

文章编号:1001-5078(2024)06-0885-06

· 激光应用技术 ·

利用涡旋光轨道角动量的8进制数据传输

黎芳,李润豪,杨傲,申辰
(北京建筑大学电气与信息工程学院,北京 102612)

摘要:提出了一种基于涡旋光轨道角动量特性与8进制数据编码相结合的数据传输方法。原理为将传输数据进行8进制编码,并将每个比特映射为不同大小的拓扑荷值,使用轨道角动量键控法得到相应拓扑荷值的涡旋光,并使用复二重振幅光栅进行拓扑荷检测从而得到相应的编码数据并最后进行反向解码。通过仿真验证了,相比于普通的二进制光传输涡旋光8进制数据传输具有更大的信道容量。最后通过具体实验得到实际的涡旋光九宫格图像并进行分析,验证了涡旋光8进制数据加密传输的可行性。

关键词:光通信;涡旋光;8进制数据传输;轨道角动量

中图分类号:E963;TN919 **文献标识码:**A **DOI:**10.3969/j.issn.1001-5078.2024.06.007

Octal data transmission utilizing orbital angular momentum of the vortex light

LI Fang, LI Run-hao, YANG Ao, SHEN Chen

(School of Electrical and Information Engineering, Beijing University of Civil Engineering and Architecture, Beijing 102612, China)

Abstract: In this paper, a data transmission method based on the combination of the characteristics of the angular momentum of the vortex optical orbit and octal data encoding is proposed. The principle is to encode the transmitted data in octal and map each bit into different sizes of topological charges, use orbital angular momentum keying method to obtain the corresponding topological charge of the vortex light, and utilize the double amplitude grating to detect the topological charge so as to obtain the corresponding encoded data and finally carry out the reverse decoding. The simulation results show that compared with conventional binary optical transmission, vortex optical octet data transmission has a larger channel capacity. Finally, the actual scroll light grid image is obtained and analyzed through the concrete experiment, and the feasibility of encrypted transmission of scroll light 8-bit data is verified.

Keywords: optical communication; vortex light; octal data transmission; orbital angular momentum

1 引言

1992年,Allen等人提出了在光束中轨道角动量(Orbital Angular Momentum, OAM)独立于自旋角动量,当光束带有 $\exp(ik\theta)$ 形式的相位因子时,其每个光子所携带的OAM均为 \hbar ^[1]。涡旋光的特性在

光通信^[2-3]、光学微操控^[4-5]、光学测量^[6-7]、激光加工和材料处理^[8]等领域都有着重要的应用。

涡旋光具有大小正负不同拓扑荷数(Topological Charge, TC)^[9],理论上其TC可以取任意值,因此可以实现多元编码,从而提高通信效率。目前,

基金项目:国家自然科学基金项目(No. 41801229);北京市属高校基本科研业务费项目(No. X20153);北京建筑大学建大英才培养计划项目(No. JDYC20200328)资助。

作者简介:黎芳,女,博士,副教授,主要研究方向为涡旋光束的传输特性及其在通信、遥感、导航、定位等领域的应用。
E-mail: lifang@bucea.edu.cn

收稿日期:2023-10-01; **修订日期:**2023-10-30

OAM 光通信技术的研究方向主要包括 OAM 键控和 OAM 复用。涡旋光通信的基本原理是:其在空间传播过程中,每个光子的角动量一直保持不变^[10],直到被接收端的探测器接收到,最后将接收到的信号进行解码处理,还原出原始信息。涡旋光通信具有速率高、抗干扰性强、多元编码等优势,可以应用于高速传输、保密通信^[11]等领域。目前,利用涡旋光进行的编码研究主要包括:涡旋相位编码^[12];基于深度学习的涡旋光通信编码^[13-14]以及多路涡旋光束的复用/解复用^[15]等。但这些方法在应用 TC 值较大的涡旋光进行远场传输时,会更容易受到自然噪声的干扰^[16]且信道容量普遍偏小。本文使用最常见的空间光调制器(Spatial Light Modulator, SLM)生成涡旋光及轨道角动量检测装置^[17]实现了 8 进制数据传输,其最大的 TC 绝对值仅为 4,在远场检测中受到噪声干扰较小,精度较高。通过最终算法对 CCD 接收的涡旋光图像信息进行解码分析,从而完成数据的传输,加大信道容量。

2 基本原理

首先使用 He-Ne 激光器产生高斯光束,在经过 SLM1 所映射的不同 TC 值的叉形光栅衍射后产生特定 TC 值的涡旋光,此过程称之为 OAM 键控(OAM-SK)通信,携带信息的涡旋光束经过空间传输后,照射到 SLM2 映射的复合叉形光栅衍射后形成最终所需要的涡旋光九宫格,使用计算机对此涡旋光九宫格进行分析,最终确定携带信息的涡旋光束的 TC 值,实现涡旋光的生成与检测。涡旋光 8 进制数据传输在涡旋光生成与检测的基础上,需要根据传输需求进行传输协议的设定,将所需要传输的信息转换为 8 进制数据并添加校验位生成码元,将码元中的每位比特依次使用 SLM1 映射出与之对应的叉形光栅,在高斯光照射后生成带有特定数据的涡旋光束,实现数据的传输,整体实验光路图如图 1 所示。

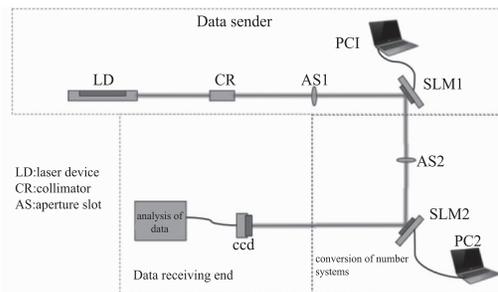


图 1 整体实验光路图

Fig. 1 Overall experimental optical path diagram

2.1 利用空间光调制器生成涡旋光并检测拓扑荷值

在 SLM1 上映射出叉形光栅,当高斯光束经过其衍射后即可得到特定拓扑荷的涡旋光。复合叉形光栅为 y 方向与 x 方向叉形光栅的叠加(例如 x 方向 $l=1$, y 方向的 $l=3$),使用高斯光束照射就可以得到一个 3×3 的涡旋光九宫格形式的衍射图,如图 2 所示。

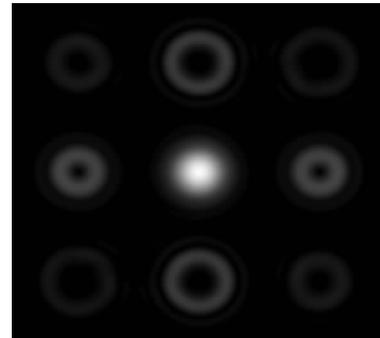


图 2 涡旋光九宫格

Fig. 2 Vortex light grid

涡旋光 TC 值不为 0 时其光强均为暗中心的圆环,而 TC 值为 0 的光束为中心亮斑。当使用 $l=m$ 的涡旋光照射复合叉形光栅时,所生成的涡旋光九宫格的每个衍射级上的 TC 值都会随之增加 m ,当九宫格中有与 m 符号相反,大小相同的涡旋光衍射级时,其会与 m 相抵消,从而再此衍射级位置出现亮斑如图 3 所示。因此只需要确定生成的涡旋光九宫格中出现中心亮斑的位置就可以逆向推断出照射复合叉形光栅的涡旋光 TC 值的大小,实现涡旋光 TC 值的检测。

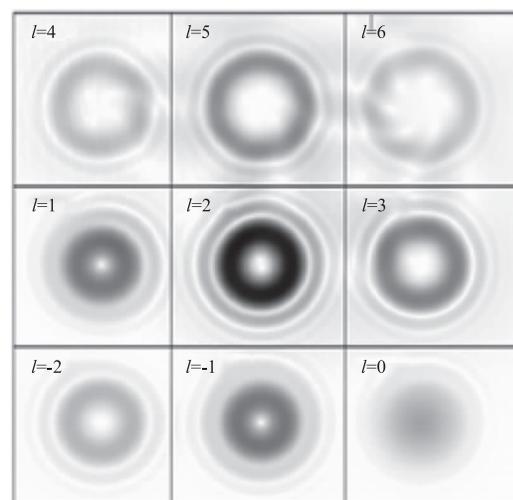


图 3 $l=2$ 的涡旋光生成的九宫格

Fig. 3 The grid generated by the vortex light of $l=2$

2.2 8进制传输协议以及通信原理

本文使用的传输协议为“校验位+传输的信息+校验位”，在九宫格中有9个TC值不同的涡旋光，取其中TC值等于4作为校验位，即当计算机检测到此TC值出现，就开始或结束记录数据。计算机中所有的字符都以ASCII码形式存储，例如大写字母“A”，它的ASCII为“01000001”，在进行数据传输之前需要将2进制的ASCII码转换为8进制数据，之后使用十进制算法将8进制的每个比特值减4得到传输数据，并将此数据与两个校验位组合为码元。例如字母“A”的传输码元为“4 -3 -4 -3 4”；最后根据所设定的数据传输速率将码元中的比特依次以叉形光栅的拓扑荷值大小形式呈现到空间光调制器上，以便可以生成携带特定信息的涡旋光束。

在数据接收端分析生成的涡旋光九宫格图，得到涡旋光TC值的大小，当TC值为4时开始进行数据接收，并将接收的每位比特进行解码（以十进制形式加4）后存入解码码元中，当再次接收到TC值为4时，停止码元存放并对照密码本对码元进行解码，一次数据读取结束进入到等待，直到再次检测到TC值为4时再次进入读取解码。

在单拓扑荷编码形式下系统的信道容量表达式为：

$$\begin{aligned}
 C &= \max[H(x) - H(x|y)] \\
 &= \max\left[-\sum_{x_i} P(x_i) \log_2 P(x_i) - \right. \\
 &\quad \left. (-\sum_{y_j} \sum_{x_i} P(x_i, y_j) \log_2 P(x_i|y_j))\right] \quad (1)
 \end{aligned}$$

式中， $P(x_i)$ 为发射 x_i 信号的概率， $P(x_i, y_j)$ 为发射 x_i 信号与接收 y_j 信号的联合概率， $P(x_i|y_j)$ 为给定接收 y_j 信号得到发射 x_i 信号的条件概率，令 $K = \{-L, \dots, L\}$ ：

$$P(x_i) = \frac{1}{2L+1} \{x_i \in K\} \quad (2)$$

$$P(y_j|x_i) = P(l|l_0) \{x_i \in K\} \quad (3)$$

$$P(x_i, y_j) = P(x_i)P(y_j|x_i) = \frac{P(l|l_0)}{2L+1} \quad (4)$$

$$P(x_i|y_j) = \frac{P(l|l_0)}{\sum_{x_i} P(l|l_0)} \quad (5)$$

式中， $P(l|l_0)$ 为当发出的涡旋光TC值为 l_0 时，接收端的螺旋普分布中TC值为 l 的分量占比。将式

(2)~(5)代入式(1)得到：

$$\begin{aligned}
 C &= \log_2(2L+1) + \sum_{y_j} \sum_{x_i} \frac{P(l|l_0)}{2L+1} \cdot \\
 &\quad \log_2\left(\frac{P(l|l_0)}{\sum_{x_i} P(l|l_0)}\right) \quad (6)
 \end{aligned}$$

3 仿真

仿真中以传输汉字“你”为例，八进制传输的数据比特为“4 7 5 4 0”，在此基础上进行编码并添加校验位，得到需要传输的码元为“4 0 3 1 0 -4 4”将码元的每一位依次做为TC值并生成叉形光栅。在SLM2上映射出需要的“1+3”复合叉形光栅，经过衍射和空间传播后，在接收屏上即可依次呈现出九宫格图，根据图像信息分析得到传输的数据，在经过解码可得到想要的信息。将得到的九宫格图拆分为3部分，如图4所示，对每一部分进行光强分析处理得到如图5所示的光强图。之后进行分析判断是否存在符合高斯分布的点以及位置。若检测到得到 $l=0$ 的涡旋光则停止检测并记录此涡旋光位置判断出生成此九宫格的涡旋光TC值。

由于涡旋光光强图在两个波峰之间会出现明显的波谷，但如图6(b)所示的光强图在坐标-0.005至0.005之间的光强分布符合高斯光束分布，使用

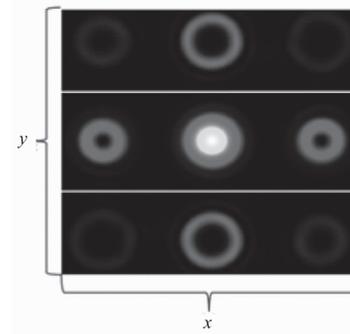
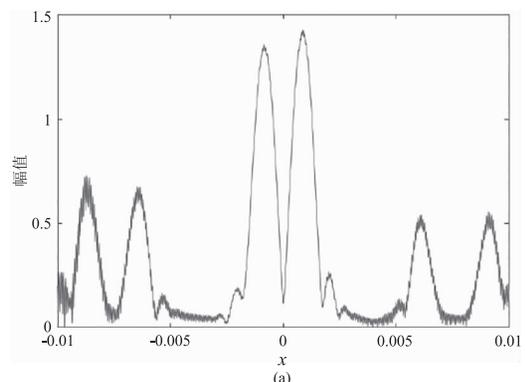


图4 九宫格拆分

Fig. 4 Division of nine chambers



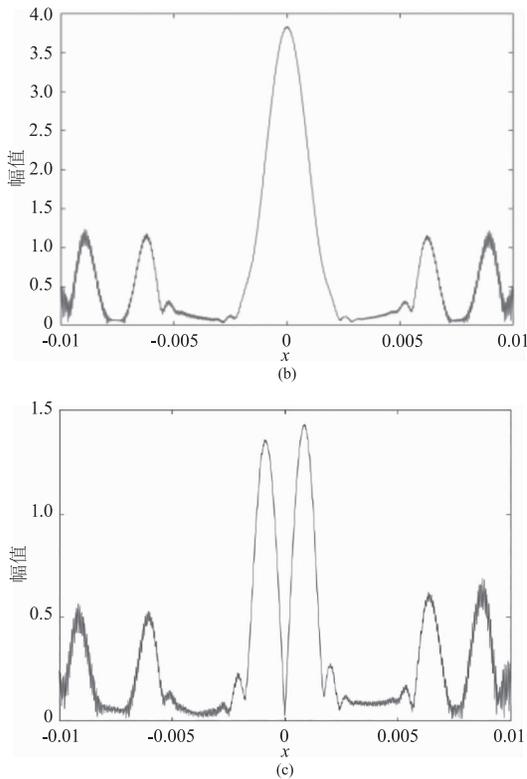


图5 区块光强图

Fig. 5 Block light intensity diagram

不同拓扑荷的涡旋光照射复二重振幅光栅生成的九宫格中拓扑荷等于0的涡旋光位置均不相同,所以根据此位置就可以知道相应的拓扑荷值。将得到的数据进行反向解码,取出校验位中包含的数据进行解码得到原本信息。

将涡旋光8进制数据传输方法与普通二进制传输进行固定数据传输时间比较,使用波长为632.8 nm束腰半径为0.005 m的激光光束在加入均值为零方差为0.3的高斯白噪声,传输距离为1 km的仿真结果结果如表1所示,在根据表格结果可以看出涡旋光8进制传输是普通2进制传输的2倍左右,正确率相差不多。

表1 固定字符传输速度比较

Tab. 1 Comparison of fixed character transmission speeds

Transmission speed comparison	binary system	Vortex octal transmission
Transfer 100 letters time/s	14.38	7.23
Transfer time of 100 characters/s	42.37	20.22
Transfer 100mixed times/s	48.94	22.61
Comprehensive accuracy/ %	99.72	99.45

同等情况下计算信道容量,令 $K = \{-4, \dots, 4\}$ 则公式(6)变为:

$$C = \log_2 9 + \frac{1}{9} \sum_{y_j} \sum_{x_i} P(l|l_0) \cdot \log_2 \left(\frac{P(l|l_0)}{\sum_{x_i} P(l|l_0)} \right) \quad (7)$$

计算得到在有外加噪声的情况下使用涡旋光8进制数据传输,其信道容量C为1.7324 bit/符号,而在同等情况下普通的二进制传输的信道容量仅为0.9768 bit/符号,不难发现发送的涡旋光的TC值的集合K越大信道容量也就越大,在减少了外加噪声的方差到0.01时涡旋光8进制传输的信道容量增加为1.7754 bit/符号,如图6所示。

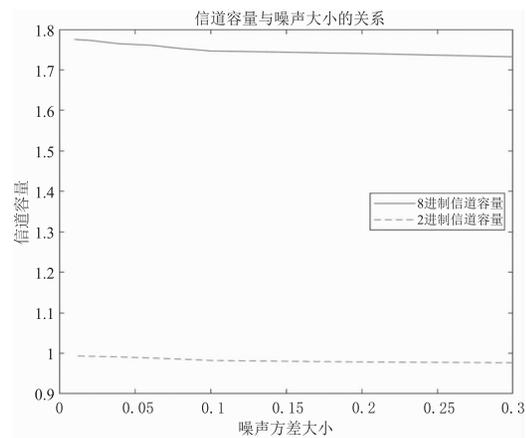


图6 信道容量与噪声的关系图

Fig. 6 Relationship between channel capacity and noise

由此可以得到:在同等噪声情况下发送的拓扑荷集合越大信道容量就越大,当噪声减少时同一进制下的数据传输信道容量也会变大。

4 实验

由于经过光栅衍射后所形成的衍射图样的光强不一,所以为了使结果更明显,可以适当改变光栅的亮度以改变不同部位的反射值大小。实验使用了波长为632.8 nm束腰半径为0.005 m的激光光束,SLM1到SLM2之间的距离为1 m。首先使用SLM1生成拓扑荷数一定的涡旋光并截取其+1级亮纹作为数据传输光。在数据发送端将已经进行处理的数据以特定拓扑荷值的叉形光栅图像显示在SLM1上,生成所需要的涡旋光,经过空间的传播后照射在SLM2上的复合叉形光栅,得到了所需要进行分析的涡旋光九宫格,如图7所示。

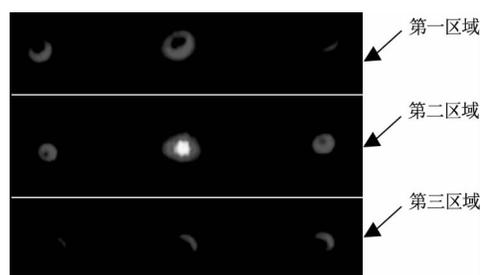


图7 涡旋光九宫格分割图

Fig. 7 Segment diagram of vortex light

将涡旋光九宫格进行拆分对不同区块的图像进行光强分析,得到了如图8所示的光强分布图,由于实验中存在仪器误差及自然光干扰,使得实验光强图出现误差,但也可以发现图8(a)、(c)中的6个光强分布均在两个相对的波峰之间出现了明显的波谷,符合 TC 值不为零的涡旋光特征,图8(b)中在坐标 -500 到 500 之间的光强分布出现平顶光特征,所以可以判定其为拓扑荷等于0的位置,分析位置即可得到传输数据的涡旋光 TC 值为0。

在CCD读取到有效的光强图后,将其传输到MATLAB中进行光强数据分析,之后进行反向解码,即可得到传输的信息。在自然光较低,粉尘较少的情况下,使用波长为 632.8 nm 束腰半径为 0.005 m 的激光光束,进行8进制数据传输,当传输距离为 2 m ,SLM1的叉形光栅改变时间为 0.1 s/次 时进行100个字符的数据传输,其综合正确率为 99.86% 接近 100% ,出现错误的原因在MATLAB中判断 TC 值等于零的位置时由于实验仪器存在误差,使得取图像 y 坐标时无法兼顾同一区域内的三个光环中心在同一水平位置,使得提前检测到 TC 值等于零的位置,出现错误。

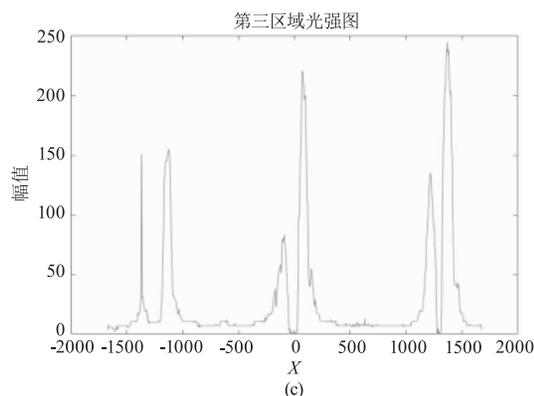
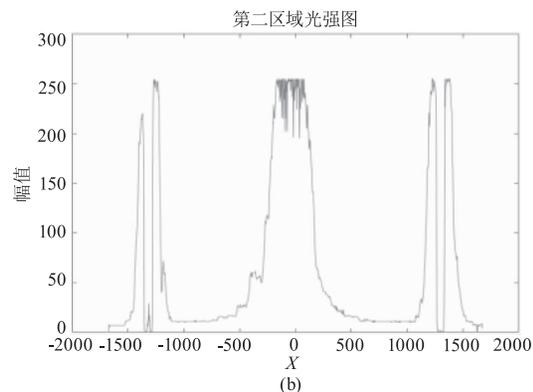
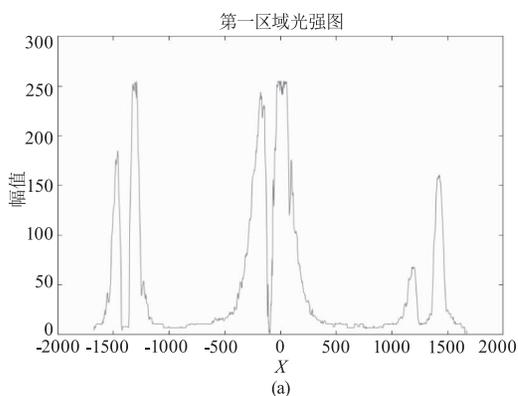


图8 区块光强分析

Fig. 8 Segment diagram of vortex light

5 结论

本文首先介绍涡旋光的生成与拓扑荷的检测,并简述了如何利用涡旋光轨道角动量的特性与8进制的巧妙结合实现数据传输,涡旋光8进制传输方法相比于普通二进制传输有着:信道容量大、传输同等信息量时时间短、正确率却基本相同等优点。最终通过实验验证了此方法用于数据传输的可行性。8进制涡旋光数据传输可以用来实现高维量子信息的传输,也可以将数据编码的密度大幅度提高。涡旋光的轨道角动量理论上可以取无穷多的值,这也为以后进一步提升涡旋光传输信息的信息量,实现16进制乃至32进制数据传输提供了基础,未来可用于大容量信息的快速传输,且其加密性将会有进一步提升。这对光学信息传输速率以及传输信息量的提高,光学信息的编码解码的操作等有着重要意义。

参考文献:

- [1] L Allen, M W Beijersbergen, R J C Spreeuw, et al. Orbital angular momentum of light and the transformation of Laguerre-Gaussian laser modes [J]. Physical Review A, 1992, 45(11): 8185-8189.
- [2] Jie Zhu, Kaicheng Zhu, Huiqin Tang, et al. Average inten-

- sity and spreading of an astigmatic sinh-Gaussian beam with small beam width propagating in atmospheric turbulence [J]. *Journal of Modern Optics*, 2017, 64 (18): 1915 – 1921.
- [3] Jian Wang, Jeng-Yuan Yang, Irfan M Fazal, et al. Terabit free-space data transmission employing orbital angular momentum multiplexing [J]. *Nature Photonics*, 2012, 6 (7): 488 – 496.
- [4] Liang Yansheng, Yao Baoli, Lei Ming, et al. Optical micro-manipulation based on spatial modulation of optical fields [J]. *Journal of Optics*, 2016, 36 (10): 43 – 56. (in Chinese)
梁言生, 姚保利, 雷铭, 等. 基于空间光场调控技术的光学微操纵 [J]. *光学学报*, 2016, 36 (10): 43 – 56.
- [5] Guangzong Xiao, Kaiyong Yang, Hui Luo, et al. Orbital rotation of trapped particle in a transversely misaligned dual-fiber optical trap [J]. *IEEE Photonics Journal*, 2016, 8 (1): 1 – 8.
- [6] Han Shize, Yang Dong, Hu Xiaoning, et al. Micro-displacement measurement based on interference of vortex beams and plane wave [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2022, 30 (17): 2058 – 2066. (in Chinese)
韩世泽, 杨栋, 胡晓宁, 等. 基于涡旋光与平面波干涉的微小位移测量 [J]. *光学精密工程*, 2022, 30 (17): 2058 – 2066.
- [7] Xia Haojie, Gu Rongrui, Pan Chengliang, et al. Signal processing method for displacement measurement interferometry using vortex beams [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2020, 28 (9): 1905 – 1912. (in Chinese)
夏豪杰, 谷容睿, 潘成亮, 等. 涡旋光位移干涉测量方法与信号处理 [J]. *光学精密工程*, 2020, 28 (9): 1905 – 1912.
- [8] Yuan Hongwei, Rao Shenglong, Wu Dong, et al. Fabrication and rotation driving of movable microstructures based on femtosecond laser [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2020, 28 (3): 584 – 590. (in Chinese)
袁宏伟, 饶生龙, 吴东, 等. 基于飞秒激光的可运动微结构加工与旋转驱动 [J]. *光学精密工程*, 2020, 28 (3): 584 – 590.
- [9] Svetlana N Khonina, Sergey V Karpeev, Muhammad A Butt. Spatial-light-modulator-based multichannel data transmission by vortex beams of various orders [J]. *Sensors*, 2021, 21 (2988): 2988.
- [10] Ma Shengjie, Hao Shiqi, Zhao Qingsong. Wavefront distortion correction of vortex beam based on improved SPGD algorithm [J]. *Journal of Optics*, 2021, 41 (6): 0601001. (in Chinese)
马圣杰, 郝士琦, 赵青松. 基于改进型 SPGD 算法的涡旋光波前畸变校正 [J]. *光学学报*, 2021, 41 (6): 0601001.
- [11] Li Yansong, Chen Jun, Fu Gangkun, et al. Measurement of topological charge of obstructed wandering vortex beams [J]. *Journal of Optics*, 2023, 43 (2): 10. (in Chinese)
李岩松, 陈君, 傅钢坤, 等. 障碍物遮挡下漂移涡旋光束拓扑荷数的测量 [J]. *光学学报*, 2023, 43 (2): 10.
- [12] Ke Xizheng, Guo Xinlong. Research of realizing optical phase information encode by using orbital angular momentum of light beam [J]. *Chinese Journal of Quantum Electronics*, 2015, 32 (1): 69 – 76. (in Chinese)
柯熙政, 郭新龙. 光束轨道角动量相位信息编码的研究 [J]. *量子电子学报*, 2015, 32 (1): 69 – 76.
- [13] Nan Jiuhang, Han Yiping. Dual-channel multiband vortex optical communication [J]. *Journal of Optics*, 2021, 41 (12): 1206001. (in Chinese)
南久航, 韩一平. 双路多进制涡旋光通信 [J]. *光学学报*, 2021, 41 (12): 1206001.
- [14] Li Tianyi, Li Ming, Zhou Mingou, et al. Signal detection in ACO-OFDM free-space optical communication systems based on deep learning [J]. *Journal of Optoelectronics · Laser*, 2023, 34 (1): 6. (in Chinese)
黎天翼, 黎明, 周明欧, 等. 基于深度学习的 ACO-OFDM 自由空间光通信中信号检测 [J]. *光电子·激光*, 2023, 34 (1): 6.
- [15] Su Mingyang, Zhang Xiaoke, He Yanliang, et al. OAM optical communication system based on multiple-valued optical vortex phase hologram [J]. *Optical Communication Technology*, 2017, 41 (7): 4. (in Chinese)
苏明样, 张小科, 贺炎亮, 等. 基于多值光学涡旋相息图的 OAM 光通信系统 [J]. *光通信技术*, 2017, 41 (7): 4.
- [16] Ge Xiaolu, Yue Xifu, Wang Benyi, et al. Beam spreading and phase singularities behavior of non-diffracting vortex beams through turbulent atmosphere [J]. *Journal of Optics*, 2019, 39 (9): 0901001. (in Chinese)
葛筱璐, 岳喜福, 王本义, 等. 湍流大气中无衍射涡旋光束的展宽及相位奇点的演化 [J]. *光学学报*, 2019, 39 (9): 0901001.
- [17] Peng Yiming, Xue Yu, Xiao Guangzong, et al. Spiral spectrum analysis and application of coherent synthetic vortex beams [J]. *Acta Physica Sinica-Chinese Edition*, 2019, 68 (21): 214206.