

文章编号: 1006-4710(2014)03-0326-05

弱湍流状态下空间光-多模光纤耦合效率分析

陈锦妮^{1,2}, 柯熙政¹

(1. 西安理工大学 自动化与信息工程学院, 陕西 西安 710048;

2. 西安工程大学 电子信息学院, 陕西 西安 710048)

摘要: 利用菲涅尔反射和模式耦合理论研究弱湍流条件下的多模光纤耦合效率模型。理论分析入射角起伏、光束漂移情况下多模光纤耦合效率模型, 并通过模式匹配法对空间光-多模光纤耦合效率进行数值分析。理论计算表明: 当光斑轴向偏差 $80\ \mu\text{m}$, 入射角为 $0.45\ \text{mrad}$ 时菲涅尔损耗使多模光纤耦合效率下降到 50% , 各模式中基模耦合效率最高, 随着大气结构常数增大各模式耦合效率明显下降。

关键词: 自由空间光通信; 空间光-多模光纤耦合; 耦合效率; 弱湍流

中图分类号: TP929.12 **文献标志码:** A

Analysis of space optical-multimode fiber coupling efficiency in weak turbulence

CHEN Jinni^{1,2}, KE Xizheng¹

(1. Faculty of Automation and Information Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China;

2. College of Electronic Information, Xi'an Polytechnic University, Xi'an 710048, China)

Abstract: Based on fresnel reflection and mode coupling theory, the coupling efficiency model of light from free space to multimode fiber is specifically derived. In this paper, the author theoretically analyzes the consequential influences to the multimode fiber coupling efficiency model when incident angle fluctuation and beam drift occur. Additionally, numerical analysis of coupling efficiency of light from free space to multimode fiber is carried out by employing mode matching method. The results from theoretical computation indicate that the coupling efficiency is dropped to 50% when axial alignment tolerance is $80\ \mu\text{m}$ and incident angle is $0.45\ \text{mrad}$, the fundamental mode coupling has the highest efficiency in comparison with high order mode, and the coupling efficiency declines dramatically with an increase in atmosphere structure constant.

Key words: FSO; space optical-multimode fiber coupling; coupling efficiency; weak turbulence

近年来,无线激光通信由于既具有微波通信灵活机动的特点,又具有光纤通信码速率高的特点,将成为下一代通信的核心技术。光相干检测可以大大提高系统检测灵敏度而受到国内外关注^[1-3]。空间光通信光相干检测技术常采用两种方法实现, $850\ \text{nm}$ 波段将光信号直接接收到光敏面上与本振光相干,由于大气湍流引起的光斑抖动和到达角起伏使光外差检测增益大大减小^[4-6]; $1\ 550\ \text{nm}$ 波段通常将空间光耦合进单模光纤然后通过掺铒放大器进行

放大后与本振光相干,但是由于空间光耦合效率太低而导致通信误码率上升,严重时可导致通信中断^[7-8]。

大气湍流引起的光强闪烁和光束漂移使光纤耦合系统耦合的光强发生起伏、到达角起伏使光纤端面上的菲涅尔反射光强发生改变严重影响了耦合效率。光信号在自由空间中经长距离传输到达接收端时非常微弱,当湍流引起的起伏较强时可导致严重的通信错误,甚至通信中断^[9]。2006年, Lazzaroni

收稿日期: 2014-05-06

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61377080); 陕西省“13115”科技统筹计划资助项目(2011KTCQ01-31); 陕西省教育厅产业化培育基金资助项目(2010JC17); 西安市科技成果转化基金资助项目(CX12165); 陕西省自然科学基金基础研究计划资助项目(2013JC2-15); 陕西省教育厅科研计划资助项目(14JK1292)。

作者简介: 陈锦妮,女,讲师,博士生,研究方向为大气激光通信技术。E-mail: chenjnpxu@126.com。

柯熙政,男,教授,博导,研究方向为大气激光通信及信号处理。E-mail: xzke@263.net。

M 利用最优化的爱里斑尺寸推导最大耦合效率与随机角抖动的函数关系,假设衰落水平 3dB、衰落概率为 10^{-2} 下允许的随机角抖动应该小于模场半径的 0.164 倍,随机角抖动下平均误码率显著下降超过 0.3^[10]。2011 年,奥地利 Erich Leitgeb 研究了把光锥用在 FSO 接收端来提高空间光耦合效率,通过理论仿真指出使用光锥比透镜的耦合效率更高,但是在实验当中发现光锥的反射角度是得到高耦合效率的关键,并且指出耦合进多模光纤比耦合进单模光纤的效率高得多^[11]。2006 年,向劲松等人根据弱湍流理论,考虑湍流起伏、湍流波前畸变、耦合系统跟踪误差等影响推导空间光到单模光纤平均耦合效率和耦合功率起伏模型,仿真上行和下行平均耦合效率与耦合功率起伏^[12]。2011 年,韩立强^[13]研究了大气湍流中斜程传输情况下单模光纤耦合效率,采用无模型盲优化波前校正技术提高单模光纤耦合效率。但是空间光耦合进单模光纤,由于单模光纤纤芯只有几微米,极大降低了空间光耦合效率。

本文主要分析了湍流状态下光纤耦合系统中多模光纤的耦合效率,分别讨论了在光斑抖动、入射角起伏情况下的耦合效率。激光经过大气信道,到达接收孔径表面的激光可看成多个模式激光的叠加,本文通过模式耦合理论,研究了湍流状态下各个模式的耦合效率,为耦合技术在外差检测中的应用奠定基础。

1 理想条件下的光纤端面菲涅尔反射及耦合效率

空间光经过大气信道到达接收孔径时,光斑会发生光强起伏、光斑漂移、光束扩展等问题,大气湍流对相干检测系统灵敏度影响尤为严重。我们设计的空间光相干检测系统光学接收天线如图 1 所示。

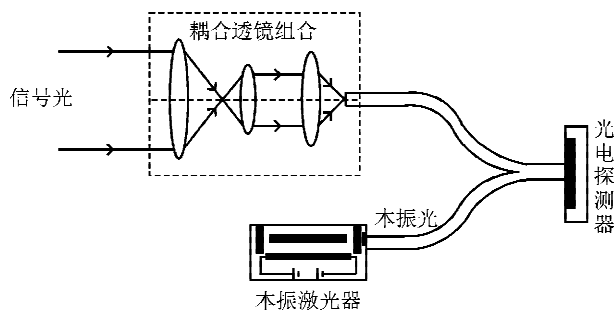


图 1 相干检测接收端光学接收天线
Fig. 1 Optical receiving antenna
of coherent detection system

在接收端通过耦合透镜组对空间光进行聚焦耦合进多模光纤中。对于耦合系统,信号光经过透镜

组进行耦合后,焦点处的光束束腰半径应该小于多模光纤纤芯半径,并且光束的发散角小于光纤的数值孔径。要达到高的耦合效率,光纤耦合系统应该保证聚焦透镜和多模光纤同轴。多模光纤端面上存在菲涅尔反射,理想条件下主要考虑菲涅尔反射对耦合效率的影响。

无线激光通信系统发送端用基带信号调制半导体激光器,通过马克苏托夫-卡塞格林望远镜发出空心高斯光束到大气信道。在大气信道光束经过远距离传输会出现自聚焦现象,到达接收端的光束可近似为高斯光束,当湍流强度大时,会产生光斑破碎。光接收机局部范围内光斑可以近似为平面波。根据菲涅尔反射原理,可分为垂直平面波 s 分量和水平平面波 p 分量。在空气与多模光纤的分界面处会产生菲涅尔反射。本文主要分析 s 分量的耦合效率。

在分界面处 s 分量的反射率为:

$$R_s = \left[\frac{n_1 \cos \varphi_1 - \sqrt{n_0^2 - n_1^2 \sin^2 \varphi_1}}{n_1 \cos \varphi_1 + \sqrt{n_0^2 - n_1^2 \sin^2 \varphi_1}} \right]^2 \quad (1)$$

式中, n_1 为空气折射率, n_0 为光纤纤芯折射率, φ 为光波的入射角, φ_0 为光波的折射角。

在光纤纤芯表面,根据对称性,可以推导出 s 分量反射损耗率 δ_s 为:

$$\delta_s = \frac{4}{\pi \omega^2} \int_0^\theta \left[\frac{n_1 \cos \varphi_1 - \sqrt{n_0^2 - n_1^2 \sin^2 \varphi_1}}{n_1 \cos \varphi_1 + \sqrt{n_0^2 - n_1^2 \sin^2 \varphi_1}} \right]^2 \times \sqrt{\omega^2 - f^2 \tan^2 \varphi} \frac{f}{\cos \varphi} d\varphi \quad (2)$$

式中, ω 为耦合透镜表面激光光束半径, f 为耦合透镜焦距。

在理想情况下,入射光在接收端耦合透镜表面处局部范围内可认为是理想平面波,经过耦合透镜组在后焦面上形成爱里斑。理想情况下的 s 分量耦合效率为:

$$\eta = 1 - \delta_s \quad (3)$$

大气湍流强度的起伏导致信号光幅度和相位的随机起伏。大气湍流引起的到达角起伏使菲涅尔反射产生的反射损耗率产生起伏,使耦合进光纤的光功率产生起伏。

由于折射率起伏引起的光斑漂移和光强闪烁引起聚焦光斑抖动。当纤芯面上的光斑面积小于纤芯面积,这时由于入射角 i 发生变化,光斑会在纤芯面移动。

因 i 较小,光斑可近似认为是半径 $R = \Delta x w / f$ 的圆形光斑。由上面的分析,可以进一步推导出入射角起伏时 s 分量的反射能量 W_r 为:

$$W_r = \int_{\theta_1}^{\theta_2} \bar{W} \cdot R_s^2 \cdot 2\sqrt{\left(\frac{r \cdot f}{\Delta z}\right)^2 - (f \tan \varphi - f \tan i)^2} \cdot \frac{f}{\cos \varphi} d\varphi + \int_0^{\theta_1} \bar{W} \cdot R_s^2 \cdot 2\sqrt{\omega^2 - (f \tan \varphi - f \tan i)^2} \cdot \frac{f}{\cos \varphi} d\varphi \quad (4)$$

则耦合效率为:

$$\eta = \frac{\bar{W} \cdot S' - W_r}{W_i} \quad (5)$$

式中, \bar{W} 为透镜面上单位面积光能量, W_r 为反射光能量, S' 为纤芯和光斑重叠的面积, W_i 为通过透镜的激光束光功率。

通过对式(2)的数值计算, 得到理想情况下 s 分量耦合效率与透镜表面光束束宽的关系曲线, 如图 2 所示。

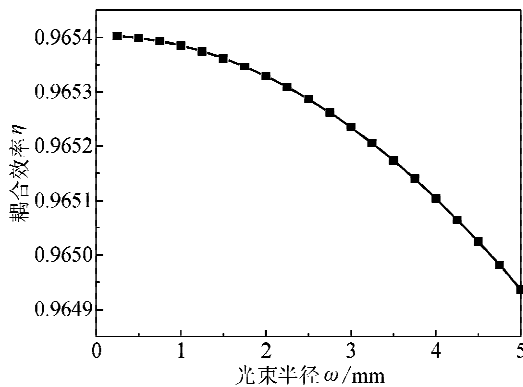


图 2 理想情况下 s 分量耦合效率与束宽的关系
Fig. 2 The relationship between s constituent coupling efficiency and spot radius

设耦合透镜焦距 $f=200$ mm, 纤芯折射率 $n_1=1.475$, 空气折射率 $n_0=1$, 多模光纤纤芯半径 $r=25$ μm 。

由仿真结果可见, 在理想情况下, 水平入射的(信号光) s 分量耦合效率最低可达到 96.49%, 主要的能量损耗是光纤端面上的菲涅尔反射造成的。

通过对式(5)的计算机数值计算, 得到 s 分量耦合效率 η 与入射角度 i 的关系曲线, 如图 3 所示。

当轴向偏差 $\Delta z=80$ μm , 入射角 i 在 $0\sim 0.167$ mrad 之间时, $\eta=95.8\%$ 保持恒定, 而 $\Delta z=90$ μm 、 110 μm 、 120 μm , i 为 $0\sim 0.128$ mrad、 0.066 mrad、 0.0187 mrad 时 η 几乎不变。

Δz 越小, 入射角 i 在比较大的范围可以保持较高的耦合效率, 所以要尽量减小 Δz , 来减小入射角起伏时造成的光耦合损耗; 当入射角 i 增大到一定值, Δz 值大小对于耦合效率已不再有较大的影响。

当 $\Delta z=80$ μm , 入射角 i 为 0.45 mrad 时耦合效率下降到 50%。

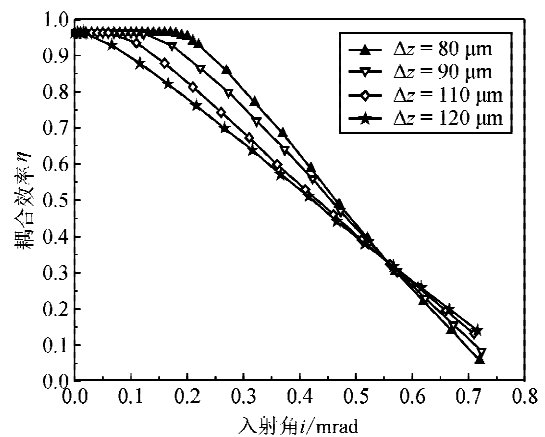


图 3 s 分量耦合效率 η 与入射角度 i 的关系
Fig. 3 The relationship between coupling efficiency η and incident angle i on s

2 湍流状态下空间光-多模光纤的模式耦合

经过大气湍流, 产生了振幅起伏和相位起伏, 在接收孔径平面上的光场分布可表示为:

$$U(x, y) = \sqrt{I_0} \exp(\chi(x, y) + i\phi(x, y)) \quad (6)$$

式中, 实部 $\chi(x, y)$ 为大气湍流引起的对数振幅起伏, 虚部 $\phi(x, y)$ 为相位起伏。经过大气湍流的光束包含多种模式, 还可能存在高阶的高斯光束。本文采用拉盖尔-高斯光束模型表示高阶高斯光束:

$$U_m(r, \theta, z) = C_{nm} \frac{\omega_0}{\omega} \left(\frac{\sqrt{2} r}{\omega(z)}\right)^m L_n^{(m)}\left(\frac{2r^2}{\omega^2(z)}\right) \times \exp[-i(2n+m+1)\varphi(z)] \times \exp\left(ikz + im\theta - \frac{r^2}{\omega^2} - i\frac{kr^2}{2F}\right) \quad (7)$$

$m, n = 0, 1, 2, \dots$

式中, ω_0 为束腰半径, $\omega(z)$ 为与束腰相距为 z 处的光斑半径, $L_n^{(m)}(2r^2/\omega^2(z))$ 为关联拉盖尔多项式。

则接收孔径平面上两点光场的互相干函数可表示为:

$$\Gamma_i(r_1, r_2) = \langle \exp[(\chi_1 + \chi_2) + i(\phi_1 - \phi_2)] \rangle = I_0 \exp\left[-\frac{1}{2}(D_x(\rho) + D_s(\rho))\right] \quad (8)$$

式中, $D_x(\rho)$ 为对数振幅结构函数, $D_s(\rho)$ 为相位结构函数。

本文拟采用高斯光束在接收孔径平面上两点的互相干函数推导多模光纤各个模式耦合效率。在弱湍流下, 高斯光束在接收孔径上的两点光场的互相干函数可以近似^[14]:

$$\Gamma_2(\rho, L) = \frac{W_0^2}{W^2} \exp\left[-1.13(q \wedge)^{5/6} - \dots\right]$$

$$\frac{1}{4} \wedge \left(\frac{k\rho^2}{L} \right) - \frac{3}{8} a \left(\frac{qk\rho^2}{L} \right)^{5/6}]$$

$$l_0 \leq \rho \leq L_0 \quad (9)$$

式中, ρ 为接收孔径上两点之间的距离, 必须小于惯性区域; $q = 1.22(\sigma_R^2)^{6/5}$, 其中 $\sigma_R^2 = 1.23C_n^2 k^{7/6} L^{11/6}$ 为光强对数起伏方差; $\wedge = 2L/(k\omega^2)$; $a = 1 + L/F$, 其中 F 为接收平面波前曲率半径; l_0 为湍流内尺度, L_0 为湍流外尺度。

接收透镜表面多模光纤后向传输模场分布表示为^[15]:

$$U_f(f) = \sqrt{\frac{2}{\pi}} U_{f0} \exp\left(\frac{-r^2}{\omega_f^2}\right) \quad (10)$$

式中, U_{f0} 表示多模光纤的场振幅, $\omega_f = \lambda f / (\pi \omega_a)$, 其中 ω_a 为多模光纤模场半径, f 为耦合透镜焦距, λ 为信号激光波长。

由于高斯激光束经过湍流大气进行传出, 模式发生畸变, 激光束可以看成多个模式的叠加, 所以采用多模光纤进行空间光到光纤的耦合可大大提高耦合效率, 为了理论计算空间光到多模光纤的耦合效率, 按照模式匹配的方法^[16], 有:

$$\eta_{nm} = \frac{\langle P_c \rangle}{\langle P_a \rangle} = \frac{\left\langle \left| \int_A U_i(r) U_f^*(r) dr \right|^2 \right\rangle}{\int_A |U_m(r)|^2 dr} \quad (11)$$

展开上式的平方项, 经过透镜孔径平面, 可推导出湍流状态下各个模式耦合效率为:

$$\eta_{nm} = \frac{\iint_A \Gamma_i(r_1, r_2) U_f^*(r_1) U_f(r_2) dr_1 dr_2}{\int_A |U_m(r)|^2 dr} \quad (12)$$

式中, $\Gamma_i(r_1, r_2)$ 为入射光场的互相关函数。

由于大气湍流对激光中包含的光波模式的影响, 耦合效率应该通过各模式耦合效率的权重来计算:

$$\eta = \sum_{m,n} B_{mn} \eta_{nm} \quad (13)$$

式中, B_{mn} 是经过湍流影响后各个模式耦合效率所占比例, 最后对各个模式耦合效率进行加权平均。

由式(12)可以数值计算出湍流状态下空间光-多模光纤光波各个模式耦合效率的影响因素。

假设多模光纤纤芯半径为 $50 \mu\text{m}$, 数值孔径为 0.2 , 接收孔径为 0.1 m , 传输距离为 1 km , 激光波长为 850 nm 。当 $\sigma_R^2 < 0.3$ 时, $\sigma_R^2 = 1.23C_n^2 k^{7/6} L^{11/6}$, $C_n^2 < 7.475 \times 10^{-15} \text{ m}^{-2/3}$ 考虑为弱湍流。弱湍流状态下, 各个模式耦合效率与激光束宽的关系如图4所示。随着光束半径增加, 各个模式耦合效率迅速下降, 在耦合孔径大小为 0.1 m , 光束半径增加到 0.05

m 时, 各模式耦合效率下降到 20% 左右。

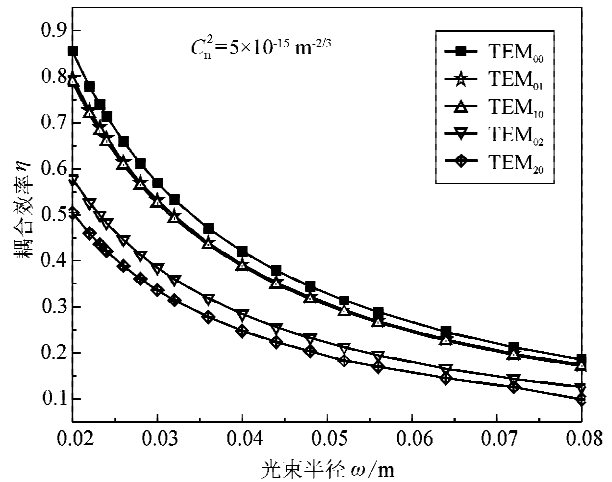


图4 弱湍流情况各模式耦合效率与束宽的关系
Fig. 4 The relationship between coupling efficiency and atmosphere structure constant in each mode under weak turbulence

弱湍流状态下, 大气结构常数对各个模式激光耦合效率的影响如图5所示。

从图5可以看出, 耦合效率在弱湍流情况下随大气折射率结构常数 C_n^2 增大呈下降趋势, 基模 TEM_{00} 模的耦合效率最高, TEM_{01} 模和 TEM_{10} 模耦合效率相似, 耦合效率随大气结构常数增加而下降的速度越来越快, $C_n^2 = 0.4 \times 10^{-14} \text{ m}^{-2/3}$ 时, 各个模式耦合效率降为 10% 左右。

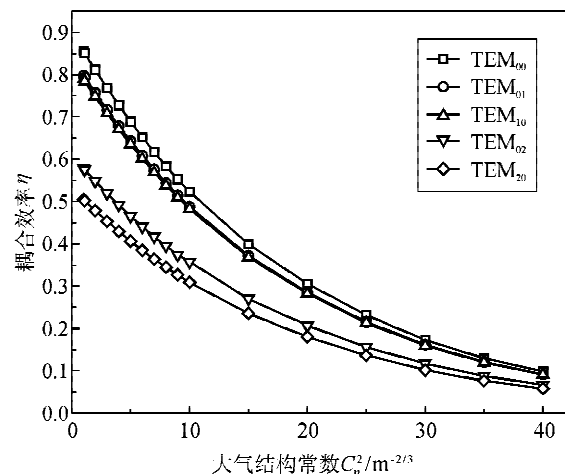


图5 弱湍流下各模式耦合效率与大气结构常数的关系
Fig. 5 The analysis of space optical-multimode fiber coupling efficiency under weak turbulence

3 结语

本文通过菲涅尔反射理论对自由空间光信号到多模光纤的耦合效率进行了讨论, 分析了入射角起伏和光束漂移对多模光纤耦合效率的影响。通过模

式耦合理论推导了多模光纤耦合效率模型。

数值分析结果表明,入射角的起伏和光束漂移以及光纤轴心偏移,都会使耦合效率降低。弱湍流状态下,各模式耦合效率随大气结构常数增加呈下降趋势。随着光束半径增加,各个模式耦合效率迅速下降,在耦合孔径大小为 0.1 m,光束半径增加到 0.05 m 时,各模式耦合效率下降到 20% 左右。由于湍流对空间光耦合效率的影响,可以考虑采用多根光纤耦合,增大耦合面积,提高耦合效率以克服光斑随机抖动产生的耦合功率起伏。

参考文献:

- [1] Michael G T. Phase estimation methods for optical coherent detection using digital signal processing[J]. IEEE Light Wave Technology, 2009, 27: 901-914.
- [2] Lee E J, Chan V W S. Diversity coherent and incoherent receivers for free-space optical communication in the presence and absence of interference[C]//IEEE Optical Communications and Networking, 2009, 5: 463-483.
- [3] 许楠,刘立人,刘德安,等. 自由空间相干光通信技术及其发展[J]. 光通信, 2007, 44(8): 44-51.
Xu Nan, Liu Liren, Liu De'an, et al. Technologies and recent progress of coherent optical communications in free space[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2007, 44(8): 44-51.
- [4] 徐静,毛红敏,甄胜来等. 大气湍流引起激光外差探测空间相干性退化研究[J]. 激光与红外, 2007, 37(12): 1245-1249.
Xu Jing, Mao Hongmin, Zhen Shenglai, et al. The research for the deterioration of spatial coherence of laser heterodyne detection caused by atmospheric turbulence[J]. Laser & Infrared, 2007, 37(12): 1245-1249.
- [5] Holzman J F, Niu Mingbo, Cheng Julian. Diversity reception for coherent free-space optical communications over K-Distributed Atmospheric Turbulence Channels[C]//IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC), 2010, 3: 1-6.
- [6] 杨利红,柯熙政,马冬冬,等. 10.6 μm 激光在沙尘暴中的传输特性研究[J]. 西安理工大学学报, 2009, 25(4): 472-476.
Yang Lihong, Ke Xizheng, Ma Dongdong, et al. Research on 10.6 μm laser transmission characteristics in dust storms[J]. Journal of Xi'an University of Technology, 2009, 25(4): 472-476.
- [7] 覃智祥. 大气湍流对空间光—单模光纤耦合效率影响研究[D]. 哈尔滨工业大学, 2010.
Tan Zhixiang. The Research of the impact of atmospheric turbulence on space light-single mode fiber coupling efficiency[D]. Harbin Institute of Technology, 2010.
- [8] 陈海涛,杨华军,李拓辉等. 光纤偏移对空间光—单模光纤耦合效率的影响[J]. 激光与红外, 2011, 41(01): 75-78.
Chen Haitao, Yang Huajun, Li Tuohui, et al. Influence of fiber displacement on coupling light beam into single-mode fiber[J]. Laser & Infrared, 2011, 41(01): 75-78.
- [9] 王亚萍,胡辽林,张卫强. 分布式光纤光栅传感系统中微弱信号检测研究[J]. 西安理工大学学报, 2013, 29(4): 428-433.
Wang Yaping, Hu Liaolin, Zhang Weichao. Research on weak signal detecting in distributed FBG sensing system[J]. Journal of Xi'an University of Technology, 2013, 29(4): 428-433.
- [10] Lazzaroni M, Zocchi F E. Optical coupling from plane wave to step-index single-mode fiber[J]. Optics Communications, 2004, 237(1-7): 37-43.
- [11] Erich L, Stefan S, Markus L. Using tapers for efficient coupling of received FSO-signals into fibers[C]//Conference Record of 13th International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON), Stockholm, SWEDEN, 2011: 1-6.
- [12] 向劲松,陈彦,胡渝. 大气湍流对空间光耦合至单模光纤的影响[J]. 强激光与粒子束, 2006, 18(3): 377-380.
Xiang Jingsong, Chen Yan, Hu Yu. Influence of coupling free space light beam into single-mode fiber through atmospheric turbulence[J]. High power laser and particle beams, 2006, 18(3): 377-380.
- [13] 韩立强,王祁,信太克归,等. 基于自适应光学补偿的自由空间光通信系统性能研究[J]. 应用光学, 2010, 31(2): 301-303.
Han Liqiang, Wang Qi, Shida Katsunori, et al. Free space optical communication based on adaptive optics compensation[J]. Journal of Applied Optics, 2010, 31(2): 301-303.
- [14] Larry C A, Ronald L P. Laser beam propagation through random media[M]. The International Society for Optical Engineering (SPIE), 2005.
- [15] Ruilier C. A study of degraded light coupling into single-mode fibers[C]//Proceeding of the International Society for Optical Engineering (SPIE), Bellingham Washington, USA, 1998: 319-329.
- [16] Shaklan S, Roddier F. Coupling starlight into single-mode fiber optics[J]. Applied Optics, 1988, 27(11): 2234-2238.

(责任编辑 杨小丽)