

星地链路空间光至单模光纤耦合效率补偿特性研究

杨清波,曹开锐,赵生,谭立英,马晶,于思源

(哈尔滨工业大学 可调谐激光技术国家级重点实验室,黑龙江 哈尔滨 150001)

摘要: 在入射光瞳面处针对星地激光链路中空间光至单模光纤耦合效率补偿特性进行了研究,依据星地下行链路特点,对星地下行链路光纤耦合效率模型进行分析。在此基础上,利用基于单模光纤后向传输模场为加权函数的加权孔径正交多项式,建立光纤耦合接收系统波前相位模式补偿理论模型,运用该理论模型,通过数值模拟对波前相位进行模式补偿,给出波前相位模式补偿下平均光纤耦合效率与接收孔径尺寸和相位补偿项数的变化关系,以及典型接收孔径下采取一定项数的波前相位补偿后光纤耦合效率概率分布,为基于光纤耦合接收方式的星地激光通信链路波前补偿系统设计提供一定理论参考。

关键词: 星地下行激光通信; 单模光纤耦合效率; 大气湍流; 波前相位模式补偿

中图分类号: TN929.13 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2015)09-2789-06

Research on compensation characteristic of coupling efficiency from space to single-mode fiber in the satellite-to-ground link

Yang Qingbo, Cao Kairui, Zhao Sheng, Tan Liying, Ma Jing, Yu Siyuan

(National Key Laboratory of Tunable Laser Technology, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

Abstract: Compensation characteristic of coupling efficiency in process of coupling space light into single-mode fiber was studied in the satellite-to-ground link. According to satellite-to-ground link feature, coupling efficiency model was analyzed. Wavefront phase modal compensation model using orthonormal polynomials on pupil weighted by the backpropagated fiber mode field was built. Based on this model, the relation between average fiber coupling efficiency and received aperture diameter or phase modal term compensated was obtained by numerical simulation. The probability distribution of coupling efficiency was given for typical received aperture by using different term modal compensation. The research work can offer a useful reference for compensation system design of satellite-to-ground optical communication based fiber coupling way.

Key words: satellite-to-ground downlink optical communication; single-mode fiber coupling efficiency; atmospheric turbulence; wavefront phase modal compensation

收稿日期:2015-01-13; 修订日期:2015-02-03

基金项目:国家自然科学基金(10374023)

作者简介:杨清波(1980-),男,讲师,博士,主要从事卫星光通信技术等方面的研究。Email:yangqingbo@hit.edu.cn

0 引言

为提高卫星光通信系统通信速率和探测灵敏度,采用地面光纤通信成熟的光放大器和波分复用技术成为一种潜在的选择。在如此的系统中,耦合空间光至单模光纤成为首先要解决的技术问题。星地下行激光链路系统中,信号光从卫星到地面的传输过程中受到大气湍流的影响,使得接收到的信号光的空间相干性受到破坏,降低了聚焦光场与单模光纤模场的匹配程度,直接的后果是带来耦合损耗,影响系统的通信质量。

国内外已有大量文献对空间光至单模光纤的耦合效率以及自适应光学校正下耦合效率的改善情况进行了理论和实验研究^[1-7]。参考文献[1-2]基于入射光场的互相关函数给出了大气湍流存在时空光至单模光纤平均耦合效率的表达式。由于星地激光通信系统的性能通常与光纤耦合效率呈非线性关系,长时的平均光纤耦合效率并无法充分衡量基于光纤耦合结构的高速星地激光通信系统性能,参考文献[7]通过数值模拟方法给出了光纤耦合效率的概率分布。为提高湍流条件下光纤耦合效率,参考文献[4-6]对自适应光学补偿特性进行了理论和实验研究。

利用自适应光学系统对波前相位进行补偿,Zernike 多项式常被作为相位复原的基函数。由于单模光纤耦合系统中的接收孔径是加权孔径,其加权函数为单模光纤后向传输模场,Zernike 多项式不再具有正交特性,不能为波前校正器提供准确的相位参考信息^[8],不便于对大气湍流影响下系统通信性能分析。

文中将根据星地下行链路特点,对星地下行链路光纤耦合效率模型进行分析。在此基础上,利用基于单模光纤后向传输模场为加权函数的加权孔径正交多项式,建立光纤耦合接收系统波前相位模式补偿理论模型,通过数值模拟给出波前相位模式补偿条件下的平均光纤耦合效率以及光纤耦合效率概率分布。

1 星地下行链路大气湍流条件下光纤耦合效率分析

理想平行光经大气湍流传输后波前相位随机起

伏,波前畸变的入射光束进入接收光学系统,会聚于放置在接收光学系统后焦面处的单模光纤纤芯表面进行空间光耦合。接收光学系统可以等效为直径为 D 、焦距为 f 的衍射极限薄透镜,如图 1 所示。

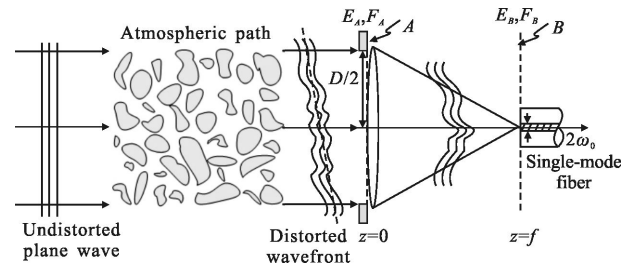


图 1 星地下行链路中空间光到单模光纤耦合示意图

Fig.1 Geometry of coupling space light into single-mode fiber in the satellite-to-ground downlink

星地下行链路中光纤耦合效率可表示为^[9]:

$$\eta_c = \frac{\left| \int_A E_A^*(r) F_A(r) ds \right|^2}{\int_A |E_A(r)|^2 ds \cdot \int_A |F_A(r)|^2 ds} \quad (1)$$

式中: $E_A(r)$ 为光瞳面 A 上入射随机起伏的信号光场; $F_A(r)$ 为单模光纤反向传输到入射光瞳面 A 处的模场,满足归一化条件 $\int_A |F_A(r)|^2 dr = 1$ 。光瞳面上单模光纤后向传输模场分布可表示为^[9]:

$$F_A(r) = \sqrt{\frac{2}{\pi \omega_a^2}} \exp\left(-\frac{r^2}{\omega_a^2}\right) \quad (2)$$

式中: ω_a 为光纤后向传输模场半径; ω_a 与焦平面内单模光纤模场半径 ω_0 具有如下关系^[9]:

$$\omega_a = \frac{\lambda f}{\pi \omega_0} \quad (3)$$

在无湍流情况下,光纤耦合效率可写为^[2] $\eta_c = 2[1 - \exp(-\beta^2)/\beta^2]$,其中 β 为光纤耦合参数,其定义为光瞳半径与光纤后向传输模场半径的比值,即 $\beta = \pi D \omega_0 / 2 \lambda f$,在 $\beta = 1.121$ 时可获得理论最大光纤耦合效率 $\eta_c = 0.8145$ 。

星地下行链路中在光瞳面上的入射光场 $E_A(r)$ 可通过建立光在大气中传输的相位屏方法获得。 $E_A(r)$ 的表达式为:

$$E_A(r) = A(r) \exp[-i\phi(r)] \quad (4)$$

式中: $A(r)$ 和 $\phi(r)$ 分别为经大气湍流传输后的随机起伏入射光场振幅和相位。在长距离的星地下行链路中传输至地面的光斑尺寸通常会达到百米量级,对于米级孔径的接收望远镜来说,可以近似认为是平行光入射。光强闪烁作为入射光场的整体功率变化没有考虑在光纤耦合效率的计算中,因此假定振幅 $A(r)$ 恒等于 1。在光瞳面上入射光场的波前相位畸变函数 $\phi(r)$ 可通过生成波前相位屏的数值模拟方法给出^[7-8]。因此,对于星地下行链路的大气湍流随机光场,主要需要找出湍流产生的畸变波前 $\phi(r)$,可通过单位圆域内的 Zernike 多项式进行展开,可表示为^[8]:

$$\phi(r) = \sum_{j=1}^{\infty} a_j Z_j(r) \quad (5)$$

式中: $Z_j(r)$ 为第 j 项 Zernike 多项式; a_j 为第 j 项 Zernike 多项式的系数。变量 a_j 服从零均值高斯分布,由相位屏尺寸和大气空间相干半径 ρ_c 决定^[8]。对于星地下行链路, ρ_c 可表示为^[10]:

$$\rho_c = (1.45k^2 \int_{h_0}^H C_n^2(h) dh)^{-3/5} \cos^{-3/5}(\zeta) \quad (6)$$

式中: k 为波数; H 为卫星轨道高度; h_0 为地面接收机高度; ζ 为链路天顶角,对于垂直链路有 $\zeta=0$; $C_n^2(h)$ 为高度 h 处的大气折射率结构常数,它是衡量大气湍流起伏强度的一个重要的物理参量。 C_n^2 随高度变化的模型有很多,目前普遍接受的模型为 H-V 5/7 模型,其表达式为^[11]:

$$C_n^2(h) = 0.00594(v/27)^2(10^{-5}h)^{10} \exp(-h/1000) + 2.7 \times 10^{-16} \exp(-h/1500) + A_0 \exp(-h/100) \quad (7)$$

式中: v 为垂直于传输链路的风速,典型值为 21 m/s; A_0 为近地面处的折射率结构常数,典型值为 $1.7 \times 10^{-14} \text{ m}^{-2/3}$ 。

2 光纤耦合系统波前相位模式补偿建模

基于光纤耦合技术接收机中自适应光学系统结构框图如图 2 所示。信号光束的波前在进入接收望远镜前受到大气湍流的扰动而发生畸变,经望远镜传输后投射至波前倾斜校正器和高阶波前校正器,然后传输至光束分束器透射后经透镜聚焦在光纤端面处实现空间光耦合,而经过分束器反射的光束进入波前传感器对畸变的波前进行测量,输出波前畸

变信息送至波前畸变控制计算机进行波前相位重构,计算得到的控制量分别对波前倾斜校正器和高阶波前校正器进行闭环控制。对入射光场波前相位畸变进行校正后,光瞳面上的入射光场 $E_A(r)$ 可以表示为:

$$E_A(r) = A(r) \exp[-i\phi(r) + i\phi_c(r)] \quad (8)$$

式中: $\phi_c(r)$ 为波前校正器生成的共轭相位。

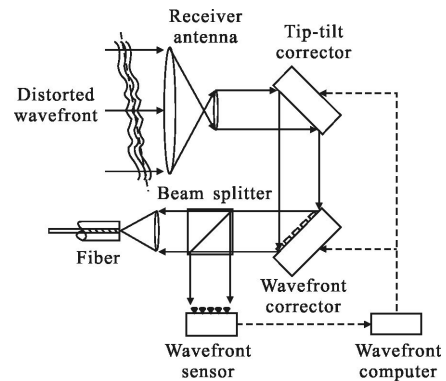


图 2 基于光纤耦合技术接收机中自适应光学系统结构框图

Fig.2 Schematic of adaptive optics system in receiver based on fiber-coupling technology

模式法是目前自适应光学系统中较常用的复原方法,模式法将接收孔径的波前相位用一组正交基函数模式进行线性展开,利用波前传感器得到的测量数据拟合出各模式系数,再对各模式进行线性组合得到全口径的波前相位,通常自适应光学系统的相位复原使用 Zernike 多项式或 Zernike-annular 多项式作为基函数^[12-13]。

然而,对于单模光纤耦合系统,接收孔径是以单模光纤后向传输模场为加权函数的加权孔径。在加权孔径内,Zernike 多项式不再具有正交特性^[14]。

在光纤模场加权孔径内,可利用参考文献[9]给出的转换矩阵,对加权孔径内的正交多项式 G_i 进行求解。耦合系统接收到的波前畸变相位 $\varphi(r, \theta)$ 可通过正交多项式集 $\{G_i\}$ 进行展开。

$$\varphi(r, \theta) = \sum_{i=1}^J b_i G_i \left(\frac{r}{R}, \theta \right) = \sum_{i=1}^J 2\pi c_i G_i \left(\frac{r}{R}, \theta \right) \quad (9)$$

式中: b_i 为正交多项式展开系数,单位为弧度; c_i 为畸变幅度,单位为波长 λ ; J 为正交多项式的展开项数。

表 1 给出了求解得到的耦合参数 $\beta=1.121$ 时,中心无遮挡孔径前 6 项正交多项式的表达式。

表 1 中心无遮挡孔径前 6 项正交多项式表达式

Tab.1 First 6 orthonormal polynomials for central non-obstruction aperture

Term#	Radial degree	Azimuthal frequency	Orthonormal polynomials
1	0	0	1
2	1	1	$2.2414\rho\cos(\theta)$
3	1	1	$2.2414\rho\sin(\theta)$
4	2	0	$\sqrt{3}(2.0784\rho^2-0.8274)$
5	2	2	$\sqrt{6}(1.1893\rho^2)\sin(2\theta)$
6	2	2	$\sqrt{6}(1.1893\rho^2)\cos(2\theta)$

为阐明采用加权孔径内正交多项式和 Zernike 多项式对湍流畸变波前进行模式补偿的差别, 分别利用正交多项式 $\{G_i\}$ 和 Zernike 多项式对一幅大气湍流随机光场的畸变波前相位进行模式展开, 展开后的各项多项式的系数如图 3 所示。

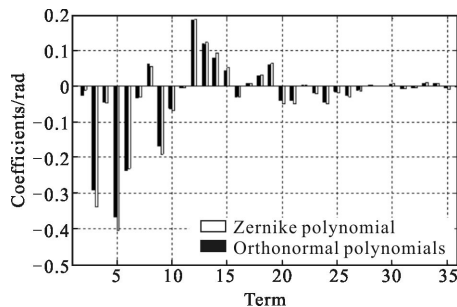


图 3 波前利用正交多项式和 Zernike 多项式进行模式展开后的系数

Fig.3 Coefficients of orthonormal polynomials and Zernike polynomials

从图 3 可以看出, 对畸变的波前相位利用正交多项式和 Zernike 多项式进行模式展开的各项系数随着多项式阶数的增加呈现出振荡减小的趋势, 但利用正交多项式和 Zernike 多项式进行模式展开后的模式系数始终存在一定差异。

3 波前相位模式补偿方式下光纤耦合效率

为衡量采用波前相位模式补偿方式对星地下行光纤耦合系统接收性能的改善作用, 文中通过数值模拟方法获得星地下行链路空间光至单模光纤的平均耦合效率以及耦合效率的概率分布。

为尽量准确模拟星地下行激光链路随机光场波

前畸变相位, 实现充分高的数值模拟精度, 所有的数值模拟均基于 H-V 5/7 模型, 并且模型中的参数 ν 和 A_0 取值分别为 21m/s 和 $1.7\times 10^{-14} \text{ m}^{-2/3}$ 。选取湍流典型的内尺度 1 cm、外尺度 5 m, 卫星轨道高度 $H=38\times 10^3 \text{ km}$, 地面接收机高度 $h_0=10 \text{ m}$, 天顶角 $\zeta=0^\circ$, 考虑的湍流高度为 25 km, 波长 $\lambda=1550 \text{ nm}$ 。

相位屏的整体尺寸和网格尺寸(采样间隔)要尽量合理地与大气湍流的物理尺度相对应。因此, 在模拟中, 相位屏的采样间隔设置成 5 mm, 并使用 1024×1024 的网格采样点。在湍流路径中放置 20 幅二维相位屏, 并且每一幅相位屏包含 496 项 Zernike 多项式。

在光纤耦合效率的数值模拟计算中, 为减少数值模拟带来的不确定性, 每组光纤耦合效率的数值模拟至少运行 3 000 次, 确保数值模拟获得的耦合效率的平均值与理论平均值的差值小于 3%。

选取 10~60 cm 接收孔径的地面望远镜进行研究, 分别进行了前 0(未补偿)、3、6、10、15、21、28 和 36 项的波前相位畸变模式补偿。图 4 给出了不同项数模式补偿后的平均耦合效率随接收孔径的变化关系。

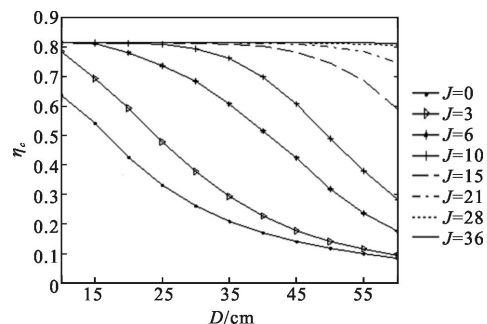


图 4 不同项模式补偿后的平均耦合效率随接收孔径变化曲线

Fig.4 Average coupling efficiencies vs receiving aperture after different terms modal compensation

从图 4 中可以看出, 低阶模式补偿后的平均耦合效率随接收孔径的增大仍明显下降。以采用前 3 项模式补偿为例, 接收孔径增大到接近 60 cm 时, 平均耦合效率与不采用模式补偿获得的耦合效率没有明显提高。随着模式补偿项数的增加, 入射信号光束的波前的空间相干性得到改善, 平均耦合效率得到提高。对于小于 20 cm 的接收孔径, 进行前 10 项模式补偿后, 平均耦合效率已经达到无湍流条件下的理想耦合效率; 随着接收孔径的增大, 期望达到无湍流条件下的理想耦合效率所需要的模式补偿数目明

显增加,对于 60 cm 的接收孔径,需要进行超过 28 项的模式补偿后平均耦合效率才能接近于无湍流条件下的理想耦合效率。

为充分展现波前模式补偿对平均耦合效率的改善效果,图 5 给出了不同孔径下平均耦合效率随波前模式补偿项数的变化关系。可以看出,对于不同尺寸的接收孔径,平均耦合效率随波前模式补偿数目的增加均有不同程度的提高,直至达到无湍流条件下的理想耦合效率。

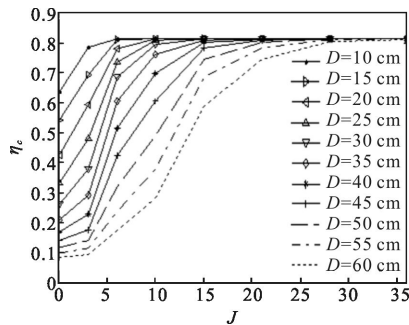


图 5 不同孔径下平均耦合效率随补偿项数的变化曲线
Fig.5 Average coupling efficiencies vs numbers of model compensation term for different receiving apertures

在星地下行激光链路中,系统的通信性能随光纤耦合效率的变化是非线性的,仅仅知道波前相位模式补偿后的平均光纤耦合效率还远远不够,因此有必要获得波前相位模式补偿后光纤耦合效率的概率分布模型,为基于光纤耦合的星地下行自差相干激光通信系统的性能分析提供依据。

图 6 分别给出了 60 cm 的接收孔径下,对波前相位进行前 0 (未补偿)、3、6、10、15、21、28 和 36 项模式补偿后的耦合效率概率分布直方图,图中的曲线为其平滑曲线。

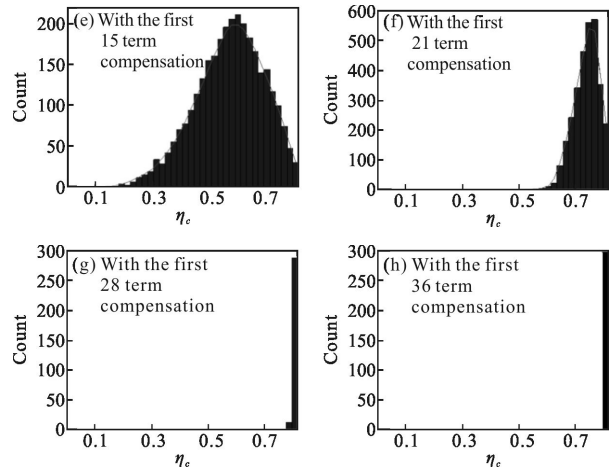
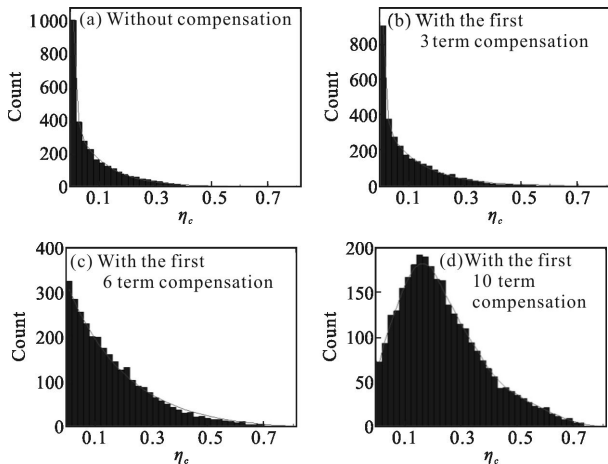


图 6 不同项数模式补偿后光纤耦合效率统计分布直方图和平滑曲线

Fig.6 Histograms of coupling efficiency and smoothing curve after different terms modal compensation

从图 6 中可以看出,进行 0、3 和 6 项模式补偿后耦合效率概率分布直方图随耦合效率均具有单调下降的趋势,但随模式补偿项数的增加趋势逐渐变缓;而进行 10、15 和 21 项模式补偿后,耦合效率概率分布直方图的峰值逐渐向 0.8145 接近,平均耦合效率逐渐增大;进行 28 项以上模式补偿后,耦合效率基本上达到无湍流下耦合效率的最大值 0.8145。

4 结 论

文中针对星地下行激光通信链路中空间光至单模光纤耦合效率补偿特性进行了研究。建立了利用光纤模场加权孔径内的正交多项式进行波前相位畸变模式补偿的光纤耦合接收系统模型。通过对星地下行光场相位畸变进行波前模式补偿的数值模拟分析,给出了地面终端波前相位模式补偿下平均光纤耦合效率与接收孔径和相位补偿项数的变化关系。给出了地面 60 cm 接收孔径下,采取不同项数模式补偿后的光纤耦合效率概率分布直方图,结果表明,进行 0、3 和 6 项模式补偿后耦合效率概率分布直方图随耦合效率均具有单调下降的趋势,但随模式补偿项数的增加趋势逐渐变缓;而进行 10、15 和 21 项模式补偿后,耦合效率概率分布直方图的峰值逐渐向 0.8145 接近,进行 28 项以上模式补偿后,耦合效率基本上达到无湍流下耦合效率的最大值 0.8145。所得结论对基于光纤耦合接收方式的星地激光通信

链路波前补偿系统设计提供一定理论参考。

参考文献:

- [1] Winze P J, Leeb W R. Fiber coupling efficiency for random light and its applications to lidar [J]. *Optics Letters*, 1998, 23: 986–988.
- [2] Dikmelik Y, Davidson F M. Fiber-coupling efficiency for free-space optical communication through atmospheric turbulence[J]. *Applied Optics*, 2005, 44(23): 4946–4952.
- [3] Ruilier C, Cassaing F. Coupling of large telescopes and single-mode waveguides: application to stellar interferometry [J]. *J Opt Soc Am A*, 2001, 18(1): 143–149.
- [4] Weyrauch T, Vorontsov M A, Gowens J W, et al. Fiber coupling with adaptive optics for free-space optical communication[C]//SPIE, 2002, 4489: 177–184.
- [5] Xiong Zhun, Ai Yong, Shan Xin, et al. Fiber coupling efficiency and compensation analysis for free space optical communication [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42(9): 2510–2514. (in Chinese)
熊准, 艾勇, 单欣, 等. 空间光通信光纤耦合效率及补偿分析[J]. *红外与激光工程*, 2013, 42(9): 2510–2514.
- [6] Han Liqiang, Wang Zhibin. Fiber coupling efficiency and Strehl ratio for space optical communication based on adaptive optics correction [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42(1): 125–129. (in Chinese)
- [7] Tan Liying, Yang Qingbo, Yu Siyuan, et al. Statistical distribution of fiber-coupling efficiency in the satellite-to-ground downlink [J]. *Optical Engineering*, 2011, 50(10): 105001–1–105001–4.
- [8] Roddier N. Atmospheric wavefront simulation using Zernike polynomials[J]. *Optical Engineering*, 1990, 29(10): 1174–1180.
- [9] Ma J, Zhao F, Tan L, et al. Plane wave coupling into single-mode fiber in the presence of random angular jitter[J]. *Applied Optics*, 2009(48): 5184–5189.
- [10] Fried D L. Optical heterodyne detection of an atmospherically distorted signal wave front[J]. *IEEE*, 1967, 55(1): 57–67.
- [11] Andrews L C, Phillips R L, Yu P T. Optical scintillations and fade statistics for a satellite–communication system [J]. *Applied Optics*, 1995, 34(33): 7742–7751.
- [12] Dai G. Modal compensation of atmospheric turbulence with the use of Zernike polynomials and Karhunen-Loève functions[J]. *J Opt Soc Am A*, 1995, 12(10): 2182–2193.
- [13] Dai G, Mahajan V N. Zernike annular polynomials and atmospheric turbulence [J]. *J Opt Soc Am A*, 2007, 24(1): 139–155.
- [14] Zhao F, Yu S, Ma J, et al. Orthonormal polynomials in analysis of single-mode fiber coupling[J]. *Opt Comm*, 2011, 284: 207–214.