

# 大气湍流对激光通信系统误码率影响的研究

王德飞<sup>1</sup>, 楚振峰<sup>1</sup>, 任正雷<sup>1</sup>, 李广东<sup>2</sup>

(1. 中国人民解放军 63889 部队, 河南 孟州 454750; 2. 中国人民解放军 63893 部队, 河南 洛阳 471003)

**摘要:**基于 Kolmogorov 和 Rytov 的大气湍流理论模型, 考虑到大气湍流引起的强度闪烁对激光通信系统性能的影响, 得到了用于描述强、弱湍流条件下误码率的理论模型, 数值模拟了湍流强弱和激光波长对通信系统误码率的影响。结果表明: 中强湍流区对信噪比的影响明显大于弱湍流区, 随着传输距离的增加, 系统的误码率迅速增大并最终趋于饱和; 当系统误码率低于  $10^{-9}$  时, 弱湍流区的有效通信距离远大于中强湍流区。同时, 当湍流强度一定时, 激光的波长越长对改善系误码率越有利, 对工程上提高激光通信的质量具有一定的参考价值。

**关键词:**激光通信; 大气湍流; 误码率; 信噪比

**中图分类号:** TN911.14; TN929.12      **文献标识码:** A

## Influence of atmospheric turbulence on BER of laser communication system

WANG De-fei<sup>1</sup>, CHU Zhen-feng<sup>1</sup>, REN Zheng-lei<sup>1</sup>, LI Guang-dong<sup>2</sup>

(1. No. 63889 Unit of the PLA, Mengzhou 454750, China; 2. No. 63893 Unit of the PLA, LuoYang 471003, China)

**Abstract:** Based on Kolmogorov and Rytov's theory model and considering the effect of turbulence intensity on the performance of free space laser communication, a modified theory model used to depict the bit error rate (BER) in both weak and medium turbulence conditions is obtained, the influence of turbulent intensity and wavelength on BER in communication system is also simulated. It is shown that in medium turbulence field, the influence of BER is very obvious compared with weak turbulence. The system BER increases rapidly with the increase of the propagation distance and trends to saturation. With system's BER below  $10^{-9}$ , the effective communication range in the weak atmosphere turbulence will be greater than that in the medium turbulence regime. Under a certain intensity of turbulence the longer the wavelength is adopted, the better the system performance is. The analytical results can be used to improve the performance of laser communication system.

**Key words:** laser communication; atmosphere turbulence; BER; SNR

### 1 引言

自由空间激光通信技术是以激光束为信息载体, 在大气信道中进行信息传递的一种通信方式。当激光束在大气信道中传输时, 大气湍流效应使激光束在传播过程中随机的改变其波束特性, 导致光波的强度、相位和频率在时间和空间上呈现随机起伏, 表现为光束截面内出现强度起伏(大气闪烁)、光束弯曲和漂移、光束弥散畸变以及空间相干性退

化等现象, 将严重影响激光通信系统的稳定性和可靠性<sup>[1-4]</sup>。

大气闪烁现象使通过大气信道的激光束强度忽大忽小, 光斑忽明忽暗。当光束直径大于湍流直径时, 光束截面内包含多个湍流漩涡, 每个漩涡各自对

**作者简介:**王德飞(1982-), 男, 硕士, 工程师, 主要从事光电对抗及激光通信方面的研究工作。E-mail: defeiwangscu@163.com

**收稿日期:** 2010-11-09; **修订日期:** 2010-12-14

辐照其上的那部分激光束独立的吸收、衍射和散射,导致通信系统接收探测器上的光强在时间和空间上随机起伏,从而引起激光信号受到随机的寄生调制而呈现出额外的大气湍流噪声,使接收端的信噪比降低、误码率增加<sup>[5-7]</sup>。本文通过对大气湍流强度对激光通信系统性能指标(信噪比和误码率)影响的数值仿真,分析了引起系统性能指标下降的主要因素,对工程上提高激光通信质量具有一定的指导作用。

### 2 大气湍流对激光通信系统的影响

激光束在大气信道中传输过程中,大气湍流对其影响可以用 Kolmogorov 和 Rytov 的理论进行描述<sup>[6]</sup>。根据 Rytov 理论,激光束(平面波)在大气湍流场中传输的波动方程为:

$$u(\bar{r}) = A(\bar{r}) \cdot \exp[i\phi(\bar{r})] = u_0(\bar{r}) \exp(\Phi_1) \tag{1}$$

式中,  $u_0(\bar{r})$  为不考虑湍流效应时的光波的振幅;  $\Phi_1$  为微扰因子。

$$u_0(\bar{r}) = A_0(\bar{r}) \cdot \exp[i\phi_0(\bar{r})] \tag{2}$$

上式中指数部分微扰因子的表达式为:

$$\Phi_1 = \ln\left[\frac{A(\bar{r})}{A_0(\bar{r})}\right] + i[\phi(\bar{r}) - \phi_0(\bar{r})] = \chi + i\zeta \tag{3}$$

式中,  $\chi$  和  $\zeta$  为大气湍流引起光波的对数振幅和相位起伏,光波振幅和相位的起伏影响激光通信系统的信噪比和误码率。

假设在湍流强度均匀的情况下,平面波的对数强度起伏可以表示为<sup>[7]</sup>:

$$\sigma_{\ln R}^2 = 1.23 C_n^2 k^{7/6} L^{11/6} \tag{4}$$

其中,波数  $k = 2\pi/\lambda$ ;  $L$  为激光的传输距离。

对于通信系统而言,信噪比和误码率通常被用来评价系统的通信质量。误码率与平均的接收功率、闪烁强度和接收机噪声有关。本文仅考虑由大气湍流引起的噪声,忽略其他噪声来源,对数振幅的表达式为:

$$\chi = \ln\left[\frac{A(\bar{r})}{A_0(\bar{r})}\right] = \ln\left[\frac{A_0(\bar{r}) + A_i(\bar{r})}{A_0(\bar{r})}\right] = \ln(1 + \varepsilon) \tag{5}$$

式中,  $A_i(\bar{r})$  为噪声振幅;  $\varepsilon = A_i(\bar{r})/A_0(\bar{r})$  为噪声与信号的振幅比。

在弱湍流(折射率结构常数  $C_n^2 \leq 10^{-14} \text{ m}^{-2/3}$ ) 时,  $\varepsilon$  为小量,  $\chi = \ln(1 + \varepsilon) \approx \varepsilon$ 。对平面波  $\langle \varepsilon^2 \rangle = \langle \chi^2 \rangle = 0.31 C_n^2 k^{7/6} L^{11/6}$ , 系统的信噪比为:

$$\text{SNR} = \frac{I_0}{\langle I_i \rangle} = \frac{\langle A_0^2(\bar{r}) \rangle}{\langle A_i^2(\bar{r}) \rangle} = \frac{1}{\langle \varepsilon^2 \rangle}$$

$$= (0.31 C_n^2 k^{7/6} L^{11/6})^{-1} \tag{6}$$

式中,  $I_0$  为信号的强度;  $\langle I_i \rangle$  噪声强度的系综平均。

对于数字激光通信系统,从发射端输出的激光信号经过光学系统准直后,可当平面波处理。光接收机接收激光信号时,系统误码率为<sup>[8]</sup>:

$$\text{BER} = \frac{1}{2} \text{erfc}\left(\frac{Q}{\sqrt{2}}\right) \approx \frac{\exp(-Q^2/2)}{Q\sqrt{2\pi}} \tag{7}$$

其中,  $\text{erfc}$  为余误差函数;  $Q$  定义为:

$$Q = \frac{A_1 - A_0}{\sigma_1 + \sigma_0} \tag{8}$$

式中,  $A_1, \sigma_1$  分别为接收机接收到的比特是“1”时的信号和噪声;  $A_0, \sigma_0$  分别为接收机接收到的比特是“0”时的信号和噪声。对自由空间光通信系统,  $A_0 = 0, A_1 = \langle A_0(r) \rangle, \sigma_1 + \sigma_0 = \langle A_i(r) \rangle$ , 所以信噪比的表达式可以表示为<sup>[9]</sup>:

$$\text{SNR} = \frac{\langle A_1^2 \rangle}{\langle \sigma_1^2 + \sigma_0^2 \rangle} = Q^2 \tag{9}$$

那么,信噪比和误码率的关系可以表示为:

$$\text{BER} = \frac{\exp(-\text{SNR}/2)}{\sqrt{2\pi\text{SNR}}} \tag{10}$$

当折射率结构常数  $C_n^2 \geq 10^{-14} \text{ m}^{-2/3}$  时,大气湍流不再为弱湍流,  $\varepsilon$  不再为小量,  $\chi = \ln(1 + \varepsilon) \Rightarrow \varepsilon = e^\chi - 1$ , 利用泰勒级数对  $f(\chi) = e^\chi - 1$  进行展开,并作适当的近似简化处理可以得到信噪比和对数振幅起伏的关系:

$$\text{SNR} = \frac{1}{\langle \chi^2 + \chi^3 + \dots \rangle} \approx \frac{1}{\alpha \langle \chi^2 \rangle} (1 \leq \alpha \leq 2) \tag{11}$$

其中,  $\alpha$  为闪烁强度因子。

### 3 结果与分析

本文基于上述理论模型,数值仿真了大气湍流对激光通信系统误码率和信噪比的影响。考虑到与第三代光波通信系统主干网络的兼容、人眼的安全以及背景噪声,激光的波长选择 1550 nm; 表征大气湍流强度的折射率结构常数  $C_n^2$  分别取  $1.0 \times 10^{-15} \text{ m}^{-2/3}, 5.0 \times 10^{-15} \text{ m}^{-2/3}, 1.0 \times 10^{-14} \text{ m}^{-2/3}$ ; 其中  $C_n^2$  取  $1.0 \times 10^{-15} \text{ m}^{-2/3}, 5.0 \times 10^{-15} \text{ m}^{-2/3}$  为弱湍流区,  $1.0 \times 10^{-14} \text{ m}^{-2/3}$  为中强湍流区<sup>[10]</sup>。

图 1 给出了不同强度湍流条件下,对数振幅起伏和对数强度起伏随传输距离的变化规律。从图中明显看出,传输距离一定时,湍流强度越强,对数振幅和对数强度起伏越大。

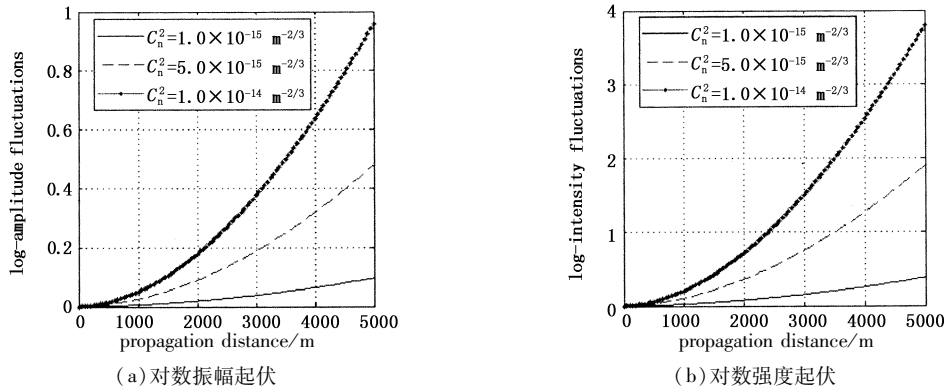


图1 对数振幅起伏和对数强度起伏随传输距离的变化规律

Fig.1 the log-amplitude variance and log-intensity fluctuations versus the propagation distance

在波长  $\lambda = 1550 \text{ nm}$  的激光输出时大气湍流强度与误码率的关系如图2所示。从图2可以看出：当传输距离达到 2550 m 时，即使在  $C_n^2 = 1.0 \times 10^{-15} \text{ m}^{-2/3}$  的弱湍流区，系统的误码率已经上升到  $1.109 \times 10^{-9}$ ，然而通常要求无线激光通信系统的误码率在  $10^{-9}$  以下（即有效通信距离）。因此，在弱湍流区，大气湍流对激光通信系统的影响也是不能忽略的。同时，当传输距离一定时，随着湍流强度的增强，误码率也随着迅速增加。当湍流强度达到  $C_n^2 = 10^{-14} \text{ m}^{-2/3}$  量级的中强湍流区，其影响程度远大于弱湍流区，致使有效通信距离将降低到 1000 m 以下，甚至更短。

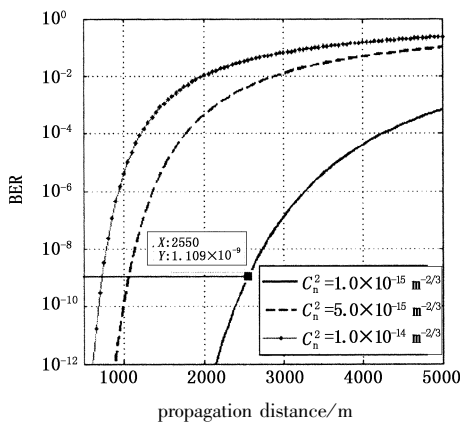


图2 不同湍流强度条件下，误码率随传输距离的变化规律

Fig.2 BER curves for propagation distance with various atmospheric turbulence intensity

图3描述了湍流强度为  $C_n^2 = 1.0 \times 10^{-15} \text{ m}^{-2/3}$  时，不同波长条件下误码率随传输距离的变化关系。对比不同波长对误码率的影响可以看出：波长越长大气湍流对误码率的影响越小，采用长波长的激光可以有效的降低系统的误码率，增加传输距离。例如，在弱湍流区，激光波长为 1550 nm 时有效传输距离为约为 2500 m，而 780 nm 时约为 1400 m。因此，在实际激光通信中选择合适的波长是十分必要的。

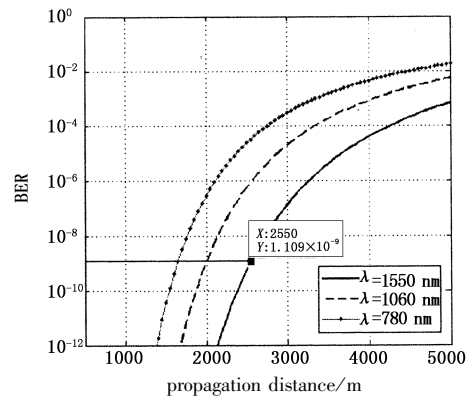


图3 不同波长条件下，误码率随传输距离的变化规律

Fig.3 BER curves for propagation distance with various wavelength

基于修正的信噪比模型，图4给出了在弱湍流区以及中强湍流区中取不同的  $\alpha$  值时，系统误码率随传输距离的变化规律。从图中可以看出：在中强湍流区，系统的有效通信距离降到了 500 m 以下，并且随着闪烁强度因子  $\alpha$  的增加而减小，远小于在弱湍流区中有效通信距离。对比图2和图4可以看出，基于修正的信噪比模型，以误码率为衡量指标，能更准确地反映系统的有效通信距离，与有关的试验结果更吻合<sup>[11]</sup>。

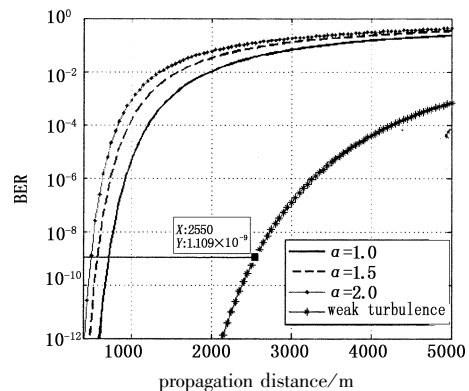


图4 强、弱湍流条件下误码率随传输距离的变化趋势

Fig.4 BER against propagation distance for strong-to-weak turbulence strength

#### 4 结 论

本文主要讨论了大气湍流效应中强度闪烁对激光通信系统误码率的影响。仿真结果表明:中强湍流区对误码率的影响明显大于弱湍流区,且中强湍流区系统的最大有效通信距离明显小于弱湍流区;当激光波长一定时,随着传输距离的增加系统的误码率迅速增大并最终趋于饱和;当湍流强度一定时,激光的波长越长对改善系统误码率越有利。同时,基于修正的信噪比模型,以误码率为衡量指标,能更准确的反映系统的有效通信距离,对工程上提高激光通信系统的质量具有一定的参考价值。

#### 参考文献:

- [1] Yu Jiping, Qi Wenzong, Guo Chunfeng, et al. Numerical simulation of laser propagation through atmospheric turbulence[J]. *Laser & Infrared*, 2008, 38(6): 523 - 527. (in Chinese)  
于季平, 齐文宗, 郭春风, 等. 激光大气传输特性的数值模拟[J]. *激光与红外*, 2008, 38(6): 523 - 527.
- [2] Wu Lin, Ying Jiaju, Geng Biao. Effect of laser propagation in the atmospheric turbulence [J]. *Laser & Infrared*, 2008, 38(10): 974 - 977. (in Chinese)  
武琳, 应家驹, 耿彪. 大气湍流对激光传输的影响[J]. *激光与红外*, 2008, 38(10): 974 - 977.
- [3] Xing Jianbin, Xu guoliang, Zhang Xuping. Effect of the atmospheric turbulence on laser communication system[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2005, 34(12): 1850 - 1852. (in Chinese)  
邢建斌, 许国良, 张旭苹, 等. 大气湍流对激光通信系统的影响[J]. *光子学报*, 2005, 34(12): 1850 - 1852.
- [4] Yuan Zongheng, Zhang Wentao. The analysis and research for the laser beam through atmospheric turbulence channel [J]. *Laser & Infrared*, 2006, 36(4): 272 - 274. (in Chinese)  
袁纵横, 张文涛. 大气湍流对激光信号传输影响的分析研究[J]. *激光与红外*, 2006, 36(4): 272 - 274.
- [5] M Uysa, J Li, M Yu. Error rate performance analysis of coded free-space optical links over gamma-gamma atmospheric turbulence channel [J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2006, 5(6): 1229 - 1233.
- [6] X M Zhu, J M Kahn. Free-space optical communication through atmospheric turbulence channels [J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2002, 50(8): 1293 - 1300.
- [7] Ke Xuzheng, Xi Xiaoli. Conspectus of wireless laser communication [M]. Beijing: Beijing University of Post and Communication Press, 2004: 245 - 248. (in Chinese)  
柯煦政, 席晓莉. 无线激光通信概论[M]. 北京: 北京邮电大学出版社, 2004: 245 - 248.
- [8] Yang Xianglin. Optical fiber communications systems [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2000: 145 - 146. (in Chinese)  
杨祥林. 光纤通信系统[M]. 北京: 国防工业出版社, 2000: 145 - 146.
- [9] G M Xu, X P Zhang, J W Wei, et al. Influence of atmospheric turbulence on FSO link performance [C]. *Proceedings of SPIE, Optical Transmission, Switching, and Subsystems*, 2004, 5281: 813 - 823.
- [10] R Karin, W Weiss. Influence of atmospheric turbulence an imaging quality of electro - optical sensors in different climates [C]. *Proceedings of SPIE*, 2002, 5237: 1 - 12.
- [11] A A Habash, K W Fischer, C C Cornish, et al. Comparison between experimental and theoretical probability of fade for free space optical communication [C]. *Proceedings of SPIE, Optical Wireless Communications*, 2002, 4873: 79 - 89.