

# 实际大气中无线光通信的系统差错性能

李 菲<sup>1,2,3</sup> 侯再红<sup>1</sup> 吴 毅<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 中国科学院安徽光学精密机械研究所大气成分与光学重点实验室, 安徽 合肥 230031  
<sup>2</sup> 中国科学技术大学物理学院光学与光学工程系, 安徽 合肥 230026  
<sup>3</sup> 解放军电子工程学院光电系脉冲功率激光技术国家重点实验室, 安徽 合肥 230037

**摘要** 无线光通信(FSO)系统的性能受大气湍流影响会产生剧烈波动。根据系统和大气参数评估系统差错性能的研究具有现实意义。以大气湍流信道和光电探测模型为基础,使用拟合概率分布替换常用的对数正态分布,建立了FSO系统差错性能的数学仿真模型,改进了湍流条件下系统误码率计算公式,并且进行全天的验证实验。实验结果显示,光强概率分布对系统性能有显著的影响,原有公式在某些情况下的计算结果有较大偏差,而改进公式的计算结果具有更好的适应性和准确性。该改进公式可有效评估湍流条件下FSO系统性能,并为相关理论研究提供参考。

**关键词** 大气光学;无线光通信;误码率;大气湍流;光强起伏;概率分布

**中图分类号** TN929.12 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201232.0906003

## Error Performance for Free Space Optical Communication Systems in a Real Turbulent Atmosphere

Li Fei<sup>1,2,3</sup> Hou Zaihong<sup>1</sup> Wu Yi<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Key Laboratory of Atmospheric Composition and Optical Radiation, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Hefei, Anhui 230031, China

<sup>2</sup> Department of Optics and Optical Engineering, School of Physical Sciences, University of Science and Technology of China, Hefei, Anhui 230026, China

<sup>3</sup> State Key Laboratory of Pulsed Power Laser Technology, Department of Optoelectronics, Electronic Engineering Institute of PLA, Hefei, Anhui 230037, China

**Abstract** Performance of free-space optical communication (FSO) system fluctuates greatly, which is influenced by atmospheric turbulence. Research about evaluating system error performance according to parameters of system and atmosphere is a subject with certain practical significance. Based on both optical turbulence channel and photoelectric detection model, a mathematic simulation model of error performance for FSO system is established. A modified expression of bit error rate for FSO system through turbulent atmosphere is proposed, and an experiment of 24 hours' duration is carried out to test the expression. It shows that intensity probability distribution has a significant influence on system error performance. The results of original expression are inconsistent with experimental data on certain conditions, and the modified expression has better applicability and accuracy. The modified expression can lead to an efficient performance evaluation and provide reference to correlative researches.

**Key words** atmospheric optics; free-space optical communications; bit error rate; atmospheric turbulence; intensity fluctuation; probability distribution

**OCIS codes** 010.1290; 200.2605; 010.1330

收稿日期: 2011-12-14; 收到修改稿日期: 2012-05-09

基金项目: 国家 863 计划(2006AA861062)资助课题。

作者简介: 李 菲(1981—),男,博士研究生,讲师,主要从事激光大气传输和空间光通信等方面的研究。

E-mail: lifei\_8149@yahoo.cn

导师简介: 吴 毅(1960—),男,博士生导师,研究员,主要从事激光大气传输及光学参数探测等方面的研究。

E-mail: wuyi@aiofm.ac.cn

## 1 引言

无线光通信(FSO)具有成本低、架设灵活、通信容量大、无需频率申请和抗电磁干扰等优点,已经成为无线通信领域研究的热点。近年来的研究表明<sup>[1,2]</sup>,激光信号在大气信道中传输时会受到空间损耗、大气衰减、大气湍流和背景辐射等因素影响,其中大气湍流引起的光强起伏的影响尤为明显。在通信系统各项参数已确定的情况下,系统性能会由大气信道的随机变化而产生较大的波动。因此,根据实时测量的大气信道参数评估系统性能已成为一个急需解决且具有实际意义的问题。Andrews等<sup>[3~6]</sup>根据各种假设提出了各种仿真模型,本文在这些模型基础上,使用根据实测数据拟合出的光强概率分布函数,对湍流条件下无线光通信系统误码率(BER)进行了数学仿真,并通过全天实验对仿真结果进行了验证。

## 2 系统模型

本文建立的系统模型是基于最常用的开关键控(OOK)强度调制/直接检测(IM/DD)无线光通信系统,主要关注大气湍流引起的光强起伏对系统性能的影响,假设大气衰减为确定值,且系统的捕获、瞄准及跟踪(APT)系统能正常工作。IM/DD通信系统中,激光信号经过大气湍流信道传输后被接收天线汇聚到光电探测器上,经过光电转换与放大后产生电信号,并由系统对电信号进行阈值判决。本质上,系统差错性能主要取决于信噪比(SNR)。由于大气湍流的影响,不仅系统接收的信号光强会产生随机起伏,同时也给系统引入了额外的噪声,最终导致阈值判决提取出的数据就可能含有误码。

由于光通信传输速率远大于大气的扰动频率,所以可认为系统接收光强缓慢起伏变化,而每个时隙内的接收光强独立且稳定,可表示为

$$I_r = \langle I_s \rangle SX + I_b, \quad (1)$$

式中  $I_s$  为信号光强,  $\langle \rangle$  表示统计平均,  $X$  为调制函数(发送“1”码时  $X = 1$ ; 发送“0”码时  $X = 0$ );  $S = I_s / \langle I_s \rangle$  为归一化光强,在湍流影响下,  $S$  可视为一个随机变量,而无湍流条件下,  $S$  可视为常数 1;  $I_b$  为背景光强,其强度随着昼夜和气象条件的变化而变化,在一段时间内可视为恒定值。无线光通信系统使用的探测器通常为雪崩二极管(APD)或PIN光电二极管,其输出电流可近似为一个服从高斯分布的随机变量<sup>[7]</sup>。由(1)式可知,发送“1”码时,每个时隙内

输出电流主要包括信号光电流  $i_s$  和背景光电流  $i_b$ , 其均值可表示为  $i_1(S) = i_s + i_b = \langle I_s \rangle SR_i + I_b R_i$ , 式中  $R_i$  为探测器电流响应度; 噪声主要包括信号光散粒噪声  $\sigma_s^2$ 、背景光噪声  $\sigma_b^2$  和系统固有的热噪声  $\sigma_t^2$ , 其方差可表示为

$$\sigma_1^2(S) = \sigma_s^2 + \sigma_b^2 + \sigma_t^2 = 2eBMF \langle I_s \rangle SR_i + 2eBMFI_b R_i + 4K_b TB/R_L, \quad (2)$$

式中  $M$  为 APD 倍增因子,  $F$  为 APD 噪声系数,  $e$  为电子电荷,  $B$  为探测器工作带宽,  $K_b$  为玻尔兹曼常数,  $T$  为绝对温度,  $R_L$  为负载电阻。对于 PIN 二极管,将  $M$  与  $F$  取为 1 即可。发送“0”码时,系统接收光强仅包括背景光强  $I_b$ , 不受光强起伏的影响,输出电流  $i_0 = I_b R_i$ , 噪声方差  $\sigma_0^2 = \sigma_b^2 + \sigma_t^2 = 2eBMFI_b R_i + 4K_b TB/R_L$ 。

IM/DD 系统进行阈值判决时的误码率包括虚警概率和漏警概率两部分。虚警概率  $P_{\text{false}}$  是指发送“0”码时噪声的幅度大于判决阈值  $i_T$  的概率,漏警概率  $P_{\text{miss}}$  是指发送“1”码时信号与噪声之和小于  $i_T$  的概率。无湍流影响时,系统误码率可表示为<sup>[8]</sup>

$$R_{\text{BE}}^0 = (P_{\text{false}} + P_{\text{miss}})/2 = \left[ \operatorname{erfc} \left( \frac{R_{\text{TN}}^0 - R_{\text{SN}}^0}{\sqrt{2}} \right) + \operatorname{erfc} \left( \frac{R_{\text{SN}}^1 - R_{\text{TN}}^1}{\sqrt{2}} \right) \right] / 4, \quad (3)$$

式中  $\operatorname{erfc}(\cdot)$  为互补误差函数,  $R_{\text{SN}}^0 = i_0/\sigma_0$  和  $R_{\text{TN}}^0 = i_T/\sigma_0$  分别为发送“0”码时的信噪比和阈值噪声比,而  $R_{\text{SN}}^1 = i_1(1)/\sigma_1(1)$  和  $R_{\text{TN}}^1 = i_T/\sigma_1(1)$  为发送“1”码时的信噪比和阈值噪声比。在大气湍流条件下,发送“0”码时系统接收光强不受影响,此时的虚警概率相比无湍流时也没有变化;发送“1”码时,每个时隙内的电流均值  $i_1(S)$  和噪声方差  $\sigma_1^2(S)$  可视为以  $S$  为自变量的函数,为了方便测量其具体形式可以变换为

$$i_1(S) = [i_1(1) - i_0]S + i_0, \quad (4)$$

$$\sigma_1^2(S) = 2eBMF[i_1(1) - i_0]S + \sigma_0^2, \quad (5)$$

此时的信噪比和阈值噪声比也可以表示为  $R_{\text{SN}}^1(S) = i_1(S)/\sigma_1(S)$  和  $R_{\text{TN}}^1(S) = i_T/\sigma_1(S)$ 。显然每个时隙内的误码率相对独立,且可视为关于  $S$  的条件概率,因此通过对  $S$  的概率分布函数  $f(S)$  进行平均就可得出总的误码率

$$R_{\text{BE}} = \left\{ \operatorname{erfc} \left( \frac{R_{\text{TN}}^0 - R_{\text{SN}}^0}{\sqrt{2}} \right) + \int_0^{\infty} f(S) \operatorname{erfc} \left[ \frac{R_{\text{SN}}^1(S) - R_{\text{TN}}^1(S)}{\sqrt{2}} \right] dS \right\} / 4. \quad (6)$$

### 3 光强概率分布

通常认为在弱湍流条件下,光强起伏的概率密度满足对数正态分布,而在中、强湍流条件下则服从Gamma-Gamma分布<sup>[9]</sup>。对于通信距离几千米以内的无线光通信系统,考虑到孔径平均效应,光强起伏一般都看作弱起伏,服从对数正态分布,其概率密度函数为

$$f(S) = \exp[-(\ln S + \sigma_{\ln I}^2/2)^2/2\sigma_{\ln I}^2]/(S\sigma_{\ln I} \sqrt{2\pi}), \quad (7)$$

式中 $\sigma_{\ln I}^2$ 为经过孔径平均后的对数光强起伏方差。但是最近的研究显示<sup>[10]</sup>,实际湍流大气中光强起伏特征具有更加复杂的特性。

饶瑞中等<sup>[11]</sup>曾提出:根据湍流大气中激光对数强度的最低几阶中心矩,可以建立一种能准确地描述实际概率分布的最大似然概率分布模型。若对数光强 $\ln I$ 的概率分布为 $f(\ln I)$ ,则对数光强的 $k$ 阶中心矩 $\mu_k$ 有

$$\mu_k = \int_{-\infty}^{\infty} (\ln I - \langle \ln I \rangle)^k f(\ln I) d\ln I. \quad (8)$$

通常,实验数据的高阶矩的精度是较低的,只有较低级次的矩比较可靠。由最低四阶中心矩拟合的最大似然概率密度分布可以表达为

$$f(\ln I) = \exp\left[\sum_{i=0}^4 \lambda_i (\ln I - \langle \ln I \rangle)^i\right]. \quad (9)$$

它应满足归一化条件,即 $\mu_0$ 等于1。由归一化条件和4个矩方程构成5个未知系数 $\lambda_0$ 、 $\lambda_1$ 、 $\lambda_2$ 、 $\lambda_3$ 和 $\lambda_4$ 的非线性积分方程组。借助于五阶矩 $\mu_5$ 和六阶矩 $\mu_6$ ,再根据(9)式的形式推断它在无穷大时以指数趋于零,使用分部积分法可以得到 $\lambda_i$ 的方程组,解得此方程组后系数 $\lambda_0$ 可以通过数值积分求得。由(1)式可知 $S = I/\langle I \rangle$ ,将其代入对数光强 $\ln I$ 的概率分布函数(9)式并进行变换后就可以得到 $S$ 的概率分布函数

$$f(S) = \frac{1}{S} \exp\left[\sum_{i=0}^4 \lambda_i (\ln S + \ln \langle I \rangle - \langle \ln I \rangle)^i\right]. \quad (10)$$

### 4 实验结果

本文的实验使用波长为670 nm的半导体激光器作为发射光源,使用口径100 mm的卡塞格伦望远镜作为接收天线,APD探测器被安放在望远镜焦点附近;探测器输出的信号被接入8位数据采集卡,由计算机软件进行采集和阈值判决。激光水平传输距离为1 km,传输路径距离地面约10 m,水面和陆

地约各占一半。在提取数据过程中,时钟信号的累计误差可能导致数据的错位,因此使用连续激光来模拟一段时间的全“1”信号,而使用光阑阻断光路来模拟一段时间的全“0”信号,将两组数据的误码累加起来作为最终误码结果。实验时间选择在9月份的晴朗天气,持续进行24 h,信号采集频率为10 MHz,每次采集 $2 \times 10^8$ 个样本点,相邻两次采集相隔30 min。由于经历了全天的变化,对数光强起伏方差跨越了近两个数量级,但是仍然满足弱起伏条件。

由于误码率中虚警概率 $P_{\text{false}}$ 不受湍流影响,使用正态分布计算的结果与拟合分布没有差别,因此本文主要研究光强起伏对漏警概率 $P_{\text{miss}}$ 的影响。计算中使用的参数 $i_0$ 、 $i_1(1)$ 和 $\sigma_0^2$ 是通过实验数据进行统计处理获得,其中 $i_0$ 和 $\sigma_0^2$ 分别为全“0”数据的统计均值和方差,而 $i_1(1)$ 在忽略光束扩展的影响时可以认为与全“1”数据的统计均值 $\langle i_1 \rangle$ 相等。(5)式中的参数 $2eBMF$ 可以通过事先的系统标定得到,具体做法是:在无湍流影响的实验室环境中,使用探测器接收高稳定度激光器输出的连续激光并采集数据,对数据的统计均值和方差进行线性拟合,所得拟合直线的斜率即可作为参数 $2eBMF$ 进行计算。

对于实际大气湍流,单纯根据对数起伏方差 $\sigma_{\ln I}^2$ 衡量起伏强度并不可靠。由(6)式可知,除了平均信噪比和对数起伏方差,光强概率分布函数对系统性能的影响也有较大的影响。图1为在平均信噪比 $\langle R_{\text{SN}}^1 \rangle = 6$ 、对数起伏方差 $\sigma_{\ln I}^2 = 0.035$ 的条件下,同一天内两个不同时刻实测的漏警概率曲线。图中纵坐标为漏警概率 $P_{\text{miss}}$ ,横坐标为归一化判决阈值 $i_T/\langle i_1 \rangle$ ,空心圆点对应的样本采集于凌晨3:00,实心圆点对应的样本采集于中午12:00。可以看出即

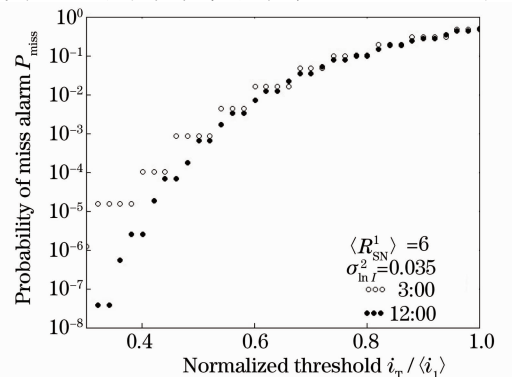


图1 光强概率分布不同时的漏警概率

Fig. 1 Probability of miss alarm with different intensity probability distributions

使平均信噪比和对数起伏方差相同,系统性能仍然会由于光强概率分布的变化而产生几个数量级的波动。

图 2 是实测数据以及使用(7)式和(10)式计算得到的概率分布直方图。图中横坐标为  $S$ ,纵坐标代表  $S$  值落在某一区间内的概率,空心圆点代表从  $2 \times 10^8$  个实测样本点直接获得的概率分布直方图,

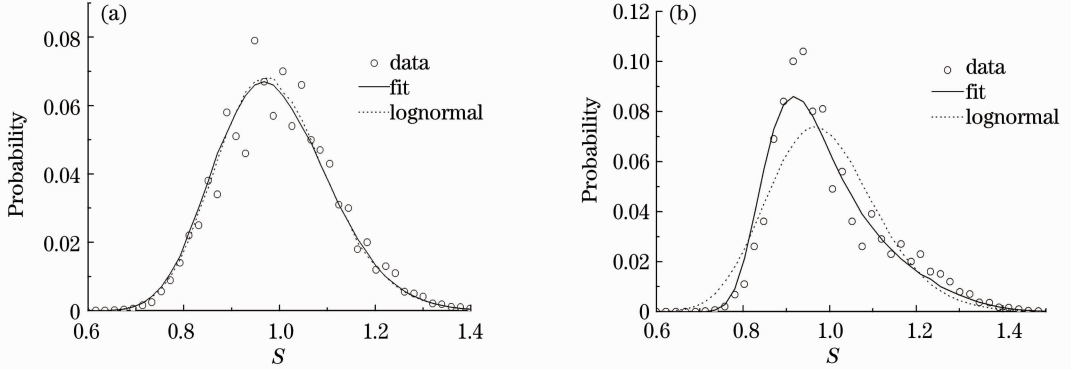


图 2 实测样本概率分布直方图。(a) 5:00; (b) 14:00

Fig. 2 Probability distribution histogram of experimental data, (a) 5:00; (b) 14:00

图 3 是 24 h 内正态分布、拟合分布的计算结果与实测样本之间的相关系数变化曲线。图中实线代表正态分布与实测样本之间的相关系数,虚线代表拟合分布与实测样本之间的相关系数。总的来说,大部分情况下正态分布模型可以较好地描述实际分布,但是在某些时刻实际分布明显偏离正态分布,而拟合分布具有更高的相关性,以此分布模型进行仿真计算可以得到更准确的结果。

图 4 为不同起伏强度条件下根据(6)式分别按照正态分布和拟合分布计算的漏警概率曲线。图中

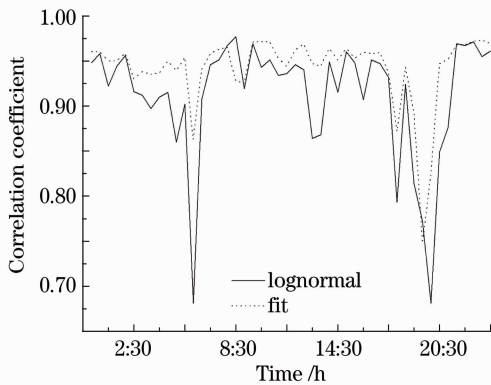


图 3 实测样本与计算值之间的相关系数

Fig. 3 Correlation coefficients of experimental data and simulated values

实线代表用极大似然拟合分布计算的结果,虚线代表使用对数正态分布计算所得结果,其中图 2(a)和(b)所用样本对应的  $\sigma_{ln I}^2$  都为 0.014。通过对大量数据的分析,可以看出大部分情况下正态分布和拟合分布与实际分布都比较接近,但是在某些情况下正态分布与实际分布的偏差较大,这也将导致漏警概率计算中的较大偏差。

空心圆点代表从  $2 \times 10^8$  个实测样本点直接获得的漏警概率,实线代表按照拟合分布计算的结果,虚线代表按照正态分布计算的结果。由于采样数据总量的限制,实测漏警概率的精度无法超出  $10^{-9}$  量级,图中漏警概率实测值在个别点上显示为 0,而采集卡的精度限制也导致实测漏警概率出现阶梯状。可以看出,随着对数起伏方差的增大和平均信噪比的减小,漏警概率的计算值和实测值都迅速升高,这与之前的研究相吻合;在测量精度范围内,使用拟合分布计算的结果基本上都与实测值相吻合,而使用正态分布计算的结果则在某些情况下偏差相对较大。

正态分布计算结果与实测值之间的偏差可以通过光强概率分布的偏斜度和陡峭度反映出来。偏斜度和陡峭度的绝对值越小,偏差程度越小,反之亦然;当偏斜度为负时,实测值通常大于正态分布计算结果;当偏斜度为正时,实测值通常小于正态分布计算结果。对此现象可做出如下可能的解释:通信系统的归一化判决阈值一般都会被设置为 0.5 或更小。偏斜度和陡峭度的绝对值越小,实际概率分布与正态分布越接近,计算结果与实测值之间的偏差自然越小;当偏斜度为负时,实测光强低于判决阈值的概率大于正态分布,实测漏警概率也自然大于正态分布计算结果。

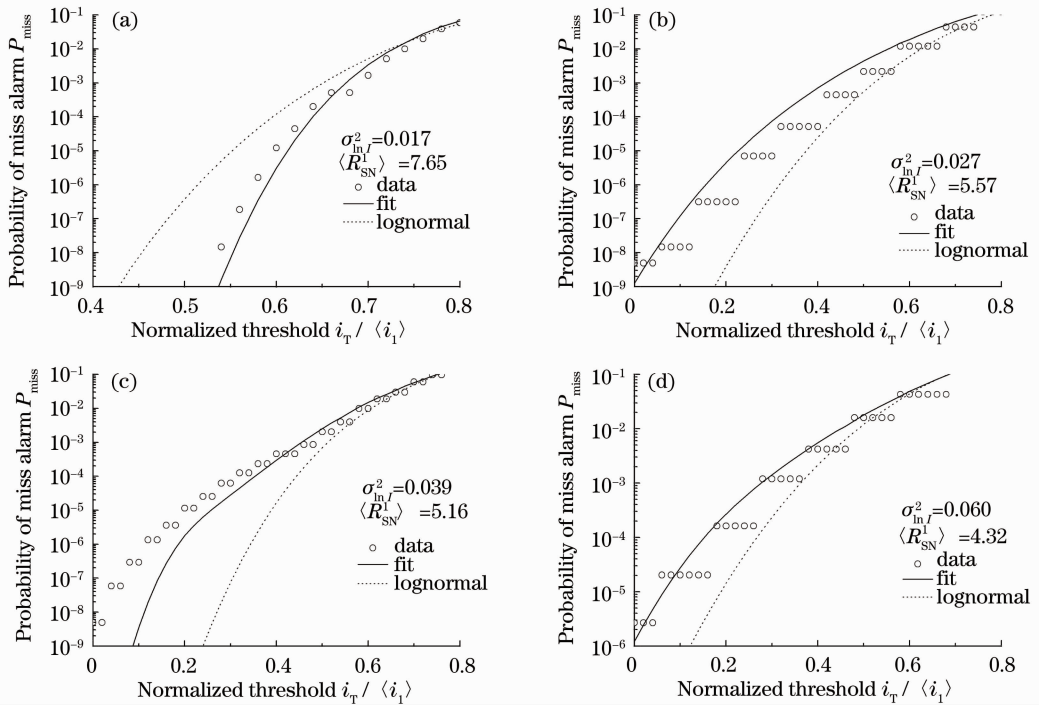


图 4 计算结果与实测漏警概率的比较

Fig. 4 Comparison between simulation and experimental data for  $P_{\text{miss}}$ 

## 5 结 论

在现有模型基础上,使用极大似然拟合光强概率分布模型取代常用的正态分布模型,提出了实际大气中无线光通信系统差错性能的修正计算模型,并进行了全天实验以验证模型的准确性。在持续 24 h 的实验时间内,大气湍流在满足弱起伏的条件下经历了较大范围的变化。实验中发现,在弱起伏条件下实测光强的概率分布大多符合对数正态分布,但在某些情况下与对数正态分布有着明显的偏差,而这种偏差导致使用修正模型的计算结果与实测值也有较大偏差。如果使用极大似然拟合分布替换对数正态分布,修正模型的计算结果则与实测值比较一致,计算准确度有明显提高。提出的修正模型不仅可用于无线光通信系统误码率的仿真研究,也可以对工程系统设计评价和相关理论研究提供一定参考。只要能够获取某地大气湍流的光强起伏方差和概率分布模型等参数,并且得到无线光通信系统的发射功率、光束发散角等系统参数,就可以根据此模型估算出该系统的误码率,这对于无线光通信的站点选址也有很大的帮助。由于在实际工作环境中,系统性能还会受到大气透射率起伏、光束扩展以及到达角起伏等大气效应的影响,极大似然概率分布模型也不足以完全准确地反应光强概率密度分布

的特征,因此要对复杂环境下的系统性能进行全面评估,还需要对激光大气传输理论和光强起伏特征做进一步的研究。

## 参 考 文 献

- 1 J. C. Ricklin, S. M. Hammel, F. D. Eataon *et al.*. Atmospheric channel effects on free-space laser communication [J]. *J. Opt. Fiber Commun.*, 2006, **3**(2): 111~158
- 2 A. K. Majumdar. Free-space laser communication performance in the atmospheric channel [J]. *J. Opt. Fiber Commun.*, 2005, **2**(4): 345~396
- 3 L. C. Andrews, R. L. Philips. *Laser Beam Propagation Through Random Media* [M]. Washington: SPIE Press, 2005. 441~475
- 4 M. H. Mahdieh, M. Pournoury. Atmospheric turbulence and numerical evaluation of bit error rate (BER) in free-space communication [J]. *Opt. & Laser Technol.*, 2010, **42**(1): 55~60
- 5 Wang Hongxing, Hu Hao, Zhang Tieying *et al.*. Modeling and simulating of error performance for free space optical communication system through weak turbulence atmosphere [J]. *J. System Simulation*, 2011, **23**(4): 788~792  
王红星, 胡 昊, 张铁英等. 弱湍流中无线光通信系统差错性能建模与仿真[J]. *系统仿真学报*, 2011, **23**(4): 788~792
- 6 E. Ferdinandov, B. Pachedjewa, B. Bonev *et al.*. Joint influence of heterogeneous stochastic factors on bit-error rate of ground-to-ground free-space laser communication systems [J]. *Opt. Commun.*, 2007, **270**(2): 121~127
- 7 S. Dolinar, D. Divsalar, J. Hamkins *et al.*. Capacity of Pulse-Position Modulation (PPM) on Gaussian and Webb channels[R]. TMO Progress Report, 2000. 42~142
- 8 L. C. Andrews, R. L. Philips, C. Y. Hopen. *Laser Beam*

- Scintillation with Applications [M]. Washington: SPIE Press, 2001. 201~242
- 9 Yang Changqi, Jiang Wenhan, Rao Changhui. Impact of aperture averaging on bit-error rate for free-space optical communication [J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(2): 212~218  
杨昌旗, 姜文汉, 饶长辉. 孔径平均对自由空间光通信误码率的影响[J]. *光学学报*, 2007, **27**(2): 212~218
- 10 Jing Xu, Wu Yi, Hou Zaihong *et al.*. Study of irradiance fluctuations for laser beam propagation in atmosphere [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(11): 3110~3116  
靖 旭, 吴 毅, 侯再红 等. 湍流大气中激光传输光强起伏特征研究[J]. *光学学报*, 2010, **30**(11): 3110~3116
- 11 Rao Ruizhong, Wang Shipeng, Liu Xiaochun *et al.*. Probability distribution of laser irradiance scintillation in a real turbulent atmosphere [J]. *Acta Optica Sinica*, 1999, **19**(1): 81~86  
饶瑞中, 王世鹏, 刘晓春 等. 实际大气中激光闪烁的概率分布[J]. *光学学报*, 1999, **19**(1): 81~86

栏目编辑: 王晓琰