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

ارزیابی بازدهی مرتبه پراش پرتوهای‌لاگرگاوس به‌دست آمده از توری های چنگالی فاز و دامنه توسط مدولاتور فضایی نور (SLM)

شکیبا مساوات شهرضا، سید ایوب موسوی، حسین ثقفی‌فر
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 لاگرگاوس با استفاده از تمام‌نگاشت تولید شده‌ی رایانه‌ای (CGH) بر روی مدولاتور فضایی نور (SLM) مورد بررسی قرار می‌گیرد. ابتدا فرآیند شبیه‌سازی تولید پرتوهای لاگرگاوس از طریق پراش از توری چنگالی دامنه و فاز در دو نوع طراحی باینری و جلوه‌دار (به شکل دندانه‌اره‌ای) صورت گرفته و مقایسه گردید. نتایج به‌دست آمده برای توری‌های فازی به‌ویژه نوع جلوه‌دار بازدهی بالاتری را در مرتبه‌ی اول پراش نشان می‌دهد. با برپایی چیدمان تجربی و ثبت نتایج آزمایشگاهی سازگاری خوبی با نتایج شبیه‌سازی به‌دست آمد. به‌منظور آشکارسازی بار توپولوژیکی پرتو لاگرگاوس تولید شده از چیدمان تداخل‌سنج ماخ‌زندر استفاده شد.

کلید واژه-پرتو لاگرگاوس، تمام‌نگاری رایانه‌ای، توری دندانه‌اره‌ای 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

[Downloaded from www.opsi.ir on 2025-07-28]

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].

پرتوهای‌لاگرگاوس دارای فاز گردابی به صورت $\exp(il\varphi)$ 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 تابت 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 پرتوی‌دلخواه، 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 nام را به‌صورت $E_n = \frac{P_n}{P_0}$ نمایش داده می‌شود. واضح است که یک تمام‌نگار دامنه به طور متوسط حدود نیمی از توان فرودی را به‌دلیل عدم عبور در فرانژهای‌کدر 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. SLMها 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. ازطرفی 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 نظرگرفته 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

[Downloaded from www.opsi.ir on 2025-07-28]

لاگرگاوس و آشکارسازی از طریق تداخل‌سنجی خواهیم پرداخت.

مبانی نظری وشبیه سازی

انتگرال پراش فرانهوفر که در واقع تبدیل فوریه‌ی 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 ۰و۱ 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 محدوده توری به‌دست می‌آید. پروفایل توری مربوطه در شکل۱ 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.

$$F\{t(x_1,y_1)\} = \iint_{-\infty}^{+\infty} t(x_1,y_1)\exp\left[-i2\pi(x_1\xi + y_1\zeta)\right]\, dx_1 dy_1 \qquad (۱)$$

$$g_1(\alpha) = \frac{1}{2}\left(1 + sign(\cos(\alpha))\right) \qquad (۲)$$

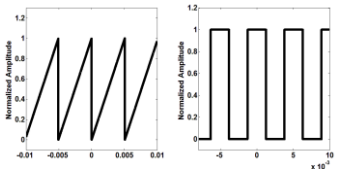
$$g_2(\alpha) = \frac{1}{2\pi} Mod(\alpha, 2\pi) \qquad (۳)$$

که $\alpha = k_x x - l\varphi$ و تابع $Mod(\alpha,2\pi)$، 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 $\ell=1$ در شکل۲ 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.

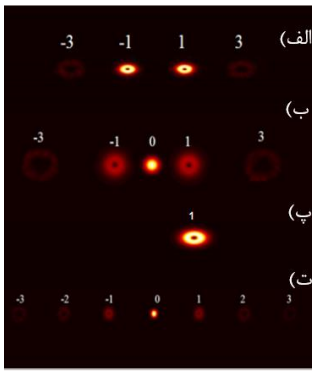
$$t(x_1,y_1) = e^{iag} \qquad (۴)$$

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



شکل۱: مقطع عرضی توری. شکل سمت راست پروفایل باینری و شکل سمت چپ پروفایل جلوه‌دار (دندانه‌ارهای شکل) است.

شکل۲: الگوی توری چنگالی به منظور تولید پرتو گردابی با بار توپولوژیکی $\ell=1$. شکل سمت راست تمام‌نگاری باینری و شکل چپ تمام‌نگاری جلوه‌دار را نشان می‌دهد.



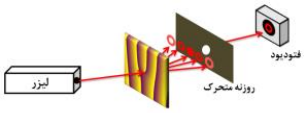
شکل۳: مراتب پراش حاصل از: الف)تمام‌نگاری باینری فازی، ب)تمام‌نگاری باینری دامنه، پ)تمام‌نگاری جلوه‌دار فازی و ت)تمام‌نگاری جلوه‌دار دامنه

چیدمان تجربی

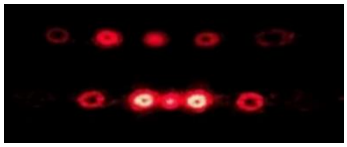
چیدمان آزمایشگاهی در شکل ۴ نشان داده شده که در آن نور لیزر به الگوی CGH بر روی SLM تابیده می‌شود و بازده هرمرتبه از پراش از توری‌های دامنه توسط فتودیود اندازه‌گیری شده است؛ همانطور که الگوی تجربی پراشی حاصل از توری تمام‌نگار دامنه در شکل ۵ نشان می‌دهد، در نوع جلوه‌دار، تمام مراتب پراش ظاهر می‌گردد درحالی 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

[Downloaded from www.opsi.ir on 2025-07-28]

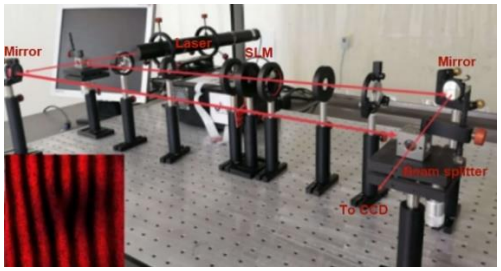
گرفته سازگاری دارد. به منظور صحت سنجی عملکرد توری ها در تداخل‌سنج ماخزندر، پرتو لاگرگاوس با موج تخت تداخل کرده و الگوی چنگالی به‌وجود می‌آید. بار توپولوژیکی لاگرگاوس با آنچه از توری چنگالی حاصل از تداخل‌سنجی به‌دست می‌آید، مشابه است که در شکل ۶، مشاهده می‌گردد.



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 تداخل سنج ماخزندر و در سمت چپ، الگوی چنگالی به‌دست آمده از تداخل‌سنج ماخزندرنشان دهنده‌ی بار توپولوژیکی $\ell=1$.

در جدول ۱، بازده نظری شبیه سازی 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 به‌عنوان تمام‌نگار فاز استفاده نمود.

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

	بازده تمام‌نگار دامنه		بازده تمام‌نگار فاز
نوع توری	تجربی	شبیه‌سازی	شبیه‌سازی
جلوه‌دار	۳٪	۳.۵٪	۱۰۰٪
باینری	۹٪	۱۰٪	۴۰٪

نتیجه‌گیری

با توجه به نتایج، بازده تمام نگار دامنه برای هر دو توری باینری و جلوه‌دار ، نسبت به تمام‌نگار فاز کمتر است. به‌قصد متمرکز کردن کل انرژی در یک مرتبه‌ی پراش، تمام‌نگار فاز نوع جلوه‌دار ایده‌آل‌ترین توری به‌حساب می‌آید که بازده ۱۰۰٪ تولید می‌کند. در صورت استفاده از تمام‌نگار دامنه به صورت تجربی، نوع باینری بازده ۹٪ ایجاد می‌کند درحالی 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 به‌دست آمده برای نوع جلوه‌دار و نوع باینری، به‌دلیل جذب نور، کمتر از مقادیر شبیه‌سازی می‌باشد. به‌منظور 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 به‌صورت بهینه‌سازی معکوس می‌تواند بهترین تابع انتقال را برحسب نیاز به‌دست 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] Coullet, 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 transmitive 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.

[Downloaded from www.opsi.ir on 2025-07-28]