بیستمین کنفرانس اپتیک و فوتونیک ایران
و ششمین کنفرانس مهندسی و فناوری فوتونیک ایران
۸ تا ۱۰ بهمن ماه۱۳۹۲ - دانشگاه صنعتی شیراز

اثر الگوی اعمالی روی SLM بر کیفیت تصویر در تصویرسازی گوست محاسباتی

محمد ظفری، سهراب احمدی کندجانی و رضا خردمند

دانشگاه تبریز، پژوهشکده فیزیک کاربردی و تحقیقات ستاره‌شناسی

چکیده – در این مقاله، ما یک روش جدید برای بازسازی تصویر در تصویرسازی گوست محاسباتی معرفی کردیم که کیفیت تصویر گوست را به طور چشمگیری افزایش می‌دهد. برای این منظور، تصویر گوست را با استفاده از این روش، هم به صورت شبیه سازی و هم به صورت تجربی به دست آورده و پارامترهای کیفیت تصویر(تباین، نسبت سیگنال به نویز و نسبت کنتراست به نویز) را محاسبه کردیم. مقادیر محاسبه شده برتری این روش نسبت به روش مرسوم را نشان می‌دهد.

کلید واژه- تصویر گوست، کیفیت تصویر، تباین، نسبت سیگنال به نویز، نسبت کنتراست به نویز

The effect of SLM pattern on the image quality in computational ghost imaging

Mohammad Zafari, Sohrab Ahmadi Kandjani, and Reza Kheradmand

Research Institute for Applied Physics and Astronomy, University of Tabriz, Tabriz, Iran

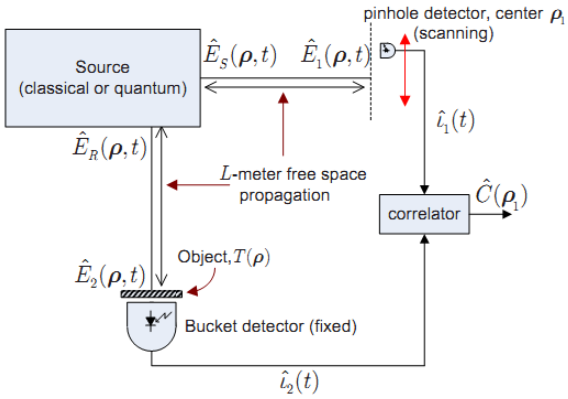
Abstract- In this paper we present a new technique for reconstructing image in computational ghost imaging (CGI) which dramatically enhances the ghost image quality. For this aim, we reconstruct ghost image by using this method, both with simulation and experimental methods and calculate the image quality parameters (visibility, signal to noise ratio (SNR) and contrast to noise ratio (CNR)). The calculated values show the superiority of this method over conventional method.

Keywords: Ghost image, Image quality, Visibility, Signal to noise ratio (SNR), Contrast to noise ratio (CNR)

[Downloaded from opsi.ir on 2026-02-05]

۱- مقدمه

تصویرسازی گوست، بدست آوردن الگوی میزان عبور عرضی نور توسط یک شی با استفاده از اندازه‌گیری همبستگی جریان نوری است. به طور کلی در یک آزمایش تصویرسازی گوست، یک منبع کلاسیکی یا کوانتومی که دو باریکه نوری همبسته یا درهم‌تنیده تولید می‌کند، مورد استفاده قرار می‌گیرد(شکل ۱). یک باریکه به جسم برخورد کرده و با آن برهمکنش می‌کند و به یک آشکارساز تک-پیکسل(بوکت) –که قدرت تفکیک فضایی ندارد– می‌رسد، در حالیکه باریکه دیگر در یک مسیر مستقل حرکت می‌کند و هیچ اندرکنشی با جسم ندارد ولی به یک آشکارساز با قدرت تفکیک بالا (مثلا آرایه CCD یا CMOS) برخورد می‌کند که خروجی چند پیکسلی بدست می‌دهد. تصویر گوست جسم با اندازه‌گیری تابع همبستگی متقابل شدت دو باریکه حاصل از این آشکارسازها بدست می‌آید[۹-۱].



شکل ۱: چیدمان تصویرسازی گوست معمولی[۱]

اصطلاح "تصویرسازی گوست" به این دلیل برای این پدیده به کار برده می‌شود که خروجی هیچ‌کدام از آشکارسازها به تنهایی نمی‌تواند تصویر را بازسازی کند.

اگرچه تصاویر گوست بدست آمده از منابع کوانتومی(زوج فوتون‌های درهم‌تنیده) دارای تباین بسیار بهتری نسبت به تصاویر حاصل از منابع کلاسیکی(حرارتی یا شبه حرارتی) هستند، مشکلات تولید زوج فوتون‌های درهم‌تنیده و شار فوتونی پایین، کاربرد منابع کوانتومی را محدود کرده است. بنابراین در سال‌های اخیر استفاده از منابع کلاسیکی توجه زیادی را به خود جلب کرده است.

۲- تصویرسازی گوست محاسباتی

در چیدمان‌های معمولی، الگوهای لکه‌ای(طرح‌های اسپکل) با عبور باریکه لیزر از یک شیشه مات چرخان تولید می‌شوند که این باریکه توسط یک شکافنده پرتو به دو باریکه مرجع و جسمی تقسیم می‌شود. در تصویرسازی گوست اطلاع داشتن از الگوهای لکه‌ای متغیر با زمان که به جسم برخورد می‌کنند امری ضروری است.آشکارساز با قدرت تفکیک فضایی در بازوی مرجع نوسانات را در هر پیکسل نشان می‌دهد، در حالیکه آشکارساز بوکت در بازوی جسمی، مجموع نوسانات وزن‌دار همه پیکسل‌های الگوی اسپکل را اندازه‌گیری می‌کند.

در تصویرسازی گوست محاسباتی پرتو لیزر از یک مدولاتور فضایی نور(SLM) عبور داده می‌شود که ورودی‌های انتخابی برای ایجاد رفتار همدوس بدست می‌دهد. در این حالت چون نوسانات شدت معلوم هستند، بازوی سیگنال را می‌توان با محاسبات عددی جایگزین کرد. بنابراین نیاز به شکافنده پرتو و آشکارساز با قدرت تفکیک فضایی از بین رفته است. نور غیر همدوس فضایی با اعمال الگوهای فازی شبه‌تصادفی $\varphi(x,y)$ روی SLM تولید می‌شود. چون برای هر تکرار r، الگوهای فازی معلوم هستند، می‌توان میدان را درست بعد از SLM به صورت زیر محاسبه کرد[۱۰]:

$$E_r(x,y,z=0)=E^{(in)}e^{i\phi(x,y)} \qquad (۱)$$

که $E^{(in)}$، میدان فرودی روی SLM است. با معلوم بودن $E_r(x,y,z=0)$، میدان در فاصله z از SLM با استفاده از انتشارگر فرنل- هویگنس محاسبه می‌شود:

(۲)

$$E_r(x,y,z)=\frac{e^{i\lambda z}}{i\lambda z}\int d\xi d\eta E_r(x-\xi,y-\eta,0)e^{i(\frac{\pi}{\lambda z})(\xi^2-\eta^2)}$$

که λ طول‌موج منبع است. برای بازسازی تابع انتقال جسم، $T(x,y)$، در نقطه $z=L$ از همبستگی متقابل الگوی شدت محاسبه شده در طرح جسم(I_r) با شدت‌های اندازه‌گیری شده توسط آشکارساز بوکت(B_r) استفاده می‌شود.

$$I_r=|E_r(x,y,z=L)|^2 \qquad (۳)$$

$$B_r=\int dxdyI_r(x,y,L)T(x,y) \qquad (۴)$$

در نهایت تصویر گوست به صورت زیر محاسبه می‌شود:

[Downloaded from opsi.ir on 2026-02-05]

$$G(\rho)=\frac{1}{N}\sum_{r=1}^{N}(B_r-<B_r>)I_r(\rho) \qquad (۵)$$
$$=<BI(\rho)>-<B><I(\rho)>$$

۳- شبیه‌سازی عددی

در این قسمت با شبیه‌سازی تصویرسازی گوست محاسباتی، تصویر گوست را به دو روش مرسوم و روش جدید (که در ادامه توضیح داده خواهد شد)، بدست آورده و مقادیر تباین، نسبت سیگنال به نویز(SNR) و نسبت کنتراست به نویز(CNR) برای هر دو روش محاسبه کردیم. تباین یک تصویر اختلاف نسبی بین نواحی روشن و تاریک تصویر را توصیف می‌کند و از رابطه زیر بدست می‌آید [۲]:

$$V(G)\equiv\frac{<G(x_{in})>-<G(x_{out})>}{<G(x_{in})>+<G(x_{out})>} \qquad (۶)$$

پارامترهای نسبت سیگنال به نویز(SNR) و نسبت کنتراست به نویز(CNR) چگونگی قابل تمییز بودن اطلاعات مفید را نسبت به نویز موجود در سیستم مشخص می‌کنند و به شکل روابط(۷) و (۸) بیان می‌شوند:

$$SNR(G)\equiv\frac{<G(x_{in})>}{\sqrt{\frac{1}{2}[\Delta^2G(x_{in})+\Delta^2G(x_{out})]}} \qquad (۷)$$

$$CNR(G)\equiv\frac{<G(x_{in})>-<G(x_{out})>}{\sqrt{\frac{1}{2}[\Delta^2G(x_{in})+\Delta^2G(x_{out})]}} \qquad (۸)$$

که در آنها x_{in} و x_{out} به ترتیب موقعیت پیکسل‌ها را در داخل و خارج ناحیه انتقال جسم نشان می‌دهند.

در تصویرسازی گوست مرسوم طرح‌های اسپکل به صورت ماتریس‌های کاتوره‌ای روی SLM نقش می‌بندند، به طوری که به هر یک از عناصر ماتریس، یک مقدار تصادفی به عنوان مدولاتور شدت نسبت داده می‌شود. در نتیجه در هر اندازه‌گیری، تمامی عناصر ماتریس کاتوره‌ای دارای یک مقدار تصادفی دلخواه خواهد بود. در روش ما به جای استفاده از ماتریس کاتوره‌ای، در هر اندازه‌گیری همه عناصر ماتریس یک مقدار یکسان در نظر گرفته شده به طوری که کمترین شدت را از SLM عبور دهد و فقط به یک عنصر آن مقدار تصادفی نسبت داده می‌شود، به طوری که در کل اندازه‌گیری‌ها هر عنصر تنها یک بار مقدار تصادفی به خود می‌گیرد. در نتیجه ماکزیمم شات(فرآیند اندازه‌گیری و محاسبه در هر تکرار) لازم برای تشکیل یک تصویر با بهترین کیفیت، برابر حاصلضرب تعداد سطرها در ستون‌های ماتریس خواهد بود.

نتایج حاصل از شبیه‌سازی عددی در شکل(۲) و جدول(۱) نشان داده شده است.

(الف) (ب) (ج)

شکل۲: تصاویر حاصل از شبیه‌سازی عددی. الف) تصویر اصلی. ب) تصویر گوست به روش مرسوم. ج) تصویر گوست به روش ما

جدول۱: مقادیر محاسبه شده تباین، نسبت سیگنال به نویز و نسبت کنتراست به نویز

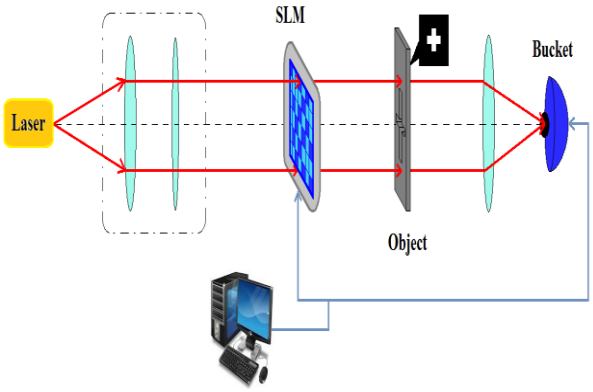
	SNR	CNR	V
تصویر گوست به روش مرسوم	۵/۹۶	۱/۹۵	۰/۱۹
تصویر گوست به روش ما	۳۰/۴۷	۳۰/۲۰	۰/۹۸

همان طور که از شکل(۲) و جدول(۱) می‌توان مشاهده کرد، کیفیت تصویر و همچنین پارامترهای مربوط به آن در روش ما نسبت به روش مرسوم افزایش چشمگیری یافته است.

۴- نتایج تجربی

برای نشان دادن برتری این روش به صورت تجربی، از یک لیزر هلیوم- نئون با طول‌موج $\lambda=632.8nm$ یک SLM به ابعاد ۱۳۰×۱۳۰ پیکسل (اندازه هر پیکسل برابر $2\times2\mu m^2$ است) و یک دوربین CMOS (Complementary Metal-Oxide Semiconductor) به ابعاد ۴۴۰×۶۴۰ پیکسل (۴×۳mm^2) استفاده کردیم. چیدمان تجربی در شکل(۳) نشان داده شده است.

[Downloaded from opsi.ir on 2026-02-05]

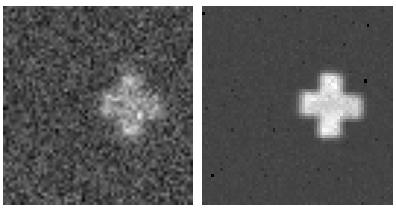


شکل۳: چیدمان تصویرسازی گوست محاسباتی

برای ایجاد طرح‌های اسپکل روی باریکه لیزر، در هر اندازه‌گیری الگوها به صورت ماتریس توسط یک کنترل کننده کامپیوتری روی SLM نقش می‌بندند. SLM طرح‌های اسپکل را روی نور یکنواخت لیزر ایجاد می‌کند. طرح‌های اسپکل که دارای نقاط روشن و تاریک هستند، بعد از عبور از جسم به آشکارساز می‌رسند. در نتیجه در هر طرح اسپکل یک عدد منحصربفرد به عنوان شدت توسط آشکارساز بدست می‌آید که با توجه به طرح اسپکل مربوطه می‌توان تصویر گوست را بدست آورد. ما از نرم‌افزار MATLAB به عنوان رابط بین کامپیوتر و SLM استفاده کردیم که می‌توانست الگوهای تصادفی را به صورت ماتریس‌های دلخواه در اندازه‌های مختلف روی SLM تولید کند.

به عنوان نتیجه تجربی، تصویر گوست مربوط به یک **"علامت بعلاوه"** به ابعاد ۶۵×۶۵ پیکسل را با هر دو روش تحت ۴۲۲۵(۶۵×۶۵) شات میدان بدست آورده و مقادیر تباین، نسبت سیگنال به نویز و نسبت کنتراست به نویز را محاسبه کردیم.

نتایج حاصل از داده‌های تجربی در شکل(۴) و جدول(۲) نشان داده شده است.



(الف) (ب)

شکل۴: تصاویر حاصل از داده‌های تجربی. الف) روش مرسوم. ب) روش ما

جدول۲: مقادیر محاسبه شده تباین، نسبت سیگنال به نویز و نسبت کنتراست به نویز

	SNR	CNR	V
تصویر گوست به روش مرسوم	۶/۳۸	۳/۰۵	۰/۳۱
تصویر گوست به روش ما	۳۳/۷۲	۲۱/۶۴	۰/۴۷

۵- نتیجه‌گیری

در این مقاله یک روش جدید برای بهبود کیفیت تصویر گوست معرفی شد. با استفاده از شبیه‌سازی عددی و همچنین به صورت تجربی، تصویر گوست را به دو روش بدست آورده و مقادیر تباین، نسبت سیگنال به نویز و نسبت کنتراست به نویز را محاسبه کردیم. شکل‌های(۲) و (۴) و نیز مقادیر مربوط به جدول‌های(۱) و (۲) نشان دهنده برتری این روش و بهبود کیفیت تصویر گوست هستند.

مراجع

[1] Erkmen, B., Shapiro, J., *Ghost imaging: from quantum to classical to computational*, **Adv. Opt. Photon.**, Vol 2, pp. 405-450, 2010.

[2] K.W.C., Chan., O'Sullivan., M.N., Boyd., R.W., *Optimization of thermal ghost imaging: high-order correlations vs. background subtraction*, **Optics Express.**, Vol 18(6), pp. 5562-5573, 2010

[3] Pittman ,T. B., Shih ,Y. H., Strekalov, D. V., Sergienko, A. V., *Optical imaging by means of two-photon quantum entanglement*, **Phys. Rev. A.**, Vol 52, pp. 3429–3432, 1995.

[4] Bennink ,R.S., Bentley ,S.J., Boyd, R.W., *Two-photon coincidence imaging with a classical source*, **Phys. Rev. Lett.**, Vol 89, p.113601, 2002.

[5] Tanha, M., Kheradmand, R., Ahmadi-Kandjani, S., *Gray-scale and color optical encryption based on computational ghost imaging*, **Applied Physics Letters.**, Vol 101(10), p. 101108-101108-3,2012

[6] Tanha, M., Ahmadi-Kandjani, S., Kheradmand, R., Ghanbari, H., *Computational Fluorescence Ghost Imaging*, **Eur. Phy. J. D.**, Vol 67(2), p. 1-4,2013.

[7] Ferri, F., et al., *Differential ghost imaging*, **Physical review letters**, Vol 104(25): p. 253603,2010.

[8] Katz, O., Y. Bromberg, and Y. *Silberberg*, *Compressive ghost imaging*, **Applied Physics Letters**, Vol 95(13): p. 131110-131110-3,2009.

[9] Sun, B., et al., *Normalized ghost imaging*. **Optics Express**, Vol 20(15): p. 16892-16901, 2012.

[10] Bromberg, Y., Katz, O., Silberberg, Y., *Ghost imaging with a single detector*, Physical Review A., Vol 79(5). p. 053840, 2009.

[Downloaded from opsi.ir on 2026-02-05]