

涡旋光束的自适应光学波前校正技术

高春清, 张世坤, 付时尧, 胡新奇

(北京理工大学 光电学院, 北京 100081)

摘要: 涡旋光束是一种具有螺旋波前的光束, 其特点是其光强分布为环形, 携带有与螺旋波前结构相关的轨道角动量。由于涡旋光束的角量子数可取任意整数, 同时不同角量子数的光束之间相互正交, 因此可提高光通信系统的信道容量。但涡旋光束在自由空间传输时会受到大气湍流的影响, 进而产生波前畸变, 因此需要采用自适应波前校正技术对畸变后的光束进行校正。文中对现有的涡旋光束波前校正技术进行了概述, 重点介绍了笔者课题组提出的应用 GS 相位恢复算法和高斯光束探针相结合对涡旋光束波前畸变校正的技术及应用 SPGD 算法和泽尼克多项式对涡旋光束波前畸变校正的研究工作。

关键词: 自适应光学; 涡旋光束; 波前校正; GS 算法; SPGD 算法

中图分类号: O436 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201746.0201001

Adaptive optics wavefront correction techniques of vortex beams

Gao Chunqing, Zhang Shikun, Fu Shiyao, Hu Xinqi

(School of Opto-Electronics, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

Abstract: Vortex beam is a new kind of beams with helical wavefront. It has an annular intensity distribution, and with orbital angular momentum (OAM) related to the helical wavefront. The OAM state of a vortex beam can be any integer, and vortex beams with different OAM states are mutually orthogonal, which indicates the potential of enlarging the capacity of optical communications. However, when a vortex beam propagates in free space, its wavefront will be distorted by the turbulence of the atmosphere. It is necessary to study how to compensate the wavefront distortion by using adaptive optics system. In this paper, some adaptive optics correction approaches were summarized. Moreover, schemes of correcting distorted vortex beams, which were proposed by our group, were introduced. One scheme was the pre-compensation method by using the GS algorithm and a Gaussian probe beam. The other one was a phase correction method by using a Zernike polynomials-based SPGD algorithm.

Key words: adaptive optics; vortex beam; wavefront correction; GS algorithm; SPGD algorithm

收稿日期: 2016-06-05; 修订日期: 2016-07-10

基金项目: 973 计划(2014CB340004)

作者简介: 高春清(1967-), 男, 教授, 博士生导师, 博士, 主要从事新型激光器件与技术, 光电子信息技术与系统等方面的研究。

Email: gao@bit.edu.cn

0 引言

1992 年,荷兰莱顿大学的 Allen 发现拉盖尔-高斯光束具有轨道角动量(Orbital Angular Momentum, OAM)^[1],这种携带有轨道角动量的光束被称为涡旋光束,因其独特光学特性受到了越来越多的关注。涡旋光束的特点为具有螺旋型相位波前和中空环状的光强分布,相位分布为 $\exp(i\ell\theta)$,每个光子携带 ℓh 的轨道角动量,其中 ℓ 被称为涡旋光束的轨道角量子数或者拓扑荷, θ 为方位角。携带不同轨道角量子数的涡旋光束之间是相互正交的,且 ℓ 在理论上可以取任意整数。涡旋光束角量子数的无限性和正交性使其在光通信等领域有着重要的应用前景^[2-3]。

在自由空间光通信等应用中,由于太阳照射、气象因素、大气压变化等会造成大气局部温度、压强的随机变化,并导致大气折射率的随机变化。当光信号在自由空间光通信系统中传输时,波前会受折射率不均匀的大气的影响,导致光束抖动、光强闪烁及光束扩展等大气湍流效应。对于涡旋光束,大气湍流会引起轨道角动量谱的弥散,造成相邻阶次间发生串扰,增大误码率,降低传输效率,甚至阻断传输系统^[4-5]。因此,通过一定的波前校正技术补偿和校正波前畸变是十分重要的。但是由于涡旋光束特殊的相位和光强分布使得常规的波前校正技术无法实现有效校正,因此需要针对涡旋光束研究新型的波前校正技术。

文中将概述近年来涡旋光束自适应波前校正技术有关研究进展,包括夏克哈特曼法(Shack-Hartmann, S-H)、相位恢复算法(Gerchberg-Saxton, GS)、随即并行梯度下降算法(Stochastic-Parallel-Gradient-Descent, SPGD)等。此外,文中重点介绍了笔者课题组提出的应用 GS 相位恢复算法和高斯光束探针相结合对涡旋光束波前畸变预校正的技术和应用泽尼克多项式和 SPGD 算法结合对涡旋光束波前畸变校正的研究结果。

1 涡旋光束自适应波前校正技术的方法和原理

目前国内外已报道的可用于涡旋光束自适应波前校正技术包括,夏克哈特曼校正法^[6-7]、相位恢复算法^[8-10]、随机并行梯度下降算法^[11-12]等。下面分别予以介绍。

1.1 夏克哈特曼法

夏克哈特曼波前传感器由微透镜阵列和 CCD 相

机组成。入射光场经过微透镜阵列,每个子波前都被微透镜聚焦于 CCD 相机的像面上相应微透镜的焦点处。如果入射光场为理想的平面波,则 CCD 将接收到一个理想的点阵。如果存在波前畸变,不同微透镜的子波前将偏离焦点并且各不相同,通过 CCD 得到每分子波前焦点的偏移量,即可获得畸变信息。

由于涡旋光束存在相位奇点,某些位置的波前不可直接探测。美国南加州大学 2014 年提出了使用探针来检测波前畸变的方法^[6],他们使偏振正交的基模高斯光束和涡旋光束通过 PBS 合束后同轴传输,经过相同的大气湍流。接收端使用 PBS 将光束分离,利用夏克哈特曼波前探测器探测高斯光束的畸变,从而得到相应的涡旋光束波前畸变信息。根据波前补偿算法计算得到校正相位屏,由闭环控制器分别加载到两路光的波前校正器上,实现了高斯光束和涡旋光束的同时校正,他们的实验系统如图 1 所示。

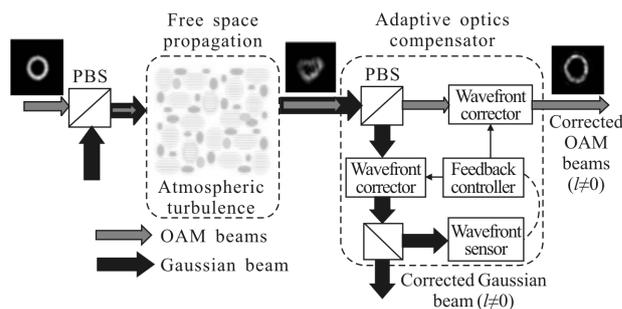


图 1 使用夏克哈特曼法校正涡旋光束波前畸变的实验系统图
Fig.1 Experimental setup to correct the wavefront aberrations of vortex beams by using Shack-Hartmann wavefront sensor

实验结果表明,图 1 所示的校正系统减少了邻近模式间的串扰,降低了功率损失,验证了使用探针结合常规自适应校正方法可以实现涡旋光束的波前校正。但是合束系统和波前探测器的使用导致校正系统较为复杂^[7],使系统应用范围受到限制。

1.2 相位恢复 GS 算法

无波前探测器的校正算法降低了系统复杂性,且在波前无法探测的应用环境中有着其独特的优势。通过间接的光场相位探测方法也可以获得相位畸变信息。GS 相位恢复算法就是通过输入、输出平面的光场光强分布来得到所需的相位分布的^[8]。图 2 是 GS 相位恢复算法的仿真实验原理图^[9]。图中空间光调制器(Spatial Light Modulator, SLM)用于相位调制,其中 SLM1 加载螺旋相位片,其作用是将基模高斯

光束转化为涡旋光束;SLM2 加载大气湍流仿真相位屏,用于模拟大气湍流;利用 CCD 相机捕获光场光强分布,根据 GS 算法进行迭代计算,获得波前重构相位屏;SLM3 作为波前校正器加载重构相位屏,进行畸变补偿,实现涡旋光束的波前校正。接收端使用 OAM 解复用和接收器检验和分析校正效果。

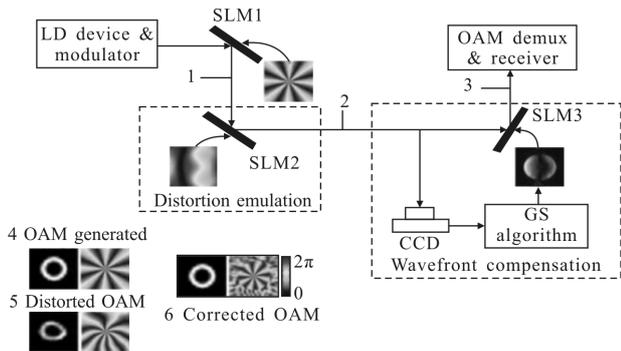


图 2 使用相位恢复 GS 算法校正涡旋光束波前畸变

Fig.2 Experimental setup to compensate the wavefront aberrations of vortex beams by using GS algorithm based phase retrieval

GS 相位恢复算法是一种迭代算法,能较快地收敛于一个最优解。实验结果表明,相同条件下,相位恢复算法相对于夏克哈特曼波前校正法校正效果更好^[10]。但是 GS 算法是一种局部优化算法,有可能收敛于局部的最优解,得不到需要的校正效果,可以通过选择良好的初始相位改善其收敛结果。

1.3 基于泽尼克多项式的 SPGD 算法

SPGD 算法效率高、速度快、实用性强,有着良好的应用背景。与 GS 算法一样,SPGD 算法也是无波前传感器自适应光学优化算法,其关键技术包括性能指标评价函数和迭代方法。其中性能指标评价函数是为了评价校正效果的好坏。传统的评价函数有斯特列尔比 (Strehl Ratio, SR)、光学传递函数 (Optical Transfer Function, OTF)、像清晰度函数等。研究表明,涡旋光束的模式纯净度,与校正后远场光强分布的相关系数有关,且满足单调关系,即光强分布的相关性越大,残余畸变越小,模式纯净度越高^[11]。因此,可以将光强分布的相关系数作为 SPGD 校正算法的性能指标。SPGD 算法的校正原理如图 3 所示^[12-13]。首先应用 CCD 相机采集并保存无大气湍流时理想的光强信号 $I_0(x, y)$,然后加载大气湍流后再用 CCD 相机采集畸变波前对应的光强信号 $I(x, y)$,系统根据随机并行梯度下降控制算法计算出性能指标变化量,进行梯度估计,以迭代

方式在梯度下降方向上进行控制参数搜索,进入下一个控制循环。图 3 的系统以上述迭代方式对波前校正器进行控制,校正畸变像相差,最终得到接近衍射极限的理想涡旋光束图样。

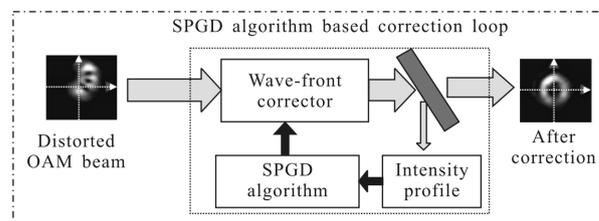


图 3 使用随机并行梯度下降算法校正涡旋光束实验系统图

Fig.3 Experimental setup to compensate the wavefront aberrations of vortex beams by using stochastic parallel gradient descent algorithm

与常规自适应光学系统相比,该算法无需波前探测器和探针光束,降低了系统复杂性。同时,收敛速度和校正效果优于其他算法,可应用于实时校正系统。但同样存在局部极值的问题,对于强湍流无法进行有效校正。

1.4 利用数字信号处理方法进行校正

前面介绍的波前畸变校正方法都是利用光学的方法实现校正的,2014 年美国南加州大学提出了将光学装置的复杂度转移到电学的校正方法,他们使用数字信号处理的方法减轻了信道间的串扰^[14]。如图 4 所示,单路和多路复用的涡旋光束在经过大气湍流后会产生串扰,应用 MIMO 均衡补偿器可以有

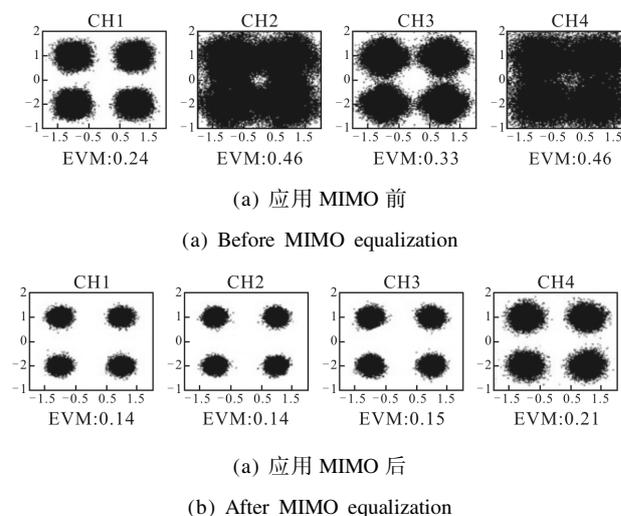


图 4 应用 MIMO 均衡器降低码间串扰的实验结果

Fig.4 Experimental results to restrain the inter-channel crosstalk by using MIMO equalization

效抑制码间串扰,提高信号质量,降低误码率。但是,在强湍流状态下,涡旋光束大部分能量可能转移到其他轨道角动量态,此时 MIMO 均衡器对于提高系统性能不再有帮助。

2 结合探针光束和 GS 相位恢复算法对涡旋光束波前畸变校正的技术

在现有涡旋光束自适应波前校正技术的基础上,笔者课题组提出了一种应用 GS 相位恢复算法和高斯光束探针相结合对涡旋光束波前畸变进行预校正的技术^[15],校正原理如图 5 所示。

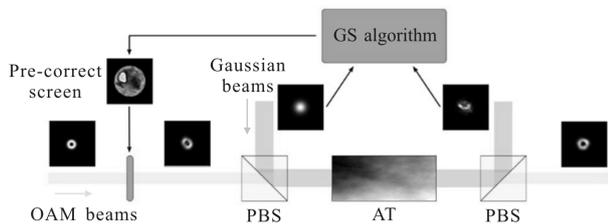


图 5 基于高斯光束探针和 GS 算法的涡旋光束预校正方法

Fig.5 Pre-turbulence compensation method based on a probe beam and the GS algorithm

所谓预校正,就是在经过湍流之前就加载预校正相位屏,可以理解为先引入“校正”导致的畸变,再使用大气湍流来“补偿”畸变。采用基模高斯光束作为“探针”和涡旋光束同轴传输的方式进行实验,高斯光束和涡旋光束的波前具有相同的大气湍流畸变。高斯光束的光斑直径大于涡旋光束的光斑直径;基模高斯光束与涡旋光束通过 PBS 来进行合束与分束;GS 相位恢复算法校正的是基模高斯光束的相位畸变,得到的重构相位同时作用于涡旋光束,实现校正。

GS 相位恢复算法流程如图 6 所示。具有平面相

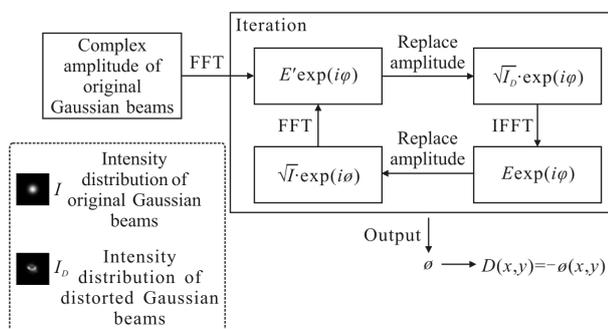


图 6 通过 GS 算法计算预校正相位屏的算法流程图

Fig.6 Flow chart of computing the pre-compensation phase screen by using the GS algorithm

位的高斯光束的复振幅作为输入参数,经过傅里叶变换得到光场分布,之后用畸变的高斯光束的振幅替代,并做反傅里叶变换,得到衍射平面的复振幅,再用原高斯光束振幅替换进行傅里叶变换。经过反复迭代计算,得到相位分布,预校正相位屏就是其相反相位。

在 Fried 常数 $r_0=1.4\text{ mm}$ 的湍流强度下,利用该系统进行校正,通过 CCD 相机采集原始光强分布、经过湍流后光强分布以及经过湍流和校正后的光强分布,可以看到不论高斯探针光束、单模涡旋光束还是多模复用的涡旋光束,都可以实现有效的自适应波前校正,实验结果如图 7 所示。

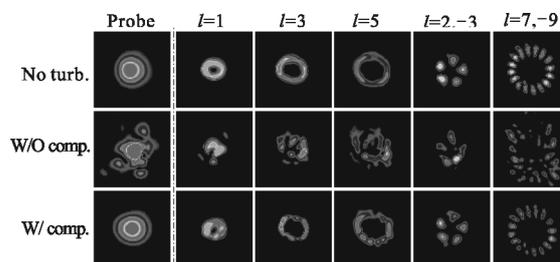


图 7 各种阶次涡旋光束校正前后光强分布图

Fig.7 Intensity patterns of probe Gaussian beams and various OAM beams

为了进一步验证校正效果,笔者对校正后的涡旋光束加载阶次相反的螺旋相位片,可得到基模高斯光束。利用功率计探测校正过程中功率变化情况,其归一化功率强度与迭代次数的关系如图 8 所示。由此可以看到对于单模涡旋光束,校正迭代次数在 70 次就可以达到较为理想的校正效果,归一化功率值恢复到畸变前的 90% 以上。

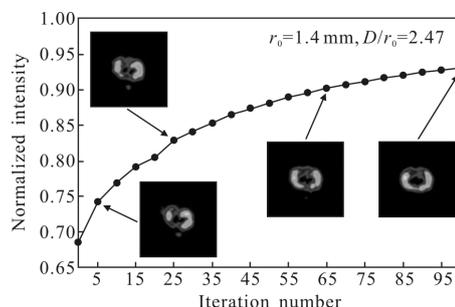


图 8 归一化功率强度与算法迭代次数关系

Fig.8 Curve to show the received normalization power for the OAM mode as a function of the algorithm's iteration number

与现有的 GS 算法仅能实现单模涡旋光束的校正相比,该方法能够实现多模涡旋光束校正,且不需

要波前探测器来获得波前畸变情况,而根据 CCD 相机采集的光强信息进行分析,同时也为无探针相位恢复算法实现涡旋光束校正奠定了基础。该方法除了可用于拉盖尔-高斯光束的波前校正外,也适用于贝塞尔-高斯光束的校正,为涡旋光束在光信息领域中的应用提供了支持。

3 应用泽尼克多项式和 SPGD 算法校正涡旋光束波前的仿真研究

笔者课题组建立了自适应光学仿真模型,通过数值仿真的方法分析了基于泽尼克多项式(Zernike polynomials)的 SPGD 算法校正涡旋光束波前畸变的效果。

在实验室条件下,大气湍流通常使用数值模拟的方法来获得,其中一个有效的表达方式是用正交的 Zernike 多项式作为展开基函数表示相位波前^[16-17]。研究表明,使用 Zernike 展开法对符合 Kolmogorov 统计规律的大气湍流畸变波前相位屏进行数值模拟时,产生的相位屏低空间频率成分与理论相符,而高空间频率成分不足,可以通过增加阶数改善^[18]。

相应地,在校正波前畸变的仿真实验中,相互正交的 Zernike 多项式也可以用线性组合的方式模拟校正相位屏,增加大气湍流与畸变校正的相关性,提高收敛速度。校正算法的关键就是快速而准确地确定各阶 Zernike 多项式系数的值。其迭代过程为:各阶系数初始值均为零,此时校正屏为空。每次迭代中,随机生成服从伯努力分布,幅值相等的随机序列作为随机扰动,加载到波前校正器上,得到校正后残余波前的光强信号。系统根据光强信号和 SPGD 算法更新各项系数,进入下一个循环。以此方法不断迭代,最终得到校正相位屏和接近衍射极限的成像效果。

实验中,分别采用了 20 阶 Zernike 多项式和 200 阶 Zernike 多项式模拟低阶和高阶大气湍流相位屏(Fried 常数 $r_0=10\text{ mm}$),使用同样的前 20 阶 Zernike 多项式的线性组合作为校正相位屏实现波前畸变校正。图 9 所示是不同大气湍流仿真条件下,经过 200 次迭代的校正仿真实验结果,其中低阶大气湍流条件下,(a)是原始光强分布,(b)是经过大气传输后光强分布,(c)是校正后的光强分布;高阶大气湍流条件下,(d)是原始光强分布,(e)是经过大气传输后

光强分布,(f)是校正后的光强分布。

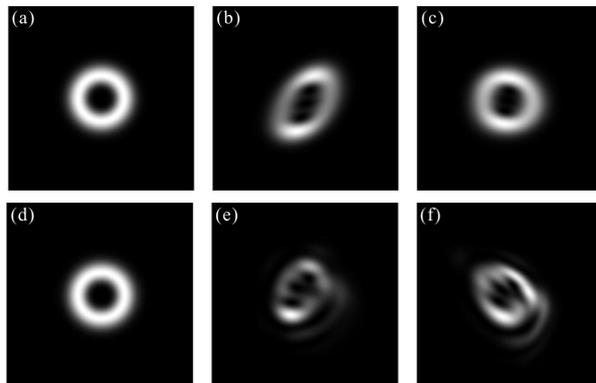


图 9 应用泽尼克多项式和 SPGD 算法校正涡旋光束
Fig.9 Experimental results of correction of wavefront aberrations of vortex beams by using Zernike polynomial and SPGD algorithm

实验结果表明,如系统中仅含有低阶相位畸变,使用低阶数 Zernike 多项式进行校正,可获得较好的收敛速度和校正效果;但是当含有高阶分量较多或湍流强度较大时,使用低阶数 Zernike 多项式校正效果有限,增大阶数可以优化校正效果,但是会损失收敛速度上的优势。

4 结论

文中对近年来涡旋光束自适应波前校正方面的研究进行了分析,其中夏克哈特曼法可以结合常规的波前补偿算法进行校正,但需要使用高斯探针光和波前探测器。无波前的 GS 算法和 SPGD 算法无需波前探测器,收敛速度与校正效果较好,但可能出现局部极值的情况。利用数字信号处理的方法能有效降低码间串扰,但仅能应用在弱湍流情况下。文中介绍了笔者提出的应用高斯探针光束和 GS 算法相结合的预校正技术,以及应用 Zernike 多项式和 SPGD 算法进行校正的方法并通过实验进行了验证。总的来说,这些方法均很好的实现了涡旋光束的自适应波前校正,对涡旋光束在信息领域中的应用具有重要的意义。

参考文献:

[1] Allen L, Beijersbergen M W, Spreeuw R J C, et al. Orbital angular momentum of light and transformation of Laguerre-Gaussian laser modes[J]. *Phys Rev A*, 1992, 45: 8185-8189.
[2] Wang J, Yang J Y, Fazal I M, et al. Terabit free-space data

- transmission employing orbital angular momentum multiplexing [J]. *Nature Photonics*, 2012, 6: 488–496.
- [3] 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.
- [4] Ren Yongxiong, Huang Hao, Xie Guodong, et al. Atmospheric turbulence effects on the performance of a free space optical link employing orbital angular momentum multiplexing[J]. *Opt Lett*, 2013, 38: 4062–4065.
- [5] Malik Mehul, Sullivan Malcolm, Rodenburg Brandon, et al. Influence of atmospheric turbulence on optical communications using orbital angular momentum for encoding[J]. *Opt Express*, 2012, 20: 13195–13200.
- [6] Ren Yongxiong, Xie Guodong, Huang Hao, et al. Adaptive optics compensation of multiple orbital angular momentum beams propagating through emulated atmospheric turbulence [J]. *Opt Lett*, 2014, 39: 2845–2848.
- [7] Li Shuhui, Wang Jian. Compensation of a distorted N-fold orbital angular momentum multicasting link using adaptive optics[J]. *Opt Lett*, 2016, 41(7): 1482–1485.
- [8] Gerchberg R W, Saxton W O. A practical algorithm for the determination of phase from image and diffraction plane pictures[J]. *Optik*, 1972, 35(2): 237–250.
- [9] Ren Yongxiong, Huang Hao, Yang Jengyuan, et al. Correction of phase distortion of an OAM mode using GS algorithm based phase retrieval[C]//Conference on Lasers and Electro-Optics, 2012: 1–2.
- [10] 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]. *Opt Express*, 2012, 20(1): 452–461.
- [11] Huang Hao, Ren Yongxiong, Yan Yan, et al. Phase-shift interference-based wavefront characterization for orbital angular momentum modes[J]. *Opt Lett*, 2013, 38: 2348–2350.
- [12] Xie Guodong, Ren Yongxiong, Huang Hao, et al. Phase correction for a distorted orbital angular momentum beam using a zernike polynomials-based stochastic-parallel-gradient-descent algorithm [J]. *Opt Lett*, 2015, 40: 1197–1200.
- [13] Xie Guodong, Ren Yongxiong, Huang Hao, et al. Experiment turbulence compensation of 50 –Gbaud/s Orbital-Angular-Momentum QPSK signals using intensity-only based SPGD algorithm[C]//Optical Fiber Communication Conference, 2014.
- [14] Huang Hao, Cao Yinwen, Xie Guodong, et al. Crosstalk mitigation in a free-space orbital angular momentum multiplexed communication link using 4×4 MIMO equalization[J]. *Opt Lett*, 2014, 39(15): 4360–4363.
- [15] Fu Shiyao, Zhang Shiun, Wang Tonglu, et al. Pre-turbulence compensation of orbital angular momentum beams based on a probe and the Gerchberg-Saxton algorithm [J]. *Opt Lett*, 2016, 41(14): 3185–3188.
- [16] Noll R J. Zernike polynomials and atmospheric turbulence[J]. *J Opt SocAm*, 1976, 66(3): 207–211.
- [17] Nicolas Roddier. Atmospheric wavefront simulation using Zernike polynomials[J]. *Opt Eng*, 1990, 29(10): 1174–1180.
- [18] Zhang Huimin, Li Xinyang. Numerical simulation of wavefront phase screen distorted by atmospheric turbulence [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2006, 33(1): 14–19. (in Chinese)
- 张慧敏, 李新阳. 大气湍流畸变相位屏的数值模拟方法研究[J]. *光电工程*, 2006, 33(1): 14–19.