

# 径向偏振矢量光束在大气湍流下的传输分析

张建强<sup>1,2</sup>, 翟焱望<sup>1,2</sup>, 付时尧<sup>1,2</sup>, 高春清<sup>1,2\*</sup>

<sup>1</sup>北京理工大学光电学院, 北京 100081;

<sup>2</sup>信息光子技术工业和信息化部重点实验室, 北京 100081

**摘要** 基于 von Karman 谱模型采用分步相位屏幕方法, 仿真模拟不同阶次径向偏振矢量光束在 Kolmogorov 大气湍流中的传输特性, 并对其 Stokes 矢量、闪烁指数、光束重心径向偏移量进行分析。研究发现: 大气湍流下径向偏振矢量光束的光强分布环形特征的最大识别距离大于标量涡旋光束, 其闪烁指数与光束重心径向偏移量都小于标量涡旋光束; 高阶光束能在更远的距离保持环形特征, 具有更小的闪烁指数与光束重心径向偏移量; 径向偏振矢量光束的 Stokes 矢量图像会发生扩散与畸变。仿真结果表明, 大气湍流下径向偏振矢量光束比标量涡旋光束具有更好的大气湍流抗性, 高阶光束的部分性质优于低阶光束。

**关键词** 大气光学; 矢量光束; 大气湍流; 闪烁指数; 大气传输

中图分类号 O436

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202040.1101001

## Propagation Properties of Radially-Polarized Vector Beams Under a Turbulent Atmosphere

Zhang Jianqiang<sup>1,2</sup>, Zhai Yanwang<sup>1,2</sup>, Fu Shiyao<sup>1,2</sup>, Gao Chunqing<sup>1,2\*</sup>

<sup>1</sup>School of Optics and Photonics, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China;

<sup>2</sup>Key Laboratory of Photonic Information Technology, Ministry of Industry and Information Technology, Beijing 100081, China

**Abstract** Based on the von Karman spectral model, a step-by-step phase screen method is employed in this study to simulate the propagation characteristics of radially-polarized vector beams with different orders in the Kolmogorov's atmospheric turbulence. Furthermore, the Stokes vectors, scintillation index, and radial deviations of gravity centers of beams are analyzed. The simulation results show that the maximum discriminating distance of the ring features of the radially-polarized vector beam under an atmospheric turbulence is larger than that of the scalar vortex beam, and its scintillation index and the radial deviation of the gravity center of beams are smaller than those of scalar vortex beams. High-order beam can maintain its ring shape features at a larger distance than that of a low-order beam, and the scintillation index and the radial deviation of gravity center of beam for high-order beams are observed to be smaller. The Stokes vectors images of the radially-polarized vector beams get diffused and distorted. In conclusion, the radially-polarized vector beams have better turbulence resistance than the scalar vortex beams under an atmospheric turbulence, and high-order beams exhibit better properties than low-order beams in some way.

**Key words** atmospheric optics; vortex beams; atmospheric turbulence; scintillation index; atmospheric propagation

**OCIS codes** 010.1330; 290.5930; 010.1300; 050.4865

## 1 引 言

近年来, 携带轨道角动量的涡旋光束吸引了大量研究者的兴趣<sup>[1]</sup>。国内外学者利用数字微型镜(DMD)<sup>[2-3]</sup>、液晶空间光调制器(LC-SLM)<sup>[4-5]</sup>、Q 波片<sup>[6-7]</sup>实现了涡旋光束的生成; 也利用环形光泵浦方

式<sup>[8]</sup>、热聚焦透镜原理<sup>[9]</sup>、对谐振腔腔镜刻蚀圆斑<sup>[10-11]</sup>等获得了涡旋光束的输出。涡旋光束在超分辨率成像<sup>[12-14]</sup>、光通信<sup>[15-17]</sup>、生物医学、天文学等领域具有重要的应用前景<sup>[18]</sup>。基于涡旋光束可以进一步获得矢量光束<sup>[19]</sup>, 矢量光束是具有特殊偏振态分布的空间结构光束, 其中径向偏振矢量光束是其

收稿日期: 2019-12-25; 修回日期: 2020-02-25; 录用日期: 2020-02-27

基金项目: 国家自然科学基金(11834001)、中国电科联合基金(6141B08231125)

\* E-mail: gao@bit.edu.cn

典型代表之一。矢量光束在光通信<sup>[20]</sup>、光镊、激光加工、量子通信等领域有广阔的应用前景<sup>[21-22]</sup>。在实际应用如自由空间光通信中,矢量光束与标量涡旋光束都将受大气湍流扰动的影响,导致其光强分布、相位分布产生畸变;光束的偏振特性也将受到大气湍流扰动的影响,引发模式串扰,降低通信质量<sup>[23-26]</sup>。研究中通常使用模式纯度、光强恢复比、Stokes 矢量(偏振度)<sup>[25]</sup>作为描述光束受大气湍流影响的指标。闪烁指数是描述光束在传输过程中光强涨落的重要参数,闪烁指数越大表示光束光强变化越剧烈<sup>[27-28]</sup>,研究矢量光束在大气湍流中传输的闪烁指数变化具有重要意义。

本文基于 MATLAB,搭建了径向偏振矢量光束在大气湍流中的传输仿真系统,分析了不同阶次矢量光束在不同强度的大气湍流传输中的 Stokes 矢量变化和闪烁指数变化,为矢量光束的通信传输提供仿真平台。基于 von Karman 大气功率谱模型分别生成了弱湍流、强湍流下的大气湍流相位屏,并对所生成的相位屏作低频补偿,用于矢量光束的大气湍流传输特性仿真研究。实验中,基于拉盖尔-高斯型涡旋光束合成径向偏振矢量光束,每传输 100 m 就对所生成的同一强度下的不同大气湍流相位屏叠加一次,传输距离总长 5000 m。在不同大气湍流下,分析不同阶次矢量光束的 Stokes 矢量、光强闪烁指数与光束重心径向偏移量。相同湍流强度下,随着传输距离的增加,Stokes 矢量的图像分布畸变愈加明显,光强分布环形特征识别度逐渐降低。相同阶次下,随湍流强度的增加,矢量光束的光强分布畸变加重。总体而言,相对于标量涡旋光束,矢量光束的光强分布能在更远的距离保持环形特征,其相应的闪烁指数更低。

## 2 仿真研究

### 2.1 矢量光束的传输模型

径向偏振的矢量光束可由左旋圆偏光束与右旋圆偏光束叠加合成。在束腰位置( $z=0$ )处,径向偏振的矢量光束的光场可表述为

$$\mathbf{E}(r, \phi, z) = \mathbf{E}_{\text{LG}_p^l} \cdot \begin{bmatrix} 1 \\ i \end{bmatrix} + \mathbf{E}_{\text{LG}_p^{-l}} \cdot \begin{bmatrix} 1 \\ -i \end{bmatrix}, \quad (1)$$

式中: $\mathbf{E}_{\text{LG}_p^l}$ 为涡旋光束的电场强度矢量; $p$ 为拉盖尔多项式阶数; $l$ 为拓扑荷数; $\mathbf{E}$ 为光束振幅。令

$$\mathbf{E}_x(x, y, z) = \mathbf{E}_{\text{LG}_p^l} + \mathbf{E}_{\text{LG}_p^{-l}} = \mathbf{E}_{0x} \cdot \cos[(\kappa z - \omega t) + \delta_x], \quad (2)$$

$$\mathbf{E}_y(x, y, z) = i \cdot (\mathbf{E}_{\text{LG}_p^l} - \mathbf{E}_{\text{LG}_p^{-l}}) = \mathbf{E}_{0y} \cdot \cos[(\kappa z - \omega t) + \delta_y], \quad (3)$$

$$\delta = \delta_x - \delta_y, \quad (4)$$

$$\mathbf{E}_{\text{LG}_p^l} = \mathbf{E}_0 \cdot \left( \sqrt{2} \frac{r}{\omega_0} \right)^l \cdot L_p^l \left( 2 \frac{r^2}{\omega_0^2} \right) \cdot \exp\left(-\frac{r^2}{\omega_0^2}\right) \cdot \exp(-il\varphi), \quad (5)$$

(1)式可分解为水平线偏振与竖直线偏振<sup>[19,25]</sup>,即

$$\mathbf{E}(r, \phi, z) = (\mathbf{E}_{\text{LG}_p^l} + \mathbf{E}_{\text{LG}_p^{-l}}) \cdot \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} + i(\mathbf{E}_{\text{LG}_p^l} - \mathbf{E}_{\text{LG}_p^{-l}}) \cdot \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix}, \quad (6)$$

式中: $r, \phi, z$ 为柱坐标系下坐标; $\mathbf{E}_{0x}$ 与 $\mathbf{E}_{0y}$ 分别为水平偏振与竖直偏振光束的初始振幅; $\delta_x$ 与 $\delta_y$ 分别为水平偏振光束、竖直偏振光束的初始相位; $\delta$ 为水平偏振光束与竖直偏振光束之间的相位差; $\omega_0$ 为束腰半径; $\mathbf{E}_0$ 是涡旋光束初始振幅; $L_p^l(x)$ 为 $l, p$ 阶拉盖尔多项式。

Stokes 矢量是描述矢量光束的偏振性质的重要参数,基于以上对径向偏振矢量光束的正交线偏振光束分解过程,Stokes 矢量可表示为

$$S_0 = \langle \mathbf{E}_{0x}^2 \rangle + \langle \mathbf{E}_{0y}^2 \rangle, \quad (7)$$

$$S_1 = \langle \mathbf{E}_{0x}^2 \rangle - \langle \mathbf{E}_{0y}^2 \rangle, \quad (8)$$

$$S_2 = \langle 2 \cdot \mathbf{E}_{0x} \cdot \mathbf{E}_{0y} \cdot \cos \delta \rangle, \quad (9)$$

$$S_3 = \langle 2 \cdot \mathbf{E}_{0x} \cdot \mathbf{E}_{0y} \cdot \sin \delta \rangle. \quad (10)$$

仿真中,设置 $p=0$ ,忽略径向量子数的影响,设置 $l=1, 3, 5, 7, 9, \lambda=1550 \text{ nm}, \omega_0=3 \text{ mm}$ ,绘图区域为 $x=[-3 \text{ cm}, +3 \text{ cm}], y=[-3 \text{ cm}, +3 \text{ cm}]$ ,数据采样点 $N=1080$ 。图 1 为径向偏振矢量光束的合成示意图,首先需要仿真生成水平偏振光束以及竖直偏振光束,再进行径向偏振矢量光束的合成。

由于矢量光束的水平分量与竖直分量相互正交,可依据标量场的角谱传输理论对其分别进行独立传输仿真<sup>[25]</sup>,之后,再进一步合成矢量光束。实验仿真中,设置传输距离步长为 100 m,累计传输 50 次,传输距离总长 5000 m,每次传输经过同一强度的大气湍流相位屏。径向偏振矢量光束依次经过相同强度下的大气湍流相位屏,每次传输获取各个传输距离节点下的光场信息。实验中,模拟矢量光束在无湍流、弱湍流、强湍流情形下的传输过程。为确保实验数据的准确性,每种大气湍流强度下作 500 次传输仿真,传输示意图如图 2 所示。

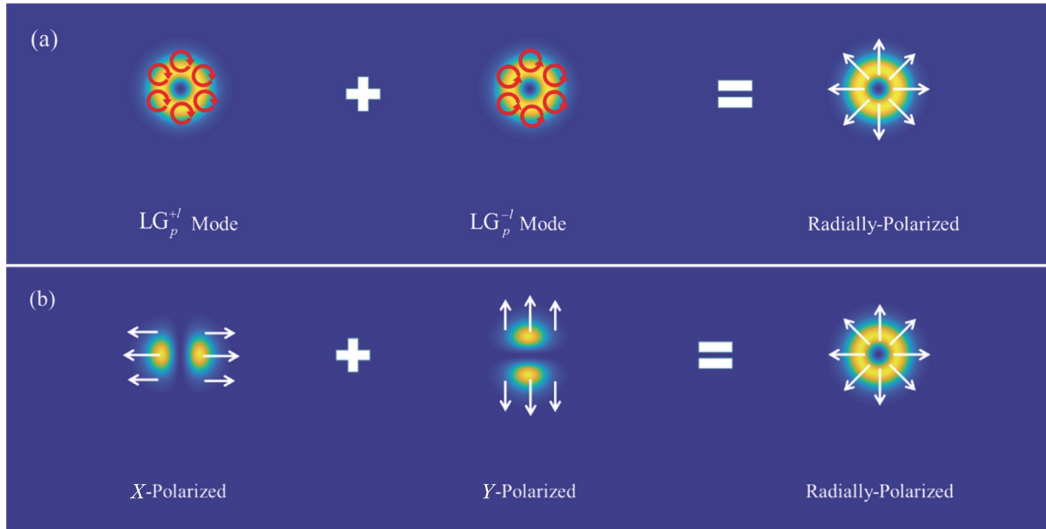


图 1 径向偏振矢量光束的合成示意图。(a)圆偏光合成;(b)线偏光合成( $p=0, l=1$ )

Fig. 1 Combination synthetic diagram of radially-polarized vector beams. (a) Combined by circularly-polarized beams; (b) combined by linearly-polarized beams ( $p=0, l=1$ )

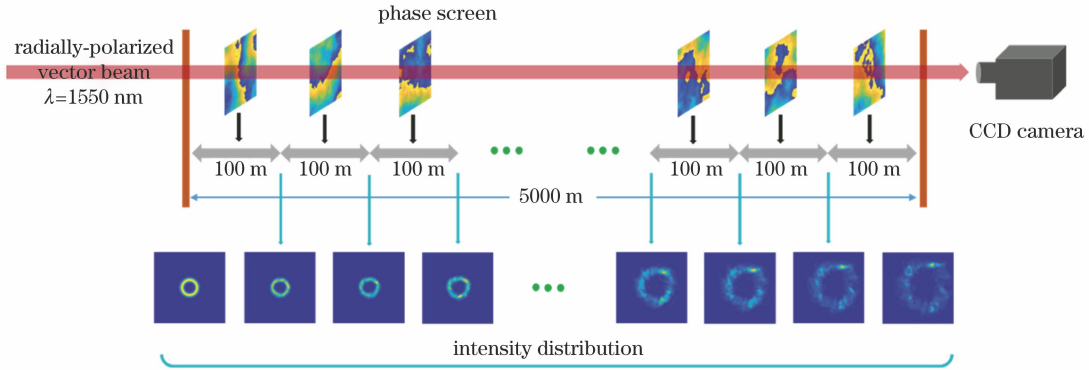


图 2 径向偏振矢量光束的大气湍流传输系统

Fig. 2 Propagation system of radially-polarized vector beam under different atmospheric turbulences

### 2.2 大气湍流相位屏的生成

在大气湍流相位屏的模拟中,主要以 Kolmogorov 的大气功率谱模型为依据; Tatarskii 在 Kolmogorov 功率谱模型上引入了大气湍流内尺度的修正项; von Karman 基于 Tatarskii 的模型加入了大气湍流外尺度的限制; Hill 对 Kolmogorov 功率谱模型做了更加精确的修正<sup>[29]</sup>。目前所报道的相关研究中大多使用 von Karman 功率谱模型生成不同强度下的大气湍流相位屏,次谐波补偿技术能补偿该模型下大气湍流中的低频成分。本研究采用 Von Karman 大气湍流功率谱模型,其形式简单,低频成分符合良好,可表述为<sup>[29]</sup>

$$\theta_n(\kappa) = 0.033C_n^2 \cdot \kappa^{-11/3} \cdot \exp(-\kappa^2/\kappa_m^2) \cdot [\kappa^2/(\kappa^2 + \kappa_0^2)]^{11/6}, \quad (11)$$

式中:  $C_n^2$  为大气折射率结构系数;  $\kappa=2\pi/\lambda$  为空间波数;  $\kappa_m=5.92/l_0$ ,  $l_0$  为大气湍流内尺度;  $\kappa_0=2\pi/L_0$ ,

$L_0$  为大气湍流外尺度;  $\theta_n(\kappa)$  为大气湍流功率谱。基于大气湍流功率谱,可获得大气湍流相位屏,其数学关系表示为

$$\varphi_n(\kappa) = 2\pi^2 \kappa^2 \cdot \Delta z \cdot \theta_n(\kappa), \quad (12)$$

式中:  $\Delta z$  为传输距离步长;  $\varphi_n(\kappa)$  为大气湍流相位屏。仿真中,大气折射率结构系数  $C_n^2 = 5 \times 10^{-17} \text{ m}^{-2/3}$  对应弱湍流,  $C_n^2 = 5 \times 10^{-13} \text{ m}^{-2/3}$  对应强湍流。图 3 为所生成的相位屏。

### 2.3 闪烁指数的表达

光束在随机介质中传输时,由于介质的折射率分布不均匀对光束产生散射、折射、聚焦等现象,引发光强分布出现涨落,此现象称为闪烁现象,使用闪烁指数(SI)描述<sup>[25,28]</sup>。闪烁指数可表示为

$$R_{SI} = \frac{\langle I^2 \rangle - \langle \bar{I} \rangle^2}{\langle \bar{I} \rangle^2} = \frac{\langle I^2 \rangle}{\langle \bar{I} \rangle^2} - 1, \quad (13)$$

式中:  $I$  为传输距离节点下的真实光强分布;  $\bar{I}$  表示

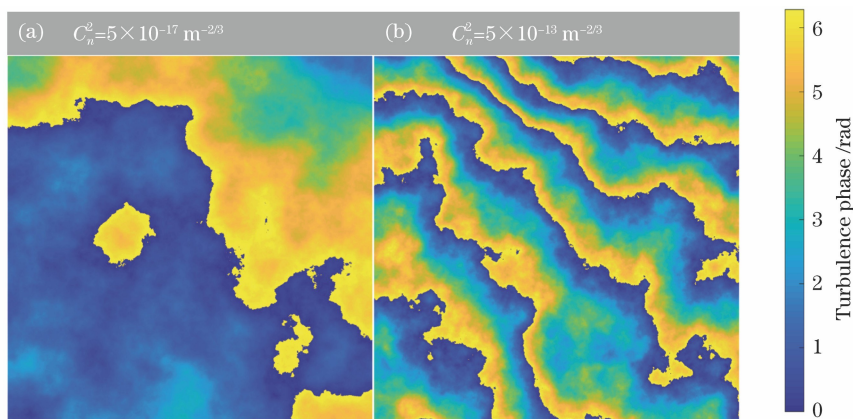


图 3 大气湍流相位屏。(a)弱湍流相位屏;(b)强湍流相位屏

Fig. 3 Atmospheric turbulence phase screens. (a) Weak turbulence phase screen; (b) strong turbulence phase screen

自起始位置到传输距离节点下的路径平均光强分布; $\langle \cdot \rangle$ 表示取均值; $R_{SI}$ 为光强闪烁指数。 $R_{SI}$ 的值表示光束经过大气湍流时光强变化的剧烈程度。仿真中,以符号  $G$  表示闪烁指数变化率绝对值均值,则有

$$G = \left[ \sum_0^{K-1} |R_{SI,M+1} - R_{SI,M}| \right] / K, \quad (14)$$

式中: $R_{SI,M}$ 为第  $M$  个传输距离点的闪烁指数; $M$  的取值为  $0 \sim K$ ,  $K$  为相位屏叠加总次数,  $K$  取值 50。使用  $G$  作为定量评价闪烁指数曲线变化程度的参

数,  $G$  值越小说明闪烁指数变化越平缓,  $G$  值越大说明闪烁指数变化越剧烈。

### 3 仿真结果与分析

#### 3.1 矢量光束在大气湍流传输下的 Stokes 矢量

实验中,分别仿真了 1 阶、3 阶、5 阶、7 阶、9 阶五组径向偏振矢量光束在不同湍流下的传输性质。图 4~6 分别为 1 阶、5 阶、9 阶径向偏振矢量光束在弱湍流和强湍流下 1000 m 内的 Stokes 矢量分量图

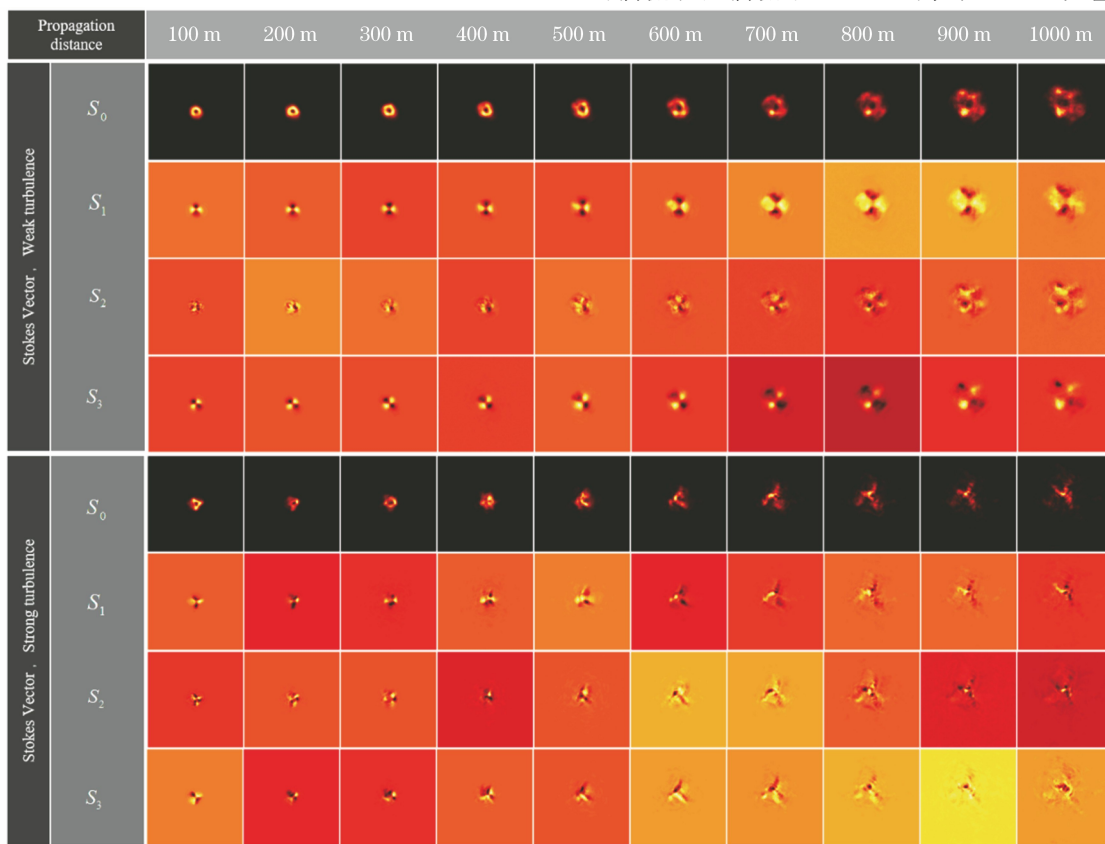


图 4 1 阶径向偏振矢量光束在弱湍流与强湍流下的 Stokes 矢量

Fig. 4 Stokes vectors of the 1<sup>st</sup> order radially-polarized vector beam under weak turbulence and strong turbulence

像。其中,Stokes 矢量的  $S_0$  分量代表光强分布图像,在两种湍流下矢量光束光强分布都随传输距离的增加而逐渐扩散,且光强分布图像都发生畸变,随着湍流强度的增加,光斑畸变更加明显。同样地,Stokes 矢量的  $S_1$  分量、 $S_2$  分量、 $S_3$  分量均受到大气湍流影响,在传输过程中发生畸变,畸变程度随湍流强度增加而增加。

相较于 1 阶径向偏振矢量光束,5 阶径向偏振矢量光束在大气湍流传输过程中能在更远的距离保持光强分布的环形特征;弱湍流下,1 阶径向偏振矢量光束在传输 600 m 后无法分清光强分布环形特征,而 5 阶径向偏振矢量光束在传输 1000 m 时光强分布环形特征仍清晰可见;强湍流下,1 阶径向偏振矢量光束保持光强分布环形特征的最大距离是

400 m, 5 阶径向偏振矢量光束保持光强分布环形特征的最大距离是 500 m。同样地,对于 Stokes 矢量的  $S_1$  分量、 $S_2$  分量、 $S_3$  分量,在弱湍流条件下,5 阶径向偏振矢量光束的 Stokes 矢量分量图像在大气湍流传输过程中均能比 1 阶径向偏振矢量光束的相应 Stokes 矢量分量图像在更远的传输距离下保持相应的图像特征。

对于 9 阶径向偏振矢量光束,弱湍流条件下,其光强分布图像保持环形特征的最大距离为 1300 m。在强湍流情形下,其光强分布保持环形特征的最大距离是 600 m。分析 9 阶径向偏振矢量光束的 Stokes 矢量  $S_1$  分量、 $S_2$  分量、 $S_3$  分量,弱湍流条件下,3 个分量对应的图像清晰度都随传输距离的增加而减小;强湍流条件下,图像清晰度下降得更加明显。

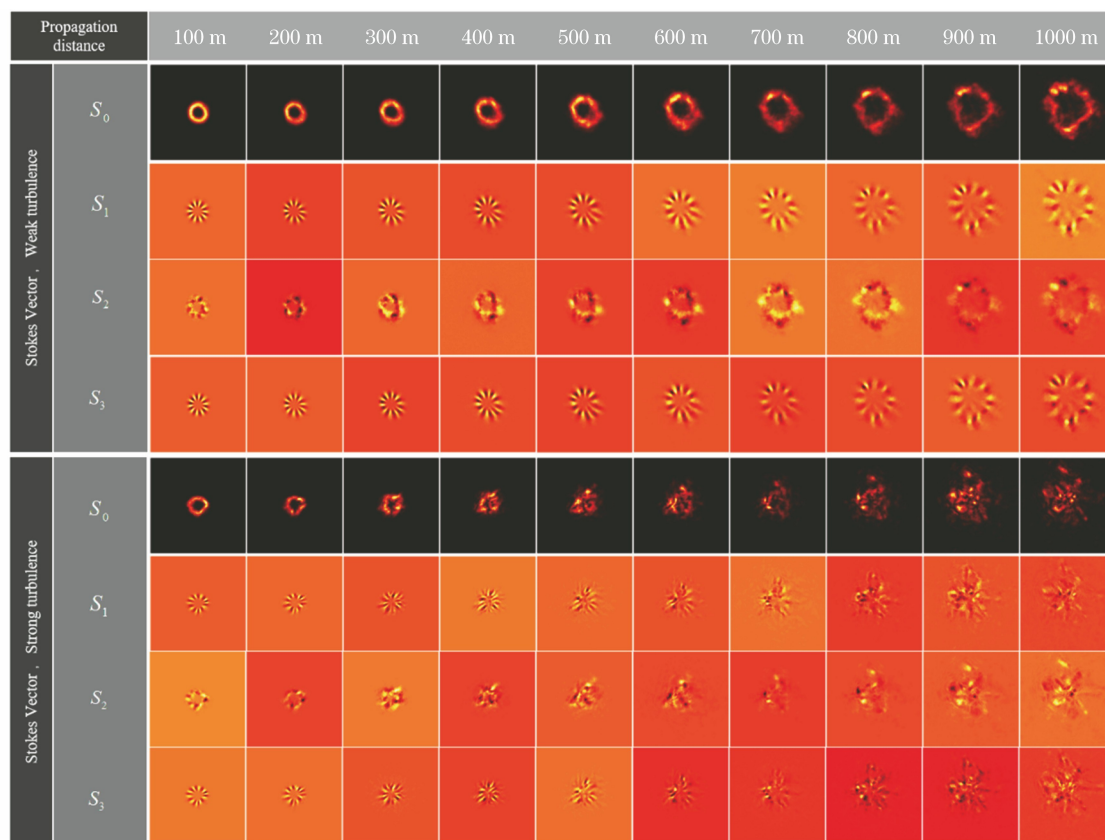


图 5 5 阶径向偏振矢量光束在弱湍流与强湍流下的 Stokes 矢量

Fig. 5 Stokes vectors of the 5<sup>th</sup> order radially-polarized vector beam under weak turbulence and strong turbulence

同时,在相同条件下对比了标量光束的光强分布图像,如图 7 所示:1 阶标量光束光强分布环形特征的最大识别距离,弱湍流下为 500 m,强湍流下为 300 m;5 阶标量涡旋光束光强分布环形特征的最大识别距离,弱湍流下为 800 m,强湍流下为 300 m;9 阶标量涡旋光束光强分布环形特征的最大识别距离,弱湍流下为 1000 m,强湍流下为 400 m。总体而言,大气

湍流下径向偏振矢量光束比标量涡旋光束能在更远的距离保持光束的环形特征,且高阶光束比低阶光束有更远的光强分布环形特征识别距离。

对于径向偏振矢量光束,其 Stokes 矢量的  $S_1$ 、 $S_2$ 、 $S_3$  分量图像在传输过程中也发生改变,大气湍流越强,变化越明显,证实了大气湍流对不同偏振态光束的影响不同。仿真所研究的径向偏振矢量光束

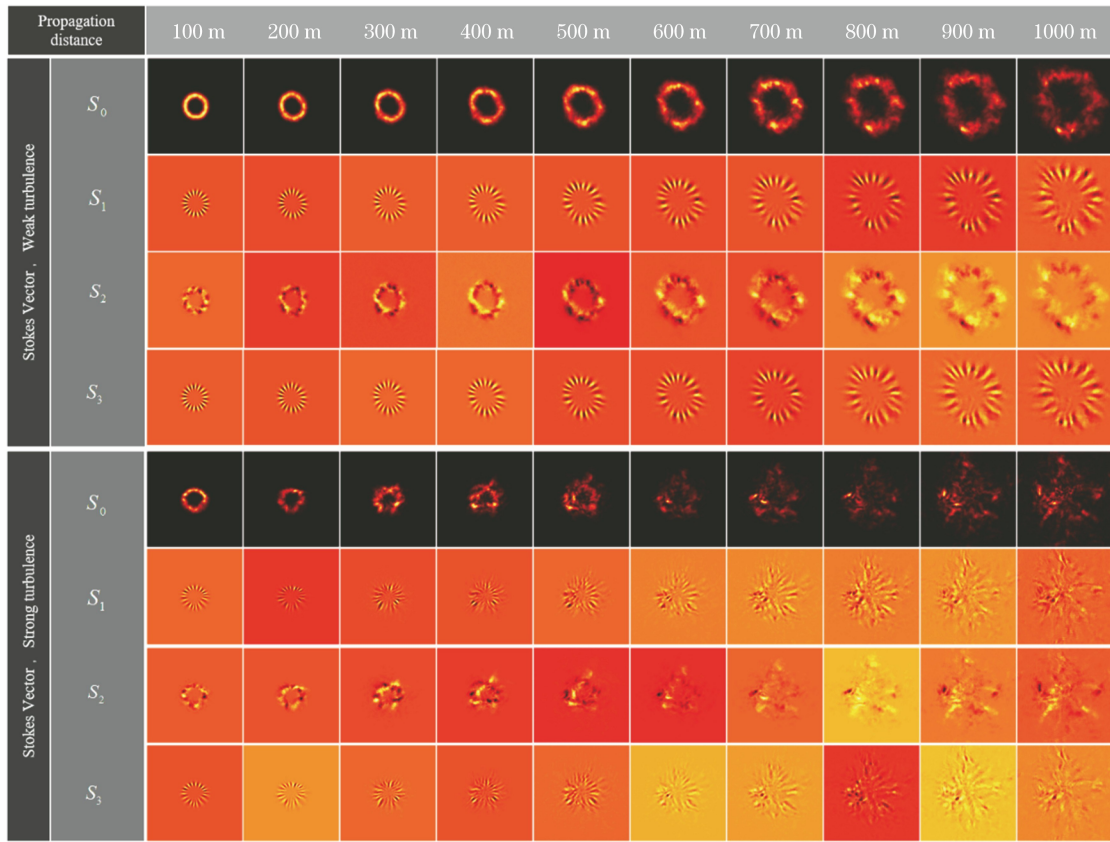


图 6 9 阶径向偏振矢量光束在弱湍流与强湍流下的 Stokes 矢量

Fig. 6 Stokes vectors of the 9<sup>th</sup> order radially-polarized vector beam under weak turbulence and strong turbulence



图 7 标量涡旋光束在大气湍流下的光强分布图像

Fig. 7 Intensity distributions of the scalar vortex beam under atmospheric turbulence

可以视作偏振态互相正交的两束光束的叠加,这两束分量光束在大气湍流中独立传输,空间上互不相

关,受到的大气湍流的影响不一致,两束分量光束合成径向偏振矢量光束后部分影响相互抵消,使其受

到大气湍流的影响比标量光束受到的影响要小。对于高阶次的径向偏振矢量光束,以左旋、右旋圆偏振分量考虑;在一个波长对应的相位信息内,由于拓补更高,左旋分量与右旋分量相位交叠的次数也越多,意味着两个分量在大气湍流中传输时,相互补偿的部分也越多,故能在更远距离维持其光强分布的环形特征。Stokes 矢量分量图像在大气湍流中的变化,意味着合成径向偏振矢量光束的两束偏振态相互正交的分量光束之间的相位差发生了改变,进一步表明两束分量光束在相同大气湍流下相位差的变化不一致,说明大气湍流对不同偏振态光束的影响不同。

### 3.2 矢量光束在大气湍流传输下的闪烁指数

在仿真中,分别测试 1 阶、3 阶、5 阶、7 阶、9 阶

五组径向偏振矢量光束以及相应阶次的标量涡旋光束在弱湍流、强湍流情形下 0~5000 m 传输路径中,50 个传输距离节点下的闪烁指数。在每一个大气湍流下,进行 500 次仿真,取闪烁指数均值作为结果分析。

闪烁指数仿真数据(前 10 个传输距离节点)如表 1 所示,图 8 为不同湍流强度下各阶径向偏振矢量光束与标量涡旋光束的闪烁指数图像。在不同湍流情形下,各阶径向偏振矢量光束闪烁指数都随传输距离的增加呈现先增加后减小的趋势。相对于低阶光束,高阶光束的闪烁指数曲线偏低,其极大值偏小,且阶次越高极大值对应的距离点越近。各阶次的矢量光束闪烁指数均低于同阶次的标量涡旋光束闪烁指数。

表 1 不同湍流下各阶矢量光束在各个传输距离节点的闪烁指数

Table 1 Scintillation indexes of vector beams under different atmospheric turbulences at different propagation distances

Propagation distance	100 m	200 m	300 m	400 m	500 m	600 m	700 m	800 m	900 m	1000 m
$l=1$ , weak turbulence	0.0447	0.0595	0.1353	0.2200	0.2911	0.4160	0.5337	0.7181	0.8580	1.0956
$l=1$ , strong turbulence	0.1963	0.5340	1.1271	2.1422	2.9896	4.3135	5.5241	6.9385	8.2400	9.1586
$l=3$ , weak turbulence	0.0437	0.0795	0.1383	0.2259	0.3027	0.4248	0.5104	0.6682	0.8259	1.0568
$l=3$ , strong turbulence	0.1954	0.6017	1.1074	2.0919	2.9733	4.2868	5.4901	6.7790	8.0844	8.9351
$l=5$ , weak turbulence	0.0429	0.0576	0.1186	0.2008	0.2925	0.4242	0.5365	0.6917	0.8424	1.0222
$l=5$ , strong turbulence	0.1946	0.6694	1.1194	2.0182	2.9383	4.1555	5.3884	6.7338	7.9770	8.7683
$l=7$ , weak turbulence	0.0422	0.0744	0.1284	0.2165	0.2890	0.3949	0.4892	0.6367	0.7878	1.0153
$l=7$ , strong turbulence	0.1939	0.6724	1.1614	1.9908	2.9443	4.1180	5.3657	6.6732	7.9196	8.6863
$l=9$ , weak turbulence	0.0414	0.0742	0.1283	0.2008	0.2698	0.3845	0.4732	0.6135	0.7843	1.0381
$l=9$ , strong turbulence	0.1933	0.6844	1.1988	2.0143	2.9745	4.1257	5.2897	6.6055	7.7261	8.4927

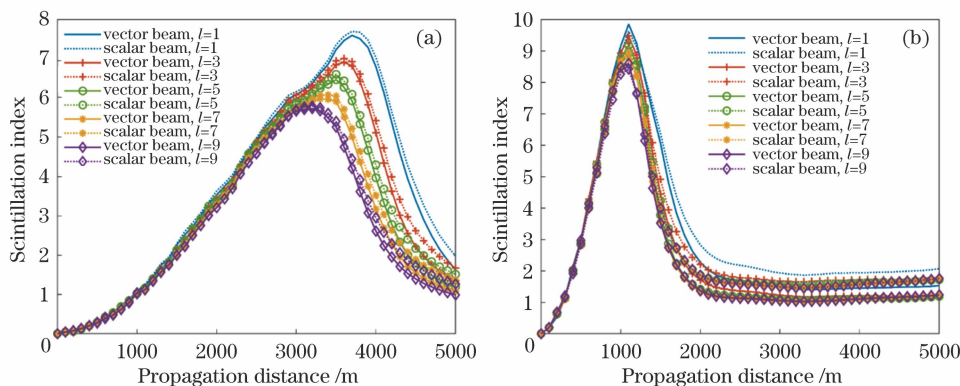


图 8 弱湍流、强湍流下径向偏振矢量光束与标量光束在各个传输距离下的闪烁指数。(a)弱湍流下;(b)强湍流下

Fig. 8 SI of vector beams and the scalar beam under atmospheric turbulence at different propagation distances.

(a) Weak turbulence; (b) strong turbulence

闪烁指数用于描述光束在空间传输过程中光强涨落的现象。分析可知,在传输路径中,径向偏振矢量光束与标量涡旋光束的闪烁指数曲线都呈现先增大后减小的趋势,同阶次的径向偏振矢量光束闪烁

指数低于标量涡旋光束;高阶次光束的闪烁指数变化更加平缓,极大值更低,意味着高阶光束的光强涨落更小。图 9 为不同大气湍流条件下传输路径中各阶径向偏振矢量光束的闪烁指数变化率绝对值均

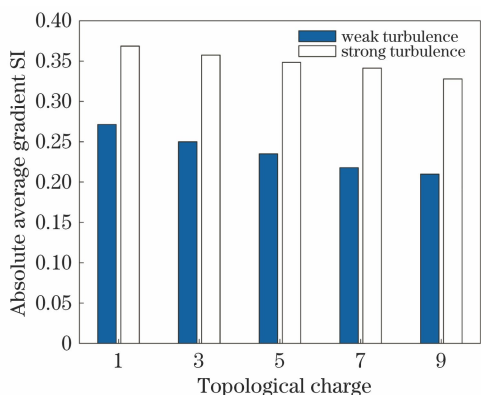


图 9 弱湍流、强湍流下各阶矢量光束闪烁指数变化率绝对值均值

Fig. 9 Absolute average gradient SI of vector beams under different atmospheric turbulences

值,用于表示闪烁指数变化的剧烈程度。容易发现:各阶径向偏振矢量光束强湍流下的闪烁指数变化比弱湍流下更加剧烈;在不同湍流情形下,低阶径向偏振矢量光束的闪烁指数变化率绝对值均值大于高阶光束,证明低阶径向偏振矢量光束的闪烁指数变化更剧烈,传输过程中光强涨落更明显。

同时,分析了大气湍流对光束光强分布横向的影响,计算了在传输路径中各阶光束光束重心相对于轴向中心的径向偏移量。测试数据(前 10 个传输距离节点)如表 2 所示,图 10 为不同湍流强度下,各阶径向偏振矢量光束与同阶标量涡旋光束光束重心径向偏移量的变化趋势。

结果显示,径向偏振矢量光束与标量涡旋光束的光束重心径向偏移量都随传输距离的增加而增

表 2 不同湍流下各阶矢量光束在各个传输距离节点的光束中心径向偏移量

Table 2 Radial deviations of vector beams at different propagation distances

mm

Propagation distance	100 m	200 m	300 m	400 m	500 m	600 m	700 m	800 m	900 m	1000 m
$l=1$ , weak turbulence	0.0011	0.0048	0.0093	0.0147	0.0210	0.0274	0.0368	0.0463	0.0567	0.0697
$l=1$ , strong turbulence	0.0046	0.0116	0.0249	0.0443	0.0699	0.0898	0.1163	0.1383	0.1663	0.1979
$l=3$ , weak turbulence	0.0006	0.0042	0.0088	0.0141	0.0205	0.0264	0.0359	0.0449	0.0549	0.0678
$l=3$ , strong turbulence	0.0042	0.0093	0.0197	0.0354	0.0565	0.0716	0.0932	0.1106	0.1331	0.1574
$l=5$ , weak turbulence	0.0007	0.0044	0.0090	0.0148	0.0216	0.0279	0.0378	0.0471	0.0576	0.0708
$l=5$ , strong turbulence	0.0037	0.0078	0.0163	0.0292	0.0467	0.0582	0.0756	0.0887	0.1061	0.1249
$l=7$ , weak turbulence	0.0010	0.0048	0.0098	0.0161	0.0239	0.0312	0.0417	0.0517	0.0632	0.0770
$l=7$ , strong turbulence	0.0032	0.0060	0.0125	0.0226	0.0365	0.0446	0.0579	0.0670	0.0798	0.0938
$l=9$ , weak turbulence	0.0013	0.0051	0.0103	0.0171	0.0256	0.0336	0.0446	0.0552	0.0674	0.0819
$l=9$ , strong turbulence	0.0026	0.0042	0.0090	0.0166	0.0274	0.0325	0.0425	0.0486	0.0578	0.0681

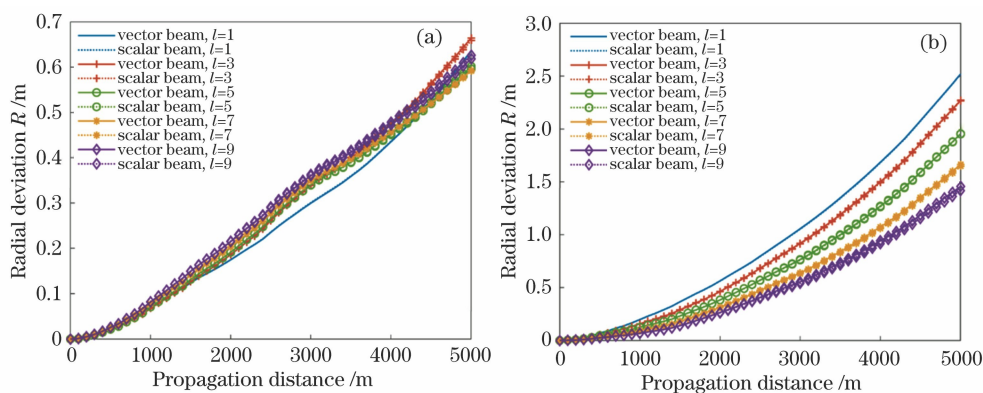


图 10 弱湍流、强湍流下径向偏振矢量光束与标量光束在各个传输距离下的光束中心径向偏移量。

(a)弱湍流下;(b)强湍流下

Fig. 10 Radial deviations of vector beams and the scalar beam under different atmospheric turbulences at different propagation distances. (a) Weak turbulence; (b) strong turbulence

加,强湍流下光束重心径向偏移量更大。同阶次的径向偏振矢量光束与标量涡旋光束相比,相同大气湍流下,光束重心径向偏移量差异不大。对于径向

偏振矢量光束,弱湍流下,不同阶次光束之间的光束重心径向偏移量差异较小;但在强湍流下,高阶径向偏振矢量光束的光束重心径向偏移量小于低阶光



束,这意味着高阶光束在大气湍流中传输时光斑漂移量偏小。

综合而言,径向偏振矢量光束比标量涡旋光束有更小的闪烁指数,原因在于:传输过程中,径向偏振矢量光束的两个正交偏振分量受到的大气湍流影响部分抵消,使得路径中光强涨落降低,故其闪烁指数相对较小。仿真中,本研究对各阶光束的初始能量作了归一化处理,高阶光束环带面积更大,中心环带光强值小于低阶光束,且高阶光束两个分量之间的相互补偿部分更多,在传输过程中光强的涨落值相对较低,使得其闪烁指数曲线低于低阶光束的闪烁指数曲线。而在传输路径中,当光强值损耗到一定程度时,其涨落将不明显,使得闪烁指数曲线开始降低;同时由于初始能量的归一化,相同距离下,高阶光束的中心环带光强小于低阶光束,在更短的距离光强涨落不明显,故其闪烁指数曲线拐点对应的距离更小。

分析光束重心径向偏移量,同阶次的径向偏振矢量光束与标量光束具有相同的环带面积与光强分布,在相同大气湍流下,二者的光束重心径向偏移量差异比较微弱。在传输过程中,高阶光束的两个分量之间的相互补偿部分更多,光强的涨落相对不明显,因此高阶光束的光束重心偏移量也相对较小。而在强大气湍流下,各阶光束的光强涨落值都高于弱大气湍流下的光强涨落值,因此光束光斑的漂移相对明显,光束重心偏移量也更大。

## 4 结 论

采用分布相位屏的方法,对不同阶次的矢量光束在不同强度的大气湍流中传输的 Stokes 矢量、闪烁指数、光束重心径向偏移量作仿真分析。研究发现,相同大气湍流下,径向偏振矢量光束与标量涡旋光束相比,其光强分布环形特征的最大识别距离更远、闪烁指数更低、光束重心径向偏移量相对更小,大气湍流的抗性优于标量涡旋光束。同时,径向偏振矢量光束的 Stokes 矢量分量图像在传输过程中发生变化,揭示不同偏振态光束受到大气湍流的影响也不同。对于径向偏振矢量光束,高阶光束能在更远的距离保持光强分布的环形特征,且其横向评价参数光束重心径向偏移量小于低阶光束,纵向参数闪烁指数小于低阶光束。因此整体而言,径向偏振矢量光束比标量涡旋光束表现出了更好的大气湍流抗性,高阶光束的部分性质优于低阶光束。

## 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] Mirhosseini M, Magaña-Loaiza O S, Chen C C, et al. Rapid generation of light beams carrying orbital angular momentum[J]. *Optics Express*, 2013, 21(25): 30196-30203.
- [3] Zhang C L, Min C J, Yuan X C. Shaping perfect optical vortex with amplitude modulated using a digital micro-mirror device[J]. *Optics Communications*, 2016, 381: 292-295.
- [4] Fickler R, Lapkiewicz R, Plick W N, et al. Quantum entanglement of high angular momenta[J]. *Science*, 2012, 338(6107): 640-643.
- [5] Fu S Y, Wang T L, Gao C Q. Generating perfect polarization vortices through encoding liquid-crystal display devices[J]. *Applied Optics*, 2016, 55(23): 6501-6505.
- [6] Davis J A, Hashimoto N, Kurihara M, et al. Analysis of a segmented Q-plate tunable retarder for the generation of first-order vector beams[J]. *Applied Optics*, 2015, 54(32): 9583-9590.
- [7] Xin J T, Lou X P, Zhou Z H, et al. Generation of polarization vortex beams by segmented quarter-wave plates[J]. *Chinese Optics Letters*, 2016, 14(7): 070501.
- [8] Kim J W, Clarkson W A. Selective generation of Laguerre-Gaussian ( $LG_{0n}$ ) mode output in a diode-laser pumped Nd:YAG laser[J]. *Optics Communications*, 2013, 296: 109-112.
- [9] Zhang Y X, Yu H H, Zhang H J, et al. Self-mode-locked Laguerre-Gaussian beam with staged topological charge by thermal-optical field coupling [J]. *Optics Express*, 2016, 24(5): 5514-5522.
- [10] Ito A, Kozawa Y, Sato S. Generation of hollow scalar and vector beams using a spot-defect mirror [J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 2010, 27(9): 2072-2077.
- [11] Qiao Z, Xie G Q, Wu Y H, et al. High-charge optical vortices: generating high-charge optical vortices directly from laser up to 288th order[J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2018, 12(8): 1800019.
- [12] Li L L, Li F. Beating the Rayleigh limit: orbital-angular-momentum-based super-resolution diffraction tomography[J]. *Physical Review E*, 2013, 88(3): 033205.
- [13] Lin M T, Liu P G, Gao Y, et al. Super-resolution orbital angular momentum based radar targets detection [J]. *Electronics Letters*, 2016, 52(13):

- 1168-1170.
- [14] Liu K, Cheng Y Q, Gao Y, et al. Super-resolution radar imaging based on experimental OAM beams [J]. Applied Physics Letters, 2017, 110 (16): 164102.
- [15] Willner A E, Ren Y X, Xie G D, et al. Recent advances in high-capacity free-space optical and radio-frequency communications using orbital angular momentum multiplexing[J]. Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences, 2017, 375(2087): 20150439.
- [16] Wang J. Advances in communications using optical vortices[J]. Photonics Research, 2016, 4(5): B14-B28.
- [17] Yu S Y. Potentials and challenges of using orbital angular momentum communications in optical interconnects[J]. Optics Express, 2015, 23 (3): 3075-3087.
- [18] Shen Y J, Wang X J, Xie Z W, et al. Optical vortices 30 years on: OAM manipulation from topological charge to multiple singularities[J]. Light: Science & Applications, 2019, 8: 90.
- [19] Zhan Q W. Cylindrical vector beams: from mathematical concepts to applications[J]. Advances in Optics and Photonics, 2009, 1(1): 1-57.
- [20] Milione G, Lavery M P J, Huang H, et al.  $4 \times 20$  Gbit/s mode division multiplexing over free space using vector modes and a Q-plate mode (de) multiplexer[J]. Optics Letters, 2015, 40(9): 1980-1983.
- [21] Lavery M P J, Speirits F C, Barnett S M, et al. Detection of a spinning object using light's orbital angular momentum[J]. Science, 2013, 341(6145): 537-540.
- [22] Rosales-Guzmán C, Ndagano B, Forbes A. A review of complex vector light fields and their applications [J]. Journal of Optics, 2018, 20(12): 123001.
- [23] Ren Y X, Huang H, Xie G D, et al. Atmospheric turbulence effects on the performance of a free space optical link employing orbital angular momentum multiplexing[J]. Optics Letters, 2013, 38(20): 4062.
- [24] Fu S Y, Gao C Q. Influences of atmospheric turbulence effects on the orbital angular momentum spectra of vortex beams [J]. Photonics Research, 2016, 4(5): B1-B4.
- [25] Cheng W, Haus J W, Zhan Q W. Propagation of vector vortex beams through a turbulent atmosphere [J]. Optics Express, 2009, 17(20): 17829-17836.
- [26] Birch P, Ituen I, Young R, et al. Long-distance Bessel beam propagation through Kolmogorov turbulence[J]. Journal of the Optical Society of America A, 2015, 32(11): 2066-2073.
- [27] Andrews L C, Philips R L, Hopen C Y. Laser beam scintillation with applications [M]. Bellingham, Washington D.C., USA: SPIE Press, 2001: PM99.
- [28] Zhang K N, Liu Y X, Pu J X. Scintillation index of vortex beams propagating in oceanic turbulence [J]. Chinese Journal of Lasers, 2019, 46(7): 0705001. 张凯宁, 刘永欣, 蒲继雄. 涡旋光束在海洋湍流中传输的闪烁因子 [J]. 中国激光, 2019, 46 (7): 0705001.
- [29] Fu S Y. Study on the generation, detection and distortion compensation of optical vortices[D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2018: 96-100. 付时尧. 涡旋光束的生成、探测及畸变补偿技术研究 [D]. 北京:北京理工大学, 2018: 96-100.