

基于混合光模式阵列的自由空间编码通信

解万财 黄素娟 邵蔚 朱福全 陈木生

Free-space optical communication based on hybrid optical mode array encoding

Xie Wan-Cai Huang Su-Juan Shao Wei Zhu Fu-Quan Chen Mu-Sheng

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 66, 144102 (2017) DOI: 10.7498/aps.66.144102

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.66.144102>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2017/V66/I14>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

空心光束尺寸的精确调控

Precise controll of hollow beam size

物理学报.2016, 65(18): 184101 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.184101>

单环多段光强分布检测光学涡旋拓扑荷值

Detection optical vortex topological charges with monocyclic multistage intensity distribution

物理学报.2016, 65(6): 064101 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.064101>

部分相干光对周期性局域空心光束的影响

Effects of a partially coherent beam on periodic bottle beam

物理学报.2016, 65(4): 044103 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.044103>

栅极热变形对离子推力器工作过程影响分析

Analysis on the effects of optics thermal deformation on the ion thruster operation

物理学报.2015, 64(9): 094104 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.094104>

多环涡旋光束的实验研究

Experimental study on multiple-ring vortex beams

物理学报.2014, 63(24): 244103 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.244103>

基于混合光模式阵列的自由空间编码通信*

解万财 黄素娟[†] 邵蔚 朱福全 陈木生

(上海大学通信与信息工程学院, 特种光纤与光接入网省部共建重点实验室, 上海 200072)

(2017年1月9日收到; 2017年4月6日收到修改稿)

光学涡旋的产生、传输与应用是当前光学领域的研究热点之一。光学涡旋具有轨道角动量, 作为一种全新的自由度, 丰富了目前光通信的方式。利用面向目标的共轭对称延拓傅里叶计算全息技术, 基于空间光调制器, 用单束激光直接产生混合光模式阵列进行编码通信。采用由单光涡和复合光涡构成的4种易于识别的模式组成 2×2 混合光模式阵列, 进行灰度图像的编码传输。在接收端提取混合光模式阵列图的信息并进行解码, 实现零误码的灰度图像再现。以传输一幅Lena图像为例, 使用 2×2 混合光模式阵列进行编码通信, 相对于传统单光涡编码通信, 其信息容量可增加4倍。该方法光路简单易行, 可扩展性强, 进一步拓展使用 4×4 混合光模式阵列进行编码通信, 信息容量提升16倍。提出的混合光模式阵列编码通信方法对于提高信息传输容量具有重要价值。

关键词: 光学涡旋, 计算全息图, 编码, 空间光调制器

PACS: 41.85.-p, 42.40.Jv, 87.19.ls, 42.79.-e

DOI: 10.7498/aps.66.144102

1 引言

光学涡旋具有螺旋波前相位结构, 其相位因子描述为 $\exp(i l \theta)$, 其中 l 为拓扑电荷数, 理论上可取任意整数, θ 为方位角。由于其相位奇点的存在, 涡旋光强呈现暗中空的面包圈结构^[1-3]。光学涡旋的产生方法主要有几何模式转换法、全息光栅法、螺旋相位板法、液晶空间光调制器法, 以及基于电介质超表面材料的模式转换法^[4,5]。液晶空间光调制器法因其快速、灵活、可控等优点成为实验室目前最常采用的光学涡旋产生方法。由于光涡的拓扑荷理论上可以取任意整数, 并且可以作为一种全新的自由度与传统光复用方式兼容, 极大地提升了通信总容量及频谱利用率^[6-10]。光涡复用通信已然成为国内外研究的一个热点, 目前在自由空间中的传输速率已经达到Pbit/s量级^[11], 在光纤中的传输距离可达几十千米^[12,13]。

光涡除了作为信息的载体进行复用通信外, 还可用信息本身进行编码/解码通信。2004年Gibson等^[14]首先提出用光涡状态增强信息传输的安全, 随后Lü等^[15]提出一种利用具有轨道角动量的高阶Bessel无衍射光束进行空间光信息传输的编码解码方法。Krenn等^[16]在维也纳广场上进行了3 km距离内自由空间的编码通信。Zhao等^[17]提出用高阶矢量光束进行编码通信, 并达到零误码。除了在自由空间中进行编码通信, 在光纤中使用光涡进行编码通信也取得了显著成果^[18,19]。然而, 实验室无法进行大拓扑荷光涡的产生与检测^[20,11], 单光涡进行编码通信所携带的信息量有限。对此, Li等^[22]提出了使用光涡阵列进行自由空间编码通信的方法。相对于传统单光涡编码通信, 用光涡阵列进行编码通信极大地提升了通信容量。但Li等^[22]提出的光涡阵列编码通信系统需要使用多个分束器将一束激光分成多束, 分别入射到空间光调

* 国家自然科学基金(批准号: 61475098)和上海市科委科研计划(批准号 14440500100)资助的课题。

[†] 通信作者。E-mail: sjhuang@shu.edu.cn

制器 (spatial light modulator, SLM) 的不同部分, 实验装置过于复杂, 不易拓展, 进一步提升通信容量的难度较大.

本文利用一种面向目标的共轭对称延拓傅里叶计算全息技术^[23-25], 用单束激光直接照射空间光调制器, 无需分束, 生成混合光模式阵列. 通过混合光模式阵列进行编码/解码通信, 实现了高效的自由空间编码通信. 采用 2×2 的混合光模式阵列进行编码/解码通信, 混合光模式阵列每个部分选取易于识别的 4 种模式, 分别为高斯点、单光涡、亮晶格 a 和亮晶格 b. 因此 2×2 混合光模式阵列一共有 256 种状态, 一一对应于灰度值 0—255. 实验传输了一幅大小为 $32 \text{ pixel} \times 32 \text{ pixel}$ 、灰度值为 0—255 的 Lena 图像. 在接收端, 实现零误码的 Lena 图像再现, 表明实验方案简单可靠. 另外, 增加混合光模式阵列数以及模式的种数, 可以进一步提高通信容量.

2 理论分析

2.1 混合光模式阵列

拉盖尔高斯 (Laguerre-Gaussian, LG) 涡旋光束是实验室常用的涡旋光束. 一般情况下, 其振幅具有 p 个径向节点, 为方便研究, 实验取 $p = 0$, 此时光涡呈现暗中空的面包圈结构, 其复振幅表达式为

$$E_0^l = \frac{1}{w(z)} \left[\frac{r\sqrt{2}}{w(z)} \right]^{|l|} \cdot \exp \left[\frac{-r^2}{w^2(z)} \right] \times \exp \left[i \left(kz - \frac{kr^2}{2R} + \varphi \right) \right]$$

$$\times \exp(-il\theta), \quad (1)$$

式中 $w(z) = w_0 \sqrt{1 + (z/z_R)^2}$ 表示传播距离 z 处的光斑尺寸, w_0 为束腰半径, z_R 为瑞利长度; l 为拓扑电荷数; θ 为方位角; k 为波数; $\varphi = (|l| + 1) \cdot \arctan(z/z_R)$ 为古伊相位; R 为曲率半径.

将 (1) 式中的柱坐标系改写为直角坐标系, 即 $r = \sqrt{x^2 + y^2}$, 可得

$$E_0^l = \frac{1}{w(z)} \left[\frac{\sqrt{x^2 + y^2} \sqrt{2}}{w(z)} \right]^{|l|} \cdot \exp \left[\frac{-x^2 - y^2}{w(z)^2} \right] \times \exp \left\{ i \left[kz - \frac{k(x^2 + y^2)}{2R} + \varphi \right] \right\} \times \exp(-il\theta). \quad (2)$$

2×2 混合光模式阵列的平面分布如图 1(a) 所示, 由 4 个部分组成, $A(0, 0)$, $B(a, 0)$, $C(0, a)$, $D(a, a)$ 分别为各部分的中心位置. 则混合光模式阵列在直角坐标系的表达式为

$$E_{\text{array}} = E^{l_A} + E^{l_B}(x - a, y) + E^{l_C}(x, y - a) + E^{l_D}(x - a, y - a). \quad (3)$$

每个部分有 4 种可选模式, 分别为高斯点, 拓扑荷为 +1 的光涡, 拓扑荷为 ± 1 的光涡同轴叠加成的亮晶格 a, 以及初始相位差为 π 的拓扑荷为 ± 1 的光涡同轴叠加成的亮晶格 b. 图 1(b) 为一种 2×2 混合光模式阵列的强度仿真图. 其中中心位置为 A 的部分是高斯点, 为 B 的部分是亮晶格 a, 为 C 的部分是拓扑荷为 +1 的光涡, 为 D 的部分为亮晶格 b. 即 $E^{l_A} = E_0^0$, $E^{l_B} = E_0^{+1} + E_0^{-1}$, $E^{l_C} = E_0^{+1}$, $E^{l_D} = E_0^{+1} + E_0^{-1}$ (初始相位差为 π). 此混合光模式阵列对应的相位为图 1(c).

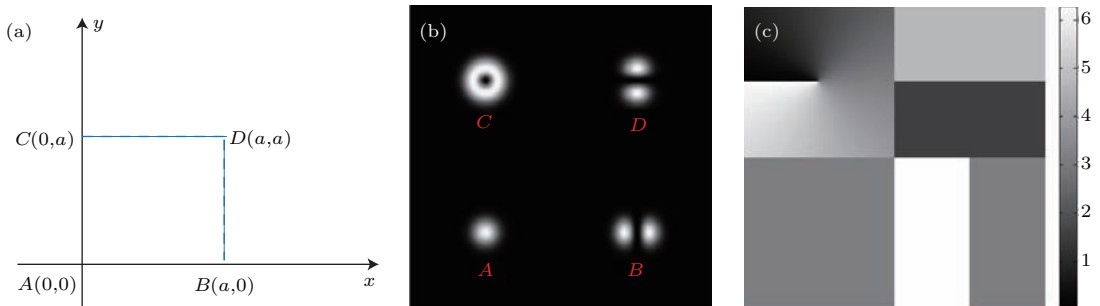


图 1 (a) 混合光模式阵列平面分布示意图; (b) 混合光模式阵列强度图; (c) 混合光模式阵列相位图

Fig. 1. (a) Plane distribution diagram of hybrid optical mode array; (b) theoretical intensity distribution of hybrid optical mode array; (c) theoretical phase distribution of hybrid optical mode array.

2.2 混合光模式阵列计算全息图

利用面向目标的共轭对称延拓傅里叶计算全息技术生成混合光模式阵列的计算全息图 (CGH). 其实质就是利用共轭对称复函数的傅里叶变换是实函数这一特性, 将 2×2 混合光模式阵列 (图 1) 作为物光波的复振幅进行共轭对称延拓后作傅里叶变换, 得到的实值函数既包含物光波振幅信息又包含相位信息, 最后通过适当编码生成全息图. 利用

$$f(m, n) = \begin{cases} f_0(m, n), & m = 1, 2, \dots, M/2 - 1; n = 1, 2, \dots, N - 1, \\ f_0^*(M - m, N - n), & m = M/2 + 1, \dots, M - 1; n = 1, 2, \dots, N - 1, \\ 0, & m = 0 \text{ or } n = 0 \text{ or } m = M/2, \end{cases} \quad (5)$$

式中上标 * 表示复共轭. 令列数 M 和行数 N 均为偶数, 并使 $f(0, n) = f(m, 0) = f(M/2, 0) = 0$, 对称中心位置为 $(M/2, N/2)$.

将 $f(m, n)$ 进行二维离散傅里叶变换:

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

$$\mu = 0, 1, \dots, M - 1,$$

$$\nu = 0, 1, \dots, N - 1, \quad (6)$$

式中 μ 和 ν 分别为水平方向和垂直方向的频域样本序号. 将 (4) 式和 (5) 式代入 (6) 式中整理可得

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

$$\mu = 0, 1, \dots, M - 1, \quad \nu = 0, 1, \dots, N - 1. \quad (7)$$

(7) 式既包含了物光波的幅度信息 $A(m, n)$, 又包含了物光波的相位信息 $\varphi(m, n)$, 是一个实值函数. 将此实值函数编码成 0—255 灰度图, 即为目标混合光模式的计算全息图. 基于上述方法, 生成混合光模式阵列的计算全息图, 如图 2 所示, 其中图 2(a) 为混合光模式阵列的共轭对称延拓傅里叶变换生成的全息图, 图 2(b) 是图 2(a) 放大 16 倍后的图像. 图 2(c) 是由图 2(a) 计算全息图仿真再现得到的混合光模式阵列强度图, 说明此全息方法是可行的.

该全息图可以再现原始物光波, 即 2×2 混合光模式阵列.

在编码计算全息图时, 将混合光模式阵列作为物光波, 其复振幅分布 $f_0(m, n)$ 可简单表示为

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

$$m = 1, 2, \dots, M/2 - 1, \quad n = 1, 2, \dots, N - 1, \quad (4)$$

式中 $A(m, n)$ 为混合光模式幅度, $\varphi(m, n)$ 为混合光模式相位. 将 $f_0(m, n)$ 进行共轭对称延拓得

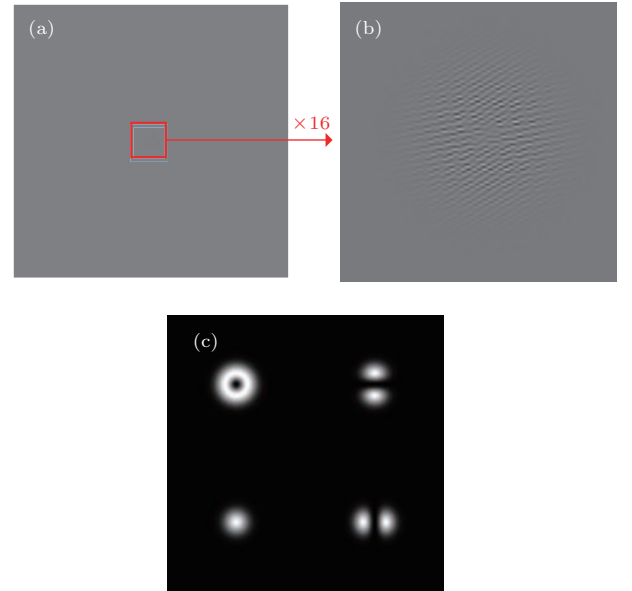


图 2 (a) 混合光模式阵列的计算全息图; (b) 混合光模式阵列计算全息放大 ($\times 16$); (c) 由 (a) 计算全息图再现得到的混合光模式阵列

Fig. 2. (a) CGH of hybrid optical mode array; (b) enlarged CGH ($\times 16$); (c) hybrid optical mode array reproduced by CGH in (a).

2.3 混合光模式阵列编码/解码

混合光模式阵列由 4 个部分组成 (中心位置分别为 A, B, C, D) (图 1 (b)), 每个部分有 4 种可选模式 (高斯点, 拓扑荷为 +1 的光涡, 亮晶格 a, 亮晶格 b), 因此 2×2 混合光模式阵列一共有 $4^4 = 256$ 种状态, 每种状态对应一个像素的灰度值 (0—255). 另外, 每种模式分别对应一个四进制数, 高斯点对应 0, 拓扑荷为 +1 的光涡对应 1, 亮晶格 a 对应 2, 亮晶格 b 对应 3. 则 $ABCD$ 对应像素的灰度值 0—255

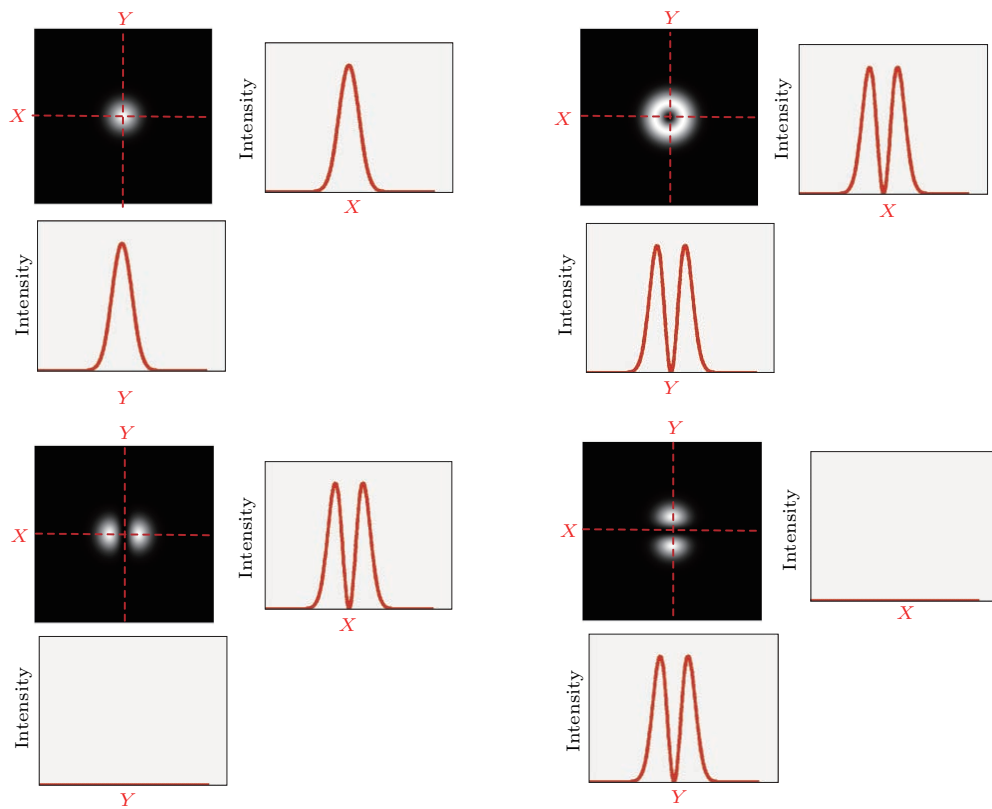


图3 4种模式的识别

Fig. 3. Recognition of four modes.

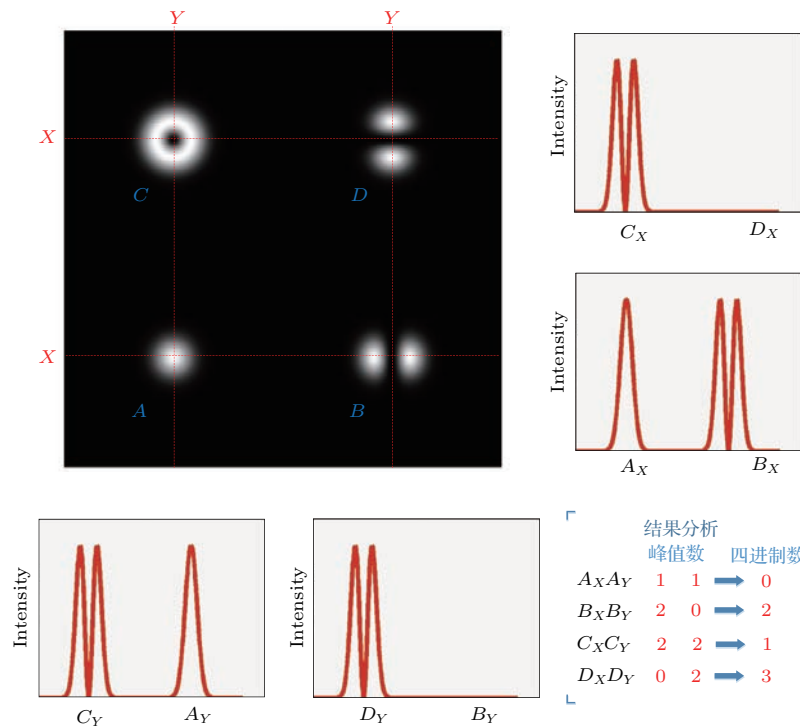


图4 混合光模式阵列的识别

Fig. 4. Recognition of hybrid optical mode array.

(四进制数 0000—3333). 如灰度值为 39(0213) 的像素点对应的混合光模式阵列为图 1(b). 4 种模式具有不同的强度分布, 通过测量识别不同模式的强度分布. 如图 3 所示, 在各模式的中心位置设置两条正交的线 (X 轴和 Y 轴), 得出每个模式中心轴上的强度特征. 通过计算每个模式中心轴上强度的峰值, 识别不同模式, 从而得到对应的四进制码. 高斯点在每个中心轴上都只有一个峰值; 光涡在每个中心轴上都有两个峰值; 亮晶格 a 在 X 轴上有两个峰值, 在 Y 轴上没有峰值; 亮晶格 b 在 X 轴上没有峰值, 在 Y 轴上有两个峰值. 因此, 通过测量每个模式的中心轴强度来识别不同模式是可行的.

使用的混合光模式阵列由 4 部分组成, 每个部分有 4 种可选模式, 我们依次测量每个部分的中心轴强度来识别各部分的模式, 从而进一步得到整个混合光模式阵列所代表的灰度值. 如图 4 所示, 中心位置为 A 的部分 A_X , A_Y 都为单峰, 则该部分为高斯点, 对应四进制数 0; 中心位置为 B 的部分 B_X 为双峰, B_Y 没有峰, 则表示该部分为亮晶格 a, 对应四进制数 2; 中心位置为 C 的部分 C_X 为双峰, C_Y 也是双峰, 则表示该部分为光涡, 对应四进制数 1; 中心位置为 D 的部分 D_X 没有峰, D_Y 为双峰, 则表示该部分为亮晶格 b, 对应四进制数 3. 因此图 4 混合光模式阵列为四进制数 0213, 对应灰度值为 39 的像素点.

3 实验装置与结果分析

3.1 实验装置

如图 5 所示, 氦氖 (He-Ne) 激光器 (波长 $\lambda = 632.8 \text{ nm}$) 发射的激光经过偏振片 (Pol), 使其偏振方向适合反射型相位空间光调制器 (SLM) 的要求, 通过扩束系统 (BE) 得到尺寸合适的高斯光投射到 SLM 上, SLM 上加载基于共轭对称延拓傅里叶变换生成的混合光模式阵列的计算全息图, 通过光阑选出混合光模式阵列, 用 CCD 拍摄经过中性密度衰减片 (NDF) 后的图像, 并在电脑 (PC2) 上显示. 处理 CCD 记录的混合光模式阵列图像, 识别传输像素点的灰度值. 当传输一幅大小为 $32 \text{ pixel} \times 32 \text{ pixel}$ 的 Lena 灰度图时, 一共有 1024 个像素点, 每个像素点对应一幅混合光模式阵列的全息图, 通过切换加载在 PC1 上的全息图, 得到一

个时变的混合光模式阵列序列, 在接收端记录每张全息图对应的混合光模式阵列并进行识别, 进一步还原得到传输的 Lena 图像.

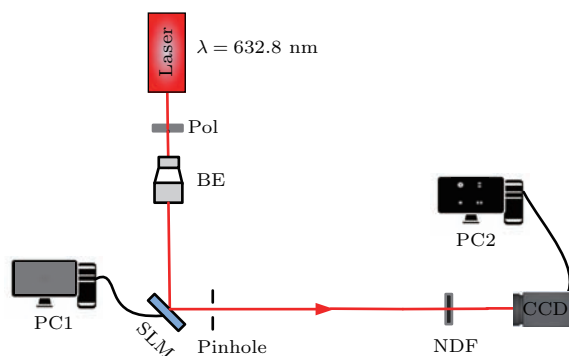


图 5 实验装置示意图 (Pol, 偏振片; BE, 扩束器; SLM, 液晶空间光调制器; NDF, 中性密度衰减片; PC1, PC2, 计算机)

Fig. 5. Schematic of the experimental setup. Pol, polarizer; BE, beam expander; SLM, spatial light modulator; NDF, neutral density filter; PC1, PC2, computer.

3.2 实验结果与分析

以传输一幅 $32 \text{ pixel} \times 32 \text{ pixel}$ 的 Lena 图像为例, 将灰度值为 0—255 的像素点转变为 4 位四进制值 (0000—3333), 每个像素点对应一个 2×2 混合光模式阵列, 利用共轭对称延拓傅里叶变换得到每幅混合光模式阵列全息图, 则 Lena 图像就对应一个由 1024 幅混合光模式阵列组成的序列. 切换加载在 SLM 上的计算全息图, 并用 CCD 记录混合光模式阵列图像, 通过对图像的处理识别每幅混合光模式阵列图像所代表的像素值, 从而还原得到传输的 Lena 图像. 图 6 所示为接收端 CCD 记录的一幅混合光模式阵列图像. 中心位置为 A 的部分 A_X , A_Y 对应的峰值个数为 1, 1, 可知该部分对应的四进制数为 0; 中心位置为 B 的部分 B_X , B_Y 对应的峰值个数为 2, 0, 可知该部分对应的四进制数为 2; 中心位置为 C 的部分 C_X , C_Y 对应的峰值个数为 2, 2, 可知该部分对应的四进制数为 1; 中心位置为 D 的部分 D_X , D_Y 对应的峰值个数为 0, 2, 可知该部分对应的四进制数为 3. 综上所述, 这幅 CCD 记录的图像对应的灰度值为四进制数 0213(39). 图 7 列举了几个不同灰度值对应的混合光模式阵列实验图, 通过上文识别方法, 可得其对应的灰度值分别为 0123(27), 1111(85), 1133(95) 及 3333(255).

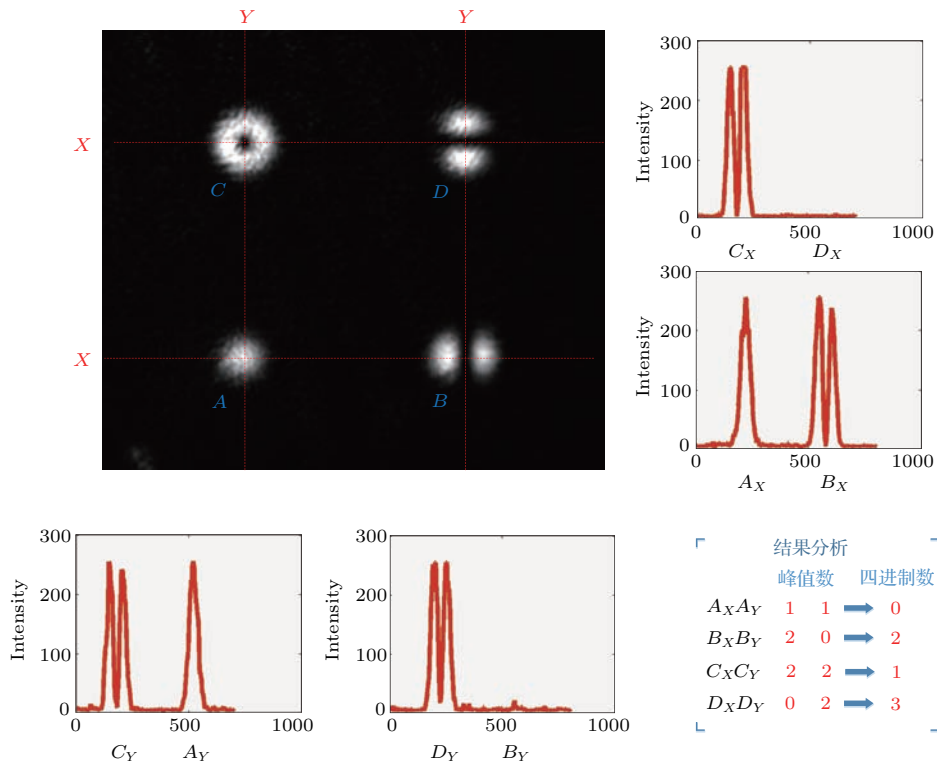


图6 混合光模式阵列的实验图及其模式识别

Fig. 6. Experimentally generated hybrid optical mode array and recognition of hybrid optical mode array.

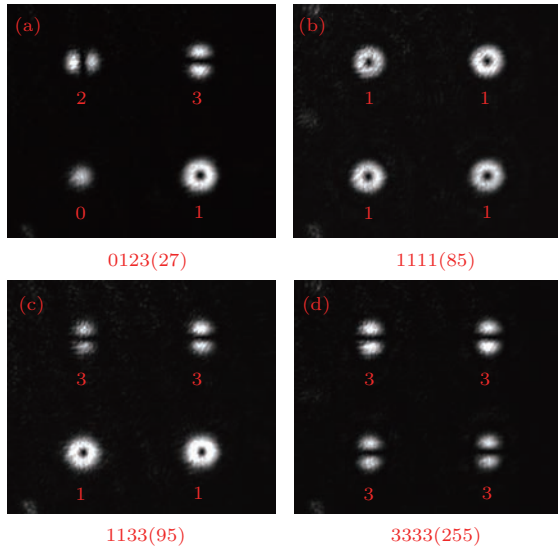


图7 混合光模式阵列的实验图 (a) 0123; (b) 1111; (c) 1133; (d) 3333

Fig. 7. Experiment results of hybrid optical mode array: (a) 0123; (b) 1111; (c) 1133; (d) 3333.

图8是Lena图像的传输示意图, 实验传输一幅 $32 \text{ pixel} \times 32 \text{ pixel}$ 、灰度值为0—255的Lena图像. 在发送端, 逐行扫描 $32 \text{ pixel} \times 32 \text{ pixel}$ 的Lena图像, 将每个像素点的像素值编码成一幅混合光模式阵列, 并将混合光模式编码成相应的计算全息图, 则Lena图像的1024个像素点对应一个由1024

幅计算全息图组成的序列. SLM不断切换加载的计算全息图, 实现Lena图像的传输. 在接收端对每幅混合光模式阵列进行识别解码, 还原得到传输的像素点的值, 实现零误码的Lena图像的再现. 本文采用的4种模式易于识别, 有利于Lena图像零误码再现. 相对于单个光涡编码传输, 使用基于共轭对称延拓傅里叶计算全息技术生成的 2×2 混合光模式阵列所携带的信息量增加了4倍. 实验装置简单, 可扩展性强, 在提升编码通信容量方面具有极大潜力.

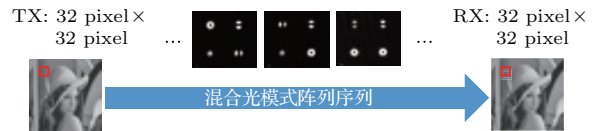


图8 $32 \text{ pixel} \times 32 \text{ pixel}$ Lena图像的传输

Fig. 8. Transmission of $32 \text{ pixel} \times 32 \text{ pixel}$ Lena gray image using hybrid optical mode array.

4 展望—— 4×4 混合阵列编码通信

上文实现 2×2 混合光模式阵列编码通信, 每个部分有4种可选模式, 共有256种状态, 一一对应于像素的灰度值(0—255), 实现 $32 \text{ pixel} \times 32 \text{ pixel}$

Lena 图像的自由空间传输. 采用的面向目标的共轭对称延拓傅里叶计算全息技术在生成混合光模式阵列方面优势明显, 主要体现在实验装置的简单易行, 仅用单束激光入射 SLM, 无需进行分束, 便可生成 $S \times S$ 阵列光涡. 以 4×4 混合光模式阵列为例, 阵列共 16 个部分, 每个部分选用上文所使用的 4 种易于识别的模式, 则此阵列一共有 4^{16} 种状态, 即 2^{32} 种状态, 因此每幅全息图携带 32 bit 信息. 每个像素点灰度值是 8 bit, 则一幅 4×4 混合光模式阵列就对应 4 个像素点. 同样传输一幅 $32 \text{ pixel} \times 32 \text{ pixel}$ Lena 图像, 用此 4×4 混合光模式阵列仅需 256 幅计算全息图. 图 9 (a) 所示为 4×4 混合光模式阵列的一种状态仿真图, 在检测时将其分成 4 大部分, 每个部分对应一个 2×2 混合光模式阵列, 对应一个像素点. 则一幅 4×4 混合光模式阵列所携带的信息量相当于 4 幅 2×2 混合光模式阵列所携带的信息量. 图 9 所示 4×4 混合光模式阵列对应的 4 个像素点灰度值为 27, 85, 95, 255, 相当于图 7 所示 4 幅 2×2 混合光模式阵列所对应的像素点. 图 9 (b) 为 CCD 记录的实验阵列图. 提出的使用共轭对称延拓傅里叶计算全息技术生成混合光模式阵列进行编码通信的方法易于扩展, 对于每幅全息图所携带的信息容量有极大的提升.

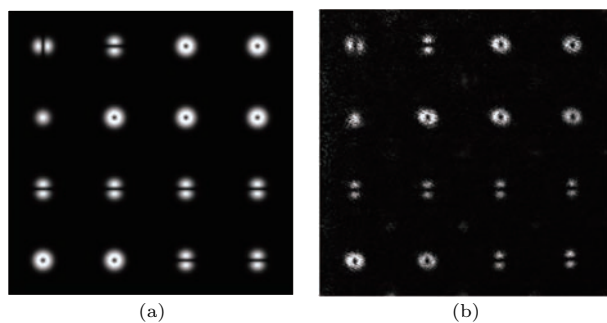


图 9 (a) 4×4 混合光模式阵列强度仿真图; (b) 4×4 混合光模式阵列实验图

Fig. 9. (a) Theoretical intensity distribution of 4×4 hybrid optical mode array; (b) experiment result of 4×4 hybrid optical mode array.

5 结 论

本文利用共轭对称延拓傅里叶计算全息技术生成混合光模式阵列进行编码通信, 实现零误码的图像传输. 采用 2×2 混合光模式阵列, 每个部分采用易于识别的 4 种模式, 相对于传统单光涡进行

编码通信, 每幅全息图所携带的信息量增加了 4 倍. 共轭对称延拓傅里叶计算全息技术在生成光模式阵列方面优势明显, 实验装置简单, 仅需要改变加载在 SLM 上的全息图即可得到 $S \times S$ 混合光模式阵列. 用 $S \times S$ 混合光模式阵列进行编码通信, 能够极大地提高每张全息图的信息量, 是单光涡编码通信的 $S \times S$ 倍. 因此, 本文提出的基于共轭对称延拓傅里叶计算全息技术生成混合光模式阵列进行编码通信的方法, 对于提升编码通信的容量具有重要价值.

参考文献

- [1] Allen L, Beijersbergen M W, Spreeuw R J C, Woerdman J P 1992 *Phys. Rev. A* **45** 8185
- [2] Heckenberg N R, McDuff R, Smith C P, Rubinsztein-Dunlop H, Wegener M J 1992 *Opt. Quant. Electron.* **24** S951
- [3] Ding P F, Pu J X 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 094204 (in Chinese) [丁攀峰, 蒲继雄 2011 物理学报 **60** 094204]
- [4] Yao A M, Padgett M J 2011 *Adv. Opt. Photonics* **3** 161
- [5] He Y L, Liu Z X, Liu Y C, Zhou J X, Ke Y G, Luo H L, Wen S C 2015 *Opt. Lett.* **40** 5506
- [6] Wang J, Yang J Y, Fazal I M, Ahmed N, Yan Y, Huang H, Ren Y X, Yue Y, Dolinar S, Tur M, Willner A E 2012 *Nat. Photonics* **6** 488
- [7] Fazal I M, Ahmed N, Wang J, Yang J Y, Yan Y, Shamee B, Huang H, Yue Y, Dolinar S, Tur M, Willner A E 2012 *Opt. Lett.* **37** 4753
- [8] Huang H, Xie G D, Yan Y, Ahmed N, Ren Y X, Yue Y, Rogawski D, Willner M J, Erkmen B I, Birnbaum K M, Dolinar S J, Lavery M P J, Padgett M J, Tur M, Willner A E 2014 *Opt. Lett.* **39** 197
- [9] Zhu Y X, Zou K H, Zheng Z N, Zhang F 2016 *Opt. Express* **24** 3967
- [10] Li S H, Wang J 2017 *Sci. Rep.* **7** 43233
- [11] Wang J, Li S, Luo M, Liu J, Zhu L, Li C, Xie D Q, Yang Q, Yu S H, Sun J Q, Zhang X L, Shieh W, Willner A E 2014 *The European Conference on Optical Communication Cannes, France, September 21–25, Mo.4.5.1*
- [12] Ramachandran S, Kristensen P 2013 *Nanophotonics* **2** 455
- [13] Wang A D, Zhu L, Chen S, Du C, Mo Q, Wang J 2016 *Opt. Express* **24** 11716
- [14] Gibson G, Courtial J, Padgett M J, Vasnetsov M, Pas'ko V, Barnett S M, Franke-Arnold S 2004 *Opt. Express* **12** 5448
- [15] Lü H, Ke X Z 2009 *Acta Opt. Sin.* **29** 331 (in Chinese) [吕宏, 柯熙政 2009 光学学报 **29** 331]
- [16] Krenn M, Fickler R, Fink M, Handsteiner J, Malik M, Scheidl T, Ursin R, Zeilinger A 2014 *New. J. Phys.* **16** 113028

- [17] Zhao Y, Wang J 2015 *Opt. Lett.* **40** 4843
- [18] Brüning R, Ndagano B, McLaren M, Schroter S, Kobelke J, Duparre M, Forbes A 2016 *J. Opt.* **18** 03LT01
- [19] Zhu L, Liu J, Mo Q, Cheng D, Wang J 2016 *Opt. Express* **24** 16934
- [20] Xin J T, Gao C Q, Li C, Wang Z 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 174202 (in Chinese) [辛璟焘, 高春清, 李辰, 王铮 2012 物理学报 **61** 174202]
- [21] Fu D Z, Jia J L, Zhou Y N, Chen D X, Gao H, Li F L, Zhang P 2015 *Acta Phys. Sin.* **64** 130704 (in Chinese) [付栋之, 贾俊亮, 周英男, 陈东旭, 高宏, 李福利, 张沛 2015 物理学报 **64** 130704]
- [22] Li S, Xu Z, Liu J, Zhou N, Zhao Y F, Zhu L, Xia F, Wang J 2015 *Conference on Lasers and Electro-Optics* San Jose, USA, May 10–15, JTh2A.67
- [23] Huang S J, Wang S Z, Yu Y J 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 952 (in Chinese) [黄素娟, 王朔中, 于瀛洁 2009 物理学报 **58** 952]
- [24] Huang S J, He C, Wang T W 2014 *J. Opt.* **16** 035402
- [25] Huang S J, Gu T T, Miao Z, He C, Wang T Y 2014 *Acta Phys. Sin.* **63** 244103 (in Chinese) [黄素娟, 谷婷婷, 缪庄, 贺超, 王廷云 2014 物理学报 **63** 244103]

Free-space optical communication based on hybrid optical mode array encoding*

Xie Wan-Cai Huang Su-Juan[†] Shao Wei Zhu Fu-Quan Chen Mu-Sheng

(Key Laboratory of Special Fiber Optics and Optical Access Networks, School of Communication and Information Engineering, Shanghai University, Shanghai 200072, China)

(Received 9 January 2017; revised manuscript received 6 April 2017)

Abstract

The generation, propagation and application of optical vortex have been hot research topics in recent years. Optical vortex carries orbital angular momentum (OAM) that potentially increases the capacity and the spectral efficiency of optical communication system as a new degree of freedom. The optical vortex can be used not only as information carrier for space-division multiplexing, but also for encoding/decoding. We present a novel free-space optical communication system based on hybrid optical mode array encoding/decoding. The array includes four modes that can easily be identified by image processing. The four modes are Gaussian beam, single optical vortex, and two different composite optical vortices. In this paper, the computer generated hologram (CGH) of the hybrid optical mode array is generated based on the object-oriented conjugate-symmetric extension Fourier holography. When the CGH is loaded onto the electronic addressing reflection-type spatial light modulator (SLM), a single light beam illuminates the SLM, and the desired hybrid optical mode array is generated. In the experiment, a $32 \text{ pixel} \times 32 \text{ pixel}$ Lena gray image is transferred. At the transmitter, the Lena gray image is scanned line by line. The gray value (0–255) of each pixel with 8-bit information is extracted from the image and converted into a 2×2 hybrid optical mode array, which is encoded into the CGH. Hence, the $32 \text{ pixel} \times 32 \text{ pixel}$ Lena gray image is corresponding to a sequence with 1024 CGHs. By switching the CGHs loaded onto the SLM, the Lena gray image is transmitted in the form of the hybrid optical mode array. At the receiver, each hybrid optical mode array is decoded to a pixel value. To distinguish different modes conveniently, two cross lines are set at the center of each mode. By counting the peaks of two intensity distribution lines, the modes can easily be identified. We demonstrate the image reproduction of Lena with zero bit error rate (BER). The experimental result shows the favorable performance of the free-space optical communication link based on hybrid optical mode array encoding/decoding. Compared to that of the traditional single-vortex encoding communication system, the information capacity of our system with 2×2 hybrid optical mode array increases by four times. In addition, the presented experimental system is feasible and has strong expansibility. The information capacity can increase by 16 times with a 4×4 hybrid optical mode array based on the same experimental setup. Therefore, the presented free-space optical communication system using hybrid optical mode array encoding/decoding has great significance for improving the capacity of free-space optical communication system.

Keywords: optical vortices, computer-generated hologram, encoding, spatial light modulator

PACS: 41.85.-p, 42.40.Jv, 87.19.ls, 42.79.-e

DOI: [10.7498/aps.66.144102](https://doi.org/10.7498/aps.66.144102)

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 61475098) and the Shanghai Science and Technology Commission Research Plan, China (Grant No. 14440500100).

[†] Corresponding author. E-mail: sjhuang@shu.edu.cn