



بیست و هشتمین کنفرانس اپتیک و
فوتونیک ایران و چهاردهمین کنفرانس
مهندسی و فناوری فوتونیک ایران،
دانشگاه شهید چمران اهواز،
خوزستان، ایران.
۱۴-۱۲ بهمن ۱۴۰۰



ارزیابی بازدهی مرتبه پراش پرتوهای لاگراگوس به دست آمده از توری های چنگالی فاز و دامنه توسط مدولاتور فضایی نور (SLM)

شکیبا مساوات شهرضا، سید ایوب موسوی، حسین ثقفی فر

پژوهشکده علوم و فناوری اپتیک و لیزر، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، اصفهان

shakibamosavat@gmail.com, ayoobm63@gmail.com, saghafifar1@yahoo.com

چکیده - در این مقاله، تولید پرتوهای لاگراگوس با استفاده از تمامنگاشت تولید شده رایانه ای (CGH) بر روی مدولاتور فضایی نور (SLM) مورد بررسی قرار می گیرد. ابتدا فرآیند شبیه سازی تولید پرتوهای لاگراگوس از طریق پراش از توری چنگالی دامنه و فاز در دو نوع طراحی باینری و جلوه دار (به شکل دنداناره ای) صورت گرفته و مقایسه گردید. نتایج به دست آمده برای توری های فازی به ویژه نوع جلوه دار بازدهی بالاتری را در مرتبه اول پراش نشان می دهد. با برپایی چیدمان تجربی و ثبت نتایج آزمایشگاهی سازگاری خوبی با نتایج شبیه سازی به دست آمد. به منظور آشکارسازی بار توپولوژیکی پرتو لاگراگوس تولید شده از چیدمان تداخل سنج ماخ زندر استفاده شد.

کلید واژه- پرتو لاگراگوس، تمامنگاری رایانه ای، توری دنداناره ای و باینری، مدولاتور فضایی نوری

Evaluation of diffraction orders efficiency of Laguerre-Gaussian beam generated by the phase and amplitude fork grating applied on spatial light modulator (SLM)

Shakiba Mosavat Shahreza, Seyed Ayoob Moosavi, Hossein Saghafifar

Optics and Laser Science and Technology Research Center, Malek-e Ashtar University of Technology, Isfahan

shakibamosavat@gmail.com, ayoobm63@gmail.com, saghafifar1@yahoo.com

Abstract- In this paper, Laguerre-Gaussian beams are produced by computer generated hologram (CGH) on spatial light modulator (SLM). At first, Laguerre-Gaussian beam generation process is simulated by diffraction of laser light from phase and amplitude fork gratings in two types: blazed (sawtooth groove profile) and binary gratings and the result are compared. The higher efficiency is obtained for the blazed phase grating in the first order. Recorded data from the experiment shows a good agreement with simulation results. In order to evaluate the topological charge of the generated Laguerre-Gaussian beam, the Mach-Zehnder interferometer setup is used.

Keywords: Binary and Saw-tooth Grating, Computer generated Hologram, Laguerre-Gaussian beam, Spatial Light Modulator

مقدمه

گرداب‌های نوری حامل تکانه‌ی زاویه‌ای مداری، نوع جدیدی از پرتوهای ساختاریافته هستند که در طول دهه‌های گذشته به دلیل کاربرد های مهم آن‌ها مورد توجه قرار گرفته‌اند. از جمله کاربرد ها می‌توان به بالابردن ظرفیت ارتباطات نوری فضای آزاد و ارتباطات کوانتومی [۱]، انبرک‌های نوری [۲]، در نجوم برای هاله‌نگاری [۳] و غیره اشاره کرد. یکی دیگر از مهمترین ویژگی‌های مورد توجه در بحث گرداب‌های نوری، توانایی بازسازی این پرتوها در انتشار پرتو در جو آشفته است که دارای اعوجاج کمتری است [۴].

پرتوهای لاگراگوس دارای فاز گردابی به صورت $\exp(i\ell\phi)$ هستند که در آن‌ها هر فوتون حامل تکانه‌ی زاویه‌ای مداری $\ell\hbar$ بوده و ℓ بیانگر مد پرتو است که به آن بار توپولوژیکی نیز گفته می‌شود؛ ϕ زاویه سمتی و $\hbar$ تقسیم ثابت پلانک بر 2π است [۵].

همواره تولید چنین پرتوهایی با توجه به در دسترس نبودن چشمه نوری که قابلیت تولید آن‌ها را داشته باشد یک چالش بوده است. یک ایده کاربردی و امکان‌پذیر برای ثبت و تولید پرتوی دلخواه، استفاده از روش تمام‌نگاری است. در این روش، پرتوی حامل گرداب نوری با موج تخت تداخل کرده و الگوی چنگالی شکل را ایجاد می‌کنند. این تمام‌نگاشت به عنوان تمام‌نگاشت تولید شده‌ی رایانه‌ای (computer generated hologram (CGH)) شناخته می‌شود. این الگوی CGH را می‌توان بر روی **مدولاتور فضایی نور (SLM)** ایجاد کرد. حال با پراش نور از آن می‌توان گرداب نوری که توسط رایانه ایجاد شده است را به صورت واقعی در مراتب مختلف پراش مشاهده کرد.

به طور کلی، تمام‌نگاری به دو قسمت فازی و دامنه تقسیم می‌شود که برای هر دو قسمت، الگوی چنگالی یکسان است. در تمام‌نگاری دامنه قسمتی از نور عبور کرده و بخشی از آن توسط قسمت کدر عبور داده نمی‌شود و نور خروجی مدوله شده به دامنه به گونه‌ای پراکنده می‌شود که پرتو یک

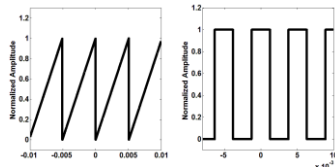
جبهه فاز معین را که توسط الگوی فرانژها تعریف می‌شود به دست می‌آورد. در مقابل، در تمام‌نگاری فازی، مانعی برای نور وجود ندارد و تنها تاخیر راه نوری از نظر فضایی به جبهه موج اعمال می‌شود. یک کمیت مفید برای توصیف تمام‌نگاری، بازدهی آن است که نسبت کسری توان واقع در مرتبه موردنظر پراش به توان ورودی (P_0) است و بازده مرتبه‌ی n را به صورت $E_n = \frac{P_n}{P_0}$ نمایش داده می‌شود. واضح است که یک تمام‌نگار دامنه به طور متوسط حدود نیمی از توان ورودی را به دلیل عدم عبور در فرانژهای کدر از دست می‌دهد؛ بنابراین، بازدهی کمتری نسبت به تمام‌نگار فازی خواهد داشت.

یکی از روش های تولید گرداب‌های نوری، چاپ الگوی چنگالی تمام‌نگار دامنه بر روی فیلم‌های لیتوگرافی با توان جداسازی بالا است. از دیگر روش‌های موجود می‌توان به استفاده از SLM اشاره کرد. SLM ها در واقع صفحات نمایشگر بر مبنای بلور مایع هستند و این امکان را ایجاد می‌کند که بتوان با تغییر توری چنگالی، گرداب‌های نوری با بار توپولوژیکی متفاوتی در حداقل زمان ممکن ساخت. عملکرد SLM به اینگونه است که در هر پیکسل به صورت مجزا چرخش قطبش نور اعمال کند و می‌توان با قرار دادن دو قطبشگر عمود برهم در دو طرف آن، یک تمام‌نگار دامنه ایجاد کرد. از طرفی چرخش دو قطبی‌های کریستال مایع، یک تاخیر فاز به صورت محلی می‌تواند ایجاد کند که گزینه‌ی مناسبی برای تولید توری فازی است. بنابراین، استفاده از SLM نسبت به توری های چاپی یا حکاکی شده برتری دارد [۶].

از آنجایی که الگوی شکل توری، نقش مهمی در بازدهی آن تمام‌نگار ایفا می‌کند دو حالت متفاوت باینری و جلوه‌دار را در نظر گرفته و مقایسه خواهیم کرد. با استفاده از یک SLM دارای توان جداسازی بالا و بررسی عملکرد آن در مدولاسیون دامنه و فاز [۷]، در این مقاله به بررسی بازدهی مراتب پراش تولید شده توسط SLM در ایجاد پرتوهای

$$t(x_1, y_1) = e^{iag} \quad (4)$$

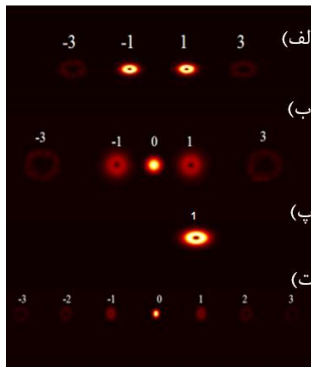
حاصل پراش یک باریکه گاوسی از الگوی چنگالی باینری و جلوه‌دار برای بارهای توپولوژیکی در هر مرتبه از پراش برای حالت‌های دامنه و فاز، در شکل ۳ نشان داده شده است.



شکل ۱: مقطع عرضی توری. شکل سمت راست پروفایل باینری و شکل سمت چپ پروفایل جلوه‌دار (دندانه‌های شکل) است.



شکل ۲: الگوی توری چنگالی به منظور تولید پرتو گردابی با بار توپولوژیکی $l=1$. شکل سمت راست تمام‌نگاری باینری و شکل چپ تمام‌نگاری جلوه‌دار را نشان می‌دهد.



شکل ۳: مراتب پراش حاصل از: (الف) تمام‌نگاری باینری فازی، (ب) تمام‌نگاری باینری دامنه، (پ) تمام‌نگاری جلوه‌دار فازی و (ت) تمام‌نگاری جلوه‌دار دامنه

چیدمان تجربی

چیدمان آزمایشگاهی در شکل ۴ نشان داده شده که در آن نور لیزر به الگوی CGH بر روی SLM تابیده می‌شود و بازده هرمرتبه از پراش از توری‌های دامنه توسط فتودیود اندازه‌گیری شده است؛ همانطور که الگوی تجربی پراشی حاصل از توری تمام‌نگار دامنه در شکل ۵ نشان می‌دهد، در نوع جلوه‌دار، تمام مراتب پراش ظاهر می‌گردد درحالی که در نوع باینری، مرتبه صفر و مراتب فرد مشاهده می‌شود، لذا انتظار می‌رود در نوع باینری چگالی توان در مراتب فرد پراش نسبت به نوع جلوه‌دار که انرژی آن در تمام مراتب پراش توزیع شده، بیشتر باشد و با شبیه‌سازی‌های صورت

لاگراوس و آشکارسازی از طریق تداخل‌سنجی خواهیم پرداخت.

مبانی نظری و شبیه سازی

انتگرال پراش فرانیهوفر که در واقع تبدیل فوری‌ی تابع انتقال $t(x_1, y_1)$ است در معادله‌ی (۱) نشان داده شده است. تابع انتقال یک توری باینری از هم‌پیچش یک تابع مستطیلی (rect) جهت ایجاد حالت‌های ۱ و ۰ باینری در یک تابع شانه‌ای (comb) جهت تکرار حالت باینری است که در یک پوش خارجی مستطیلی (rect) برای مشخص کردن محدوده‌ی توری ضرب می‌شود، به‌دست می‌آید؛ در حالی که یک توری جلوه‌دار (blazed grating)، از هم‌پیچش یک تابع شیب (ramp) نشان‌دهنده‌ی اختلاف فاز در یک دوره‌ی توری جلوه‌دار و یک تابع شانه‌ای (comb) جهت تکرار تابع شیب است و ضرب در یک پوش مستطیلی (rect) جهت ایجاد محدوده‌ی توری به‌دست می‌آید. پروفایل توری مربوطه در شکل ۱ نمایش داده شده است. با این حال برای ایجاد الگوی چنگالی می‌توان یک موج تخت مرجع را با یک موج پرتو گردابی تداخل داد که در نهایت به معادله (۲) که الگوی چنگالی یک توری باینری است منجر می‌شود [۸] و معادله نهایی یک توری جلوه‌دار در معادله (۳) نشان داده شده است.

$$F\{t(x_1, y_1)\} = \iint_{-\infty}^{+\infty} t(x_1, y_1) \exp [-i2\pi(x_1\xi + y_1\zeta)] dx_1 dy_1 \quad (1)$$

$$g_1(\alpha) = \frac{1}{2}(1 + \text{sign}(\cos(\alpha))) \quad (2)$$

$$g_2(\alpha) = \frac{1}{2\pi} \text{Mod}(\alpha, 2\pi) \quad (3)$$

که $\alpha = k_x x - l\varphi$ و تابع $\text{Mod}(\alpha, 2\pi)$ ، باقی مانده‌ی تقسیم α بر 2π و sign ، تابع علامت است. توری تمام‌نگار باینری و جلوه‌دار حاصل از معادلات فوق را به ازای بار توپولوژیکی $l=1$ در شکل ۲ نشان داده شده است.

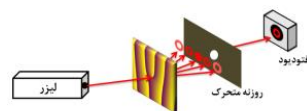
برای تمام‌نگار فاز، از تابع انتقال در معادله (۴) استفاده می‌شود که g نوع توری از بین دو توری ذکر شده و a عمق مدولاسیون توری تمام‌نگار می‌باشد.

متمرکز کردن کل انرژی در یک مرتبه‌ی پراش، تمام‌نگار فاز نوع جلوه‌دار ایده‌آل‌ترین توری به حساب می‌آید که بازده ۱۰۰٪ تولید می‌کند. در صورت استفاده از تمام‌نگار دامنه به صورت تجربی، نوع باینری بازده ۹٪ ایجاد می‌کند در حالی که نوع جلوه‌دار، بازده ۳٪ تولید می‌نماید؛ بنابراین تمام‌نگار دامنه نوع جلوه‌دار به دلیل حضور تمام مراتب پراش نسبت به نوع باینری بازده کمتری دارد. مقادیر تجربی به دست آمده برای نوع جلوه‌دار و نوع باینری، به دلیل جذب نور، کمتر از مقادیر شبیه‌سازی می‌باشد. به منظور افزایش بازدهی، باید به این نکته توجه شود که پاسخ توزیع انرژی در مراتب مختلف پراش به انتخاب تابع انتقال برای توری بستگی دارد؛ لذا حل مساله به صورت بهینه‌سازی معکوس می‌تواند بهترین تابع انتقال را برحسب نیاز به دست آورد.

مرجع‌ها

- [1] Nicolas, A., Veissier, L., Giner, L., Giacobino, E., Maxein, D., & Laurat, J. (2014). A quantum memory for orbital angular momentum photonic qubits. *Nature Photonics*, 8(3), 234-238.
- [2] Couillet, P., Gil, L., & Rocca, F. (1989). Optical vortices. *Optics Communications*, 73(5), 403-408.
- [3] Rouan, D., Riaud, P., Boccaletti, A., Clénet, Y., & Labeyrie, A. (2000). The four-quadrant phase-mask coronagraph. I. Principle. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 112(777), 1479.
- [4] Gbur, G., & Tyson, R. K. (2008). Vortex beam propagation through atmospheric turbulence and topological charge conservation. *JOSA A*, 25(1), 225-230.
- [5] Khare, K., Lochab, P., & Senthilkumaran, P. (2020). Orbital Angular Momentum States of Light. *coordinates*, 1, 3.
- [6] Karimi, E. (2009). Generation and manipulation of laser beams carrying orbital angular momentum for classical and quantum information applications. *Universita degli Studi di Napoli Federico II*, 1-8.
- [7] Moosavi, S. A., Mohammadian, N., & Saghafifar, H. (2015). Design and construction of a transmissive reflective Liquid Crystal SLM and investigation of phase and amplitude modulation.
- [8] Harvey, J. E., & Pfisterer, R. N. (2019). Understanding diffraction grating behavior: including conical diffraction and Rayleigh anomalies from transmission gratings. *Optical Engineering*, 58(8), 087105.

گرفته سازگاری دارد. به منظور صحت سنجی عملکرد توری‌ها در تداخل‌سنج ماخ‌زندر، پرتو لاگراوس با موج تخت تداخل کرده و الگوی چنگالی به وجود می‌آید. بار توپولوژیکی لاگراوس با آنچه از توری چنگالی حاصل از تداخل‌سنجی به دست می‌آید، مشابه است که در شکل ۶، مشاهده می‌گردد.



شکل ۴: شماتیک اندازه‌گیری بازده توسط فتودیود



شکل ۵: الگوی پراشی حاصل از توری تمام‌نگار دامنه: شکل بالا جلوه‌دار و شکل پایین باینری



شکل ۶: چیدمان تداخل‌سنج ماخ‌زندر و در سمت چپ، الگوی چنگالی به دست آمده از تداخل‌سنج ماخ‌زندر نشان دهنده‌ی بار توپولوژیکی $l=1$.

در جدول ۱، بازده نظری شبیه‌سازی عددی و همچنین نتایج تجربی برای تمام‌نگار دامنه و فاز را برای دونوع توری، نشان داده شده است. از آنجایی که SLM استفاده‌شده در این آزمایش قادر به ایجاد اختلاف فاز موردنیاز نبوده، نمی‌توان از آن به عنوان تمام‌نگار فاز استفاده نمود.

جدول ۱: بازده تمام‌نگار دامنه و فاز برای مرتبه اول پراش

نوع توری	بازده تمام‌نگار دامنه	بازده تمام‌نگار فاز
تجربی	شبیه‌سازی	شبیه‌سازی
جلوه‌دار	۳٪	۳.۵٪
باینری	۹٪	۱۰٪
		۴۰٪

نتیجه‌گیری

با توجه به نتایج، بازده تمام‌نگار دامنه برای هر دو توری باینری و جلوه‌دار، نسبت به تمام‌نگار فاز کمتر است. به قصد