



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



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

سید اسماعیل حسینی^۱، محمدرضا قشقایی^۲

^۱عضو هیئت علمی، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه شیراز، (se.hosseini@shirazu.ac.ir)

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

چکیده - امروزه در بسیاری از ساختارهای الکترواپتیکی و میکروویوفوتونیک از تحریرگر فاز (Phase modulator (PM)) درون تداخل سنج نوری ساگناک (Sagnac interferometer (SI)) استفاده می شود. نورهای منتشر شونده درون SI به صورت همدوس در خروجی آن ترکیب می شوند، بنابراین قطبش آن ها باید حفظ شود و تغییر نکند. برای این منظور، از فیبرهای نوری که قطبش را حفظ می کنند (Polarization-maintaining optical fiber (PMF)) استفاده می شود. فیبرهای نوری PMF دارای رفتار دوشکستی (Birefringence) هستند که باعث می شود 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 می شود و روابط تحلیلی برای ضرایب انتقال و بازتاب آن به دست می آید. نشان داده می شود که با تنظیم میزان دوشکستی فیبر و نیز پارامترهای PM مورد استفاده، می توان این ضرایب را کنترل کرد.

کلیدواژه - رفتار دوشکستی، تداخل سنج ساگناک، میکروویوفوتونیک، تحریرگر فاز

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

S. Esmail Hosseini¹, Mohammad Reza Qashqaei²,

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

²School 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

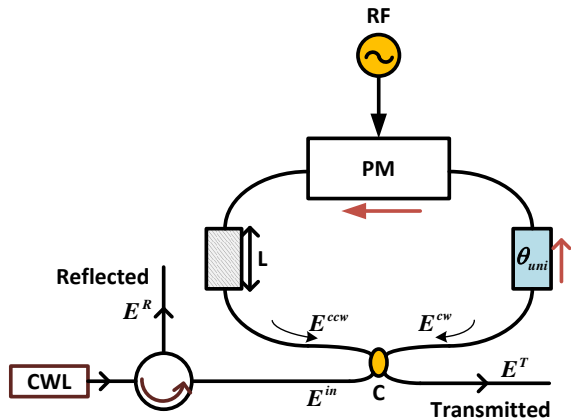
مقدمه

تحریرگر فاز (Phase modulator (PM)) درون تداخل سنج نوری ساگاناک (Sagnac interferometer (SI))، کاربردهای زیادی در سیستم‌های الکترو-اپتیک و میکروویوفوتونیک دارند. با توجه به آن که درون SI، نور منتشر شونده در مسیر ساعتگرد و پادساعتگرد مسیر دقیقاً یکسانی را طی می‌کند بنابراین مشخصات آن حساسیت بسیار کمی به اغتشاشات محیطی مانند تغییر دما و فشار 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 ژيروسکوپ 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 میکروویوفوتونیک [۷]، اسیلاتور میکروویوفوتونیک [۸]، میکسر میکروویوفوتونیک [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 در نظر گرفتن اثر رفتار دوشکستی نیز انجام شده است [۶]. در این مقاله، تحلیل PM درون SI، با در نظر 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. تداخل سنج ساگاناک 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 می‌شود 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 می‌کند (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 $v(t) = V_{rf} \cos \omega_{rf} t$ در نظر می‌گیریم. همچنین نور تابیده شده از لیزر به کوپلر نوری به صورت زیر در نظر می‌گیریم،

$$E^{in} = \begin{bmatrix} E_x^{in} \\ E_y^{in} \end{bmatrix} \quad (1)$$

همچنین فاز موج پادساعتگرد توسط شیفت‌دهنده فاز یک‌طرفه نوری به اندازه θ_{umi} 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،

$$E^{ccw} = -j\sqrt{k}e^{j\alpha} J^{ccw} \begin{bmatrix} E_x^{in} \\ E_y^{in} \end{bmatrix} \quad (6)$$

که در این رابطه $\alpha = \theta_{umi} + \Gamma_{rf} \cos \omega_{rf} t$ 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،

$$E^T = \sqrt{1-k}E^{cw} - j\sqrt{k}E^{ccw} \\ = \left[(1-k)J^{cw} - ke^{j\alpha} J^{ccw} \right] E_{in} = J^T E_{in} \quad (7)$$

$$E^R = -j\sqrt{k}E^{cw} + \sqrt{1-k}E^{ccw} \\ = -j\sqrt{k(1-k)}(J^{cw} + e^{j\alpha} J^{ccw}) E_{in} = J^R E_{in} \quad (8)$$

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_{umi} و با در نظر گرفتن اثر رفتار دوشکستی به صورت زیر به دست می‌آید،

$$T = I_r / I_m = |E^T|^2 / |E_m|^2 = \left(|E_x^T|^2 + |E_y^T|^2 \right) / |E_m|^2 \\ = \sin^2 \left(\frac{\alpha}{2} \right) + \cos \alpha \sin^2 (2\theta) \sin^2 \left(\frac{\Delta\phi}{2} \right) \\ - \frac{1}{2} \sin (2\psi) \sin \alpha \sin (2\theta) \sin \Delta\phi \quad (9)$$

$$R = I_r / I_m = |E^R|^2 / |E_m|^2 = \left(|E_x^R|^2 + |E_y^R|^2 \right) / |E_m|^2 \quad (10) \\ = \cos^2 \left(\frac{\alpha}{2} \right) - \cos \alpha \sin^2 (2\theta) \sin^2 \left(\frac{\Delta\phi}{2} \right) \\ + \frac{1}{2} \sin (2\psi) \sin \alpha \sin (2\theta) \sin \Delta\phi = 1 - T$$

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

$$E^{cw} = \sqrt{1-k} \begin{bmatrix} E_x^{in} \\ E_y^{in} \end{bmatrix}, \quad E^{ccw} = -j\sqrt{k} \begin{bmatrix} E_x^{in} \\ E_y^{in} \end{bmatrix} \quad (2)$$

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

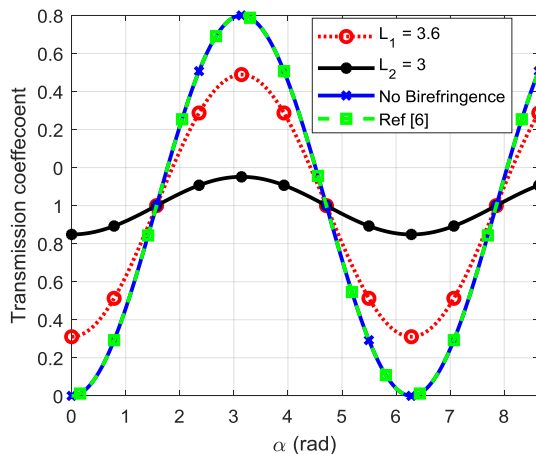
$$J^{cw} = \begin{bmatrix} J_{xx} & J_{xy} \\ J_{yx} & J_{yy} \end{bmatrix}, \quad J^{ccw} = \begin{bmatrix} J_{xx} & -J_{xy} \\ -J_{yx} & J_{yy} \end{bmatrix} \quad (3)$$

که در این رابطه،

$$J_{xx} = e^{j\Delta\phi} \cos^2 \theta + \sin^2 \theta \\ J_{xy} = J_{yx} = (e^{j\Delta\phi} - 1) \cos \theta \sin \theta \\ J_{yy} = \cos^2 \theta + e^{j\Delta\phi} \sin^2 \theta \quad (4)$$

که θ زاویه‌ی محور نوری محور نوری ساختار PMF با رفتار دوشکستی نسبت به صفحه‌ی SI است و $\Delta\phi = 2\pi BL / \lambda$ 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،

$$E^{cw} = \sqrt{1-k} J^{cw} \begin{bmatrix} E_x^{in} \\ E_y^{in} \end{bmatrix} \quad (5)$$



شکل ۲. 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.I. 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.

با انتخاب حالت خاص $\alpha = 0$ (یعنی یک SI بدون PM و شیفت‌دهنده فاز یک‌طرفه نوری θ_{umi} 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_{umi} 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 $B = 5.7 \times 10^{-4}$ 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 گزارش شده 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 حالت‌های 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.