



بیست و یکمین کنفرانس اپتیک و فوتونیک ایران  
و هفتمین کنفرانس مهندسی و فناوری فوتونیک ایران  
۲۳ تا ۲۵ دی ماه ۱۳۹۳، دانشگاه شهید بهشتی



## مقایسه روشهای رمزنگاری نوری براساس تصویرسازی گوست

محمد ظفری، سهراب احمدی کندجانی و رضا خردمند

دانشگاه تبریز، پژوهشکده فیزیک کاربردی و تحقیقات ستاره‌شناسی

چکیده - تصویرسازی گوست یک روش تصویرسازی نوین است که ماهیت آن بر مبنای محاسبه تابع همبستگی مرتبه دوم دو پرتو همبسته یا درهم‌تنیده استوار است. این ویژگی استفاده از دو پرتو باعث اهمیت تصویرسازی گوست در رمزنگاری نوری شده است. در این مقاله، ضمن معرفی روش گزینشی به عنوان یک تکنیک جدید برای تصویرسازی گوست و رمزنگاری نوری بر اساس این روش به صورت تجربی، مقایسه‌ای بین روش‌های رمزنگاری قبلی به انجام رسیده است. مقدار محاسبه‌شده پارامتر مربوط به میزان خطا در رمزگشایی غیرمجاز، برتری و امنیت بالای روش گزینشی در رمزنگاری نوری را نسبت به روش‌های قبلی نشان می‌دهد.

کلیدواژه- تابع همبستگی، تصویرسازی گوست، رمزنگاری نوری، روش گزینشی

## Comparison of optical encryption methods based on ghost imaging

Mohammad Zafari, Sohrab Ahmadi kandjani, Reza Kheradmand

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

Abstract- Ghost imaging is a novel imaging technique which the nature of it is based on calculating the second-order correlation function of two correlated or entangled beams. This feature of using two beams has been caused ghost imaging significance in optical encryption. In this paper, with the introducing of the selective method as a novel technique for ghost imaging and optical encryption based on this method experimentally, a comparison between previous encryption methods has been accomplished. Calculated value of the error rate parameter in unauthorized decryption shows the superiority and high security of selective method in optical encryption over previous methods.

Keywords: Correlation function, ghost imaging, optical encryption, selective method

## ۱- مقدمه

در تصویرسازی گوشت، برای بازسازی تصویر گوشت جسم با تابع عبور  $T(x,y)$  و در فاصله  $z=L$  از SLM از رابطه زیر استفاده می‌شود:

$$G(x,y) = \frac{1}{N} \sum_{r=1}^N (B_r - \langle B \rangle) I_r(x,y) \quad (1)$$

که در آن  $B_r = \int dx dy I_r(x,y, L) T(x,y)$  شدت اندازه‌گیری شده توسط آشکارساز بوکت و  $I_r = |E_r(x,y, z=L)|^2$  الگوی شدت محاسبه شده در سطح جسم است.

## ۳- تصویرسازی گوشت محاسباتی گزینشی

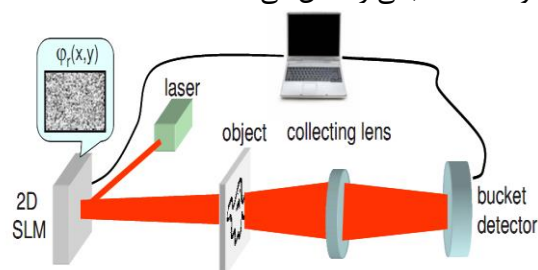
در تصویرسازی گوشت محاسباتی مرسوم الگوهای لکه‌ای به صورت ماتریس‌های تصادفی روی SLM نقش می‌بندند، به طوری که به هر یک از عناصر ماتریس، یک مقدار تصادفی به عنوان مدولاتور شدت نسبت داده می‌شود. در نتیجه در هر اندازه‌گیری، تمامی عناصر ماتریس دارای یک مقدار تصادفی دلخواه خواهد بود. به طور مشابه، در تصویرسازی گوشت گزینشی ما در هر اندازه‌گیری یک ماتریس تصادفی در نظر می‌گیریم؛ اما یک درایه آن مقدار متفاوت و بسیار بزرگ‌تر از درایه‌های دیگر به خود می‌گیرد. بنابراین، شدت عبوری از این درایه بسیار بیشتر درایه‌های دیگر خواهد بود. در این حالت چون در کل اندازه‌گیری‌ها هر درایه تنها یک بار مقدار متفاوت به خود می‌گیرد، در نتیجه ماکزیمم شات یا اندازه‌گیری لازم برای تشکیل یک تصویر با بهترین کیفیت، برابر حاصل‌ضرب تعداد سطرها در ستون‌های ماتریس خواهد بود. البته در این روش بسته به کاربرد می‌توان به جای استفاده از ماتریس تصادفی، از یک ماتریس با عناصر یکسان و یک عنصر متفاوت در هر اندازه‌گیری استفاده کرد. همچنین در این روش با انتخاب دو نقطه، چهار نقطه و یا تعداد نقاط بیشتر کنار هم با مقدار متفاوت به عنوان واحد در هر اندازه‌گیری، می‌توان تعداد اندازه‌گیری‌ها را به ترتیب به نصف، یک‌چهارم و یا کمتر، کاهش داد. شکل (۲) تصاویر گوشت بازسازی شده به ابعاد  $65 \times 65$  پیکسل و با تعداد  $4225$  اندازه‌گیری را با استفاده از شبیه‌سازی عددی به روش تصویرسازی گوشت محاسباتی مرسوم و گزینشی نشان می‌دهد. برای مقایسه دقت بازسازی تصاویر گوشت از خطای میانگین مربع (MSE) استفاده می‌شود که از

در یک چیدمان تصویرسازی گوشت متداول، پرتو لیزر پس از عبور از یک شیشه مات چرخان، به دو باریکه همبسته فضایی شکافته می‌شود که در دو مسیر جداگانه حرکت می‌کنند و معمولاً به عنوان بازوهای مرجع و جسمی شناخته می‌شوند. در بازوی جسمی، باریکه به جسم برخورد کرده و نور عبوری یا بازتابی از آن توسط یک آشکارساز تک-پیکسل که قدرت تفکیک فضایی ندارد، آشکارسازی می‌شود. در بازوی مرجع یک آشکارساز با قدرت تفکیک فضایی بالا قرار دارد و اطلاعات مربوط به باریکه مرجع را که هیچ برخورد یا اندرکنشی با جسم ندارد را اندازه‌گیری می‌کند. در نتیجه تصویر گوشت جسم با اندازه‌گیری تابع همبستگی متقابل شدت باریکه جسمی و باریکه مرجع به دست می‌آید [۵-۱].

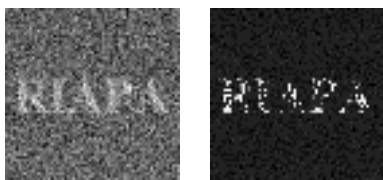
رمزنگاری نوری اطلاعات با استفاده از تصویرسازی گوشت موضوعی است که اخیراً مطرح شده و دارای قابلیت انتقال اطلاعات با امنیت بالا است. در این مقاله با معرفی یک روش جدید برای تصویرسازی گوشت محاسباتی با عنوان روش گزینشی و اثبات برتری این روش نسبت به روش محاسباتی مرسوم، رمزنگاری نوری بر اساس روش گزینشی به انجام رسیده و با روش‌های قبلی مقایسه شده است.

## ۲- تصویرسازی گوشت محاسباتی

در روش جدید تصویرسازی گوشت که به تصویرسازی گوشت محاسباتی معروف است، به جای استفاده از شیشه مات چرخان، پرتو لیزر از یک مدولاتور فضایی نور (SLM) عبور داده می‌شود [۶، ۷]. در این روش نور غیر هم‌دوس فضایی با اعمال الگوهای شبه تصادفی روی SLM تولید می‌شود؛ بنابراین بازوی مرجع را می‌توان با محاسبات عددی جایگزین کرد. شکل (۱) چیدمان تصویرسازی گوشت محاسباتی را نشان می‌دهد.



شکل ۱: چیدمان تصویرسازی گوشت محاسباتی [۷]



شکل ۴: تصاویر گوست حاصل از ۱۵۰۰ اندازه‌گیری. روش مرسوم (سمت چپ) و روش گزینشی (سمت راست).

#### ۴- رمزنگاری نوری

در رمزنگاری نوری اطلاعات براساس تصویرسازی گوست، الگوهای تصادفی که روی باریکه لیزر اثر می‌کنند، قسمت اصلی مولفه‌های رمز هستند و با معلوم بودن شدت‌های مربوط به هر الگوی تصادفی، تصویر گوست جسم بازسازی می‌شود [۹-۱۴]. برای بدست آوردن میزان خطا در رمزگشایی غیرمجاز تصویر، از خطای ریشه نرمال میانگین مربع استفاده می‌شود. این کمیت، تصویر رمزگشایی شده ناموفق را با تصویر ورودی اصلی مقایسه می‌کند و به صورت زیر محاسبه می‌شود [۱۰، ۱۴]:

$$NRMS = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N |I_d(i,j) - I_o(i,j)|^2}}{\sqrt{\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N |I_o(i,j)|^2}} \quad (3)$$

در این رابطه  $I_d$  و  $I_o$  به ترتیب نشان‌دهنده شدت‌های مربوط به تصویر رمزگشایی شده و تصویر اصلی هستند. مقدار NRMS بین صفر و یک تغییر می‌کند ( $0 \leq NRMS \leq 1$ ) که  $NRMS = 0$  نشان‌دهنده کمترین امنیت یا همان رمزگشایی کامل و  $NRMS = 1$  نشان‌دهنده بیشترین امنیت در سیستم رمزنگاری است. رمزنگاری نوری اطلاعات بر اساس تصویرسازی گوست محاسباتی برای اولین بار در سال ۲۰۱۰ مطرح شد که در آن از الگوهای فازی اختیاری و با مقادیر فازی متغیر در بازه  $[0-2\pi]$  به عنوان قسمت اصلی مؤلفه‌های رمز استفاده می‌شد [۹]. نتایج حاصل از این روش به گونه‌ای بود که یک کاربر غیرمجاز با دسترسی به تنها ۱۰٪ از اطلاعات می‌توانست تصاویر را رمزگشایی کند. در سال ۲۰۱۲ رمزنگاری تصاویر گوست با استفاده از مواد نورتاب برای بالا بردن سطح امنیت اطلاعات کدگذاری شده به انجام رسید [۱۰]. در این روش مقدار محاسبه شده NRMS برای دزدیده شدن ۲۰٪ اطلاعات برابر ۰/۳۸ است که نسبت به

رابطه زیر بدست می‌آید [۸]:

(۲)

$$MSE = \frac{1}{N_{pix}} \sum_{i,j} [T_{GI}(x_i, y_j) - T_{ref}(x_i, y_j)]^2$$

در این رابطه  $T_{GI}$  و  $T_{ref}$  به ترتیب شدت‌های مربوط به تصویر گوست بازسازی شده و تصویر اصلی هستند.



شکل ۲: تصاویر حاصل از شبیه‌سازی عددی. الف) تصویر اصلی. ب) تصویر گوست به روش محاسباتی مرسوم. ج) تصویر گوست به روش گزینشی.

مقادیر محاسبه شده MSE برای تصاویر فوق نشان می‌دهد که دقت بازسازی تصویر گوست به روش گزینشی بیش از ۱۴ مرتبه بهتر از روش مرسوم است. قابلیت منحصربه‌فرد تصویرسازی گوست گزینشی توانایی آن در بازسازی تصویر جداگانه از بخش‌های مختلف یک جسم است (شکل ۳). این امر با انتخاب اندازه‌گیری‌های معین و قرار دادن مقادیر متفاوت به صورت ترتیبی در سطرها یا ستون‌های ماتریس در اندازه‌گیری‌های متوالی صورت می‌گیرد.



شکل ۳: تصاویر گوست بازسازی شده از بخش‌های مختلف تصویر اصلی به صورت جداگانه.

یکی دیگر از تفاوت‌های تصویرسازی گوست گزینشی با روش مرسوم این است که در روش مرسوم با کاهش تعداد اندازه‌گیری‌ها کیفیت تصویر گوست کاهش می‌یابد، اما با کاهش تعداد اندازه‌گیری‌ها در روش گزینشی، تعداد نقاط بازسازی شده تصویر گوست کاهش می‌یابد که این ویژگی در رمزنگاری نوری اطلاعات یک مزیت بسیار مهم به‌شمار می‌رود. این ویژگی در شکل (۴) نشان داده شده است.

NRMS محاسبه شده تحت ۵۰٪ لو رفتگی اطلاعات با در نظر گرفتن حالت یک-نقطه برابر ۰/۷۵ است که در مقایسه با آخرین نتیجه گزارش شده، دارای مقدار بزرگتری بوده و در نتیجه سطح امنیت اطلاعات رمزگذاری شده در این روش بالاتر از روش های قبلی است.

### ۵- نتیجه گیری

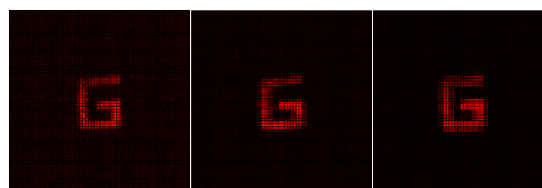
در این مقاله ابتدا روش گزینشی به عنوان یک تکنیک جدید برای تصویرسازی گوشت معرفی شد. سپس با بیان قابلیت تصویرسازی گوشت در رمزنگاری نوری، مقایسه ای بین روش های مختلف رمزنگاری بر اساس تصویرسازی گوشت به انجام رسید. در نهایت با رمزنگاری نوری بر اساس روش گزینشی به صورت تجربی و محاسبه NRMS برای درصدهای مختلف لو رفتگی اطلاعات و مقایسه آن با روش های قبلی، برتری روش گزینشی در رمزنگاری به اثبات رسید.

### مراجع

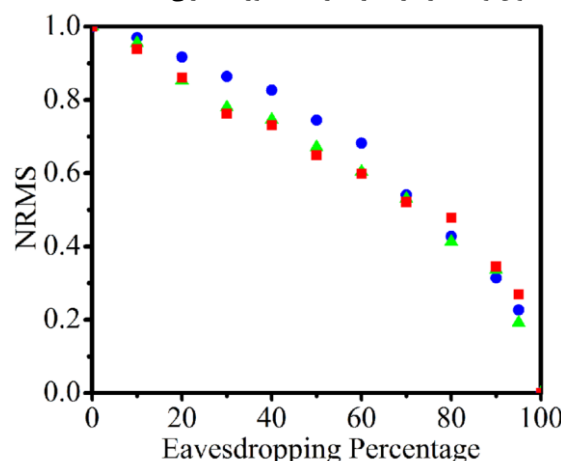
- [1] Pittman T., et al., *Optical imaging by means of two-photon quantum entanglement*, **Phys. Rev. A**. 52 (1995) 3429-3432.
- [2] Bennink R S., Bentley S J., Boyd R W., "Two-Photon" *Coincidence Imaging with a Classical Source*, **Phys. Rev. Lett.** 89 (2002) 113601.
- [3] Valencia A., et al., *Two-photon imaging with thermal light*, **Phys. Rev. Lett.** 94 (2005) 063601.
- [4] Erkmen B I., Shapiro J H., *Ghost imaging: from quantum to classical to computational*, **Adv. Opt. Photon.** 2 (2010) 405-450.
- [5] Shapiro J H., Boyd R W., *The physics of ghost imaging*, **Quantum Inf Process.** 11 (2012) 949-993.
- [6] Shapiro J H., *Computational ghost imaging*, **Phys. Rev. A**. 78 (2008) 061802.
- [7] Bromberg Y., Katz O., Silberberg Y., *Ghost imaging with a single detector*, **Phys. Rev. A**. 79 (2009) 053840.
- [8] Katz O., Bromberg Y., Silberberg Y., *Compressive ghost imaging*, **Appl. Phys. Lett.** 95 (2009) 131110.
- [9] Clemente P., et al., *Optical encryption based on computational ghost imaging*, **Opt. Lett.** 35 (2010) 2391-2393.
- [10] Tanha M., Kheradmand R., Ahmadi-Kandjani S., *Gray-scale and color optical encryption based on computational ghost imaging*, **Appl. Phys. Lett.** 101 (2012) 101108-101108-3.
- [11] Kong L J., et al., *Encryption of ghost imaging*, **Phys. Rev. A**. 88 (2013) 013852.
- [12] Sun M., et al., *A simple optical encryption based on shape merging technique in periodic diffraction correlation imaging*, **Opt. Express**. 21 (2013) 19395-19400.
- [13] Chen W., Chen X., *Ghost imaging for three-dimensional optical security*, **Appl. Phys. Lett.** 103 (2013) 221106.
- [14] Zafari M., Kheradmand R., Ahmadi-Kandjani S., *Optical encryption with selective computational ghost imaging*, **J. Opt.** 16 (2014) 105405.

روش قبلی از امنیت بهتری برخوردار است. اما در سال ۲۰۱۳ رمزنگاری تصاویر گوشت با استفاده از روش دو پرتو و چیدمان متداول مطرح شد [۱۱]. بهره گیری از این روش سطح امنیت اطلاعات کدگذاری شده را نسبت به دو روش قبلی بسیار بالا برد به طوری که مقدار NRMS محاسبه شده تحت ۵۰٪ لو رفتگی اطلاعات به ۰/۶۸ رسید.

برای نشان دادن برتری روش گزینشی در رمزنگاری نوری اطلاعات به صورت تجربی، ما از یک لیزر هلیوم-نئون با طول موج  $\lambda = 632.8nm$  یک SLM به ابعاد  $130 \times 130$  پیکسل (اندازه هر پیکسل برابر  $2 \times 2 \mu m^2$  است) و یک دوربین CMOS به ابعاد  $640 \times 640$  پیکسل ( $4 \times 3 mm^2$ ) استفاده کردیم. به منظور محاسبات کمی، تصویر گوشت جسم با در نظر گرفتن تعداد نقاط مختلف کنار هم با مقدار متفاوت به عنوان واحد در هر اندازه گیری، بازسازی شده و مقدار NRMS برای درصدهای مختلف لو رفتگی اطلاعات محاسبه شد.



شکل ۵: (به ترتیب از چپ به راست) تصویر گوشت بازسازی شده با در نظر گرفتن یک نقطه، دو نقطه و چهار نقطه کنار هم با مقدار متفاوت به عنوان واحد در هر اندازه گیری به صورت تجربی.



شکل ۶: نمودار میزان خطا بر حسب درصد لو رفتگی اطلاعات. داده های مربوط به حالت های یک-نقطه، دو-نقطه و چهار-نقطه به ترتیب با دایره، مثلث و مربع نشان داده شده اند.

همان طور که در شکل (۶) مشاهده می شود، مقدار