

双路多进制涡旋光通信

南久航¹, 韩一平^{2*}¹西安电子科技大学通信工程学院, 陕西 西安 710071;²西安电子科技大学物理与光电工程学院应用物理系, 陕西 西安 710071

摘要 轨道角动量(OAM)作为一个全新的通信复用维度,在大气激光通信、卫星通信等领域有着广泛的应用价值。主要采用双路多进制 OAM 调制进行信息的传输,利用两路多进制信号产生具有不同拓扑荷值的涡旋光束再进行相干叠加,产生不同的光强图案,在接收端利用 CCD 相机记录下光强信息,通过光强信息可以识别不同的符号信息。采用双路四进制信息传输时,可以产生 16 种不同的光强图案,为了保证光强图案的差异性,提出了一种基于光强相关性的编码方案,同时探索了大气湍流对光强的影响。使用卷积神经网络(CNN)进行光强信息的识别,能够显著提高大气湍流影响下光强信息的识别率。

关键词 光通信;自由空间光通信;轨道角动量;涡旋光;卷积神经网络;大气湍流

中图分类号 TN929.12

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202141.1206001

Dual-Channel Multiband Vortex Optical Communication

Nan Jiuhang¹, Han Yiping^{2*}¹School of Communication Engineering, Xidian University, Xi'an, Shaanxi 710071, China;²Department of Applied Physics, School of Physics and Optoelectronic Engineering, Xidian University, Xi'an, Shaanxi 710071, China

Abstract Orbital angular momentum (OAM), as a new communication multiplexing dimension, has a wide range of applications in the fields of atmospheric laser communication and satellite communication. Here, dual-channel multiband OAM modulation is explored as a means of information transmission. Two-channel multiband signals are used to generate vortex beams with different topological charge values for coherent superposition to produce different light intensity patterns. These patterns are recorded by a charge-coupled device (CCD) camera at the receiving end, where differences in light intensity information denote differences in symbol information. When dual-channel quaternary information is transmitted, 16 different light intensity patterns can be generated. To ensure the differences among light intensity patterns, a coding scheme based on light intensity correlation is proposed. The effect of atmospheric turbulence on light intensity pattern recognition is then explored. The use of a convolutional neural network (CNN) for light intensity information recognition is found to significantly improve the recognition rate of light intensity information under the influence of atmospheric turbulence.

Key words optical communications; free space optical communication; orbital angular momentum; vortex light; convolutional neural network; atmospheric turbulence

OCIS codes 060.2605; 060.4510; 060.4230

1 引言

激光适合传输高速率的数据,但是也容易受到

传输介质的影响。为了实现更大的通信容量,可以利用光的各种独立特征^[1],比如光的空间相干性^[2-3]、强度、波长^[4]、偏振^[5-6]、光的轨道角动量

收稿日期: 2020-12-15; 修回日期: 2021-01-08; 录用日期: 2021-01-22

基金项目: 国家自然科学基金(61675159)

* E-mail: yphan@xidian.edu.cn

(OAM)^[7]。涡旋光束携带的 OAM 为光波的空间域提供了新的维度资源,吸引了越来越多研究人员的关注。由于具有不同 OAM 模式值的涡旋光束相互正交,因此将 OAM 模式引入传统光通信领域,衍生出了两种新的应用机制——OAM 键控(OAM-SK)与 OAM 复用(OAM-DM),这为未来实现高速、大容量及高频谱效率的光通信技术提供了潜在的解决方案^[8]。大多数的研究主要集中在激光在大气湍流和海洋湍流条件下的传播,为了减弱湍流的影响,可以采用自适应光学技术^[9],恢复波前相位。深空光通信、大气光通信在光通信领域有着广泛的研究和应用,本文主要研究双路涡旋光编码和大气湍流中的无线光通信。

本文采用两路涡旋光进行相干叠加产生不同的光强图案,依照不同的光强图案携带的不同的符号信息,尽可能地利用不同符号之间的光强差异解调出所需要的信息。利用相干叠加的涡旋光产生不同的光强图案,在接收端利用 CCD 相机记录下光强信息,对光强信息进行分类识别就可以识别出光强所代表的符号信息。在经典的方法中,可以采用干涉^[10]、衍射^[11]等方法进行涡旋光模式的检测和识别。本文主要采用卷积神经网络(CNN)对 CCD 相机记录的光强信息进行识别,从而得到具体的信息。

本文使用空间光调制器(SLM)来产生 OAM

光束^[12]。首先给出拉盖尔-高斯(LG)光束的理论推导,及利用 SLM 产生 OAM 光束的方法;然后提出一种双路多进制的编码方法,及如何选择涡旋光束进行叠加产生有效的光强图案,描述了大气湍流对涡旋光传输的影响;为了克服大气湍流对光通信的影响,利用 CNN 对 CCD 相机记录的光强进行识别,并给出所选模型下的训练结果;最后对所采用的模型和方法进行总结。

2 系统理论设计

2.1 拉盖尔-高斯光束

涡旋光是一种具有螺旋相位波阵面的光束,OAM 可以有无限个本征态,所以理论上单光子 OAM 可承载无穷多比特信息,这大大提高了通信系统的容量和频谱利用率。常见的涡旋光束有拉盖尔-高斯光束^[13]、贝塞尔光束^[14]和厄米高斯光束^[15-16]。拉盖尔-高斯光束是一种典型的涡旋光束,是实验室最具有代表性的光束,可以由 SLM 加载相位图的方式产生。在近轴情况下,亥姆霍兹方程^[17]可以描述为

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial E}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 E}{\partial \varphi^2} + 2ik \frac{\partial E}{\partial z} = 0. \quad (1)$$

对(1)式进行求解,可以得到拉盖尔-高斯光束的光场结构^[18],表达式为

$$U_{p,m}(r, \varphi, z) = \sqrt{\frac{2p!}{\pi(p+|m|)!}} \times \frac{1}{\omega(z)} \left[\frac{\sqrt{2}r}{\omega(z)} \right]^{|m|} \times \exp\left[\frac{-r^2}{\omega^2(z)} \right] L_p^{|m|} \left[\frac{2r^2}{\omega^2(z)} \right] \exp(im\varphi) \times \exp\left[\frac{ik_0 r^2 z}{2(z^2 + z_R^2)} \right] \exp\left[-i(2p + |m| + 1) \arctan\left(\frac{z}{z_R} \right) \right], \quad (2)$$

式中: φ 为柱坐标系下的角度; E 为光场强度; r 为柱坐标系下的半径; p 为阶数; m 为拓扑荷值;瑞利长度 $z_R = (\pi\omega^2)/\lambda$;波数 $k_0 = 2\pi/\lambda$; λ 为光束的波长; $\omega(z) = \omega_0 \sqrt{1 + (z/z_R)^2}$, ω_0 为高斯光束的束腰宽度; $L_p^{|m|}$ 为拉盖尔多项式。

在光束的选择中,主要使用阶数 $p=0$ 和 $p=1$ 的拉盖尔-高斯光束,当 $z=0$ 时,(2)式可以描述为

$$U_{1,m}(r, \varphi, 0) = \sqrt{\frac{2}{\pi(1+|m|)!}} \frac{1}{\omega_0} \left(\frac{\sqrt{2}r}{\omega_0} \right)^{|m|} \times \exp\left(\frac{-r^2}{\omega_0^2} \right) L_1^{|m|} \left(\frac{2r^2}{\omega_0^2} \right) \exp(im\varphi), \quad (3)$$

$$U_{0,m}(r, \varphi, 0) = \sqrt{\frac{2}{\pi(|m|)!}} \frac{1}{\omega_0} \left(\frac{\sqrt{2}r}{\omega_0} \right)^{|m|} \times \exp\left(\frac{-r^2}{\omega_0^2} \right) L_0^{|m|} \left(\frac{2r^2}{\omega_0^2} \right) \exp(im\varphi). \quad (4)$$

通过计算机仿真可以看出,通过改变拓扑荷值就可以改变圆环半径的大小,从而产生不同强度的同心环和不同形式的相位分布。

使用 SLM 加载螺旋相位的方式产生涡旋光束。图 1 是阶数为 1、拓扑荷值为 3 的拉盖尔-高斯

光束。实验采用的 SLM 为 HOLOEYE Pluto 纯相位空间光调制器,规格为 1920 pixel×1080 pixel,每个像素间隔 8 μm ,总大小为 15.36 mm×8.64 mm。

2.2 系统设计

设计双路涡旋光束的编码,目标是将信息流

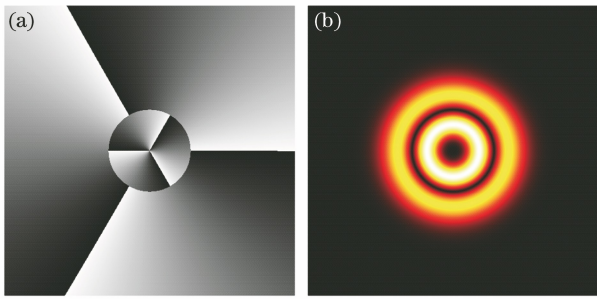


图 1 $p=1, m=3$ 的拉盖尔-高斯光束相位和光强。
(a) 相位; (b) 光强

Fig. 1 Phase and intensity of Laguerre-Gaussian beams with $p=1$ and $m=3$. (a) Phase; (b) intensity

转换成二进制编码,通过串并转换产生两路信号,每一路信号传输四进制编码信息,接收端根据信息的整合恢复出原始信息,得到最终信息流,最后还原为数据本身。以符号“1101”为例,“1101”可以分为“11”和“01”,第一路传输“11”,选择光束 $U_{0,10}$,第二路传输“01”,选择光束 $U_{0,3}$,两者的相干叠加可以表示为

$$U(r, \varphi, 0) = U_{0,10}(r, \varphi, 0) + U_{0,3}(r, \varphi, 0). \quad (5)$$

产生的光强图样如图 2 所示。

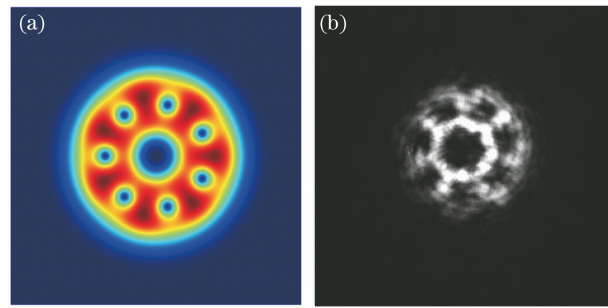


图 2 $U_{0,10}$ 和 $U_{0,3}$ 相干叠加产生的光强。
(a) 理论结果; (b) 实验结果

Fig. 2 Light intensity produced by the coherent superposition of $U_{0,10}$ and $U_{0,3}$. (a) Theoretical result; (b) experimental result

系统设计可以分成三部分,编码传输部分、湍流信道部分、解调部分,如图 3 所示。原始信息通过编码产生二进制比特流,二进制比特流通过串并转换变成两路四进制信息流;利用四进制信息生成对应的涡旋光的螺旋相位图,并将其加载到 SLM 中;两路涡旋光通过相干叠加可产生复合光场,复合光场经湍流信道传输到接收端,最终通过光强信息恢复出原始信息。

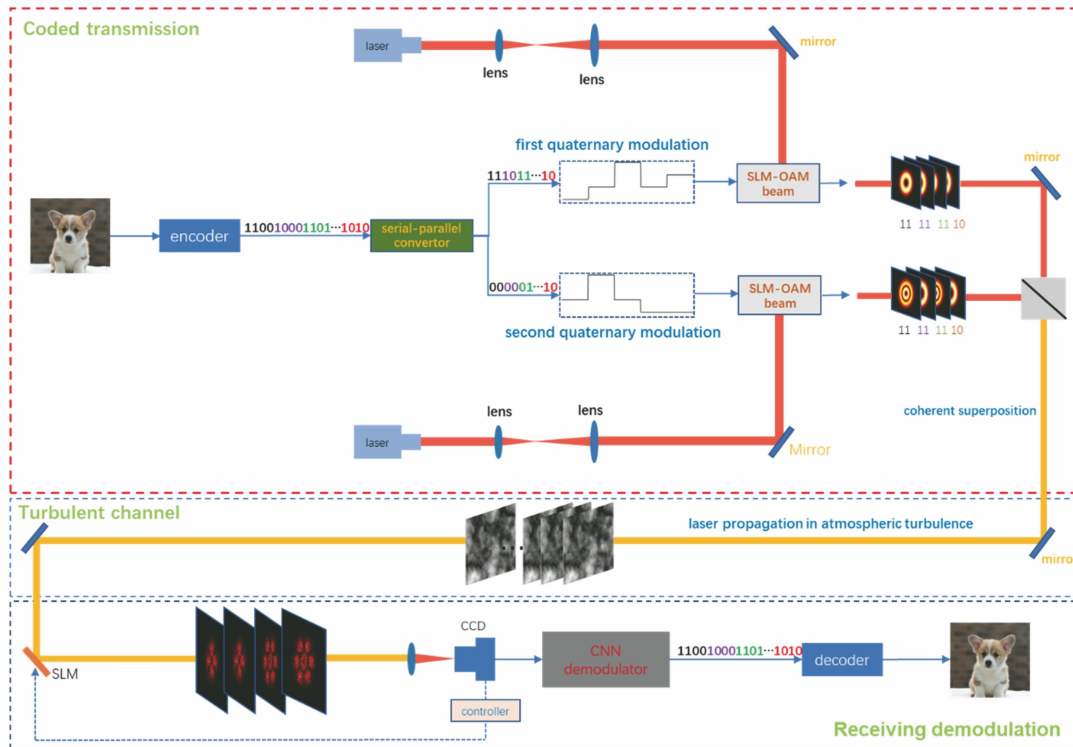


图 3 双路多进制涡旋光通信系统结构图

Fig. 3 Structure diagram of multiband multiband vortex optical communication system

2.3 编码设计

采用两路信号进行信息的传输,每一路信号都采

用四进制编码。图 4 为两路信号编码的波形图,每一路中不同的符号分别对应不同的螺旋相位图。将螺

旋相位图加载到 SLM 就产生了对应拓扑荷值的涡旋光, 两路信号叠加后就可以产生不同的光强图案, 光

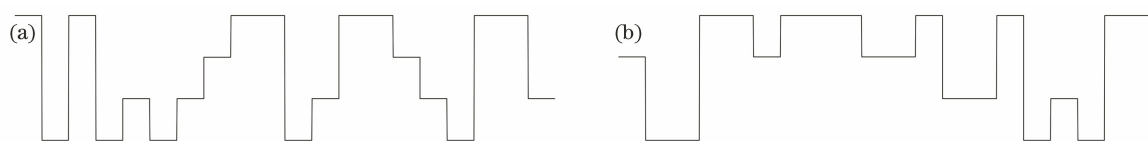


图 4 双路多进制调制信号。(a)第一路信号;(b)第二路信号

Fig. 4 Dual-channel multiband modulation signal. (a) First signal; (b) second signal

所使用的研究方法首要的目标是基于接收到的光的强度模式对信息进行可靠的分类。为了获得更可靠的分类结果, 需要相干叠加后的光强图之间差异性越大越好, 所以提出了一种基于强度相关性的编码方法。不同光强图案之间的差异越大, 越有利于信息的识别, 越有利于对最终接收到的光强信息进行分

强图案经大气湍流信道后到达接收端, 在接收端利用 CCD 相机得到的光强图案恢复得到原始信息。

类, 得到更加准确的结果。由于信息解码依赖于记录的强度, 当多束光同时相干发射时, 该复合光束的强度呈现出特有的光强图案, 因此需要相干叠加生成的光强图在一定程度上差异性更大一些, 差异性越大, 一定程度上可以减少接收端识别误判的情况。图 5 描述了传输图片信息时的一个像素的编码方式。

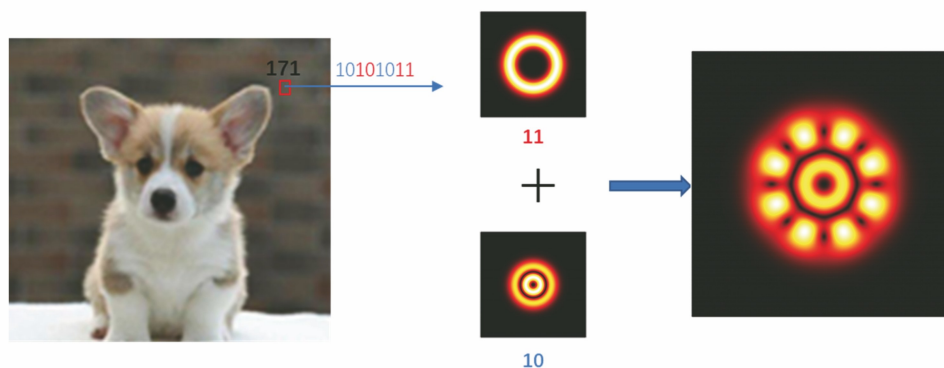


图 5 编码方式

Fig. 5 Encoding method

为了能够得到更加符合编码标准的光束集, 增加各个符号编码后的光强差异, 在选择光束集时将强度相关性作为评估编码好坏的标准, 表 1 给出了编码选择光束的标准。理论上, 拉盖尔-高斯光束的正交性使得拓扑荷值的选择是无限的, 实际上, 由于实验室条件的限制, 拓扑荷值的选择不易过大, 因此选择不同阶数的拉盖尔多项式, 可以进一步增加强度模式的多样性, 增加各个符号之间的差异。如果选择拓扑荷值较小的光束, 可以产生更加明显的叠加强度图样。

图 6 为由 $\{U_{0.4}, U_{0.6}, U_{0.8}, U_{0.10}\}$ 和 $\{U_{0.2}, U_{0.3}, U_{1.2}, U_{1.3}\}$ 两组光束集组成的 16 种光束对应的相关系数图。对两路光束分别进行叠加后, 一共可以得到 16 种代表不同符号信息的光强图。

结合硬件系统的设计, 由于 SLM 屏幕的像素大小的限制, 创建的最大拓扑荷值不宜过大, 选择的最大拓扑荷值为 10。相位的离散化会使光强的分布发生改变, 在 SLM 上呈现的相位屏越简单, 远场

的强度就越接近理论光强。基于上述条件, 选择的光束的范围就会缩小, 集中在拓扑荷值小于 10 的范围内。因此所选的光束集为 $\{U_{0.4}, U_{0.6}, U_{0.8}, U_{0.10}\}$ 和 $\{U_{0.2}, U_{0.3}, U_{1.2}, U_{1.3}\}$, 得到的 16 种光强分布如图 7 所示, 理论的光强图和实验得到的光强图还是有所差异, 但是总体上还是很接近的, 在接收端可以很好地识别出光强信息。

上述给定的方法在理论上可以应用于任意光束的设计, 但是由于实际硬件的限制, 要想得到和理论相似的光强干涉图并不是那么容易的, 需要考虑实际的 SLM 的精度, 实验室的条件都会对实验结果产生一定的影响, 因此实验中选择上述两路一共 8 种实验室产生的拉盖尔-高斯光束作为基础光束集。只要光束集选择固定, 那么任意 4 种光束均可以组成一路光信号, 两路光束相干叠加后就可以产生 16 种光强图, 但是整体的光强图种类并没有改变, 改变的只是编码的顺序。

表 1 16 种符号在光束集 $\{U_{0,4}, U_{0,6}, U_{0,8}, U_{0,10}\}$ 和 $\{U_{0,2}, U_{0,3}, U_{1,2}, U_{1,3}\}$ 下的编码结果

Table 1 Coding results of 16 kinds of symbols in beam sets $\{U_{0,4}, U_{0,6}, U_{0,8}, U_{0,10}\}$ and $\{U_{0,2}, U_{0,3}, U_{1,2}, U_{1,3}\}$

Symbol encoding	Selected beam	Light intensity shape description
0000	$U_{0,2} + U_{0,4}$	2 petals
0001	$U_{0,2} + U_{0,6}$	4 petals
0010	$U_{0,2} + U_{0,8}$	6 petals
0011	$U_{0,2} + U_{0,10}$	8 petals
0100	$U_{0,3} + U_{0,4}$	1 petal
0101	$U_{0,3} + U_{0,6}$	3 petals
0110	$U_{0,3} + U_{0,8}$	5 petals
0111	$U_{0,3} + U_{0,10}$	7 petals
1000	$U_{1,2} + U_{0,4}$	Two layers, 2 petals on the outer layer
1001	$U_{1,2} + U_{0,6}$	Two layers, 4 petals on the outer layer
1010	$U_{1,2} + U_{0,8}$	Two layers, 6 petals on the outer layer
1011	$U_{1,2} + U_{0,10}$	Two layers, 8 petals on the outer layer
1100	$U_{1,3} + U_{0,4}$	Two layers, 1 petal on the outer layer
1101	$U_{1,3} + U_{0,6}$	Two layers, 3 petals on the outer layer
1110	$U_{1,3} + U_{0,8}$	Two layers, 5 petals on the outer layer
1111	$U_{1,3} + U_{0,10}$	Two layers, 7 petals on the outer layer

编码理论和方法如下。

①双通道,每一个信道可选择的光束集为四种 LG 光束,比如选择 $\{U_{0,2}, U_{0,3}, U_{1,2}, U_{1,3}\}$ 和 $\{U_{0,4}, U_{0,6}, U_{0,8}, U_{0,10}\}$ 两组光束,记录下不同的花瓣数和光强信息。

②为了提高识别的效果,使用阶数为 1 和 0 的两种 LG 光束,叠加后产生的光强将会被分成两层和单层两个种类。

③涡旋光束的拓扑荷值选择 4, 6, 8, 10, 叠加后将产生不同的花瓣,为了提高识别效果,尽可能大地增加叠加光强的差异性,因此使用的 1 阶和 0 阶涡旋光束的拓扑荷值有两种 2 和 3,那么第二组光束中拓扑荷值的下标至少应该相差 2。

④如果不满足两组光束之间的拓扑荷值和阶数之间的关系,那么导致的结果仅仅是只增加了光强图案的大小,并不能改变形状。

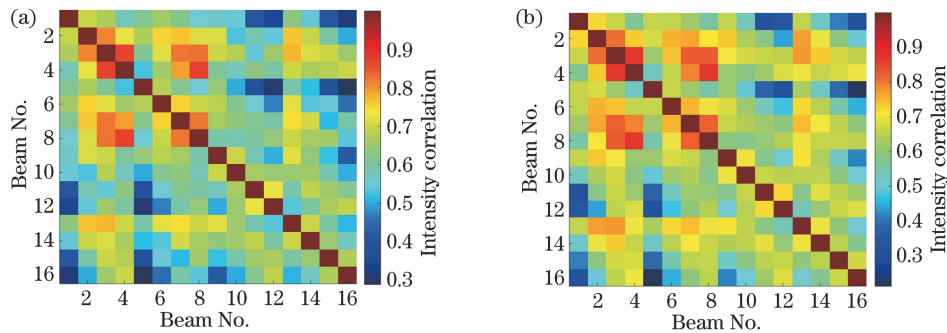


图 6 16 种叠加后的光强的相关性。(a) 光束组 $\{U_{0,4}, U_{0,6}, U_{0,8}, U_{0,10}\}$ 和 $\{U_{0,2}, U_{0,3}, U_{1,2}, U_{1,3}\}$ 组合;

(b) 光束组 $\{U_{0,4}, U_{0,6}, U_{0,8}, U_{0,10}\}$ 和 $\{U_{0,-2}, U_{0,-3}, U_{1,2}, U_{1,3}\}$ 组合

Fig. 6 16 kinds of superimposed light intensity correlations. (a) Beam groups $\{U_{0,4}, U_{0,6}, U_{0,8}, U_{0,10}\}$ and $\{U_{0,2}, U_{0,3}, U_{1,2}, U_{1,3}\}$; (b) beam groups $\{U_{0,4}, U_{0,6}, U_{0,8}, U_{0,10}\}$ and $\{U_{0,-2}, U_{0,-3}, U_{1,2}, U_{1,3}\}$

2.4 大气湍流

大气湍流引起的光强信号衰落严重影响无线光通信性能。OAM 复用光通信在自由空间传输时,由于大气湍流的相位扰动^[19],不同 OAM 复用光束在大气湍流信道中传输,光束的光强会随着大气折射率在空间和时间上的变化而发生随机变化,从而影响了通信系统的性能,导致接收端接收到的光强

之间可能会发生串扰^[20]。

大气湍流引起的相位波动会转换为振幅波动,导致相机在接收端捕获的图像质量下降,从而导致解调精度下降。为了准确分析 OAM 复用光束在大气湍流中受到的影响,可以在传播路径上增加一系列随机相位屏来模拟,每一个相位屏都可以看作是调节光束相位的薄片^[21]。相位屏^[22]可以被描述为

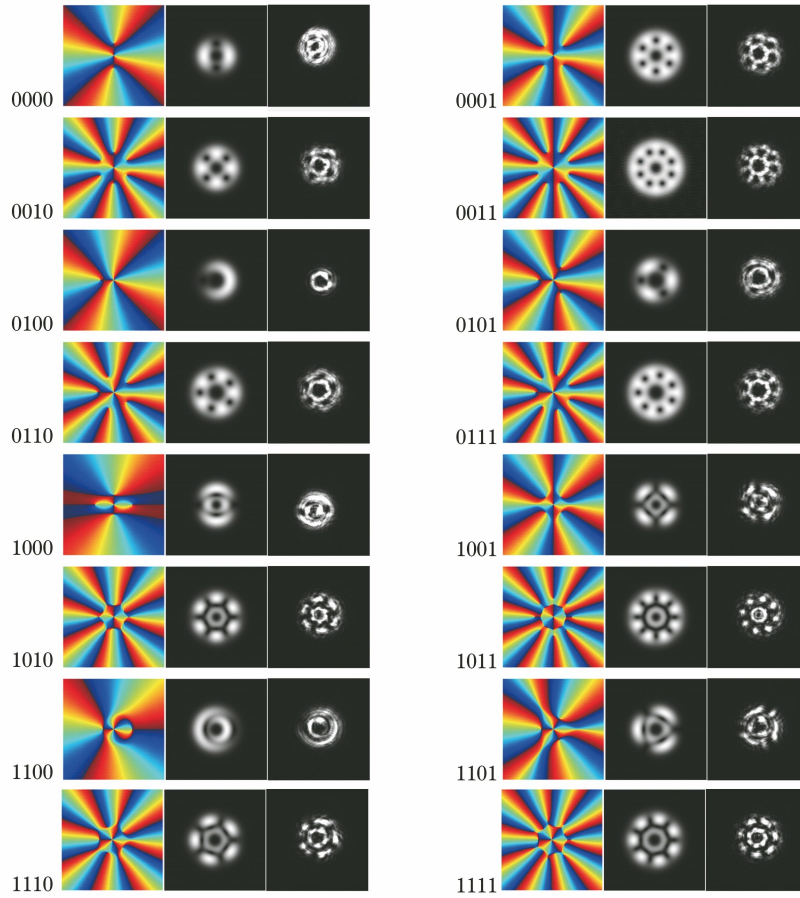


图 7 16 个符号所对应的相位分布图。左边为相位图,中间为 $z=0$ m 处的理论仿真图,右边为 $z=1$ m 处 CCD 相机记录的光强图

Fig. 7 Phase distribution diagrams corresponding to 16 symbols. The left side represents the phase diagrams, the middle represents the theoretical simulation diagrams at $z=0$ m, and the right side is the light intensity diagrams recorded by the CCD camera at $z=1$ m

$$\varphi(x, y) = \mathcal{F}\left\{C\left(\frac{2\pi}{N\Delta x}\right)\left\{2\pi(k_x^2 + k_y^2)\Delta z \times \exp\left(\frac{k_x^2 + k_y^2}{k_l^2}\right)\left(k_x^2 + k_y^2 + \frac{1}{L_0^2}\right)^{-11/6} \times 0.033C_n^2\left[1 + 1.802\sqrt{\frac{k_x^2 + k_y^2}{k_l^2}} - 0.254\left(\frac{k_x^2 + k_y^2}{k_l^2}\right)^{-7/12}\right]^{-1/2}\right\}\right\}, \quad (6)$$

式中: $\mathcal{F}\{\cdot\}$ 为傅里叶变换符号; N^2 为网格元素的数量; C 为 $N \times N$ 维均值为 0、方差为 1 的复随机变量; Δx 为网格间距; k_x 为 x 方向上的波数, k_y 为 y 方向上的波数; Δz 为相位屏之间的间隔; $k_l = 3.3/l_0$, l_0 为大气湍流的内尺度; L_0 为大气湍流的外尺度; C_n^2 为大气湍流折射率结构常数。参数的选取为 $\Delta z = 200$ m, $N = 300$, $L_0 = 50$ m, $l_0 = 0.03$ m, $\Delta x = 0.06$ cm。最终相位屏的数量多少取决于传输距离和 Δz 。计算机模拟产生的大气湍流相位如图 8 所示。图 9 是 $C_n^2 = 1 \times 10^{-17}$ 和 $C_n^2 = 1 \times 10^{-14}$ 强度大气湍流下的光强图。

3 信号解调

3.1 卷积神经网络

CNN 广泛用于图像的分类和识别,有着成熟的应用,因此在对接收端光强进行识别中使用 CNN 对光强进行分类。在接收端,使用 CCD 相机记录下光强值,使用一个基于 CNN 的图像识别器直接识别 CCD 相机捕获的光强信息图。目前可以考虑的比较流行的 CNN 架构有 AlexNet^[23]、VGGNet^[24]、ResNet^[24]、VGG16^[25]、VGG19^[25] 等,由于所使用的训练集比较简单,识别数目只有 16 种,较简单的框架可以很好地满足精度的要求,较复杂的 CNN 架

构对解调的实验结果影响并不是很大。CNN 框架的复杂度越高,那么对解调所使用的硬件的要求也

越高,消耗的资源也越多。因此选择 VGG16 框架进行光强图像的识别,总体的结构如图 10 所示。

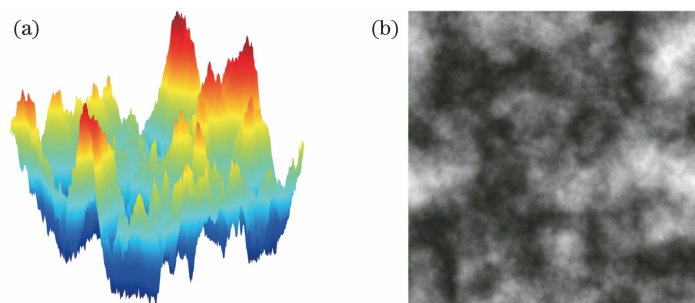


图 8 $C_n^2=1\times 10^{-14} \text{ m}^{-2/3}$ 情况下的大气湍流相位仿真图。(a) 3d 仿真;(b) 相位屏

Fig. 8 Atmospheric turbulence phase simulation diagram at $C_n^2=1\times 10^{-14} \text{ m}^{-2/3}$. (a) 3D simulation; (b) phase screen

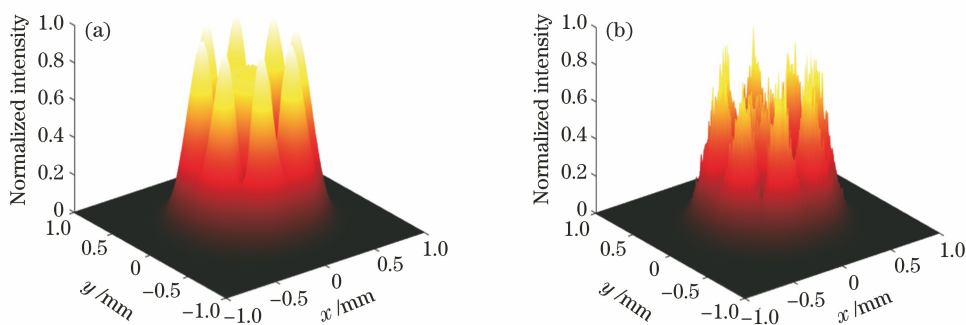


图 9 不同大气湍流情况下的光强图。(a) $C_n^2=1\times 10^{-17} \text{ m}^{-2/3}$; (b) $C_n^2=1\times 10^{-14} \text{ m}^{-2/3}$

Fig. 9 Light intensity diagrams under different atmospheric turbulence conditions.

(a) $C_n^2=1\times 10^{-17} \text{ m}^{-2/3}$; (b) $C_n^2=1\times 10^{-14} \text{ m}^{-2/3}$

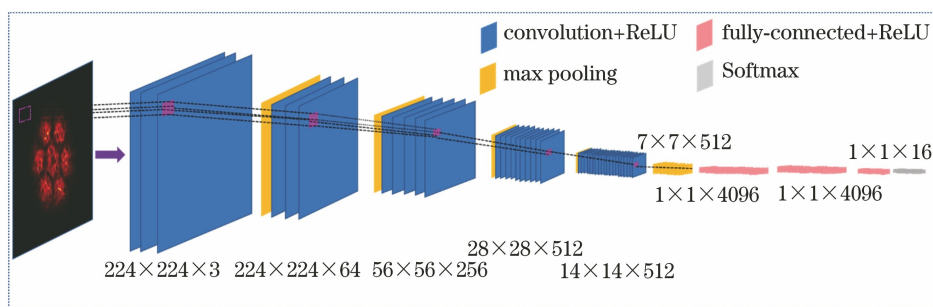


图 10 VGG16 模型结构图

Fig. 10 Structure diagram of VGG16 model

VGG16 模型一共包含 13 个卷积层 (convolutional layer)、3 个全连接层 (fully-connected layer)、5 个池化层 (pool layer)。其中卷积层和全连接层具有权重系数,也称为权重层,训练的过程就是不断修改权重系数,使预测结果更加准确。在 VGG16 模型中,通过适应大小操作将输入图片的尺寸变成符合网络结构的 224×224 ;通过卷积获取图像特征,池化层去除冗余信息,压缩图像特征;2 个全连接层由 4096 ($1\times 1\times 4096$) 个神经元节点组成,为了适应自制的数据集,需要修改输出网络

的结构和大小;需要分类的数据集有 16 类,因此需要修改输出大小至 $1\times 1\times 16$,所以最后一个全连接层与输出层 (16 个节点对应 16 个输出) 完全连接。在卷积层和全连接层中使用的所有激活函数都是整流线性单元 (ReLU)^[26],选择 $L = -\sum_{i=1}^N y_i' \log(y_i)$ 作为损失函数,将整个训练数据集分成多个批次进行训练, y_i 和 y_i' 分别表示第 i 批次实际输出和期望输出。通过训练可以创建输入图像和输出图像之间的映射关系,最终通过训练好的 CNN 接收器,从 CCD 捕捉到的图像中获得对应的光强信息。

选择 VGG16 模型的好处是,网络结构相对简单,对于数据集较少的情况,通过预训练模型可以提高 CNN 训练的速度,加快网络收敛速度。最终将训练好的网络模型的参数保存到网络中,通过网络模型可以得到最终的输出结果。

3.2 训练接收器

使用具有相同结构和大小的测试集,每一个符

号的训练集有 150 张左右的图片,每一个符号的测试集有 75 张左右的图片,通过改变大气湍流强度(湍流强度最小为 $1 \times 10^{-17} \text{ m}^{-2/3}$,最大为 $1 \times 10^{-13} \text{ m}^{-2/3}$,每一段传输距离中湍流强度从最小值改变到最大值)和传输距离(0~1000 m,每隔 200 m 记录一次光强信息),可以得到测试样本和训练样本,整体的样本如图 11 所示。

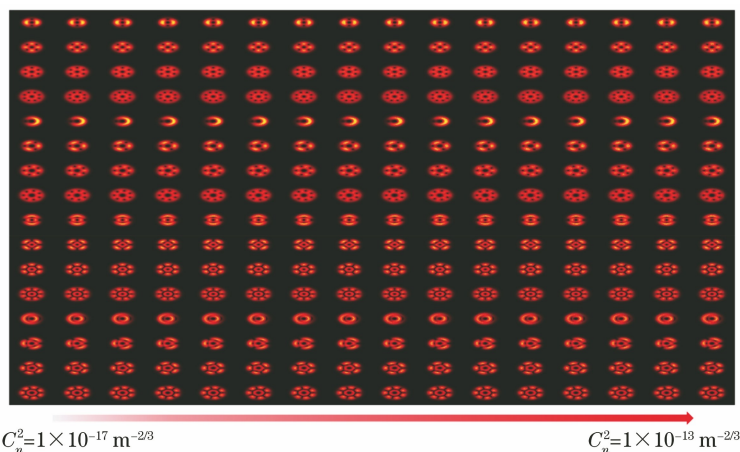


图 11 训练数据集

Fig. 11 Training data set

将训练数据集输入到 CNN 模型中,经过 20 轮的训练,精度达到要求,保存训练模型的参数,接收到的数据经 CNN 输出预测结果,根据结果得到最终的数据,还原原始信息。实验测试结果如图 12 所示。

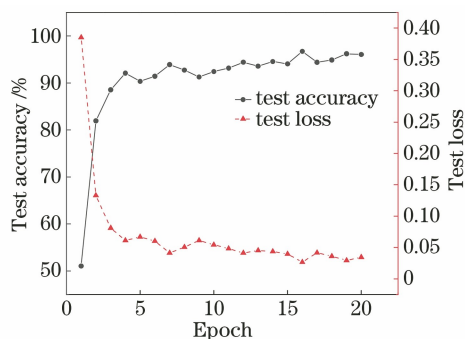


图 12 训练过程中的测试精度和测试损失

Fig. 12 Test accuracy and test loss during training process

根据图 12 可以得到,20 次的训练后,输出的精度都保持在 96% 以上,CNN 解调器能够很好地识别出图片的信息。对于湍流比较强的环境,由于光强受大气湍流的影响衰减较大,各个符号花瓣数目之间产生了较大干扰,无法准确识别光强图案所表示的信息。对于光强图像识别而言,成熟的 CNN 技术能够很好地提高图案的识别准确率,越来越多的领域中都使用了 CNN 技术进行目标检测和识

别。相比较之前的检测方法,CNN 技术在效率和准确度方面都有了显著提升。无论是干涉方法检测还是衍射方法检测,都与光束的波前相位密切相关,相位极易受到大气湍流的影响,大气湍流只是影响部分光强值的衰减,对光强图像整体的影响相对较小。

4 结 论

主要提出一种基于多进制的 OAM 调制编码传输方法。该方法利用光强信息识别符号,通过 CNN 进行光强分类,能够准确获得光强所代表的信息,即使在大气湍流环境下也能够有很好的识别率,最终识别出符号所代表的信息。所提多路复用在理论上可以推广到拓扑荷值更大、阶数更高的拉盖尔-高斯光束,但是由于实验设备的精度所限,对于具有更高阶数、更高拓扑荷值的拉盖尔-高斯光束,在远场衍射的过程中利用 CCD 相机记录的光强信息时,并不能很好地辨别出原始信息;但是理论上可以推广到更高阶数的 OAM 光通信。这种复用方式能够很好地提高系统容量,在光通信领域有着很好的应用价值。

参 考 文 献

- [1] Lee E J, Chan V W S. Part 1: optical communication over the clear turbulent atmospheric channel using

- diversity [J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2004, 22(9): 1896-1906.
- [2] Wang F, Liu X L, Cai Y J, et al. Propagation of partially coherent beam in turbulent atmosphere: a review [J]. *Progress in Electromagnetics Research*, 2015, 150: 123-143.
- [3] Lajunen H, Saastamoinen T. Propagation characteristics of partially coherent beams with spatially varying correlations [J]. *Optics Letters*, 2011, 36(20): 4104-4106.
- [4] Berman G P, Bishop A R, Chernobrod B M, et al. Suppression of intensity fluctuations in free space high-speed optical communication based on spectral encoding of a partially coherent beam [J]. *Optics Communications*, 2007, 280(2): 264-270.
- [5] Xiao X F, Voelz D. Wave optics simulation of partially coherent and partially polarized beam propagation in turbulence [J]. *Proceedings of SPIE*, 2009, 7464: 74640T.
- [6] Avramov-Zamurovic S, Nelson C. Experimental study: underwater propagation of polarized flat top partially coherent laser beams with a varying degree of spatial coherence [J]. *Optics Communications*, 2018, 424: 54-62.
- [7] Gibson G, Courtial J, Padgett M J, et al. Free-space information transfer using light beams carrying orbital angular momentum [J]. *Optics Express*, 2004, 12(22): 5448-5456.
- [8] Guo Z Y, Gong C F, Liu H J, et al. Research advances of orbital angular momentum based optical communication technology [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2020, 47(3): 190593.
郭忠义, 龚超凡, 刘洪郡, 等. OAM 光通信技术研究进展 [J]. *光电工程*, 2020, 47(3): 190593.
- [9] Zhao W, Zhao M M, Wang S, et al. Influence of near ground phase vortex on correction of adaptive optics [J]. *Chinese Journal of Quantum Electronics*, 2020, 37(4): 466-476.
赵旺, 赵孟孟, 王帅, 等. 近地面相位涡旋对自适应光学校正的影响 [J]. *量子电子学报*, 2020, 37(4): 466-476.
- [10] Boyd R W, Rodenburg B, Mirhosseini M, et al. Influence of atmospheric turbulence on the propagation of quantum states of light using plane-wave encoding [J]. *Optics Express*, 2011, 19(19): 18310-18317.
- [11] Wang Z X, Zhang N, Yuan X C, et al. High-volume optical vortex multiplexing and de-multiplexing for free-space optical communication [J]. *Optics Express*, 2011, 19(2): 482-492.
- [12] Guo S F, Liu K, Sun H X, et al. Generation of higher-order Laguerre-Gaussian beams by liquid crystal spatial light modulators [J]. *Acta Sinica Quantum Optica*, 2015, 21(1): 86-92.
郭帅凤, 刘奎, 孙恒信, 等. 利用液晶空间光调制器产生高阶拉盖尔高斯光束 [J]. *量子光学学报*, 2015, 21(1): 86-92.
- [13] 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.
- [14] Indebetouw G, Korwan D R. Model of vortices nucleation in a photorefractive phase-conjugate resonator [J]. *Journal of Modern Optics*, 1994, 41(5): 941-950.
- [15] Shao X L, Ma J S, Hou L X, et al. Generation of high-order Hermite-Gaussian modes directly in gas lasers [J]. *Optical Instruments*, 2013, 35(5): 20-23.
邵晓丽, 马军山, 侯乐鑫, 等. 气体激光器自激励产生各高阶厄米-高斯光束 [J]. *光学仪器*, 2013, 35(5): 20-23.
- [16] He D, Yan H W, Lü B D, et al. Evolution and composite optical vortices of Hermite-Gaussian vortex beams [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2009, 36(8): 2023-2029.
何德, 闫红卫, 吕百达, 等. 厄米-高斯涡旋光束形成的合成光涡旋及演化 [J]. *中国激光*, 2009, 36(8): 2023-2029.
- [17] Zhang M M. Study on the propagation characteristics of off-axis vortex beams [D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2014.
张明明. 离轴涡旋光束的传输特性研究 [D]. 南京: 南京理工大学, 2014.
- [18] Nowack R L. A tale of two beams: an elementary overview of Gaussian beams and Bessel beams [J]. *Studia Geophysica et Geodaetica*, 2012, 56(2): 355-372.
- [19] Zhao S M, Leach J, Gong L Y, et al. Aberration corrections for free-space optical communications in atmosphere turbulence using orbital angular momentum states [J]. *Optics Express*, 2012, 20(1): 452-461.
- [20] Liu M W, Li Y C. Propagation of OFDM-OAM optical signal in atmospheric turbulence [J]. *Acta Optica Sinica*, 2019, 39(7): 0706002.
刘旻雯, 李迎春. OFDM-OAM 光信号在大气湍流中的传输 [J]. *光学学报*, 2019, 39(7): 0706002.
- [21] Zhang N N, Shan X, Zhang Y G, et al. Simulated experiment of the light intensity influenced by non-Kolmogorov turbulence [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2018, 47(6): 0601002.
张娜娜, 单欣, 张燕革, 等. Non-Kolmogorov 湍流

- 对光强影响的模拟实验 [J]. 光子学报, 2018, 47 (6): 0601002.
- [22] Andrews L C. An analytical model for the refractive index power spectrum and its application to optical scintillations in the atmosphere [J]. *Journal of Modern Optics*, 1992, 39(9): 1849-1853.
- [23] Smirnov E A, Timoshenko D M, Andrianov S N, et al. Comparison of regularization methods for ImageNet classification with deep convolutional neural networks[J]. *AASRI Procedia*, 2014, 6: 89-94.
- [24] He K M, Zhang X Y, Ren S Q, et al. Deep residual learning for image recognition [C] // 2016 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), June 27-30, 2016, Las Vegas, NV, USA. New York: IEEE Press, 2016: 770-778.
- [25] Simonyan K, Zisserman A. Very deep convolutional networks for large-scale image recognition[EB/OL]. (2015-04-10) [2020-12-10]. <https://arxiv.org/abs/1409.1556>.
- [26] Szegedy C, Vanhoucke V, Ioffe S, et al. Rethinking the inception architecture for computer vision [C] // 2016 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), June 27-30, 2016, Las Vegas, NV, USA. New York: IEEE Press, 2016: 2818-2826.