

基于光学亮环晶格的空间光编码通信

贺超^{1*}, 叶卉², 陈田¹, 程鹏雨³

¹中国电子科技集团公司第三十八研究所, 安徽 合肥 230093;

²中国科学技术大学附属第一医院, 安徽 合肥 230036;

³上海大学通信与信息工程学院, 上海 200444

摘要 提出一种基于光学亮环晶格进行空间光信息编码通信的方法。基于面向目标的计算全息术,生成 4 种简单模式的光学亮环晶格对应的计算全息图,并将其加载在反射式空间光调制器(SLM)上,SLM 调制入射光,直接重建 4 种简单模式的光学亮环晶格。4 种光学亮环晶格模式对应 4 个不同的四进制数,易于识别,通过光学亮环晶格模式的组合完成一幅 32 pixel×56 pixel 的 256 阶灰度图的编码与空间传输。距离发射端 2 m 处的电荷耦合器件(CCD)接收光学亮环晶格图像并通过计算机对数据进行解码,可以在部分干扰情况下,无差错地恢复原始图像信息。在此基础上,实验拓展单个光学亮环晶格至 2×2 和 4×4 阵列,传输效率和系统容量提升了 4 倍和 16 倍。本研究成果为光学亮环晶格的编码通信研究提供了理论和实验依据。

关键词 光通信; 光学涡旋; 拓扑电荷数; 光学亮环晶格; 计算全息图; 编码

中图分类号 O436

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202040.1106002

Space Optical Encoding Communication Based on Optical Bright-Ring Lattice

He Chao^{1*}, Ye Hui², Chen Tian¹, Cheng Pengyu³

¹The Thirty Eighth Institute, China Electronics Technology Group Corporation, Hefei, Anhui 230093, China;

²The First Affiliated Hospital, University of Science and Technology of China, Hefei, Anhui 230036, China;

³School of Communication and Information Engineering, Shanghai University, Shanghai 200444, China

Abstract This study proposes a method for space optical information encoding communication based on optical bright-ring lattices. Based on an objected-oriented computer-generated holography method, a computer-generated hologram of four simple-mode optical bright-ring lattices is generated and loaded into a reflection-type spatial light modulator (SLM), which modulates the incident light and experimentally reconstructs the aforementioned four simple-mode optical bright-ring lattices. The four optical bright-ring lattice modes correspond to four different quaternary numbers and can be easily identified. By employing the proposed system, a 32 pixel×56 pixel image with a 256 grayscale is encoded and transmitted in space through optical bright-ring lattice mode combination. A charge-coupled device (CCD) at a distance of 2 m from the transmitting terminal is used to capture the optical bright-ring lattice images, which can be easily decoded with no errors in the computer even with partial interference. On this basis, a single optical bright-ring lattice is extended to 2×2 and 4×4 arrays, which can increase the transfer efficiency and system capacity by 4 and 16 times, respectively. Results provide some theoretical and experimental foundations for researches on encoding and communication of optical bright-ring lattices.

Key words optical communication; optical vortices; topological charge number; optical bright-ring lattice; computer generated hologram; encoding

OCIS codes 060.4510; 260.6042; 200.2605; 090.1760

1 引 言

涡旋光束是一类具有特殊螺旋形相位波前的光

束^[1-3],其复振幅中携有相位因子 $\exp(il\theta)$, l 为拓扑电荷数, θ 为柱坐标系统参数。该类光束各光子均携有轨道角动量^[4],因此涡旋光束可用于驱动微观

收稿日期: 2020-02-01; 修回日期: 2020-03-07; 录用日期: 2020-03-16

基金项目: 国家自然科学基金(61475098)

* E-mail: che891101@163.com

粒子旋转与平移,常被用作光学镊子或光学扳手,实现微观领域的粒子捕获与囚禁^[5-7],此外,利用涡旋光束携带的拓扑电荷信息可实现容量的光信息编码与传输^[8]。涡旋光束有多种产生方法,利用 Dove 旋转棱镜^[9]、全息光栅^[10]、模式转换^[11]、螺旋相位板(SSP)^[12]及空间光调制器(SLM)^[13-14]均可实现。目前,SLM 常用来产生涡旋光束,其实时、灵活、易操作等特点为涡旋光束的理论研究与实际应用提供了较多的便利。

单一拓扑信息的涡旋光束在物理光学领域已经得到较为深入的研究,复合涡旋光束也逐渐成为该领域新的研究热点。利用涡旋光束共轴叠加,可以产生携带复杂拓扑信息且具有特殊光强相位分布、传输特性与新应用方向的复合态涡旋光束,如 bottle 光束^[15]、双涡旋光束^[16-17]、光环晶格等。其中,光环晶格以特殊的旋转与自修复特性、失谐条件下对冷原子的捕获与操控能力,得到了较为广泛的关注。自 Franke-Arnold 等^[18]提出利用共轴叠加拉盖尔高斯(LG)涡旋光束的方法产生光环晶格以捕获超冷原子后,光环晶格的光分布特征、空间传输特性、原子操控等方面均有丰富的研究成果。Baumann 等^[19]发现在空间传输过程中,古伊相位可使光环晶格围绕光束中心旋转。Vaity 等^[20]研究了横向能流分布引起的光环晶格自修复。Litvin 等^[21]报道了光学亮环晶格的角自重建特性,并推导了自重建距离。Houston 等^[22]提出了一种可再生动态光学暗环晶格的方法,并将该方法用于捕获蓝失谐条件下的超冷原子。He 等^[23]利用 SLM 产生的光学亮环晶格完成了对单个 Rb 原子的捕获。上述对于光环晶格的研究主要涉及光环晶格的产生、空间传输特性及失谐条件下超冷原子操控的应用,而对于光环晶格在空间光信息编码通信领域的应用鲜有报道。

本文提出一种利用光学亮环晶格对空间光信息进行编码通信的方法。基于面向目标的共轭对称延拓 Fourier 计算全息方法^[24]生成 4 种简单模式的光学亮环晶格的计算全息图(CGH),利用加载 CGH 的 SLM 调制入射光,动态重建 4 种不同模式的光学亮环晶格,用于实现空间光编码通信。基于光学亮环晶格,完成一幅尺寸为 32 pixel × 56 pixel 的 256 阶灰度图像的编码与空间传输,在接收端利用电荷耦合器件(CCD)完成光学信息采集,并进行数据解码,可以在弱干扰情况下无差错地恢复原始图像信息。在上述研究基础上,使用 2 × 2 和 4 × 4 光

学亮环晶格阵列进行光信息编码通信,系统容量与传输效率分别提升了 4 倍和 16 倍。所提方法采用的编解码方案复杂度低、实现简单、扩展性强,具有一定的抗干扰性,该成果为光学亮环晶格的编码通信研究提供了一定的理论与实验依据。

2 理论分析

2.1 光学亮环晶格的产生

LG 涡旋光束($L_{LG,p}^l$)是一种较为典型的涡旋光束,其径向光束分布中含有 p 个节点。本研究采用单环模式的涡旋光束($p=0$),则携带拓扑电荷数 l 的 LG 涡旋光束的复振幅为

$$L_{LG0}^l(r, \theta, z) = \frac{1}{w(z)} \cdot \left[\frac{\sqrt{2}r}{w(z)} \right]^{|l|} \cdot \exp\left[\frac{-r^2}{w^2(z)} \right] \cdot \exp(-il\theta) \cdot \exp\left(i \frac{kz - kr^2}{2R} \right) \cdot \exp(i\varphi), \quad (1)$$

式中: r, z 为柱坐标系参数; $w(z)$ 为光斑尺寸; R 为曲率半径; k 为波数; φ 为古伊相位;瑞利长度 $z_R = \frac{\pi w_0^2}{\lambda}$, w_0 为束腰半径, λ 为波长。

将携带相反拓扑电荷数的两束 LG 涡旋光束 L_{LG0}^l 和 L_{LG0}^{-l} ($l \neq 0$) 共轴叠加,可以产生亮花瓣状外围分布的光学亮环晶格,其复振幅 E 、光强 I 及相位分布 ϕ 可描述为

$$\begin{cases} E_0^{l,-l} = L_{LG0}^l + L_{LG0}^{-l} \\ I = E_0^{l,-l} \times E_0^{l,-l*} \\ \phi = \arctan E_0^{l,-l} \end{cases}, \quad (2)$$

式中: $*$ 表示取复共轭。

图 1 为 L_{LG0}^3 和 L_{LG0}^{-3} 共轴叠加形成的光学亮环晶格复振幅 $E_0^{3,-3}$ 对应的光强与相位分布。观察可知,光束中心光强为 0,外围分布着 6 个亮花瓣状光斑,光斑围绕光束中心呈环形对称分布;亮环晶格的相位分布只包含 0 和 2π 两种等相位值,围绕光束中心,在 6 块区域交错分布。

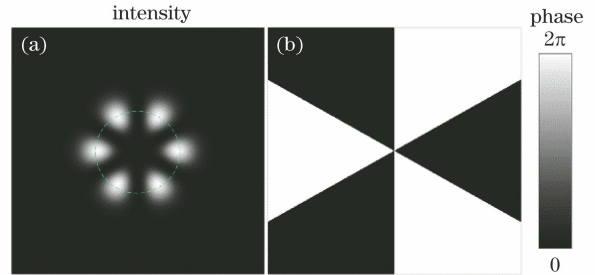


图 1 光学亮环晶格 $E_0^{3,-3}$ 的光强与相位分布
Fig. 1 Intensity and phase distributions of optical bright-ring lattice $E_0^{3,-3}$

2.2 共轭对称延拓 Fourier 计算全息

为产生光学亮环晶格的 CGH,采用共轭对称延拓 Fourier 计算全息。利用基于共轭对称复函数的傅里叶变换(FT)是实函数这一特性,将物光波共轭对称延拓后作 FT,再进行适当的编码,可生成全息图。其原理简述如下。

一物光波复振幅 $f_0(m, n)$ 由幅度和相位两部

分组成,即

$$f_0(m, n) = A(m, n)\exp[i\varphi(m, n)],$$

$$m = 1, 2, \dots, M/2 - 1, n = 1, 2, \dots, N - 1, \quad (3)$$

式中: m, n 分别为列数、行数; $A(m, n)$ 为幅度信息; M 为总列数, N 为总行数。

对上述物光波进行共轭对称延拓可得复振幅分布,即

$$f(m, n) = \begin{cases} f_0(m, n), & m = 1, 2, \dots, M/2 - 1, n = 1, 2, \dots, N - 1 \\ f_0^*(M - m, N - n), & m = M/2 + 1, \dots, M - 1, n = 1, 2, \dots, N - 1. \\ 0, & m = 0 \text{ or } n = 0 \text{ or } m = M/2 \end{cases} \quad (4)$$

令列数 M 和行数 N 均为偶数,并使 $f(0, n) = f(m, 0) = f(M/2, n) = 0$, 对称中心位置为 $(M/2, N/2)$, 则 $f(m, n)$ 的离散 FT 为

$$F(\mu, \nu) = \frac{1}{MN} \sum_{m=0}^{M-1} \sum_{n=0}^{N-1} f(m, n) \times \exp\left[-i2\pi\left(\frac{m\mu}{M} + \frac{n\nu}{N}\right)\right],$$

$$\mu = 0, 1, \dots, M - 1, \quad \nu = 0, 1, \dots, N - 1, \quad (5)$$

式中: μ 和 ν 分别为水平和垂直方向的频域样本序号。将(3)、(4)式代入(5)式中,整理化简可得

$$F(\mu, \nu) = \frac{2}{MN} \sum_{m=1}^{(M/2)-1} \sum_{n=1}^{N-1} \left\{ A(m, n) \cos\left[2\pi\left(\frac{m\mu}{M} + \frac{n\nu}{N}\right) - \varphi(m, n)\right] \right\}. \quad (6)$$

从(6)式可以看出,物光波复振幅 $f_0(m, n)$ 经过共轭对称延拓和 FT 后,得到包含了物光波的幅度信息 $A(m, n)$ 和相位信息 $\varphi(m, n)$ 的二维离散实函数 $F(\mu, \nu)$ 。将其映射至灰度值 $0 \sim 255$ 并取整,可编码得到 8 bit 深度的全息图,利用该全息图可以再现原始物光波。

2.3 光学亮环晶格的计算全息图生成及数字重建

基于共轭对称延拓 Fourier 计算全息方法,将光学亮环晶格的复振幅共轭对称延拓后作二维 FT,获得包含光学亮环晶格幅度与相位信息的二维实函数。对该二维实函数进行简单的编码后可获得光学亮环晶格对应的 CGH,用于重建原始光学亮环晶格。

图 2(a)是当 $w_0 = 0.5 \text{ mm}, z = 0 \text{ m}$ 时,光学亮环晶格 $E_0^{3,-3}$ 对应的 CGH,图 2(b)是图 2(a)中心方块区域放大 15 倍后的结果。

对图 2(a)中的 CGH 进行 Fourier 逆变换,可数字重建原始的光学亮环晶格。图 3 是数字重建结果

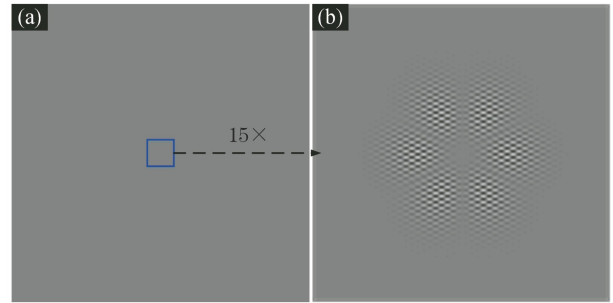


图 2 光学亮环晶格 $E_0^{3,-3}$ 的 CGH。

(a)原始 CGH;(b)中心区域 15 倍放大

Fig. 2 CGH of optical bright-ring lattice $E_0^{3,-3}$.

(a) Original CGH; (b) 15 times magnification of central area

对应的光强与相位分布,可以看出,数字重建结果与图 1 中原始光学亮环晶格基本保持一致,相位分布外围(虚线圆圈外)的不规则分布为光学亮环晶格零强度区域数值计算(零值的傅里叶逆变换)过程中产生的随机相位噪声,其对光学亮环晶格的质量与特性无影响。

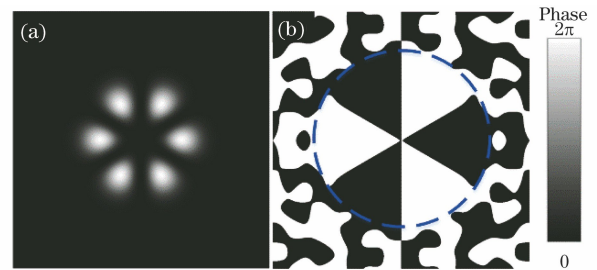


图 3 光学亮环晶格 $E_0^{3,-3}$ 的数字重建。

(a) 光强;(b) 相位

Fig. 3 Numerical reconstruction of optical bright-ring lattice $E_0^{3,-3}$. (a) Intensity; (b) phase

2.4 光学亮环晶格的编解码原理

使用 4 种简单的光学亮环晶格模式,分别为 $E_0^{1,-1}, E_0^{2,-2}, E_0^{3,-3}, E_0^{4,-4}$, 通过组合 4 个光学亮环

晶格,可以产生 $4^4=256$ 种组合模式,这与 256 阶灰度图的像素值(0~255)一一对应,因此一幅 256 阶灰度图像可以通过编码成 4 种光学亮环晶格模式的组合来描述。将 4 种光学亮环晶格模式对应为一个单独四进制数的编码结果, $E_0^{1,-1}$ 对应 0, $E_0^{2,-2}$ 对应 1, $E_0^{3,-3}$ 对应 2, $E_0^{4,-4}$ 对应 3,各模式与四进制数对

应的关系如图 4 所示。其中 δ 为光学亮环晶格相邻亮花瓣与光束中心连线之间的夹角, Q 为编码对应的四进制数。

基于上述分析,可以建立起光学亮环晶格模式组合、亮花瓣间夹角组合、四进制数组合、像素值之间的对应关系,如表 1 所示。

Optical bright-ring lattice mode	$E_0^{1,-1}$	$E_0^{2,-2}$	$E_0^{3,-3}$	$E_0^{4,-4}$
Intensity distribution of optical bright-ring lattice				
Connecting lines of beam center and peripheral bright petals				
Included angle of adjacent bright petals	$\delta=\pi$	$\delta=\frac{\pi}{2}$	$\delta=\frac{\pi}{3}$	$\delta=\frac{\pi}{4}$
Quaternary number	$Q=\frac{\pi}{\delta}-1=0$	$Q=\frac{\pi}{\delta}-1=1$	$Q=\frac{\pi}{\delta}-1=2$	$Q=\frac{\pi}{\delta}-1=3$

图 4 光学亮环晶格模式与四进制数的对应关系

Fig. 4 Relationship between optical bright-ring lattice modes and quaternary numbers

表 1 亮环晶格模式组合、亮花瓣间夹角组合、四进制数组合、像素值的对应关系

Table 1 Relationship among optical bright-ring lattice modes, included angles of adjacent bright petals, quaternary numbers, and pixel values

Title	Range
Optical bright-ring lattice mode combination	$(E_0^{1,-1}, E_0^{1,-1}, E_0^{1,-1}, E_0^{1,-1})-(E_0^{4,-4}, E_0^{4,-4}, E_0^{4,-4}, E_0^{4,-4})$
Included angle combination of adjacent bright petals	$(\pi, \pi, \pi, \pi)-\left(\frac{\pi}{4}, \frac{\pi}{4}, \frac{\pi}{4}, \frac{\pi}{4}\right)$
Quaternary number combination	(0000)-(3333)
Pixel value	0-255

以像素值 54 为例进行说明,可用四进制数 (0312),根据图 4 和表 1 中的编码关系,将其编码成 4 种不同的亮环晶格模式组合($E_0^{1,-1}, E_0^{4,-4}, E_0^{2,-2}, E_0^{3,-3}$)。

在光学亮环晶格的解码过程中,分别接收到如

图 5 所示的图像信息。图像信息包含 4 种不同的光学亮环晶格模式,其光强分布不同,同时光束中心与相邻的两个外围亮花瓣之间的夹角也各不相同,通过测量出夹角值,可以完成不同亮环晶格模式的识别与解码。图5(a)~(d)所示的相邻亮花瓣之间的夹

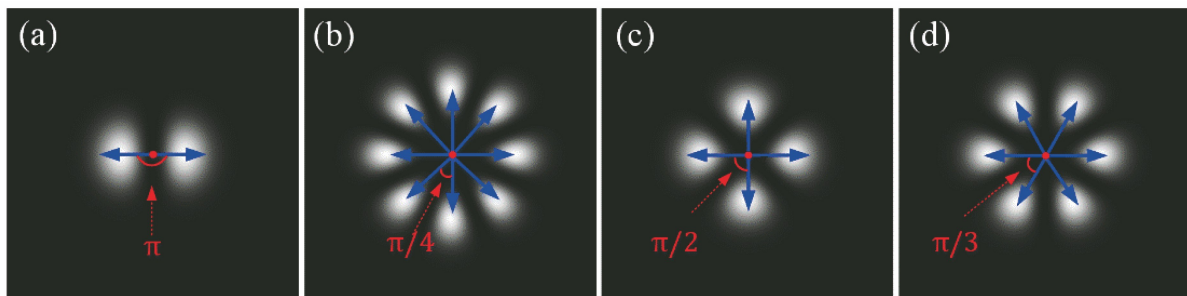


图 5 不同夹角下,光学亮环晶格模式的解码。(a) π ; (b) $\pi/4$; (c) $\pi/2$; (d) $\pi/3$

Fig. 5 Decoding of optical bright-ring lattice modes at different included angles. (a) π ; (b) $\pi/4$; (c) $\pi/2$; (d) $\pi/3$

角测量值分别为 π 、 $\pi/4$ 、 $\pi/2$ 、 $\pi/3$ ，依据图 4 中亮花瓣间夹角与四进制数之间的关系，可分别解析出四进制数 0、3、1、2，识别出的结果与原始四进制数 (0312) 相一致，通过这 4 种组合模式的识别与解码，可得到四进制数 (0312)，继而计算出像素值 54。

此外，利用亮环晶格中相邻亮花瓣之间的夹角值进行解码时有一定的抗干扰性。在空间传输过程中，亮环晶格会面临着各类型的干扰，例如典型的遮

挡干扰，在遮挡干扰发生后，接收端只能接收到部分信息，在最为严重的情况下，光束在传播过程中被完全遮挡，接收端无法接收到任何信息。图 6 为在几种非完全遮挡干扰的情况下，利用所提方法进行解码的一组结果，将图 6(a)~(d) 中相邻亮花瓣间的最小夹角测量值 $\pi/2$ 、 $\pi/3$ 、 $\pi/4$ 、 π 作为各自的输入信息来进行解码，可以得到解码结果 1、2、3、0，对应为四进制数 (1230)，像素值为 108。

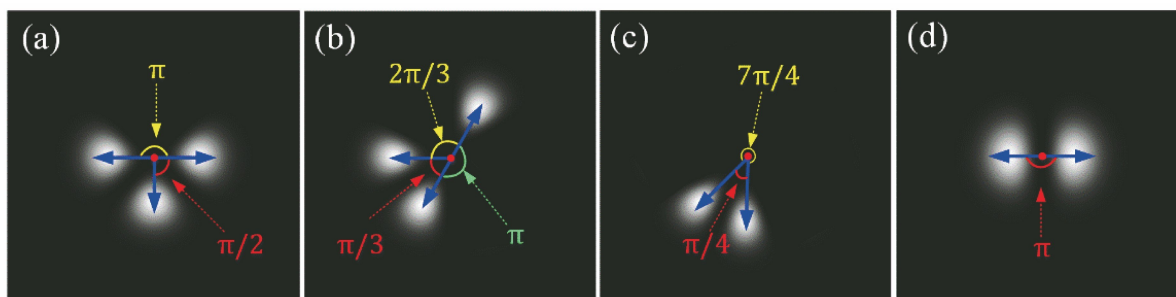


图 6 部分干扰情况下光学亮环晶格模式的解码。(a) $\pi/2$ ；(b) $\pi/3$ ；(c) $\pi/4$ ；(d) π

Fig. 6 Decoding of optical bright-ring lattice modes under partial interference. (a) $\pi/2$ ；(b) $\pi/3$ ；(c) $\pi/4$ ；(d) π

3 实验原理图与结果分析

3.1 实验原理图

实验原理如图 7 所示。实验光源采用固体激光器 ($\lambda = 532 \text{ nm}$)，光源发射出的激光束的功率经渐变密度衰减片 (GDF) 衰减到 0.5 mW ，并经过 20 倍的光束扩展器 (BE) 扩束后转为准平面光；光波经过一定距离的传播到达反射式 SLM，加载亮环晶格 CGH 的 SLM 实时调制入射光，可重建光学亮环晶格，并通过光阑 A 筛选出来；离 SLM 2 m 的 CCD 相机实时拍摄实验产生的光学亮环晶格，结果保存在计算机 PC2 中，之后对 PC2 中存储的光学亮环晶格图像进行数字处理和分析，利用理论分析中的方法可以完成相应的信息解码。

3.2 实验结果分析

实验传输一幅尺寸为 $32 \text{ pixel} \times 56 \text{ pixel}$ 的 256 阶灰度的小狗图像，将 1792 个像素值转换成 (0000)~(3333) 的四进制数组合，每个组合包含 4 个四进制数，对应 4 个光学亮环晶格和 4 幅 CGH，因此小狗图像共对应 7168 幅 CGH，将所有 CGH 按照组合顺序进行编号。通过不断刷新加载在 SLM 上的 7168 幅顺序排列的 CGH，利用 CCD 记录光学亮环晶格的图像，对图像进行识别并解码，可以得到亮环晶格对应的四进制数，完成所有光学亮环晶格的图像解码，从而完整地得到 7168 个四进制数、1792 个像素值，恢复出系统传输的小狗

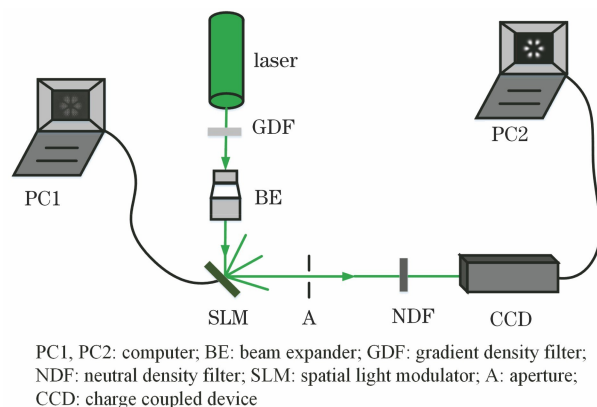


图 7 实验原理图

Fig. 7 Schematic of experimental principle

图像。

图 8(a)~(d) 为接收端 CCD 连续拍摄的 4 幅光学亮环晶格图像的组合，相邻亮花瓣之间的夹角测量值分别约为 π 、 $\pi/4$ 、 $\pi/2$ 、 $\pi/3$ ，可分别解码出四进制数 0、3、1、2，则该图像组合对应的四进制数组合为 (0312)，对应的像素值为 54。

图 8(e)~(h) 为亮环晶格在空间传输过程中被部分遮挡情况下接收端 CCD 拍摄的图像，利用图 4 中编解码对应的关系进行解码，选取相邻亮花瓣间的最小夹角 $\pi/2$ 、 $\pi/3$ 、 $\pi/4$ 、 π 作为各自的输入信息来进行解码，可以正确得到与图 6 对应的解码结果 (1、2、3、0)，对应的四进制数为 (1230)，像素值为 108。

小狗图像的传送流程如图 9 所示。为完成 $32 \text{ pixel} \times 56 \text{ pixel}$ 的小狗图像传输，在发送端采用

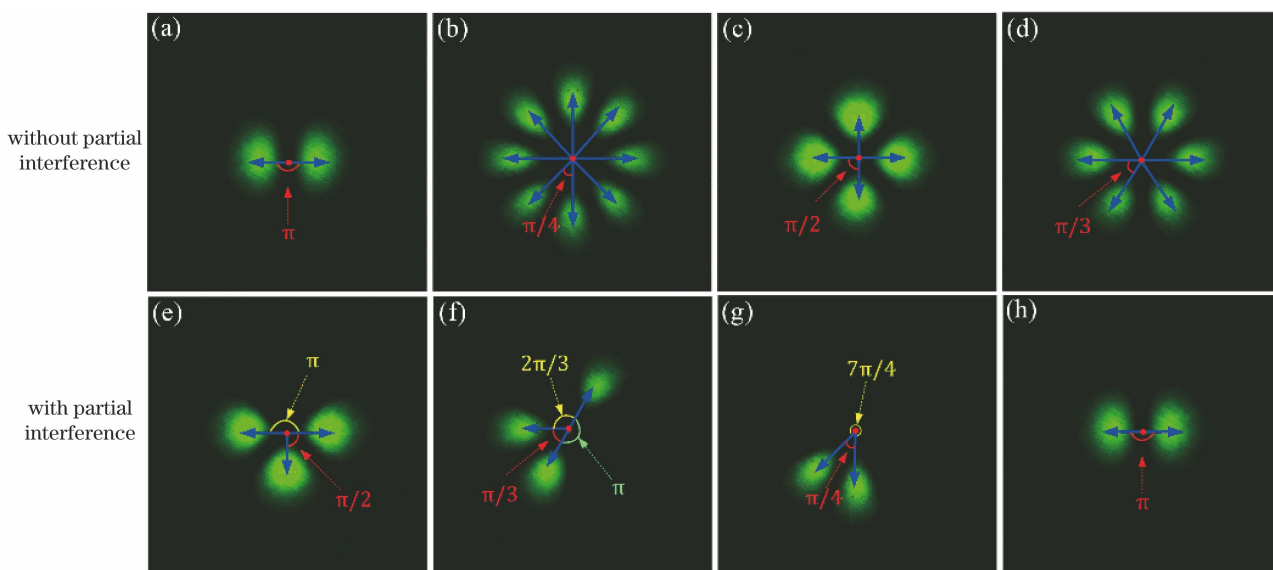


图 8 实验产生的光学亮环晶格模式的解码。(a) π ; (b) $\pi/4$; (c) $\pi/2$; (d) $\pi/3$; (e) $\pi/2$; (f) $\pi/3$; (g) $\pi/4$; (h) π
 Fig. 8 Decoding of experimentally generated optical bright-ring lattice modes. (a) π ; (b) $\pi/4$;
 (c) $\pi/2$; (d) $\pi/3$; (e) $\pi/2$; (f) $\pi/3$; (g) $\pi/4$; (h) π

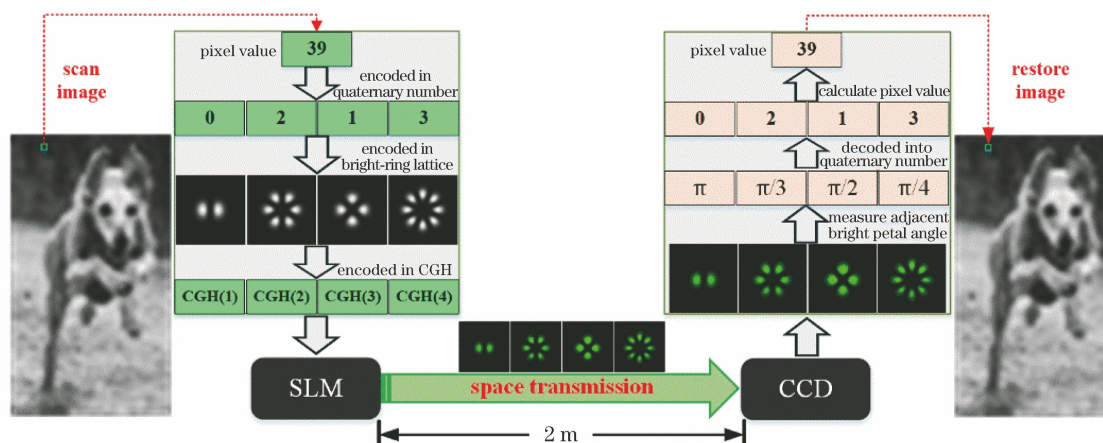


图 9 小狗图像的传输过程

Fig. 9 Transmission process of little dog image

逐行扫描的方法完成所有像素的扫描,将每个像素值编码成四进制数,对应四个光学亮环晶格,再编码生成对应的光学亮环晶格 CGH,小狗图像的 1792 个像素点则对应着 7168 幅按序号顺序排列的 CGH。利用计算机控制的 SLM 不断刷新按序排列的 CGH,调制入射光产生光学亮环晶格并发射,完成小狗图像的发送。接收端利用 CCD 按顺序采集光学亮环晶格,将结果存储到计算机中并进行模式识别和信息解码,还原出发送端图像对应的四进制数序列,继而计算出相应的像素值,完成零误差的小狗图像恢复。

上述实验系统原理简单、易于实现,且具有一定的抗干扰性,实验顺利完成了一幅 $32 \text{ pixel} \times 56 \text{ pixel}$ 的小狗图像传输,传输距离为 2 m,在接收

端实现了小狗图像的无差错解码。

4 光学亮环晶格阵列扩展

基于光学亮环晶格实现了一幅 $32 \text{ pixel} \times 56 \text{ pixel}$ 的小狗图像编码通信。系统虽然复杂度低、实现简单,但实现小狗图像 1792 个像素的空间传输共需要 7168 幅 CGH,数量较多。

系统采用面向目标的共轭对称延拓 Fourier 计算全息法,该方法在产生光环晶格阵列方面具有一定的优势,主要体现为,实验装置简单易实施,仅使用单束激光照射加载光学亮环晶格 CGH 的 SLM,无需分束和多光路的合成,便可以方便灵活地重建出光学亮环晶格阵列,实现了更加高效的基于光学亮环晶格阵列的空间编码通信。

4.1 2×2 光学亮环晶格阵列模式

图 10 为数值计算及 CCD 记录的 2×2 光学亮环晶格阵列, 每个阵列包含 4 个光学亮环晶格, 对应 4 个四进制数, 按照左上, 右上, 左下, 右下的顺序进行编解码。则图 10(a) 对应的四进制数为 (0213), 像素值为 39; 图 10(b) 对应的四进制数为 (1111), 像素值为 85。对图 10(a)、(b) 两个光学亮环晶格阵列

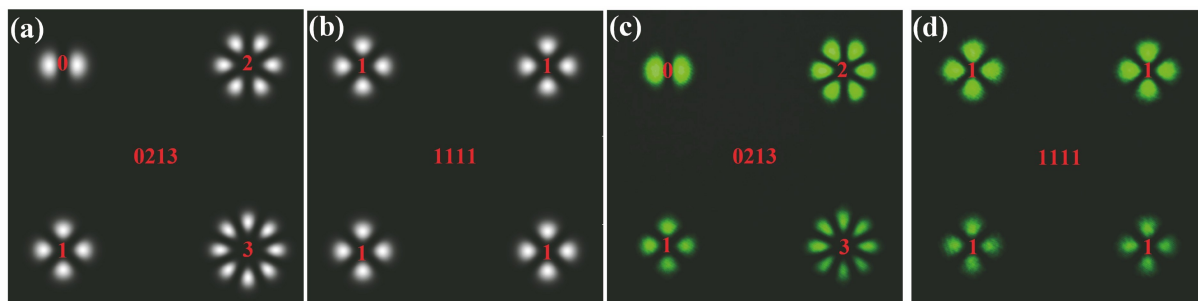


图 10 2×2 光学亮环晶格阵列模式。(a)(b) 数值计算; (c)(d) 实验测量

Fig. 10 2×2 optical bright-ring lattice array modes. (a)(b) Numerical calculation; (c)(d) experimental measurement

利用 2×2 光学亮环晶格阵列进行编码通信, 每个阵列可对应 1 个像素值, 因此要完成 $32 \text{ pixel} \times 56 \text{ pixel}$ 的小狗图像传输, 只需要 1792 次传输, 即 1792 幅 CGH。每幅 CGH 的信息量是原有单个光学亮环晶格对应 CGH 信息量的 4 倍, 系统传输效率和通信系统容量提升了 4 倍。

4.2 4×4 光学亮环晶格阵列模式

进一步扩展阵列数量, 图 11 为数值计算及 CCD 记录的 4×4 光学亮环晶格阵列。该阵列包含 16 个光学亮环晶格, 对应 16 个四进制数, 从水平中心和垂直中心以两条虚线将阵列划分成 4 个分离的

分别进行编码生成 CGH 并依次加载在 SLM 上, CGH 调制入射光波, 依次产生与图 10(a)、(b) 对应的 2×2 光学亮环晶格阵列并发射出去, 经 2 m 距离的空间传输, 在接收端被 CCD 顺序采集并存储。图 10(c)、(d) 是接收端采集到的与图 10(a)、(b) 对应的 2×2 光学亮环晶格阵列, 通过该阵列可以分别解码出像素值 39 和 85。

2×2 光学亮环晶格阵列, 按照左上, 右上, 左下, 右下的顺序分别对 4 个光环晶格阵列进行编解码。图 11(a) 左上、右上、左下、右下区域对应的四进制数分别为 0203、1111、2023、1313, 相应的像素值分别为 35、85、139、119。将图 10(a) 中 4×4 光学亮环晶格阵列编码生成对应的 CGH 加载在 SLM 上, CGH 调制入射光产生 4×4 光学亮环晶格阵列并发射出去, 经 2 m 距离的空间传输, 在接收端被 CCD 顺序采集并存储。图 11(b) 是接收端采集到的与图 11(a) 对应的 4×4 光学亮环晶格阵列, 通过该阵列可以分别解码出像素值 35、85、139、119。

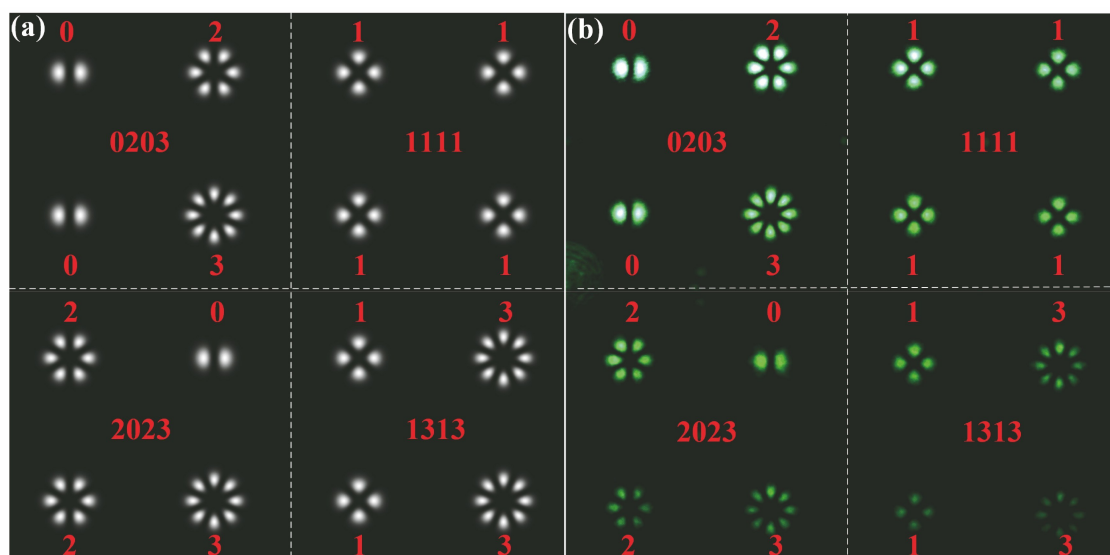


图 11 4×4 光学亮环晶格阵列模式。(a) 数值计算; (b) 实验测量

Fig. 11 4×4 optical bright-ring lattice array modes. (a) Numerical calculation; (b) experimental measurement

利用 4×4 光学亮环晶格阵列进行编码通信, 每个阵列可对应 4 个像素值, 因此要完成 $32 \text{ pixel} \times 56 \text{ pixel}$ 的小狗图像传输, 只需要 448 次传输, 即需要 448 幅 CGH。每幅 CGH 的信息量是原有单个光学亮环晶格对应 CGH 信息量的 16 倍, 系统传输效率和通信系统容量提升了 16 倍。

5 结 论

实现了一种利用光学亮环晶格进行空间信息编码通信的新方法。基于面向目标的计算全息术产生 4 种光学亮环晶格的 CGH, 将 CGH 加载到 SLM 上调制入射光可直接产生 4 种简单模式的光学亮环晶格。4 种光学亮环晶格模式对应 4 个四进制数, 易于识别。实验通过光学亮环晶格, 对一幅 $32 \text{ pixel} \times 56 \text{ pixel}$ 的 256 阶小狗灰度图进行编码及自由空间光传输, 在距离发射端 2 m 处的接收端, 利用 CCD 完成光学信息接收并利用计算机完成数据解码, 该方法可以在部分遮挡干扰情况下, 无差错地恢复原始发送的图像信息。在此基础上, 实验拓展单个光学亮环晶格至 2×2 和 4×4 阵列, 在原有系统基础上, 系统传输效率、通信系统容量分别提升了 4 倍和 16 倍, 表明所提方法可以进一步提升系统容量和传输效率。本研究达成了利用光学亮环晶格进行自由空间光编码通信的实验目标, 所提方法采用低复杂度的编解码方案, 实现简单、可扩展性强, 且具有一定的抗干扰性, 拓展了光学亮环晶格的应用领域, 此外, 相对于传统单一的光学亮环晶格, 光学亮环晶格阵列极大提高了通信系统容量和信息传输效率。因此该研究成果为光环晶格在信息编码传输领域的应用拓展提供了一定的理论与实验依据。

参 考 文 献

- [1] Curtis J E, Grier D G. Structure of optical vortices [J]. *Physical Review Letters*, 2003, 90 (13): 133901.
- [2] Mao N, Wei H Y, Cai D M, et al. Simulation for measuring the topological charges of composite vortex beams[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2019, 46(1): 0104008.
毛宁, 韦宏艳, 蔡冬梅, 等. 复合涡旋光束拓扑荷数测量的仿真研究 [J]. *中国激光*, 2019, 46 (1): 0104008.
- [3] Heckenberg N R, McDuff R, Smith C P, et al. Laser beams with phase singularities[J]. *Optical and Quantum Electronics*, 1992, 24(9): S951-S962.
- [4] Allen L, Beijersbergen M W, Spreeuw R J C, et al. Orbital angular momentum of light and the transformation of Laguerre-Gaussian laser modes[J]. *Physical Review A*, 1992, 45(11): 8185-8189.
- [5] Li D H, Pu J X, Wang X Q. Optical torques upon a micro object illuminated by a vortex beam [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2012, 39(s1): s102012.
李东华, 蒲继雄, 王喜庆. 涡旋光束照射下特殊形状微型物体所受的力矩 [J]. *中国激光*, 2012, 39(s1): s102012.
- [6] Zhang Y, Tang X Y, Zhang Y X, et al. 3-dimensional dark traps for low refractive index bio-cells using a single optical fiber Bessel beam[J]. *Optics Letters*, 2018, 43(12): 2784-2786.
- [7] Diniz K, Dutra R S, Pires L B, et al. Negative optical torque on a microsphere in optical tweezers [J]. *Optics Express*, 2019, 27(5): 5905-5917.
- [8] Cheng W C, Zhang W, Jing H Y, et al. Orbital angular momentum for wireless communications[J]. *IEEE Wireless Communications*, 2019, 26(1): 100-107.
- [9] González N, Molina-Terriza G, Torres J P. How a Dove prism transforms the orbital angular momentum of a light beam [J]. *Optics Express*, 2006, 14(20): 9093-9102.
- [10] Heckenberg N R, McDuff R, Smith C P, et al. Generation of optical phase singularities by computer-generated holograms [J]. *Optics Letters*, 1992, 17 (3): 221-223.
- [11] Beijersbergen M W, Allen L, van der Veen H E L O, et al. Astigmatic laser mode converters and transfer of orbital angular momentum [J]. *Optics Communications*, 1993, 96(1/2/3): 123-132.
- [12] Kotlyar V V, Kovalev A A, Skidanov R V, et al. Diffraction of a finite-radius plane wave and a Gaussian beam by a helical axicon and a spiral phase plate [J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 2007, 24(7): 1955-1964.
- [13] Ostrovsky A S, Rickenstorff-Parrao C, Arrizón V. Generation of the "perfect" optical vortex using a liquid-crystal spatial light modulator [J]. *Optics Letters*, 2013, 38(4): 534-536.
- [14] Rosales-Guzmán C, Bhebhe N, Forbes A. Simultaneous generation of multiple vector beams on a single SLM [J]. *Optics Express*, 2017, 25(21): 25697-25706.
- [15] Arlt J, Padgett M J. Generation of a beam with a dark focus surrounded by regions of higher intensity: the optical bottle beam [J]. *Optics Letters*, 2000, 25 (4): 191-193.
- [16] Sun S H, Pu J X. Generation and propagation of double-vortex beams [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011,

- 31(s1): 100520.
孙顺红, 蒲继雄. 双涡旋光束的产生与传输[J]. 光学学报, 2011, 31(s1): 100520.
- [17] Fang G J, Sun S H, Pu J X. Experimental study on fractional double-vortex beams [J]. Acta Physica Sinica, 2012, 61(6): 064210.
方桂娟, 孙顺红, 蒲继雄. 分数阶双涡旋光束的实验研究[J]. 物理学报, 2012, 61(6): 064210.
- [18] Franke-Arnold S, Leach J, Padgett M J, et al. Optical Ferris wheel for ultracold atoms[J]. Optics Express, 2007, 15(14): 8619-8625.
- [19] Baumann S M, Kalb D M, MacMillan L H, et al. Propagation dynamics of optical vortices due to Gouy phase[J]. Optics Express, 2009, 17(12): 9818-9827.
- [20] Vaity P, Singh R P. Self-healing property of optical ring lattice[J]. Optics Letters, 2011, 36(15): 2994-2996.
- [21] Litvin I A, Burger L, Forbes A. Angular self-reconstruction of petal-like beams [J]. Optics Letters, 2013, 38(17): 3363-3365.
- [22] Houston N, Riis E, Arnold A S. Reproducible dynamic dark ring lattices for ultracold atoms [J]. Journal of Physics B: Atomic, Molecular and Optical Physics, 2008, 41(21): 211001.
- [23] He X D, Xu P, Wang J, et al. Rotating single atoms in a ring lattice generated by a spatial light modulator [J]. Optics Express, 2009, 17(23): 21007-21014.
- [24] Huang S J, Wang S Z, Yu Y J. Computer generated holography based on Fourier transform using conjugate symmetric extension [J]. Acta Physica Sinica, 2009, 58(2): 952-958.
黄素娟, 王朔中, 于瀛洁. 共轭对称延拓傅里叶计算全息[J]. 物理学报, 2009, 58(2): 952-958.