

自适应光学对大气激光通信质量的影响研究与仿真

武云云^{1,2} 李新阳¹

(¹ 中国科学院自适应光学重点实验室, 四川 成都 610209)
² 中国科学院研究生院, 北京 100049)

摘要 自适应光学技术是缓解大气激光通信中大气湍流影响的有效途径之一。建立了湍流大气激光通信的系统模型以及误码率(BER)等评价指标模型, 仿真对比了各种湍流强度下发射端自适应光学校正与接收端校正对大气激光通信质量的改善效果。结果表明, 自适应光学可以有效地提高接收端光功率、降低系统误码率。在收发口径为250 mm的情况下, 接收端自适应光学的校正效果要明显优于发射端校正。但是, 发射端校正对光强起伏有一定抑制作用, 而接收端校正则不能有效抑制光强起伏。因此, 从误码率的改善效果看, 发射端自适应光学的作用与接收端自适应光学的作用非常接近。

关键词 大气光学; 大气激光通信; 自适应光学; 大气湍流; 误码率; 光强起伏

中图分类号 TN929.12 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201131.s100212

Research and Simulation about Effect of Adaptive Optics on Atmospheric Optical Communication

Wu Yunyun^{1,2} Li Xinyang¹

(¹ Key Laboratory on Adaptive Optics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu, Sichuan 610209, China)
² Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract Adaptive optics technology is an effective way to alleviate the effect of turbulence on atmospheric optical communication. The atmospheric turbulence optical communication system model and bit-error-rate (BER) evaluation model are established, then the difference between the transmitter adaptive optics(AO) correction and receiver AO correction working in atmospheric optical communication on different turbulence intensities is simulated. The simulation results demonstrate that AO applied in communication is beneficial for increasing the received energy of detector and decreasing the BER. Correction of receiver AO is better than transmitter AO when aperture is 250 mm. However, transmitter AO can control the intensity fluctuation while receiver AO cannot. Therefore, both transmitter AO and receiver AO have the approximate efficacy to improve BER.

Key words atmospheric optics; atmospheric optical communication; adaptive optics; atmospheric turbulence; bit error rate; intensity fluctuation

OCIS codes 060.2605; 010.1330; 010.1080

1 引言

以大气为传输信道的大气激光通信必然受到大气特性的影响。大气湍流引起的大气折射率的随机起伏将严重影响激光光束在大气中的传输特征, 主要引起光束的强度闪烁、光束漂移、扩展和抖动等现

象, 严重地降低了通信质量, 缩短了通信距离。目前, 近距离(2 km 以内)传输的低码率激光通信系统的技术水平已经能够满足一般湍流大气条件下的通信要求。但是, 在长距离(6 km 以上)、高码率近地激光通信链路中, 由于缺乏有效抑制或缓解激光传

收稿日期: 2011-02-28; 收到修改稿日期: 2011-03-14

基金项目: 国家自然科学基金(60978050)和四川省青年科技基金(08ZQ026-053)资助课题。

作者简介: 武云云(1985—), 女, 博士研究生, 主要从事光通信方面的研究。E-mail: wuyunyun_1985@163.com

导师简介: 李新阳(1971—), 男, 研究员, 主要从事自适应光学方面的研究。E-mail: xyli@ioe.ac.cn

输所受大气湍流效应影响的解决技术,系统的可靠性或有效性难于保证。国内外的大气光通信研究人员^[1~5]先后指出,采用自适应光学(AO)技术是缓解湍流大气信道中长距离高码率光通信系统性能的最佳选择方案之一。本文用数值仿真的方法证明自适应光学应用于大气激光通信有利于改善通信系统的误码率(BER),提高通信效率。

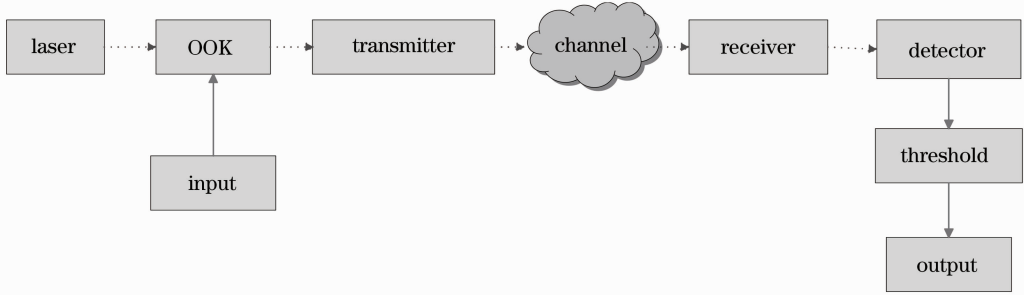


图 1 简单的 IM/DD,OOK 光通信示意图

Fig. 1 Configuration of IM/DD, OOK optical communication system

对于一个受大气湍流信道影响的光强调制的 OOK 通信系统^[6],接收光强 $I_R(r,t)$ 可表示为

$$I_R(r,t) = I_P(r) \sum_{j=-\infty}^{\infty} d_j P(t - jT_s) + I_0, \quad (1)$$

式中 $I_P(r)$ 是发射光束经大气湍流通道的传输和闪烁影响后的光强; $P(t)$ 是一个归一化的非归零码(NRZ)脉冲波形; d_j 是等概率分布的 $\{0, 1\}$ 数字信号; T_s 是每个数字符号的持续时间; I_0 是背景光。

信噪比(SNR)是指接收端输出的信号平均功率与噪声平均功率之比,是评价通信质量的常用手段之一。

误码率是数字通信中非常重要的性能指标。误码率是码元在传输系统中被传错的概率,即错误接收的码元数在传输总码元数中所占的比例。

3 大气湍流信道及自适应光学应用

3.1 湍流信道传输

大气湍流对传输光束的影响表现为光束抖动、强度起伏、光束扩展和像点抖动,其物理本质是湍流引起传输光束波前相位的随机起伏。考虑到这一点,可以将传输路径上的大气湍流等效为简单的相位改变屏。因此可以将整个复杂的传输过程简化为真空传输改变光波振幅,相位屏改变光波的相位。本文采用符合 Kolmogonov 统计规律的大气湍流畸变波前相位屏^[7]。用大气折射率结构常数 C_n^2 ,湍流大气相干长度 r_0 ,表征光强闪烁的 Rytov 指数来说明湍流的强弱。

2 大气光通信的基础知识及评价标准

本文针对大气光通信中最基础的调制方式开关键控(OOK)的光强调制、直接检测(IM/DD)方式开展研究,研究结果也可以扩展到其他光通信调制方式中。其系统结构如图 1 所示,发射机与接收机之间是复杂的大气信道。

Rytov 指数主要作为起伏条件的衡量参数,其对应于弱起伏条件下平面波的归一化光强起伏方差^[8],用 σ_{Rytov}^2 表示为

$$\sigma_{Rytov}^2(z) = 1.23 C_n^2 k^{7/6} z^{11/6}. \quad (2)$$

3.2 自适应光学的应用

本文主要分析和研究了理想自适应光学对光通信系统性能的改善情况,即不考虑自适应光学系统的误差,把自适应光学看成一个理想系统,能完全探测和校正大气湍流引起的动态波前畸变,其具体做法是将信标光获得的波前相位畸变共轭加到需要补偿的光波波前上,使湍流对相位的影响得到完全补偿。下面提到的自适应光学校正除特殊说明外,都是指理想自适应校正。

常规的自适应光学一般分为接收端校正(图 2)和发射端校正(图 3)两种情况。对于大气激光通信来说,接收端的自适应光学校正结构相对简单,在接收端探测湍流引起的畸变相位,用变形镜实时补偿,这样可以提高接收光信号的聚焦效率,提升探测器靶面的接收能量,从而改善通信系统误码率。但是接收端校正只能使有限接收孔径中的能量会聚更

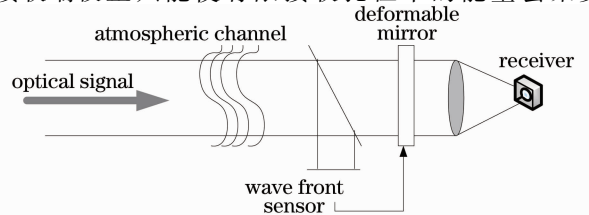


图 2 接收端 AO 校正原理示意图

Fig. 2 Configuration principle of receiver AO correction

好,而对传输过程中扩散到有限接收孔径以外的能量却无能为力。发射端的自适应光学校正则通过信标光的传输探测湍流引起的相位畸变,在发射端补偿了畸变的相位,减少了光束传输过程中的漂移、扩

散,使有限接收孔径中的能量得到提升,也在一定程度上提高了光束的聚焦效率,增加了探测器靶面上的光能量,改善了通信系统误码率。

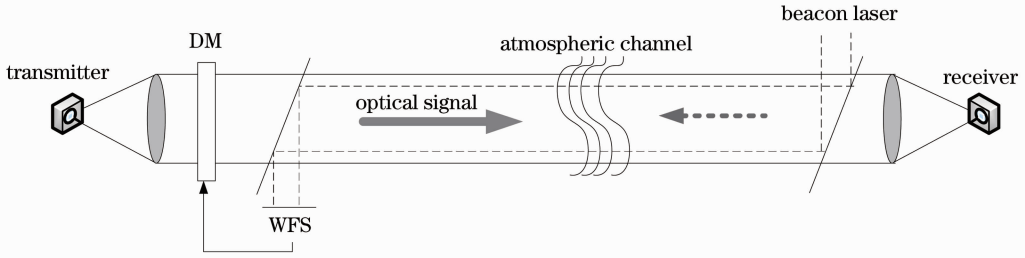


图3 发射端 AO 校正原理示意图

Fig. 3 Configuration principle of transmitter AO correction

4 接收端和发射端自适应光学对大气光通信质量的改善情况的仿真研究

首先认为大气通道中只有湍流造成的损耗,不考虑别的因素造成的损耗。因此下面的仿真中认为光束已经被完全准直。同时假设变形镜是无穷多单元的,即理想校正;假设探测器是理想的,转换效率为 100%;假设通信系统的收发口径完全对准。

本文涉及的数值计算中,关于湍流大气传输的

参数和通信误码率仿真参数设置如表 1 所示。仿真模型中,可通过参数设置计算出光束的衍射极限(DL)约为 9.76 个网格,对应于 $20.74 \mu\text{m}$,这样探测器 16×16 的正方形网格为衍射极限的 1.64 倍,也就是 $34 \mu\text{m} \times 34 \mu\text{m}$ 正方形大小,这是符合现有的光通信器件的要求的。根据长距离光通信系统参数设置原则,选择收发光学系统口径为 250 mm。

表 1 数值仿真参数列表

Table 1 Parameters of numerical simulation

Parameters of atmospheric propagation	Value	Parameters of communication simulation	Value
Wavelength λ /nm	850	Propagation bandwidth /(bit/s)	100
Aperture /mm	250	Sampling frequency /Hz	1000
Grid of availability beam	128×128	Time of turbulence freeze /s	0.01
Grid of phase screen sizes	1024×1024	Size of detector	16×16
Wind speed /(m/s)	2		
Atmospheric refractive index $C_n^2/\text{m}^{-2/3}$	$10^{-16} \sim 10^{-14}$		

一般的,激光通信的传输码率比较高,可以达到每秒几百兆比特甚至是几十千兆比特。但是考虑到仿真数据量的问题,首先仿真了低码率传输时的情况。根据泰勒湍流冻结假设^[9],在某个非常短的时间内大气湍流相对空间结构保持不变,光波传播路径上湍流介质的变化是由横向风的吹动所致。这样可以认为,在湍流冻结时间内,湍流对所经过的光信号的影响是相同的,所以在研究湍流对大气光通信的影响时,可以用低码率传输时的仿真结果来类推高码率时的结果。

假设发射信号光功率一定,经湍流大气传输后,由于大气造成光束漂移、扩散和光强闪烁等,而接收端的有限孔径和探测器的有限靶面必然会使接收端光强有所损耗。下面仿真了收发口径 $D=250 \text{ mm}$

时,各种不同湍流条件下接收端信号功率的损耗情况。主要仿真和分析了未加 AO 补偿、在接收端加 AO 校正以及在发射端加 AO 校正这 3 种情况下接收信号光功率的变化以及误码率的变化。

4.1 AO 校正对平均光功率的改善

首先仿真了收发口径 $D=250 \text{ mm}$ 时,湍流强度由弱到强时引起的光强闪烁和相位畸变以及加入自适应光学前后远场光斑的能量会聚情况。图 4 是传输距离 $L=10 \text{ km}$, $C_n^2=5 \times 10^{-15} \text{ m}^{-2/3}$, $r_0=0.0146 \text{ m}$, $\sigma_{\text{Rytov}}^2=13.6698$ 时得到的光强、相位校正前后的对比图以及校正前后远场光斑的对比图。从图中对比可以看出,未加 AO 校正时,相位畸变严重,远场光斑的峰值平坦,探测器靶面上的能量不集中;经过接收端 AO 校正后,接收端光强分布不变,

但相位畸变得得到完全的补偿,同时远场光斑的会聚性也得到很好的提升;经过发射端 AO 预校正后,光强分布有所变化,相位畸变也得到一定的补偿,此时

远场光斑的会聚性较未校正时得到提升,但是峰值提升的效果没有接收端校正显著。

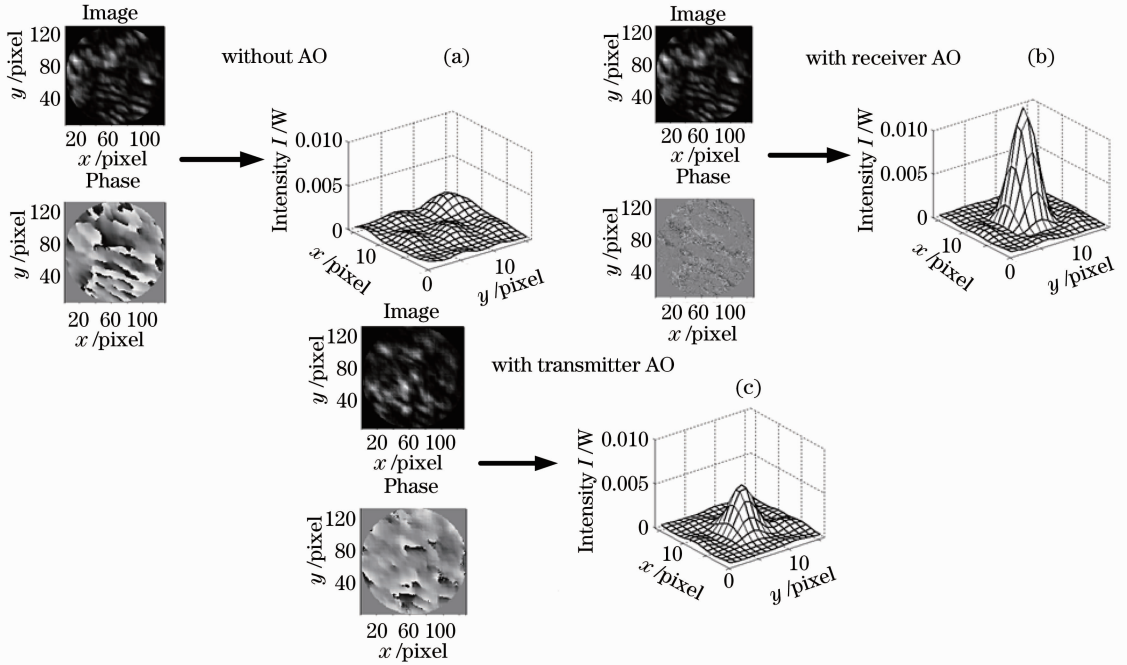


图 4 $D=250$ mm 时光强、相位与远场光斑示意图。(a)未加 AO 校正,(b)接收端 AO 校正,(c)发射端 AO 校正
 Fig. 4 Configuration of intensity, phase and far-field when $D=250$ mm. (a) Without AO, (b) with receiver AO, (c) with transmitter AO

接下来仿真了传输距离为 10 km, C_n^2 在 $1 \times 10^{-16} \sim 5 \times 10^{-15} \text{ m}^{-2/3}$ 之间变化, Rytov 指数在 0.2734~13.6698 之间变化时,自适应光学校正前后探测器靶面上接收能量的变化情况。每个 Rytov 指数下的接收光功率都是计算 10 次取平均值。

从图 5 中可以看出,随着湍流强度的增加, Rytov 指数逐渐增大,接收光功率的损耗也逐渐增加。当 Rytov 指数较大时,由于湍流的影响,接收端光功率损耗严重,而经过自适应光学校正后,接收端光功率均有所提升。也就是说,在相同平均功率的噪声影响下,校正后的系统信噪比得到了提高,通信质量也得到了改善。可以认为,在发射口径 $D=250$ mm 时,发射端和接收端的 AO 校正对提升接收端的信号光功率都有比较好的效果,并且接收端的校正情况要优于发射端校正。当 Rytov 指数较小时,光通信质量受大气湍流影响也不大,所以自适应光学对其改善效果也不如 Rytov 指数大时明显。

4.2 AO 校正对光强起伏的抑制作用

针对收发口径 $D=250$ mm, 传输距离 $L=5$ km, $C_n^2=5 \times 10^{-15} \text{ m}^{-2/3}$, $r_0=0.0221$ m, $\sigma_{\text{Rytov}}=3.8360$, 风速 2 m/s 条件仿真了 500 次校正前后接

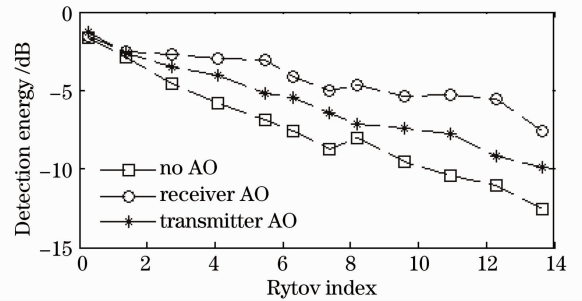


图 5 接收端平均光功率随 Rytov 指数变化曲线
 Fig. 5 Curve of detection energy followed Rytov index

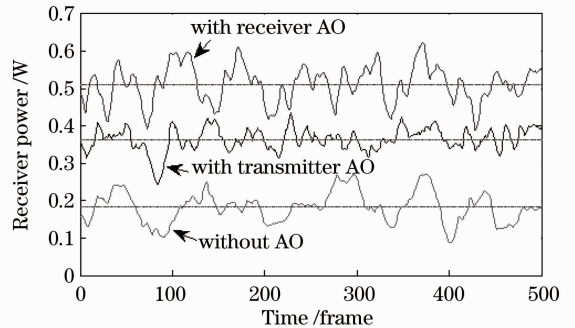


图 6 校正前后接收光功率动态变化图

Fig. 6 Receiver power before and after correction
 收光功率的变化。图 6 为仿真所得到的校正前后探

测靶面上光功率的变化情况图,未加 AO 校正时,接收光强的均值为 0.18,标准差为 0.04;在接收端加 AO 校正后,均值为 0.51,标准差为 0.05,此时尽管平均光强得到了提高,但是光强起伏却有增无减;在发射端加 AO 校正后,均值为 0.36,标准差为 0.03,此时接收的平均光强得到一定提升,光强起伏也有所抑制。在发射端加 AO 校正后平均光功率得到了提高,同时光强起伏也得到了改善。

4.3 误码率的仿真

一个 OOK 非相干解调时系统的误码率^[10]可以表示为

$$P_e = \frac{1}{2} [1 - Q(\sqrt{2r_{SN}}, b_0)] + \frac{1}{2} \exp(-b_0^2/2), \quad (3)$$

式中 b_0 为归一化门限值, r_{SN} 为系统输入信噪比, $Q()$ 为 MarcumQ 函数,定义为

$$Q(\alpha, \beta) = \int_{\beta}^{\infty} t I_0(\alpha t) \exp[-(t^2 + \alpha^2)/2] dt. \quad (4)$$

通过计算,可以得出大信噪比和最佳门限时的误码

率表达式为

$$P_e = \frac{1}{4} f_{\text{erfc}}\left(\frac{\sqrt{r_{SN}}}{2}\right) + \frac{1}{2} \exp(-r_{SN}/4). \quad (5)$$

不考虑光强起伏时,SNR 为光接收机的信号平均功率与噪声平均功率的比值。考虑光强起伏时,SNR 为光接收机的信号平均功率与噪声平均功率和光强起伏方差之和的比值。

从误码率曲线图 7 可以看出,随着湍流强度的增加,Rytov 指数逐渐变大,通信系统的误码率也逐渐增加,但是经过 AO 校正后,系统误码率比未校正时有明显的改善,说明 AO 校正能有效抑制湍流影响,降低通信系统的误码率。不考虑光强起伏时,接收端 AO 校正对误码率的改善效果要明显优于发射端 AO 校正,但是由于接收端校正并不能抑制光强起伏,而发射端校正却能有效抑制光强起伏,所以在考虑光强起伏的影响后,误码率普遍增加了,但此时发射端校正的效果和接收端校正差不多。

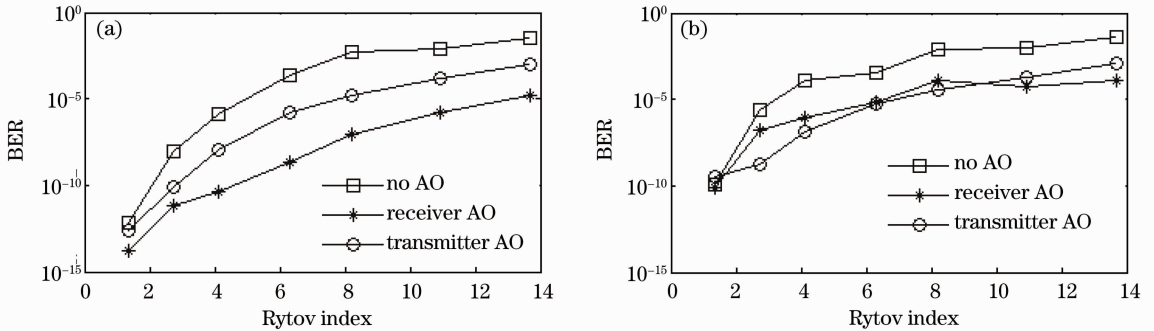


图 7 误码率统计图。(a)不考虑光强起伏,(b)考虑光强起伏

Fig. 7 Statistical figure of BER. (a) Without considering intensity fluctuation, (b) considering intensity fluctuation

5 结 论

总结仿真数据,首先可以看出随着湍流强度的增加,即 Rytov 指数的增加,大气光通信系统的接收光功率逐渐减小,系统误码率也逐渐增加。并且 AO 校正对光通信质量确实是有改善作用的,主要表现在接收端光功率的提升和降低了系统误码率。其次,通过数值仿真证实收发口径 $D=250$ mm 时,接收端 AO 校正在提升光强平均功率上要优于发射端 AO 校正,但是由于发射端 AO 能有效地抑制光强起伏,而接收端 AO 并无此作用,所以,从误码率的改善效果看,发射端 AO 的作用与接收端 AO 作用非常接近。

本文是在收发口径 D 一定时得到的仿真结果。

在后续的研究中,会考虑不同口径和湍流条件下自适应光学对大气光通信质量的影响,并通过实验验证相关结论。

致谢 特别感谢魏伟博士为本文提出的宝贵意见。

参 考 文 献

- 1 R. K. Tyson. Bit-error rate for free-space adaptive optics laser communications[J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 2002, **19**(4): 753~758
- 2 T. Weyrauch, M. A. Vorontsov. Free-space laser communications with adaptive optics: atmospheric compensation experiments[J]. *J. Opt. Fiber. Commun. Rep.*, 2008, **2**: 247~271
- 3 Yang Huizhen, Cai Dongmei, Chen Bo *et al.*. Analysis of adaptive optics techniques without a wave-front sensor and its application in atmospheric laser communications[J]. *Chinese J.*

- Lasers, 2008, **35**(5): 680~684
 杨惠珍, 蔡东梅, 陈 波 等. 无波前传感自适应光学技术及其在大气光通信中的应用[J]. 中国激光, 2008, **35**(5): 680~684
- 4 Li Huan, Zhang Hongtao, Yin Changfu. The adaptive optics technique for atmospheric turbulence in laser communication system[J]. *Journal of Changchun University of Science and Technology (Natural Science Edition)*, 2008, **31**(2): 1~3
 李 欢, 张洪涛, 尹福昌. 空间激光通信系统中大气湍流的自适应补偿方法[J]. 长春理工大学学报(自然科学版), 2008, **31**(2): 1~3
- 5 Wang Jiangan, Zhao Yingjun, Chen Dong *et al.*. Effects of turbulence sizes on the error rate of atmospheric laser communication system [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2009, **38**(4): 655~659
 王江安, 赵英俊, 陈 冬 等. 湍流尺度对大气激光通信系统误码率的影响[J]. 红外与激光工程, 2009, **38**(4): 655~659
- 6 Kalman Kiasaleha. Performance analysis of free-space, on-off-keying optical communication systems impaired by turbulence [C]. *SPIE*, 2002, **4635**: 150~161
- 7 Zhang Huimin, Li Xinyang. Numerical simulation of wavefront phase screen distorted by atmospheric turbulence [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2006, **33**(1): 14~19
 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
- 8 Li Xiaofeng. The Principle and Technology of the Satellite-to-Ground Laser Communication Links [M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2007. 137
 李晓峰. 星地激光通信链路原理与技术[M]. 北京:国防工业出版社, 2007. 137
- 9 Zhou Renzhong, Yan Jixiang. Adaptive Optical Theory [M]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 1996. 98
 周仁忠, 阎吉祥. 自适应光学理论[M]. 北京:北京理工大学出版社, 1996. 98
- 10 Fan Changxin, Zhang Fuyi, Xu Bingxiang *et al.*. Communication Principle [M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2001. 142~147
 樊昌信, 张甫翊, 徐炳祥 等. 通信原理[M]. 北京:国防工业出版社, 2001. 142~147