



بیست و هفتمین کنفرانس اپتیک و فوتونیک ایران و سیزدهمین کنفرانس مهندسی و فناوری فوتونیک ایران، دانشگاه سیستان و بلوچستان، زاهدان، ایران.  
۱۴-۱۶ بهمن ۱۳۹۹



کد مقاله : ۱-۲۵۱۵-۱۰-A

## بررسی عملکرد ژيروسکوپ تار نوری در آرایش ماخ-زندر با در نظر گرفتن اثر ورنیه

مهران فر، محمدرضا، کشاووز، علیرضا، پاکارزاده، حسن  
دانشکده فیزیک، دانشگاه صنعتی شیراز، شیراز، ایران

چکیده - امروزه مطالعه و ساخت حسگرهای چرخنده نوری با اثر ساینک که در آغاز قرن بیستم معرفی شد، مورد توجه است. در این مقاله با معرفی یک ژيروسکوپ تار نوری با ساختاری مبتنی بر تداخل سنج ماخ زندر و و اثر ساینک، با اضافه کردن یک حلقه تشدید، عملکرد ناشی از اثر ورنیه را بررسی می‌کنیم. نتایج نشان می‌دهند که در نظر گرفتن چنین اثری در ساختار ژيروسکوپ تار نوری اثر مستقیم در میدان خروجی و نیز اختلاف فاز حاصل خواهد داشت که به نوبه خود می‌توان کنترل بیشتری روی حساسیت حسگرهای ژيروسکوپ تار نوری داشت.

کلید واژه- ژيروسکوپ تار نوری، تداخل سنج ماخ زندر، اثر ورنیه

## Investigation of the Vernier-Effect in an Optical Fiber Gyroscope with Mach-Zender Interferometer

Mehranfar, Mohammadreza, Keshavarz, Alireza, Pakarzadeh, Hassan  
Department of Physics, Shiraz University of Technology, Shiraz, Iran

**Abstract-** Today, the study and manufacture of optical rotating sensors with the Sagnac effect that was introduced at the beginning of the twentieth century are noteworthy. In this paper, by introducing an optical fiber gyroscope with a structure based on Mach Zander's interferometer and the Sagnac effect, we add a resonant loop to examine the performance of the Vernier effect. The results show that considering such an effect on the structure of the optical fiber gyroscope will have a direct effect on the output field as well as the phase difference, which in turn can have more control over the sensitivity of the optical fiber gyroscope sensors.

Keywords: Fiber Optic Gyroscope, Mach-Zender Interferometer, Vernier-Effect

به مسیر دایروی به وسیله یک جدا کننده به دو پرتو تقسیم می‌شود که اگر سیستم در حالت تعادل باشد، هر دو پرتو، مسیر اپتیکی را در یک زمان طی می‌کنند و در یک فاز به منبع بازمی‌گردند. اختلاف مسیر اپتیکی بین دو پرتو به وجود خواهد آمد که منجر به اختلاف فاز  $\Delta\Omega$  خواهد شد [۴].



شکل ۱: طرح نمادین تداخل سنج ماخ-زندر با حلقه ساینک [۱].

این اختلاف به کمک تداخل سنج ماخ-زندر قابل اندازه‌گیری است. تداخل سنج ماخ-زندر بر مبنای تداخل دو پرتو با دامنه شکافته شده است و برای اندازه‌گیری اختلاف فاز بین دو باریکه نوری که هم راستا هستند و از منبع نور همدوسی به وجود آمده باشند، به کار می‌رود. این اختلاف فاز باعث تغییر الگوی تداخلی می‌شود که با توجه به آن می‌توان پارامترهای مختلفی را اندازه‌گیری کرد. همانطور که در شکل ۱ ملاحظه می‌شود، اختلاف فاز به وجود آمده توسط حلقه ساینک توسط بازوهای این تداخل سنج قابل اندازه‌گیری است. برابر بودن بازوهای سیستم تداخل سنج ماخ-زندر موجب رسیدن به بیشترین حساسیت موجود در تار نیز می‌شود. اثر ورنیه نیز که در این پژوهش به ژيروسکوپ تار نوری اضافه شده است، روش خوبی برای افزایش حساسیت در حسگرهای یکپارچه نوری است. در حالت ایده‌آل از یک تداخل سنج به عنوان حسگر و از دیگری به عنوان یک مرجع ثابت استفاده می‌شود و نتیجه حاصل از هم‌پوشانی این دو مقیاس باعث بهبود دقت در اندازه‌گیری می‌گردد. برای بررسی فیزیکی انتشار پرتو در سیستم مورد نظر از روش پرتویابی ماتریسی استفاده می‌شود. مطابق شکل ۲ [۱]

## مقدمه

با توجه به توسعه روزافزون علم در حوزه‌های گوناگون، حسگرها بخش ویژه‌ای از تحقیقات را به خود اختصاص داده‌اند. در این تحقیقات تلاش شده تا ویژگی‌های حسگرها را تا حد مطلوبی بهینه کنند. در این میان حسگرهایی که سرعت زاویه‌ای را نسبت به چارچوب مرجع اینرسی اندازه‌گیری می‌کنند، ژيروسکوپ نامیده می‌شوند. ژيروسکوپ عضو اصلی سیستم‌های هدایت اینرسی است و عمدتاً برای اندازه‌گیری مقدار دوران و ایجاد محورهای مختصات مرجع در وسایل نقلیه هوایی، فضایی و دریایی به کار می‌رود. به طور کلی ژيروسکوپ‌ها به سه دسته مکانیکی، حلقوی لیزری و تار نوری تقسیم می‌شوند. در حال حاضر به دلیل وجود استهلاک، ژيروسکوپ‌های مکانیکی، ژيروسکوپ‌های حلقه لیزری (RLG)<sup>۱</sup> و ژيروسکوپ‌های تارنوری (FOG)<sup>۲</sup> بیشتر مورد استفاده قرار می‌گیرند [۲، ۱]. ژيروسکوپ تارنوری، حسگری با فناوری نو شامل ساختاری مبتنی بر اثر ساینک است. این نوع ژيروسکوپ‌ها پاسخ‌دهی سریع، حجم و وزن کم، نداشتن قطعه مدور و پایداری بایاس نسبتاً خوبی در مقابل دیگر انواع ژيروسکوپ دارند [۳].

در این پژوهش عملکرد ژيروسکوپ تارنوری با تداخل سنج ماخ-زندر و حلقه ساینک با اضافه کردن اثر ورنیه بر اساس آنچه در مرجع [۱] معرفی شده است، مورد مطالعه قرار می‌گیرد.

## مبانی نظری

برای شناخت بیشتر سیستم مورد نظر اجزای مختلف به صورت گسسته تشریح می‌شوند و سپس به صورت متوالی در ساختار ژيروسکوپ تارنوری قرار می‌گیرند. شکل ۱ ساختار یک تداخل سنج ماخ-زندر و یک حلقه ساینک معرفی شده است. در حلقه ساینک پرتوی نور وارد شده

$$\begin{bmatrix} S_6^c \\ S_6^{cc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & \alpha_{loss,s} e^{j\phi_s} \\ \alpha_{loss,s} e^{j\phi_s} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_{u,5} \\ S_{l,5} \end{bmatrix} = T_{sagnac} \begin{bmatrix} S_{u,5} \\ S_{l,5} \end{bmatrix} \quad (۵)$$

$$\begin{bmatrix} S_7^- \\ S_{out} \end{bmatrix} = q_3 DC_3 T_{MZI} q_4 DC_4 \begin{bmatrix} S_6^c \\ S_6^{cc} \end{bmatrix} \quad (۶)$$

در این روابط  $s$  معرف دامنه پرتو در هر قسمت است که با کمک ماتریس‌های عبور در هر جزء از حسگر جداگانه بدست می‌آیند. بنابر روابط فوق می‌توان  $S_{out}$  را پرتو خروجی دانست و بنابراین به راحتی می‌توان ضریب عبور را بدست آورد:

$$T = \frac{S_{out}}{S_{in}} (\gamma)$$

با در نظر گرفتن نظریه تداخل سنج ساینک در ساختار ژيروسکوپ تار نوری مانند شکل ۱ در حلقه تار، حساسیت تار با رسیدن دو پرتو ساعتگرد و پادساعتگرد موجود در حلقه به قسمت فوتو آشکارساز تعیین می‌شود که این حساسیت بسته به تعداد دور حلقه تارنوری و همچنین اثرات نوری می‌باشد که افزایش و کاهش هر یک از این عوامل یاد شده موجب افزایش و برعکس موجب کاهش مقدار اختلاف فاز در فوتو آشکارساز و در نتیجه میزان حساسیت در ژيروسکوپ تار نوری رابه دنبال خواهد داشت. این اختلاف فاز از طریق رابطه زیر بدست می‌آید [۵].

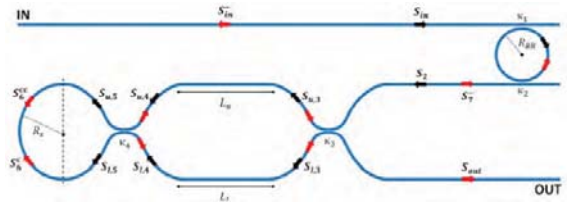
$$\phi_s = \frac{2\pi LD}{\lambda c} \Omega (\lambda)$$

که در این رابطه  $\Omega$  نرخ چرخش می‌باشد.

### شبیه‌سازی

در این پژوهش عملکرد ساختار ماخ-زندر و حلقه ساینک با اثر ورنیه به عنوان یک ژيروسکوپ تار نوری در نظر گرفته شده است. برای این منظور نمودارهای عبوری اختلاف فاز متناسب با طول موج رسم شدند. ضریب عبور حسگر تار نوری با ضرایب جفت‌شدگی  $k_i$  به ازای مقادیر  $i = 3, 4$  به صورت معکوس متناسب خواهد بود. برای مقادیر طول موجی بین ۱۴۶۰ تا ۱۵۸۰ نانومتر ضریب

بعنوان ساختار اصلی در این تحقیق شامل تشدیدگر حلقوی، تداخل سنج ماخ-زندر و حلقه ساینک می‌باشد. در ساختار مورد نظر، قبل از ورود نور به تداخل سنج باهدف تقویت نور ورودی از یک تشدیدگر حلقوی استفاده می‌شود.



شکل ۲: ساختار حسگر تارنوری شامل تشدیدگر حلقوی تداخل سنج ماخ-زندر و حلقه ساینک [۱].

می‌توان نشان داد که پرتو ورودی پس از عبور از تشدیدگر به تداخل سنج  $S_2$  از رابطه زیر بدست می‌آید [۱].

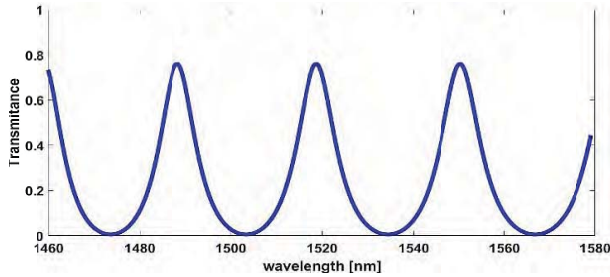
$$S_2 = S_{in} \frac{-\sqrt{\alpha_{loss,RR}} q_1 q_2 r_1 r_2 e^{-i\frac{\phi_{RR}}{2}}}{1 - \alpha_{loss,RR} q_1 q_2 t_1 t_2 e^{-i\phi_{RR}}} \quad (۱)$$

در این رابطه ضریب تضعیف تشدیدگر حلقوی است و مقادیر  $t_i r_i$  متناسب با ضریب جفت‌شدگی ( $K$ ) هستند  $t_i = \sqrt{1 - k_i} g_i = \sqrt{k_i}$  علاوه بر این  $q_i$ ها عامل افت در جفت‌شدگی بین ساختارها هستند. اختلاف فاز  $\phi$  حاصل از ضرب طول مسیر در ثابت انتشار خواهند بود که برای هر کدام از اجزای سیستم به طور جداگانه محاسبه خواهد شد. معادلات اصلی برای بررسی ورودی و خروجی با کمک ماتریس‌های انتقال از هر یک از اجزاء بدست خواهند آمد به طوری که [۱]:

$$\begin{bmatrix} S_{u,3} \\ S_{l,3} \end{bmatrix} = q_3 \begin{bmatrix} t_3 & -jr_3 \\ -jr_3 & t_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_2 \\ 0 \end{bmatrix} = q_3 T_{DC_3} \begin{bmatrix} S_2 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (۲)$$

$$\begin{bmatrix} S_{u,4} \\ S_{l,4} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \alpha_{loss,u} e^{j\phi_u} & 0 \\ 0 & \alpha_{loss,l} e^{j\phi_l} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_{u,3} \\ S_{l,3} \end{bmatrix} = T_{MZI} \begin{bmatrix} S_{u,3} \\ S_{l,3} \end{bmatrix} \quad (۳)$$

$$\begin{bmatrix} S_{u,5} \\ S_{l,5} \end{bmatrix} = q_4 \begin{bmatrix} t_4 & -jr_4 \\ -jr_4 & t_4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_{u,4} \\ S_{l,4} \end{bmatrix} = q_4 T_{DC_4} \begin{bmatrix} S_{u,4} \\ S_{l,4} \end{bmatrix} \quad (۴)$$



شکل ۴: ضریب عبور حاصل از ساختار ماخ-زندر برای ضرایب جفت شدگی  $k_3 = 0.25$  و  $k_4 = 0.25$  بدون اثر ورنیه

### نتیجه گیری

در این مقاله و با در نظر گرفتن اثر ورنیه عملکرد این اثر بر میزان حساسیت ژيروسکوپ بررسی شد. برای این منظور با محاسبه فاصله قله تا قله که اثر مستقیم روی حساسیت سیستم دارد به کمک نرم افزار متلب و محاسبه ضریب عبور کل سیستم در بازه طول موجی خاص شبیه سازی شد. نتایج نشان می دهد که با اضافه کردن یک حلقه تشدید و اثر ورنیه می توان روی خروجی و ضریب عبور و نیز حساسیت حسگرهایی که با این ساختار طراحی می شوند کنترل بیشتری داشت.

### مرجع ها

[۱] Troia, Benedetto, Francesco De Leonardis, and Vittorio MN Passaro. "Cascaded ring resonator and Mach-Zehnder interferometer with a Sagnac loop for Vernier-effect refractive index sensing." *Sensors and Actuators B: Chemical* 240 (2017): 76-89.

[۲] Liao, Hao, Ping Lu, Xin Fu, Xinyue Jiang, Wenjun Ni, [

### Fiber Optic Gyroscope<sup>1</sup> Ring Laser Gyroscope

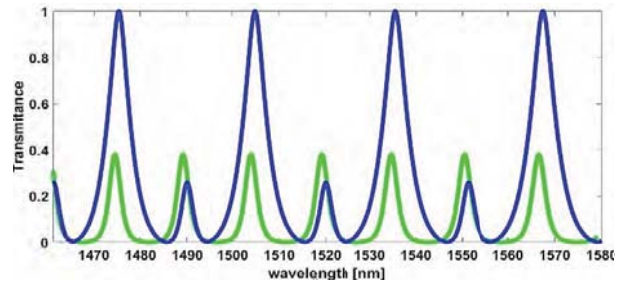
Deming Liu, and Jiangshan Zhang. "Sensitivity amplification of fiber-optic in-line Mach-Zehnder Interferometer sensors with modified Vernier-effect." *Optics express* 25, no. 22 (2017): 26898-26909.

[۳] La Notte, Mario, Benedetto Troia, Tommaso Muciaccia, Carlo Edoardo Campanella, Francesco De Leonardis, and Vittorio Passaro. "Recent advances in gas and chemical detection by Vernier effect-based photonic sensors." *Sensors* 14, no. 3 (2014): 4831-4855.

[۴] Shao, Li-Yang, Yuan Luo, Zhiyong Zhang, Xihua Zou, Bin Luo, Wei Pan, and Lianshan Yan. "Sensitivity-enhanced temperature sensor with cascaded fiber optic Sagnac interferometers based on Vernier-effect." *Optics Communications* 336 (2015): 73-76.

[۵] Merlo, S., Norgia, M., & Donati, S. (2000). *Fiber gyroscope principles. Handbook of Fibre Optic Sensing Technology*, 1-23.

اختلاف فازهای عبوری از حسگر تار نوری در شکل های ۳ و ۴ رسم شده است.



شکل ۳: ضریب عبور حاصل از ساختار ماخ-زندر و حلقه ساینک با اثر ورنیه برای مقادیر ضرایب جفت شدگی  $k_3 = k_4 = 0.5$  و  $k_3 = 0.25$  و  $k_4 = 0.25$  در نمودار آبی رنگ

شکل ۳ ضریب عبور بهنجار حسگر تار نوری با ساختار ماخ-زندر و حلقه ساینک را نشان می دهد که با در نظر گرفتن اثر ورنیه به صورت دوره ای نمایان می شود، موجب افزایش فاصله قله عبور یا FSR می گردد. علاوه بر این نمودار آبی رنگ معرف میزان عبور برای ضرایب جفت شدگی  $k_3 = 0.25$  و  $k_4 = 0.25$  است و نمودار سبز رنگ برای ضرایب  $k_3 = 0.5$  و  $k_4 = 0.1464$  رسم شده است. در این حالت اختلاف بین دو قله عبوری در نمودار آبی رنگ  $FSR_1$  و اختلاف دو قله نمودار سبز رنگ  $FSR_2$  می باشد به طوری که  $FSR_2 = \frac{FSR_1}{2}$  به عنوان شرط ورنیه برقرار است و در صورتی که  $FSR_2$  زیاد شود، اختلاف فاز نمودار سبز رنگ نیز زیاد می شود. در حالت کلی افزایش اختلاف فاز باعث افزایش جریان در خروجی و نهایتاً منجر به تقویت حساسیت در کل سیستم می گردد. همچنین در شکل ۴ ضریب عبور حسگر تار نوری با ساختار ماخ-زندر و حلقه ساینک بدون اثر ورنیه می باشد. علاوه بر این در حالت تعادل ضرایب جفت شده که  $k_3 = 0.5$  و  $k_4 = 0.5$  خواهند بود که مطلوب ترین حالت برای سنجش در حسگرهای شامل حلقه تشدیدگر و تداخل سنج ماخ-زندر است فاصله قله ها بیشتر است که در این حالت حساسیت کمتری خواهیم داشت.