

基于波前相位校正的 OAM-SK FSO 通信系统误码率性能研究

李爽, 王平, 刘涛, 潘宇婷, 王炜

(西安电子科技大学通信工程学院综合业务网国家重点实验室, 陕西 西安 710071)

摘要: 弱大气湍流条件下, 针对轨道角动量键控自由空间光通信系统, 基于 Gerchberg-Saxton 算法和角谱理论, 提出了一种改进的 Laguerre-Gaussian 光束波前相位校正算法。该算法将传输前后探测光束的光场分布作为输入, 利用迭代计算得到的相位掩膜校正畸变的传输光束, 从而减缓大气湍流引起的模间串扰效应。仿真结果表明, 改进的波前相位校正算法明显优于传统的 GS 算法, 且随着折射率结构参数的增加, 系统的误码率性能得到显著提升。

关键词: 自由空间光通信; 轨道角动量; 相位校正; 角谱理论; 误码率

中图分类号: TN929.12

文献标志码: A

DOI: 10.11959/j.issn.1000-436x.2022110

Research on BER performance of the OAM-SK FSO communication system with wavefront phase correction

LI Shuang, WANG Ping, LIU Tao, PAN Yuting, WANG Wei

State Key Laboratory of Integrated Service Networks, School of Telecommunications Engineering, Xidian University, Xi'an 710071, China

Abstract: On the basis of Gerchberg-Saxton (GS) algorithm and angular-spectrum theory, an improved wavefront phase correction algorithm to the Laguerre-Gaussian (LG) beams was proposed for the orbital angular momentum-shift keying (OAM-SK) modulation-based free space optical (FSO) communication system under weak atmospheric turbulence. The light field distributions of the probe beam at transmitter and receiver were regarded as the input of the improved wavefront phase correction algorithm. And the correction phase mask was iteratively calculated to correct the distorted LG beams, thereby alleviating the inter-modal crosstalk caused by atmospheric turbulence. Simulation results show that the improved wavefront phase correction algorithm is superior to the conditional GS algorithm. And with the increase of the refractive-index structure parameter, the bit error rate (BER) performance of the OAM-SK FSO communication system is significantly improved.

Keywords: free space optical, orbital angular momentum, phase correction, angular-spectrum theory, bit error rate

0 引言

自由空间光通信 (FSO, free space optical) 技术以其大带宽、高数据速率、低功耗、快速方便部署以及不需要频谱许可等特点在无线通信领域中占据重要地位^[1-3]。为了进一步增加 FSO 链路的信息传输能力, 研究者提出了多种技术, 如波分复用^[4]、

空间多路复用^[5]等。近年来, 涡旋光的空间模式提供了一种新的信息编码自由度, 大大提高了光通信链路在有限带宽内的系统容量和光谱效率, 使基于涡旋光的 FSO 通信系统研究逐渐成为当前无线通信领域研究的热点之一。

轨道角动量 (OAM, orbital angular momentum) 是光的一种特性。携带 OAM 的光束通常被称为涡

收稿日期: 2022-03-11; 修回日期: 2022-04-26

通信作者: 王平, pingwang@xidian.edu.cn

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No.62071365); 陕西省重点研发计划基金资助项目 (No.2022GY-103)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (No.62071365), The Key Research and Development Program of Shaanxi Province (No.2022GY-103)

旋光，具有螺旋相位 $\exp(im\theta)$ ，其中 m 为拓扑荷，也被称为 OAM 模式数； θ 为方位角^[6]。和传统的振幅、频率、相位等自由度相比，OAM 在理论上拥有无限的模式，因而能够在不增加频谱带宽的情况下使信道容量以及频谱效率得到进一步的提升^[7-8]。同时，带有不同拓扑荷的涡旋光束具有正交性，即通过真空传输后，任意 2 个不同拓扑荷的涡旋光束标量积为 0。OAM 键控是指将比特信息映射到涡旋光束的拓扑荷上，结合 OAM 的无限模态实现更高阶的调制^[9]。然而，由于涡旋光束相位和振幅结构的特殊性，OAM-SK FSO 通信链路的传输性能尤其是在长距离数据传输中仍面临 2 个主要的挑战。一是光束发散的影响。当接收机孔径受限时，OAM 光束的发散可能会导致功率损耗和模式串扰^[10]。另外，高阶 OAM 光束比低阶 OAM 光束发散得更快，因此更难捕获^[11]。当前，为了抑制 OAM 光束的发散，一种比较有效的方法是使用聚焦透镜，它能够直接减小接收端侧的光束直径^[12]。但是，当传输距离发生变化时，聚焦镜头的参数也需要进行相应调整。二是大气湍流的影响。大气中温度、压力的不均匀变换会使大气折射率产生随机变化，引起光束相位的扰动，从而导致无线光通信信号的强度波动^[13]，最终使 FSO 系统的传输性能恶化。对于涡旋光束而言，具体地，大气湍流会造成涡旋光束本征态能量向其他的 OAM 模态转移，由此导致 OAM 本征态信道衰减和模式间串扰。因此，在实际应用中缓解大气湍流导致的信号失真对 OAM-SK FSO 通信系统而言至关重要。

针对上述问题，现有文献报道了多种补偿方案，如多输入多输出（MIMO, multiple-input multiple-output）均衡^[14]、空间分集^[15]、卷积神经网络^[16]等。除此之外，自适应光学（AO, adaptive optics）也是一类比较好的补偿方法^[17-28]。该方法根据是否有助于畸变相位检测的参考光束分为探测型^[20]和非探测型^[21-22]；根据是否有助于测量畸变相位的波前传感器（WFS, wavefront sensor）分为基于 WFS 的 AO 系统和无 WFS 的 AO 系统。其中，基于 WFS 的 AO 系统一般采用 Shack Hartmann 波前传感器作为探测器，变形镜作为波前校正器。然而，由于 OAM 光束具有螺旋状的波前相位结构，因此 OAM 光束的探测较困难。另外，系统中还可能存在未对准、波前重建误差等问题^[19]。针对该问题，研究人员提出了一种利用探测光束进行波前相位畸变检

测的无 WFS AO 系统^[23-27]。该系统基于相位恢复算法间接地测量像差，由于其不需要独立的波前传感器，从而大大简化了 AO 系统的设计，降低了系统复杂度。在无波前传感器的 AO 系统中，GS（Gerchberg-Saxton）算法是用于波前相位恢复的经典算法。早期，Ren 等^[23]提出了一种基于 GS 算法的波前相位校正技术，并将其应用于 OAM 复用 FSO 通信系统中，有效缓解了大气湍流引起的相位畸变。随后，他们提出了一种基于 AO 的波前校正技术，通过高斯光束探测大气湍流引起的波前畸变，进而分别在多路复用和双向 OAM-FSO 链路上进行了波前校正实验^[24-25]。结果表明，经过相位补偿后大气湍流对相邻模态的串扰降低了 12 dB 以上。邹丽等^[26]基于 GS 算法研究了正交相移键控（QPSK, quadrature phase shift keying）调制的 OAM-FSO 通信系统的抗干扰性能。仿真表明，采用波前相位校正方案的系统误码率性能得到了明显提升。此外，Fu 等^[27]基于高斯探测光束研究了非均匀介质中贝塞尔光束的校正方法。从提高模式纯度和抑制信道间串扰的角度来看，该方法对单路和多路布拉格光栅光束都具有很好的校正作用。

综上，GS 算法已经被广泛用于涡旋光束波前相位的恢复研究中^[23-27]，然而由于其傅里叶变换的代价函数是非凸的，并且可能存在多个局部最小值，传统的 GS 算法不总是收敛的^[29]。为了更好地实现涡旋光束的波前相位校正并提高 OAM-SK FSO 通信系统的误码率性能，本文在弱大气湍流条件下，基于 GS 算法和角谱理论提出了一种改进的涡旋光束波前相位校正算法。该算法首先基于大气湍流对 LG (Laguerre-Gaussian) 光束造成畸变信息，将探测光束传输前后的光场分布作为改进的波前相位校正算法的输入，通过一系列的迭代计算后，得到预补偿的相位掩膜。然后通过空间光调制器将相位掩膜的共轭加载到畸变的传输光束上来缓解大气湍流对传输光束造成的影响。最后将改进的波前相位校正算法应用于 OAM-SK FSO 通信系统中，并对该系统的误码率性能进行了研究。

1 OAM-FSO 通信系统传输方案以及改进的波前相位校正算法

1.1 基于 AO 的 OAM-FSO 通信系统传输方案

图 1 给出了基于 AO 的 OAM-FSO 通信系统传输方案流程。在发射机处，将探测光束和携带 OAM

模态的 LG 光束进行偏振复用，并进行同轴传输，一起通过大气湍流信道^[27]。传输过程中，大气湍流会引起 LG 光束的强度和相位随机起伏，从而造成传输光束发生波前相位畸变。畸变的探测光束和传输光束通过接收器上的偏振分束器被分开。进而畸变的探测光束作为改进的涡旋光束波前相位校正算法的输入，迭代计算出补偿的相位掩膜。最后，通过空间光调制器将相位掩膜的共轭加载到畸变的传输光束上，从而缓解大气湍流引起的传输 LG 光束的模式间串扰以及相位畸变。

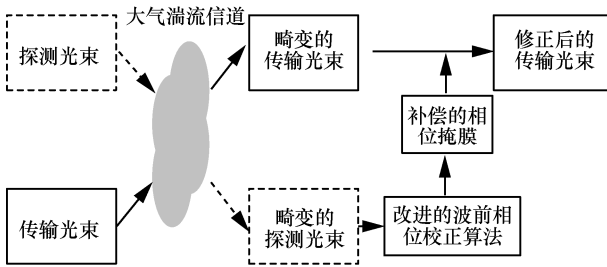


图 1 基于 AO 的 OAM-FSO 通信系统传输方案流程

本文中，探测光束和传输光束均采用 LG 光束。当 LG 光束的径向模式数 $p = 0$ 时，被称为 TEM01* 光束，又被称为环形光束。极坐标下的 TEM01* 光束在传输距离 z 处的光场分布为^[30]

$$\bar{U}_m(\rho, \varphi, z) = \sqrt{\frac{2}{\pi|m|!}} \frac{1}{\omega(z)} \left[\frac{\rho\sqrt{2}}{\omega(z)} \right]^{|m|} \exp\left[-\frac{\rho^2}{\omega^2(z)}\right] \cdot \exp\left[-\frac{ik_0\rho^2}{2R(z)}\right] \exp[i\psi(z)] \exp(-im\varphi) \quad (1)$$

其中， $k_0 = \frac{2\pi}{\lambda}$ 为波数， λ 为波长； ρ 为极坐标系中的半径坐标； φ 为角坐标； m 为涡旋光束的拓扑荷，也称为 OAM 模式数； $\omega(z) = \omega_0 \sqrt{1 + \left(\frac{z}{z_R}\right)^2}$ 为传输距离 z 处 LG 光束的光斑半径， $z_R = \frac{\pi\omega_0^2}{\lambda}$ 为瑞利范围， ω_0 为束腰半径； $R(z)$ 为传输距离 z 处的波前曲率半径， $\psi(z)$ 为传输距离 z 处的古伊相位。图 2(a) 和图 2(b) 分别给出了拓扑荷为 4 的 TEM01* 光束在光源处的幅度和相位分布，图 2(c) 和图 2(d) 分别给出了拓扑荷为 4 的 TEM01* 光束在真空中传输 1 000 m 后的幅度和相位分布。从图 2 可以看出，LG 光束的束腰半径随传输距离的增加而增加，而光场强度有

所下降。此外，由于衍射效应，LG 光束的相位分布由图 2(b) 中的直线发散状变成图 2(d) 中的螺旋状。

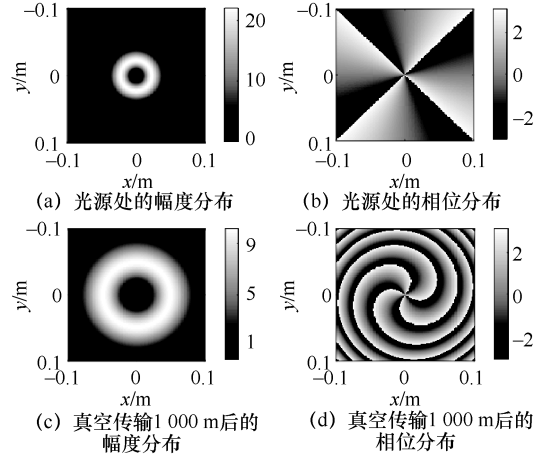


图 2 拓扑荷为 4 的 TEM01* 光束的幅度和相位分布

在 OAM-FSO 通信系统中，通常使用 OAM 因子来表现信道信息。OAM 因子分为 OAM 衰减因子和串扰因子，衰减因子 $\eta_{m \rightarrow m}$ 表示涡旋光束本征态自信道衰减比例，串扰因子 $\eta_{m \rightarrow n} (m \neq n)$ 表示涡旋光束的能量从本征模态转移到其他 OAM 模态的比例。 $\eta_{m \rightarrow m}$ 可看作自信道衰落， $\eta_{m \rightarrow n} (m \neq n)$ 可看作不同 OAM 信道之间的串扰情况，具体形式为

$$\eta_{m \rightarrow n} = \frac{\langle \mu_{m \rightarrow n} \rangle}{\sum_{k=-\infty}^{+\infty} \langle \mu_{k \rightarrow n} \rangle} \quad \text{s.t.} \quad \sum_{n=-\infty}^{+\infty} \eta_{m \rightarrow n} = 1 \quad (2)$$

其中， $\langle \cdot \rangle$ 表示集合平均。

$$\mu_{m \rightarrow n} = (u_m^T, u_n^V) \quad (3)$$

其中， $(u^T, u^V) = \iint u^{T*}(\rho, \varphi, z) u^V(\rho, \varphi, z) \rho d\rho d\varphi$ ，上标*表示共轭计算； u_m^T 表示拓扑荷为 m 的涡旋光束在湍流信道中传输距离 z 处的光场， u_n^V 表示 OAM 拓扑荷为 n 的涡旋光束在真空中传输距离为 z 处的光场。对于具有不同拓扑荷的涡旋光束，其在真空中传输后仍保持相互正交

$$(u_m, u_n) = \begin{cases} 1, & m = n \\ 0, & m \neq n \end{cases} \quad (4)$$

因此， $\eta_{m \rightarrow m} = 1$ ， $\eta_{m \rightarrow n} (m \neq n) = 0$ 。

1.2 改进的涡旋光束波前相位校正算法

文献[19]给出了关于 GS 算法的详细理论分析，

证明了 GS 算法的合理性和有效性。本文在 GS 算法的基础上, 结合角谱传输理论提出了一种改进的涡旋光束波前相位校正算法。图 3 给出了改进的涡旋光束波前相位校正算法流程。

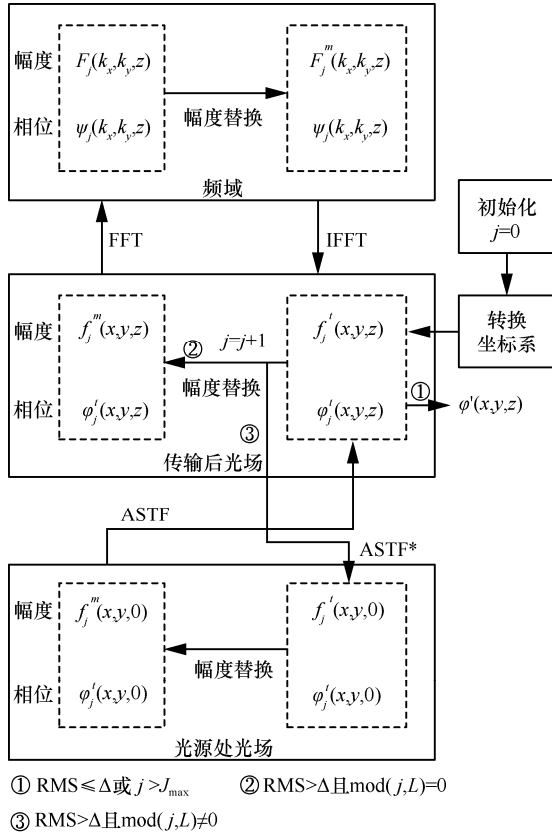


图3 改进的涡旋光束波前相位校正算法流程

改进的涡旋光束速波前相位校正算法具体步骤如下。

步骤1 初始化2个拓扑荷分别为 m 和 l 的 LG 光束, 并将其作为传输光束和探测光束, 它们在光源处的场强分布分别为 $\bar{U}_m(\rho, \varphi, 0)$ 和 $\bar{U}_l(\rho, \varphi, 0)$; 此外, 初始化收敛误差 Δ , 迭代次数 $j=0$, 最大迭代次数 J_{\max} 和标志位 L 。

步骤2 将探测光束和传输光束场强分布在极坐标系下的表示转换为在直角坐标系下的表示, 分别记为 $\bar{U}_l(x, y, 0)$ 和 $\bar{U}_m(x, y, 0)$; 然后将探测光束和传输光束复用, 并在湍流信道中同轴传输, 其经过距离为 z 的传输后均发生畸变; 畸变的传输光束的场强分布为 $\bar{U}_m^t(x, y, z)$, 畸变的探测光束在时域中的场强分布为

$$\bar{U}_l^t(x, y, z) = f_l^t(x, y, z) \exp[i\phi^t(x, y, z)] \quad (5)$$

其中, $f_l^t(x, y, z)$ 和 $\phi^t(x, y, z)$ 分别为畸变的探测光束在时域上的幅度分布和相位分布。将受湍流影响的探测光束作为改进的波前相位校正算法的输入。

步骤3 用传输光束的幅度分布替换探测光束的幅度分布, 则第 j 次迭代过程中初始光束的光场分布可表示为

$$\bar{U}_{0,j}^t(x, y, z) = f_j^m(x, y, z) \exp[i\phi_j^t(x, y, z)] \quad (6)$$

$$f_j^m(x, y, z) = |\bar{U}_{0,j}^t(x, y, z)| \quad (7)$$

其中, $|\cdot|$ 为取值操作符; $f_j^m(x, y, z)$ 和 $\phi_j^t(x, y, z)$ 分别为第 j 次迭代过程中初始光束在时域上的幅度分布和相位分布。

步骤4 采用快速傅里叶变换将初始光束的场强分布 $\bar{U}_{0,j}^t(x, y, z)$ 转换到频域

$$\mathcal{F}\{\bar{U}_{0,j}^t(x, y, z)\} = F_j(k_x, k_y, z) \exp[i\Psi_j(k_x, k_y, z)] \quad (8)$$

其中, $\mathcal{F}(\cdot)$ 为快速傅里叶变换函数, $F_j(k_x, k_y, z)$ 和 $\Psi_j(k_x, k_y, z)$ 分别为第 j 次迭代过程中初始光束在频域上的幅度分布和相位分布。然后在频域上用畸变传输光束的幅度分布替换初始光束的幅度分布

$$\bar{U}_{0,j}(k_x, k_y, z) = F_j^m(k_x, k_y, z) \exp[i\Psi_j(k_x, k_y, z)] \quad (9)$$

$$F_j^m(k_x, k_y, z) = |\mathcal{F}\{\bar{U}_{0,j}^t(x, y, z)\}| \quad (10)$$

步骤5 采用快速傅里叶逆变换, 将频域中初始光束的场强分布 $\bar{U}_{0,j}(k_x, k_y, z)$ 转换到时域

$$\mathcal{F}^{-1}\{\bar{U}_{0,j}(k_x, k_y, z)\} = f_{j+1}^t(x, y, z) \exp[i\phi_{j+1}^t(x, y, z)] \quad (11)$$

其中, $\mathcal{F}^{-1}(\cdot)$ 为快速傅里叶逆变换函数; $f_{j+1}^t(x, y, z)$ 和 $\phi_{j+1}^t(x, y, z)$ 分别为第 j 次迭代过程中初始光束在时域上的幅度分布和相位分布。

步骤6 定义均方根误差作为算法的代价函数, 即

$$\text{RMS} = \left(\frac{\sum \sum (|\bar{U}_{0,1}^t(k_x, k_y, z)| - |\bar{U}_{0,j}(k_x, k_y, z)|)^2}{\sum \sum |\bar{U}_{0,1}^t(k_x, k_y, z)|^2} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (12)$$

其中, $\bar{U}_{0,1}^t(k_x, k_y, z)$ 和 $\bar{U}_{0,j}(k_x, k_y, z)$ 分别为波前相位校正前后初始光束场强分布的傅里叶变换。

当 $\text{RMS} \leq \Delta$ 或 $j > J_{\max}$ ，即算法满足误差设定条件或者超出最大循环次数时，算法停止，输出满足误差条件的相位分布 $\phi'_{j+1}(x, y, z)$ ，补偿的相位掩膜分布 $\phi'(x, y, z)$ 可表示为

$$\phi'(x, y, z) = \phi^t(x, y, z) - \phi'_{j+1}(x, y, z) \quad (13)$$

当 $\text{RMS} > \Delta$ 且 $\text{mod}(j, L) = 0$ ， $\text{mod}(\cdot)$ 为取余操作符，即算法不满足误差设定条件，且循环次数 j 为 L 的倍数时，转步骤 7。

当 $\text{RMS} > \Delta$ 且 $\text{mod}(j, L) \neq 0$ ，即算法不满足误差设定条件，且循环次数 j 不为 L 的倍数时， $j = j + 1$ ，转步骤 3。

步骤 7 基于光波近场传播的角谱理论，采用菲涅尔衍射积分角谱形式的逆变换，将传输距离 z 处的初始光束的场强分布转换至光源处初始光束的场强分布

$$\text{AST}^* \{ \bar{U}'_{0,j+1}(x, y, z) \} = f'_{j+1}(x, y, 0) \exp[i \phi'_{j+1}(x, y, 0)] \quad (14)$$

其中， $f'_{j+1}(x, y, 0)$ 和 $\phi'_{j+1}(x, y, 0)$ 分别为第 j 次迭代过程中初始光束在光源处的幅度分布和相位分布； $\text{AST}^* \{ U(x, y, z) \}$ 为场强分布 $U(x, y, z)$ 角频谱的共轭

$$\text{AST}^* \{ U(x, y, z) \} = \mathcal{F}^{-1} \{ \mathcal{F} [U(x, y, z)] H(f_x, f_y, z) \} \quad (15)$$

其中， $H(f_x, f_y, z)$ 为角谱传递函数的共轭

$$H(f_x, f_y, z) = \exp(-ik_0 z) \exp \left[\frac{i2\pi^2 z}{k_0} (f_x^2 + f_y^2) \right] \quad (16)$$

其中， f_x 和 f_y 分别为 x 轴和 y 轴上的空间频率。时域上，采用光源处传输光束的幅度分布替换光源处初始光束的幅度分布

$$\bar{U}_{0,j+1}(x, y, 0) = f_{j+1}^m(x, y, 0) \exp[i \phi'_{j+1}(x, y, 0)] \quad (17)$$

$$f_{j+1}^m(x, y, 0) = | \bar{U}_m(x, y, 0) | \quad (18)$$

其中， $\bar{U}_m(x, y, 0)$ 为传输光束在光源处的场强分布。

步骤 8 基于光波近场传播的角谱理论，采用菲涅尔衍射积分的角频谱形式，将初始光束在光源

处的场强分布转换至其在传输距离 z 处的场强分布

$$\text{AST} \{ \bar{U}_{0,j+1}(x, y, 0) \} = f'_{j+1}(x, y, z) \exp[i \phi'_{j+1}(x, y, z)] \quad (19)$$

其中， $\text{AST} \{ U(x, y, z) \}$ 表示场强分布 $U(x, y, z)$ 的角频谱形式，可表示为

$$\text{AST} \{ U(x, y, 0) \} = \mathcal{F}^{-1} \{ \mathcal{F} [U(x, y, z)] H_1(f_x, f_y, z) \} \quad (20)$$

其中， $H_1(f_x, f_y, z)$ 为角频谱传递函数

$$H_1(f_x, f_y, z) = \exp(ik_0 z) \exp \left[-\frac{i2\pi^2 z}{k_0} (f_x^2 + f_y^2) \right] \quad (21)$$

在上述步骤中，假设采样个数是 $N \times N$ ，采样范围是边长为 L_p 的正方形，空间频率 f_x 和 f_y 分别是 $\frac{xN}{L_p}$ 和 $\frac{yN}{L_p}$ 。

2 基于改进的波前相位校正算法的 OAM-SK FSO 通信系统模型

OAM-SK FSO 通信系统流程如图 4 所示，其利用 OAM 模式表示码元信息进行信息的传递。针对 M 进制的码元，需要 M 个不同的 OAM 模式与之对应。假设信源处的信号为 M 进制，具体为 $\{0, 1, \dots, \bar{m}-1\}$ ，码元 \bar{a} 对应 OAM 模式 $l_{\bar{a}}$ 。

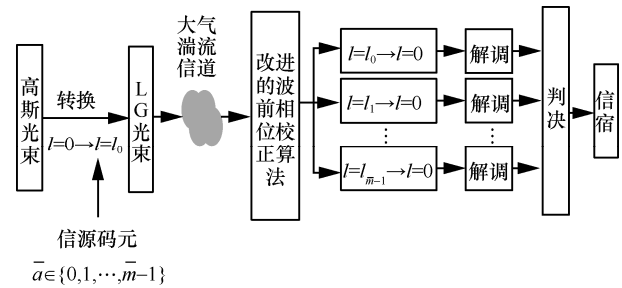


图 4 OAM-SK FSO 通信系统流程

该系统首先根据每个时隙的码元信息将高斯光束转换成对应具有 OAM 模态的 LG 光束。随后通过大气湍流信道，利用本文提出的改进的波前相位校正算法对接收到的传输光束进行相位补偿。最后，对经波前相位补偿后的传输光束进行解调，并得到一组电信号 $\mathcal{N} = \{g_0(t), g_1(t), \dots, g_{\bar{m}-1}(t)\}$ 。其中

第 \hat{m} 路的信号可表示为

$$g_{\hat{m}}(t) = \eta_{l_{\bar{a}(t)} \rightarrow l_{\hat{m}}} P \zeta + \hat{n}(t) \quad (22)$$

其中, P 是传输光信号的功率, ζ 是光电转化系数, $\hat{n}(t)$ 是均值为 0、方差为 σ^2 的高斯白噪声, $\eta_{l_{\bar{a}(t)} \rightarrow l_{\hat{m}}}$ 是拓扑荷为 $l_{\bar{a}(t)}$ 的光束到拓扑荷为 $l_{\hat{m}}$ 的光束的功率转移因子。此时, 端到端的瞬时信噪比 γ_{SK} 为

$$\gamma_{SK} = \frac{P^2 \zeta^2}{2\sigma^2} \quad (23)$$

最后, 对这组信号进行判决, 选择幅值最大的信号作为判决后的信号。判决后的信号可表示为

$$\bar{a}_r(t) \in \{\hat{m} | g_{\hat{m}}(t) \geq \max [g_{\hat{m}}(t)]\} \quad (24)$$

3 数值仿真和分析

本节对 LG 光束在弱大气湍流条件下的传输过程进行了模拟仿真, 并对本文提出的改进的波前相位校正算法的有效性进行了检验。仿真中, 基于分步光束传播法, 模拟了 LG 光束在 FSO 链路上传输, 将整个传输路径划分为 10 个部分, 并采用功率谱反演法模拟大气湍流引起的相位扰动。部分系统参数如表 1 所示。

表 1 部分系统参数		
参数	含义/单位	值
λ	波长/nm	1 550
L_0	外尺度/m	20
l_0	内尺度/m	0.01
ω_0	束腰半径/m	0.016
z	传输距离/m	1 000
L_p	采样范围边长/m	0.3

图 5 给出了当折射率结构参数 $C_n^2 = 5 \times 10^{-14} \text{ m}^{-\frac{2}{3}}$ 时, 拓扑荷为 4 的 LG 光束分别采用 GS 算法、改进的波前相位校正算法以及不采用相位校正算法时的场强分布。从图 5(a)~图 5(c)可以看出, 采用波前相位校正算法能够有效缓解大气湍流对 OAM 光束造成的相位畸变。此外, 图 5(a)中的相位图畸变程度最小, 即本文提出的改进的波前相位校正算法可以更好地缓解大气湍流的影响。

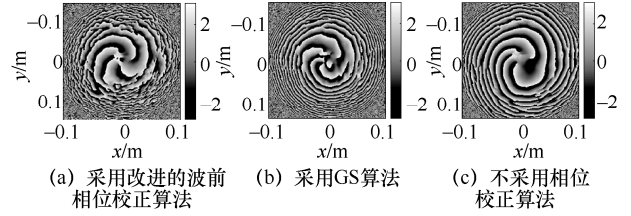


图 5 传输光束在不同情况下的场强分布

图 6 给出了图 5 对应条件下传输光束 OAM 因子的变化曲线。其中, 横坐标为 OAM 模式数, 纵坐标为 LG 光束衰减因子和串扰因子的值。从图 6 中可以看出, 不采用相位校正算法时, OAM 衰减因子 $\eta_{4 \rightarrow 4}$ 的值小于串扰因子 $\eta_{4 \rightarrow 3}$ 的值, 表明此时的传输 LG 光束已完全失真。而采用传统 GS 算法的传输光束衰减因子 $\eta_{4 \rightarrow 4} = 0.1814$, 采用改进的波前相位校正算法的衰减因子 $\eta_{4 \rightarrow 4} = 0.4217$, 并且在这 2 种情况下, LG 光束的衰减因子值均高于相邻模式的串扰因子, 从而表明改进的波前相位校正算法可以有效缓解大气湍流的影响。采用改进校正算法优化后的 LG 光束更容易将其能量保持在本征态, 只有很少的能量可能会转移到其他模式。因此, 图 5 和图 6 共同验证了本文提出的改进的波前相位校正算法的有效性。

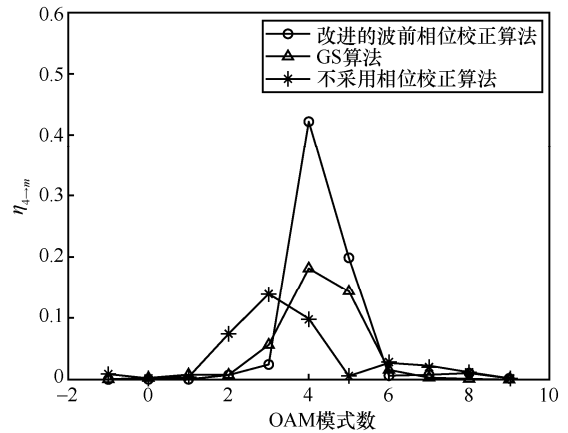


图 6 传输光束 OAM 因子的变化曲线

图 7 中给出了当折射率结构参数 $C_n^2 = 1 \times 10^{-14} \text{ m}^{-\frac{2}{3}}$ 时, 拓扑荷为 6 的传输光束衰减因子 $\eta_{6 \rightarrow 6}$ 的统计直方图。仿真实验取 500 次, 探测光束的拓扑荷为 1。其中, 图 7(a)采用本文提出的改进的波前相位校正算法, 图 7(b)采用传统的 GS 算法, 图 7(c)不采用相位校正算法。从图 7 中可以看出, OAM 功率衰减因子落在区间[0.5,1]上的次数分别为 458、385 和 163。由式(2)可知, 当 LG 光束衰减因子大于 0.5 时,

即可判断出传输光束的拓扑荷为 6。假设将 $\eta_{6 \rightarrow 6} = 0.5$ 作为判决门限, OAM 功率衰减因子大于 0.5 的概率越大, 则传输光束越有可能被接收端识别。3 种传输方案下 OAM 功率衰减因子大于 0.5 的先验概率分别为 0.916、0.770 和 0.326。分析表明, 本文提出的改进的波前相位校正算法优于传统的 GS 算法, 并且可以使接收端更准确地识别出传输光束的模式。

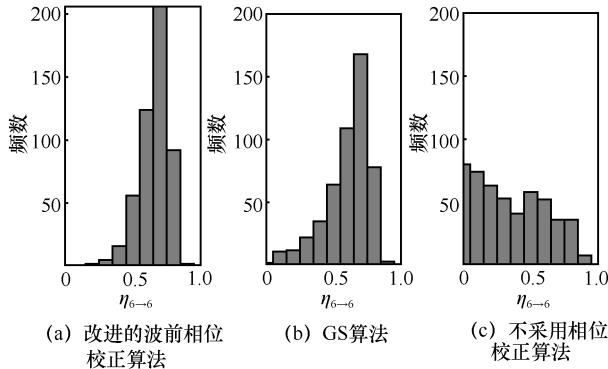


图 7 衰减因子统计直方图

图 8 给出了采用改进的波前相位校正算法时, LG 光束传输前后功率衰减因子平均值随折射率结构参数 C_n^2 的变化曲线。其中, 探测光束的拓扑荷为 1, 传输 LG 光束的拓扑荷为 {2,4,6}, 仿真次数为 100 次。从图 8 可以看到, 弱大气湍流条件下, 随着大气折射率结构参数 C_n^2 的增加, 涡旋光束在传输过程中受到大气湍流的影响加重, 因此 LG 光束的衰减因子呈下降趋势, 且拓扑荷较大的 LG 光束的衰减因子下降更快。相较于不采用相位校正算法, 采用本文提出的改进的波前相位校正算法时, 具有不同拓扑荷的 LG 光束衰减因子的平均值均有所提升。具体地, 当折射率结构参数 $C_n^2 = 1 \times 10^{-14} \text{ m}^{-2/3}$ 时, 不采用相位校正算法的 LG 光束的衰减因子平均值分别为 $\eta_{2 \rightarrow 2} = 0.540$ 、 $\eta_{4 \rightarrow 4} = 0.392$ 、 $\eta_{6 \rightarrow 6} = 0.338$; 经过校正后, LG 光束的衰减因子平均值分别提升至 $\eta_{2 \rightarrow 2} = 0.916$ 、 $\eta_{4 \rightarrow 4} = 0.836$ 、 $\eta_{6 \rightarrow 6} = 0.663$ 。通过比较不同 LG 光束相位校正后衰减因子的平均值可以发现, 随着湍流强度的增加, 具有不同拓扑荷的 LG 光束衰减因子平均值之间差距变大。这表明, 湍流强度越强, 改进的波前相位校正算法的校正效果越明显。另外, 从图 8 中还可以看出, 相同的传输方案下, 拓扑荷较小的 LG 光束保持在其本征态的概率越大,

这与拓扑荷较小的涡旋光束保持其本征态的能力较强有关。此外, 拓扑荷相差越大, 探测光束和传输光束的光场差异越大, 从而造成探测光束无法很好地获取传输光束受畸变的光场信息。

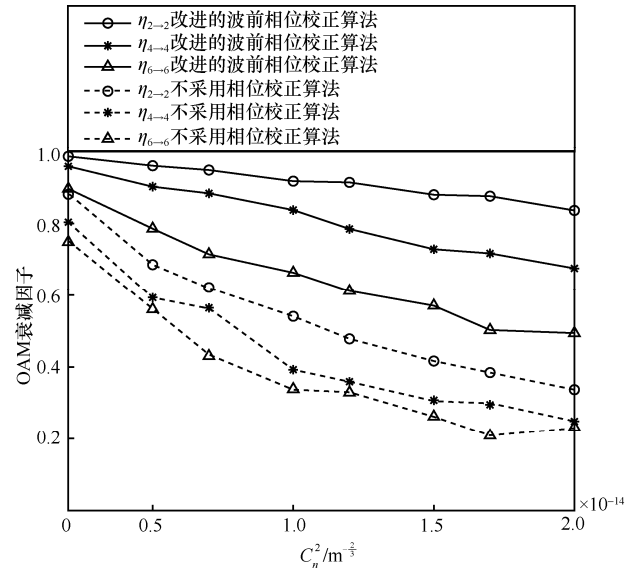


图 8 不同传输光束衰减因子随 C_n^2 的变化曲线

由于在实际的自由空间中, 折射率结构参数是随环境的变换而变化的, 因此图 9 给出了不同条件下传输光束衰减因子随折射率结构参数 C_n^2 的变化曲线。具体地, 图 9(a) 中传输光束的拓扑荷为 4, 探测光束的拓扑荷为 {0,2,4,6,8} 时。图 9(b) 中传输光束的拓扑荷为 5, 探测光束的拓扑荷为 {1,3,5,7,9}。针对每种湍流条件, 本文进行了 100 次仿真测试, 并给出了未经相位校正的传输光束衰减因子平均值以供比较。如图 9(a) 所示, 只有采用拓扑荷为 8 的探测光束时, 校正效果不佳且接近无优化的衰减因子的平均值。校正效果最好的是采用拓扑荷为 2 的探测光束, 其次是拓扑荷为 4 的探测光束, 较差的是拓扑荷为 0 和 6 的探测光束。相比较而言, 对于拓扑荷大于 4 的探测光束, 拓扑荷相差越大, 校正效果越不明显。推测是由于涡旋光束的能量向相邻模态扩散, 模式越接近的涡旋光束, 湍流引起的畸变程度越相似^[30], 因此校正效果越好。另外, 比较相同拓扑荷间隔下的探测光束 (如比较模式 0 和模式 8、模式 2 和模式 6 的探测光束的校正效果) 可以发现, 拓扑荷越小的探测光束校正的效果越好。同样地, 在图 9(b) 中, 通过比较使用不同拓扑荷的探测光束的校正效果, 可以观察到类似的现象。

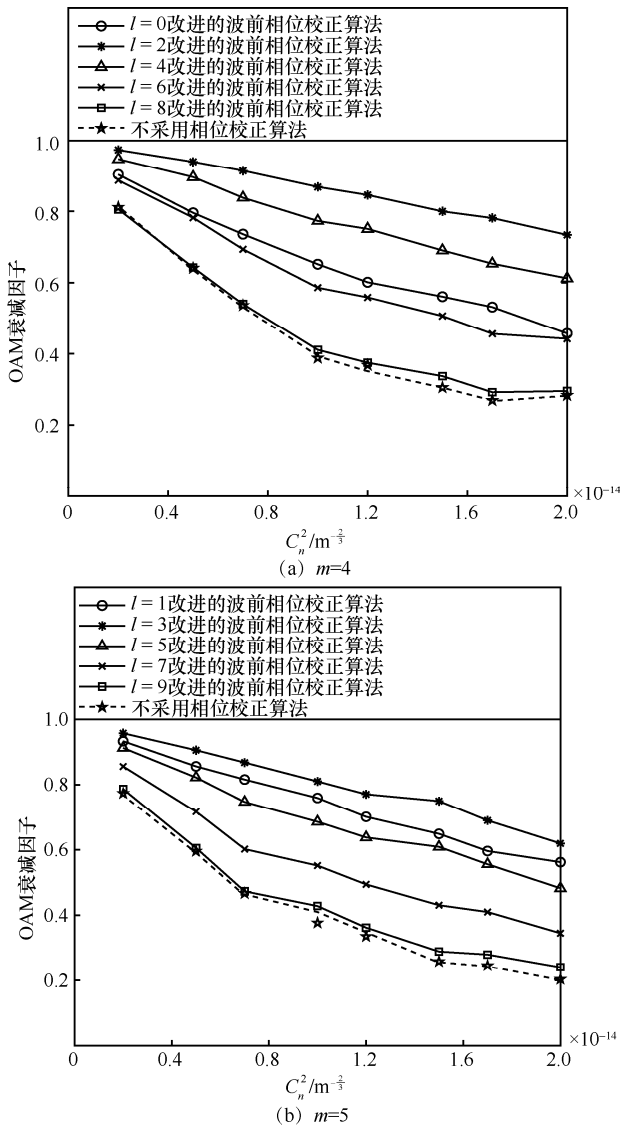


图 9 不同探测光束条件下的传输光束衰减因子变化曲线

图 10 给出了不同折射率结构参数 C_n^2 条件下，采用改进的波前相位校正算法和不采用相位校正算法的 OAM-SK FSO 通信系统的误码率。为了对比，本文还给出了真空条件下 OAM-SK FSO 通信系统的误码率曲线。假设信源是四进制信息，选取模式 $m \in \{3, 4, 5, 6\}$ 分别与之对应。探测光束的拓扑荷为 3，3 种湍流条件分别为 $C_n^2 = 1 \times 10^{-16} \text{ m}^{-2/3}$ 、 $1 \times 10^{-15} \text{ m}^{-2/3}$ 、 $1 \times 10^{-14} \text{ m}^{-2/3}$ 。从图 10 中可以看出，当 $C_n^2 = 1 \times 10^{-16} \text{ m}^{-2/3}$ 时，相位补偿后 OAM-SK FSO 通信系统误码率性能并没有得到明显提高，且和无湍流条件下的误码率性能曲线非常接近。这是因为当折射率结构参数较小时，OAM-SK FSO 通信系统本身的误码率性能比较好，算法提升的效果有限。

但是在 $C_n^2 = 1 \times 10^{-15} \text{ m}^{-2/3}$ 和 $C_n^2 = 1 \times 10^{-14} \text{ m}^{-2/3}$ 条件下，经过波前相位校正后的 OAM-SK FSO 通信系统的误码率性能得到了有效提高。例如，当平均信噪比为 12 dB 时， $C_n^2 = 1 \times 10^{-15} \text{ m}^{-2/3}$ 条件下 OAM-SK 系统的误码率从 0.024 2 降低到 0.007 7； $C_n^2 = 1 \times 10^{-14} \text{ m}^{-2/3}$ 条件下 OAM-SK FSO 系统的误码率从 0.440 3 降低到 0.048 6。比较这三组相位校正前后的误码率曲线可以发现，当大气折射率结构参数较大时，改进的波前相位校正算法的校正效果更明显。

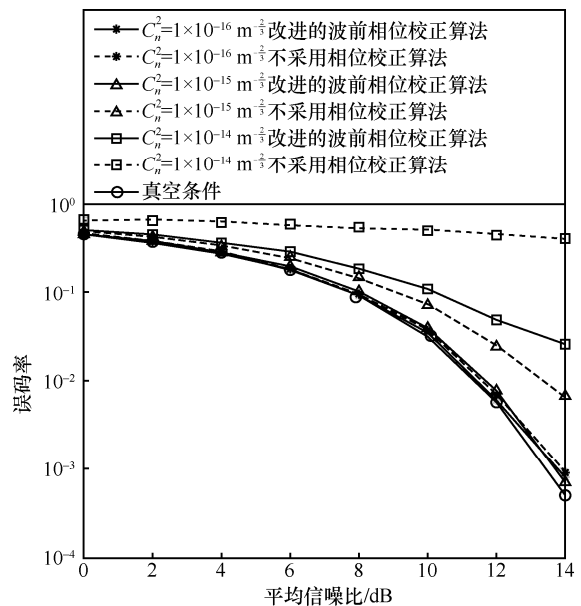


图 10 不同 C_n^2 条件下 OAM-SK FSO 通信系统误码性能

4 结束语

本文针对 OAM-SK FSO 通信系统，基于 GS 算法和角频谱理论，提出了一种改进的涡旋光束波前相位校正算法。在该算法中，将传输前后探测光束的光场分布作为输入，然后利用迭代计算出的相位掩膜校正畸变的传输光束，从而缓解大气湍流引起的模间串扰。仿真表明，相较于传统的 GS 算法，改进的波前相位校正算法校正效果更好，能有效地缓解大气湍流造成的相位畸变、提高 LG 光束本征态自信道衰减比例。此外，当大气折射率结构参数较大时，使用改进的波前相位校正算法可以显著地提高系统的误码率性能。本文工作为 OAM-FSO 通信系统的设计和开发提供了参考。

参考文献:

- [1] JAMALI V, AJAM H, NAJAFI M, et al. Intelligent reflecting surface assisted free-space optical communications[J]. *IEEE Communications Magazine*, 2021, 59(10): 57-63.
- [2] YANG Q C, WANG T S, CHEN J D, et al. Transmission characters of wide-spectrum OAM beam in tunable atmospheric turbulence[J]. *Optics Communications*, 2021, 496: 127078.
- [3] ZHU L, WANG A D, DENG M L, et al. Free-space optical communication with quasi-ring Airy vortex beam under limited-size receiving aperture and atmospheric turbulence[J]. *Optics Express*, 2021, 29(20): 32580-32590.
- [4] MAGIDI S, JABEENA A. Review on wavelength division multiplexing free space optics[J]. *Journal of Optical Communications*, 2018: doi.org/10.1515/joc-2017-097.
- [5] SAFI H, DARGAHI A, CHENG J L. Performance analysis of FSO MIMO multiplexing links with beam wander and nonzero boresight pointing errors[C]//*Proceedings of 2019 16th Canadian Workshop on Information Theory (CWIT)*. Piscataway: IEEE Press, 2019: 1-6.
- [6] ALLEN L, BEIJERSBERGEN M W, SPREEUW R J, et al. Orbital angular momentum of light and the transformation of Laguerre-Gaussian laser modes[J]. *Physical Review A, Atomic, Molecular, and Optical Physics*, 1992, 45(11): 8185-8189.
- [7] WANG W, WANG P, PANG W N, et al. Evolution properties and spatial-mode UWOC performances of the perfect vortex beam subject to oceanic turbulence[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2021, 69(11): 7647-7658.
- [8] YAO S Z, REN G B, SHEN Y, et al. Tunable orbital angular momentum generation using all-fiber fused coupler[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2018, 30(1): 99-102.
- [9] GONG B, CAI S Y, XIAO Z Y, et al. Recognition of OAM state using CNN based deep learning for OAM shift keying FSO system with pointing error and limited receiving aperture[C]//*Proceedings of 2021 Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO)*. Piscataway: IEEE Press, 2021: 1-2.
- [10] PADGETT M J, MIATTO F M, LAVERY M P J, et al. Divergence of an orbital-angular-momentum-carrying beam upon propagation[J]. *New Journal of Physics*, 2015, 17(2): 023011.
- [11] LI L, ZHANG R Z, LIAO P C, et al. Limited-size aperture effects in an orbital-angular-momentum-multiplexed free-space optical data link between a ground station and a retro-reflecting UAV[J]. *Optics Communications*, 2019, 450: 241-245.
- [12] ZHOU M Y, ZHOU Y Q, WU G F, et al. Reducing the cross-talk among different orbital angular momentum modes in turbulent atmosphere by using a focusing mirror[J]. *Optics Express*, 2019, 27(7): 10280-10287.
- [13] AMIRABADI M A, KAHAEI M H, NEZAMALHOSSANI S A. Low complexity deep learning algorithms for compensating atmospheric turbulence in the free space optical communication system[J]. *IET Optoelectronics*, 2021: doi.org/10.1049/ote2.12060.
- [14] LI L, ZHANG R Z, LIAO P C, et al. MIMO equalization to mitigate turbulence in a 2-channel 40-gbit/s QPSK free-space optical 100-m round-trip orbital-angular-momentum-multiplexed link between a ground station and a retro-reflecting UAV[C]//*Proceedings of 2018 European Conference on Optical Communication (ECOC)*. Piscataway: IEEE Press, 2018: 1-3.
- [15] MEHRPOOR G R, SAFARI M, SCHMAUSS B. Free space optical communication with spatial diversity based on orbital angular momentum of light[C]//*Proceedings of 2015 4th International Workshop on Optical Wireless Communications (IWOW)*. Piscataway: IEEE Press, 2015: 78-82.
- [16] 徐启伟, 王佩佩, 曾镇佳, 等. 基于深度卷积神经网络的大气湍流相位提取[J]. *物理学报*, 2020, 69(1): 286-296.
- XU Q W, WANG P P, ZENG Z J, et al. Extracting atmospheric turbulence phase using deep convolutional neural network[J]. *Acta Physica Sinica*, 2020, 69(1): 286-296.
- [17] 詹海潮, 王乐, 彭秦, 等. 涡旋光束的自适应光学波前校正技术研究进展(特邀)[J]. *红外与激光工程*, 2021, 50(9): 20210428-1-20210428-10.
- ZHAN H C, WANG L, PENG Q, et al. Progress in adaptive optics wavefront correction technology of vortex beam(Invited)[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2021, 50(9): 20210428-1-20210428-10.
- [18] LI S H, CHEN S, GAO C Q, et al. Atmospheric turbulence compensation in orbital angular momentum communications: advances and perspectives[J]. *Optics Communications*, 2018, 408: 68-81.
- [19] CHANG H, YIN X L, CUI X Z, et al. Adaptive optics compensation of orbital angular momentum beams with a modified Gerchberg-Saxton-based phase retrieval algorithm[J]. *Optics Communications*, 2017, 405: 271-275.
- [20] CHANG H, YIN X L, YAO H P, et al. Low-complexity adaptive optics aided orbital angular momentum based wireless communications[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2021, 70(8): 7812-7824.
- [21] FU S Y, WANG T L, ZHANG S K, et al. Non-probe compensation of optical vortices carrying orbital angular momentum[J]. *Photonics Research*, 2017, 5(3): 251.
- [22] ZHANG H, ZHENG W J, ZHENG G C, et al. Simultaneous measurement of orbital angular momentum spectra in a turbulent atmosphere without probe beam compensation[J]. *Optics Express*, 2021, 29(19): 30666.
- [23] REN Y X, HUANG H, YANG J Y, et al. Correction of phase distortion of an OAM mode using GS algorithm based phase retrieval[C]//*Proceedings of Conference on Lasers and Electro-Optics 2012*. Washington: OSA Publishing, 2012: 1-2.
- [24] REN Y X, XIE G D, HUANG H, et al. Adaptive optics compensation of multiple orbital angular momentum beams propagating through

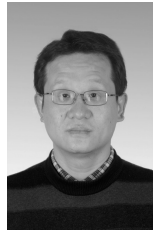
emulated atmospheric turbulence[J]. Optics Letters, 2014, 39(10): 2845-2848.

- [25] REN Y X, XIE G D, HUANG H, et al. Adaptive-optics-based simultaneous pre-and post-turbulence compensation of multiple orbital-angular-momentum beams in a bidirectional free-space optical link[J]. Optica, 2014, 1(6): 376-382.
- [26] 邹丽, 王乐, 张士兵, 等. 基于波前校正的轨道角动量复用通信系统抗干扰研究[J]. 通信学报, 2015, 36(10): 76-84.
- ZOU L, WANG L, ZHANG S B, et al. Compensation of orbital-angular-momentum multiplexed communication system with wavefront correction[J]. Journal on Communications, 2015, 36(10): 76-84.
- [27] FU S Y, WANG T L, ZHANG Z Y, et al. Pre-correction of distorted Bessel-Gauss beams without wavefront detection[J]. Applied Physics B, 2017, 123(12): 1-8.
- [28] YIN X L, CHANG H, CUI X Z, et al. Adaptive turbulence compensation with a hybrid input-output algorithm in orbital angular momentum-based free-space optical communication[J]. Applied Optics, 2018, 57(26): 7644-7650.
- [29] ZHOU S T, ZHANG Q, GAO R, et al. High-accuracy atmospheric turbulence compensation based on a Wirtinger flow algorithm in an orbital angular momentum-free space optical communication system[J]. Optics Communications, 2020, 477: 126322.
- [30] 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.

[作者简介]



李爽（1997-），女，陕西商洛人，西安电子科技大学博士生，主要研究方向为涡旋光通信、水下无线光通信。



王平（1977-），男，陕西西安人，博士，西安电子科技大学教授、博士生导师，主要研究方向为无线光通信、可见光通信以及人工智能通信等。

刘涛（1986-），男，陕西西安人，西安电子科技大学博士生，主要研究方向为无线光通信。

潘宇婷（1996-），女，浙江台州人，西安电子科技大学硕士生，主要研究方向为涡旋光通信。

王炜（1996-），女，山西临汾人，西安电子科技大学博士生，主要研究方向为水下无线光通信、深度学习、涡旋光通信。