

## 涡旋光复用传输的相干解复用研究

杨尚君<sup>1</sup>, 李梦茹<sup>1</sup>, 柯程虎<sup>2</sup>, 丁德强<sup>3\*</sup>, 柯熙政<sup>1,4</sup><sup>1</sup>西安理工大学自动化与信息工程学院, 陕西 西安 710048;<sup>2</sup>西安文理学院信息工程学院, 陕西 西安 710065;<sup>3</sup>国防科技大学信息通信学院, 湖北 武汉 430035;<sup>4</sup>陕西省智能协同网络军民共建重点实验室, 陕西 西安 710048

**摘要** 涡旋光相干检测通过改变本振光的拓扑荷数, 在接收端实现涡旋光的相干解复用, 也可以实现信息交换。本文分析了信号光斜程传输时拓扑荷数、海拔高度、传输距离对涡旋光复用通信系统性能的影响。结果表明: 大气湍流造成的波前畸变会破坏不同拓扑荷数信号光与本振光波前之间的正交性; 使用同一套自适应光学系统对上行和下行链路的信号光波前进行校正, 比较分析了波前畸变预校正与后校正效果, 发现下行链路的后校正效果要优于上行链路的预校正效果, 为多路涡旋光复用传输奠定了理论基础。

**关键词** 涡旋光束; 大气湍流; 相干检测; 相干增益

**中图分类号** TN929.12

**文献标志码** A

**DOI:** 10.3788/AOS230728

## 1 引言

涡旋光束具有独特的螺旋波前结构、相位奇点及轨道角动量(OAM)<sup>[1-4]</sup>, 具有不同模式的涡旋光在空间内相互正交。可利用同一波长的不同拓扑荷数的涡旋光的正交性实现轨道角动量复用, 在接收端进行解复用处理, 能够大幅度提升系统的信道容量和频谱效率<sup>[5-7]</sup>。

对 OAM 的检测方法主要分为衍射法和干涉法两类。衍射法利用各种光阑和合成光栅, 通过光栅设置不同的衍射角, 根据衍射光斑的条纹和朝向来判断拓扑荷数大小和极性。Zhang 等<sup>[8]</sup>结合传统涡旋光栅和达曼光栅的特征, 提出了一种达曼涡旋光栅<sup>[9]</sup>, 该光栅可增加光学涡旋的检测范围。Gibson 等<sup>[10]</sup>利用涡旋光束经三角形孔光阑后的远场衍射光斑特征进行检测。柯熙政等<sup>[11]</sup>利用相位校正技术和 fan-out 技术提高了光栅检测技术的精度。Hickmann 等<sup>[12]</sup>发现 OAM 可以表示三角形光阑衍射图形中隐藏的晶格特性, 可以利用这种效应来测量涡旋光束的 OAM 值。Mourka 等<sup>[13]</sup>研究了涡旋光束的三角形光阑衍射解复用, 分析了分数阶涡旋光衍射的具体表现, 结果对拓扑荷数的识别有重要意义。干涉法利用光的干涉原理, 除了常见的平面波、球面波干涉, 还有静态双缝干涉和动态双

缝干涉。Leach 等<sup>[14]</sup>提出基于马赫-曾德尔干涉仪的 OAM 奇偶叠加态探测方法。柯熙政等<sup>[15-16]</sup>通过搭建双缝干涉实验对入射涡旋光束进行检测, 实验制备出分数阶涡旋光束, 发现此光束较整数阶光束有更强的光强分布, 利于信息的传输。Fu 等<sup>[17]</sup>发现当分数阶涡旋光束经过动态双缝时, 远场一点的干涉强度随着 OAM 的变化而改变, 通过数据处理可以拟合出 OAM 值, 且误差小于 5%。Zhou 等<sup>[18]</sup>提出了一种利用动态双缝干涉检测光束 OAM 的方法, 该方案由于动态双缝的连续扫描可以检测到非常高阶数的涡旋光束。还有研究者用相干检测方法实现解复用, Yang 等<sup>[19]</sup>将高斯光束用作与信号光共光路的信标光, 获得大气湍流引起的失真信息, 将该信息用来进行波前校正, 可以同时实现湍流补偿和涡旋光解复用, 明显提高了对相邻 OAM 模式之间的辨别能力。许多研究者将深度学习与涡旋光信息提取结合起来, 这样可以有效提高计算速度和精度, 从而简化补偿系统的复杂度, 提高检测效率<sup>[20]</sup>。涡旋光在大气湍流中复用传输时会发生模式串扰<sup>[21]</sup>, 对 OAM 的检测产生影响。为了抑制大气湍流造成的模式之间的串扰, 采用自适应光学技术减少湍流产生的影响<sup>[22-24]</sup>。

本文将相干检测技术应用在涡旋光的解复用中, 这样可以省去对衍射干涉等图像的识别步骤, 减小识

收稿日期: 2023-03-29; 修回日期: 2023-05-05; 录用日期: 2023-05-15; 网络首发日期: 2023-06-28

基金项目: 陕西省科研项目(18JK0341)、陕西省重点产业创新项目(2017ZDCXL-GY-06-01)、西安市科技计划项目(2020KJRC0083, 22GXFW0115)、国防科技大学自主创新科学基金项目(22-ZZCX-051)

通信作者: \*dingdeqiang17@nudt.edu.cn

别过程带来的误差<sup>[19]</sup>,同时结合自适应光学进行波前校正,可以在提高检测灵敏度和信道容量的同时,减少各模式之间的串扰。

## 2 系统原理及组成

### 2.1 系统组成

双向传输的无线光通信 OAM 复用相干检测系统结构如图 1 所示。通信双端传输距离为  $z$ , 传输链路的天顶角为  $\psi$ , 上行链路的发射端(即下行链路的接收端)位于高度为  $h_0$  处, 上行链路的接收端(即下行链路的发射端)位于高度为  $H$  处, 且  $h_0 < H$ 。自适应光学系

统靠近地面的下行链路的接收端。

图 2 为系统发射端和接收端示意图。其中发射端的信号光激光器采用  $1 \times 4$  耦合器, 耦合器将光束分成 4 路。信源信号经串并转换后, 分别对每一路进行外调制, 并用螺旋相位片将光转换成拓扑荷数为 1、2、3、4 的涡旋光, 涡旋光再经  $4 \times 1$  的耦合器合成 1 路后进行同轴传输。在接收端, 首先采用  $1 \times 4$  耦合器将光束分为 4 路, 并与拓扑荷数分别为 1、2、3、4 的本振涡旋光进行混频处理, 经平衡探测恢复出电信号, 电信号得到解调后再经并串转换合成 1 路信号, 从而实现信号从信源到信宿的传输。

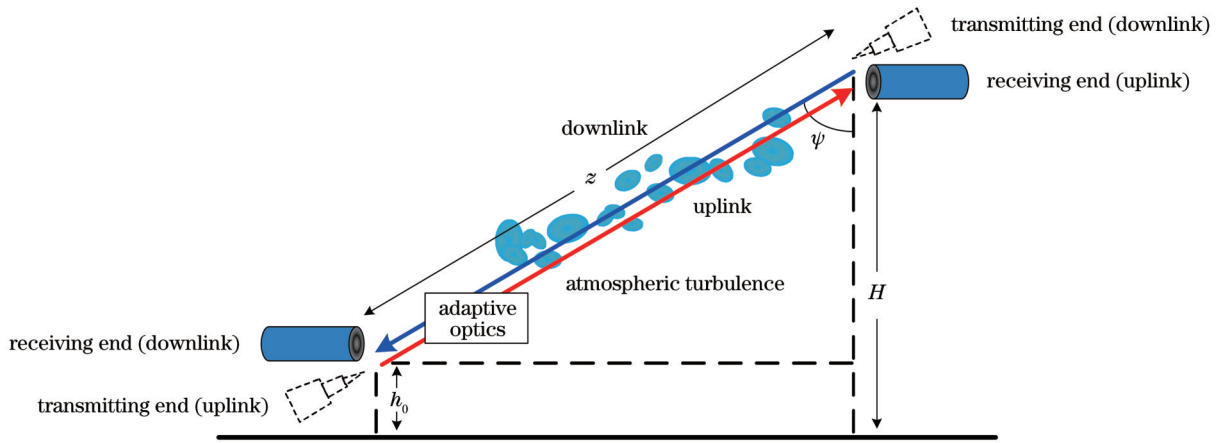


图 1 无线光通信 OAM 复用相干检测系统的结构

Fig. 1 Structure of OAM multiplexing coherent detection system for optical wireless communication

采用同一套自适应光学系统对上行和下行链路进行校正, 工作原理如图 3 所示。在大气传输的下行链路光信号经变形镜反射后, 首先利用波前传感器采集波前相位, 然后由计算机将计算得到的共轭波前施加到变形镜表面产生共轭波前, 从而实现后校正。由于传输链路的可逆性和波前反向叠加作用, 可以认为在发射天线处上行链路信号光波前的畸变与同一时刻接

收天线接收到的下行链路的波前畸变为共轭关系, 发射天线发射出的上行链路信号光携带与上行链路湍流相位共轭的波前相位, 达到抑制湍流的效果, 以此完成波前的预校正。

### 2.2 理论分析

拉盖尔-高斯光束是一种典型的涡旋光束, 其光场<sup>[25]</sup>表示为

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

式中:  $r = (r, \theta)$ ,  $r$  和  $\theta$  分别为径向变量和角相变量;  $z$  为传输距离;  $z_R = \frac{\pi w_0^2}{\lambda}$ ,  $\lambda$  为波长,  $w_0$  为光束初始束腰

半径;  $w(z) = w_0 \left[ 1 + \left( \frac{z}{z_R} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}}$  为传输距离为  $z$  时的光

束束腰半径<sup>[26]</sup>;  $l$  为拓扑荷数;  $\kappa = \frac{2\pi}{\lambda}$  为波数。  $L_p^{(|l|)}$  为缔合拉盖尔多项式, 表达式为

$$L_p^{(|l|)}(x) = \sum_{m=0}^p (-1)^m \frac{(|l| + p)!}{(p-m)! (|l| + m)! m!} x^m, \quad (2)$$

式中:  $p$  为径向指数。为简化表达, 将式(1)写为

$$U(r, z) = A(r, z) \exp(-il\theta). \quad (3)$$

已调制且拓扑荷数为  $l_{s1}$  的涡旋光表达式为

$$U_{s1}(r, z, t) = m_{s1}(t) \cos[\omega_s t + \pi \cdot n_{s1}(t)] \cdot$$

$$A(r, z) \exp(-il_{s1}\theta), \quad (4)$$

式中:  $\omega_s$  为信号光角频率;  $t$  为时间变量;  $m_{s1}(t)$  和  $n_{s1}(t)$

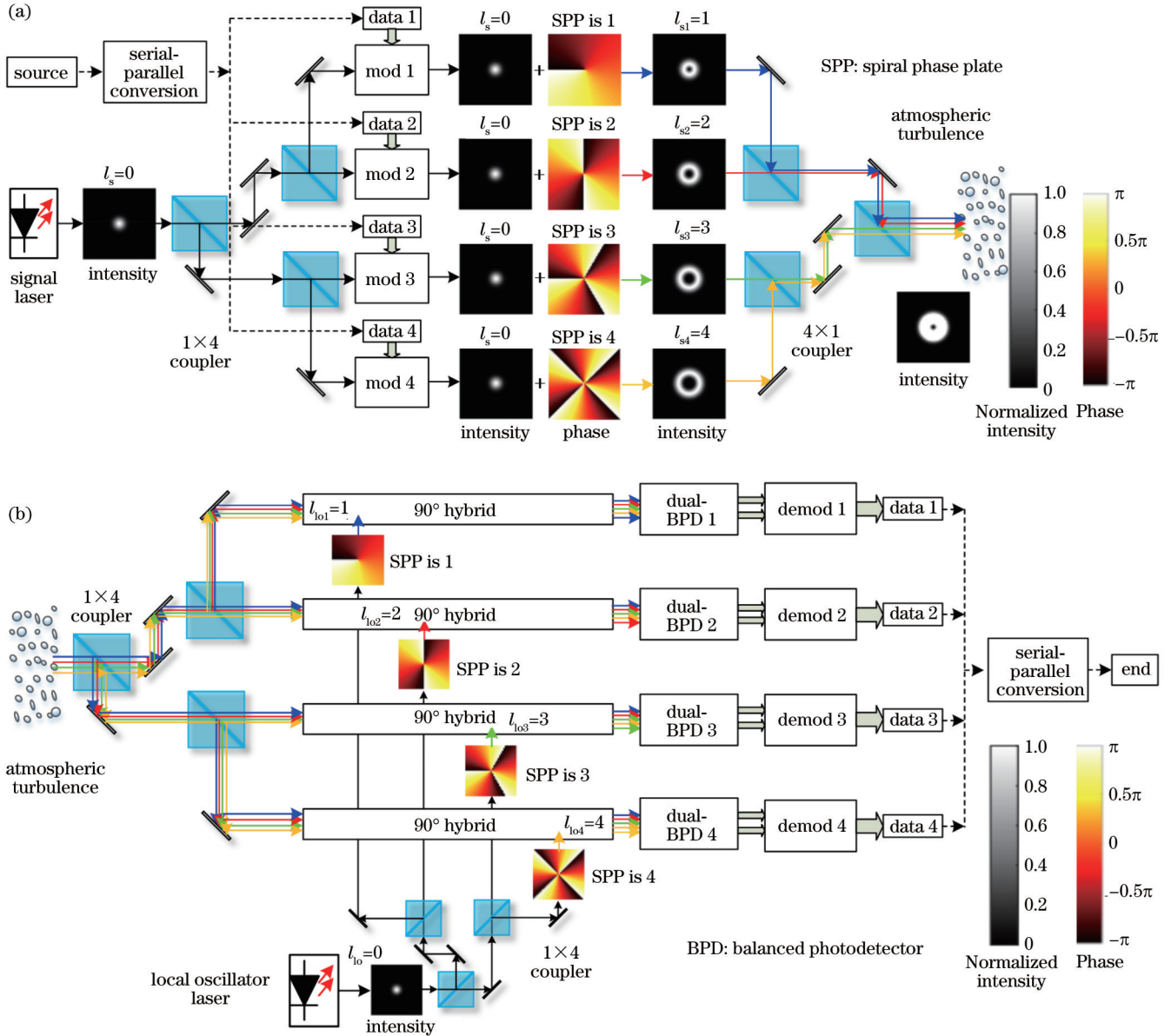


图 2 发射和接收端示意图。(a)发射端;(b)接收端

Fig. 2 Schematic diagram of transmitter and receiver. (a) Transmitter; (b) receiver

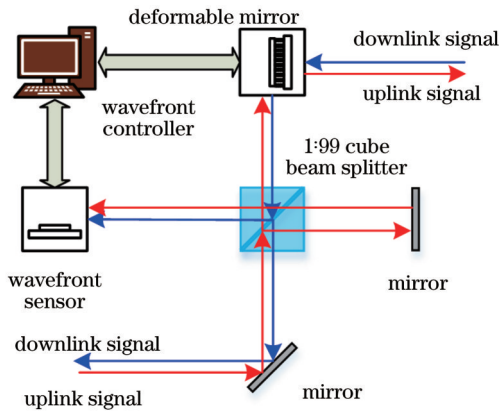


图 3 位于下行链路接收端的自适应光学系统

Fig. 3 Adaptive optics system at downlink receiving end

分别为映射并调制在信号光幅值和相位的信源信息,  $m_{s1}(t)$  和  $n_{s1}(t) = 0$  或 1。

对于 4 路拓扑荷数不相同的涡旋光, 经同轴复用传输后的光场表达式为

$$U_s(\mathbf{r}, z, t) = \sum_{k=1}^4 U_{sk}(\mathbf{r}, z, t) = \sum_{k=1}^4 m_{sk}(t) \cos[\omega_s t + \pi n_{sk}(t)] \cdot A(\mathbf{r}, z) \exp(-i l_{sk} \theta) \quad (5)$$

采用功率谱反演法产生随机相位屏, 其中高频分量<sup>[27]</sup>可表示为

$$\phi_H(m, n) = \sum_{m'=-\frac{N_x}{2}}^{\frac{N_x}{2}-1} \sum_{n'=-\frac{N_y}{2}}^{\frac{N_y}{2}-1} a(m', n') \sqrt{\Phi_\phi(m', n')} e^{i2\pi(\frac{m'm}{N_x} + \frac{n'n}{N_y})} \quad (6)$$

式中:  $N_x$  和  $N_y$  为  $x$  和  $y$  方向上的取样点数;  $a(m', n')$  为复高斯随机矩阵。  $\Phi_\phi(m', n')$  为采用 Hill 谱修正谱模型得到的大气相位功率谱密度<sup>[28]</sup>, 表达式为

$$\Phi_{\phi}(\kappa_r) = 2\pi\kappa^2 \cdot 0.033C_n^2(h) \times \left[ 1 + 1.802 \left( \frac{\kappa_r}{\kappa_1} \right) - 0.254 \left( \frac{\kappa_r}{\kappa_1} \right)^{7/6} \right] \frac{\exp\left(-\frac{\kappa_r^2}{\kappa_1^2}\right)}{(\kappa_0^2 + \kappa_r^2)^{11/6}}, \quad (7)$$

式中:  $\kappa_r = 2\pi f_r$  为空间波数,  $f_r = (f_x^2 + f_y^2)^{1/2}$ ,  $f_x$  和  $f_y$  为空间频率, 即  $f_x = 1/L_x$ ,  $f_y = 1/L_y$ ,  $L_x$  和  $L_y$  为相位屏在  $x$  和  $y$  方向上的大小;  $\kappa_1 = 3.3/l_0$ ,  $\kappa_0 = 2\pi/L_0$ ,  $l_0$  和  $L_0$  分别为内尺度和外尺度;  $C_n^2$  为大气折射率结构常数。对于斜程传输情况,  $C_n^2$  随海拔高度变化<sup>[29]</sup>, 采用 Hufnagel Valley 21 模型 (风速为 21 m/s), 可表示为

$$C_n^2(h) = 5.94 \times 10^{-53} h^{10} \left( \frac{21}{27} \right)^2 e^{-\frac{h}{1000}} + 2.7 \times 10^{-16} e^{-\frac{h}{1500}} + 1.7 \times 10^{-14} e^{-\frac{h}{100}}. \quad (8)$$

在长度为  $z$  的斜程传输链路等间隔放置  $N_{\text{screen}}$  个湍流相位屏, 每个相位屏的  $C_n^2$  的表达式为

$$C_n^2 = \frac{1}{\Delta h} \int_h^{h+\Delta h} C_n^2(\xi) d\xi. \quad (9)$$

相位屏的低频分量<sup>[27]</sup>为

$$\phi_L(m, n) = \sum_{p=1}^{N_p} \sum_{m'=-\frac{N_x}{2}}^{\frac{N_x}{2}-1} \sum_{n'=-\frac{N_y}{2}}^{\frac{N_y}{2}-1} a(m', n') \sqrt{\Phi_{\phi}(m', n')} e^{i2\pi 3^{-p} \left( \frac{mm'}{N} + \frac{nn'}{N} \right)}, \quad (10)$$

式中:  $N_p$  为次谐波的级数。信号光每经过一层湍流相位屏后的表达式为

$$U_s(\mathbf{r}, z + \Delta z, t) = \mathcal{F}^{-1} \left\{ \mathcal{F} \left\{ U_s(\mathbf{r}, z, t) \cdot \exp[i\phi_H(\mathbf{r}) + i\phi_L(\mathbf{r})] \right\} \cdot e^{-\frac{i(\kappa_x^2 + \kappa_y^2)\Delta z}{2\kappa}} \right\}, \quad (11)$$

式中:  $\mathcal{F}$  和  $\mathcal{F}^{-1}$  分别表示傅里叶变换和傅里叶逆变换;  $\phi_L(\mathbf{r})$  和  $\phi_H(\mathbf{r})$  分别为相位屏的低阶和高阶相位;  $\Delta z = z/N_{\text{screen}}$  为两相位屏之间的距离;  $\kappa_x = 2\pi f_x$  和  $\kappa_y = 2\pi f_y$  为空间波数。自适应光学相位补偿可表示为

$$U_{\text{s-re}}(\mathbf{r}, z, t) = U_s(\mathbf{r}, z, t) \cdot \exp \left\{ -i \sum_{n'=1}^{N_{\text{screen}}} \mathcal{F}^{-1} \left\{ \mathcal{F} \left[ \phi_{Hn'}(\mathbf{r}) + \phi_{Ln'}(\mathbf{r}) \right] \cdot e^{-\frac{i(\kappa_x^2 + \kappa_y^2)\Delta z}{2\kappa}} \right\} \right\}, \quad (12)$$

式中:  $n'$  为求和变量, 取整数。接收端本振光是拓扑荷数为  $l_0$  的涡旋光, 光场表达式为

$$U_{l_0}(\mathbf{r}, z, t) = A(\mathbf{r}, z) \cos(\omega_{l_0} t) \exp(-il_0 \theta). \quad (13)$$

信号光  $U_{\text{s-re}}(\mathbf{r}, z, t)$  与本振光  $U_{l_0}(\mathbf{r}, z, t)$  在混频器中进行混频, 混频器输出的 4 路光信号分别为

$$U_{\text{hybrid1}}(\mathbf{r}, z, t) = U_{\text{s-re}}(\mathbf{r}, z, t) + U_{l_0}(\mathbf{r}, z, t), \quad (14)$$

$$U_{\text{hybrid2}}(\mathbf{r}, z, t) = U_{\text{s-re}}(\mathbf{r}, z, t) - U_{l_0}(\mathbf{r}, z, t), \quad (15)$$

$$U_{\text{hybrid3}}(\mathbf{r}, z, t) = U_{\text{s-re}}(\mathbf{r}, z, t) + U_{l_0}^*(\mathbf{r}, z, t), \quad (16)$$

$$U_{\text{hybrid4}}(\mathbf{r}, z, t) = U_{\text{s-re}}(\mathbf{r}, z, t) - U_{l_0}^*(\mathbf{r}, z, t), \quad (17)$$

式中: \* 表示共轭。式(14)的平方减去式(15)的平方, 利用积化和差, 计算得到平衡探测器输出的一路电流信号为

$$I_1 = 4\alpha \cdot \sum_{k=1}^4 \langle U_{\text{sk-re}}(\mathbf{r}, z, t) \cdot U_{l_0}(\mathbf{r}, z, t) \rangle = \alpha \cdot \sum_{k=1}^4 2m_{\text{sk}}(t) \cdot \left\{ \cos[(\omega_s + \omega_{l_0})t + \pi n_{\text{sk}}(t)] + \cos[(\omega_s - \omega_{l_0})t + \pi n_{\text{sk}}(t)] \right\} \cdot \int_0^{2\pi} \int_0^R |A(\mathbf{r}, z)|^2 \cdot \exp[-i(l_{\text{sk}} - l_0)\theta] \cdot \exp[i\Delta\phi(\mathbf{r})] \cdot r dr d\theta, \quad (18)$$

式中:  $\alpha$  为光电转换系数;  $R$  为探测器的有效半径;  $\Delta\phi(\mathbf{r})$  为自适应光学校正后的波前残差。由于“和频项”对应的频率很高, 一般情况下光电探测器无法响应, “差频项”的频率相对光场的变化要缓慢得多, 则平衡探测器输出为

$$I_1 = \alpha \cdot \sum_{k=1}^4 2m_{\text{sk}}(t) \cdot \left\{ \cos[(\omega_s - \omega_{l_0})t + \pi n_{\text{sk}}(t)] \right\} \cdot \int_0^{2\pi} \int_0^R |A(\mathbf{r}, z)|^2 \cdot \exp[-i(l_{\text{sk}} - l_0)\theta] \cdot \exp[i\Delta\phi(\mathbf{r})] \cdot r dr d\theta. \quad (19)$$

波前残差  $\Delta\phi(\mathbf{r})$  会使得相同拓扑荷数信号之间的正交性受到破坏, 同时各路信号的模式扩展使得各路信号之间产生串扰<sup>[30]</sup>。信号光与本振光的相干增益  $G$  可表示为

$$G = \int_0^{2\pi} \int_0^R |A(\mathbf{r}, z)|^2 \cdot \exp[-i(l_{\text{sk}} - l_0)\theta] \cdot \exp[i\Delta\phi(\mathbf{r})] \cdot r dr d\theta = \int_0^{2\pi} \int_0^R [U_{\text{sk}}(\mathbf{r}, z, t) \cdot U_{l_0}^*(\mathbf{r}, z, t)] r dr d\theta. \quad (20)$$

接收信号  $U_{\text{sk}}(\mathbf{r}, z, t)$  表示第  $k$  路受湍流影响的涡旋光信号。考虑到计算复杂度和待分析的各路拓扑荷数的对称性, 将每路光信号按照螺旋谱  $-5 \sim 10$  阶谐波函数展开, 其中第  $k$  路信号表示为

$$U_{\text{sk}}(\mathbf{r}, z, t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \sum_{l=-5}^{10} a_{kl}(\mathbf{r}, z) \exp(-il\theta), \quad (21)$$

式中:  $a_{kl}(\mathbf{r}, z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^{2\pi} U_{\text{sk}}(\mathbf{r}, z, t) \exp(il\theta) d\theta$ <sup>[31]</sup>。

同理, 本振光  $U_{l_0}(\mathbf{r}, z, t)$  可以展开为

$$U_{l_0}(\mathbf{r}, z, t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \sum_{l=-5}^{10} b_{l_0}(\mathbf{r}, z) \exp(-il\theta), \quad (22)$$

式中,  $b_{l_0}(\mathbf{r}, z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^{2\pi} U_{l_0}(\mathbf{r}, z, t) \exp(il\theta) d\theta$ 。将接收信号光  $U_{sk}(\mathbf{r}, z, t)$  表达式(21)和本振光  $U_{l_0}(\mathbf{r}, z, t)$  表达式(22)代入式(20)中, 相干增益  $G$  为

$$G = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \int_0^R \left[ \sum_{l=-5}^{10} a_{kl}(\mathbf{r}, z) \exp(-il\theta) \cdot \sum_{l=-5}^{10} b_{l_0}(\mathbf{r}, z) \exp(il\theta) \right] r dr d\theta, \quad (23)$$

由于不同拓扑荷数的涡旋光具有正交性<sup>[32]</sup>, 有

$$\int_0^{2\pi} \int_0^R |A(\mathbf{r}, z)|^2 \cdot \exp[-i(L_{sk} - L_{l_0})\theta] \cdot r dr d\theta = \begin{cases} 1, & L_{sk} = L_{l_0} \\ 0, & L_{sk} \neq L_{l_0} \end{cases}, \quad (24)$$

式(23)可以化简为

$$G = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \int_0^R \left[ \sum_{l=-5}^{10} a_{kl}(\mathbf{r}, z) b_{l_0}(\mathbf{r}, z) \right] r dr d\theta = \int_0^R \left[ \sum_{l=-5}^{10} a_{kl}(\mathbf{r}, z) b_{l_0}(\mathbf{r}, z) \right] r dr, \quad (25)$$

由于本振光未经过大气湍流不发生模式串扰, 因此只在  $l = l_0$  时有值, 此时相干增益  $G$  可以化简为

$$G = \int_0^R [a_{kl}(\mathbf{r}, z) \cdot b_{l_0}(\mathbf{r}, z)] \Big|_{l=l_0} r dr. \quad (26)$$

### 3 数值分析

如无特别说明, 仿真时取如下参数: 对于涡旋光束特性, 波长  $\lambda = 1550$  nm, 初始束腰半径  $w_0 = 0.05$  m, 径向指数  $p = 0$ ; 对于传输链路, 低端距离地面高度  $h_0 = 2$  m, 高端距离地面高度  $H = 500$  m; 对于相位屏, 取采样点数  $N_x = N_y = 512$ , 相位屏宽度  $L = 1$  m, 相位屏间距  $\Delta z = 10$  m, 内尺度  $l_0 = 0.003$  m, 外尺度  $L_0 = 3$  m; 次谐波级数  $N_p = 6$ 。

#### 3.1 不同拓扑荷数的信号光及本振光对相干增益影响

取传输距离  $z = 10$  km, 不同拓扑荷数信号光  $l_s = 1 \sim 4$  经大气传输后与不同拓扑荷数本振光  $l_0 = 1 \sim 4$  经混频后分别在上行链路、下行链路、未校正及校正后的相干增益由式(26)计算得出, 结果如图4所示。在相同传输距离情况下, 涡旋光拓扑荷数越大, 涡旋结构越丰富, 越容易受到湍流的影响, 模式串扰也越严重。当信号光拓扑荷数  $l_{s1} = 1$ , 本振光拓扑荷数为  $l_0 = 1$  时, 根据式(26)计算得到, 上行链路未校正情形下的相干增益为 0.867; 当信号光拓扑荷数  $l_{s1} = 1$ , 本振光拓扑荷数为  $l_0 = 2$  时, 根据式(26)算得上行链路未校正情形下的相干增益为 0.156。大气湍流导致的涡旋光波前畸变会降低信号光与本振光的相干性, 同时影响不同路信号之间的正交性。

大气湍流强度在靠近地表处最强<sup>[21]</sup>。上行链路光束从光密介质向光疏介质传输, 光束的波前畸变和光

斑抖动较大, 下行链路光束从光疏介质向光密介质传输, 光束的波前畸变和光斑抖动较小, 因此上行链路波前畸变更明显。当本振光拓扑荷数  $l_0 = 3$ , 传输距离为  $z = 10$  km 时, 依据式(26)得到上行链路预校正后的相干增益由 0.706 提升至 0.942; 当本振光拓扑荷数  $l_0 = 3$ , 传输距离为  $z = 10$  km 时, 依据式(26)得到下行链路校正后的相干增益由 0.744 提升至 0.975。大气链路传输的可逆性使得采用同一套自适应光学系统即可同时完成上行链路和下行链路的波前畸变补偿。

#### 3.2 海拔高度对系统性能影响

设传输距离为  $z = 5$  km, 改变距离地面高端的海拔高度  $H$  (即改变天顶角  $\psi$ ), 得到不同拓扑荷数的信号光传输后的相干增益, 如图5所示。随着  $H$  的增大 (即天顶角减小), 相干增益呈现出增大趋势; 在未校正情形下, 当  $H > 2$  km 时, 无论是下行链路还是上行链路校正后, 相干增益趋于一个稳态值, 证明在天顶角  $\psi < 1.16$  rad 时, 相干增益就基本不受天顶角变化的影响; 而采用自适应光学进行波前畸变校正后, 相干增益在  $H > 1$  km ( $\psi < 1.37$  rad) 时就相对稳定。以此类推, 对于极限情形, 水平传输 ( $\psi = \pi/2$  rad) 涡旋光束受湍流影响最大, 垂直传输 ( $\psi = 0$  rad) 涡旋光束受湍流影响最小<sup>[33]</sup>。

#### 3.3 传输距离对系统性能影响

当信号光拓扑荷数分别为 1、2、3、4 时, 信号光与本振光拓扑荷数相同时相干增益随传输距离的变化如图6所示。当传输距离为  $z = 8$  km, 取本振光拓扑荷数  $l_0 = 1 \sim 4$  时, 依据式(26)得到上行链路校正前的相干增益分别为 0.905、0.743、0.717、0.632, 说明在相同传输距离情况下, 涡旋光拓扑荷数越大, 受湍流影响越明显, 模式退化越严重。由于自适应光学通常适用于弱湍流下的波前校正<sup>[23]</sup>, 与上行链路相比, 下行链路中使用自适应光学进行波前校正的效果更显著。当传输距离  $z = 9$  km, 本振光拓扑荷数  $l_0 = 4$  时, 由式(26)计算得到下行链路校正后对应的相干增益为 0.972, 上行链路校正后对应的相干增益为 0.841。此外, 随着传输距离和拓扑荷数的增大, 下行链路的校正优势越明显。因此在设计涡旋光复用相干检测通信系统时, 应考虑传输距离和复用路个数之间的关系。

设传输距离为  $z = 10$  km, 海拔高度  $H = 500$  m, 拓

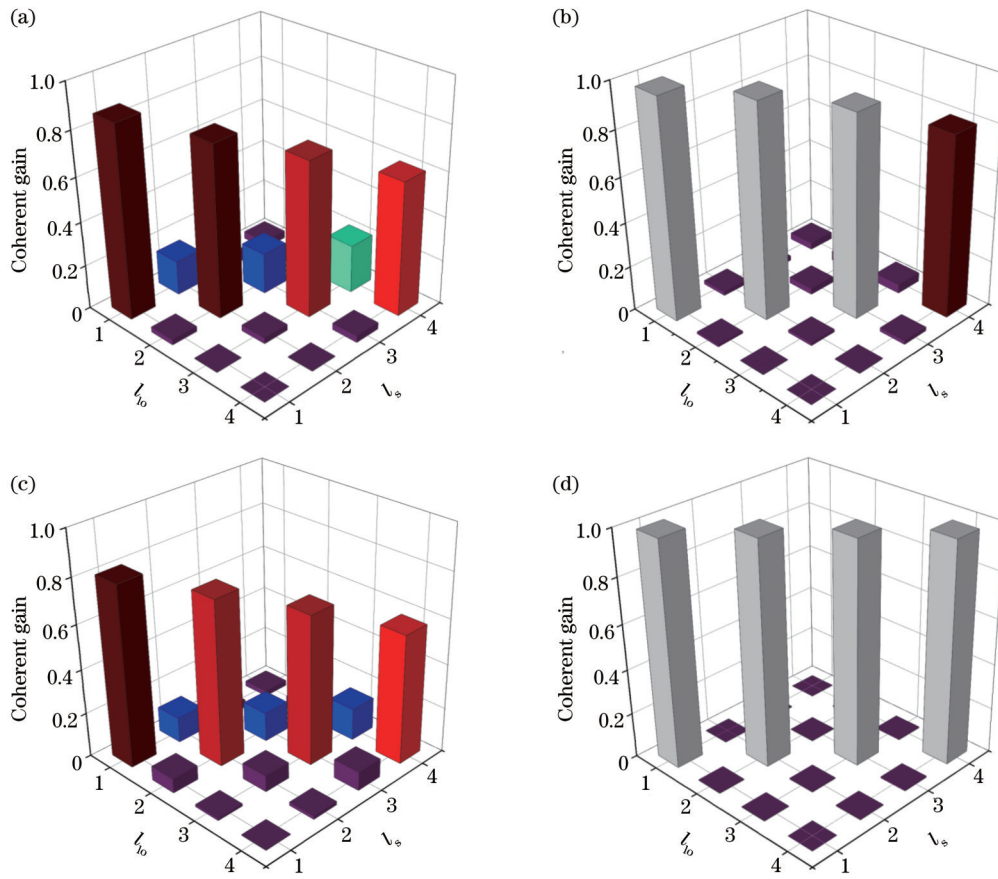


图 4 不同拓扑荷数的信号光与本振光的相干增益。(a)上行链路未校正;(b)上行链路校正后;(c)下行链路未校正;(d)下行链路校正后  
 Fig. 4 Coherent gain of signal light and LO light with different topological charges. (a) Uplink uncorrected; (b) uplink corrected; (c) downlink uncorrected; (d) downlink corrected

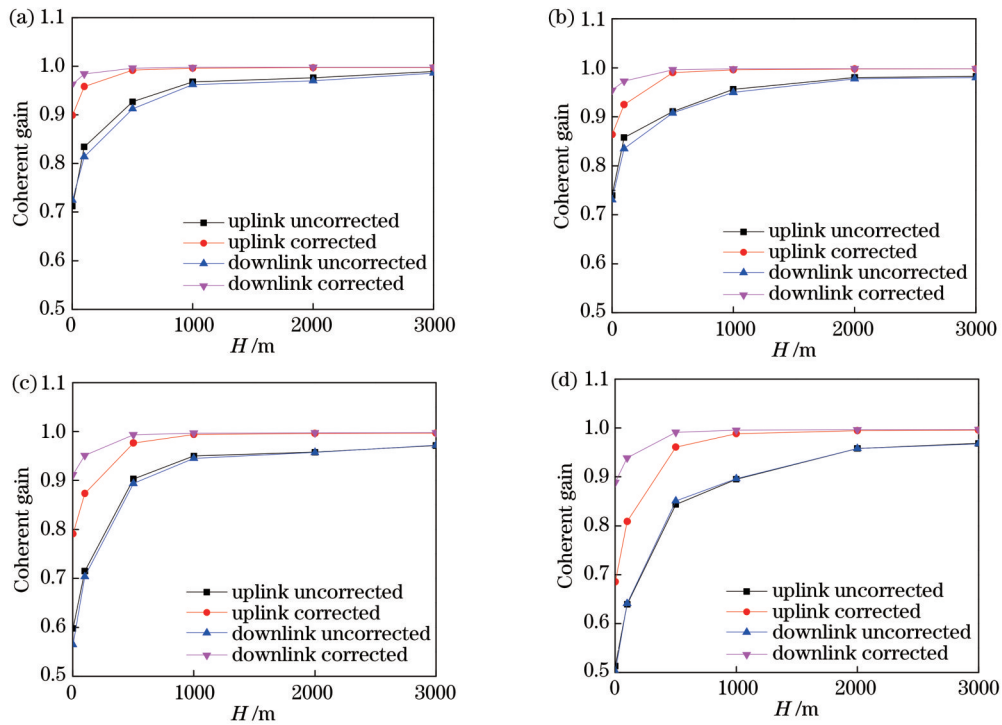


图 5 不同拓扑荷数信号光经不同海拔高度传输后相干增益的变化。(a)  $l_{s1}=1$ ; (b)  $l_{s2}=2$ ; (c)  $l_{s3}=3$ ; (d)  $l_{s4}=4$   
 Fig. 5 Change of coherent gain of signal light with different topological charges transmitting at different altitudes. (a)  $l_{s1}=1$ ; (b)  $l_{s2}=2$ ; (c)  $l_{s3}=3$ ; (d)  $l_{s4}=4$

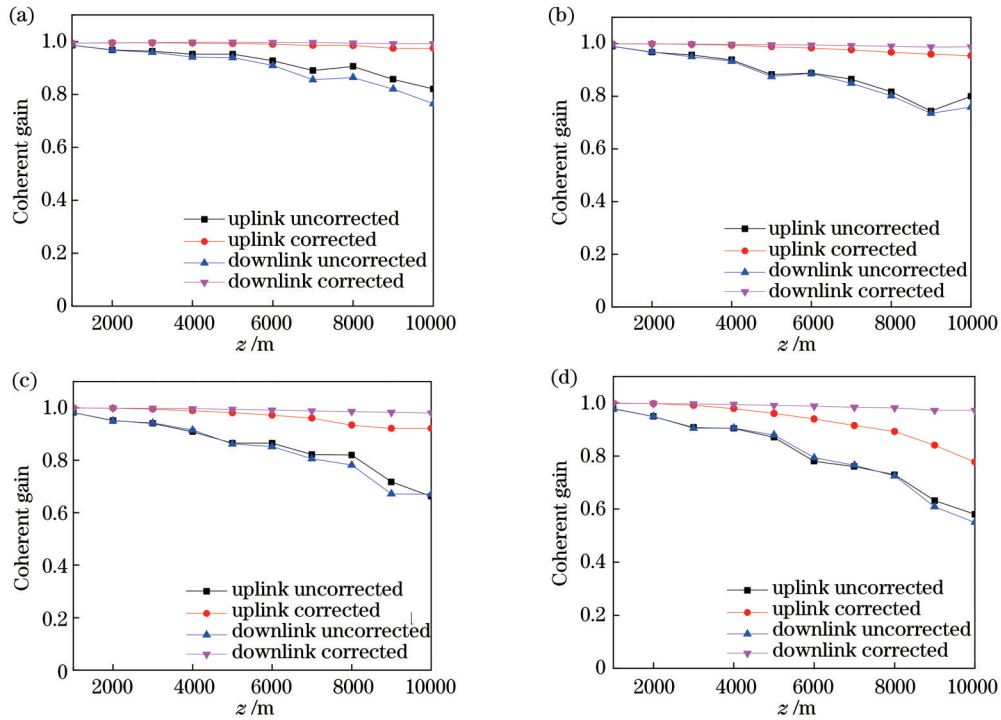


图 6 不同拓扑荷数信号光经不同传输距离后相干增益的变化。(a)  $l_{s1}=1$ ; (b)  $l_{s2}=2$ ; (c)  $l_{s3}=3$ ; (d)  $l_{s4}=4$

Fig. 6 Change of coherent gain of signal light with different topological charges transmitting different transmission distances. (a)  $l_{s1}=1$ ; (b)  $l_{s2}=2$ ; (c)  $l_{s3}=3$ ; (d)  $l_{s4}=4$

拓扑荷数  $l_s=1\sim 4$  的信号光传输后,得到上行和下行链路、未校正以及校正后各路信号之间的串扰情况,如图 7 所示。以上行链路为例,当传输距离  $z=10$  km,拓扑荷数  $l_{s2}=2$  的信号光传输后,由式(26)计算得到相干增益  $G_{22}$ (第一个下标表示第 2 路传输,第二个下标表示螺旋谱分解拓扑荷数为 2)由校正前的 0.8781 提升至 0.9711。拓扑荷数  $l_{s1}=1$  的信号光传输后,由式(26)计算得到,相干增益  $G_{12}$  由校正前的 0.1581 降至 0.0949。对于接收端第 2 路,由于本振光的拓扑荷数  $l_{o2}=2$ ,那么在相干检测过程中,拓扑荷数  $l_{s2}=2$  的信号光的螺旋谱携带了有效信息,而拓扑荷数  $l_{s1}=1$  的信号光的螺旋谱由于发生模式串扰,会产生与  $l_{s2}=2$  信号光相同拓扑荷数的螺旋谱分量,这对于拓扑荷数  $l_{s2}=2$  的信号光是一种噪声和干扰。同样考虑到其他路信号的干扰,使拓扑荷数  $l_{o2}=2$  的本振光一路所产生的信号星座图发生弥散,如图 7(a)所示。自适应光学可有效抑制涡旋光复用各路之间的串扰,使得图 7(b)中的星座图相比图 7(a)所对应的调制星座点更集中。同时在  $z=10$  km 链路距离传输下,由图 7 可知,下行链路的校正效果优于上行链路,因此下行链路星座图收敛效果更为明显。

采用蒙特卡罗法,总码数取  $10^6$ 。图 8 为不同传输距离下未校正以及校正后各路的误码率以及系统误码率随传输距离的变化曲线。传输距离  $z < 5$  km 时,自适应光学系统的校正能力能够处理大气湍流所产生的波前畸变,下行和上行链路的校正效果无明显区别。

随着传输距离的增大,上行链路较强的湍流所产生的波前畸变超出了自适应光学的校正能力范围,使得传输距离  $z > 5$  km 时,上行链路误码率要高于下行链路。同时自适应光学系统位于距离地面低端的校正能力要优于距离地面高端,且更便于设备搭建操作。以拓扑荷数  $l_{s3}=3$ 、传输距离  $z=10$  km 的涡旋光传输为例,图 8 中各附图为经上行和下行链路传输后,未校正以及校正后的光强和相位分布。由于上行链路采用预校正处理,可以看出校正后的光斑直径大于未校正。而波前校正并不会影响光强分布,因此对于下行链路,校正前后光强分布并无区别。

图 9 为涡旋光进行单路传输及多路复用传输下,信道容量随传输距离的变化曲线。由图 9 结果可知,在相同条件下,多路复用传输下的信道容量大于单路传输下的信道容量。而信道容量是依据系统误码率结果,计算信道转移矩阵,利用贝叶斯公式求得条件信息量和信源信息量计算得到的,因此信道容量和系统误码率两者变化趋势相同。自适应光学系统能够降低误码率的同时提高信道容量。

## 4 结 论

涡旋光束 OAM 复用相干检测的双向斜程光通信系统采用一套自适应光学系统同时校正上行链路和下行链路涡旋光所产生的波前畸变。可得结论:大气湍流会导致涡旋光复用传输时的模式串扰,传输距离增大会使系统的误码率增大,相同传输距离下,拓扑荷数

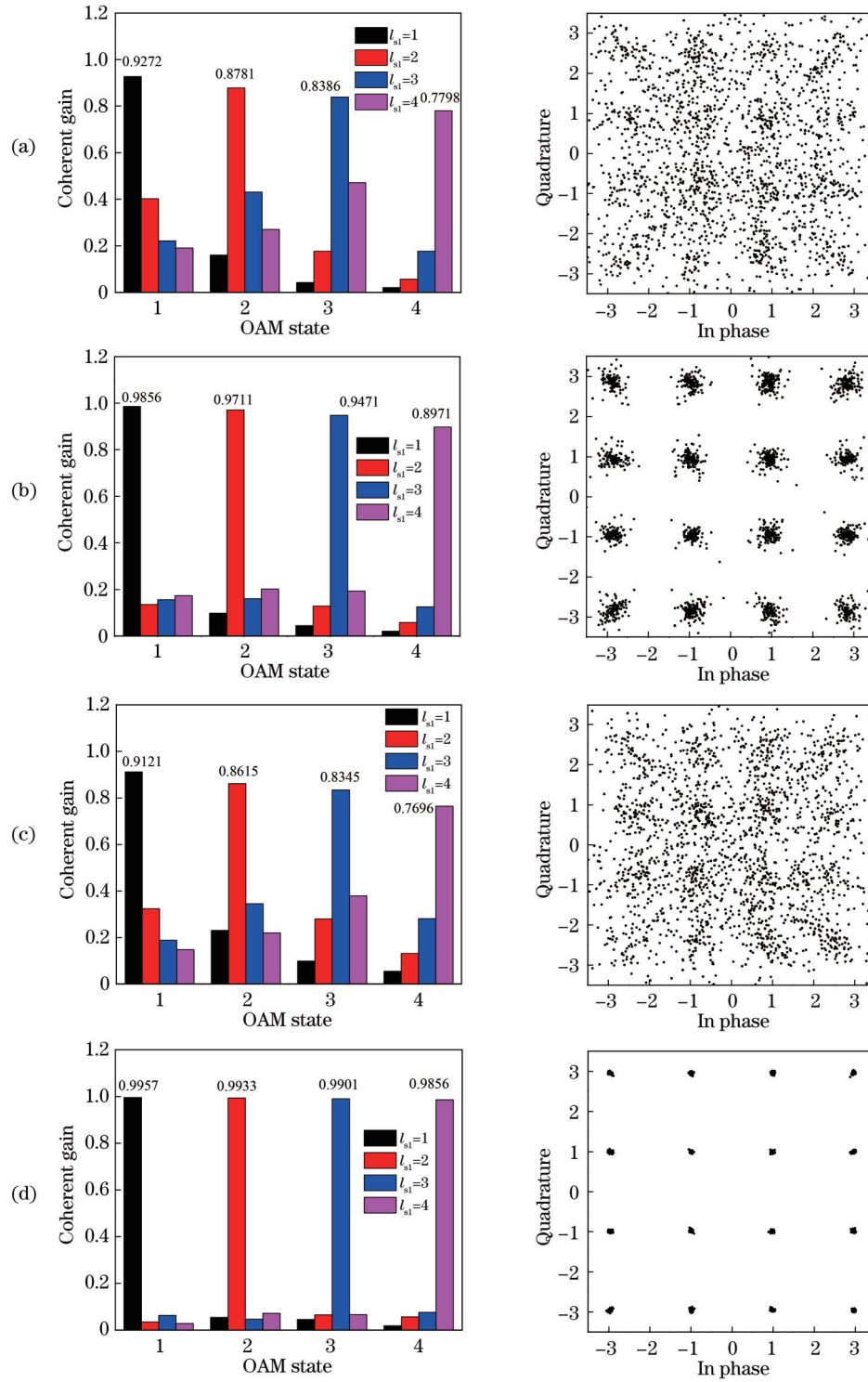


图 7 不同拓扑荷数信号光传输后的相干增益以及各模式之间的串扰。(a)上行链路未校正;(b)上行链路校正后;(c)下行链路未校正;(d)下行链路校正后

Fig. 7 Coherent gain of signal light with different topological charges after transmission and crosstalk among modes. (a) Uplink uncorrected; (b) uplink corrected; (c) downlink uncorrected; (d) downlink corrected

越大模式串扰越严重;自适应光学系统通常适用于弱湍流下的相位补偿,下行链路的校正效果相比上行链路优势更为明显。涡旋光束 OAM 复用相干检测在提

高了系统检测灵敏度的同时,提高了信道容量。该结论可扩充至多路 OAM 复用且增加复用间隔的相干检测通信。



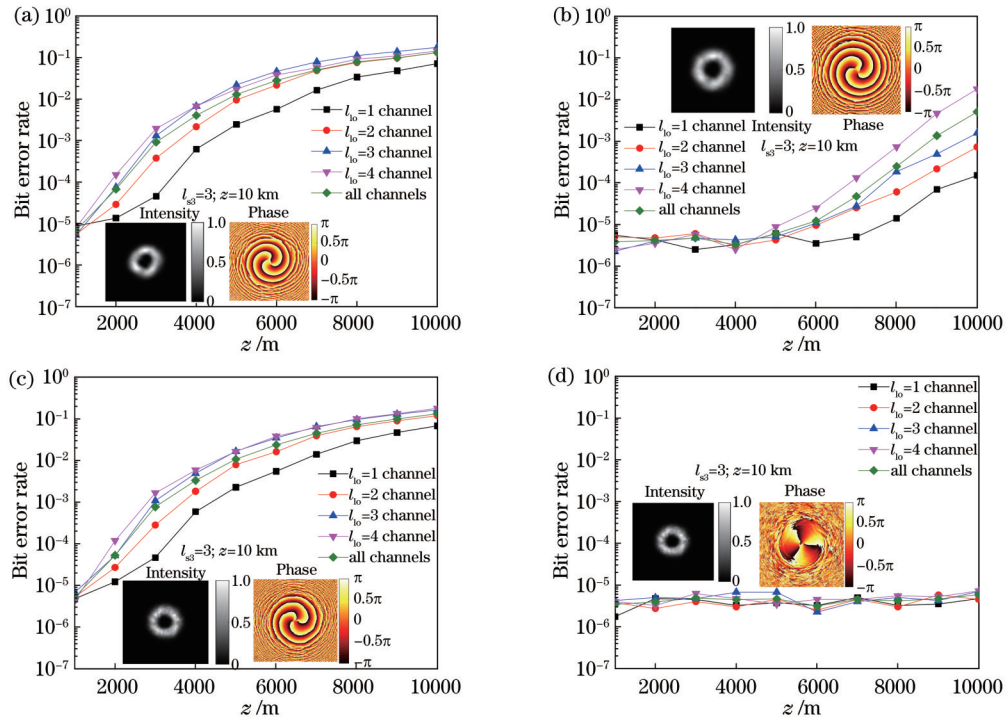


图 8 系统误码率随传输距离的变化。(a)上行链路未校正;(b)上行链路校正后;(c)下行链路未校正;(d)下行链路校正后  
Fig. 8 Change of system bit error rate with transmission distance. (a) Uplink uncorrected; (b) uplink corrected; (c) downlink uncorrected; (d) downlink corrected

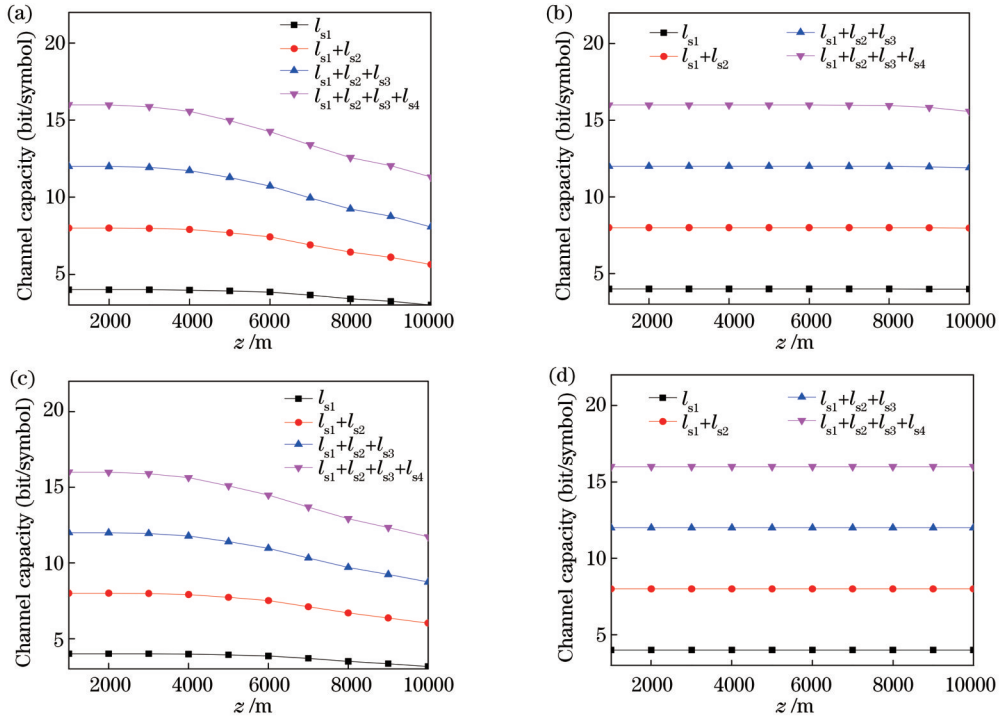


图 9 信道容量随传输距离的变化。(a)上行链路未校正;(b)上行链路校正后;(c)下行链路未校正;(d)下行链路校正后  
Fig. 9 Change of channel capacity with transmission distance. (a) Uplink uncorrected; (b) uplink corrected; (c) downlink uncorrected; (d) downlink corrected

参 考 文 献

[1] Otte E, Denz C. Optical trapping gets structure: structured light for advanced optical manipulation[J]. Applied Physics Reviews, 2020, 7(4): 041308.

[2] Willner A E, Zhao Z, Liu C, et al. Perspectives on advances in high-capacity, free-space communications using multiplexing of orbital-angular-momentum beams[J]. APL Photonics, 2021, 6 (3): 030901.

- [3] 刘俊, 王健. 涡旋光激光器研究进展[J]. 中国激光, 2022, 49(12): 1201001.  
Liu J, Wang J. Research progress of vortex laser[J]. Chinese Journal of Lasers, 2022, 49(12): 1201001.
- [4] Gianani I, Suprano A, Giordani T, et al. Transmission of vector vortex beams in dispersive media[J]. Advanced Photonics, 2020, 2(3): 036003.
- [5] Willner A E, Huang H, Yan Y, et al. Optical communications using orbital angular momentum beams[J]. Advances in Optics and Photonics, 2015, 7(1): 66-106.
- [6] 王明军, 余文辉, 黄朝军. 水下拉盖尔-高斯涡旋光束及其叠加态传输特性[J]. 光学学报, 2023, 43(6): 0626001.  
Wang M J, Yu W H, Huang C J. Transmission characteristics of underwater Laguerre-Gaussian vortex beam and its superposition states[J]. Acta Optica Sinica, 2023, 43(6): 0626001.
- [7] 吴冉, 陈君, 傅钢坤. 多模高阶涡旋光的光束漂移实验研究[J]. 光学学报, 2022, 42(4): 0426001.  
Wu R, Chen J, Fu G K. Experimental study of multi-mode high-order vortex beam wander[J]. Acta Optica Sinica, 2022, 42(4): 0426001.
- [8] Zhang N, Yuan X C, Burge R E. Extending the detection range of optical vortices by Damman vortex gratings[J]. Optics Letters, 2010, 35(20): 3495-3497.
- [9] 柯熙政, 胥俊宇. 涡旋光束轨道角动量干涉及检测的研究[J]. 中国激光, 2016, 43(9): 0905003.  
Ke X Z, Xu J Y. Interference and detection of vortex beams with orbital angular momentum[J]. Chinese Journal of Lasers, 2016, 43(9): 0905003.
- [10] Gibson G, Courtial J, Padgett M, et al. Free-space information transfer using light beams carrying orbital angular momentum[J]. Optics Express, 2004, 12(22): 5448-5456.
- [11] 柯熙政, 谢炎辰, 张颖. 涡旋光束轨道角动量检测及其性能改善[J]. 光学学报, 2019, 39(1): 0126017.  
Ke X Z, Xie Y C, Zhang Y. Orbital angular momentum measurement of vortex beam and its performance improvement [J]. Acta Optica Sinica, 2019, 39(1): 0126017.
- [12] Hickmann J M, Fonseca E J S, Soares W C, et al. Unveiling a truncated optical lattice associated with a triangular aperture using light's orbital angular momentum[J]. Physical Review Letters, 2010, 105(5): 053904.
- [13] Mourka A, Baumgartl J, Shanor C, et al. Visualization of the birth of an optical vortex using diffraction from a triangular aperture[J]. Optics Express, 2011, 19(7): 5760-5771.
- [14] Leach J, Padgett M J, Barnett S M, et al. Measuring the orbital angular momentum of a single photon[J]. Physical Review Letters, 2002, 88(25): 257901.
- [15] 柯熙政, 湛娟, 吕宏. 涡旋光束的轨道角动量双缝干涉实验研究[J]. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2012, 42(10): 996-1002.  
Ke X Z, Chen J, Lü H. Study of double-slit interference experiment on the orbital angular momentum of LG beam[J]. Scientia Sinica (Physica, Mechanica & Astronomica), 2012, 42(10): 996-1002.
- [16] 柯熙政, 李亚星. 分数阶拉盖尔高斯光束轨道角动量的实验研究[J]. 激光与光电子学进展, 2015, 52(8): 080501.  
Ke X Z, Li Y X. Experimental study on fractional Laguerre Gaussian beam with orbital angular momentum[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2015, 52(8): 080501.
- [17] Fu S Y, Wang T L, Gao Y, et al. Diagnostics of the topological charge of optical vortex by a phase-diffractive element [J]. Chinese Optics Letters, 2016, 14(8): 080501.
- [18] Zhou H L, Shi L, Zhang X L, et al. Dynamic interferometry measurement of orbital angular momentum of light[J]. Optics Letters, 2014, 39(20): 6058-6061.
- [19] Yang C Y, Xu C A, Ni W J, et al. Turbulence heterodyne coherent mitigation of orbital angular momentum multiplexing in a free space optical link by auxiliary light[J]. Optics Express, 2017, 25(21): 25612-25624.
- [20] Cao M, Yin Y L, Zhou J W, et al. Machine learning based accurate recognition of fractional optical vortex modes in atmospheric environment[J]. Applied Physics Letters, 2021, 119(14): 141103.
- [21] 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): 4062-4065.
- [22] Ke X Z, Cui N M. Experimental research on phase diversity method for correcting vortex beam distortion wavefront[J]. Applied Physics B, 2020, 126(4): 66.
- [23] 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): 275.
- [24] 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.
- [25] 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, 1992, 45(11): 8185-8189.
- [26] Li G F. Recent advances in coherent optical communication[J]. Advances in Optics and Photonics, 2009, 1(2): 279-307.
- [27] Lane R G, Glindemann A, Dainty J C. Simulation of a Kolmogorov phase screen[J]. Waves in Random Media, 1992, 2(3): 209-224.
- [28] Andrews L C, Phillips R L. Laser beam propagation through random media[M]. Bellingham: SPIE, 2005.
- [29] Tan Z K, Ke X Z. Analysis of a heterodyne detection system affected by irradiance and phase fluctuations in slant atmospheric turbulence[J]. Applied Optics, 2018, 57(32): 9596-9603.
- [30] 柯熙政, 王姣. 涡旋光束的产生、传输、检测及应用[M]. 北京: 科学出版社, 2018: 120-121.  
Ke X Z, Wang J. Generation, transmission, detection and application of vortex beam[M]. Beijing: Science Press, 2018: 120-121.
- [31] Djordjevic I B. Deep-space and near-Earth optical communications by coded orbital angular momentum (OAM) modulation[J]. Optics Express, 2011, 19(15): 14277-14289.
- [32] Molina-Terriza G, Torres J P, Torner L. Management of the angular momentum of light: preparation of photons in multidimensional vector states of angular momentum[J]. Physical Review Letters, 2001, 88(1): 013601.
- [33] Ke X Z, Tan Z K. Effect of angle-of-arrival fluctuation on heterodyne detection in slant atmospheric turbulence[J]. Applied Optics, 2018, 57(5): 1083-1090.

# Coherent Demultiplexing of Vortex Beam Multiplexing Transmission

Yang Shangjun<sup>1</sup>, Li Mengru<sup>1</sup>, Ke Chenghu<sup>2</sup>, Ding Deqiang<sup>3\*</sup>, Ke Xizheng<sup>1,4</sup>

<sup>1</sup>*School of Automation and Information Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, Shaanxi, China;*

<sup>2</sup>*School of Information Engineering, Xi'an University, Xi'an 710065, Shaanxi, China;*

<sup>3</sup>*School of Information Communication, National University of Defense Technology, Wuhan 430035, Hubei, China;*

<sup>4</sup>*Shaanxi Civil-Military Integration Key Laboratory of Intelligence Collaborative Networks, Xi'an 710048, Shaanxi, China*

**Objective** Vortex beams, distinguished by their unique spiral wavefront structure, phase singularity, and orbital angular momentum, offer possibilities for enhancing system performance. Notably, vortex beams with different modes are spatially orthogonal, enabling their use in orbital angular momentum multiplexing for augmenting the channel capacity and spectral efficiency. Moreover, demultiplexing these beams at the receiving end provides an additional boost to system capabilities.

This paper focuses on the application of coherent detection technology to a bi-directional slant path optical wireless communication system, employing orbital angular momentum multiplexing. This approach eliminates the need for image recognition steps, such as diffraction interference, thereby reducing errors introduced during the process. It analyzes the impact of the topological charge, altitude, and transmission distance on the performance of a vortex optical multiplex communication system. By incorporating an adaptive optics system for uplink and downlink correction, we can minimize crosstalk between modes, leading to improved detection sensitivity and channel capacity.

**Methods** The architecture of the orbital angular momentum multiplexing coherent detection system for optical wireless communication using bi-directional slant transmission is illustrated in Fig. 1. Fig. 2 presents a schematic view of the system's transmitting and receiving ends. At the transmitting end, the source signal laser is split into four beams using a  $1 \times 4$  coupler. The signal for each channel undergoes external modulation after series-to-parallel conversion and is then transformed into a vortex beam, with topological charges of 1, 2, 3, and 4, through spiral phase plates. These channels are then combined with a  $4 \times 1$  coupler for coaxial transmission. At the receiving end, a  $1 \times 4$  coupler divides the beam into four channels, each mixed with local oscillator vortex beams with corresponding topological charges. Following balanced detection, the electric signal is recovered, demodulated, and then converted back into signals through parallel-to-series conversion, enabling signal transmission from the source to the end. The uplink and downlink employ a single adaptive optics system, located near the downlink receiver, for correction. This system's working principle is depicted in Fig. 3. Given the reversibility of the transmission link and the reverse superposition of the wavefront, the distortion of the uplink signal wavefront at the transmitting antenna is conjugate with the wavefront distortion of the downlink received by the receiving antenna. This feature allows for post-correction of the downlink and pre-correction of the uplink.

**Results and Discussions** Fig. 4 illustrates the coherent gains of signal and local oscillator light with varying topological charges after mixing. These gains include uplink, downlink, corrected, and uncorrected scenarios. When the topological charge of the signal light ( $l_s$ ) is 1, and the topological charges of the local oscillator (LO) light ( $l_o$ ) are 1 and 2, the corresponding coherent gains stand at 0.867 and 0.156, respectively. Atmospheric turbulence, which is most potent near the surface, induces wavefront distortion in vortex light, reducing coherence between signal and LO light, and affecting their orthogonality. As a result, the downlink's correction effect is superior to that of the uplink. Fig. 8 reveals the bit error rate of each channel and the system's bit error rate under varying transmission distances. With increasing transmission distances, the wavefront distortion caused by strong turbulence in the uplink exceeds the adaptive optics' correction capability. Insets in Fig. 8 show the uncorrected and corrected light intensity and phase distribution after uplink and downlink transmission. The uplink utilizes pre-correction processing, leading to a larger corrected spot diameter compared with the uncorrected one. Wavefront correction does not influence the light intensity distribution, so no differences are observed in the light intensity distribution before and after downlink correction.

**Conclusions** The study concludes that atmospheric turbulence can trigger mode crosstalk during vortex optical multiplexing transmission, and extending the transmission distance heightens the system's bit error rate. At the same transmission distance, mode crosstalk becomes more pronounced as the topological load increases. Adaptive optics is typically apt for phase compensation in weak turbulence conditions, with the correction effect of the downlink more obvious than that of the uplink. The vortex beam orbital angular momentum multiplexing coherent detection significantly enhances the system's detection sensitivity and channel capacity. These findings apply to coherent detection communication involving multiple orbital angular momentum multiplexing with an expanded multiplexing interval.

**Key words** vortex beam; atmospheric turbulence; coherent detection; coherent gain