

基于轨道角动量全息和频移的大容量光学信息加密技术

郑伟¹, 张迪², 原昊², 于娜娜², 席思星^{2*}, 王桂林¹, 马帅³, 王晓雷^{4*}, 郎利影⁵

1. 运城学院 物理与电子工程系, 山西 运城 044000;
2. 河北工程大学 数理科学与工程学院, 河北 邯郸 056038;
3. 联想(北京)信息技术有限公司, 北京 100095;
4. 南开大学现代光学研究所, 天津 300350;
5. 河北工业大学 先进激光技术研究中心, 天津 300401)

摘要: 提出了一种基于轨道角动量全息 (Orbital Angular Momentum, OAM) 和频移的大容量光学信息加密方法。该方法实现了对多个图像信息的并行加密。首先, 对多幅原始图像进行采样, 采样阵列的采样间隔取决于具有不同拓扑荷数的螺旋相位的空间频率。然后, 多个采样图像信息经过随机相位调制、傅里叶变换和频移相位调制后相干叠加构成轨道角动量保留全息图。最后, 将不同拓扑荷的螺旋相位分别编码到轨道角动量保留全息图中, 得到轨道角动量选择全息图, 进行相干叠加后构成最终的单个加密全息图。解密时, 轨道角动量复合选择全息图被加载到空间光调制器上, 用包含特定拓扑荷数的涡旋光束照射, 并经过傅里叶变换获得多个解密信息。该加密系统具有极高的加密灵活性和极大的加密容量, 不仅可以在同一拓扑荷下, 设计不同的频移因子来并行加密一组多个图像信息, 还可以利用不同拓扑荷对多组图像信息进行加密。该方法将涡旋光束的模式设定为一个新的光学密钥, 极大地提高了光学加密系统的安全性。此外, 该光学加密方法中, 待加密图像信息的尺寸不受空间光调制器的像元数量限制, 极大地提高了光学实现信息加密的可行性和有效性。仿真实验结果表明该方法具有较高的安全性、抗噪性和抗剪切能力。

关键词: 光学信息加密; 轨道角动量; 全息; 频移

中图分类号: O438.1; TP391 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA20230313

0 引言

涡旋光束是一种具有独特波前结构的光束。涡旋光束携带的轨道角动量 (Orbital Angular Momentum, OAM) 与光的振幅、相位、偏振和波长等参量相互独立, 并且模式不同的 OAM 之间具有正交性, 故可以无限叠加^[1]。因此, 轨道角动量在光学加密^[2]、光学通信^[3-7]、全息成像^[8]、光操纵^[9]、超分辨成像^[10-12]、高精度测量^[13-15]等领域具备巨大的应用潜力, 而将

OAM 应用于图像加密领域有望为高安全、超大容量加密系统的研究开辟出一条道路。

虽然 OAM 是一个独立的光学参量, 但由于布拉格衍射公式中缺乏拓扑荷数的选择性, 使得传统的数字全息图并不能显示 OAM 的选择性, 即全息图在 OAM 光束照明的情况下, 所有的 OAM 模式都以相同的方式衍射, 这就限制了以 OAM 作为密钥的光学加密系统的发展。为了解决这个问题, 2019 年 12 月,

收稿日期: 2023-05-21; 修订日期: 2023-06-20

基金项目: 国家自然科学基金项目 (11904073, 61875093); 河北省高等学校科学技术研究项目 (BJ2020028); 邯郸市科学技术研究与发展计划项目 (19422031008-3); 山西省科技创新项目 (2019L0877, 2022L476); 来晋科研专项项目 (QZX-2018012); 运城学院博士科研启动项目 (YQ-2017015); 山西省研究生教育教学改革课题 (2022YJJG263); 运城市科技计划项目 (YCKJ-202268); 运城学院学科建设项目

作者简介: 郑伟, 男, 讲师, 博士, 主要从事光学信息处理和太赫兹功能器件方面的研究。

通讯作者: 席思星, 男, 副教授, 博士, 主要从事光场调控和光学信息安全方面的研究。

王晓雷, 男, 教授, 博士, 主要从事光场调控和太赫兹技术方面的研究。

Fang 等人^[16]提出一种保留 OAM 选择特性全息图的获取方法。该方法通过编码一个 OAM 特有的采样阵列将 OAM 特性保存到全息图像上。2020 年 1 月, Ren 等人^[17-20]在此基础上提出了一种基于超表面编码的轨道角动量加密全息成像方法,该方法通过使用超高维 OAM 复用的大尺度复振幅超表面演示了多达 200 个正交图像通道的无透镜重建和全息视频显示,该方法验证了 OAM 大容量加密系统的可行性。为了提高系统的安全性,同年 5 月, Zhou 等人^[21]提出了偏振加密轨道角动量多路复用超表面全息术。该方法使用双折射超表面并通过轨道角动量复用和不同偏振通道进行全息加密,只有利用正确的拓扑荷和特定的偏振态才能重建 OAM 选择全息图的信息。2021 年,该课题组^[22]又提出了高维轨道角动量复用非线性全息术,成功地解决了非线性光学系统中非线性谐波场与输入场耦合的问题。

为了进一步提高轨道角动量加密系统的容量和突破空间光调制器的像元数量限制,文中提出了一种基于轨道角动量全息术和频移的大容量光学信息加密新方法。该方法在利用不同拓扑荷进行加密的基础上,结合频域复用技术实现了在不同拓扑荷下对多组不同信息的加密。多组待加密图像信息经过空间频率采样、随机相位调制、傅里叶变换和频移相位调制后相干叠加得到多个轨道角动量保存全息图,再将不同拓扑荷的螺旋相位编码到这些轨道角动量保存全息图上,从而得到多个轨道角动量选择全息图,将多个不同拓扑荷对应的轨道角动量选择全息图相干叠加构成一幅轨道角动量复用选择全息图。多个解密信息只有在拓扑荷全部正确时才能通过解密系统获取。该系统将多个信息加密成单幅图像,并设置轨道角动量的拓扑荷为密钥,极大地提高了光学信息加密系统的安全性和加密容量。但由于实验设备的影响,轨道角动量所能提供的容量是有限的,因此结合频域复用技术能够极大地提升加密系统的容量。通过仿真实验验证了该大容量光学信息加密方案的有效性和可行性。实验结果表明该方法具有很高的安全性、抗噪性和抗剪切能力。此外,该方法在一定程度上可以突破 SLM 像元数量的限制,实现对超越 SLM 像元数量的大尺寸图像信息的加密。

1 光学加密过程

1.1 加密原理

该加密方法可以对多幅不同尺寸和类型的图像信息实现并行加密。为了验证该方法对多幅图像信息的加密性能,文中选取的八幅待加密图像信息如图 1 所示,分别为 512×512 个像素的“蛙”和“熊猫”, 512×256 个像素的“树”和“棋盘”, 256×512 个像素的“optics”和“光”, 256×256 个像素的“像”字和“花”,将八幅图像信息分为左右两组进行加密实验。



图 1 原始图像信息

Fig.1 Original image information

首先,对原始图像信息进行采样,得到对应的采样图像信息。其中,采样阵列的采样常数 d 由不同拓扑荷数的螺旋相位板的的空间频率来确定。在圆柱坐标下,螺旋相位板的分布可以表示为:

$$\psi(r, \theta) = \text{circ}\left(\frac{r}{R}\right) \exp(im\theta) \quad (1)$$

式中: R 为螺旋相位板的半径; r 和 θ 分别为极坐标系中的半径和方位角。螺旋相位板的空间频谱的振幅模量为:

$$|E(\rho, \varphi)| = \left| \text{FT}\{\psi(r, \theta)\} \right| = \left| \frac{(-1)^{m+1}k}{f} \exp(im\varphi) \int_0^R r J_m\left(\frac{k}{f}r\rho\right) dr \right| \quad (2)$$

式中: $k = 2\pi/\lambda$ 和 f 分别为入射光的波数和傅里叶透镜的焦距; FT 表示傅里叶变换; ρ 和 φ 分别为全息图平面上的半径和方位角; J_m 表示第一类贝塞尔函数。由于振幅模量具有径向对称性,当方位角为零时,其分布为:

$$|E(\rho, 0)| = \left| \frac{(-1)^{m+1}k}{f} \int_0^R r J_m\left(\frac{k}{f}r\rho\right) dr \right| \quad (3)$$

故在近轴极限下,不同拓扑荷数的螺旋相位板的的空间频率可以用基于傅里叶变换的圆环状强度分布来表示,如图 2 所示。其中,采样常数 d 与不同拓扑荷下螺旋相位板的的空间频率相对应^[16],其被定义为最

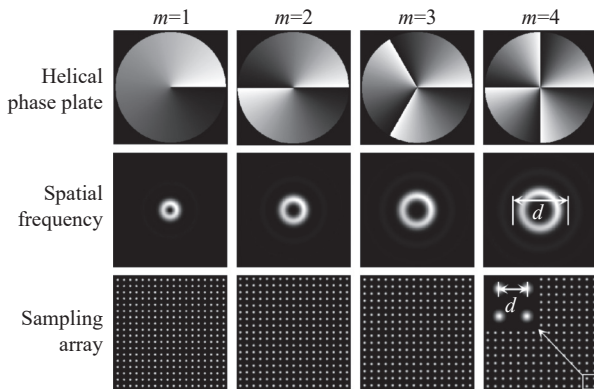


图 2 螺旋相位板空间频率及采样阵列的示意图

Fig.2 Schematic diagram of spatial frequency and sampling array of spiral phase plates

大振幅模量 30% 时所对应的像素宽度。在计算过程中, 激光的波长为 λ , SLM 的单个像素尺寸为 h 。因此通过以下公式计算得到全息图的最大数值孔径:

$$\sin\theta = \frac{\lambda}{2h} \quad (4)$$

为了将全息图所携带的全部信息进行光学传输, 可计算重建全息图像的傅里叶透镜的最小的数值孔径取值, 然后通过计算最大模振幅的 30% 所对应的像素宽度就可以得出采样常数 d 的取值。拓扑荷 $m = 1, 2, 3, 4$ 时采样常数 d 大小如图 3 所示。

然后, 利用傅里叶变换的频移特性将 8 个采样图像信息合成为两幅保留全息图, 其获取过程示意图如图 4 所示。采样图像信息分别经过随机相位调制、逆

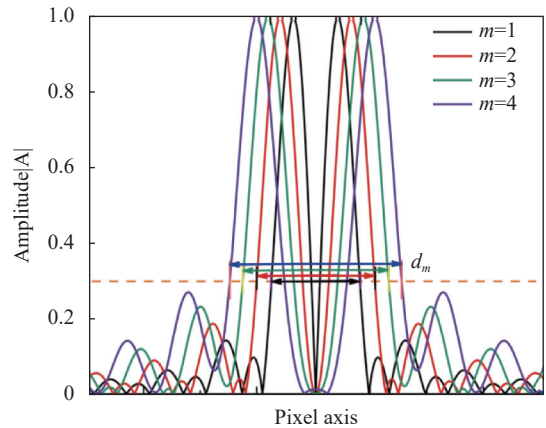


图 3 不同拓扑荷下采样常数的示意图

Fig.3 Sampling constants diagram of under different topological charges

傅里叶变换和频移相位调制后相干叠加构成两个 OAM 保留全息图 $F_1(u, v)$ 和 $F_2(u, v)$ 。

$$g_i(x, y) = f_i(x, y) \exp[i2\pi \times \text{rand}(m_i, n_i)] \quad (5)$$

$$G_i(u, v) = \text{IFT}[g_i(x, y)] \quad (6)$$

$$F_1(u, v) = \sum_{i=1}^4 G_i(u, v) \exp[i2\pi (a_i u + b_i v)] \quad (7)$$

$$F_2(u, v) = \sum_{i=5}^8 G_i(u, v) \exp[i2\pi (a_i u + b_i v)] \quad (8)$$

式中: $f_i(x, y)$ 表示采样图像信息; $\exp[i2\pi \times \text{rand}(m_i, n_i)]$ 为随机相位因子; $\text{IFT}[\cdot]$ 表示逆傅里叶变换; $\exp[i2\pi \cdot (a_i u + b_i v)]$ 为频移相位因子, 其中 (a_i, b_i) 表征各个图像的位移系数, 具体数值与坐标轴选取以及成像平面

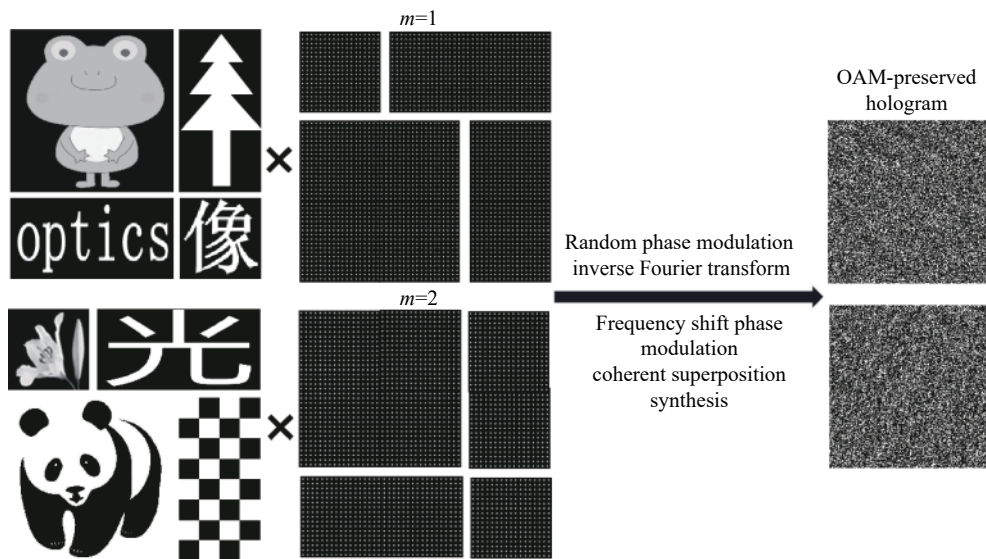


图 4 OAM 保留全息图获取过程的示意图

Fig.4 Schematic diagram of OAM-preserved hologram acquisition process

大小有关。文中,分别为“蛙”(a₁,b₁)=(1/3,1/6),“树”(a₂,b₂)=(1/12,1/6),“optics”(a₃,b₃)=(1/3,-1/3),“像”(a₄,b₄)=(1/12,-1/3),“花”(a₅,b₅)=(-1/12,1/3),“光”(a₆,b₆)=(-1/3,1/3),“熊猫”(a₇,b₇)=(-1/6,-1/6),“棋盘”(a₈,b₈)=(-5/12,-1/6)。

最后,为了在保留全息图中实现 OAM 选择特性,将拓扑荷 m = -1和 m = -2的螺旋相位板分别编码到两个 OAM 保留全息图上,这样就得到了两个 OAM 选择全息图,将其相干叠加构成最终的 OAM 复合选择全息图,即密文图像,该过程如图 5 所示。

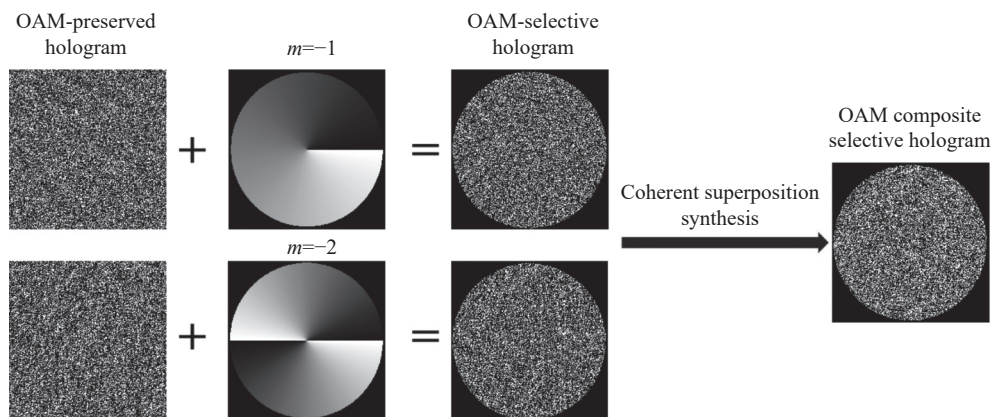


图 5 OAM 复合选择全息图获取过程的示意图

Fig.5 Schematic diagram of OAM composite selective hologram acquisition process

由图 4 和图 5 可知,相比于其他的多图像加密算法,该方法通过两次加密过程可以将多个不同尺寸和类型的待加密图像信息加密为单个全息图,并且密文图像中未显示任何原始信息。该加密系统具有极高的加密灵活性和极大的加密容量,不仅可以在同一拓扑荷下,设计不同的频移因子来加密一组多个图像信息,还可以利用不同拓扑荷对多组图像信息进行同时加密。该方法将 OAM 光束的特定拓扑荷设定为解密密钥,使得加密系统的安全性得到极大的提高。

1.2 密文相关性分析

为了验证加密结果的有效性和鲁棒性,本节对加密结果的相关性进行了分析。图像的相关性可以表征图像相邻位置像素值的相关程度,加密图像相关性越低,加密方法的安全性越高。本节分别对原始图像信息和密文图像信息在水平、垂直和对角 3 个方向上的相关性系数进行了计算,计算结果如表 1 所示。计算公式如下:

$$\text{cov}(x,y) = \frac{1}{N} \times \sum_{i=1}^N [x_i - E(x)][y_i - E(y)] \quad (9)$$

$$CC = \frac{\text{cov}(x,y)}{\sqrt{D(x)D(y)}} \quad (10)$$

由表 1 的计算结果可见,密文图像信息各个方向

上的相关性都很低,文中的加密方法有效地降低了高度相关的原始图像信息的统计特性,能够有效抵抗基于像素相关性的统计攻击,具有较高的安全性。

表 1 原始图像信息和密文图像信息的相关性系数

Tab.1 Correlation coefficient of original image and ciphertext image

Image	Horizontal correlation	Vertical correlation	Diagonal correlation
Frog	0.9977	0.9979	0.9963
Tree	0.9715	0.9711	0.9504
“optics”	0.8661	0.9383	0.8415
“像”	0.9073	0.9106	0.8139
Flower	0.9881	0.9991	0.9977
“光”	0.9884	0.9791	0.9716
Panda	0.9976	0.9909	0.9841
Chessboard	0.9881	0.9861	0.9743
Encrypted text	-0.0013	0.0164	0.0072

1.3 明文敏感性分析

明文敏感性是一种评价加密系统质量的常用指标,明文敏感性越好,加密系统的安全性越好。可以通过计算某一幅明文图像发生微小变化(某一像素值增大 0.1 和某两个像素值交换)时密文图像的像素值改变率(NPCR)和归一化平均变化强度(UACI),以此

来验证文中加密方法的明文敏感性,计算结果如表 2 所示。计算公式如下:

$$NPCR = \frac{\sum_i \sum_j z(i, j)}{M \times N} \quad (11)$$

$$UACI = \frac{1}{M \times N} \left[\sum_i \sum_j |I(i, j) - I'(i, j)| \right] \quad (12)$$

式中: 当 $I(i, j) = I'(i, j)$ 时, $z(i, j) = 0$; 当 $I(i, j) \neq I'(i, j)$ 时, $z(i, j) = 1$ 。

表 2 明文敏感性分析

Tab.2 Plaintext sensitivity analysis

Index change when pixel increases by 0.1		Index changes when two pixels are exchanged	
NPCR	UACI	NPCR	UACI
99.85%	34.75%	99.84%	34.58%

由表 2 可知, 在该加密系统中当某一明文图像信息发生上述两种的微小变化时密文像素值改变率均在 99% 以上, 其归一化平均改变强度均在 30% 以上, 这说明该系统具有较好的明文敏感性。

2 解密过程

多个图像信息的解密可以通过使用特定拓扑荷数的 OAM 光束和解密光路来实现。文中解密光路设置如图 6 所示, 不同拓扑荷数的 OAM 光束由 SLM1 产生, SLM2 上加载复合全息图, 傅里叶透镜将频域中叠加的各个图像按照对应的频移因子进行分离, 最后各个解密图像由 CCD 在焦平面上接收。

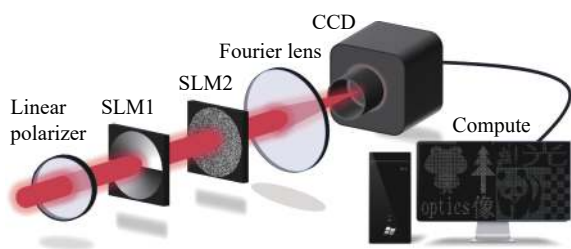


图 6 解密光路示意图

Fig.6 Schematic diagram of the decryption optical path

由于密文全息图存在 OAM 选择性, 因此只有在包含 $m = 1$ 和 $m = 2$ 模式的 OAM 光束照射时才能解密出所有图像信息。通过使用拓扑荷为 $m = 1$ 和 $m = 2$ 的 OAM 光束以及解密光路进行多个图像信息的解密, 其解密结果如图 7 所示。

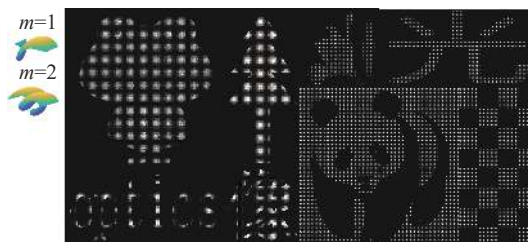


图 7 当 $m = 1, 2$ 的 OAM 光束照射时的解密结果

Fig.7 Decryption result when $m = 1, 2$ OAM beam is irradiated

将解密结果和原始图像进行对比, 采用结构相似性指数 SSIM 和相关性系数 CC 来描述两图像间的相似度, SSIM 和 CC 的计算结果如表 3 所示。结构相似性 (Structural SIMilarity, SSIM), 衡量两张图像的相似度, 通过 SSIM 指标可以衡量样本和预测图像之间的亮度、对比度和结构, SSIM 指标更加关注图像生成的感知面的图像质量。

$$I(x, y) = \frac{2\mu_x\mu_y + c_1}{\mu_x^2 + \mu_y^2 + c_1} \quad (13)$$

$$c(x, y) = \frac{2\sigma_x\sigma_y + c_2}{\sigma_x^2 + \sigma_y^2 + c_2} \quad (14)$$

$$s(x, y) = \frac{\sigma_{xy} + c_3}{\sigma_x\sigma_y + c_3} \quad (15)$$

公式 (13) 表示的是图像亮度的相似程度, 其中 μ_x 以及 μ_y 分别表示图像的 x 和 y 的均值; 公式 (14) 表示的所示图像的对比度相似性, 其中 σ_x 和 σ_y 分别表示的是图像 x 和图像 y 的方差; 而公式 (15) 表示图像的结构相似性, 其中 σ_{xy} 表示图像 x 和图像 y 的协方差, c_1, c_2, c_3 均为常数。将上述的公式联立, 可以得到公式 (16), SSIM 的取值在 0~1 之间, SSIM 的值越大, 说明两种图像更相似。

表 3 原始图像和解密图像的相似性

Tab.3 Similarity of original image and decrypted image

Similarity index	Frog	Tree	“optics”	“像”	Flower	“光”	Panda	Chessboard
SSIM	0.9703	0.9605	0.9645	0.9509	0.9829	0.9757	0.9699	0.9742
CC	0.9943	0.9932	0.9910	0.9924	0.9940	0.9922	0.9954	0.9936

$$SSIM(x,y) = \frac{2(\mu_x\mu_y + c_1)(2\sigma_{xy} + c_2)}{(\mu_x^2 + \mu_y^2 + c_1)(\sigma_x^2 + \sigma_y^2 + c_2)} \quad (16)$$

3 加密系统实验及分析

3.1 密钥有效性分析

设置 3 个对照试验来对密钥的有效性进行验证, 分别是仅使用拓扑荷为 $m = 1$ 的 OAM 光束照射、仅使用拓扑荷为 $m = 2$ 的 OAM 光束照射以及使用拓扑荷不为 $m = 1, 2$ 的 OAM 光束照射, 将实验结果与图 7 进行对比分析来对密钥的有效性进行验证。其结果如下:

当仅使用拓扑荷为 $m = 1$ 的 OAM 光束照射时只能解密出图像“蛙”、“树”、“optics”、“像”, 如图 8 所示; 当仅使用拓扑荷为 $m = 2$ 的 OAM 光束照射时只能解密出图像“花”、“光”、“熊猫”、“棋盘”, 如图 9 所示; 当使用不包含 $m = 1$ 和 $m = 2$ 任一模式的 OAM 光束照射时不能解密出任何图像, 解密结果如图 10 所示。



图 8 当 $m = 1$ 的 OAM 光束照射时的解密结果

Fig.8 Decryption result when $m = 1$ OAM beam is irradiated



图 9 当 $m = 2$ 的 OAM 光束照射时的解密结果

Fig.9 Decryption result when $m = 2$ OAM beam is irradiated



图 10 当 $m \neq 1, 2$ 的 OAM 光束照射时的解密结果

Fig.10 Decryption result when $m \neq 1, 2$ OAM beam is irradiated

由图 7~10 可知, 只有在使用正确的密钥时才可以解密出对应的多个图像, 当密钥错误时, 其无法获取任何原始图像信息。因此, 该加密方法中以拓扑荷数 m 作为密钥具有很好的有效性, 从而使得该加密系统具有很高的安全性。

3.2 抗剪切性与抗噪性能分析

当密文图像受到不同面积的剪切后使用正确密钥进行解密, 通过解密结果质量的优劣来对该加密系统的抗剪切性进行分析。从密文图像的边缘进行圆环剪切, 图 11 为解密图像信息与原始信息的平均结构相似性指数 SSIM 随密文丢失像素面积比 $S\%$ 变化的关系曲线图, 并分别给出了密文丢失像素面积比为 40%、55% 和 70% 时的解密结果。

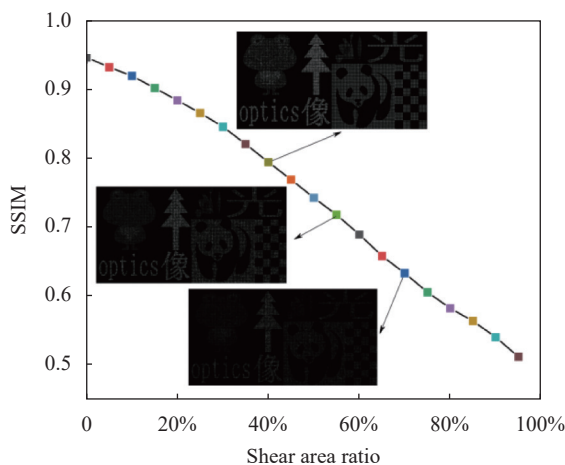


图 11 抗剪切性分析结果

Fig.11 Shear resistance simulation results

由图 11 可以看出, 在该加密方法中, 当密文丢失像素面积比小于 50% 时, 其仍可以通过正确的密钥和解密光路解密出多个尺寸和类型不同的图像, 说明该系统具有较好的抗剪切攻击能力。其中由于二值图的像素值较为简单, 其抗剪切能力较灰度图像更强。

通过对密文图像添加不同密度的椒盐噪声并使用正确密钥进行解密, 观察分析解密结果质量来对该加密系统的抗噪性进行验证。图 12 为解密图像与原始图像的平均结构相似性指数 SSIM 随密文图像中加入的椒盐噪声密度变化的关系曲线, 并分别给出了添加椒盐噪声密度为 10%、30% 和 50% 时的解密结果。

由图 12 可以看出, 在该加密方法中, 当密文图像加入椒盐噪声的密度小于 30% 时, 其可以通过正确

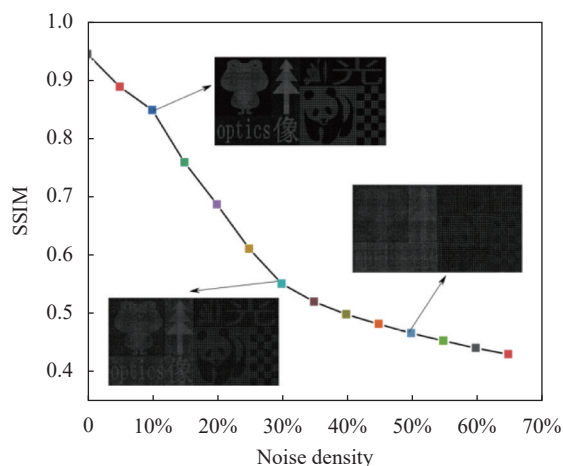


图 12 抗噪性分析结果

Fig.12 Noise immunity simulation results

的密钥和解密光路解密出多个质量较好的图像,说明该系统具有较好的抗噪攻击能力。其中由于二值图的像素值较为简单,其抗噪能力略强于灰度图像。同时,对该系统进行了多种暴力攻击测试,如:滤波攻击、高斯噪声攻击等均进行了攻击测试,结果表明该系统对于抵抗这些暴力攻击均有着不错的表现。

4 结 论

为改善加密系统容量,文中提出了一种基于轨道角动量全息和频移的大容量光学信息加密方法。多个待加密图像信息经过两次加密调制后构成一幅光学全息图,解密时由特定拓扑荷数的涡旋光束通过解密系统获取多个解密图像信息。该方法在保留 OAM 不同拓扑荷正交性的基础上,结合傅里叶变换的频移特性实现了在不同拓扑荷下对多组不同图像信息的加密。该系统将多个图像信息加密成单个全息图,并设置轨道角动量的拓扑荷作为密钥,极大地提高了光学图像加密系统的安全性和加密容量。此外,待加密图像信息的尺寸不受空间光调制器的像元数量限制,极大地提高了光学实现信息加密的可行性和有效性。

参考文献:

[1] Fu Shiyao, Huang Lei, Lv Yanlai, et al. Advances on the measurement of orbital angular momentum spectra for laser beams (Invited) [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2021, 50(9): 20210145. (in Chinese)

[2] Xiao Qiang, Ma Qian, Yan Tao, et al. Orbital-angular-

momentum-encrypted holography based on coding information metasurface [J]. *Advanced Optical Materials*, 2021, 9(11): 2002155.

[3] Li Fajing, Ding Hao, Nie Shouping, et al. Multiple-image encryption using phase jump gradient factors -based OAM multiplexing holography [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2023, 160: 107303.

[4] Wang Jian, Yang Jengyuan, Fazal Irfan M, et al. Terabit free-space data transmission employing orbital angular momentum multiplexing [J]. *Nature Photonics*, 2012, 6(7): 488-496.

[5] Bozinovic Nenad, Yue Yang, Ren Yongxiong, et al. Terabit-scale orbital angular momentum mode division multiplexing in fibers [J]. *Science*, 2013, 340(6140): 1545-1548.

[6] Yan Yan, Xie Guodong, Lavery J, et al. High-capacity millimetre-wave communications with orbital angular momentum multiplexing [J]. *Nature Communications*, 2014, 5(1): 4876.

[7] Nan Jiuhan, Han Yiping. Dual-channel multiband vortex optical communication [J]. *Acta Optica Sinica*, 2021, 41(12): 1206001. (in Chinese)

[8] Su Zhikun, Wang Faqiang, Lu Yiqun, et al. Study on quantum cryptography using orbital angular momentum states of photons [J]. *Acta Physica Sinica*, 2018, 57(5): 3016-3021. (in Chinese)

[9] Zhou Hongqiang, Wang Yongtian, Li Xin, et al. A deep learning approach for trustworthy high-fidelity computational holographic orbital angular momentum communication [J]. *Applied Physics Letters*, 2021, 119(4): 044104.

[10] Shi Zijian, Wan Zhensong, Zhan Ziyu, et al. Super-resolution orbital angular momentum holography [J]. *Nature Communications*, 2023, 14(1): 1869.

[11] Xie Xiangsheng, Chen Yongzhu, Yang Ken, et al. Harnessing the point-spread function for high-resolution far-field optical microscopy [J]. *Physical Review Letters*, 2014, 113(26): 263901.

[12] Kozawa Yuichi, Matsunaga Daichi, Sato Shunichi. Superresolution imaging via superoscillation focusing of a radially polarized beam [J]. *Optica*, 2018, 5(2): 86-92.

[13] Lavery Martin P J, Speirits F C, Barnett S M, et al. Detection of a spinning object using light's orbital angular momentum [J]. *Science*, 2013, 341(6145): 537-540.

[14] Kravets V G, Schedin F, Jalil R, et al. Singular phase nano-optics in plasmonic metamaterials for label-free single-molecule detection [J]. *Nature Materials*, 2013, 12(4): 304-309.

[15] Li Ye, Yu Lin, Zhang Yixin. Influence of anisotropic turbulence on the orbital angular momentum modes of Hermite-Gaussian

- vortex beam in the ocean [J]. *Optics Express*, 2017, 25(11): 12203-12215.
- [16] Fang Xinyuan, Ren Haoran, Gu Min. Orbital angular momentum holography for high-security encryption [J]. *Nature Photonics*, 2020, 14(2): 102-108.
- [17] Ahmed Hammad, Kim Hongyoon, Zhang Yuebian, et al. Optical metasurfaces for generating and manipulating optical vortex beams [J]. *Nanophotonics*, 2022, 11(5): 941-956.
- [18] Ren Haoran, Fang Xinyuan, Jang Jaehyuck, et al. Complex-amplitude metasurface-based orbital angular momentum holography in momentum space [J]. *Nature Nanotechnology*, 2020, 15(11): 948-955.
- [19] Ren Haoran, Fang Xinyuan, Jang Jaehyuck, et al. 3D-printed complex-amplitude metasurface for orbital angular momentum holography[C]//Meta 2021, 2021: 1-2.
- [20] Ren Haoran, Maier Stefan A. Complex amplitude metasurfaces for orbital angular momentum multiplexing holography[C]//2020 Conference on Lasers and Electro-Optics Pacific Rim (CLEO-PR), Sydney, NSW, Australia, 2020: 1-2.
- [21] Zhou Hongqiang, Sain Basudeb, Wang Yongtian, et al. Polarization-encrypted orbital angular momentum multiplexed metasurface holography [J]. *ACS Nano*, 2020, 14(5): 5553-5559.
- [22] Fang Xinyuan, Yang Haocheng, Yao Wenzhe, et al. High-dimensional orbital angular momentum multiplexing nonlinear holography [J]. *Advanced Photonics*, 2021, 3(1): 015001.

High capacity optical information encryption technology based on OAM holography and frequency shift

Zheng Wei¹, Zhang Di², Yuan Hao², Yu Nana², Xi Sixing^{2*}, Wang Guilin¹,
Ma Shuai³, Wang Xiaolei^{4*}, Lang Liying⁵

(1. Department of Physics and Electronic Engineering, Yuncheng University, Yuncheng 044000, China;

2. School of Mathematics and Physics, Hebei University of Engineering, Handan 056038, China;

3. Lenovo (Beijing) Information Technology Ltd, Beijing 100095, China;

4. Institute of Modern Optics Nankai University, Tianjin 300350, China;

5. Center for Advanced Laser Technology, Hebei University of Technology, Tianjin 300401, China)

Abstract:

Objective In order to improve the capacity and security of the optical encryption system, a new method based on OAM holography and frequency shift is proposed.

Methods Since the orbital angular momentum eigenstates mathematically constitute a complete set of orthogonal basis vectors, the orbital angular momentum can be used to realize the encoding of multiple image information. This approach achieves parallel encryption of multiple images information using Fourier transform frequency-shift and OAM holography techniques, which eliminates the crosstalk between multiple image information. Firstly, several original images information are sampled, and the sampling constants is determined by the spatial frequency of the helical phase with different helical mode indexes, which is defined as the pixel width corresponding to 30% of the maximum amplitude modulus (Fig.3). Through this process, we obtained multiple different sampled images. The orbital angular momentum-preserving holograms are then generated by the coherent superposition of multiple sampled image information modulated by random phase, Fourier transform and frequency shift phase (Fig.4). Finally, the helical phases of different helical mode indexes are encoded into two orbital angular momentum preserving holograms, and two OAM selective holograms are obtained, they are superposed coherently to form the final OAM composite selected hologram (Fig.5). In decrypted process, the orbital angular momentum compound choice hologram is loaded onto the spatial light modulator, which is illuminated by a vortex beam containing a specific helical mode index and passes through a Fourier lens, a

receiving device on the rear focal plane of the lens can receive a plurality of decrypted images (Fig.6).

Results and Discussions Compared with other multi-image encryption algorithms, the proposed method can encrypt multiple image information of different sizes and types into a single hologram through two encryption processes, and no original information is displayed in the ciphertext image. The correlation of ciphertext image information in all directions is very low, which effectively reduces the statistical characteristics of highly correlated original image information, and can effectively resist statistical attacks based on pixel correlation, with high security (Tab.1, Tab.2). This encryption system has high encryption flexibility and great capacity. It can not only design different frequency shift factors to encrypt a group of multiple images information in parallel under the same helical mode index, but also has the advantages of high encryption flexibility and high encryption capacity, several groups of image information can also be encrypted by using different helical mode index.

Conclusions In this method, the infinite OAM mode of the vortex beam are set as a new optical key, which greatly improves the security of the encryption system. In addition, due to the frequency-shift phase modulation, the size of the image to be encrypted is not limited by the number of pixels in the Spatial light modulator, which greatly improves the feasibility and effectiveness of optical realization of information encryption. The simulation results show that the proposed method has high safety, anti-noise and anti-shear capability (Fig.11, Fig.12).

Key words: optical information encryption; OAM; holography; frequency shift

Funding projects: Natural Science Foundation of China (11904073, 61875093); Science and Technology Project of Hebei Education Department (BJ2020028); Handan Science and Technology Research and Development Program (19422031008-3); Shanxi Provincial Science and Technology Innovation Project (2019L0877, 2022L476); Research Special Project of Shanxi (QZX-2018012); The doctoral research initiation project of Yuncheng College (YQ-2017015); Shanxi Province Graduate Education and Teaching Reform Project (2022YJJG263); Yuncheng Science and Technology Plan Project (YCKJ-202268); Discipline Construction Project of Yuncheng College