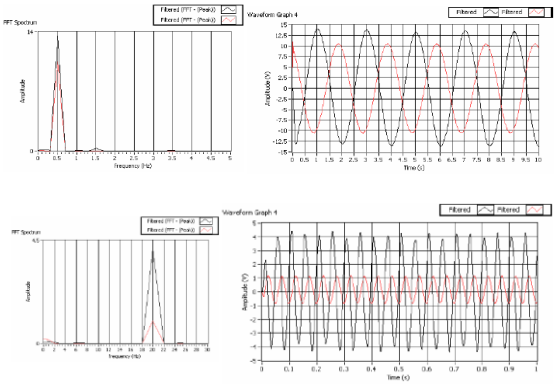
ϕ_0	25.152
x_0	1.175
y_0	1.167
A_x	1.065
A_y	1.086

شکل ۳: (الف) نمونه ای از بیضی حاصل از سیگنال خروجی MI و نمایش بیضی درون یابی شده بر اساس داده های تجربی (ب) جدول مقادیر محاسبه شده برای پارامترهای بیضی درون یابی شده.

جدول (۱): از پارامترهای درون یابی محاسبه شده در سه فرکانس مختلف و به ازای دامنه های ولتاژ مختلف اعمال شده به سیستم تقویت کننده ساب وفر

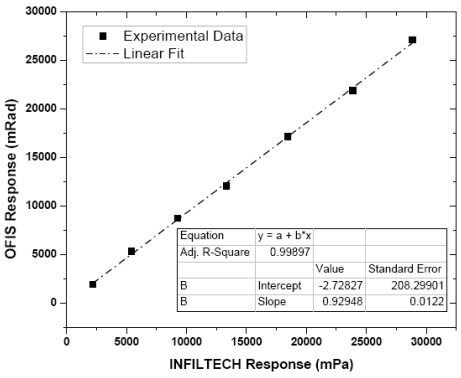
پارامترهای بیضی					دامنه های ولتاژ فانکشن (mv)							فرکانس (Hz)
A_y	A_x	y_0	x_0	φ_0								
1.10072	1.09664	1.2117	1.19391	0.44312	140	120	100	80	60	40	20	0.5
1.09429	1.10193	1.20757	1.20009	0.43722	28	22	16	10	4			1
1.0981	1.09875	1.2063	1.19463	0.43183	10	8	6	4				2

در شکل (۴) نمونه ای از سیگنال بدست آمده و اعمال شده به حسگر MI و تبدیل فوریه هر دو سیگنال ارائه شده است. سیگنال اعمالی توسط ساب وفر در دو فرکانس $0.5\,Hz$ و $20\,Hz$ می باشد.



شکل ۴: نمونه ای از سیگنال اعمالی و بدست آمده از حسگر MI و تبدیل فوریه هر دو سیگنال در دو فرکانس $0.5\,Hz$ و $20\,Hz$.

منحنی کالیبراسیون حسگر MI در پاسخ به نوسانات فشار در فرکانس $0.5\,Hz$ در شکل (۵) ارائه شده است. در این نمودار پاسخ خطی حسگر MI نسبت به تغییر دامنه فشار نوسانی مشخصی و حساسیت حسگر از درون یابی خطی داده ها برابر $0.9295\,mRad/mPa$ است.



شکل ۵: منحنی کالیبراسیون حسگر MI در پاسخ به نوسانات فشار در فرکانس $0.5\,Hz$.

۵- نتیجه‌گیری

در این پژوهش با اجرای روش وامدگردانی همودایِن غیر فعال در تداخل سنج تمام فیبری مایکلسون، با استفاده از تکنیک درون یابی داده ها فاز تداخل سنج محاسبه گردید. ارزیابی نتایج، خطی بودن رفتار سیستم وامدگردانی را در فرکانس های مختلف نشان می دهد. این حسگر در شرایط واقعی سیگنال فشار نیز آزمایش و ضمن تایید عملکرد خطی حساسیتی معادل $0.9295\,mRad/mPa$ را نشان داد.

سپاسگزاری

از Tomaz Pozar از دانشکده مکانیک دانشگاه Ljubljana به دلیل مشورت های علمی در بخش پیاده سازی الگوریتم درون یابی داده ها تشکر می گردد. همچنین از آقای مهدیان که در بخش ساخت تجهیزات مکانیکی و انجام آزمایش های اولیه یاری داده اند تشکر می گردد.

مراجع

[1] Udd E., Fiber optic sensors, John wiley, chapter 10, 2011.
[2] Kersey A. D., etl., Experimental investigation of polarization induced fading in interferometric fiber sensor array, **Electronic Lett.** 27 (1991) 562-563.
[3] Koo K.P., etl, Passive stabilization scheme for fiber interferometers using 3×3 fiber directional coupler, **App. Phys. Lett.** 41 (1982) 616-618.
[4] Harker M., O'Leary P., Zsombor-Murray P., **Image Vis. Comput** 26, (2008) 372.
[5] Mark A. Zumberge, Jonathan Berger, Matthew A. Dzieciuch, and Robert L. Parker, Resolving quadrature fringes in real time, **App. Opt.** 43 (2004) 771-775.
[6] T Pozar, P Gregorcic, J Mozina, *A* precise *and* wide-dynamic-range displacement-measuring homodyne quadrature laser interferometer, **Appl. Phys. B** 105 (2011) 575-582.

[Downloaded from opsi.ir on 2026-01-30]