大气闪烁对近似无衍射激光通信系统的影响

李 萌 王中宇 高晓颖

(北京航空航天大学 仪器科学与光电工程学院，北京 100191) (中国航天科技集团公司 一院12所，北京 100854)

摘 要：在近似无衍射激光通信系统中，大气湍流的作用导致接收端光强起伏不定，这将对通信系统的误码率产生影响.以光强起伏的概率分布为基础，忽略系统中的其他噪声，推导出折射率结构常数、通信距离和激光波长等影响因素与误码率的关系式.通过计算机模拟，研究了误码率随折射率结构常数的变化规律，讨论了一定湍流强度下通信距离和激光波长对误码率的影响，并以10^{-9}为误码率标准，确定了通信距离的允许范围.结果表明，合理地选择天气和日照条件、减小通信距离以及选择长波长的激光器可以减弱大气湍流对误码率的影响.

关 键 词：光通信；大气湍流；计算机模拟；误码率

中图分类号：TN 929.12

文献标识码：A **文 章 编 号**：1001-5965(2008)10-1147-04

Effect of atmospheric scintillation on laser communication system by pseudo-non-diffracting beam

Li Meng Wang Zhongyu

(School of Instrument Science and Opto-electronics Engineering, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China)

Gao Xiaoying

(The 12th Institute of the First Academy of China Aerospace Science and Technology Corporation, Beijing 100854, China)

Abstract: In pseudo-non-diffracting beam communication system, the intensity variance on the receiver is brought by atmospheric turbulence, and thus the bit-error rate(BER) of the communication system could be effected. Ignoring other noises in the system, the relationship between BER with the refractive index structure parameter, communication distance and wavelength was deducted based on the distribution of intensity variance. The changing law of BER along with index structure parameter was researched through computer simulation, the impact of communication distance and wavelength on BER was discussed and the allowed range of communication distance was determinated under BER criterion of 10^{-9}. It is indicated that the atmospheric turbulence's effect to BER can be weaken by choosing appropriate weather and sunlight condition, decreasing communication distance and using laser with longer wavelength.

Key words: optical communication; atmospheric turbulence; computer simulation; bit-error rate

无衍射光束的概念由Durnin于1987年首次提出，它的物理特性是：光束中心斑直径可以很小且不随传播距离改变[1-2].构造一个理想的无衍射光束需要无限能量，在实验室只能获得近似的无衍射光束.在焦深范围内，近似无衍射光的中心光斑尺寸基本保持不变，可认为其发散角为0.由于近似无衍射光的传播距离远大于相同初始半径的高斯光束的瑞利距离，更适合用于大气激光通信.大气激光通信是目前解决通信领域中“最后1 km”问题的有效途径，已经在城域网等短距离

收稿日期：2007-10-10

基金项目：航天科技创新基金资助项目(2006-2007)

作者简介：李 萌(1982—)，男，山西侯马人，博士生，limenglee@aspe.buaa.edu.cn.

通信领域内发挥了重要作用.如美国 Terabeam 公司以及英国 Cablefree 公司已经推出了可视距离内的大气激光通信系统,文献[3]中介绍的一款大气激光通信系统,其通信距离为 100～2 000 m[3].近似无衍射激光通信以近似无衍射光波为载体,在大气中传递信息,属于大气激光通信的范畴,例如文献[4]即研究了一种以无衍射激光为信息载体的通信系统.

在大气激光通信系统中,误码率是一个非常重要的参量.由于大气湍流的作用,光束截面内产生光强起伏(即大气闪烁)和光束弯曲、漂移(即方向抖动),影响通信系统的误码率,进而影响通信质量[5-6].文献[6－7]研究了大气湍流对大气激光通信的影响方式,文献[8]研究了湍流中光波传播的统计特性,文献[9]主要讨论了振动对大气激光通信误码率的影响,并研究了减小误码率的方法,而有关大气湍流对误码率影响的文献并不多见.有关振动以及大气湍流所带来的光束漂移等因素对通信系统的影响,文献[6－7]都做出了分析,在实际的系统设计中应当综合考虑.在大气激光通信系统中,使用最多的是直接检测系统,即检测通信系统接收端的光强,因此光强起伏直接影响通信系统的误码率.本文着重研究大气湍流引起的光强起伏(大气闪烁)对近似无衍射激光通信系统误码率的影响.

1 大气闪烁的理论基础

有关大气闪烁对光束传播影响的研究文献很多,其中最重要且最具有影响的是文献[10],其研究成果也是大多数后继研究者工作的基础.文献[10]给出了一定湍流条件下光强闪烁的理论模型,即激光束通过对数振幅方差 $\sigma_\chi^2<0.3$ 的湍流大气后,光束的振幅起伏满足对数正态分布规律[11].设通信系统接收端未受大气湍流影响时的光波振幅和光强分别为 A_0 和 I_0,受湍流影响时的光波振幅和光强分别为 A 和 I,则有量值关系 $I_0=A_0^2$.设对数振幅起伏 $\chi=\ln A-\ln A_0$,按照文献[10]中的理论,χ 满足正态分布,设 χ 的均值为 $E(\chi)$(对于任意变量 t,$E(t)$ 表示 t 的均值,下同),标准差为 σ_χ.由 $\chi=\ln A-\ln A_0=\ln\dfrac{A}{A_0}$ 可得,受到大气湍流影响时的振幅 $A=A_0\exp\chi$,$I=A^2(A_0\exp\chi)^2=I_0\exp(2\chi)$.

2 大气闪烁对误码率的影响

由于通信系统接收端光电探测器的位置是固定的,只有光电探测器所处位置的光强对信号的接收产生影响,光束横截面上其他位置的光强分布对光电探测器不产生作用.本文中的近似无衍射激光通信采用数字激光通信的方式,选用二元单极性码作为通信系统的码型,即信号只含有“1”和“0”两种码元,发送“1”码元时传输一定光强的激光,而发送“0”码元时不传输激光.

对于数字激光通信系统而言,误码率可表示为[12]

$$P_e=\frac{1}{2}\left[\operatorname{erfc}\left(\frac{Q}{\sqrt{2}}\right)\right] \tag{1}$$

式中,对于任意变量 t,$\operatorname{erfc}(t)$ 是误差补偿函数,定义为 $\operatorname{erfc}(t)=\dfrac{2}{\sqrt{\pi}}\int_t^\infty \mathrm{e}^{-u^2}\,\mathrm{d}u$;$Q=\dfrac{I_1-I_2}{\sigma_1+\sigma_2}$,$I_1$ 和 I_2 分别是对应发送“1”和“0”两种码元时的接收光强的平均值,σ_1 和 σ_2 分别对应发送“1”和“0”两种码元时由噪声引起的接收光强的标准差[12].显然在本文中,I_2 和 σ_2 都为 0,噪声即为光强的起伏,其值为 $I-I_0$,所以 $\sigma_1=\sqrt{D(I-I_0)}$(对于任意变量 t,$D(t)$ 表示 t 的方差,下同).设受湍流影响时接收端接收到的平均光强等于未受湍流影响时的光强,即 $I_1=E(I)=I_0$.经推导有下式成立:

$$Q=\frac{I_1-I_2}{\sigma_1+\sigma_2}=\frac{I_1}{\sigma_1}=\frac{E(I)}{\sqrt{D(I-I_0)}}=\frac{I_0}{\sqrt{D[A_0^2\exp(2\chi)-A_0^2]}}=\frac{A_0^2}{A_0^2\sqrt{D[\exp(2\chi)-1]}}=\frac{1}{\sqrt{D[\exp(2\chi)-1]}}=\frac{1}{\sqrt{D[\exp(2\chi)]}}=\frac{1}{\sqrt{E[\exp(4\chi)]-\{E[\exp(2\chi)]\}^2}} \tag{2}$$

对于任意正态分布的随机变量 z 和任意常数 a,有如下数学关系:

$$E[\exp(az)]=\exp\left[aE(z)+\frac{1}{2}a^2\sigma_z^2\right] \tag{3}$$

所以有

$$E[\exp(4\chi)]-\{E[\exp(2\chi)]\}^2=\exp[4E(\chi)+8\sigma_\chi^2]-\{\exp[2E(\chi)+2\sigma_\chi^2]\}^2 \tag{4}$$

当满足 $E(I)=I_0$ 时,$E(\chi)$ 和 $-\sigma^2\chi$ 不再相互独立,它们的量值必须满足关系式[11]:

$$E(\chi)=-\sigma_\chi^2 \tag{5}$$

将式(4)和式(5)代入式(2)可得

$$Q=\frac{1}{\sqrt{\exp(4\sigma_\chi^2)-1}} \tag{6}$$

将式(6)代入式(1)可得

$$P_e=\frac{1}{2}\left[\operatorname{erfc}\left(\frac{1}{\sqrt{2\exp(4\sigma_\chi^2)-2}}\right)\right] \tag{7}$$

理想无衍射光的发散角和理想平面波的发散角都为 0,近似无衍射光的发散角与实际使用的平面波的发散角都很小,属于准直光束,对数振幅方差可由下式求出[11]:

$$\sigma_\chi^2 = 0.31 C_n^2 k^{7/6} L^{11/6} \tag{8}$$

其中,C_n^2 是折射率结构常数;$k=\frac{2\pi}{\lambda}$是波数,λ 是激光的波长;L 是通信距离.将式(8)代入式(7)可得

$$P_e = \frac{1}{2}\left[\mathrm{erfc}\left(\frac{1}{\sqrt{2\exp(1.24 C_n^2 k^{7/6} L^{11/6}) - 2}}\right)\right] \tag{9}$$

可见,P_e受到 C_n^2,λ 和 L 的综合影响.

3　P_e受各影响因素分析

3.1　C_n^2 的影响

C_n^2 表征了湍流的强度,C_n^2 越大,湍流越强,反之则越弱.根据大量的观测,近地面的 C_n^2 的典型值分布于 $10^{-17}\sim10^{-12}\,\mathrm{m}^{-2/3}$ 之间[11].C_n^2 会受到天气影响,阴天或雨天 C_n^2 较小,晴天 C_n^2 较大;在一天之内,C_n^2 的值随着光照条件而改变,一般白天 C_n^2 较大,晚上 C_n^2 较小[11].

以 $\lambda=850$ nm 用于短距离室外通信的近似无衍射激光通信系统为例.在数字光通信中,一般以 10^{-9}作为误码率指标[12],本文也以 10^{-9}作为误码率指标.图 1 反映了当 $L=1\,000$ m 时,P_e随 C_n^2 变化的曲线.由于 C_n^2 变化的范围很大,而 $\sigma_\chi^2=0.31C_n^2k^{7/6}L^{11/6}$,所以在其他条件一定时,$\sigma_\chi^2$ 的变化范围也在几个数量级之间,此范围内的 P_e会有很大变化.由图 1 可知,当 $C_n^2>6.78\times10^{-6}\,\mathrm{m}^{-2/3}$ 时,P_e就会超过 10^{-9}.

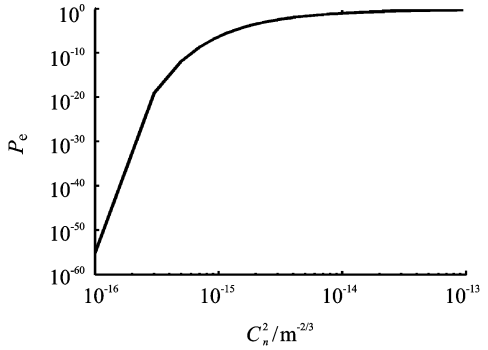

图 1　C_n^2 对 P_e的影响

3.2　L 的影响

图 2 反映了当 $\lambda=850$ m,C_n^2 分别为 $3\times10^{-14}\,\mathrm{m}^{-2/3}$和 $2\times10^{-14}\,\mathrm{m}^{-2/3}$时,$P_e$与 L 的关系.当 L 增大时,P_e随之增大.图 2 中,满足 $P_e<10^{-9}$ 的最大通信距离分别是 126.6 m(当 $C_n^2=3\times10^{-14}\,\mathrm{m}^{-2/3}$时)和 157.9 m(当 $C_n^2=2\times10^{-14}\,\mathrm{m}^{-2/3}$时).

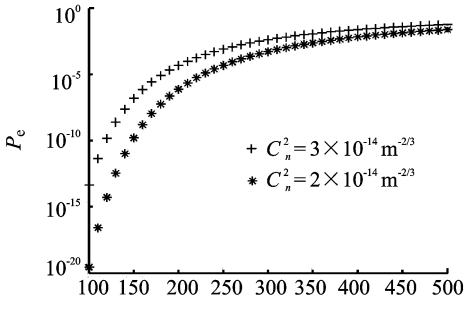

图 2　L 对 P_e的影响

3.3　λ 的影响

图 3 反映了当 $C_n^2=2\times10^{-4}\,\mathrm{m}^{-2/3}$时(即中等湍流强度条件下),$\lambda$ 分别为 850 nm 和 1 550 nm 时的 P_e与 L 的关系.

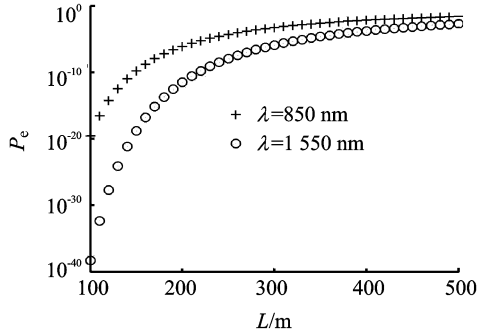

图 3　λ 对 P_e的影响

由图 3 可知,在其他条件相同的情况下,λ 越长,P_e越低.因此选择长波长的激光器,是降低 P_e的方法之一.由图 3 可知,满足 $P_e<10^{-9}$的最大通信距离分别是 157.9 m(当 $\lambda=850$ nm 时)和 231.4 m(当 $\lambda=1\,550$ nm 时).可见,在同一 P_e指标下,λ 越长的激光通信系统允许的最大通信距离也越远.

4　结　论

本文主要研究了近似无衍射激光通信系统中,大气闪烁对误码率的影响.通过推导误码率的公式,得出误码率与折射率结构常数、激光波长和通信距离的函数关系,并通过计算机模拟加以分析.折射率结构常数所表征的大气湍流强度对误码率有很大影响,这种影响随天气等条件变化,当湍流强度大到一定程度时,误码率会很高,超过系统的设计指标,严重影响通信质量.应尽量在避开晴天和日照强烈的时刻,以减小折射率结构常数带来的影响.在其他条件相同的情况下,通信距离越远,误码率越高,激光器的波长越长,误码率越

低.在中等湍流条件下,为满足误码率小于 10^{-9} 的条件,通信距离应在 200 m 以内.考虑到大气衰减的因素,应优先选择波长为 1 550 nm 的激光器作为近似无衍射激光通信的光源.

参考文献(References)

[1] 周莉萍,赵斌,李柱.无衍射光束理论与实现[J].光学精密工程,1997,5(4):14-19
Zhou Liping, Zhao Bin, Li Zhu. Theory and generation of non-diffracting bessel beams[J]. Optics and Precision Engineering, 1997, 5(4): 14-19(in Chinese)

[2] 王中宇,周聪,张朵.无衍射光技术在瞄准系统中的理论与原理试验[J].北京航空航天大学学报,2006,32(11):1337-1340
Wang Zhongyu, Zhou Cong, Zhang Duo. Basic theory and its principled experiment of non-diffracting interference in aiming system[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2006, 32(11): 1337-1340(in Chinese)

[3] 左昉,谢福增.二路收发的空间光通信系统[J].激光与红外,2004,34(6):419-421
Zuo Fang, Xie Fuzeng. Two-transmitter-two-receiver free space optical communication system[J]. Laser & Infrared, 2004, 34(6): 419-421(in Chinese)

[4] Yu C, Wang M R, Varela A J, et al. High-density non-diffracting beam array for optical interconnection[J]. Optics Communications, 2000, 177(1): 369-376

[5] 邵兵,孙立宁,曲东升,等.自由空间光通信 ATP 系统中精瞄偏转镜的设计[J].光学精密工程,2006,14(1):43-47
Shao Bing, Sun Lining, Qu Dongsheng, et al. Design of fine pointing tip/tilt mirror of ATP system for free space optical communication[J]. Optics and Precision Engineering, 2006, 14(1): 43-47(in Chinese)

[6] 李晓峰,张永健,陈彦,等.大气信道对空-地光通信的影响分析[J].应用光学,2003,24(6):14-17
Li Xiaofeng, Zhang Yongjian, Chen Yan, et al. Analysis of effects of atmospheric channel on space-to-ground optic communication[J]. Journal of Applied Optics, 2003, 24(6): 14-17(in Chinese)

[7] 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[J].应用光学,2003,24(5):22-24
Ren Hao, Wei Hongjian, Tan Jichun. Computer simulation of the detectiong noise caused by atmospheric scintillation in laser communication[J]. Journal of Applied Optics, 2003, 24(5): 22-24(in Chinese)

[8] Guo Lixin, Wu Wanfang. Study on the statistical properties of laser beam propagation through the turbulent atmosphere in the slant-path[C]//The 2006 4th Asia-Pacific Conference on Environmental Electromagnetics. Dalian: IEEE Conference Proceedings, 2006: 881-884

[9] Tyson R K, Canning D E, Tharp J S, et al. Measurement of the bit-error rate of an adaptive optics, free-space laser communications system, part 1: tip-tilt configuration, diagnostics, and closed-loop results[J]. Optical Engineering Press, 2005, 44(9): 096002/1-096002/6

[10] Tatarskii V I. Wave propagation in a turbulent medium [M]. New York: McGraw-Hill Book Company, 1961: 110-112

[11] 张逸新,迟泽英.光波在大气中的传输与成像[M].北京:国防工业出版社,1997:110-113
Zhang Yixin, Chi Zeying. The transmission and imaging of light in atmosphere[M]. Beijing: National Defence Industry Press, 1997: 110-113(in Chinese)

[12] 杨英杰.光纤通信技术[M].广州:华南理工大学出版社,2004:137
Yang Yingjie. Fiber-optic communications technology[M]. Guangzhou: South China University of Technology Press, 2004: 137(in Chinese)

(责任编辑:赵海容)