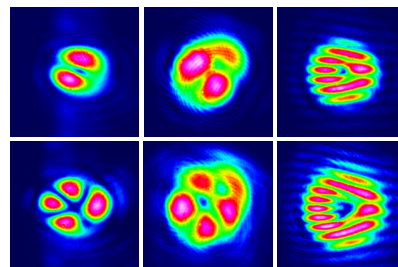




DOI: 10.12086/oe.2019.180386

OAM 光束短距离自由空间传输特性的实验研究

席瑞^{1,2}, 朱冰^{1,2*}¹中国科学技术大学电子工程与信息科学系, 安徽 合肥 230027;²中国科学院电磁空间信息重点实验室, 安徽 合肥 230027

摘要: 实验研究了光轨道角动量(OAM)光束的短距离自由空间传输特性。在实验装置中使用数字微镜器件(DMD)产生 OAM 光束, 传输距离为室内 0~50 m。在接收端使用空间光束模场分析仪测量传输后的 OAM 光束光强分布, 实验研究了不同传输距离下 OAM 光束的模场展宽效应, 并通过干涉法研究了传输对 OAM 光束相位分布特性的影响。在接收端使用一个单路 Sagnac 干涉仪对传输后 OAM 光束的各阶模式进行分离检测, 实验研究了不同距离下传输导致的 OAM 光束能量从产生的模式向临近各阶模式的迁移再分配。使用局部加热的方法模拟较强的大气湍流扰动, 实验研究了较强湍流对 OAM 光束模式特性的影响。实验结果表明, 在湍流扰动下, OAM 光束的拓扑荷值越大传输后模式纯度的劣化越严重。

关键词: 光轨道角动量; 自由空间传输; 数字微镜器件; Sagnac 干涉仪

中图分类号: TB872

文献标志码: A

引用格式: 席瑞, 朱冰. OAM 光束短距离自由空间传输特性的实验研究[J]. 光电工程, 2019, 46(6): 180386

Experimental study on short-distance free-space transmission characteristics of OAM beam

Xi Rui^{1,2}, Zhu Bing^{1,2*}¹Department of Electronic Engineering and Information Science, University of Science and Technology of China, Hefei, Anhui 230027, China;²Key Laboratory of Electromagnetic Space Information, Chinese Academy of Sciences, Hefei, Anhui 230027, China

Abstract: The short-distance free-space transmission characteristics of the optical orbital angular momentum (OAM) beam were experimentally studied. The transmission distance is 0~50 m indoors. A digital micromirror device (DMD) was used in the experimental setup to generate the OAM beam. At the receiver, a spatial beam analyzer was used to measure the intensity pattern of the OAM beam. The beam broadening effect of the OAM beam at different transmission distances was studied. The phase pattern of the OAM beam was studied by the interferometric method. At the receiver, a single path Sagnac interferometer (SPSI) was used to separate and detect the intensity of modes of the OAM beam. The effects of energy migration from the sending mode to the sideband modes of the OAM beam were studied. A heater was used to generate the strong turbulence to simulate the influence to the OAM beam mode transmission characteristics. The experimental results show that the OAM beam with large mode topological charge

收稿日期: 2018-07-17; 收到修改稿日期: 2018-10-25

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61377022)

作者简介: 席瑞(1992-), 男, 硕士研究生, 主要从事 OAM 光通信方面的研究。E-mail: xirui@mail.ustc.edu.cn

通信作者: 朱冰(1964-), 男, 博士, 教授, 主要从事光器件、光传感技术、空间光通信、量子接收机等方面的研究。

E-mail: zbing@ustc.edu.cn

has more deterioration of the mode purity after transmission in the strong turbulence.

Keywords: optical orbital angular momentum; free-space transmission; digital micromirror device; Sagnac interferometer

Citation: Xi R, Zhu B. Experimental study on short-distance free-space transmission characteristics of OAM beam[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2019, 46(6): 180386

1 引言

轨道角动量(Orbital angular momentum, OAM)光场由于具有独特的光强和相位分布^[1],近年来已经在诸多领域得到了广泛应用,例如微机械系统^[2],光镊技术^[3],超高分辨率的显微成像技术^[4],高维量子信息处理^[5],自由空间光通信等^[6-7]。光 OAM 作为一个极具潜力的自由度,理论上可以提供无限多的具有不同拓扑荷数的正交态,提供了多 OAM 模式复用通信的可能性^[8]。将 OAM 光束复用技术应用于自由空间光通信和光纤通信,已经成为信息光学领域非常重要的研究方向之一^[9-10]。

2011 年南加州大学的 Willner 研究团队利用 OAM 复用实现了 1 m 距离内的 Tbit/s 级的光传输,频谱效率高达 12.8 (bit/s)/Hz,成为了 OAM 自由空间光通信领域的一次重大突破^[6]。此后,国内外学者开展了一系列的 OAM 自由空间光通信实验研究^[11-13],验证了基于 OAM 复用技术的空间光通信系统可以实现超高速的数据传输。其中,2016 年华中科技大学的王建等人与南加利福尼亚大学的合作实现了基于 2 个 OAM 模式复用通信距离 260 m 的空间光通信系统^[13],每个信道调制有 40 Gbit/s 的 16-QAM 信号。这是目前已报道的最远距离 OAM 光束复用空间光通信实验。

影响 OAM 光束空间光通信系统特性的一个重要因素就是大气湍流的扰动。对基于 OAM 复用的空间光通信系统而言,它会造成光束漂移、光强闪烁、相位分布波动等各种影响^[14-15],导致 OAM 光束模式特性的破坏^[16],造成不同 OAM 模间串扰,进而影响 OAM 光束空间复用通信系统的特性。目前,关于 OAM 光束空间传输特性的研究已经有较多的仿真分析方面的研究^[17-19]。主要应用薄相位屏模型对 OAM 光束的空间传输特性进行分析^[20]。

由于室内属于准静态弱湍流环境,相比于室外环境湍流强度更容易得到控制和量化,有利于进行理论验证和不同湍流强度下传输特性的研究^[21-22]。2012 年,美国罗切斯特大学的 Rodenburg 等人使用空间光调制器来引入模拟大气湍流,研究了实验室环境下模拟大

气湍流对 OAM 光束的模式纯度的影响^[23]。2014 年,奥地利维也纳大学的 Krenn 等人于维也纳进行了 3 km 的城市大气环境下的 OAM 光束空间传输实验^[24],并使用模式识别算法对 16 种不同的 OAM 叠加模式进行了检测分析。2017 年,英国格拉斯哥大学 Lavery 等人 在城市环境下进行了 1.6 km 的 OAM 光束空间传输实验^[25],对传输后 OAM 光束的漂移、功率扰动、OAM 模式串扰等方面进行了分析。由于大气湍流扰动的复杂性,上述的实验研究远远不够充分,开展 OAM 光束的实际传输特性的详细实验研究对建立 OAM 光束复用空间光通信系统来说具有重要意义。

2 实验装置

我们进行了 50 m 的室内 OAM 光束的空间传输实验,对 OAM 光束的短距离传输特性进行了研究。在发射端使用数字微镜设备(digital micromirror device DMD)产生轨道角动量(OAM)光束。在接收端使用一个单路 Sagnac 干涉仪实现对 OAM 光束模式的分离检测。实验测量了 5 m 和 50 m 两种不同距离下 OAM 光束传输的展宽效应,相位分布以及模式串扰等,并对实验结果进行了分析。研究了指向偏差对 OAM 自由空间光通信系统的影响。通过加热对大气信道施加模拟的湍流扰动,进一步对 OAM 光束模式纯度在不同湍流强度下的变化进行了研究。

OAM 光束空间传输特性实验装置如图 1 所示。图 1(a)为 OAM 光束传输系统的实验光路布置,OAM 光束的发射端和接收端位于同一侧,OAM 光束经过两个平面镜反射后返回,自由空间光路为 50 m。两个反射镜的中心距为 10 cm。两条光路不相互重叠。

图 1(b)为 OAM 光束发射端的结构。发射端使用数字微镜设备(DMD)来产生 OAM 光束^[26-27]。将叉形光栅图加载到 DMD 上,形成一个反射式的二元振幅型叉形光栅^[28],对入射的高斯光束进行衍射调制,从而产生不同轨道角动量的 OAM 光束^[29]。所使用的 DMD 型号为 DLP4500,刷新速率为 4 kHz,微镜单元为斜 45°排列,如果加载水平垂直线条图案,其显示

方式实际是用锯齿线来近似显示直线^[30]。因此,在实验中将叉形光栅图按照如图 2 所示方式加载。产生 OAM 光束所使用光源为波长 632.8 nm 的 He-Ne 激光器,功率约为 2 mW,出射高斯光束的束腰直径约 1 mm。经过三倍扩束器扩束后的光束使用一个半波片调整偏振方向,再使用一个线偏振器来提高线偏光的消光比,以提高检测光路的分离可见度^[31],同时减少环境光对入射高斯光束偏振态的影响。该光束经过一个反射镜入射到 DMD 上,选择衍射的各级光束即可以得到实验所要的各阶 OAM 光束。

图 1(c)为 OAM 光束接收端的结构示意图。使用三倍望远镜对 OAM 光束进行缩束后进入单路 Sagnac 干涉仪(single-path Sagnac interferometer, SPST)。SPST 相比于 Mach-Zehnder 干涉仪具有较高的稳定性。由

于系统中使用的 Dove 棱镜(Dove prism, DP)会改变光束的偏振性^[32],因此使用两个半波片调整光的偏振态,调整后的 SPST 与输入偏振无关^[31]。当 DP 的旋转角度 $\alpha=\pi/4$ 时,奇数阶和偶数阶的 OAM 模式将分别从出口 c 和 d 输出。由于路径 d 与光输入路径重叠,因此再引入一个偏振无关分束器(non-polarizing beam-splitter, NPBS) NPBS₁ 将 d 的输出分离进行探测。在两个出口分别使用一个功率计(Thorlabs PM100D)和一个光束分析仪(Thorlabs BC106N)对出射光束进行功率探测和记录分析。用这种光路可以研究经过传输后的 OAM 光束的模式纯度特性^[33]。光束分析仪使用 12 位 140 万像素的 CCD 作为探测器,探测孔径大小 9.5 mm,像素单元尺寸 6.45 $\mu\text{m}\times 6.45 \mu\text{m}$,最短曝光时间 20 μs 。

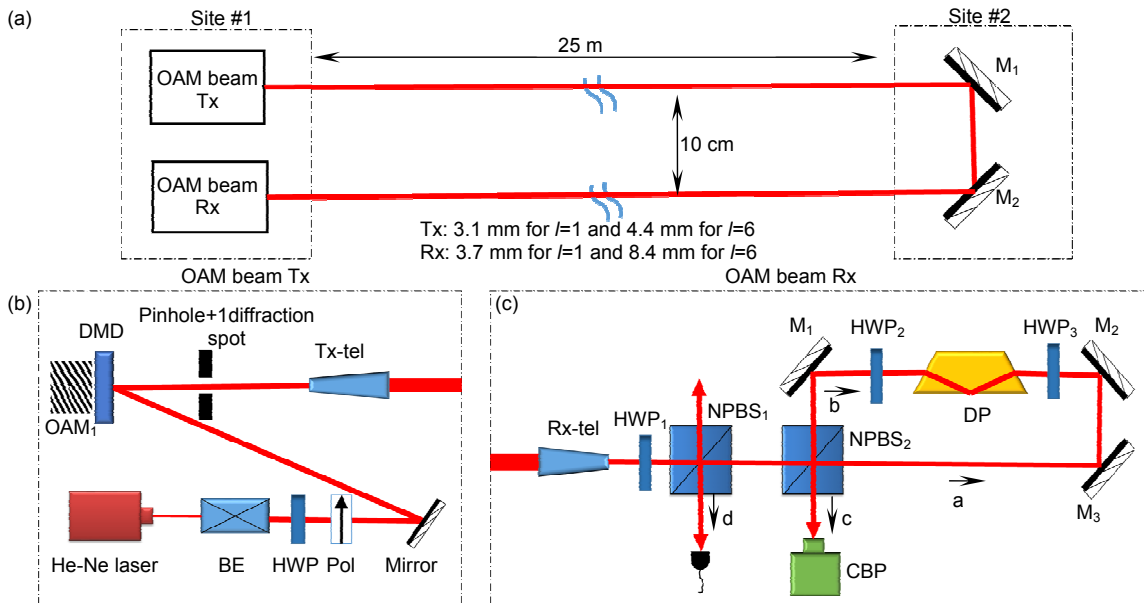


图 1 OAM 光束自由空间传输系统。(a) 50 m 的室内 OAM 光束传输自由空间光路; (b) OAM 光束的发射端的实验装置; (c) OAM 光束的接收端的实验装置

Fig. 1 Experimental setup. (a) 50 m OAM beam indoor free-space link; (b) The transmitter of OAM beam; (c) The receiver of OAM beam. NPBS: Non-polarizing beam-splitter; BE: Beam expander; M: Mirror; HWP: Half wavelength plate; DP: Dove prism; Tx-tel: Transmitter-telescope; Rx-tel: Receiver-telescope; Pol: Polarizer; CBP: Camera beam profiler

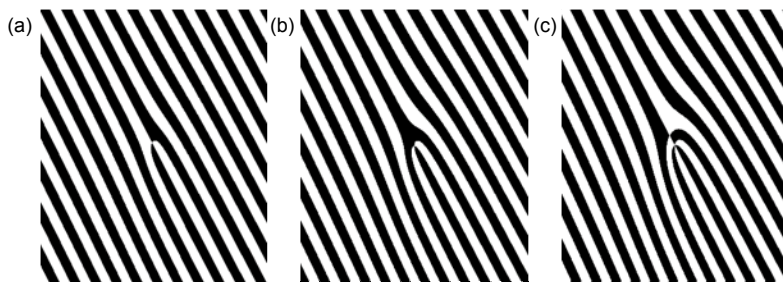


图 2 不同拓扑荷数 l 的二元叉形光栅图。(a) $l=1$; (b) $l=2$; (c) $l=3$

Fig. 2 Forklike gratings for different OAM topological charges l . (a) $l=1$; (b) $l=2$; (c) $l=3$

3 空间传输 OAM 光束的展宽效应的实验测试

OAM 光束的展宽效应是指在接收端接收到光束的光斑尺寸发生了扩展, 反应了 OAM 光束的光强分布在传输过程中的变化。这种展宽效应会使得在接收端对 OAM 光束的聚焦和检测变得困难, 从而导致整个通信系统性能降低。

实验研究了传输距离 5 m 和 50 m 的 OAM 光束的空间传输展宽效应, 可以测出随着拓扑荷 l 与传输距离 z 的增加, OAM 光束的光斑尺寸也增大。图 3(a) 和图 3(b) 分别为传输距离 $z=5$ m 和 $z=50$ m 时所观测到的 OAM 光束的光强分布图。

作为对比分析的参考, 可以基于菲涅尔衍射模型计算在理想条件(无大气湍流作用)下不同模式的 OAM 光束在自由空间传输过程中的光强分布的变化。

OAM 光束横截面上光强最大的圆周直径 D 定义为 OAM 光束的尺寸^[34]:

$$D = \sqrt{2|l|\sigma} \sqrt{1 + \frac{2z^2}{k^2\sigma^4}}, \quad (1)$$

其中: l 是拓扑电荷数, σ 是束腰半径大小, z 为传输距离, $k = 2\pi/\lambda$ 为波矢。

对拓扑荷 $l=0$ 束腰半径 1.3 mm 的高斯光束进行准直, 获得近似平行光, 测量得其发散角约为 0.01 mrad。以此为基准, 在接收端使用光束分析仪直接测量不同距离下的 OAM 光束的展宽效应。具体测量方法为使用光束分析仪分别测量 x, y 方向上的光强分布曲线, 计算每条曲线两个光强峰的间距 w_x 和 w_y , 并取其平均值作为 OAM 光束的尺寸。测试环境为室内走廊, 每个位置重复测量三次, 所有测量均选择在深夜至凌晨进行, 大气环境相对静止稳定。图 4(a) 和图 4(b) 分别对应拓扑荷 $l=1\sim 3$ 和 $l=4\sim 6$ 的 OAM 光束在 0~50 m

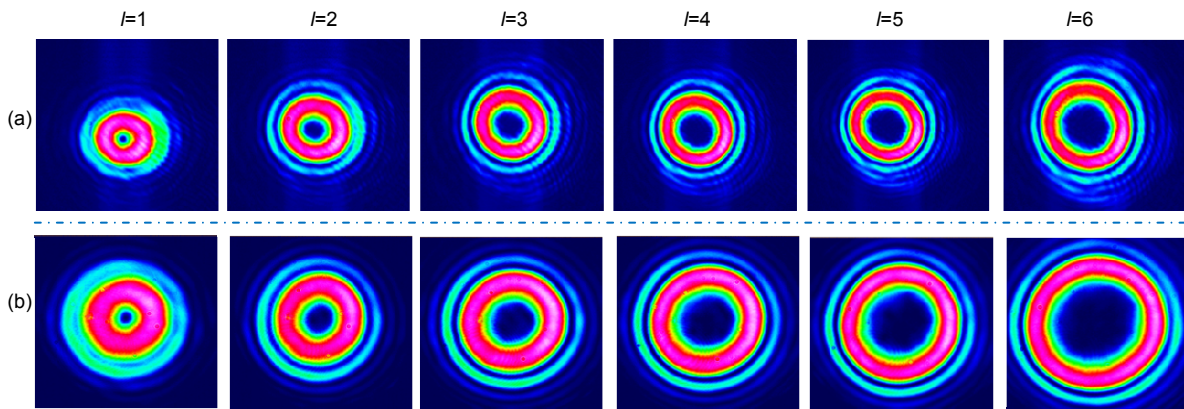


图 3 不同传输距离下的 OAM 光束光强分布图。(a) 传输距离 $z=5$ m; (b) 传输距离 $z=50$ m。(对应 OAM 模式为 $l=1\sim 6$)

Fig. 3 Intensity patterns of the OAM beam at different transmission distance. (a) $z=5$ m; (b) $z=50$ m. $l=1\sim 6$

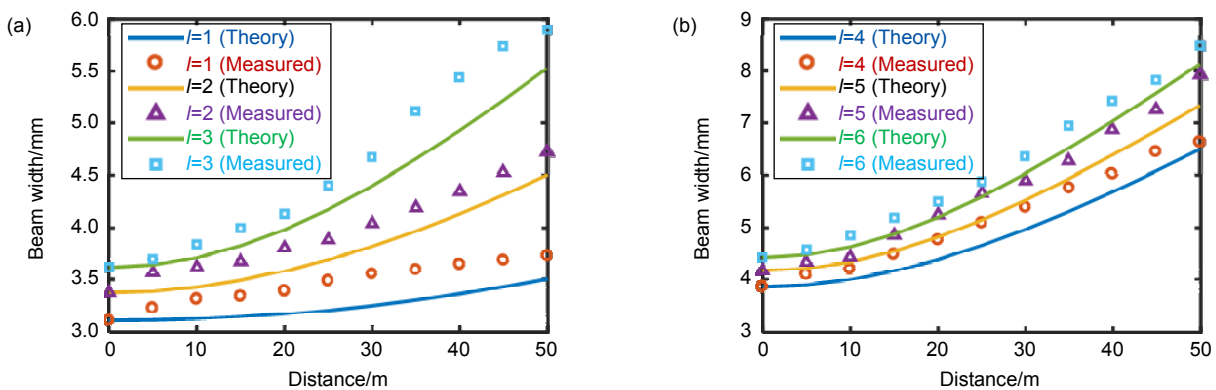


图 4 不同传输距离下的 OAM 光束尺寸变化图。(a) $l=1,2,3$; (b) $l=4,5,6$

Fig. 4 The sizes of OAM beams at different transmission distance. (a) $l=1,2,3$; (b) $l=4,5,6$

不同位置的尺寸变化情况。由式(1)计算出各阶 OAM 光束展宽的理论值与实测值的对比, 结果验证了实验测量的展宽值与理论值在变化趋势上是一致的。进一步观察会发现实验数据点均明显地高于理论值, 造成此现象的原因有两方面: 一方面大气湍流的存在会增加 OAM 光束的扩展效应, 通常在传输过程中, 当光束尺寸与大气湍流相比明显较小时会发生偏折现象, 当光束尺寸大于所穿过的湍流尺寸时, 光束主要发生扩展现象^[35]; 另一方面, 接收系统的测量误差也会造成一定的影响。

4 空间传输 OAM 光束的相位变化特性及其干涉检测

拉盖尔高斯(LG)模式 OAM 光束的光场可以表示为^[1]

$$E(\rho, \varphi) = \sqrt{\frac{2p!}{\pi(p+|l|)!} \frac{P_0}{\sigma^2}} \exp\left[-\frac{\rho^2}{\sigma^2}\right] \left[\frac{2\rho^2}{\sigma^2}\right]^{|l|/2} \cdot L_p^{|l|}\left[\frac{2\rho^2}{\sigma^2}\right] \exp(il\varphi), \quad (2)$$

其中: ρ, φ 表示柱坐标系下的径向距离和方位角, l 为 OAM 拓扑荷数, p 为径向量子数, σ 为束腰半径大小, $L_p^{|l|}$ 为广义的 Laguerre 多项式。OAM 光束相位的

角向分布为 $\exp(il\varphi)$ 。由于无法对 OAM 光束的相位分布进行直接测量, 因此在接收端使用了相等拓扑荷相反极性的 OAM 模式光束干涉的方法进行相位特性检测。当拓扑荷值为 $\pm l$ 的拉盖尔-高斯模式 OAM 光束干涉时, 假设两光束光强相等为 I , 则其干涉场光强分布为

$$I_{in} = 4Ie^{-2\rho^2/\sigma^2} \left(\frac{2\rho^2}{\sigma^2}\right)^l \left|L_p^{|l|}\left(\frac{2\rho^2}{\sigma^2}\right)\right|^2 \cos^2(l\varphi), \quad (3)$$

传输距离 $z=5$ m 和 $z=50$ m 时得到的相等拓扑荷相反极性的 OAM 光束干涉图如图 5 所示。测试环境为室内走廊, 测试时间选择在深夜至凌晨进行, 大气环境相对静止稳定。图 5(a)和图 5(b)分别为传输距离 $z=5$ m 和 $z=50$ m 的同轴干涉结果。从干涉图中可以观察到, 除了光强沿着径向变化外, 干涉条纹含有 $2l$ 个叶片, 等间距均匀分布在以光轴为中心的圆环上。图 5(c)为传输距离 $z=50$ m 的离轴干涉结果, 其干涉条纹出现了位错呈叉状, 与同轴干涉结果类似, 位错数为两倍的拓扑荷值 l 。通过比较图 5(a)~5(c)可以发现传输距离为 50 m 时的干涉图已经变得模糊, 虽然似乎仍然保持原来的结构, 但部分已经遭到破坏。这些结果定性说明了由于传输的影响, OAM 光束的相位已经出现畸变, 导致了 OAM 态的纯度的下降。

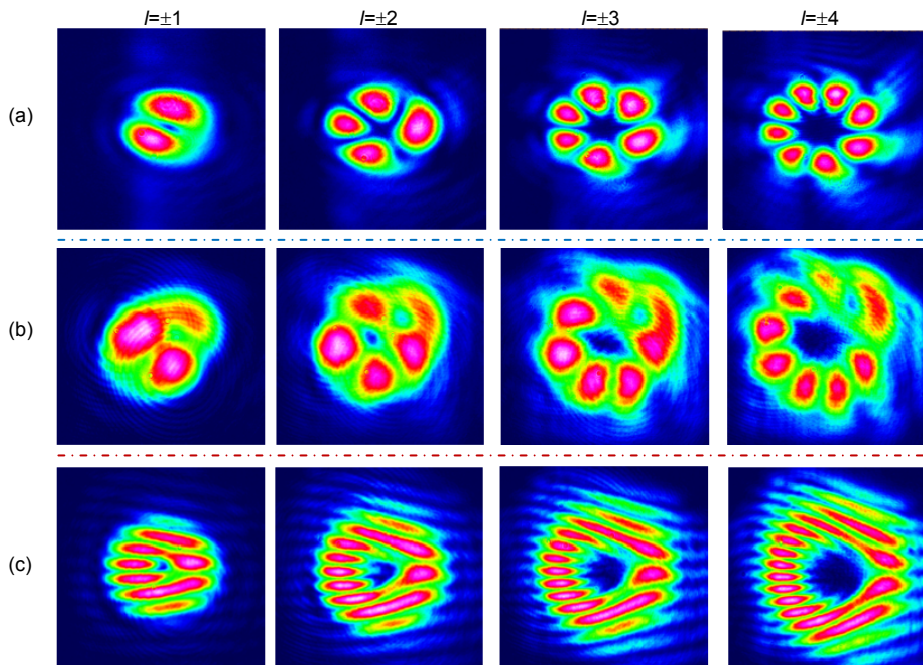


图 5 不同传输距离下相等拓扑荷相反极性的 OAM 光束干涉光强分布图。(a) 传输距离 $z=5$ m (同轴干涉); (b) 传输距离 $z=50$ m (同轴干涉); (c) 传输距离 $z=50$ m (离轴干涉)

Fig. 5 Interference patterns of OAM for $\pm l$ at different transmission distance. (a) $z=5$ m for coaxial interference; (b) $z=50$ m for coaxial interference; (c) $z=50$ m for off-axis interference

5 空间传输 OAM 光束的指向偏差特性实验

在 OAM 自由空间光通信系统中, 指向偏差 (pointing error)的大小是决定 OAM 通信系统性能和稳定性的一个重要指标^[36]。由于大气湍流、收发端的机械振动等因素的影响, OAM 光束在大气中传输时会发生随时间变化的偏折, 从而在发射端和接收端之间产生指向偏差^[37-38]。

5.1 OAM 光束自由空间传输指向偏差的测量

对传输距离 $z=5\text{ m}$ 和 $z=50\text{ m}$ 时的 OAM 光束的指向偏差的大小进行了测量。在接收端通过光束分析仪对光束与传输轴的偏移位置进行了统计。测试环境同样在室内走廊, 测试时间是在深夜至凌晨, 大气环境相对静止稳定。监测时间为 180 s , 采样间隔 400 ms , 得到两种距离下的光束强度中心的轨迹如图 6 所示。大气湍流具有随时间变化的随机性, 不同时刻监测到的轨迹变化对应着当时湍流对光传输的影响。对于准静态的相对稳定的大气环境下, 湍流强度近似不变。并且随着距离的增加, 对光束所造成的扰动具有累积效应^[39]。根据测得的数据点拟合出涵盖所有数据点的最小圆形范围(最小闭合圈)。从图 6 中可以看到, 传输距离 $z=5\text{ m}$ 和 $z=50\text{ m}$ 时的最小闭合圈半径分别为 $28\text{ }\mu\text{m}$ 和 $104\text{ }\mu\text{m}$, 显然 50 m 处的指向偏差更大。光束的偏移向量 $r=[x, y]^T$, 其中 x 和 y 分别表示沿水平轴和垂直轴的偏移值。 $r=|r|$ 应符合贝克曼(Beckmann)分布^[40]。进一步计算出各个数据点 r_i 的均值 \hat{r} 和标准

差 δ , 有:

$$\hat{r} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N r_i, \quad (4)$$

$$\delta = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (r_i - \hat{r})^2}. \quad (5)$$

对图 6(a)和图 6(b)的数据进行处理, 计算得到平均指向偏差的大小分别为 $\hat{r}_{d1} \approx 10\text{ }\mu\text{m}$ (传输距离 $z=5\text{ m}$) 和 $\hat{r}_{d2} \approx 50\text{ }\mu\text{m}$ (传输距离 $z=50\text{ m}$), 如图 6(a)、6(b)中虚线圈对应半径。平均偏离光轴角度偏差为 $\hat{\theta}_d = \arctan(\hat{r}_d / z)$, 其 z 为 OAM 光束传输的距离。

5.2 指向偏差对 OAM 光束模式纯度的影响

在理想情况下, 传输不改变 OAM 光束的轨道角动量模式, 但由于受到大气湍流等因素的影响, 所造成的指向偏差会导致接收端 OAM 光束模式间发生能量转移, 使其纯度降低。

当 OAM 光束出现指向偏差时, 假设径向偏移量为 r_d , 矢量方向的方位角为 θ , 此时偏离的 l 阶 OAM 光束的复振幅表达式可以变换为^[41]

$$E_d(\rho, \varphi) = \sum_{m=-\infty}^{\infty} A_{ml}(\rho, r_d) \exp[i m \varphi - i(m-l)\theta], \quad (6)$$

其中:

$$A_{ml}(\rho, r_d) = \frac{E_l}{\sigma^l} \exp\left(-\frac{\rho^2 + r_d^2}{\sigma^2}\right) \cdot \sum_{n=0}^l C_l^n \rho^n (-r_d)^{l-n} J_{m-n}\left(\frac{2\rho r_d}{\sigma^2}\right), \quad (7)$$

为 m 阶的 OAM 光束的振幅分量, C_l^n 为二项式系数, σ 为束腰半径大小, J_m 为修正的 m 阶贝塞尔函数^[42]。

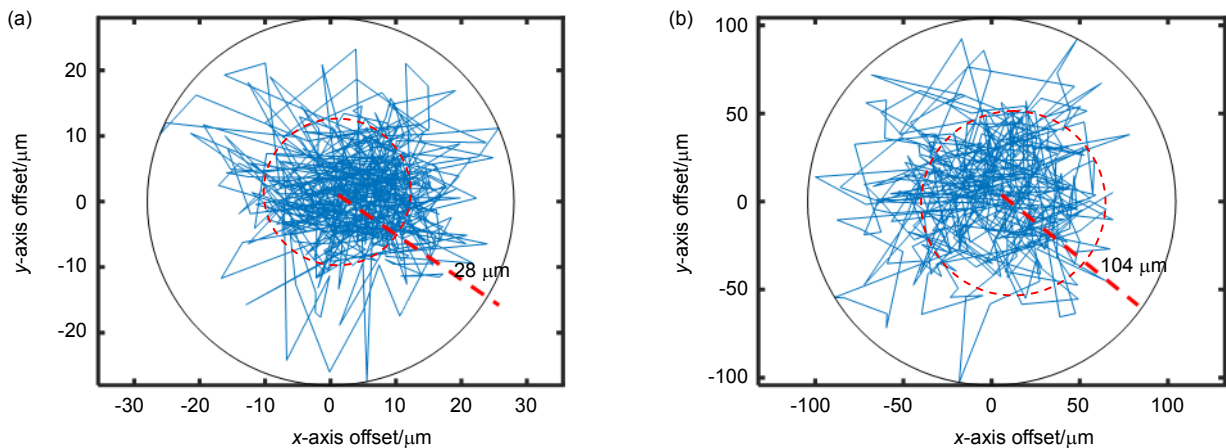


图 6 不同传输距离下接收光束与传输轴偏离位置的统计结果。(a) 传输距离 $z=5\text{ m}$; (b) 传输距离 $z=50\text{ m}$

Fig. 6 Statistics of the displacement of the received beams with respect to the propagation axis. (a) $z=5\text{ m}$; (b) $z=50\text{ m}$

从式(6)可以看出, 指向偏差使原来纯 l 阶 OAM 光束发生了模式扩展, 且扩展模式的功率谱以 $m=l$ 阶为中心呈对称分布。

使用如图 1(c)所示的单路 Sagnac 结构的干涉仪检测系统对 OAM 光束的模式纯度进行检测。Dove 棱镜的旋转角度 $\alpha=\pi/4$, 当接收 OAM 光束模式为奇数阶时, 在 c(d)出口发生干涉相长(相消), 当接收光束模式为偶数阶时, 情况相反。OAM 模式纯度(mode purity)定义为^[31]

$$\mathcal{F} = \frac{P_{\text{ori}}}{P_{\text{total}}} = \frac{\eta_{mm}}{\eta_{mm} + \sum_{n \neq m} \eta_{mn}} = \frac{I_{\text{max}}}{I_{\text{max}} + I_{\text{min}}}, \quad (8)$$

其中: $P_{\text{ori(total)}}$ 为初始模式(所有模式)的 OAM 光束功率大小, $\eta_{mm(mn)}$ 为 m 阶 OAM 光束经过传输后为 m 阶(n 阶)模式的概率, $I_{\text{max(min)}}$ 为干涉相长(相消)输出光的光强大小。在实际测量过程中, 使用一个功率计(Thorlabs PM100D)和一个光束分析仪(Thorlabs BC106N)同时对 c, d 口进行监测, 以消除 OAM 光束的光强起伏所造成的影响。光束分析仪(BC106N)内部集成功率计, 测量范围 1 fW~1 W, 使用前与功率计(PM100D)进行校准。光功率计探头(Thorlabs S130C)的探测孔径大小 9.5 mm, 测量精度 100 pW。

在接收端, 所有不是初始模式的信号都被认为是噪声, OAM 光束的信噪比可以写为

$$\text{SNR} = \frac{P_{\text{ori}} \eta_{mm}^2}{\sum_{n \neq m} P_{\text{ori}} \eta_{mn}^2 + N_0} = \frac{\eta_{mm}^2}{\sum_{n \neq m} \eta_{mn}^2 + N_0}, \quad (9)$$

其中 N_0 高斯白噪声的平均功率。由式(9)可以看出, 当 N_0 为一定值时, 传输后的 OAM 光束模式纯度大小

将会对通信系统的性能产生直接影响。

对传输距离 $z=5$ m 和 $z=50$ m 时的纯度进行检测, 测量时间为 20 s, 取样次数为 150 次。两种距离下对应的平均指向位置差大小分别为 10 μm 和 50 μm 。使用 6 个 OAM 模式($l=1, 2, \dots, 6$), 两种正交的偏振态进行测量。结果如图 7 所示, 空心柱对应 $z=5$ m 时的情况, 其所有 OAM 模式纯度最低为 91.1%, 最高为 97.1%。实心柱对应 $z=50$ m 情况, 它的最低模式纯度降低至 89.2%, 最高为 95.3%, 约降低 3%。对比图 7(a) 和图 7(b), 正交两偏振 OAM 模式纯度的变化没有明显不同, 说明自由空间 OAM 光束传输偏振相关性较小。

长距离 OAM 光束自由空间传输会由于湍流效应影响接收端的模式纯度。根据文献[25], 在短距离自由空间光通信中, 指向偏差被认为是大气湍流最主要的影响。使用加热法模拟不同强度的湍流^[43], 将加热器放置于信道中间的升降台上, 通过调整加热器的温度和高度来调控湍流大小, 并以平均指向偏差近似表征湍流强度。实验结果如图 8 所示。随着指向偏差的增大, 不同模式的 OAM 光束的纯度会不断下降, 当模拟湍流增强至平均指向位置差 $\hat{r}_d = 427 \mu\text{m}$ ($\hat{\theta}_d = 8.54 \mu\text{rad}$) 时 $l=1$ 的 OAM 模式纯度下降至 77.4%, $l=6$ 的 OAM 模式纯度为 33.4%。拓扑荷值 l 越大, OAM 模式纯度值越低, 说明其所受到湍流影响相对更严重, 进而造成 OAM 模式的串扰。所以在长距离较大湍流效应作用下, OAM 光束自由空间光通信的特性会因此明显下降。

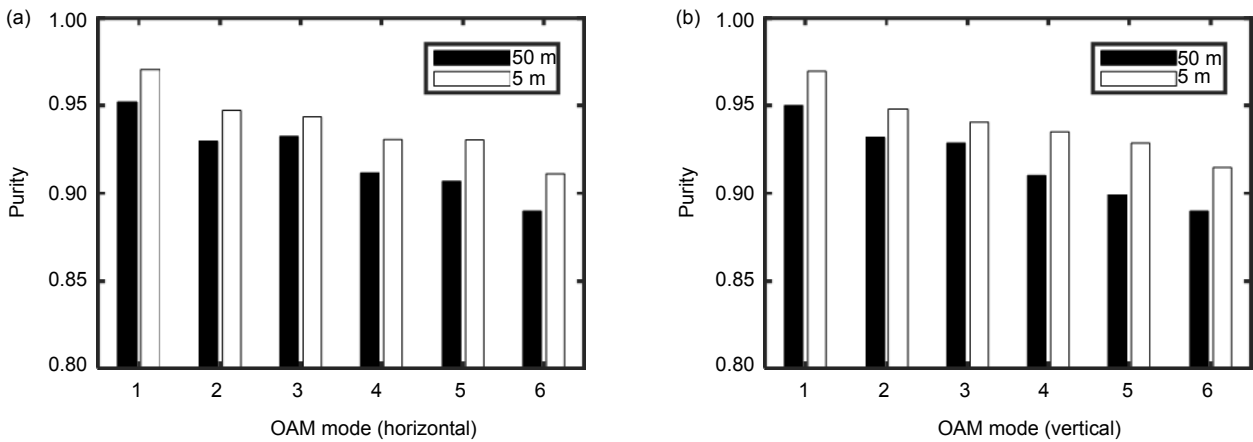


图 7 不同传输距离下的 OAM 光束模式纯度。(a) 水平偏振; (b) 垂直偏振

Fig. 7 The mode purity of the OAM beam over distance of 5 m (hollow bars) and 50 m (solid bars) for six OAM modes and two polarizations. (a) Horizontal; (b) Vertical

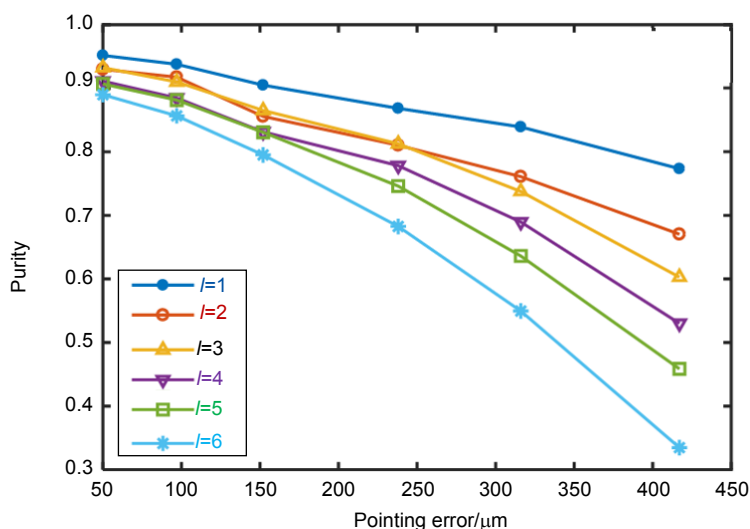


图 8 OAM 光束在不同湍流强度下的模式纯度演化

Fig. 8 The purity of OAM beam of six modes ($l=1\sim 6$) at different turbulence strength

6 结 论

在传输距离为室内 0~50 m 的条件下,使用空间光束模场分析仪测量传输后被接收端接收的 OAM 光束的光强分布,得到不同传输距离下 OAM 光束的模场展宽效应。并且与菲涅尔衍射模型计算得出的 OAM 光束传输展宽的理论值进行了对比分析,验证了两者在趋势上是一致的。通过干涉法研究了传输对 OAM 光束相位分布特性的影响。实验结果表明,在大气扰动下的传输距离越长相位分布的破坏越严重。在接收端使用单路 Sagnac 干涉仪对传输后 OAM 光束的各阶模式进行分离检测的方法,实验研究了不同传输距离下传输导致的 OAM 光束的能量从产生的模式向临近各阶模式的迁移再分配。进一步使用局部加热的方法模拟较强的大气湍流扰动的作用,实验结果表明,较长的传输距离和较强的湍流导致 OAM 光束的能量从产生的模式向临近各阶模式更快地迁移,并且 OAM 光束的拓扑荷值越大,传输后模式纯度的劣化越严重。上述实验研究的结果可以为分析 OAM 多路复用空间光通信系统的误码特性提供依据。

参考文献

- [1] 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.
- [2] O'neil A T, MacVicar I, Allen L, et al. Intrinsic and extrinsic nature of the orbital angular momentum of a light beam[J]. *Physical Review Letters*, 2002, **88**(5): 053601.
- [3] Grier D G. A revolution in optical manipulation[J]. *Nature*, 2003, **424**(6950): 810–816.
- [4] Chen L X, Lei J J, Romero J. Quantum digital spiral imaging[J]. *Light: Science & Applications*, 2014, **3**(3): e153.
- [5] Mirhosseini M, Magaña-Loaiza O S, O'Sullivan M N, et al. High-dimensional quantum cryptography with twisted light[J]. *New Journal of Physics*, 2015, **17**(3): 033033.
- [6] Wang J, Yang J Y, Fazal I M, et al. Demonstration of 12.8-bit/s/Hz spectral efficiency using 16-QAM signals over multiple orbital-angular-momentum modes[C]//*Proceedings of the 2011 37th European Conference and Exhibition on Optical Communication*, Geneva, Switzerland, 2011: 1–3.
- [7] Ren Y X, Wang Z, Xie G D, et al. Free-space optical communications using orbital-angular-momentum multiplexing combined with MIMO-based spatial multiplexing[J]. *Optics Letters*, 2015, **40**(18): 4210–4213.
- [8] Zhao N B, Li X Y, Li G F, et al. Capacity limits of spatially multiplexed free-space communication[J]. *Nature Photonics*, 2015, **9**(12): 822–826.
- [9] Ramachandran S, Kristensen P, Yan M F. Generation and propagation of radially polarized beams in optical fibers[J]. *Optics Letters*, 2009, **34**(16): 2525–2527.
- [10] Ren H R, Li X P, Zhang Q M, et al. On-chip noninterference angular momentum multiplexing of broadband light[J]. *Science*, 2016, **352**(6287): 805–809.
- [11] Fazal I M, Ahmed N, Wang J, et al. 2 Tbit/s free-space data transmission on two orthogonal orbital-angular-momentum beams each carrying 25 WDM channels[J]. *Optics Letters*, 2012, **37**(22): 4753–4755.
- [12] Wang J, Yang J Y, Fazal I M, et al. Terabit free-space data transmission employing orbital angular momentum multiplexing[J]. *Nature Photonics*, 2012, **6**(7): 488–496.
- [13] Zhao Y F, Liu J, Du J, et al. Experimental demonstration of 260-meter security free-space optical data transmission using 16-QAM carrying orbital angular momentum (OAM) beams multiplexing[C]//*Proceedings of 2016 Optical Fiber Communications Conference and Exhibition*, Anaheim, CA, USA, 2016: 1–3.
- [14] Fried D L. Statistics of a geometric representation of wavefront

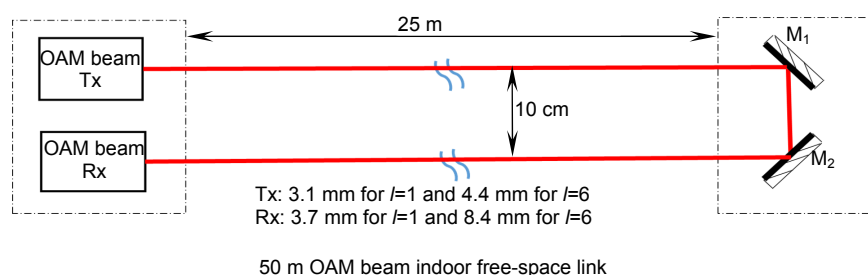
- distortion[J]. *Journal of the Optical Society of America*, 1965, **55**(11): 1427–1435.
- [15] Xing J B, Xu G L, Zhang X P, *et al.* Effect of the atmospheric turbulence on laser communication system[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2005, **34**(12): 1850–1852.
邢建斌, 许国良, 张旭革, 等. 大气湍流对激光通信系统的影响[J]. *光子学报*, 2005, **34**(12): 1850–1852.
- [16] Roux F S. Infinitesimal-propagation equation for decoherence of an orbital-angular-momentum-entangled biphoton state in atmospheric turbulence[J]. *Physical Review A*, 2011, **83**(5): 053822.
- [17] Aksenov V P, Pogutsa C E. Fluctuations of the orbital angular momentum of a laser beam, carrying an optical vortex, in the turbulent atmosphere[J]. *Quantum Electronics*, 2008, **38**(4): 343–348.
- [18] Anguita J A, Neifeld M A, Vasic B V. Turbulence-induced channel crosstalk in an orbital angular momentum-multiplexed free-space optical link[J]. *Applied Optics*, 2008, **47**(13): 2414–2429.
- [19] Zhang Y X, Cang J. Effects of turbulent aberrations on probability distribution of orbital angular momentum for optical communication[J]. *Chinese Physics Letters*, 2009, **26**(7): 074220.
- [20] Zhao S M, Wang L, Zou L, *et al.* Both channel coding and wavefront correction on the turbulence mitigation of optical communications using orbital angular momentum multiplexing[J]. *Optics Communications*, 2016, **376**: 92–98.
- [21] Malik M, O'Sullivan M, Rodenburg B, *et al.* Influence of atmospheric turbulence on optical communications using orbital angular momentum for encoding[J]. *Optics Express*, 2012, **20**(12): 13195–13200.
- [22] Tyler G A, Boyd R W. Influence of atmospheric turbulence on the propagation of quantum states of light carrying orbital angular momentum[J]. *Optics Letters*, 2009, **34**(2): 142–144.
- [23] Rodenburg B, Lavery M P J, Malik M, *et al.* Influence of atmospheric turbulence on states of light carrying orbital angular momentum[J]. *Optics Letters*, 2012, **37**(17): 3735–3737.
- [24] Krenn M, Fickler R, Fink M, *et al.* Communication with spatially modulated light through turbulent air across Vienna[J]. *New Journal of Physics*, 2014, **16**: 113028.
- [25] Lavery M P J, Peuntinger C, Günthner K, *et al.* Free-space propagation of high-dimensional structured optical fields in an urban environment[J]. *Science Advances*, 2017, **3**(10): e1700552.
- [26] Ren Y X, Li M, Huang K, *et al.* Experimental generation of Laguerre-Gaussian beam using digital micromirror device[J]. *Applied Optics*, 2010, **49**(10): 1838–1844.
- [27] Chen Y, Fang Z X, Ren Y X, *et al.* Generation and characterization of a perfect vortex beam with a large topological charge through a digital micromirror device[J]. *Applied Optics*, 2015, **54**(27): 8030–8035.
- [28] Li S X, Wang Z W. Generation of optical vortex based on computer-generated holographic gratings by photolithography[J]. *Applied Physics Letters*, 2013, **103**(14): 141110.
- [29] Cai T, Zhang X B, Ye F W, *et al.* Experimental study of the holographic grating to produce the Laguerre-Gaussian modes[J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, **25**(11): 1457–1460.
- 蔡田, 张晓波, 叶芳伟, 等. 产生拉盖尔-高斯模的全息光栅实验研究[J]. *光学学报*, 2005, **25**(11): 1457–1460.
- [30] Chong S H, Parthasarathy A B, Kavuri V C, *et al.* Intraoperative NIR diffuse optical tomography system based on spatially modulated illumination using the DLP4500 evaluation module (Conference Presentation)[J]. *Proceedings of SPIE*, 2017, **10117**: 101170D.
- [31] Wang F X, Chen W, Li Y P, *et al.* Single-path Sagnac interferometer with Dove prism for orbital-angular-momentum photon manipulation[J]. *Optics Express*, 2017, **25**(21): 24946–24959.
- [32] Moreno I, Paez G, Strojnik M. Polarization transforming properties of Dove prisms[J]. *Optics Communications*, 2003, **220**(4–6): 257–268.
- [33] Jaiswal V K, Singh R P, Simon R. Producing optical vortices through forked holographic grating: study of polarization[J]. *Journal of Modern Optics*, 2010, **57**(20): 2031–2038.
- [34] Ding P F, Pu J X. Propagation of Laguerre-Gaussian vortex beam[J]. *Acta Physica Sinica*, 2011, **60**(9): 094204.
丁攀峰, 蒲继雄. 拉盖尔高斯涡旋光束的传输[J]. *物理学报*, 2011, **60**(9): 094204.
- [35] Yura H T. Short-term average optical-beam spread in a turbulent medium[J]. *Journal of the Optical Society of America*, 1973, **63**(5): 567–572.
- [36] Barry J D, Mecherle G S. Beam pointing error as a significant design parameter for satellite-borne, free-space optical communication systems[J]. *Optical Engineering*, 1985, **24**(6): 241049.
- [37] Yang F, Cheng J L, Tsiftsis T A. Free-space optical communications with generalized pointing errors[C]//*Proceedings of 2013 IEEE International Conference on Communications*, Budapest, Hungary, 2013: 3943–3947.
- [38] Zhang Y, Wang X, Zhao S H, *et al.* BER performance for PSK-OFDM optical link over Exponentiated Weibull atmospheric turbulence[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2018, **45**(2): 170540.
张韵, 王翔, 赵尚弘, 等. Exponentiated Weibull 大气湍流下 PSK-OFDM 机载光链路性能分析[J]. *光电工程*, 2018, **45**(2): 170540.
- [39] Andrews L C, Phillips R L. *Laser Beam Propagation Through Random Media*[M]. 2nd ed. Bellingham, WA: SPIE Press, 2005.
- [40] Beckmann P, Spizzichino A. *The Scattering of Electromagnetic Waves from Rough Surfaces*[M]. Norwood, MA: Artech House, 1987: 511.
- [41] Vasnetsov M V, Pas'ko V A, Soskin M S. Analysis of orbital angular momentum of a misaligned optical beam[J]. *New Journal of Physics*, 2005, **7**(1): 46.
- [42] Abramowitz M, Stegun I A. *Handbook of Mathematical Functions: with Formulas, Graphs, and Mathematical Tables*[M]. Wash: US GPO, 1964.
- [43] Ni X L, Song L J, Jiang H L, *et al.* Research on turbulence stability characteristic of convection turbulence simulator[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2015, **52**(10): 100102.
倪小龙, 宋卢军, 姜会林, 等. 对流式湍流模拟装置湍流模拟稳定性研究[J]. *激光与光电子学进展*, 2015, **52**(10): 100102.

Experimental study on short-distance free-space transmission characteristics of OAM beam

Xi Rui^{1,2}, Zhu Bing^{1,2*}

¹Department of Electronic Engineering and Information Science,
University of Science and Technology of China, Hefei, Anhui 230027, China;

²Key Laboratory of Electromagnetic Space Information, Chinese Academy of Sciences, Hefei, Anhui 230027, China



Overview: Orbital angular momentum (OAM) of light as a degree of freedom provides an infinite number of orthogonality states with different mode topological charges. The application of OAM mode multiplexing technology in free space and fiber optical communication has become one of the most active research areas of communication. A huge challenge for OAM beam free space optical communication system is the disturbance of atmospheric turbulence. The effects include beam point jitter, intensity and phase fluctuation, damage beam pattern and crosstalk between OAM modes. Mode purity of OAM beam is very important for free space OAM mode multiplexing optical communication system. Therefore, it is significant to carry out experimental research on the actual free space transmission of OAM beams.

The short-distance free-space transmission characteristics of the OAM beam were experimentally studied. The transmission distance is 0~50 m indoors. The atmospheric environment is weak and stable. A digital micromirror device (DMD) was used to generate the OAM beam in the experimental setup. The DMD model is DLP4500 with micromirror numbers of 912×1140. At the receiver, a spatial beam analyzer was used to measure the intensity pattern of the OAM beam. The beam analyzer uses a 12-bit 1.4 megapixel CCD as the detector. The detection aperture size is 9.5 mm and the pixel size is 6.45 μm×6.45 μm. The beam broadening effect of the OAM beam at different transmission distances was studied. The measured data was compared with the theoretical results of the OAM beam propagation broadening calculated by the Fresnel diffraction model, which verifies they are consistent in trend. The phase pattern of the OAM beam was studied by the interferometric method. At the receiver, a single path Sagnac interferometer (SPSI) was used to separate and detect the intensity of modes of the OAM beam. The SPSI has higher stability than the Mach-Zehnder interferometer. The effects of energy coupling between the sending mode and the sideband modes of the OAM beam were studied. An electric heater was used to generate the strong turbulence to simulate the influence to the OAM beam mode transmission characteristics. The average pointing deviation was characterized turbulence strength approximately.

The experimental results show that the longer transmission distance and stronger turbulence cause larger energy coupling of the OAM beam from the sending mode to the sideband modes, and the OAM beam with larger mode topological charge has more deterioration of the mode purity after transmission in the strong turbulence. The results are helpful for analyzing the bit error rate (BER) characteristics of the OAM mode multiplexed optical communication system.

Citation: Xi R, Zhu B. Experimental study on short-distance free-space transmission characteristics of OAM beam[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2019, 46(6): 180386

Supported by National Natural Science Foundation of China (61377022)

* E-mail: zbing@ustc.edu.cn