

基于波前校正的轨道角动量复用通信系统抗干扰研究

邹丽^{1,2}, 王乐¹, 张士兵², 赵生妹^{1,3}

(1.南京邮电大学 通信与信息工程学院, 江苏 南京 210003; 2.南通大学 电子信息学院, 江苏 南通 226019;

3.南京邮电大学 宽带无线通信与传感网技术教育部重点实验室, 江苏 南京 210003)

摘要: 基于轨道角动量(OAM, orbital angular momentum)复用自由空间光(FSO, free-space optical)通信系统不可避免地受到大气湍流的干扰。针对 OAM 复用通信系统, 提出一种基于 Gerchberg-Saxton 相位校正的大气湍流干扰影响补偿方法。利用 Gerchberg-Saxton 相位恢复算法校正由大气湍流导致的 OAM 态复用光波前相位扭曲。数值仿真结果证实, 该方法很好地抑制了大气湍流引起的 OAM 态复用串扰。在大气湍流折射率结构指数常数 $C_n^2 < 2 \times 10^{-15} \text{ m}^{-\frac{2}{3}}$ 时, 系统误码率比没有使用 Gerchberg-Saxton 算法的要下降 2 到 3 个数量级。

关键词: 光通信; 轨道角动量复用; 大气湍流; Gerchberg-Saxton 算法; 相位校正

中图分类号: TN929.12

文献标识码: A

Compensation of orbital-angular-momentum multiplexed communication system with wavefront correction

ZOU Li^{1,2}, WANG Le¹, ZHANG Shi-bing², ZHAO Sheng-mei^{1,3}

(1. College of Telecommunications and Information Engineering, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210003, China;

2. School of Electronics and Information, Nantong University, Nantong 226019, China;

3. Key Laboratory of Broadband Wireless Communication and Sensor Network Technology of Ministry of Education, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210003, China)

Abstract: It was shown that the quality of free-space optical communication system using OAM (orbital angular momentum) multiplexing was inevitably degraded by AT(atmospheric turbulence). A wavefront phase correction based on Gerchberg-Saxton algorithm to mitigate the wave front phase distortion of the OAM-multiplexed system transmitting through AT was proposed. The simulation results show that the crosstalk caused by AT decreases by using the proposed scheme. When the refractive index structure constant of AT C_n^2 is lower than $2 \times 10^{-15} \text{ m}^{-\frac{2}{3}}$, the BER (bit error rate) performance is decreased by two or three orders of magnitude with the proposed scheme.

Key words: optical communication; orbital-angular-momentum-multiplexed; atmospheric turbulence; Gerchberg-Saxton algorithm; phase correction

1 引言

随着多媒体、移动通信等多种新业务量的出现, 人们对带宽和频带利用率的需求将不断增强^[1], 这种

现象将在 5G 通信系统中尤为明显^[2]。轨道角动量(OAM, orbital angular momentum)作为经典和量子力学的基本物理量, 已成为通信系统的一种新型复用自由度, 它极大地提高了通信系统的频带利

收稿日期: 2015-06-17; 修回日期: 2015-09-14

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61371111, 61371112, 61475075); 教育部高等学校博士学科点专项科研基金资助项目(20123223110003); 宽带无线通信与传感网技术教育部重点实验室开放课题研究基金资助项目(NYKL2015011); 江苏省高校研究生科研创新计划基金资助项目(CXZZ13_0489)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (61371111, 61371112, 61475075); The Specialized Research Fund for the Doctoral Program of Higher Education of China (20123223110003); The Open Research Fund of Key Lab of Broadband Wireless Communication and Sensor Network Technology of Ministry of Education (NYKL2015011); The Jiangsu Province Postgraduate Innovation Research Plan of China (CXZZ13_0489)

用率和系统容量^[3]。目前, OAM 复用已被应用于光纤通信^[4-6]、自由空间光(FSO, free-space optical)通信^[7-9]和无线通信^[10-12]中, OAM 复用通信系统得到了广泛的关注。

光子轨道角动量是由荷兰物理学家 Allen 在 1992 年发现的^[13]。光子角动量分为自旋角动量(SAM, spin angular momentum)和轨道角动量。SAM 与光的偏振有关, 而 OAM 与波函数的空间分布有关, 它含有一个旋转相位因子 $e^{i\theta}$, θ 为传播方位角, l 为方位角指数。2004 年, Gibson 等首次将 OAM 应用于光通信, 并在实验室演示通过单路 OAM 态编码的信息传输^[14]。与光子自旋角动量不同, 对于单个光子, 理论上 OAM 态的取值可以无限, 且不同 OAM 态间相互正交, 这种特性使 OAM 态更加适合于信息的复用传输。

然而, OAM 态本质是一空间分布函数, 基于 OAM 态的复用通信系统不可避免地受到大气湍流的干扰^[15]。大气湍流不仅影响单路 OAM 态, 而且导致不同路 OAM 态之间产生串扰^[16-19]。目前, 有很多论文研究解决大气湍流干扰 OAM 态复用系统的相关方法^[20-23]。2012 年, Djordjevic 等利用 LDPC 纠错编码抑制大气湍流对 OAM 态复用通信系统影响^[20]; 2013 年, Ren 等利用双路自适应 Shack-Hartmann 波前校正技术校正由大气湍流引起的 OAM 态复用系统干扰^[21]; 2014 年, Xu 等利用 MIMO(multiple input multiple output)自适应均衡方法降低大气湍流导致的 OAM 态复用系统信号间串扰^[22]; 2015 年, Xie 等利用基于光强的 Zernike 多项式随机并行梯度下降算法校正大气湍流对 OAM 态复用系统的影响^[23]。

相位校正方法能有效抑制大气湍流对 OAM 态复用通信系统的影响。Shack-Hartmann 波前校正技术适于校正具有空间缓变特征的波前^[24], 且对计算机处理速度要求高。而大气湍流变化速度非常快,

且随机性很大, 能引起较快速变化的随机波前扭曲。因此, 相比于 Shack-Hartmann 波前校正方法, Gerchberg-Saxton 算法可恢复任何模式的波前相位, 可纠正快速变化的随机波前扭曲, 且稳定性比 Shack-Hartmann 好, 对计算机处理速度要求不高^[24]。对于大气湍流引起的波前相位失真, 利用 Gerchberg-Saxton 波前相位恢复算法更好。

本文提出了一种基于 Gerchberg-Saxton 的相位恢复算法^[25], 用来校正由大气湍流导致的 OAM 态光的波前相位扭曲。基于 Gerchberg-Saxton 的相位恢复算法, 由变形 OAM 态复用光的幅度谱, 通过 Gerchberg-Saxton 算法迭代得出类似的大气湍流随机相位, 然后用变形 OAM 态复用光相位减去这个模拟的大气湍流随机相位, 从而达到校正 OAM 态复用光波前相位扭曲的目的。本文分析比较使用和不使用 Gerchberg-Saxton 算法的接收端 QPSK (quadrature phase shift keyin)信号星座图变化, 接收解复用各路 OAM 光串扰变化以及系统接收误码率特性变化。

2 基于 OAM 态复用的大气湍流干扰 Gerchberg-Saxton 波前相位校正方案

2.1 基于 OAM 态复用的大气湍流干扰 Gerchberg-Saxton 波前相位校正系统模型

基于 OAM 态复用系统大气湍流干扰的 Gerchberg-Saxton 相位校正系统模型如图 1 所示。

图 1 显示系统首先由 N 路独立的用户信息采用二进制信号传输。每路信号经过一个光调制器进行基带信号调制, 将输入二进制比特流信号调制为 QPSK 的高斯光信号, 然后经过 OAM 态转换器, 将高斯光转换为 OAM 光, 每路 OAM 态转换器的模式值 $l_i, i \in [1, N]$, 即为 OAM 态方位角指数。各路取不同 OAM 态方位角指数, 且各路 OAM 光信号相互正交。各 OAM 态转换器输出的光圈为每路

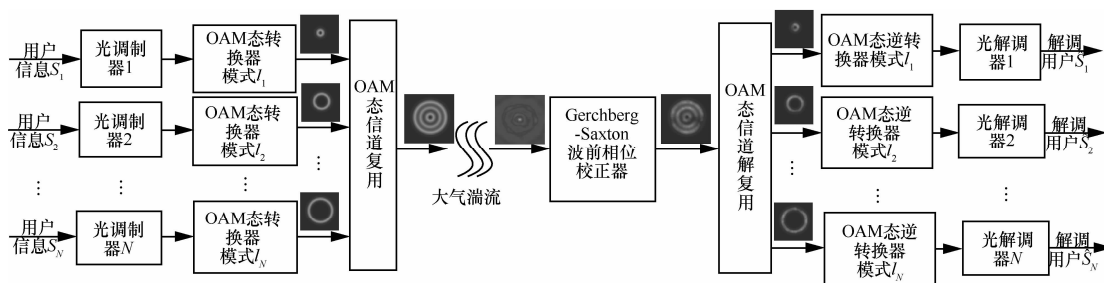


图 1 OAM 态复用系统大气湍流干扰 Gerchberg-Saxton 波前相位校正

OAM 信号光强仿真图,不同 OAM 态方位角指数对应的光圈半径不一样。接下来, N 路 OAM 态信号经过信道复用,复用光强为 N 路 OAM 态光强叠加,如图 1 中的 OAM 态信道复用输出光强仿真所示。OAM 态复用光信号传输经过大气湍流到接收端复用信号,受大气湍流影响,光强发生很严重的失真,出现弥散串扰现象,经过大气湍流输出变形光圈。为了降低各路光之间的弥散和串扰,在此引入 Gerchberg-Saxton 波前相位校正,经过 Gerchberg-Saxton 波前相位校正器后,复用光强得到了很大的改善,如图 1 中的 Gerchberg-Saxton 波前相位校正输出光强仿真所示。随后经过 OAM 态信道解复用,得到 N 路分离的 OAM 光,由于 Gerchberg-Saxton 波前相位校正不能完全去除大气湍流对 OAM 态复用光的干扰,因此各路解复用 OAM 光仍然发生变形,这时的 N 路分离 OAM 光由于受到大气湍流干扰,不再保持正交,经过 OAM 态逆转换器将各路 OAM 光转变回高斯光,最后经过光调制器将 QPSK 信号解调成各路二进制用户信号。

2.2 Gerchberg-Saxton 波前相位校正算法

Gerchberg-Saxton 波前相位校正算法是由输入和输出平面上的光强度测量数据来恢复光场相位分布的。它利用物空间和像空间的傅里叶变换与逆变换交替的迭代算法,将光强信息转变为相位信息^[26]。在 OAM 态复用通信系统中,利用失真的 OAM 态复用光幅度谱作为相位校正因子,通过迭代算法恢复相位信息。

Gerchberg-Saxton 波前相位校正算法基本流程如图 2 所示。

Gerchberg-Saxton 波前校正算法里最主要是得出由式(1)确定的模拟大气湍流的相位 $H(x,y)$ ^[27]

$$F\{\exp[iH(x,y)]\} = A(k_x,k_y)\exp[i\Phi(k_x,k_y)] \quad (1)$$

其中, $A(k_x,k_y)$ 为由大气湍流相位函数 $H(x,y)$ 求得的傅里叶变换的环形光的幅度,是此算法迭代的主要参数, $\Phi(k_x,k_y)$ 为傅里叶变换的环形光的相位。此算法流程如下。

- 1) 初始化一个 $l=+1$ 的 OAM 参考光,得出其光幅度和相位函数,如图 2 左上初始条件幅度和相位所示。
- 2) 由 $l=+1$ 的 OAM 参考光计算出其变换域幅度谱 $A_0(k_x,k_y)$ 和相位谱 $\Phi_0(k_x,k_y)$,结果对应右框图成像平面上面 2 个方框所示。
- 3) 将变形 OAM 态复用光的幅度谱放在右框图左下角位置,替换 $A_0(k_x,k_y)$,作为迭代光幅度谱。
- 4) 将变形 OAM 态复用光的幅度谱与相位谱 $\Phi_0(k_x,k_y)$ 组成新的函数,求解其傅里叶逆变换,得左框图空间光调制器 (SLM, spatial light modulator) 平面下方两方框空间域幅度 $a_0(x,y)$ 和相位 $H_0(x,y)$,把初始条件里光幅度代替 $a_0(x,y)$,与 $H_0(x,y)$ 形成新函数,求解傅里叶变换,与初始条件参考光傅里叶变换的结果相减,得差值 $A_1(k_x,k_y)$ 和 $\Phi_1(k_x,k_y)$ 替换 $A_0(k_x,k_y)$ 和 $\Phi_0(k_x,k_y)$,将 $A_1(k_x,k_y)$ 与变形 OAM 态复用光的幅度谱比较,误差大于设定误差 0.01,再把变形 OAM 态复用光的幅度谱替换 $A_1(k_x,k_y)$,进行循环迭代运算。
- 5) 直到最终满足误差设定条件,将此时的

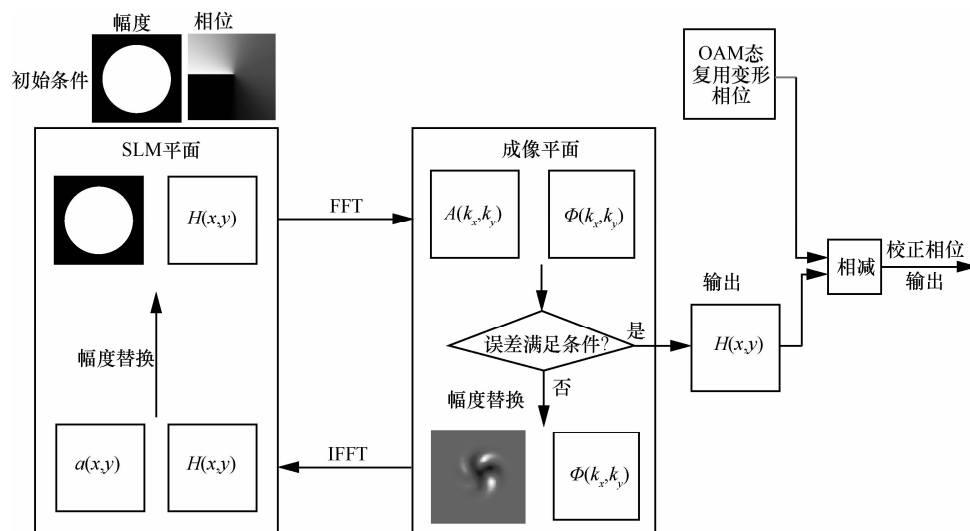


图 2 Gerchberg-Saxton 波前相位校正算法

$H(x, y)$ 作为最终的模拟大气湍流的扭曲相位输出。

6) 将原 OAM 态复用传输通过大气湍流信号的变形相位与 $H(x, y)$ 相减, 得到最终校正相位, 从而达到校正大气湍流对 OAM 态复用信号相位改变的影响。

本文 Gerchberg-Saxton 算法里, 利用变形 OAM 态复用光的幅度谱迭代算法进行相位校正的。该算法能有效校正由大气湍流所导致的 OAM 态复用光波前相位失真。

2.3 基于 OAM 态复用的大气湍流干扰 Gerchberg-Saxton 波前相位校正理论推导

OAM 光的表示方法有很多种, Gerchberg-Saxton 算法对校正 Laguerre-Gauss(LG)型 OAM 态光效果比较好^[27], 因此采用形式简单的 LG 光表示^[28]。在传输 z 距离时, LG 光数学表达式如式(2)所示

$$LG_{l,p}(r, \theta, z) = R_{l,p}(r, z) \exp(i l \theta) \cdot \exp[-i(2p + |l| + 1) \tan^{-1} \frac{z}{z_R}] \quad (2)$$

其中, $R_{l,p}(r, z)$ 表示 LG 光的幅度, 数学表达式如式(3)所示

$$R_{l,p}(r, z) = \frac{1}{w(z)} \left(\frac{2p!}{\pi(|l| + p)!} \right)^{\frac{1}{2}} \left(\frac{\sqrt{2}r}{w(z)} \right)^{|l|} \cdot L_p^l \left(\frac{2r^2}{w^2(z)} \right) \exp \left(-\frac{r^2}{w^2(z)} \right) \exp \left(-\frac{ikr^2}{2R} \right) \quad (3)$$

其中, $\exp(i l \theta) \exp \left[-i(2p + |l| + 1) \tan^{-1} \frac{z}{z_R} \right]$ 为 LG 光的相位, $\exp(i l \theta)$ 代表 LG 光的旋转相位特性。式(2)和式(3)中各参数含义如下: l 为方位角指数, p 为辐射指数, 一般情况下为降低计算复杂度取 $p = 0$, r 是光波传播的辐射半径, θ 是光波传播的辐射角, $L_p^l(\bullet)$ 是 Laguerre 多项式, z 为传输距离,

$$w = w_0 \sqrt{1 + \left(\frac{z}{z_R} \right)^2}, \quad R = z \left[1 + \left(\frac{z_R}{z} \right)^2 \right], \quad z_R = \frac{1}{2} k w_0^2,$$

$k = 2\pi / \lambda$ 为波数, w_0 是高斯光束的束腰半径, λ 为光波长。本文将传输 z 距离的 LG 光简化表示为 $LG_l(r, \theta, z)$, 在发送端 $z = 0$ 的 LG 光简化为 $LG_l(r, \theta)$ 。

LG 光由于含有旋转相位因子 $e^{i l \theta}$, 因此具有严

格正交的特性, 即

$$\begin{aligned} & (LG_{l_n}(r, \theta, z), LG_{l_m}(r, \theta, z)) \\ &= \iint LG_{l_n}(r, \theta, z) LG_{l_m}^*(r, \theta, z) r dr d\theta \\ &= \begin{cases} \iint |LG_{l_n}(r, \theta, z)|^2 r dr d\theta, & l_n = l_m \\ 0, & l_n \neq l_m \end{cases} \quad (4) \end{aligned}$$

假设每路输入用户信号表示为 $s_n(t)$, $n \in [1, N]$, 信号经过光调制器后转变成 QPSK 信号表示为 $x_n(t)$, $n \in [1, N]$, 则每路 OAM 态转换器输出信号表示为

$$U_n(r, \theta, t) = x_n(t) LG_{l_n}(r, \theta) \quad (5)$$

N 路信号复用得

$$U_{\text{MUX}}(r, \theta, t) = \sum_{n=1}^N U_n(r, \theta, t) = \sum_{n=1}^N x_n(t) LG_{l_n}(r, \theta) \quad (6)$$

本文大气湍流使用 Kolmogrove 湍流模型, 使用随机产生的相位屏模拟, 这里使用文献[29]的式(2)中产生大气湍流的随机相位屏 $\varphi(r, \theta)$ 。OAM 态复用信号经过大气湍流传输 z 距离到接收端, 得

$$\begin{aligned} U_{\text{MUXO}}(r, \theta, z, t) &= U_{\text{MUX}}(r, \theta, z, t) e^{i\varphi(r, \theta)} \\ &= \sum_{n=1}^N x_n(t) R_{l_n}'(r, z) e^{i\varphi(r, \theta)} \quad (7) \end{aligned}$$

其中, $R_{l_n}'(r, z)$ 为 LG 光 $LG_{l_n}(r, \theta, z)$ 受大气湍流影响发生变形的光幅度。 $\Phi(r, \theta)$ 为 $LG_{l_n}(r, \theta, z)$ 受大气湍流影响导致光相位发生失真的结果。

通过大气湍流后, OAM 态复用光 $U_{\text{MUXO}}(r, \theta, z, t)$ 发生严重失真, 各不同方位角指数的 OAM 态光圈发生弥散和串扰, 这种失真是由于大气湍流的相位扰动所引起的, 导致 OAM 态的光强和相位都发生失真。

OAM 态复用光通过 Gerchberg-Saxton 波前相位校正器, 输出 OAM 态复用光表示为

$$\begin{aligned} U_{\text{MUXO}}'(r, \theta, z, t) &= U_{\text{MUXO}}(r, \theta, z, t) e^{-iH(r, \theta)} \\ &= \sum_{n=1}^N x_n(t) R_{l_n}'(r, z) e^{i[\Phi(r, \theta) - H(r, \theta)]} \\ &= \sum_{n=1}^N x_n(t) R_{l_n}'(r, z) e^{i\Delta\Phi(r, \theta)} \quad (8) \end{aligned}$$

式(8)中 $H(r, \theta)$ 为由 Gerchberg-Saxton 算法恢复的模拟大气湍流相位 $H(x, y)$ 的极坐标表示, 由式(8)看出, 扭曲的 OAM 态复用光相位 $\Phi(r, \theta)$ 经过 Gerchberg-Saxton 算法校正变成 $\Delta\Phi(r, \theta)$ 。为了将式(8)简化, 令

$$LG'_n(r, \theta, z) = R'_n(r, z)e^{i\Delta\phi(r, \theta)} \quad (9)$$

则式(8)变为

$$U'_{MUXO}(r, \theta, z, t) = \sum_{n=1}^N x_n(t) LG'_n(r, \theta, z) \quad (10)$$

然后经过 OAM 态信道解复用, 并经过 OAM 态逆转换器, 此过程用接收的 OAM 态复用光与没有加入 QPSK 调制信息的理想单个 LG 光求内积得第 k 路, $k \in [1, N]$, 输出光信号为

$$\begin{aligned} y_k(t) &= (U'_{MUXO}(r, \theta, z, t), LG'_k(r, \theta, z, t)) \\ &= \sum_{n=1}^N x_n(t) \iint LG'_n(r, \theta, z) LG'^*_k(r, \theta, z) r dr d\theta \\ &= x_k(t) \iint LG'_k(r, \theta, z) LG'^*_k(r, \theta, z) r dr d\theta + \\ &\quad \sum_{n=1, n \neq k}^N x_n(t) \iint LG'_n(r, \theta, z) LG'^*_k(r, \theta, z) r dr d\theta \quad (11) \end{aligned}$$

$LG'_n(r, \theta, z)$ 虽然是经过 Gerchberg-Saxton 算法

校正的 LG 光, 但由于其不可能完全校正成理想的 LG 光, 因此 $LG'_n(r, \theta, z)$ 仍然为变形的 OAM 光。

由此得出式(11)中积分不再满足式(4)的正交特性, 从而在 $l_n \neq l_k$ 时, 上式积分不为 0, 表明接收到的方位角为 l_k 的信号受到其他方位角指数 $l_n \neq l_k$ 的串扰影响。 $y_k(t)$ 信号再经过光解调器转换为二进制基带信号 $s'_k(t)$ 。由 $s'_k(t)$ 和发送端用户信号 $s_n(t)$ 比较, 可分析系统误码率。

3 数值仿真分析

大气湍流使用 Kolmogrove 湍流模型, 采用等间距相位屏传输 1 000 m, 相邻相位屏间隔 $\Delta Z = 100$ m, 大气湍流外尺度 $L_0 = 50$ m, 大气湍流内尺度 $l_0 = 1$ mm。OAM 光使用 LG 光, 根据 LG 光相关

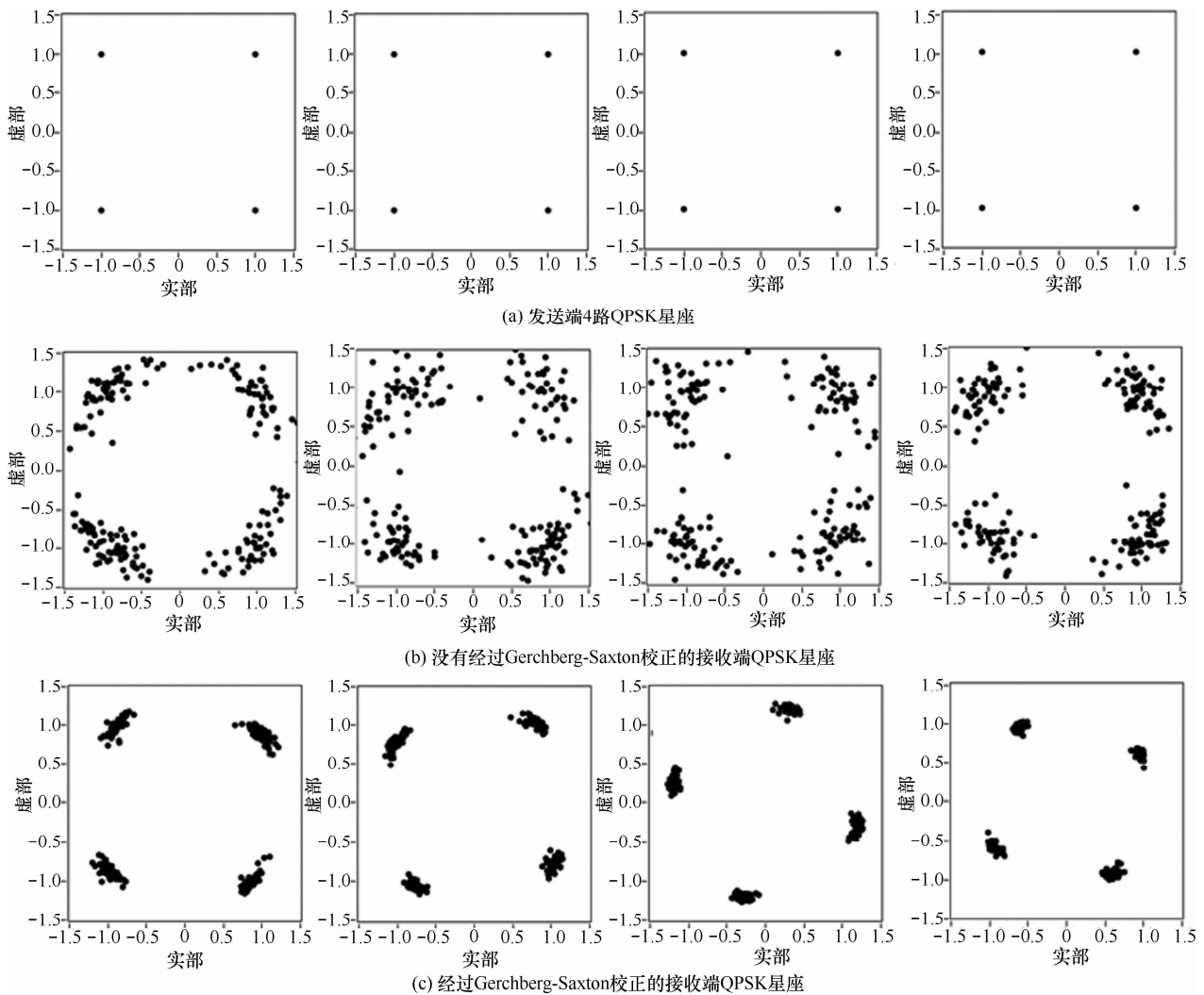


图 3 $C_n^2 = 1 \times 10^{-15} \text{ m}^{-2/3}$ 时, 4 路复用 QPSK 星座

参数^[28]设定, Lagurre 多项式径向值 $p=0$, 束腰 $w_0=0.035\text{ m}$, 波长选择工作于大气窗口的光波长 $\lambda=1550\text{ nm}$, 栅格点数 $N=128$, 栅格距 $\Delta x=2\text{ mm}$ 。

图 3 给出 OAM 态复用光传输经过大气湍流折射率结构指数常数 $C_n^2=1\times 10^{-15}\text{ m}^{-2/3}$ 时, 接收端解调得出 QPSK 信号星座图。Gerchberg-Saxton 迭代次数为 6, 信号仿真点数取 200。图 3(a)是发送端理想的 QPSK 信号, 将 4 路 QPSK 信号经过 OAM 态转换成 4 路 OAM 态复用光, 选用各路 OAM 态方位角指数从左到右分别为 $l=+1,+2,+3,+4$, OAM 态复用光传输经过大气湍流, 接收端解调出 QPSK 信号。图 3(b)为没有经过 Gerchberg-Saxton 相位校正的接收端 QPSK 星座图, 由图 3(b)看出, 受大气湍流影响, QPSK 信号幅度和相位都发生失真。图 3(c)为经过 Gerchberg-Saxton 相位校正的接收端 QPSK 星座图, 由图 3(c)的 4 路星座图看出, 经过 Gerchberg-Saxton 相位校正, 使 QPSK 信号幅度和相位失真得到很好的改善。

图 4 给出 Gerchberg-Saxton 相位校正 4 路 OAM 态复用光受 $C_n^2=1\times 10^{-14}\text{ m}^{-2/3}$ 大气湍流影响导致串扰的仿真。此时 Gerchberg-Saxton 迭代次数为 6, 数据仿真点数 10 000。图 4(a)为发送端 $l=+1,+2,+3,+4$ 的 4 路 OAM 态复用光的归一化功率。图 4(b)和图 4(c)为 4 路 OAM 态复用光传输经过大气湍流经 OAM 态解复用器得到的各路接收到的归一化功率, 图 4(b)没有经过 Gerchberg-Saxton 相位校正, 图 4(c)经过了 Gerchberg-Saxton 相位校正。由图 4 看出经过 Gerchberg-Saxton 相位校正后, 各路 OAM 光之间串扰变小。以图 4(b)最上面一张仿真图为例分析, 该图表示接收端第 1 路接收的功率, 对应发送端第 1 路 $l=+1$ 的 OAM 光, 分别由发送端 $l=+1,+2,+3,+4$ 串扰得到, 其中第 1 个柱形表示由发送端 $l=+1$ 得到接收端这路功率为 0.75, 这是正确接收到的功率, 而后面 3 个分别由 $l=+2,+3,+4$ 串扰到 $l=+1$ 的接收功率, 串扰值分别为 0.1, 0.06, 0.02。相对应图 4(c)第一张仿真图第 1 根柱形由发送端 $l=+1$ 传输得到功率为 0.93, 后面 3 个柱形分别由 $l=+2,+3,+4$ 传输得到为 0.04, 0.015, 0.01。正确接收功率由原来 0.75 提升到 0.93。再从图 4(b)纵向 4 张图看, 以每张图的第 1 个柱形看, 这 4 个柱形都是方位角指数为 +1 的功率, 它们表示从发送端 $l=+1$ 的归一化光功率受大气湍流影响串扰到接

收端 $l=+1,+2,+3,+4$ 的 4 路解复用输出, 只有第 1 个 $l=+1$ 的柱形是正确接收的光功率, 其他 3 个 $l=+1$ 的柱形都是由发送端 $l=+1$ 串扰到接收端 $l=+2,+3,+4$ 的功率, 分别为 0.15, 0.04, 0.03。相对应图 4(c)的 4 张图的第 1 个柱形看, 由发送端 $l=+1$ 串扰到 $l=+2,+3,+4$ 的功率分别为 0.03, 0.02, 0.01。

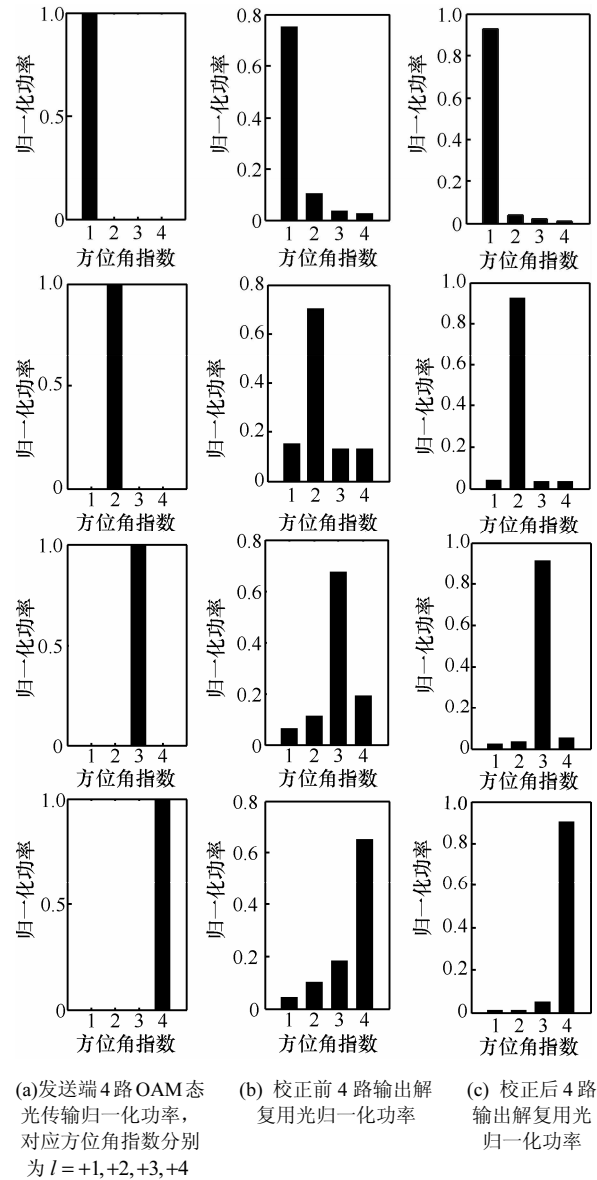


图 4 比较 4 路 OAM 态复用光传输经过大气湍流使用校正前后各路光串扰影响

图 5 为文献[25]使用单路 OAM 光信号传输相位校正前后的性能比较。同样以 $l=+1$ 的 OAM 光做为传输光, 由于收到大气湍流的影响, $l=+1$ 的 OAM 光会串扰到其他 OAM 态值。接收端考虑串扰引起的 $l=+1,+2,+3,+4$ 的 4 路接收光, 其他条件和图 4 仿真条件一致。图 5(a)为发送端 $l=+1$ 的单路

OAM 态复用光的归一化功率。图 5(b)和图 5(c)分别为受大气湍流串扰的 $l = +1, +2, +3, +4$ 的 4 路 OAM 态光的接收归一化功率，其中图 5(b)没有经过 Gerchberg-Saxton 相位校正的，图 5(c)是经过了 Gerchberg-Saxton 相位校正的。由图 5 看出，校正前接收端正确接收 $l = +1$ 的功率为 0.86，串扰到 $l = +2, +3, +4$ 的功率分别为 0.09, 0.02, 0.005；使用校正后接收端正确接收 $l = +1$ 的功率为 0.95，串扰到 $l = +2, +3, +4$ 的功率分别降为 0.015, 0.008, 0.005。

比较图 4 和图 5 可以看出，在多路 OAM 复用系统中，大气湍流引起的不同 OAM 态间串扰要比单路 OAM 态系统串扰要大得多。但使用本文提出的基于 Gerchberg-Saxton 波前校正算法后能达到单路 OAM 光的校正效果。这说明本文提出的基于 Gerchberg-Saxton 波前校正算法对复用 OAM 光校正效果是比较理想的。

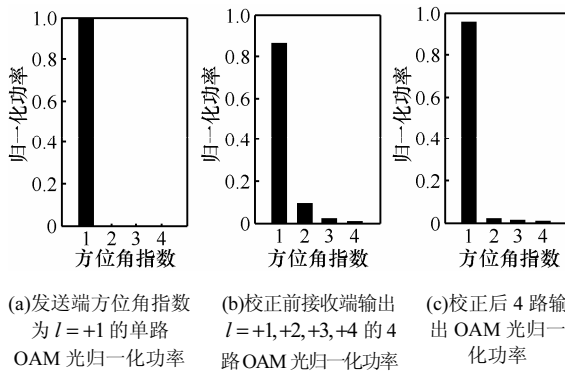
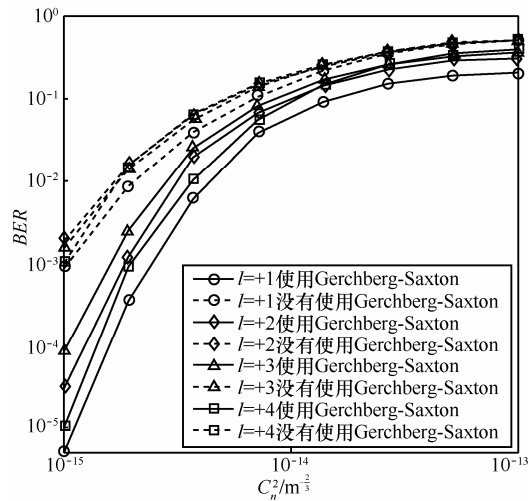


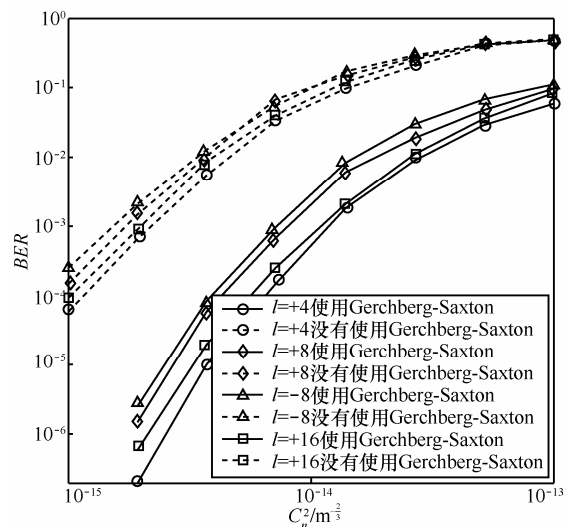
图 5 比较单路 OAM 态光传输经过大气湍流使用校正算法前后串扰影响

图 6 给出取不同方位角指数的 OAM 态复用系统使用 Gerchberg-Saxton 波前相位校正与不使用该方法，系统误码率随大气湍流折射率结构常数 C_n^2 变化仿真曲线。此时 Gerchberg-Saxton 迭代次数为 6，数据仿真点数 100 000。由图 6 看出，随着 C_n^2 的增加，系统误码率随之增加，同时，OAM 态方位角指数越大，误码率越高。由图 6(a)看出，即使在 $3.8 \times 10^{-15} \text{ m}^{-2/3} \leq C_n^2 \leq 1 \times 10^{-14} \text{ m}^{-2/3}$ 下，使用 Gerchberg-Saxton 波前相位校正也不能使系统误码率得到很好的提升。这是因为此时选取的复用方位角指数 $l = +1, +2, +3, +4$ ，由于各路 OAM 态方位角指数间隔很小，所以该复用系统受大气湍流影响导致各路光信号之间串扰很大，校正效果不好。只有当 $C_n^2 \leq 2 \times 10^{-15} \text{ m}^{-2/3}$ 时，使用 Gerchberg-Saxton 波前相位校正算法使 OAM 态复用系统性能得到明显提升，

误码率下降 2 个数量级，并且随着大气湍流强度的减弱，系统误码率性能下降很快。与图 6(a)比较，图 6(b)选取的复用方位角指数 $l = +4, +8, -8, +16$ ，Gerchberg-Saxton 波前相位校正对系统误码率提升很明显。这是因为图 6(b)中使用的 OAM 态方位角指数间隔比较大，所以该 OAM 态复用系统受大气湍流干扰导致的各路 OAM 态信号间串扰相对 OAM 态方位角指数间隔较小的图 6(a)的 OAM 态复用系统各路 OAM 态信号间串扰要小，因此，用 Gerchberg-Saxton 波前相位校正方法抑制各路 OAM 态信号间串扰的效果就比较明显。而且随着大气湍流强度不断减弱，校正效果越明显，在 $C_n^2 \leq 3.8 \times 10^{-15} \text{ m}^{-2/3}$ 时，使用 Gerchberg-Saxton 算法能将误码率下降 3 个数量级。



(a) OAM 态复用方位角指数 $l = +1, +2, +3, +4$



(b) OAM 态复用方位角指数 $l = +4, +8, -8, +16$

图 6 OAM 态复用系统使用和不使用 Gerchberg-Saxton 波前相位校正下系统误码率随大气湍流折射率结构常数 C_n^2 变化性能仿真曲线

4 结束语

本文提出了一种基于 Gerchberg-Saxton 的波前相位校正算法抑制大气湍流对 OAM 态复用 FSO 通信系统干扰的方案。在方案中, 该算法利用扭曲的 OAM 态复用光幅度通过迭代运算, 得出类似大气湍流的相位, 然后将 OAM 态复用光相位与其相减, 从而达到降低大气湍流干扰导致 OAM 态复用光相位扭曲的程度。数值仿真结果验证了方案的可行性。在 $C_n^2 = 1 \times 10^{-15} \text{ m}^{-\frac{2}{3}}$ 时, 由接收 QPSK 星座图看出, 利用 Gerchberg-Saxton 算法后, QPSK 信号的幅度和相位得到很大改善; 在 $C_n^2 = 1 \times 10^{-14} \text{ m}^{-\frac{2}{3}}$ 时, 利用 Gerchberg-Saxton 算法能降低 OAM 态信号间串扰; 在 $C_n^2 \leq 2 \times 10^{-15} \text{ m}^{-\frac{2}{3}}$ 时, 系统误码率比没有使用该方法时下降 2 到 3 个数量级。

本算法对弱大气湍流下, 提升 OAM 态复用系统性能较好, 但当大气湍流 $C_n^2 > 1 \times 10^{-14} \text{ m}^{-\frac{2}{3}}$ 时, 效果就不明显了。另外, 本文的研究是基于快速变化的大气湍流模型。由于缓变的大气湍流对本文设定的 OAM 态复用系统影响不大, 因此本文提出的算法并不适用于缓变的大气湍流模型。

下一阶段的研究将考虑 Gerchberg-Saxton 算法结合 MIMO 均衡技术^[30]联合抑制大气湍流对 OAM 态复用 FSO 通信系统的干扰。

参考文献:

- [1] 彭文杰, 李岳衡, 薛团结, 等. 复合衰落信道下分布式 MIMO 系统中断概率及信道容量分析[J]. 通信学报, 2015, 36(2): 2015052.
PENG W J, LI Y H, XUE T J, *et al.* Outage probability and capacity analysis of distributed MIMO systems over a composite fading channel[J]. Journal on Communications, 2015, 36(2): 2015052.
- [2] 尤晓虎, 潘志文, 高西奇等. 5G 移动通信发展趋势与若干关键技术[J]. 中国科学: 信息科学, 2014, 44(5): 551-563.
YOU X H, PAN Z W, GAO X Q, *et al.* The 5G mobile communication: the development trends and its emerging key techniques[J]. Scientia Sinica Informationis, 2014, 44(5): 551-563.
- [3] WANG J, YANG J Y, FAZAL I M. Terabit free-space data transmission employing orbital angular momentum multiplexing[J]. Nature Photonics, 2012, 6(7): 488-496.
- [4] ALLEN L, BEIJERSBERGEN M W, SPREEUW R J C. Orbital angular momentum of light and the transformation of Laguerre-Gaussian laser modes[J]. Physical Review A, 1992, 45(11): 8185-8189.
- [5] GIBSON G, COURTIAL J, PADGETT M J. Free-space information transfer using light beams carrying orbital angular momentum[J]. Optics Express, 2004, 12(22): 5448-5456.
- [6] YUE Y, BOZINOVIC N, REN Y X, *et al.* 1.6-Tbit/s muxing, transmission and demuxing through 1.1-km of vortex fiber carrying 2 OAM beams each with 10 wavelength channels[A]. Optical Fiber Communication Conference[C]. Anaheim, California United States, 2013.
- [7] FANG Y, YU J J, CHI N. A novel PON architecture based on OAM multiplexing for efficient bandwidth utilization[J]. IEEE Photonics Journal, 2015, 7(1): 7900506.
- [8] RAMACHANDRAN S, GREGG P, KRISTENSEN P. On the scalability of ring fiber designs for OAM Multiplexing[J]. Optics Express, 2015, 23(3): 3721-3730.
- [9] HUANG H, XIE G D, YAN Y. 100 Tbit/s free-space data link enabled by three-dimensional multiplexing of orbital angular momentum, polarization, and wavelength[J]. Optics Letters, 2014, 39(2): 197-200.
- [10] REN Y X, WANG Z, LIAO P C. 400-Gbit/s free-space optical communications link over 120-meter using multiplexing of 4 collocated orbital-angular-momentum beams[A]. Optical Fiber Communication Conference[C]. Los Angeles, California United States, 2015.
- [11] LI L, XIE G D, REN Y X. Performance enhancement of an orbital-angular-momentum-based free-space optical communication link through beam divergence controlling[A]. Optical Fiber Communication Conference[C]. Los Angeles, California United States, 2015.
- [12] TAMBURINI F, MARI E, SPONSELLI A, *et al.* Encoding many channels on the same frequency through radio vorticity: first experimental test[J]. New Journal of Physics, 2012, 14: 033001.
- [13] MARI E, SPINELLO F, OLDONI M, *et al.* Near-field experimental verification of separation of OAM channels[J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2014, 14: 556-558.
- [14] YAN Y, XIE G, LAVERY M P J, *et al.* High-capacity millimetre-wave communications with orbital angular momentum multiplexing[J]. Nature Communications, 2014, 5: 4876.
- [15] ZHAO Z J, LIAO R, LYKE S D. Direct detection free-space optical communications through atmospheric turbulence[A]. Aerospace Conference[C]. 2010. 1-9.
- [16] 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.
- [17] RODENBURG B, LAVERY M P J, MALIK M. Influence of atmospheric turbulence on states of light carrying orbital angular momentum[J]. Optics Letters, 2012, 37(17): 3735-3737.
- [18] REN Y X, HUANG H, XIE G D. 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.
- [19] 邹丽, 王宇, 王乐, 等. 大气湍流对轨道角动量态复用系统通信性能的影响[J]. 光子学报, 2014, 43(9): 0901001.
ZOU L, WANG B, WANG L, *et al.* The effects of atmospheric turbulence on the orbital angular momentum-multiplexed system[J]. Acta Photonica Sinica, 2014, 43(9): 0901001.
- [20] DJORDJEVIC I B, ANGUITA J A, VASIC B. Error-correction coded orbital-angular-momentum modulation for FSO channels affected by turbulence[J]. Journal of Lightwave Technology, 2012, 30(17): 2846-2852.

- [21] REN Y X, XIE G D, HUANG H. 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.
- [22] XU Z, GUI C, LI S. Fractional orbital angular momentum (oam) free-space optical communications with atmospheric turbulence assisted by MIMO equalization[A]. *Photonic Networks and Devices[C]*. Optical Society of America, San Diego, California United States, 2014.
- [23] XIE G D, REN Y X, HUANG H. Phase correction for a distorted orbital angular momentum beam using a zernike polynomials based stochastic-parallel-gradient-descent algorithm[J]. *Optics Letters*, 2015, 40(7): 1197-1200.
- [24] 徐宁汉. 利用随机二值纯相位调制重构复杂光场波前[D]. 北京: 清华大学, 2009.
XU N H. The random Value of Two Phase Modulation Reconstruction of Complex Wave Front[D]. Beijing: Tsinghua University, 2009.
- [25] ZHAO S M, LEACH J, GONG L Y, *et al.* Aberration corrections for free-space optical communications in atmosphere turbulence using orbital angular momentum states[J]. *Optics Express*, 2012, 20(1): 452-461.
- [26] FIENUP J R. Phase retrieval algorithms: a comparison[J]. *Applied Optics*, 1982, 21(15): 2758-2769.
- [27] JESACHER A, SCHWAIGHOFER A, FRHAPTER S. Wavefront correction of spatial light modulators using an optical vortex image[J]. *Optics Express*, 2007, 15(9): 5801-5808.
- [28] AUGUITA 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.
- [29] STRASBURG J D, HARPER W W. Impact of atmospheric turbulence on beam propagation[A]. *Proceedings of SPIE[C]*. Bellingham, WA, 2004. 93-102.
- [30] 郭艳, 朱方军, 李宁, 等. MIMO 认知无线网络中的联合收发波束形成算法研究[J]. *通信学报*, 2015, 36(3): 2015065.
GUO Y, ZHU F, LI N, *et al.* Joint transceiver beamforming in MIMO cognitive radio network[J]. *Journal on Communications*, 2015, 36(3): 2015065.

作者简介:



邹丽 (1981-), 女, 江苏南通人, 南京邮电大学博士生, 南通大学讲师, 主要研究方向为自由空间光通信和无线宽带通信技术。



王乐 (1990-), 男, 安徽祁门人, 南京邮电大学博士生, 主要研究方向为自由空间光通信和量子信息处理。



张士兵 (1962-), 男, 江苏海门人, 南通大学教授、博士生导师, 主要研究方向为宽带数字通信、通信信号处理、认知无线电等。



赵生妹 (1968-), 女, 江苏丹徒人, 南京邮电大学教授、博士生导师, 主要研究方向为无线通信与信号处理技术和量子通信技术。