

湍流大气光通信系统误码率分析与实验研究

李 菲^{1,2} 吴 毅¹ 侯再红¹

(¹ 中国科学院安徽光学精密机械研究所中国科学院大气成分与光学重点实验室, 安徽 合肥 230031)
² 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 自由空间光通信(FSO)系统的性能由于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两个模型为基础,建立了 FSO 系统差错性能的数学仿真模型,提出了湍流条件下系统误码率计算公式。对仿真结果与弱湍流条件下获得的实验数据进行了比较,并依据此模型对光强起伏和背景噪声等因素的影响进行仿真。仿真结果表明,基于该模型的仿真结果与实验数据一致,光强起伏是引起系统性能波动的主要因素,最优判决阈值需根据实际大气条件进行调整。该模型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 自由空间光通信;大气光学;大气湍流;误码率;闪烁

中图分类号 TN929.12 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201232.0606002

Analysis and Experimental Research on Bit Error Rate for Free-Space Optical Communication Systems through Turbulent Atmosphere

Li Fei^{1,2} Wu Yi¹ Hou Zaihong¹

¹ Key Laboratory of Atmospheric Composition and Optical Radiation, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Hefei, Anhui 230031, China
² State Key Laboratory of Pulsed Power Laser Technology, Optoelectronic Department, Electronic Engineering Institute of PLA, Hefei, Anhui 230037, China

Abstract Performance of free-space optical communication (FSO) system fluctuates greatly due to influence by atmospheric turbulence. Research about evaluating system error performance according to parameters of system and atmosphere is a subject of current interest. Based on both optical turbulence channel and photoelectric detection model, a mathematic simulation model of error performance for FSO system is established, and an expression of bit error rate for FSO system through turbulent atmosphere is proposed. Results of simulation are compared with experimental data obtained under weak turbulence condition and the model is used to characterize factors in turbulence, such as intensity fluctuation and background noise, etc. Simulation results are shown to be consistent with experimental data, intensity fluctuation is a chief factor of system performance fluctuation, and optimized threshold should be adjusted according to practical atmosphere. The presented model can lead to an efficient performance evaluation and provide reference to correlative theoretical researches.

Key words free-space optical communication; atmospheric optics; atmospheric turbulence; bit error rate; scintillation

OCIS codes 060.2605; 010.1290; 010.1330; 290.5930

1 引 言

与光纤通信相比,自由空间光通信(FSO)具有

成本低、架设灵活等优点,更由于通信容量大、无需频率申请和抗电磁干扰等优点使其逐渐成为无线通

收稿日期: 2011-10-21; 收到修改稿日期: 2011-12-20

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及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,研究员,博士生导师,主要从事激光大气传输方面的研究。E-mail: wuyi@aiofm.ac.cn

信领域研究的热点。近年来的研究^[1,2]表明,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,导致通信链路产生较大的误码率(BER)。

BER是衡量FSO系统性能的重要指标。在各项系统参数已确定的情况下,系统BER会因为大气信道的随机变化而产生剧烈的波动。因此,通过测量光通信系统自身参数和大气信道参数,评估该系统的BER成为一个急需解决且具有实际意义的问题。Andrews等^[3~6]在此方面的研究已经获得一些进展,但对其模型进行了较多的假设,仿真结果与实测值的偏差也较大。本文在分析FSO系统的前提下,以大气湍流信道模型和FSO系统模型为基础,给出了湍流条件下FSO系统BER的数学计算模型,在1 km距离上进行激光水平传输实验对该模型进行了检验,并分析了光强起伏、背景噪声和阈值选取等因素对系统性能的影响。

2 系统建模与性能分析

目前FSO系统一般采用强度调制/直接检测(IM/DD)工作方式。激光经过大气信道传播时,会产生大气衰减效应和大气湍流效应。相对于大气衰减,大气湍流对信号的影响更具随机性。本文主要涉及对BER有较大影响的湍流环境,默认大气衰减为确定值,且系统的捕获、瞄准及跟踪(APT)系统能正常工作。

在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会聚到光电探测器上,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。由于大气湍流引入的光强起伏噪声和探测器固有噪声的影响,阈值判决提取出的数据就可能含有误码。要分析整个系统的误码性能,应将大气湍流信道和光电信号转换过程作为一个整体进行数学建模。

2.1 大气湍流信道模型

IM/DD通信系统中发射端激光器的量子噪声一般较小,相对于接收端光电探测器的量子噪声可以忽略。在大气信道传输中,湍流引起的光强起伏会导致接收端光电探测器的输出电流随机涨落,对系统的BER的影响不容忽视。由于光通信传输速率远大于大气的扰动频率,所以可认为每个时隙内接收到的光强独立且稳定,若仅考虑光强起伏的影响,IM/DD系统接收光功率

$$P_r(t) = P_s(t)T(t) + P_b,$$

式中 $T(t)$ 为光强起伏随机调制函数,其概率分布与光强概率分布相一致; $P_s(t)$ 为信号光功率, P_b 为背景光功率,其强度随着昼夜和气象条件的变化而变化。

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^[7,8]。对于通信距离几千米以内的FSO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

$$p_I(S) = \frac{1}{S\sigma_{\ln I} \sqrt{2\pi}} \exp\left[-\left(\ln S + \frac{1}{2}\sigma_{\ln I}^2\right)^2 / 2\sigma_{\ln I}^2\right], \quad (1)$$

式中 $\sigma_{\ln I}^2$ 为经过孔径平均后的对数光强起伏方差, S 为归一化光强。在弱湍流条件下,也可以使用光强起伏的归一化方差 σ_i^2 来替换 $\sigma_{\ln I}^2$ 。最近也有研究显示^[9],实际湍流大气中光强起伏特征具有更加复杂的特性。

2.2 光电信号转换模型

在FSO系统中,具有高增益和高响应速度的雪崩二极管(APD)是一种常用的探测器。APD的探测模型可以采用加性高斯白噪声(AGWN)近似模型,输出电流包含了信号光电流 i_s 、背景光电流 i_b 和探测器暗电流 i_d ,近似为一个服从高斯分布的随机变量,其均值可表示为

$$\langle i \rangle = i_s + i_b + i_d = P_s R_i + P_b R_i + i_d, \quad (2)$$

式中 R_i 为探测器电流响应度, $\langle \rangle$ 表示统计平均。电流噪声主要包括散粒噪声 σ_s^2 、背景噪声 σ_b^2 、暗电流噪声 σ_d^2 和热噪声 σ_t^2 ,其方差可表示为

$$\sigma_i^2 = \sigma_s^2 + \sigma_b^2 + \sigma_d^2 + \sigma_t^2 = 2eBMF(i_s + i_b + i_d) + 4K_b TB/R_L, \quad (3)$$

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。输出电流经过前置放大后转化为电压信号,依然服从高斯分布,其均值可表示为 $\langle U \rangle = \langle i \rangle R_i$,方差可表示为

$$\sigma^2 = \sigma_i^2 R_i^2, \quad (4)$$

式中 R_i 为前置放大倍数。如果使用的探测器为PIN光电二极管,则将(3)式中的 M 和 F 取为1即可。

2.3 误码性能分析

IM/DD系统进行阈值判决时的BER包括虚警概率和漏警概率两部分。虚警概率 P_{false} 是指发送“0”码时噪声幅度大于判决阈值的概率,漏警概率 P_{miss} 是指发送“1”码时信号与噪声之和小于判决阈

值的概率。无湍流影响时的系统 BER 为

$$P_{\text{BER}} = \frac{1}{2}(P_{\text{false}} + P_{\text{miss}}) = \frac{1}{2} \left[\frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left(\frac{U_{\text{T}} - \langle U_0 \rangle}{\sqrt{2\sigma_0^2}} \right) + \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left(\frac{\langle U_1 \rangle - U_{\text{T}}}{\sqrt{2\sigma_1^2}} \right) \right], \quad (5)$$

式中 $\operatorname{erfc}(\cdot)$ 为互补误差函数, U_{T} 为判决阈值, $\langle U_0 \rangle$ 和 σ_0^2 为发送“0”码时的电压均值和方差, $\langle U_1 \rangle$ 和 σ_1^2 为发送“1”码时的电压均值和方差。由(2)式和(3)式可得 $\langle U_0 \rangle = (i_{\text{b}} + i_{\text{d}})R_{\text{f}}, \sigma_0^2 = \sigma_{\text{b}}^2 + \sigma_{\text{d}}^2 + \sigma_{\text{t}}^2$, $\langle U_1 \rangle = (i_{\text{s}} + i_{\text{b}} + i_{\text{d}})R_{\text{f}}, \sigma_1^2 = \sigma_{\text{s}}^2 + \sigma_{\text{b}}^2 + \sigma_{\text{d}}^2 + \sigma_{\text{t}}^2$ 。

在大气湍流条件下,发送“0”码时,信号光功率 P_{s} 为零,光强起伏的影响可以忽略,虚警概率相比无湍流时没有变化;发送“1”码时,由于信号光强随机起伏,均值 $\langle U_1' \rangle$ 和方差 $\sigma_1'^2$ 也表现为随机变化量。当忽略大气湍流引起的光束展宽效应时,均值 $\langle U_1' \rangle = \langle U_1 \rangle$, 且有平均噪声方差^[10]

$$\langle \sigma_1'^2 \rangle = \sigma_1^2 + \sigma_{\text{t}}^2 \langle U_1'^2 \rangle, \quad (6)$$

对光强起伏概率密度函数 $p_{\text{I}}(S)$ 求平均,可以得出大气湍流条件下的系统平均 BER^[11~14]

$$P_{\text{BER}} = \frac{1}{2} \left[\frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left(\frac{U_{\text{T}} - \langle U_0 \rangle}{\sqrt{2\sigma_0^2}} \right) + \frac{1}{2} \int_0^{\infty} p_{\text{I}}(S) \operatorname{erfc} \left(\frac{S \langle U_1' \rangle - U_{\text{T}}}{\sqrt{2 \langle \sigma_1'^2 \rangle}} \right) dS \right]. \quad (7)$$

(7)式中使用的数学模型认为光强起伏仅影响信号电流的均值,并且使用平均噪声方差 $\langle \sigma_1'^2 \rangle$ 作为整个系统的噪声。考虑到光强的起伏不仅会影响信号电流的均值,同时也会使噪声电流发生起伏,因此使用以归一化光强 S 为自变量的函数 $U_1(S)$ 和 $\sigma_1^2(S)$ 替换(7)式中的 $\langle U_1' \rangle$ 和 $\langle \sigma_1'^2 \rangle$, 并综合(2)、(3)式推导出系统 BER 为

$$P_{\text{BER}} = \frac{1}{2} \left[\frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left(\frac{U_{\text{T}} - \langle U_0 \rangle}{\sqrt{2\sigma_0^2}} \right) + \frac{1}{2} \int_0^{\infty} p_{\text{I}}(S) \operatorname{erfc} \left(\frac{U_1(S) - U_{\text{T}}}{\sqrt{2\sigma_1^2(S)}} \right) dS \right], \quad (8)$$

$$U_1(S) = S(\langle U_1 \rangle - \langle U_0 \rangle) + \langle U_0 \rangle, \quad (9)$$

$$\sigma_1^2(S) = 2eBMFR_{\text{f}}(\langle U_1 \rangle - \langle U_0 \rangle)S + \sigma_0^2. \quad (10)$$

3 实验与仿真

建立一套激光通信实验系统,在不同发射功率条件下测量了系统的 BER,同时按照系统参数以及环境参数进行仿真计算。实验系统主要包括发射端、接收端和数据采集单元。在发射端,将 670 nm

半导体激光器和扩束镜固定在二维光学调整架上,向接收端发射连续激光;接收端使用口径 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处理。实验时间选择在晴朗的夜间,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,而使用关闭激光器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。根据之前的实验结果,闪烁指数在一段时间内可认为保持稳定,因此将每组数据的采集时间设置为 30 s,采样率为 100 kHz,相当于每次处理 3 Mb 的通信数据。

计算中使用的参数 $\langle U_0 \rangle$ 、 $\langle U_1 \rangle$ 和 σ_0^2 是通过实验数据进行统计处理获得的,其中 $\langle U_0 \rangle$ 和 σ_0^2 分别为一组全“0”数据的统计均值和方差,而 $\langle U_1 \rangle$ 则是一组全“1”数据的统计均值。函数 $\sigma_1^2(S)$ 的参数 $2eBMFR_{\text{f}}$ 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 $2eBMFR_{\text{f}}$ 代入(10)式进行计算。

由(6)式可知,在湍流条件下探测器输出电压的平均噪声中,除了光强起伏引入的噪声,还包括了背景以及探测器本身噪声。在根据实验数据计算归一化强度起伏方差 σ_1^2 时,必须将这部分噪声的影响考虑进去,以提高实验结果的可靠性^[15]。在每次采集实验数据前都使用遮光器遮蔽信号激光并采集约 8 s 数据,这组数据的统计均值和方差便可以作为背景及探测器噪声代入仿真计算中。通过处理实测数据得到的 σ_1^2 约为 0.02,可认为满足弱起伏条件。图 1 为实验采样数据的概率分布。图中空心圆点表示从 6×10^6 个采样数据直接获得的概率分布直方图,实线表示 σ_1^2 为 0.02 时的对数正态分布曲线。可以看出,虽然在曲线峰值附近有比较明显的偏差,但实际分布比较接近对数正态分布。为简化计算,在后续的仿真计算中设定 $p_{\text{I}}(S)$ 满足对数正态分布。如果要提高计算的准确度,可以根据实际大气条件使用 Gamma-Gamma 分布或实测概率分布替代对数正态分布。

判决阈值的选择直接影响到系统的误码性能,

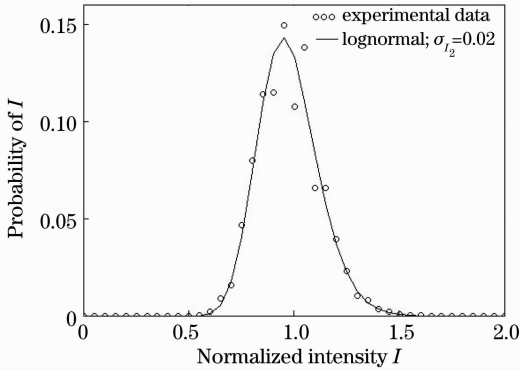


图 1 实验数据的概率分布

Fig. 1 Probability distribution of experimental data

最优阈值应当根据系统和信道的具体参数来确定。在仿真计算中通常使用 $(\langle U_0 \rangle + \langle U_1 \rangle) / 2$ 作为判决阈值, 这样设置阈值会导致系统 BER 远大于最优值。图 2 为在不同信号光功率下使用不同判决阈值得到的 BER。图中空心圆点为实测数据, 实线为根据(7)式计算出的平均 BER, 虚线为根据(8)式计算

出的 BER。以图 2(a)为例, 在信号光功率为 50 mW 且 σ_I^2 为 0.028 的条件下, 实测的最小 BER 为 3×10^{-5} , 对应的阈值为 0.35; (7)式仿真结果的最小 BER 为 5×10^{-4} , 对应的阈值为 0.35; (8)式仿真结果的最小 BER 为 4×10^{-5} , 对应的阈值为 0.40。随着信号光功率的增加, 系统的 BER 也逐渐降低。由于采样数据总量的限制, 实测 BER 的精度无法超出 10^{-7} 量级, 因此在图 2(b)、(c)、(d)中个别点上实测数据的 BER 显示为 0。在其它点上可以看出(8)式的仿真结果与实测 BER 比较接近, (7)式仿真结果与实测 BER 之间的偏差则达到几个数量级。此外还可看出各条曲线所对应的归一化最优阈值各不相同, 且随着信号光功率的增加而进一步偏离 0.5。显然, (8)式的仿真结果要比(7)式具有更高的准确性, 因此依据(8)式仿真的结果也具有更高可信度。由于实验条件的限制, 以下的计算都是在(8)式所对应数学模型的基础上通过改变参数数值进行仿真。

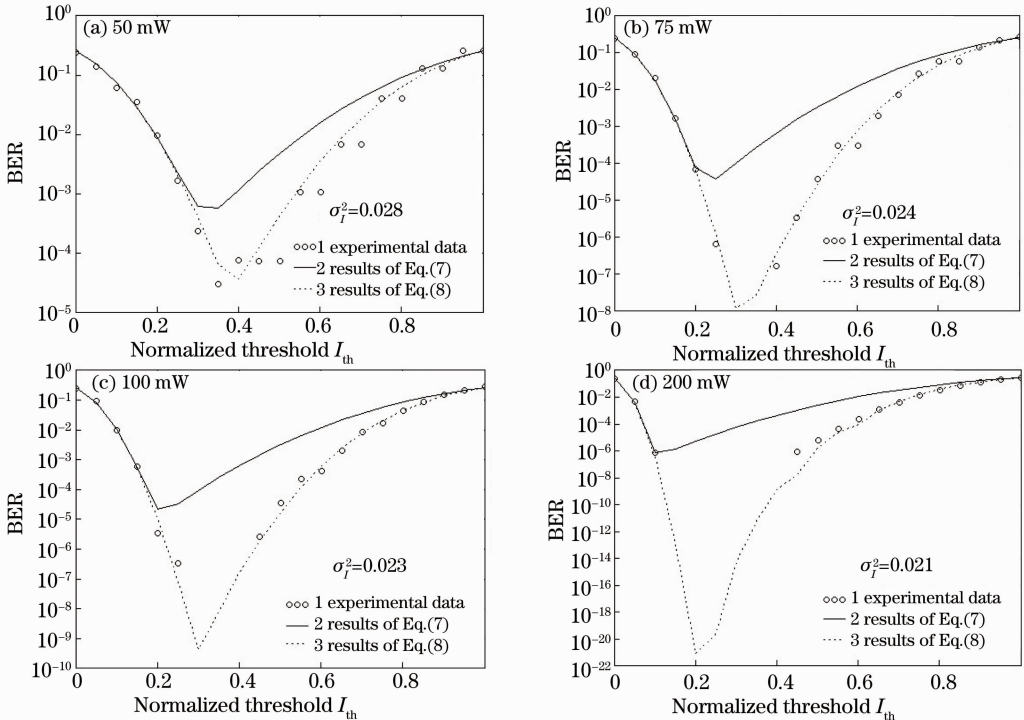


图 2 不同阈值时的 BER

Fig. 2 BER with different thresholds

判决阈值的最优值不仅受到信号光功率影响, 还要受到大气湍流的影响。通过改变(8)式中的参数 σ_I^2 模拟湍流强度的变化, 并使用数值计算获得对应的最优阈值, 可以得到湍流条件下最优阈值与湍流强度之间的关系, 如图 3 所示, 可以看出, 湍流条件下最优阈值会随着 σ_I^2 的增加而降低, 并趋近于

0.1, 这是由于随着信号光功率 P_s 和闪烁指数 σ_I^2 的增加, 噪声方差 σ_I^2 和 σ_0^2 之间的差距加大, BER 曲线的对称性减弱且峰值发生偏离。因此在实际系统中应当根据湍流强度的变化而适当调节判决阈值, 以获得更好的系统性能。

图 4 为 P_s 为 100 mW 时系统 BER 随 σ_I^2 的变

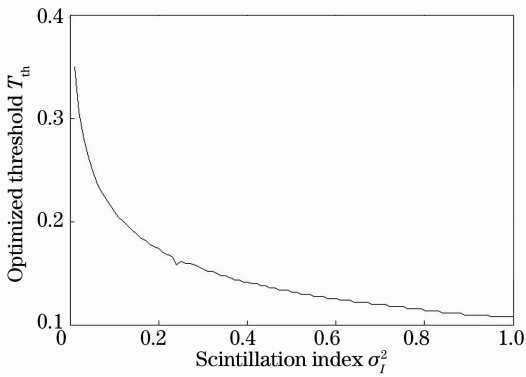


图 3 最优阈值随闪烁指数变化规律

Fig. 3 Optimized threshold versus scintillation index

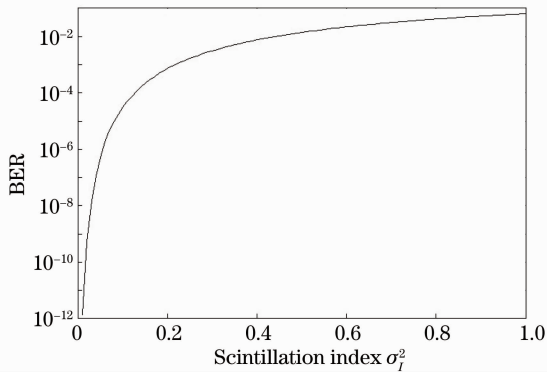


图 4 BER 随闪烁指数变化规律

Fig. 4 BER versus scintillation index

化曲线。可见,系统 BER 随闪烁指数的增加而急剧增加。当 σ_I^2 由 0.01 增加到 1 时, BER 由 10^{-12} 量级增加到 10^{-1} 量级。这意味着,即使系统本身参数不变,在一天之内系统 BER 也会有十个数量级左右的剧烈波动。

进一步通过改变背景噪声 σ_b^2 参数仿真了 σ_I^2 分别为 0.1 和 0.3 时,不同背景光强对系统误码性能的影响,如图 5 所示。由图中可以看出,背景噪声增加一倍, σ_I^2 为 0.1 时的 BER 由 10^{-6} 量级上升到

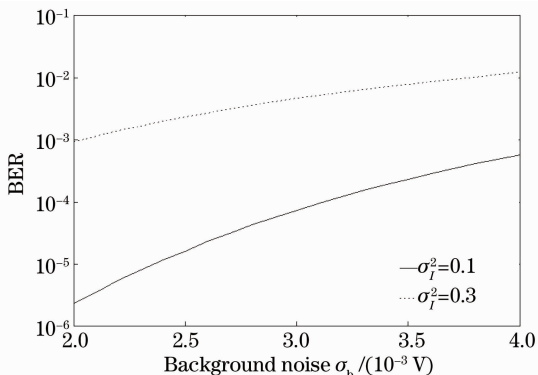


图 5 不同背景噪声下的系统 BER

Fig. 5 BER with different background noise

10^{-4} 量级,相对于 σ_I^2 为 0.3 时的 BER 上升幅度更加明显,这说明在湍流较小情况下背景噪声对系统性能有较大影响,而随着湍流强度变大,背景噪声的影响将变得不显著。在一定背景光变化范围内,光强起伏是引起系统性能下降的主要因素。

4 结 论

通过修正现有模型,综合考虑阈值选取、系统噪声等因素,建立了湍流大气条件下 FSO 系统的 BER 数学计算模型。在弱湍流实验条件下,模型的仿真结果比较好地吻合实测数据,其准确度明显优于原有模型。基于该模型进行的仿真中还发现,在系统参数确定的情况下,湍流引入的光强起伏噪声是引起系统性能波动的主要原因,系统的判决阈值也必须根据大气条件进行相应调节。所提出的 BER 计算模型可用于分析各参量对系统性能的影响,并且可对工程系统设计评价和相关理论研究提供一定参考。由于在实际工作环境中,实际光强起伏概率分布并不完全符合现有理论,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,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系统噪声模型进行进一步的研究。

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. Mahdih, 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. Pachedjeva, 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 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
- 8 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
- 9 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
- 10 Chen Chunyi, Yang Huamin, Jiang Huilin *et al.*. Performance analysis of large-aperture receiving and selection of aperture size in atmospheric optical communications [J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(11): 2957~2961
 陈纯毅, 杨华民, 姜会林 等. 大气光通信中大孔径接收性能分析与孔径尺寸选择[J]. 中国激光, 2009, **36**(11): 2957~2961
- 11 Lin Rizhao, Fu Zhongqian, Li Yongliang *et al.*. Research of bit error rate for satellite-to-ground laser communication using circle polarization shift keying modulation [J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(11): 1105007
 林日钊, 傅忠谦, 李永亮 等. 圆偏振移位键控的星地激光通信误码率研究[J]. 中国激光, 2011, **38**(11): 1105007
- 12 Hu Hao, Wang Hongxing, Zhou Min *et al.*. Modeling and analyzing of error performance for pulse position modulation and digital pulse interval modulation under turbulence [J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(5): 1269~1274
 胡 昊, 王红星, 周 旻 等. 湍流大气中脉冲位置调制和数字脉冲间隔调制差错性能的建模与分析[J]. 中国激光, 2010, **37**(5): 1269~1274
- 13 Chen Dan, Ke Xizheng. Analysis on error rate of wireless optical communication using subcarrier modulation on Turbo code [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(10): 2859~2863
 陈 丹, 柯熙政. 基于 Turbo 码的无线光通信副载波误码性能分析[J]. 光学学报, 2010, **30**(10): 2859~2863
- 14 Hu Hao, Wang Hongxing, Liu Min *et al.*. Analysis on error performance of free space optical communication based on Turbo product code [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2011, **48**(1): 010601
 胡 昊, 王红星, 刘 敏 等. 基于 TPC 的大气无线光通信差错性能分析[J]. 激光与光电子学进展, 2011, **48**(1): 010601
- 15 Wang Shipeng, Rao Ruizhong, Liu Xiaochun. Experimental observation of laser scintillation effect in real atmosphere [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 1998, **25**(6): 120~123
 王世鹏, 饶瑞中, 刘晓春. 实际大气中激光闪烁效应的实验观测[J]. 光电工程, 1998, **25**(6): 120~123

栏目编辑: 谢 婧