بیست و پنجمین کنفرانس اپتیک و
فوتونیک ایران و یازدهمین کنفرانس
مهندسی و فناوری فوتونیک ایران،
دانشگاه شیراز،
شیراز، ایران.
۹-۱۱ بهمن ۱۳۹۷

اثر رفتار دوشکستی بر عملکرد ساختارهای مبتنی بر تحریرگر فاز درون تداخل-سنج نوری ساگ‌ناک

سید اسماعیل حسینی[۱]، محمدرضا قشقایی[۲]

[۱]عضو هیئت‌علمی، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه شیراز، (se.hosseini@shirazu.ac.ir)

[۲]دانشجوی کارشناسی ارشد،دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه شیراز، (m.qashqaei@shirazu.ac.ir)

چکیده – امروزه در بسیاری از ساختارهای الکترواپتیکی و مایکروویوفوتونیکی از تحریرگر فاز (Phase modulator (PM)) درون تداخل‌سنج نوری ساگ‌ناک (Sagnac interferometer (SI)) استفاده می‌شود. نورهای منتشر شونده درون SI به صورت همدوس در خروجی آن ترکیب می‌شوند، بنابراین قطبش آن‌ها باید حفظ شود و تغییر نکند. برای این منظور، از فیبرهای نوری که قطبش را حفظ می کنند (Polarization-maintaining optical fiber (PMF)) استفاده می‌شود. فیبرهای نوری PMF دارای رفتار دوشکستی (Birefringence) هستند که باعث می‌شود نورهای با قطبش متفاوت با انتشار دورن آن، تأخیر فاز متفاوتی بگیرند. در این مقاله، اثر رفتار دوشکستی در SI شامل یک PM، با استفاده از روش ماتریس جونز تحلیل می‌شود و روابط تحلیلی برای ضرایب انتقال و بازتاب آن به دست می‌آید. نشان داده می شود که با تنظیم میزان دوشکستی فیبر و نیز پارامترهای PM مورد استفاده، می‌توان این ضرایب را کنترل کرد.

کلید واژه- رفتار دوشکستی ، تداخل سنج ساگ‌ناک ، مایکروویوفوتونیک، تحریرگر فاز

Birefringence Effects on the Performance of the Devices Based on Optical Phase Modulator Inside a Sagnac Interferometer

S. Esmail Hosseini[1], Mohammad Reza Qashqaei[2],

[1]School of Electrical and Computer Engineering, Shiraz University, Shiraz, Iran (se.hosseini@shirazu.ac.ir)

[2]School of Electrical and Computer Engineering, Shiraz University, Shiraz, Iran (m.qashqaei@shirazu.ac.ir)

Abstract- Recently, optical phase modulator (PM) inside a Sagnac interferometer (SI) has many applications in electro-optic and microwave photonic systems. Propagating lights inside the SI are combined coherently at its output, so their polarizations must be maintained. Therefore, polarization-maintaining optical fiber (PMF) are used in the SI. Since PMFs have birefringence, propagating lights with different polarizations, experience different phase delay inside the SI. In this paper, the effects of birefringence on the performance of an SI containing a PM, is theoretically investigated using the Jones matrix method. Closed form expressions for its transmission and reflection coefficients are derived. It is shown that these coefficients can be tuned by adjusting the birefringence parameter of the PMF and parameters of the PM.

Keywords: Birefringence, phase modulator, microwave photonics, Sagnac interferometer

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

[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-11-01]

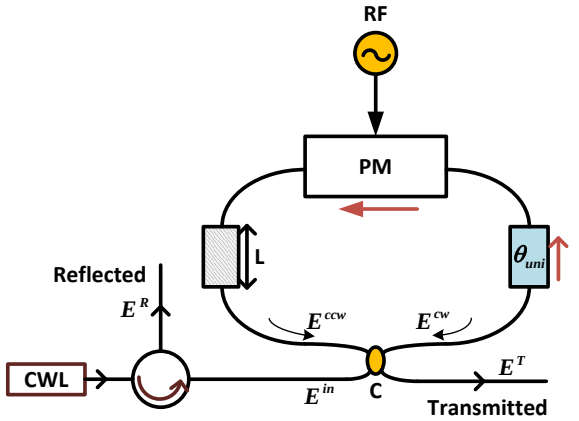
مقدمه

تحریرگر فاز ((Phase modulator (PM) درون تداخل‌سنج نوری ساگناک ((Sagnac interferometer (SI)، کاربردهای زیادی در سیستم‌های الکترو-اپتیکی و مایکروویوفوتونیکی دارند. با توجه به آن که درون SI، نور منتشر شونده در مسیر ساعتگرد و پادساعتگرد مسیر دقیقاً یکسانی را طی می کند بنابراین مشخصات آن حساسیت بسیار کمی به اغتشاشات محیطی مانند تغییر دما و فشار و . . . دارند. بنابراین یکی از مهم‌ترین مزایای این تداخل-سنج، که باعث کاربردهای بسیار زیاد آن شده است، این است که در برابر تغییرات شرایط محیطی مقاوم است.

تاکنون از SI در ساختارهای زیادی مانند ژیروسکوپ نوری [۱]، سنسور نوری اندازه‌گیری جریان الکتریکی [۲]، فیلتر/تضعیف‌کننده نوری [۳]، لیزر فیبری چندطول موجی [۴]جبران‌ساز اثر واپاشی [۵] و . . . استفاده شده است. همچنین ساختارهای زیادی مبتنی بر PM درون SI، مانند تحریرگر شدت نور [۶]، فیلتر مایکروویوفوتونیک [۷]، اسیلاتور مایکروویوفوتونیک [۸]، میکسر مایکروویوفوتونیک [۹] و . . . تاکنون گزارش شده است. قبلاً تحلیل یک SI در حضور رفتار دوشکستی (Birefringence) و عدم حضور PM انجام شده است [۱۰]. همچنین تحلیل PM درون SI، بدون درنظر گرفتن اثر رفتار دوشکستی نیز انجام شده است [۶]. در این مقاله، تحلیل PM درون SI، با درنظر گرفتن اثر رفتار دوشکستی (Birefringence) با استفاده از روش ماتریس Jones انجام می‌شود و روابط تحلیلی برای ضرایب انتقال و بازتاب آن به دست می‌آید.

ساختار و تحلیل

ساختار یک SI شامل PM، در شکل ۱، نشان داده شده است. نور لیزر موج پیوسته بعد از عبور از سیرکولاتور



شکل ۱. تداخل‌سنج ساگناک شامل تحریرگر فاز و محیط دارای رفتار دوشکستی

CWL: continuous-wave laser, PM: Phase Modulator, C: coupler, θ_{uni} : nonreciprocal optical phase shifter, L: Birefringent fiber

نوری وارد کوپلر نوری می شود و درون SI دو نور یکی در جهت ساعتگرد و دیگری پادساعتگرد منتشر می‌شوند. نورهای منتشر شونده درون SI به صورت همدوس در خروجی آن ترکیب می‌شوند، بنابراین قطبش آن‌ها باید حفظ شود و تغییر نکند. برای این منظور، از فیبرهای نوری که قطبش را حفظ می‌کنند (Polarization-maintaining optical fiber (PMF) استفاده می‌شود. فیبرهای نوری PMF دارای رفتار دوشکستی هستند که باعث می‌شود نورهای با قطبش متفاوت با انتشار دورن آن، تأخیر فاز متفاوتی بگیرند. در این مقاله، اثر رفتار دوشکستی در این ساختار، با استفاده از روش ماتریس Jones تحلیل می‌شود و روابط تحلیلی برای ضرایب انتقال و بازتاب آن به دست می‌آید.

برای تحلیل، اثر رفتار دوشکستی کل طول فیبر PMF، به صورت المان معادل L در نظر گرفته شده است. سیگنال RF اعمالی به PM را به صورت $v(t) = V_{rf} \cos \omega_{rf} t$ درنظر می‌گیریم. همچنین نور تابیده شده از لیزر به کوپلر نوری به صورت زیر در نظر می‌گیریم،

$$E^{in} = \begin{bmatrix} E_x^{in} \\ E_y^{in} \end{bmatrix} \qquad (۱)$$

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

[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-11-01]

قطبش نور ورودی E^{in} را خطی با زاویه‌ی ψ نسبت به محور yها درنظرمی‌گیریم. پس از عبور از کوپلر، یک سیگنال نوری در جهت ساعتگرد ((clockwise (CW)) و دیگری پادساعتگرد ((counterclockwise (CCW)) در SI منتشر می شوند که در صورتی که ضرایب تقسیم توان کوپلر نوری در حالت کلی به صورت $k:(1-k)$ باشد می توان آن ها را بعد از چرخش در حلقه، به‌صورت زیر بیان کرد،

$$E^{cw}=\sqrt{1-k}\begin{bmatrix}E_x^{in}\\E_y^{in}\end{bmatrix},\quad E^{ccw}=-j\sqrt{k}\begin{bmatrix}E_x^{in}\\E_y^{in}\end{bmatrix} \qquad (۲)$$

که در این رابطه $j=e^{j\pi/2}$ است. قطبش های x و y نور بعد از عبور از محیط دارای رفتار دوشکستی، تأخیر فاز متفاوتی می گیرند. ماتریس Jones برای یک SI با رفتار دوشکستی و در عدم حضور PM و تغییردهنده فاز θ، به صورت زیر است [۱۰]،

$$J^{cw}=\begin{bmatrix}J_{xx} & J_{xy}\\ J_{yx} & J_{yy}\end{bmatrix},\quad J^{ccw}=\begin{bmatrix}J_{xx} & -J_{xy}\\ -J_{yx} & J_{yy}\end{bmatrix} \qquad (۳)$$

که در این رابطه،

$$\begin{aligned}J_{xx}&=e^{j\Delta\varphi}\cos^2\theta+\sin^2\theta\\ J_{xy}&=J_{xy}=(e^{j\Delta\varphi}-1)\cos\theta\sin\theta\\ J_{yy}&=\cos^2\theta+e^{j\Delta\varphi}\sin^2\theta\end{aligned} \qquad (۴)$$

که θ زاویه‌ی محور نوری محور نوری ساختار PMF با رفتار دوشکستی نسبت به صفحه‌ی SI است و $\Delta\varphi=2\pi BL/\lambda$ اختلاف تأخیر فاز بین دو قطبش ناشی از دوشکستی حلقه است، که L و $B=n_e-n_o$ به ترتیب طول و میزان دوشکستی حلقه و λ طول موج نور لیزر است. بنابراین موج در جهت ساعتگرد بعد از پیمایش حلقه، به صورت زیر به دست می‌آید،

$$E^{cw}=\sqrt{1-k}J^{cw}\begin{bmatrix}E_x^{in}\\E_y^{in}\end{bmatrix} \qquad (۵)$$

همچنین فاز موج پادساعتگرد توسط شیفت‌دهنده فاز یک‌طرفه نوری به اندازه θ_{uni} تأخیر می‌یابد و سپس توسط سیگنال RF از طریق PM مدوله می‌شود. بنابراین موج در جهت ساعتگرد بعد از پیمایش حلقه، به صورت زیر قابل بیان است،

$$E^{ccw}=-j\sqrt{k}e^{j\alpha}J^{ccw}\begin{bmatrix}E_x^{in}\\E_y^{in}\end{bmatrix} \qquad (۶)$$

که در این رابطه $\alpha=\theta_{uni}+\Gamma_{rf}\cos\omega_{rf}t$ اختلاف فاز امواج پادساعتگرد نسبت به ساعتگرد است که $\Gamma_{rf}=\pi V_{rf}/V_\pi$ اندیس مدولاسیون و V_π ولتاژ نیم‌موج PM است. با استفاده از (۵) و (۶)، امواج انتقال یافته و بازتاب شده از SI به صورت به دست می‌آید،

$$\begin{aligned}E^T&=\sqrt{1-k}E^{cw}-j\sqrt{k}E^{ccw}\\&=\left[(1-k)J^{cw}-ke^{j\alpha}J^{ccw}\right]E_{in}=J^TE_{in}\end{aligned} \qquad (۷)$$

$$\begin{aligned}E^R&=-j\sqrt{k}E^{cw}+\sqrt{1-k}E^{ccw}\\&=-j\sqrt{k(1-k)}\left(J^{cw}+e^{j\alpha}J^{ccw}\right)E_{in}=J^RE_{in}\end{aligned} \qquad (۸)$$

با استفاده از روابط (۷) و (۸) و نیز با فرض تقسیم توان مساوی توسط کوپلر نوری ($k=0.5$)، ضرایب انتقال و بازتاب توان از SI شامل PM و شیفت‌دهنده فاز یک‌طرفه نوری θ_{uni} و با در نظر گرفتن اثر رفتار دوشکستی به صورت زیر به دست می‌آید،

$$\begin{aligned}T=I_t/I_{in}&=\left|E^T\right|^2/\left|E_{in}\right|^2=\left(\left|E_x^T\right|^2+\left|E_y^T\right|^2\right)/\left|E_{in}\right|^2\\&=\sin^2\left(\frac{\alpha}{2}\right)+\cos\alpha\sin^2(2\theta)\sin^2\left(\frac{\Delta\varphi}{2}\right)\\&\quad-\frac{1}{2}\sin(2\psi)\sin\alpha\sin(2\theta)\sin\Delta\varphi\end{aligned} \qquad (۹)$$

$$\begin{aligned}R=I_r/I_{in}&=\left|E^R\right|^2/\left|E_{in}\right|^2=\left(\left|E_x^R\right|^2+\left|E_y^R\right|^2\right)/\left|E_{in}\right|^2\\&=\cos^2\left(\frac{\alpha}{2}\right)-\cos\alpha\sin^2(2\theta)\sin^2\left(\frac{\Delta\varphi}{2}\right)\\&\quad+\frac{1}{2}\sin(2\psi)\sin\alpha\sin(2\theta)\sin\Delta\varphi=1-T\end{aligned} \qquad (۱۰)$$

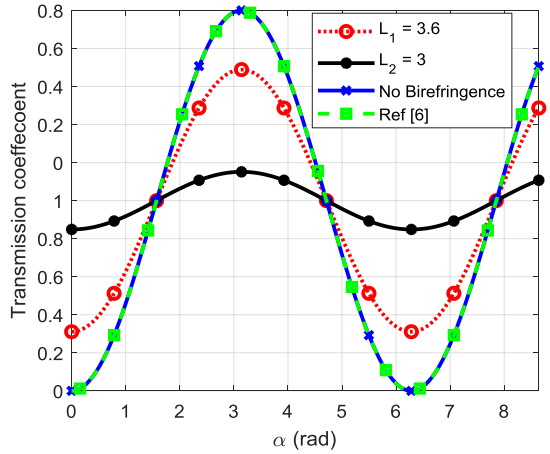
این مقاله در صورتی دارای اعتبار است که در سایت www.opsi.ir قابل دسترسی باشد.

[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-11-01]

با انتخاب حالت خاص $\alpha=0$ (یعنی یک SI بدون PM و شیفت‌دهنده فاز یک‌طرفه نوری θ_{uni} با در نظر گرفتن اثر رفتار دوشکستی)، روابط T و R در (۹) و (۱۰) همان روابط به دست آمده در [۱۰] است. همچنین با انتخاب حالت خاص $\Delta\varphi=0$ (یعنی یک SI با PM و شیفت‌دهنده فاز یک‌طرفه نوری θ_{uni} و بدون در نظر گرفتن اثر رفتار دوشکستی)، روابط T و R در (۹) و (۱۰) همان روابط به دست آمده در [۶]-[۹] است. ضریب انتقال SI با استفاده از رابطه (۹) به ازای $\psi=0$ و $\theta=\pi/4$ و چند طول متفاوت حلقه و با فرض ضریب دوشکستی $B=5.7\times10^{-4}$ برای PMF و نیز روابط به دست آمده در [۶]، در شکل ۲ رسم شده است. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود نمودار حاصل از رابطه (۹) بدون در نظر گرفتن اثر دوشکستی (انتخاب $B=0$) همان نتیجه گزارش‌شده در [۶] بدون در نظر گرفتن اثر این رفتار است. اما در عمل به دلیل وجود رفتار دوشکستی در سیستم‌های مبتنی بر SI، ضریب انتقال همان‌طور که در شکل ۲ دیده می‌شود تغییر می‌کند که در طراحی و تحلیل سیستم‌ها باید لحاظ شود.

نتیجه‌گیری

در این مقاله، اثر رفتار دوشکستی بر عملکرد یک SI شامل یک PM و یک شیفت‌دهنده فاز یک‌طرفه نوری بررسی و تحلیل شد و روابط تحلیلی بسته برای ضرایب انتقال و بازتاب SI به دست آمد. نشان داده شد که در حالت کلی این روابط تابع مقدار میزان دوشکستی فیبر PMF، طول فیبر، زاویه محور دوشکستی فیبر با صفحه SI و قطبش موج ورودی است. همچنین برای حالت های خاص نشان داده شد که این ضرایب مشابه ضرایب گزارش شده در مراجع معتبر هستند. بنابراین، تحلیل ارائه شده در این مقاله، کلی است که در آن اثر پارامترهای مختلف به صورت هم‌زمان لحاظ شده است.



شکل۲. ضریب انتقال SI در عدم حضور رفتار دوشکستی و در حضور این رفتار به ازای چند طول مختلف حلقه

مرجع‌ها

[1] R. Bergh, H. Lefevre, H. Shaw, An overview of fiber-optic gyroscopes, J. Lightwave Technol., 2 91-107, 1984.

[2] P. Nicati, P. Robert, Stabilised current sensor using Sagnac interferometer, J. Phys. E., 21 791, 1988.

[3] S. Kim and J. U. Kang, "Polarization-independent figure-eight birefringent Sagnac variable comb-filter/attenuator," IEEE Photonics Technology Letters, vol. 16, no. 2, pp. 494-496, 2004.

[4] X. Dong, et. al, "Multiwavelength erbium-doped fibre laser based on a high-birefringence fibre loop mirror," Electronics Letters, vol. 36, no. 19, pp. 1609-1610, 2000.

[5] S. Chung, B.-A. Yu, and B. Lee, "Phase response design of a polarization-maintaining fiber loop mirror for dispersion compensation," IEEE Photonics Technology Letters, vol. 15, no. 5, pp. 715-717, 2003.

[6] M. Dennis, I. Duling, and W. Burns, "Inherently bias drift free amplitude modulator," Electronics Letters, vol. 32, no. 6, pp. 547-548, 1996.

[7] Y. Gao, et. al, "Novel tunable microwave photonic notch filter using a 3× 3 coupler based Sagnac loop," Optics Communications, vol. 281, no. 6, pp. 1476-1479, 2008.

[8] S.E. Hosseini, A. Banai, F.X. Kärtner, Low-drift optoelectronic oscillator based on a phase modulator in a sagnac loop, IEEE Trans. Microw. Theory Tech., 65 (2017) 2617-2624.

[9] T. Jiang, S. Yu, Q. Xie, J. Li, W.J.O.l. Gu, Photonic downconversion based on optical carrier bidirectional reusing in a phase modulator, Opt. Lett., 39 (2014) 4990-4993.

[10] M. A. Mirza and G. Stewart, "Theory and design of a simple tunable Sagnac loop filter for multiwavelength fiber lasers," Applied optics, vol. 47, no. 29, pp. 5242-5252, 2008.

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

[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-11-01]