



## 大气湍流信道中OAM光束与高斯光束传输性能的实验研究

于策 王天枢 张莹 林鹏 郑崇辉 马万卓

### Experimental research on transmission performance on OAM beam and Gaussian beam in atmospheric turbulence channel

Yu Ce, Wang Tianshu, Zhang Ying, Lin Peng, Zheng Chonghui, Ma Wanzhuo

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.3788/IRLA20200400>

#### 您可能感兴趣的其他文章

##### Articles you may be interested in

#### 大气湍流下轨道角动量复用态串扰分析

Crosstalk analysis of orbital angular momentum-multiplexed state under atmospheric turbulence

红外与激光工程. 2018, 47(11): 1122002-1122002(7) <https://doi.org/10.3788/IRLA201847.1122002>

#### 轨道角动量叠加态的产生及其检验

Generation of Orbital Angular Momentum superpositions and its test

红外与激光工程. 2018, 47(4): 417007-0417007(6) <https://doi.org/10.3788/IRLA201847.0417007>

#### 1 Gbps实时传输的自由空间光通信链路损耗

Link loss of the free space optical communications of real-time transmission with 1 Gbps

红外与激光工程. 2019, 48(6): 622004-0622004(7) <https://doi.org/10.3788/IRLA201948.0622004>

#### 部分相干光束在大气湍流中传输的散斑特性

Speckle characteristics of partially coherent beam propagating in atmospheric turbulence

红外与激光工程. 2017, 46(7): 722003-0722003(8) <https://doi.org/10.3788/IRLA201746.0722003>

#### 基于Raptor10码的自由空间光通信系统设计

Design of free space optical communication system based on Raptor10 code

红外与激光工程. 2019, 48(9): 918004-0918004(6) <https://doi.org/10.3788/IRLA201948.0918004>

#### 综合斜程传输和光束扩展影响下的大气湍流相位屏组设计

Design of atmospheric turbulence phase screen set under the influence of combined oblique propagation and beam propagation

红外与激光工程. 2019, 48(4): 404003-0404003(8) <https://doi.org/10.3788/IRLA201948.0404003>

# 大气湍流信道中 OAM 光束与高斯光束 传输性能的实验研究

于 策<sup>1,2</sup>, 王天枢<sup>1,2</sup>, 张 莹<sup>1,2</sup>, 林 鹏<sup>1,2</sup>, 郑崇辉<sup>1,2</sup>, 马万卓<sup>1,2</sup>

(1. 长春理工大学空间光电技术国家地方联合工程研究中心, 吉林 长春 130022;  
2. 长春理工大学光电工程学院, 吉林 长春 130022)

**摘 要:** 通过实验研究了大气湍流信道下中轨道角动量 (OAM) 光束与高斯光束的传输性能, 并将两种光束的传输性能进行对比。实验以加载调制信号的 OAM 光束以及高斯光束为传输载波, 分别测量了在大气湍流信道下两种光束的光束展宽、指向偏差、功率抖动以及误码率。实验结果表明: 在大气湍流信道中传输后, OAM 光束相比高斯光束, 光束展宽减少 10.5%, 功率抖动的方差下降 0.13, 指向偏差的散布圆直径减小 30.4%, 并且光束中心更集中于接收面中心; OAM 光束载波系统的最低探测灵敏度达到  $-28.97$  dBm, 相比高斯光束提升 2.5 dB。实验结果证明了在大气湍流信道传输中, OAM 光束比高斯光束受到湍流的影响更小, 并且随着湍流强度的增加, OAM 光束恶化程度远小于高斯光束。实验的结论为大气湍流信道下自由空间激光通信的发展和應用提供了参考。

**关键词:** 轨道角动量; 大气湍流; 自由空间光通信

中图分类号: TN92 文献标志码: A DOI: 10.3788/IRLA20200400

## Experimental research on transmission performance on OAM beam and Gaussian beam in atmospheric turbulence channel

Yu Ce<sup>1,2</sup>, Wang Tianshu<sup>1,2</sup>, Zhang Ying<sup>1,2</sup>, Lin Peng<sup>1,2</sup>, Zheng Chonghui<sup>1,2</sup>, Ma Wanzhuo<sup>1,2</sup>

(1. National and Local Joint Engineering Research Center of Space Optoelectronics Technology,  
Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China;

2. College of Opto-Electronic Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China)

**Abstract:** The transmission performance of orbital angular momentum(OAM) beam and Gaussian beam in atmospheric turbulent channel was studied and compared experimentally. The beam spreading, pointing error, power jitter and bit error rate of the two beams were measured respectively, the OAM beam loaded with modulated signals and the Gaussian beam were as carrier. The experimental results show that in the atmospheric turbulence channel, compared with Gaussian beam, beam spreading ratio of the OAM beams reduces by 10.5%, variance of power jitter falls 0.13, dispersion circle diameter of the pointing error decreases by 30.4%, and more focused on the distribution of the center of the beam axis. The lowest detection sensitivity of the OAM beam carrier system reaches  $-28.97$  dBm, which improved 2.5 dB compared with that of Gaussian beam. The experimental results verify that OAM beam is less affected by turbulence than Gaussian beam in atmospheric

收稿日期:2020-12-16; 修订日期:2021-02-10

基金项目:国家自然科学基金(61975021, 62005024)

作者简介:于策,男,硕士生,主要从事自由空间光通信方面的研究。

导师简介:王天枢,男,教授,博士,主要从事光纤激光器以及空间激光通信技术方面的研究。

turbulence channel, and the deterioration of beam quality of OAM beam is much less than Gaussian beam with the increase of turbulence intensity. The results of the experiment provide a reference for the development and application of free space laser communication in atmospheric turbulent channel.

**Key words:** orbital angular momentum; atmospheric turbulence; free space optical communication

## 0 引言

轨道角动量 (Orbital Angular Momentum, OAM) 光束自提出以来便受到广泛关注<sup>[1-4]</sup>, 在光纤通信<sup>[5-7]</sup>、自由空间光通信<sup>[8-11]</sup>等领域中有着很好的应用前景, 因此逐渐成为光通信领域的研究热点。OAM 光束在大气湍流信道中传输时, 会受到大气湍流的影响发生光束展宽、功率抖动以及光强闪烁等现象, 这些都会严重影响 OAM 光束在大气湍流信道中的传输质量。因此, 研究 OAM 光束在大气湍流信道中受到的影响是十分必要的。

1992 年, Allen 与 Barnell 等人首次通过实验证明拉盖尔-高斯 (Laguerre-Gaussian, LG) 光束携带有轨道角动量<sup>[12]</sup>。2004 年, Gibson 等人最先将 OAM 光应用于通信领域, 使用 OAM 光束进行信息的传输与接收, 证明了轨道角动量可以为光通信提供一种新维度<sup>[13]</sup>。2008 年, Gbur 等人对大气湍流信道中 OAM 光束的传输进行了研究, 证明了 OAM 光束在大气湍流中能够长距离稳定传播<sup>[14]</sup>。同年, 王涛等人研究了 OAM 光束在大气湍流信道中的传输性能, 发现 OAM 光束在大气湍流中有着较小的光束展宽<sup>[15]</sup>, 但是并未考虑不同湍流强度的大气湍流信道对 OAM 光束与高斯光束传输性能的影响, 也未通过实验对光束的传输性能做进一步研究。2011 年, 刘先河等人研究了椭圆 OAM 光在大气湍流中的闪烁现象, 发现椭圆 OAM 光可以减小大气湍流造成的光强闪烁<sup>[16]</sup>。2012 年, 陈子阳等用实验验证了椭圆 OAM 光在大气湍流中能够减小光强闪烁<sup>[17]</sup>。2015 年, 西安理工大学柯熙政教授课题组利用数值仿真计算了高阶贝塞耳光在大气湍流中的斜程传输, 结果表明, 随着折射率结构常数、天顶角和传输距离的增加以及光束波长的减小, 螺旋谐波主分量对应的谱减小, 轨道角动量弥散增大<sup>[18]</sup>。

在较长距离大气信道中, 对 OAM 传输性能也已经开展实验研究。2017 年, Martin 等人在 1.6 km 自由

空间链路中进行 OAM 光束的传输实验, 对自由空间链路中 OAM 光束的功率抖动、指向偏差等参数进行了分析<sup>[19]</sup>。文中研究的城市大气环境的主要缺点是无法准确测定实验中传输链路的大气湍流特性, 导致无法定量分析不同大气湍流对光束传输性能的影响。文中利用大气湍流物理模拟装置产生稳定、可控的大气湍流, 以不同强度的大气湍流作为传输链路, 研究大气湍流对 OAM 光束传输性能的影响。

尽管关于 OAM 光束的研究较多, 但是尚未见到关于大气湍流信道中 OAM 光束与高斯光束传输性能的对比研究。文中通过实验对比了 OAM 光束与高斯光束在大气湍流中的传输性能, 以 OAM 光束与高斯光束作为传输载波, 测量两种光束在大气湍流信道中传输后的光束展宽、功率抖动等参数, 分析对比了两种光束在大气湍流信道中传输性能的差异。结果表明, 相比于高斯光束, 在同等条件下, OAM 光束的光束展宽、功率抖动等参数均有明显改善, 传输质量得到显著提升, OAM 光束有着较强的湍流抵抗能力。

## 1 光束在大气湍流信道中传输的理论分析

### 1.1 大气湍流对光束传输性能的影响

大气湍流理论指出湍流整体在时间变化与空间分布上都是不规则的, 其折射率由于湍流的随机运动而不断变化, 使得光束在自由空间传输时受到不规则影响, 发生光束展宽、光强闪烁等一系列畸变, 造成光束传输性能的下降。

根据 Kolmogorov 湍流理论<sup>[20]</sup>, 大气湍流内部的大尺度涡旋与小尺度涡旋不断进行着能量的传递, 使大气湍流保持不断运动的状态。当光束传输经过大尺度湍流涡旋时, 由于折射作用, 在传输过程中光束会发生到达角起伏, 在接收面上产生不规则的浮动, 造成接收光信号的不稳定, 进一步加剧湍流引起的闪烁效应, 使整个系统的传输性能发生严重下降。在光束经过小尺度湍流涡旋后, 由于湍流效应与衍射效应共同作用, 使光束在自由空间衍射展宽的基础之上进

一步发生展宽,导致光斑发生严重畸变,改变光束原本的光强分布,降低传输质量。

### 1.2 OAM 光束在大气湍流中传输的理论分析

OAM 光束是一种拥有螺旋相位波前的特殊光束,光束中心存在相位奇点,奇点处光强为零。在近轴近似下,亥姆霍兹方程可以表示为:

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

对公式 (1) 进行求解就可以得到其解为拉盖尔-高斯模。在柱坐标系下,原点处的拉盖尔-高斯光束复振幅的表示为<sup>[21]</sup>:

$$U^l(r, \theta, z) = \sqrt{\frac{2p!}{\pi(|l+p|)!}} \frac{1}{w(z)} \exp\left[-\frac{r^2}{w^2(z)}\right] \times \left(\frac{r\sqrt{2}}{w(z)}\right)^{|l|} L_p^{|l|} \left[-\frac{2r^2}{w^2(z)}\right] \exp(-il\theta) \quad (2)$$

式中:  $z$  为水平的传输距离;  $w(z) = w_0 \sqrt{1 + (z/z_R)^2}$ , 为拉盖尔-高斯光束的束腰宽度,  $w_0$  为初始束腰宽度,  $z_R = \pi w_0^2 / \lambda$  为瑞利距离;  $r$  为光束的径向距离;  $p$  为该光束的径向指数;  $L_p^{|l|}$  为缔合拉盖尔多项式;  $l$  为光束的拓扑荷数;  $\theta$  为光束方位角。

$$L_p^{|l|}(x) = \sum_{k=0}^p (-1)^k C_{p+|l|}^{p-k} \frac{x^k}{k!} \quad (3)$$

将公式 (3) 代入公式 (2) 中,对其进行化简就得到了拉盖尔-高斯光束在束腰位置的归一化方程<sup>[21]</sup>:

$$U^{|l|}(r, \theta) = \sqrt{\frac{2}{\pi}} \frac{1}{w_0} \exp\left(-\frac{r^2}{w_0^2}\right) \times \sqrt{\frac{1}{|l|!}} \left(\frac{r\sqrt{2}}{w_0}\right)^{|l|} \exp(-il\theta) \quad (4)$$

光束沿着  $z$  轴在大气湍流中传输时,在 Rytov 近似条件下,基于惠更斯-菲涅耳原理,光束传输到  $z$  处时的光场表达式为<sup>[15]</sup>:

$$U(\rho, z) = -\frac{i}{\lambda z} \exp(ikz) \iint_s U(r, \theta) \exp\left[\frac{ik}{2z}(\rho - r)\right] \times \exp[\psi(r, \rho, z)] r dr d\theta \quad (5)$$

式中:  $U(r, \theta)$  为光束源平面的光场;  $\lambda$  为光束的波长;  $k = 2\pi/\lambda$ , 为波数;  $\psi(r, \rho, z)$  为大气湍流对光束复相位的

干扰;  $r$  表示源平面的位置矢量;  $\rho$  为输出位置的位置矢量。

根据光束在  $z$  处的光场表达式可以求解出输出平面的光强分布。当 OAM 光束在大气湍流中传输至  $z$  处时,其光强分布的表达式为<sup>[15]</sup>:

$$I(\rho, z) = \frac{k^2}{z^2} \sum_{n=-\infty}^{\infty} \int_0^{\infty} \int_0^{\infty} \exp\left[-\left(\frac{1}{\omega_0^2} + \frac{1}{\rho_0^2}\right)\right] (r_1^2 + r_2^2) \times \exp\left[-\frac{ik}{2z}(r_1^2 - r_2^2)\right] J^n\left(\frac{k\rho r_1}{z}\right) \times J^n\left(\frac{k\rho r_2}{z}\right) I_{n+m}\left(\frac{2r_1 r_2}{\rho_0^2}\right) r_1 r_2 dr_1 dr_2 \quad (6)$$

式中:  $r_1$  和  $r_2$  分别表示源平面中任意两个点位置矢量的模;  $J^n$  为  $n$  阶贝塞耳函数;  $\rho_0 = (0.545 C_n^2 k^2 z)^{-3/5}$ , 代表球面波传输经过大气湍流介质后的大气相干长度,  $C_n^2$  为大气折射率结构常数,在湍流理论中用来表示大气湍流的强弱;  $I_{n+m}$  是  $n+m$  阶修正贝塞耳函数。

根据公式 (6), 大气湍流对传输性能的影响主要分为两种因素: 一种是光束初始因素, 如光束束腰半径、光束的波长、光束相干度等; 另一种是传输介质因素, 包括传播距离、湍流强度、湍流的内尺度与外尺度等参数。

光束的展宽通常使用归一化光束展宽比  $y$  进行表征, 即光束在发射端的光斑宽度  $R_t$  与接收端的光斑宽度  $R_r$  的比值:

$$y = \frac{R_t}{R_r} \quad (7)$$

由于 OAM 光束具有独特的光强分布, 对于光束光斑尺寸的传统描述已经不适用, OAM 光束的光束宽度定义为, 光束横截面上为光强最大的圆周<sup>[22]</sup>, 其表达式如下:

$$R = \sqrt{2|l|\sigma} \sqrt{1 + \frac{2z^2}{k^2\sigma^4}} \quad (8)$$

公式 (8) 表明, 光束展宽的程度受到传输介质因素与光束初始因素的影响。

对于自由空间光通信来说, 指向偏差是一个非常重要的性能参数, 代表了整个系统的稳定性。光束质心的表达式<sup>[23]</sup> 为:

$$\hat{x} = \frac{\sum_{i=p_1}^{p_2} \sum_{j=q_1}^{q_2} i \cdot f(i, j)}{\sum_{i=p_1}^{p_2} \sum_{j=q_1}^{q_2} f(i, j)} \quad \hat{y} = \frac{\sum_{i=p_1}^{p_2} \sum_{j=q_1}^{q_2} j \cdot f(i, j)}{\sum_{i=p_1}^{p_2} \sum_{j=q_1}^{q_2} f(i, j)} \quad (9)$$

式中:  $(p_1, q_1)$  为 CCD 左上角坐标;  $(p_2, q_2)$  为 CCD 右下角坐标;  $f(i, j)$  为在  $(i, j)$  位置处像素的灰度值;  $(\hat{x}, \hat{y})$  即为光束的质心。将质心坐标与原点坐标做差求出质心与原点的偏移量, 从而得到指向偏差散布圆的半径为:

$$r_c = \sqrt{(\hat{x} - \bar{x})^2 + (\hat{y} - \bar{y})^2} \quad (10)$$

式中:  $(\bar{x}, \bar{y})$  为光束在无湍流时的原点坐标。

## 2 实验方案

实验结构如图 1 所示, 由调制信号加载、OAM 光束调制、大气湍流信道、接收测量四个部分组成。使用波长为 1550 nm, 发射功率为 4.5 mW 的窄线宽半导体激光器作为光源。任意波形发生器 (AWG, Keysight M8195A) 发送 4 Gbit/s 的伪随机码信号, 通过马赫-曾德调制器 (MZM, Fujitsu FTM7937) 将窄线宽半导体激光器发出的连续光调制为 4 Gbit/s 的数字激光载波。随后调制光信号, 由光学天线发射入射到 OAM 光束调制部分, 在实验中所用的光学天线为 Thorlabs 公司生产的光束准直器 (Col, Thorlabs F810FC-1550), 镜头表面镀有增透膜, 增透波段为 1550 nm。由空间光调制器 1 (SLM1) 调制为 OAM 光束。实验选用了滨松公司的反射式液晶空间光调制器 X13138-08, 其

分辨率为  $1272 \times 1024$ , 像素尺寸为  $12.5 \mu\text{m}$ , 响应时间为 30~140 ms。由于空间光调制器是偏振敏感器件, 只对特定偏振方向的光束进行调制, 所以结构中使用半波片 (HWP) 对光束偏振方向进行调整, 将光束的偏振方向调整为空间光调制器所能调制的偏振方向, 再利用偏振片 (Pol) 的高消光比特性, 对光束的偏振方向做进一步的调整, 通过调整偏振片进一步滤除调整后光束中的杂光, 防止未被调制的杂光与调制后的 OAM 光束发生叠加, 导致 OAM 光束的光束质量受到严重影响。

为了对 OAM 光束的参数进行精准测量, 在 OAM 光束的发射端搭建了准直系统对光束进行了准直, 并对 OAM 光束的发散角进行测量, 将经过准直系统后的光束半径  $r_1$  与接收端的光束半径  $r_2$  相减, 得到的差值与链路长度进行反三角函数运算, 得出发散角, 经测试发散角为 0.024 mrad。生成的 OAM 光束经过透镜 L1 ( $f_1=250 \text{ mm}$ ) 和 L2 ( $f_2=300 \text{ mm}$ ) 所构成的准直系统后进入大气湍流信道。实验使用的大气湍流模拟装置结构如图 2 所示<sup>[24-25]</sup>, 基于流动的相似性理论模拟大气湍流, 通过调整装置的温度差  $\Delta T$ , 能够模拟折射率结构常数  $C_n^2=10^{-17} \sim 10^{-15}$  的 1 km 真实大气链路。2015 年, 姜会林院士课题组先后对该装置的模拟结果与测量的真实大气的湍流特性<sup>[26]</sup> 以及稳定性<sup>[27]</sup> 进行对比, 其产生的湍流频谱特性和概率密度分布与真实大气相符, 能够高精度、高可靠性地模拟大气湍流。大气湍流物理模拟装置分为大气湍流池

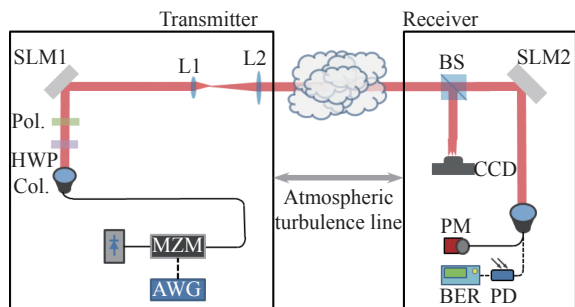


图 1 大气湍流信道中, OAM 光束与高斯光束的传输性能分析的实验结构

Fig.1 Experimental setup of transmission performance comparison of an OAM beam and the Gaussian beam system in atmospheric turbulence channel

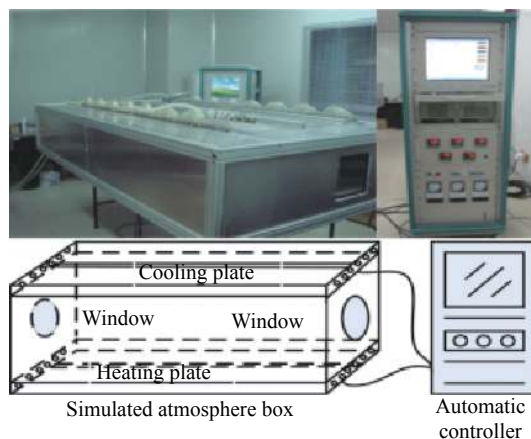


图 2 大气湍流装置结构图

Fig.2 Diagram of atmospheric turbulence device

和自动控温系统两个部分。大气湍流池由顶部冷却板、底部加热板、湍流产生区以及温度补偿区组成。湍流产生区完全密闭,不受外界温度变化的影响,冷却板使用循环水保持稳定低温,加热板通过自动控温系统控制加热,导致湍流产生区内产生温度差,从而形成湍流。自动控温系统通过湍流池中的温度探测器实时测量温度,利用自动控制程序控制加热板与冷却板,使湍流产生区内温度差保持恒定,形成实时的闭环控制,通过调节大气湍流装置的温度差就可以产生不同强度的大气湍流。当温度差  $\Delta T$  为 80、160、240  $^{\circ}\text{C}$  时,大气湍流装置所产生的大气湍流的折射率结构常数  $C_n^2$  分别为  $1.01 \times 10^{-16} \text{ m}^{-2/3}$ 、 $2.79 \times 10^{-16} \text{ m}^{-2/3}$  和  $5.71 \times 10^{-16} \text{ m}^{-2/3}$ 。

经过大气湍流后的光束由分束棱镜 (BS) 分为两束光,其中一束光由红外 CCD 相机 (Xencis, Xeva-1.7-320) 采集光斑图像数据,分辨率为  $320 \times 256$ ,像素尺寸为  $30 \mu\text{m}$ 。另一束光由准直器 (Col, Thorlabs F810FC-1550) 接收,将光信号分为两束,一束通过光功率计 (Thorlabs, PM100),另一束经光电探测器 (PD) 光电转换后由误码仪 (BER, HC N10000A) 测量误码率。在传输高斯光束时,需要关闭两个空间光调制器,由于实验结构中使用的是反射式空间光调制器,所以在不工作时,效果等同于反射镜。

### 3 实验结果与分析

#### 3.1 光束展宽对比

当光束在大气湍流信道传输时,会受到湍流效应与衍射效应的共同影响使光斑发生畸变,导致接收端的光束发生展宽。文中搭建了一条大气湍流信道中的传输链路,使用拓扑荷数为 3 的 OAM 光束与高斯光束作为载波在链路中进行传输,图 3 所示为高斯光束与 OAM 光束经过大气湍流信道后的光斑,图 3(a) 和 (b) 分别为高斯光束经过无湍流信道与湍流信道,图 3(c) 和 (d) 分别为 OAM 光束经过无湍流信道与湍流信道。由图 3 可知,OAM 光束与高斯光束经过大气湍流信道后,两种光束均发生了不同程度的畸变,导致传输质量的严重下降,因此 OAM 光束与高斯光束在大气湍流信道中的传输特性是至关重要的。

文中采用归一化光束展宽比表述经过大气湍流

后光束的展宽程度。根据公式 (7),光束展宽比为 1 时,代表传输后的光束没有发生光束展宽,相反,光束展宽比的数值越小说明光束在传输后的展宽程度越大。图 4(a)~(d) 所示是 OAM 光束与高斯光束通过  $\Delta T$  为 0  $^{\circ}\text{C}$ 、80  $^{\circ}\text{C}$ 、160  $^{\circ}\text{C}$  和 240  $^{\circ}\text{C}$  的大气湍流信道后的光束展宽比曲线。实验结果表明,在  $\Delta T$  为 0  $^{\circ}\text{C}$  时,即无湍流条件下,OAM 光束与高斯光束的光束展宽比为 0.95 和 0.97,都接近 1,但高斯光束的光束展宽比大于 OAM 光束的光束展宽比,可见在无湍流条件下,OAM 光束的展宽程度大于高斯光束。当  $\Delta T$  分别为 80  $^{\circ}\text{C}$ 、160  $^{\circ}\text{C}$  和 240  $^{\circ}\text{C}$  时,OAM 光束的光束展宽比分别为 0.91、0.88 和 0.84,高斯光束的光束展宽比分别为 0.88、0.82 和 0.76,高斯光束的光束展宽比相比同等条件下 OAM 光束的光束展宽比降低了 3.4%、7.3% 和 10.5%。这是由于 OAM 光束具有独特的螺旋相位,这一特性使得 OAM 光束在大气湍流中传播时能够抵抗湍流效应引起的衍射<sup>[28]</sup>,从而减少光束的展宽。实验结果与参考文献 [15] 的研究结果一致,证实了大气湍流信道下,高斯光束的光束展宽程度要大于 OAM 光束的展宽程度,并且随着湍流强度的增加,高斯光束的展宽程度远大于 OAM 光束,说明 OAM 光束在大气湍流信道中传输时受到湍流的影响更小。

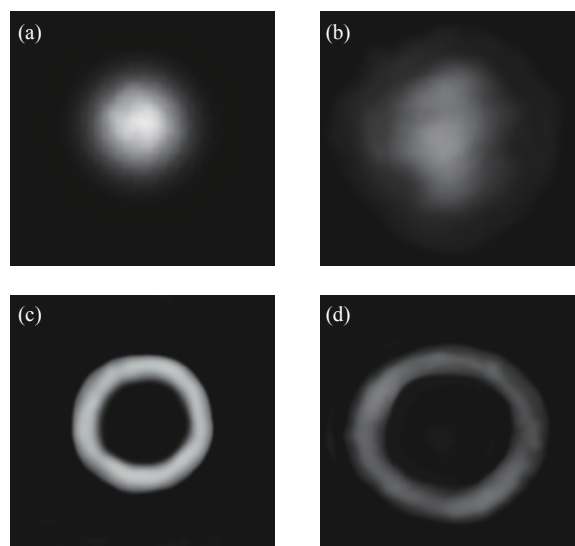


图 3 高斯光束与 OAM 光束经过无湍流链路及湍流链路的光斑图  
Fig.3 Pattern of Gaussian beam and OAM beam passing through link without turbulence and link with turbulence

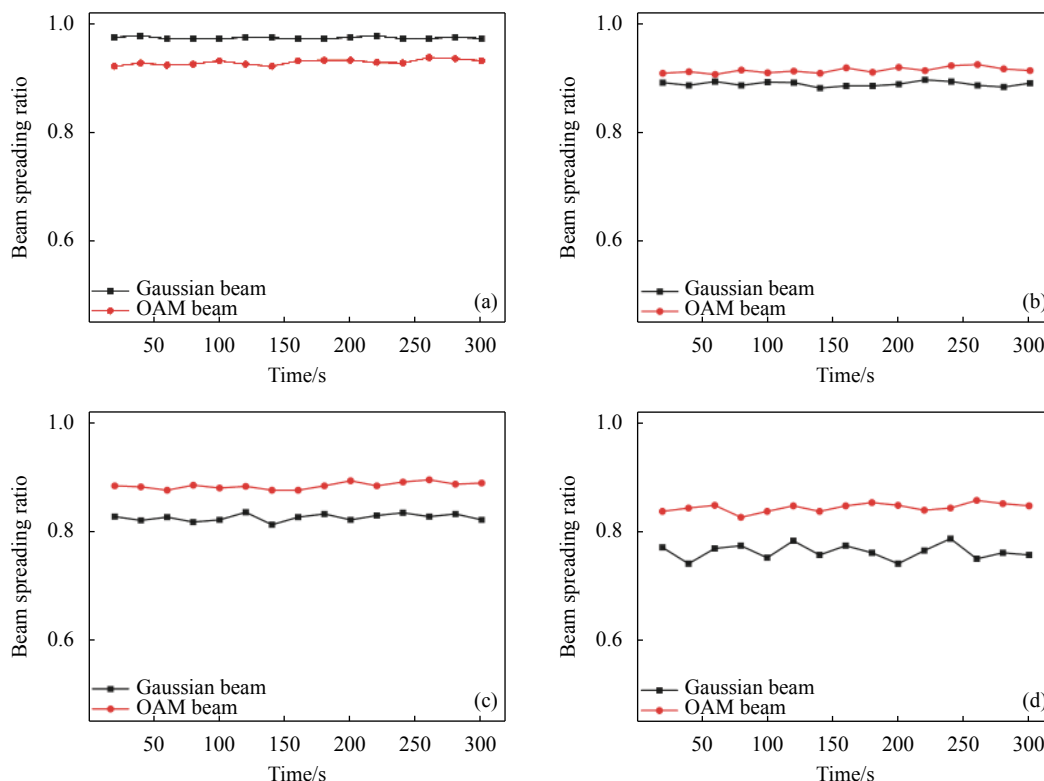


图 4 OAM 光束与高斯光束经过不同强度大气湍流后的光束展宽比曲线

Fig.4 Beam spreading ratio curves of OAM beam and Gaussian beam transmitted in atmospheric turbulence channel with different intensities

### 3.2 指向偏差对比

在大气湍流信道中,受湍流效应的影响光束的传播路径发生不规则的偏折,造成指向偏差。指向偏差会增加光束的闪烁,加剧功率抖动,甚至导致光斑溢出探测器的接收孔径,从而降低系统的传输性能。图 5 所示为 OAM 光束与高斯光束通过不同强度的大气湍流信道后的指向偏差。指向偏差表示为光束中心相对于接收面中心的偏移,根据公式 (9) 对光束的质心进行计算,再将质心坐标与原点坐标做差即可求出质心与原点的偏移量,利用公式 (10) 计算得到指向偏差散布圆的半径。由于大气湍流的不确定性,指向偏差在直角坐标系的两个轴向上的分布是相互独立的。图 5(a)~(c) 是 OAM 光束在大气湍流装置的  $\Delta T$  为 80 °C、160 °C 和 240 °C 条件下传输后的指向偏差;图 5(d)~(f) 是高斯光束在大气湍流装置的  $\Delta T$  为 80 °C、160 °C 和 240 °C 条件下传输后的指向偏差。实验数据表明,随着湍流强度的增加,两种光束在接收面中心附近出现的次数逐渐减少,而在远离接收面

中心位置出现的次数越来越多且分布范围越来越大;在大气湍流信道中高斯光束的分布范围明显比 OAM 光束的分布范围更广,且在接收面中心附近的出现的次数更少,同时随着湍流强度的增强,高斯光束与 OAM 光束指向偏差的差距逐渐增大。这说明 OAM 光束在湍流信道中更不易受到湍流影响产生指向偏差,进一步证明了 OAM 光束受到湍流的影响更小,比高斯光束有着更好的抵抗湍流能力。图 6 所示为在通过不同强度的湍流信道后 OAM 光束与高斯光束指向偏差的散布圆直径。在大气湍流装置的  $\Delta T$  为 80 °C、160 °C 和 240 °C 时,OAM 光束的散布圆直径分别是 3.69 mm、4.71 mm 和 6.07 mm,高斯光束的散布圆直径分别是 4.16 mm、5.8 mm 和 8.72 mm,与高斯光束相比,OAM 光束指向偏差的散布圆直径分别减少 12.7%、23.1% 和 30.4%。这表明在湍流信道中传输后,OAM 光束的散布圆直径远小于高斯光束,进而可以推断出 OAM 光束具有更好的抑制湍流影响的能力。

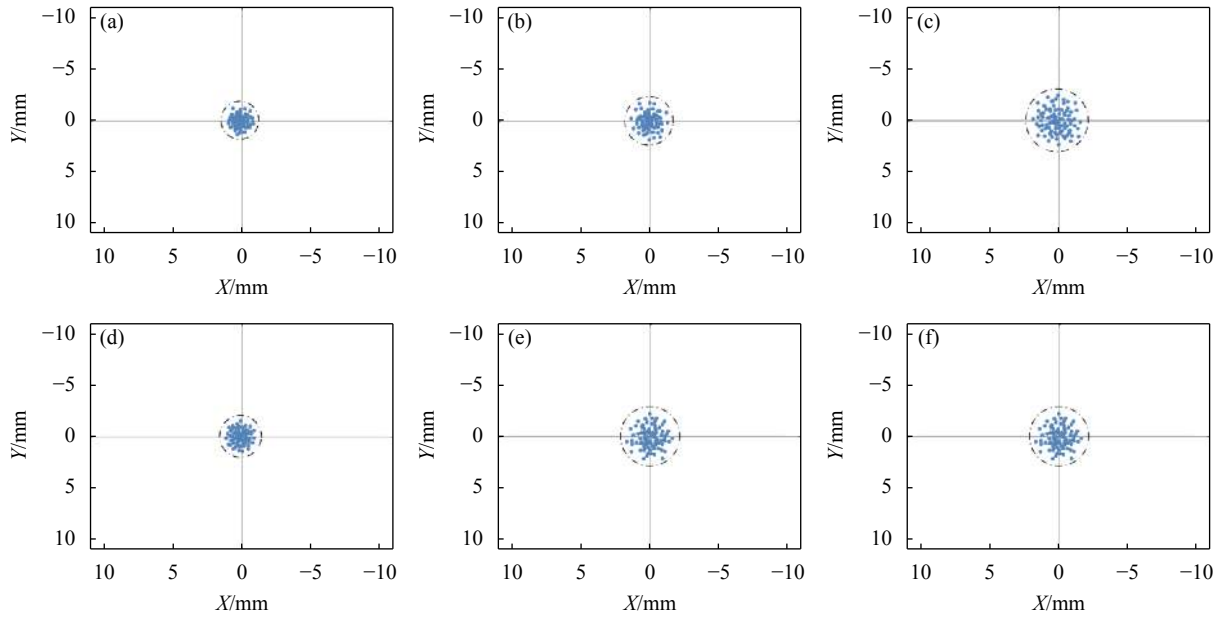


图 5 OAM 光束与高斯光束通过不同强度的湍流后的指向偏差

Fig.5 Pointing error of OAM beam and Gaussian beam transmitted in atmospheric turbulence channel

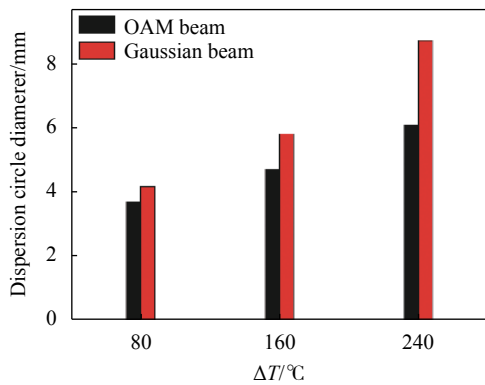


图 6 OAM 光束与高斯光束在通过不同强度的湍流后指向偏差的散布圆直径

Fig.6 Dispersion circle diameter of the pointing error of OAM beam and Gaussian beam transmitted in atmospheric turbulence channel

### 3.3 功率抖动对比

光束经过大气湍流信道传输后,在接收端的光强分布会随着空间分布与时间先后不断地发生变化,表现为接收功率的抖动,这种现象主要是由于光束传播路径上折射率的不断变化。接收端功率抖动的幅度决定了空间光通信系统的稳定性与传输质量。在实验中笔者在测量功率抖动时使用 Thorlabs 公司的 PM100 功率计,该功率计可实时测量 0.1 s 间隔的光束的接收功率,为减少测量误差,每次测量取 3000 个功率点即 5 min 的测量时间,在测得功率抖动

的数据后,笔者对这些数据的方差进行了计算,功率抖动的方差可描述接收功率的抖动幅度,方差公式表示为:

$$S^2 = \frac{(M - x_1)^2 + (M - x_2)^2 + (M - x_3)^2 \dots + (M - x_n)^2}{n} \quad (11)$$

式中:  $x_1, x_2, \dots, x_n$  为测得的功率抖动散点;  $M$  为功率抖动的平均数;  $n$  为测得的功率抖动散点的数量。

图 7 所示为不同强度的湍流信道中 OAM 光束与高斯光束传输后的功率抖动,图 7(a)~(d) 是 OAM 光束在大气湍流装置的  $\Delta T$  为 0 °C、80 °C、160 °C 和 240 °C 条件下传输后的功率抖动;图 7(e)~(h) 是高斯光束在大气湍流装置的  $\Delta T$  为 0 °C、80 °C、160 °C 和 240 °C 条件下传输后的功率抖动。由图可知,在湍流信道中 OAM 光束的抖动幅度明显小于高斯光束,且随着湍流强度的增加,两种光束的差距不断增大。图 8 为 OAM 光束与高斯光束通过不同强度的湍流后功率抖动的方差变化曲线,OAM 光束与高斯光束在温度差为 0 °C 的条件下,功率抖动方差分别为 0.026 和 0.023,这表明,在无湍流情况下,OAM 光束的功率抖动略大于高斯光束。经  $\Delta T$  为 80 °C 的大气湍流信道后,功率抖动分别为 0.067 和 0.094;经  $\Delta T$  为 160 °C 的大气湍流信道后,功率抖动分别为 0.12 和 0.182;经  $\Delta T$  为 240 °C 的大气湍流信道后,功率抖动分别为



0.201 和 0.331。两种光束在经过大气湍流信道之后, OAM 光束的功率抖动明显小于高斯光束, 说明 OAM

光束对湍流有更好的抵抗能力, 相比高斯光束受到大气湍流的影响更小。

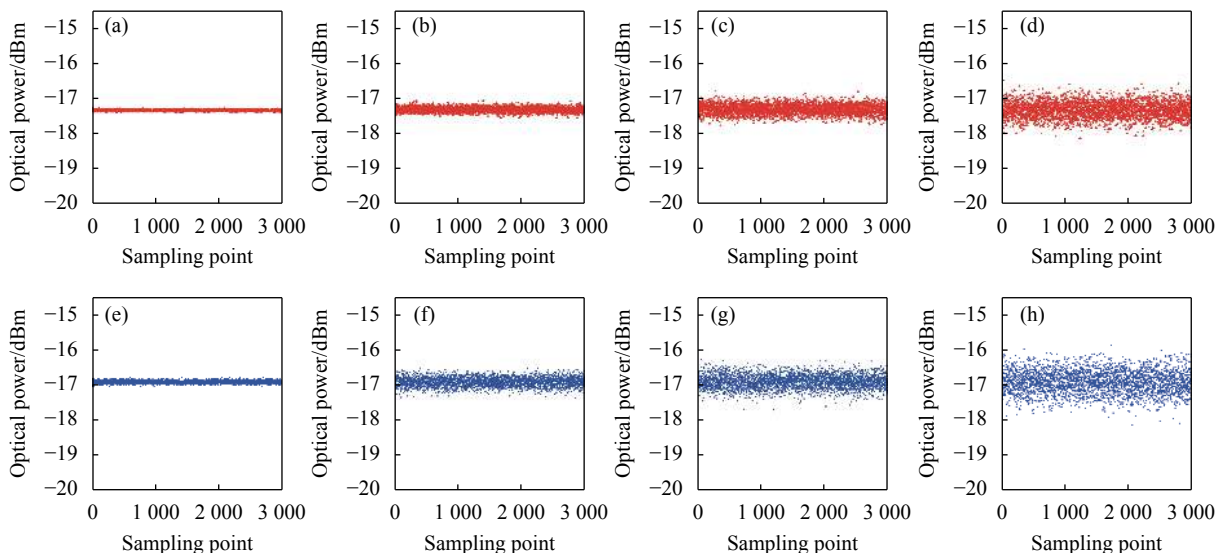


图 7 不同强度的大气湍流信道中 OAM 光束与高斯光束传输后的功率抖动

Fig.7 Jitter of received power of OAM beam and Gaussian beam transmitted in atmospheric turbulence channel

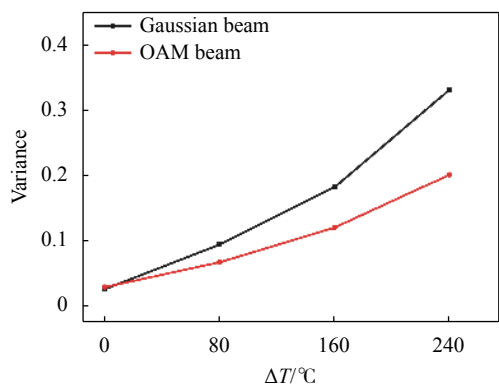


图 8 OAM 光束与高斯光束通过不同强度的湍流后功率抖动的方差

Fig.8 Variance of jitter of received power of OAM beam and Gaussian beam transmitted in atmospheric turbulence channel

### 3.4 误码率对比

OAM 光束与高斯光束通过不同强度的湍流后的误码率曲线如图 9 所示。在温度差为 0 °C 时, 即无湍流情况下, 误码率为  $3.8 \times 10^{-3}$  (FEC 极限) 时, OAM 光束和高斯光束传输后的灵敏度分别为 -32.06 dBm 和 -32.76 dBm, 说明在无湍流条件下, OAM 光束载波传输系统的误码率低于高斯光束载波传输系统, 这是由于在无湍流时 OAM 光束的光束展宽和功率抖动导致灵敏度低于高斯光束。在  $\Delta T$  为 80 °C 的大气湍流装置后, OAM 光束载波传输系统和高斯光束载波传输

系统的灵敏度分别为 -31.59 dBm 和 -31.31 dBm; 在  $\Delta T$  为 160 °C 的大气湍流装置后, OAM 光束载波传输系统和高斯光束载波传输系统的灵敏度分别为 -30.57 dBm 和 -29.04 dBm; 在  $\Delta T$  为 240 °C 的大气湍流装置后, OAM 光束载波传输系统和高斯光束载波传输系统的灵敏度分别为 -28.97 dBm 和 -26.47 dBm。在经过大气湍流信道之后, OAM 光束载波传输系统的灵敏度高于高斯光束载波传输系统的灵敏度, 这说明 OAM 光束载波受到湍流的影响更小, 有着更好抑制大气湍流影响的能力。

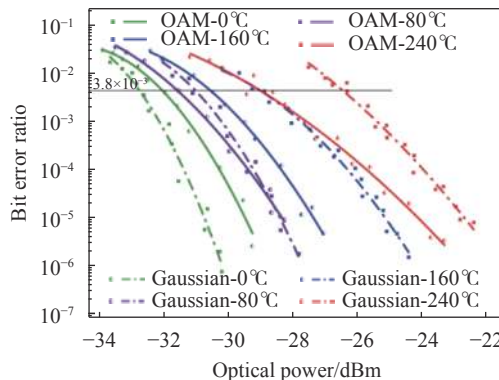


图 9 OAM 光束与高斯光束通过不同强度湍流后的误码率曲线  
Fig.9 Bit error ratio of OAM beam and Gaussian beam transmitting in atmospheric turbulence channel

## 4 结 论

针对大气湍流条件下, 光束在自由空间中传输质量下降的现象, 文中研究了 OAM 光束与高斯光束在湍流中的传输特性, 并对两种光束在大气湍流信道的传输性能进行比较。实验搭建了一条大气传输链路, 以 OAM 光束与高斯光束作为载波在大气湍流中传输, 通过实验测量了两种光束在不同湍流强度下的光束展宽、指向偏差、功率抖动及误码率, 最后分析了 OAM 光束与高斯光束在大气湍流中传输性能的差异。实验结果表明: 在大气湍流信道中传输后, 相比于高斯光束, OAM 光束的展宽更小, 功率抖动的方差同比减少 64%, 指向偏差的散布圆直径明显减小, OAM 光束载波系统的最低探测灵敏度相比高斯光束提升 2.5 dB。实验证明了 OAM 光束相比于高斯光束受大气湍流的影响更小, 具有良好的抑制湍流的能力, 并且随着湍流强度的不断增加, OAM 光束传输性能的恶化程度远远小于高斯光束。

### 参考文献:

- [1] Xia Haojie, Gu Ronghui, Pan Chengliang, et al. Signal processing method for displacement measurement interferometry using vortex beams [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2020, 28(9): 1905-1912. (in Chinese)
- [2] Yuan Hongwei, Rao Shenglong, Wu Dong, et al. Fabrication and rotation driving of movable microstructures based on femtosecond laser [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2020, 28(3): 584-590. (in Chinese)
- [3] Lu Tengfei, Zhang Kaining, Wu Zhijun, et al. Propagation properties of elliptical vortex beams in turbulent ocean [J]. *Chinese Optics*, 2020, 13(2): 323-332. (in Chinese)
- [4] Song Dongsheng, Zheng Yuanlin, Liu Hu, et al. Eigen generalized Jones matrix method [J]. *Chinese Optics*, 2020, 13(3): 637-645. (in Chinese)
- [5] Wang A, Zhu L, Wang L, et al. Directly using 8.8 km conventional multi-mode fiber for 6-mode orbital angular momentum multiplexing transmission [J]. *Optics Express*, 2018, 26(8): 10038-10047.
- [6] Ding M, Chen Y, Zhao Y, et al. Propagation and orbital angular momentum of vortex beams generated from a spiral phase plate-fiber [J]. *Laser Physics Letters*, 2019, 16(3): 035106.
- [7] Bai Xiuli, Chen Heming, Zhang Lingfei. Circular photonic crystal fiber supporting orbital angular momentum modes transmission [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2019, 48(2): 0222002. (in Chinese)
- [8] 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.
- [9] Qu Z, Djordjevic I B. 500Gb/s free-space optical transmission over strong atmospheric turbulence channels [J]. *Optics Letters*, 2016, 41(14): 3285.
- [10] Peng J, Zhang L, Zhang K, et al. Channel capacity of OAM based FSO communication systems with partially coherent Bessel-Gaussian beams in anisotropic turbulence [J]. *Optics Communications*, 2018, 418: 32-36.
- [11] Ke Xizheng, Shi Xinyu. Experimental study on the superposition of high-order radial Laguerre-Gaussian beams [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2018, 47(12): 1207002. (in Chinese)
- [12] 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.
- [13] 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.
- [14] Gbur G, Tyson R K. Vortex beam propagation through atmospheric turbulence and topological charge conservation [J]. *J Opt Soc Am A Opt Image Sci Vis*, 2008, 25(1): 225-230.
- [15] Wang T, Pu J, Chen Z. Beam-spreading and topological charge of vortex beams propagating in a turbulent atmosphere [J]. *Optics Communications*, 2009, 282(7): 1255-1259.
- [16] Liu X, Pu J. Investigation on the scintillation reduction of elliptical vortex beams propagating in atmospheric turbulence [J]. *Optics Express*, 2011, 19(27): 26444-26450.
- [17] Chen Z, Li C, Ding P, et al. Experimental investigation on the scintillation index of vortex beams propagating in simulated atmospheric turbulence [J]. *Applied Physics B*, 2012, 107(2): 469-472.
- [18] Ke Xizheng, Guo Xinlong. Orbital angular momentum research of high order Bessel Gaussian beam in a slant atmosphere turbulence [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44(12): 3744-3749. (in Chinese)
- [19] Lavery M P J, Peuntinger C, Günthner Kevin, et al. Free-space propagation of high-dimensional structured optical fields in an urban environment [J]. *Science Advances*, 2017, 3(10): e1700552.
- [20] Andrews L C, Phillips R L. Laser Beam Propagation Through Random Media [M]. 2nd ed. Washington, USA: SPIE Press,

- 2005.
- [21] Ke Xizheng, Xue Pu. Generation of orbital angular momentum superpositions and its test [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2018, 47(4): 0417007. (in Chinese)
- [22] Ding Pafeng, Pu Jixiong. Propagation of Laguerre-Gaussian vortex beam [J]. *Acta Phys Sin*, 2011, 60(9): 338-342. (in Chinese)
- [23] Liu Yunqing, Jiang Huilin, Tong Shoufeng. Study on stabilization tracking technology for atmospheric laser communication system [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2011, 38(5): 0505005. (in Chinese)
- [24] Chen Junda, Wang Tianshu, Xinmeng Zhang, et al. Free-space transmission system in a tunable simulated atmospheric turbulence channel using a high-repetition-rate broadband fiber laser [J]. *Applied Optics*, 2019, 58(10): 2635-2640.
- [25] Zhang Xinmeng, Wang Tianshu, Chen Junda, et al. Scintillation index reducing based on wide-spectral mode-locking fiber laser carriers in a simulated atmospheric turbulent channel [J]. *Optics Letters*, 2018, 43(14): 342.
- [26] Ni Xiaolong, Song Lujun, Jiang Huilin, et al. Contrast experimental research on turbulence characteristics between a simulate turbulence and the real atmospheric turbulence [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2015, 52(9): 090103. (in Chinese)
- [27] Ni Xiaolong, Song Lujun, Jiang Huilin, et al. Research on turbulence stability characteristic of convection turbulence simulator [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2015, 52(10): 100102. (in Chinese)
- [28] Lukin V P, Konyaev P A, Sennikov V A. Beam spreading of vortex beams propagating in turbulent atmosphere [J]. *Applied Optics*, 2012, 51(10): C84.