

大气湍流对激光通信系统的影响*

邢建斌 许国良 张旭革** 王光辉 丁涛

(南京大学光通信工程研究中心, 南京 210093)

摘要 从分析激光在大气湍流场中的传输方程出发, 忽略系统中的其它噪声, 仅考虑由大气湍流引起的系统误码率, 讨论了激光信号在传输过程中的振幅起伏以及强度起伏; 推导出由大气湍流引起的光强起伏和系统误码率的关系, 结果表明: 在弱起伏条件下, 对于系统误码率为 10^{-9} 以下的要求, 光强起伏应小于 0.67; 随着湍流强度 C_n^2 的增大, 误码率增加很快; 采用长波长的激光进行传输可以有效地降低系统误码率.

关键词 激光通信; 大气湍流; 强度起伏; 误码率

中图分类号 TN911.4 **文献标识码** A

0 引言

激光通过大气传输时会与大气中的各种微粒发生相互作用, 产生大气吸收和大气散射效应, 使得接收端激光的功率减小、光斑的廓形发生变化. 另外, 由于大气中存在很多湍流旋涡, 当激光通过这些旋涡时光波的强度、相位在时间和空间上都会呈现随机起伏, 产生光强闪烁、光束弯曲和漂移、扩展以及接收端光斑发生畸变等现象. 因此在设计大气激光通信系统链路时首先必须考虑实际天气情况对系统的影响, 前人在这方面做了很多理论研究和实验观测^[1~3], 分析大气闪烁变化情况以及大气对激光传输的影响, 实验数据大都集中于讨论光强起伏的分布情况^[4~6], 有关光强起伏对系统误码率的影响方面的文章还不多见, 本文主要讨论由大气湍流对传输光束造成的强度起伏以及对系统误码率的影响.

1 光强闪烁效应

光强闪烁效应是当光束直径比湍流尺度大很多时, 光束截面内包含多个湍流旋涡, 每个旋涡各自对照射其上的那部分光束独立散射和衍射, 引起接收端光强忽大忽小的变化. 在激光通信系统中, 大气闪烁可引起接收端光电探测器的探测电流随机涨落, 导致探测系统的噪声增加. 激光在大气湍流场传播时, 其电磁分量可用 $\Psi(r, t)$ 统一表示, 满足如下方程^[7]

$$\nabla^2 \Psi(r, t) - \frac{\tilde{n}^2}{c^2} \frac{\partial^2 \Psi(r, t)}{\partial t^2} = 0 \quad (1)$$

式(1)的解可写为

$$\Psi(r, t) = A_0(r) \exp[i\varphi(r)] \exp[-i\omega t] = A_0(r) \exp[\chi + i\varphi(r)] \exp[-i\omega t] \quad (2)$$

式中 $A_0(r)$ 是没有湍流时的光波振幅, $A(r)$ 是湍流存在时的光波振幅, $\varphi(r)$ 是湍流存在时的光波相位, ω 是圆频率, 其中 $\chi = \ln \frac{A(r)}{A_0(r)}$ 是大气湍流引起的对数振幅起伏, 若用辐射强度表示, 则对数光强起伏为

$$\ln \frac{I(r, t)}{I_0} = \ln \left[\frac{A(r)}{A_0(r)} \right]^2 = 2 \ln \frac{A(r)}{A_0(r)} = 2\chi \quad (3)$$

假设传输激光光束为平面波, 并忽略系统中的其它噪声, 仅讨论由于大气湍流所引起的误码率. 当激光光束在大气中传播时, 由于大气湍流的存在, 使得光波的振幅发生变化, 可以近似地认为是在原有的光波信号上叠加了一个噪声.

由式(3)可以发现光强的对数变化

$$\ln \frac{I(r, t)}{I_0} = 2 \ln \frac{A(r)}{A_0(r)} = 2 \ln \frac{A_0(r) + A_i(r)}{A_0(r)} = 2 \ln(1 + \epsilon) \quad (4)$$

式中 $A_i(r)$ 是噪声的振幅, $\epsilon = \frac{A_i(r)}{A_0(r)}$ 是噪声与信号的振幅之比. 当 ϵ 很小时, 可以近似地认为

$$\chi = \ln(1 + \epsilon) \approx \epsilon \quad (5)$$

对于数字激光通信系统, 光接收机接受光信号时, 其误码率为^[8]

$$\text{BER} = \frac{1}{2} \left[\text{erfc} \left(\frac{Q}{\sqrt{2}} \right) \right] \quad (6)$$

式中 $Q = \frac{I_1 - I_0}{i_1 + i_0}$, I_1 和 I_0 是对应比特 1 和比特 0 的平均光强, i_1 和 i_0 对应比特 1 和比特 0 处由噪声引起的光强的均方根.

设定比特 0 对应的光强为 0 (即 $I_0 = 0$), 这样参数 Q 可表示为

$$Q = \frac{I_1}{i_1 + i_0} = \frac{\langle A_0^2(r) \rangle}{\langle A_i^2(r) \rangle} = \frac{1}{\langle \epsilon^2 \rangle} = \frac{1}{\langle \chi^2 \rangle} \quad (7)$$

*江苏省软件和集成电路专项经费和南京市科技人才创新创业基金(200502041)资助

** Tel: 025-83593302 Email: xpzhang@nju.edu.cn

收稿日期: 2004-12-07

实验表明^[5]:在弱起伏区($\sigma_\chi^2 < 0.3$),对数振幅的起伏统计服从正态分布,对数辐射强度的起伏也服从正态分布,即激光信号闪烁是对数正态分布.假设对数振幅 χ 服从均值为 $\langle \chi \rangle$,方差为 σ_χ^2 的正态分布,则对数光强服从均值为 $2\langle \chi \rangle$,方差为 $\sigma_{\ln I}^2$ 的正态分布.其中对数强度起伏方差与对数振幅起伏方差的关系为

$$\sigma_{\ln I}^2 = 4\sigma_\chi^2 \tag{8}$$

Tartaskii 运用 Rytov 近似对激光通过大气后的接收光强起伏,即光强闪烁给出了理论模型,在弱起伏条件下,根据此模型得出水平传输时的对数振幅方差为^[9]

$$\sigma_\chi^2 = 0.31C_n^2 k^{7/6} L^{11/6} \quad (\text{平面波}) \tag{9}$$

$$\sigma_\chi^2 = 0.124C_n^2 k^{7/6} L^{11/6} \quad (\text{球面波}) \tag{10}$$

由式(8)、(9)、(10)可得到

$$\sigma_{\ln I}^2 = 4\sigma_\chi^2 = 1.24C_n^2 k^{7/6} L^{11/6} \quad (\text{平面波}) \tag{11}$$

$$\sigma_{\ln I}^2 = 4\sigma_\chi^2 = 0.496C_n^2 k^{7/6} L^{11/6} \quad (\text{球面波}) \tag{12}$$

式中 C_n^2 是大气湍流折射率结构常数,表征湍流的强弱, $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ 是波数, L 是传输距离.根据达维斯基的划分^[10]:强湍流 $C_n^2 > 2.5 \times 10^{-13}$,弱湍流 $C_n^2 < 6.4 \times 10^{-17}$,中等强度湍流 $6.4 \times 10^{-17} < C_n^2 < 2.5 \times 10^{-13}$.

在实际激光通信系统中,从发送端出来的激光经过光学透镜准直后可当成平面波来处理,对于平面波

$$\langle \chi^2 \rangle = \sigma_\chi^2 = 0.31C_n^2 k^{7/6} L^{11/6} \tag{13}$$

由此可得误码率和光强起伏的关系

$$\text{BER} = \frac{1}{2} \left[\text{erfc} \left(\frac{4}{\sqrt{2}\sigma_{\ln I}} \right) \right] = \frac{1}{2} \left[\text{erfc} \left(\frac{4}{\sqrt{2} \times 1.24C_n^2 k^{7/6} L^{11/6}} \right) \right] \tag{14}$$

在弱起伏条件下,误码率和对数光强起伏方差的关系如图 1.另外也给出了各种湍流强度下误码率对传输距离的影响以及对传输波长的依赖关系,分别见图 2 和图 3.

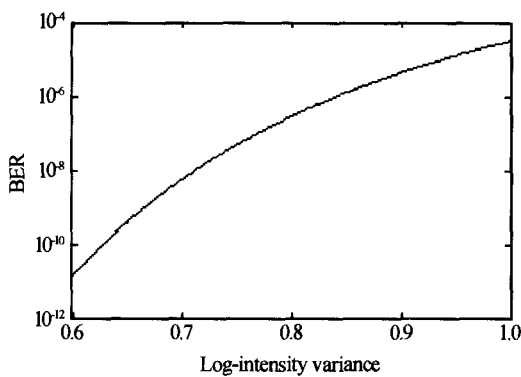


图 1 对数强度起伏方差和误码率的关系
Fig. 1 The log-intensity variance vs the BER

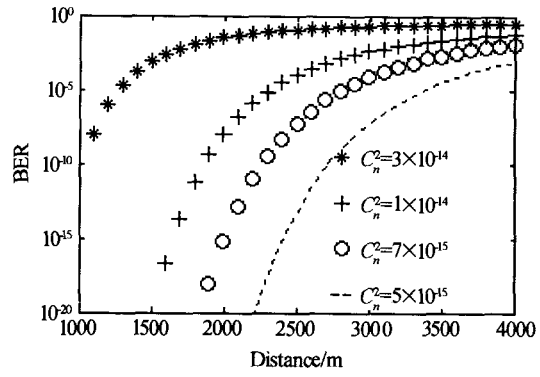


图 2 误码率和传输距离的关系
Fig. 2 The BER vs distance

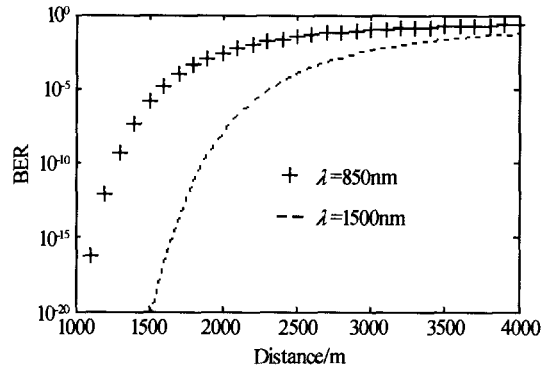


图 3 误码率对波长的依赖关系 ($C_n^2 = 1 \times 10^{-14} \text{ m}^{-2/3}$)
Fig. 3 BER vs wavelength when $C_n^2 = 1 \times 10^{-14} \text{ m}^{-2/3}$

在 2.5 Gbps 速率以下的激光通信系统中,一般要求系统误码率在 10^{-9} 以下.由图 1 可以看出,在弱起伏条件下,对于大气激光通信系统误码率小于 10^{-9} 的要求,光强起伏应小于 0.67.光强起伏一般随着天气的变化相应的发生变化,总体趋势是晴天的光强起伏比阴天、雨天的大,其中雨天时最小,这是因为雨不仅降低了地面温度,消减了温度差异,同时还减少了空气中的不均匀成分.前人的观测资料^[4]表明:晴天和天气突然变晴的最大光强起伏方差可达 1.0~1.6,阴天一般在 0.1 以下,雨天则更小.空气中雾滴、雨滴的密度较大时,几乎没有闪烁.此时影响通信链路距离的因素主要是大气衰减,其中最显著的是近地面的云和雾对激光信号的衰减.在信号衰减较小的晴朗天气,正午时分光强起伏可达到 1,此时系统的误码率可达 10^{-5} ,而在信道稳定但能见度较低、衰减较大的阴雨天气,系统误码率可稳定在 10^{-8} 以下.由图 2 和图 3 可以看出,传输距离一定时,随着湍流强度的增加,误码率上升很快.对于误码率为 10^{-9} 的要求,当 $C_n^2 = 5 \times 10^{-15} \text{ m}^{-2/3}$ 时,通信的有效距离接近 3 km,随着 C_n^2 的增加,传输的有效距离越来越小,当 C_n^2 达到 $3 \times 10^{-14} \text{ m}^{-2/3}$ 的量级时传输的有效距离已经降至 1 km 以下.另外当传输距离比较近时,采用长波长的光可以有效的降低误码率,增加传输距离,随着传输距离的增

加,误码率对波长的依赖关系逐渐变小.

2 结论

本文主要讨论了由大气湍流引起的激光通信系统的强度起伏和误码率. 结果表明:在弱起伏条件下,对于系统误码率为 10^{-9} 的要求,光强起伏应小于 0.67,可以采用多个发射孔径来减小光强闪烁效应,降低误码率;随着湍流强度的增大,误码率增加很快;采用长波长的光进行传输可以有效的降低系统误码率,增加传输距离. 本文没有涉及到各种天气情况下光信号的衰减,目前已有大量文献^[11]对激光大气传输的衰减特性进行了分析,在实际设计链路时还要综合考虑信号衰减对通信的影响.

参考文献

- Andrews L C, Phillips R L, Hopen C Y. Theory of optical scintillation. *J Opt Soc Am A*, 1999, **16**(6): 1417~1429
- 易翔,王蔚然. 激光雷达系统的数值仿真. 光子学报, 2004, **33**(1): 21~23
Yi X, Wang W R. *Acta Photonica Sinica*, 2004, **33**(1): 21~23
- 张逸新,陶纯堪. 湍流大气传输高斯谢尔光束的到达角起伏. 光子学报, 2005, **34**(3): 424~427
Zhang Y X, Tao C K. *Acta Photonica Sinica*, 2005, **34**(3): 424~427
- 万玲玉,蒋丽娟. 湍流大气中光强闪烁对光通信链路的影响. 光通信技术, 2002, **26**(2): 17~20
Wan L Y, Jiang L J. *Optical Communication Technology*, 2002, **26**(2): 17~20
- 任浩,魏宏建,谭吉春. 激光通信中大气闪烁引起探测噪声的计算机模拟. 应用光学, 2003, **24**(5): 22~24
Ren H, Wei H J, Tan J C. *Journal of Applied Optics*, 2003, **24**(5): 22~24
- 荣健,陈彦,胡渝. 激光在湍流大气中的传输特性和仿真研究. 无线光通信, 2003, **11**: 44~46
Rong J, Chen Y, Hu Y. *Wireless Optical Communications*, 2003, **11**: 44~46
- 陈亚孚. 介质传输光学. 北京:兵器工业出版社, 1995. 146
Chen Y F. *Media Transmission Optics*. Beijing: Weapon Industry Press, 1995. 146
- 徐公权. 光纤通信技术. 北京:机械工业出版社, 2002. 437
Xu G Q. *Fiber-Optic Communications Technology*. Beijing: China Machine Press, 2002. 437
- 张逸新. 随机介质中光的传播和成像. 北京:国防工业出版社, 2002. 211~214
Zhang Y X. *The Transmission and Imaging of the Light Wave in Random Medium*. Beijing: National Defence Industry Press, 2002. 211~214
- 吴健,乐时晓. 随机介质中的光传播理论. 成都:成都电讯工程学院出版, 1988. 142
Wu J, Yue S X. *The Theory of the Light Wave Transmission in Random Medium*. Chengdu: Cheng Du Telecommunication Engineering Institute Press, 1988. 142
- 牛燕雄,张鹏,姚建铨,等. 强激光对星载光电探测系统的干扰与破坏研究. 光子学报, 2004, **33**(7): 793~796
Niu Y X, Zhang P, Yao J Q, et al. *Acta Photonica Sinica*, 2004, **33**(7): 793~796

Effect of the atmospheric turbulence on laser communication system

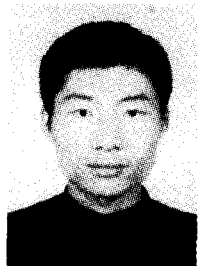
Xing Jianbin, Xu Guoliang, Zhang Xuping, Wang Guanghui, Ding Tao

Institute of Optical Communication Engineering, Nanjing University, Nanjing 210093

Received date: 2004-12-07

Abstract First, transmission equation of the laser transmitting through atmospheric turbulence channel was analyzed, ignoring other noises in the system, atmosphere turbulence was the only cause for Bit Error Rate (BER). Then, the amplitude variance and intensity variance of the laser signal were discussed, and the relationship between BER and the laser communication system was deduced. The result indicated that in the weak variance condition intensity variance should be below 0.67 for communication system with BER below 10^{-9} ; with turbulence intensity C_n^2 increasing, BER increased rapidly; adopting laser with longest wave to communicate can decrease BER effectively.

Keywords Laser communication; Atmospheric turbulence; Intensity variance; BER



Xing Jianbin was born on February 9, 1979, in Shannxi province. He graduated from applied physics department of Taiyuan University of Technology and got B. S. degree in 2003. Now he is studying for his M. S. degree in Nanjing University.