

文章编号: 1001-3806(2010)02-0261-04

舰船激光通信中大气湍流对系统误比特率的影响

赵英俊, 王江安, 任席闯, 王乐东

(海军工程大学 电子工程学院, 武汉 430033)

摘要: 为了研究舰船激光通信系统中采用多光束发射与接收技术时, 大气湍流对系统误比特率造成的影响, 采用了激光在大气湍流场中的传输方程进行解析求解的方法, 忽略系统中其它噪声, 仅考虑由大气湍流引起的系统误比特率, 得到了在不同发射天线数目和相关系数条件下, 传输距离、大气信道间距、对数振幅方差和系统误比特率的关系。结果表明, 在弱起伏条件下, 随着发射天线数目的增多或相关系数的减小, 系统误比特率减少很快; 湍流强度增大, 系统误比特率增加; 传输激光波长增大, 系统误比特率降低; 当发射天线数目一定时, 随着大气信道间距变大, 系统误比特率降低。

关键词: 光通信; 多光束发射与接收; 误比特率; 大气湍流

中图分类号: TN929.12

文献标识码: A

doi:10.3969/j.issn.1001-3806.2010.02.032

Effect of the atmospheric turbulence on the bit error rate of laser communication among the ships

ZHAO Ying-jun, WANG Jiang-an, REN Xi-chuang, WANG Le-dong

(Academy of Electronic Engineering, Naval University of Engineering, Wuhan 430033, China)

Abstract: The effect of the atmospheric turbulence on the bit error rate in a laser communication system with multiple beam transmission and reception was analyzed. Ignoring other noises in the system, atmosphere turbulence was the only cause for bit error rate. After solving the equation of laser transmission in atmospheric turbulence field, the relation between the system bit error rate, transmission range and space of atmospheric channels was obtained under the condition of the different number of transmitting antenna and correlation coefficients. The result indicated: under the weak fluctuation condition, the system bit error rate reduces quickly while increasing the number of transmitting antenna or decreasing the correlation coefficient or increasing the space between atmospheric channels; the system bit error rate increases while the turbulence intensity enhances; the system bit error rate reduces while the wavelength of transmission laser increases. When the transmitting antenna number is definite, system bit error rate will reduce with the space of atmospheric channels increasing.

Key words: optical communication; multiple beam transmission and reception; bit error rate; atmospheric turbulence

引言

舰船激光通信是利用在海洋上空大气中传输的激光束作为信息载体, 实现通信。舰船激光通信具有容量大、数据率高、体积重量小、抗电磁干扰能力强、安全保密性好、通信带宽极宽, 可以实现远距离通信^[1]。而舰船激光通信易受天气条件的影响, 海面上空的雾、雪、雨、风和湍流等气象因素会对舰船激光通信系统信号的接收产生不良的影响, 会造成信号功率衰减和误码的产生, 因此, 在设计舰船激光通信系统链路时必须考虑天气情况对系统误比特率的影响。激光经湍流

介质传输后的光强起伏分布, 已经有大量的实验数据, 美国 AstroTerra 公司做过 1, 2, 4, 8, 16 孔径的近地大气通信实验, 使归一化的光强起伏方差降低 3dB 到 8dB。但是此实验是在光束之间互不相关的基础上进行的^[2]。本文中重点分析了多光束发射与接收技术中, 选择不同发射天线数目、大气信道间距下, 相关系数对系统误比特率造成的影响。

1 大气湍流效应

在海洋上空^[3], 大气最重要的特征是通常处在湍流运动状态。由于太阳照射等因素所产生的大气微小温度随机变化将导致大气风速随机变化, 从而形成大气的湍流运动。激光在湍流大气中传输时, 传输光束波前将随机起伏, 从而引起光束漂移、光束展宽和光强闪烁^[4]。其中, 光强闪烁是指激光通过大气信道后, 光束强度忽大忽小, 光斑忽明忽暗, 空气折射率的随机

基金项目: 海军“十一五”预研资助项目(4010607020201)

作者简介: 赵英俊(1984-), 男, 硕士, 主要从事舰船大气激光通信方向研究。

E-mail: zyj_008@163.com

收稿日期: 2009-01-08; 收到修改稿日期: 2009-03-19

变化引起波前失真,造成接收相位的随机变化,当光束直径大于湍流直径时,光束直径内包含许多个湍流漩涡,每个漩涡各自对光束独立的散射和衍射,引起光束强度在时间和空间上的随机起伏,光强忽大忽小。激光在大气湍流场中传播时满足如下方程:

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

方程的解可写为^[5]:

$$\varphi(r, t) = B(r) \exp[i\varphi(r)] \exp(-i\omega t) = B_0(r) \exp[\alpha + i\varphi(r)] \exp(-i\omega t) \quad (2)$$

式中, $B(r)$, $\varphi(r)$ 表示有湍流时光波的振幅和相位, $B_0(r)$ 表示没有湍流时光波的振幅, 其中 $\alpha = \ln \frac{B(r)}{B_0(r)}$, 表示大气湍流引起的对数振幅起伏, c 为光速。

则对数光强起伏为:

$$\ln \frac{I(r)}{I_0(r)} = \ln \left| \frac{B(r)}{B_0(r)} \right|^2 = 2\alpha \quad (3)$$

大气湍流导致光波相位发生变化,从而导致波振幅变化。仅考虑大气湍流对系统误比特率造成的影响,所以振幅的变化可以近似看成是由噪声引起的,设由噪声引起的振幅变化量为 $B_z(r)$, 则对数光强起伏可表示为:

$$\ln \frac{I(r)}{I_0(r)} = \ln \left| \frac{B_0(r) + B_z(r)}{B_0(r)} \right|^2 = 2 \ln(1 + \gamma) \quad (4)$$

式中, $\gamma = \frac{B_z(r)}{B_0(r)}$, 当噪声很小时,可近似 $\ln(1 + \gamma) = \gamma = a$ 。对于数字激光通信系统,光接收机接收光信号时误比特率和光强起伏的关系^[6]:

$$P_e = \frac{1}{2} \left[\operatorname{erfc} \left(\frac{Q}{\sqrt{2}} \right) \right] \quad (5)$$

式中, P_e 表示系统误比特率, $Q = \frac{I_1 - I_0}{i_1 + i_0}$, I_1 是发送“1”码时对应的平均光强, I_0 是发送“0”码时对应的平均光强。 i_1 和 i_0 对应“1”码和“0”码时由噪声引起的光强的均方根。所以参量 Q 可表示为:

$$Q = \frac{I_1}{i_1 + i_0} = \frac{\langle B_0^2(r) \rangle}{\langle B_z^2(r) \rangle} = \frac{1}{\langle \gamma^2 \rangle} = \frac{1}{\langle a^2 \rangle} \quad (6)$$

假设噪声很小,分析在弱起伏条件下,大气湍流对系统误比特率造成的影响。在弱起伏条件下,光强 I 的概率密度服从对数正态分布。大气闪烁(光强起伏)的大小可用对数振幅方差 $\langle \delta_x^2 \rangle$ 表示^[7], 即 $\langle \delta_x^2 \rangle = \langle a^2 \rangle$ 。

$$\begin{cases} \text{对于平面波: } \langle \delta_x^2 \rangle = 0.31 C_n^2 k^{7/6} L^{11/6} \\ \text{对于球面波: } \langle \delta_x^2 \rangle = 0.125 C_n^2 k^{7/6} L^{11/6} \end{cases} \quad (7)$$

舰船激光通信系统的发射、接收天线实际上就是一个光学望远镜^[8], 通过折射、反射和折射-反射光学系统实现, 可视为一个能够接收自由空间特定波长微弱光

信号的物镜。其中, C_n^2 为大气折射率结构常数。综合考虑海上激光通信中光束发散角的压缩要求, 并要满足人眼安全的扩束要求, 在激光发射端从一些天线径之间的距离大于大气相干长度的发射镜中发射多束互不相干的激光束, 在远场接收端非相干叠加, 以减轻湍流效应对激光大气传输造成的影响, 实现大气信道的有效补偿, 发射/接收天线模型如图 1 所示。

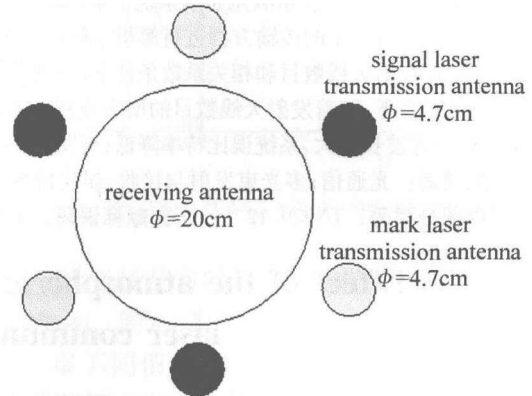


Fig. 1 Laser transmission/receiving antenna model

采用 n 个天线发射激光束时, 在接收端会同时收到来自不同发射天线发射出的光信号, 这些光束间会发生干涉, 假设光束间的归一化相关系数为 $B(r, L)$, 单光束的对数振幅方差为 δ_x^2 , 则接收端 n 束相干光束叠加后的对数振幅方差为^[9]:

$$\delta_{n,x}^2 = \left\{ \frac{1}{n} (1 - B(r, L)) + B(r, L) \right\} \langle \delta_x^2 \rangle \quad (8)$$

此时系统误比特率为:

$$P_e = \frac{1}{2} \left[\operatorname{erfc} \left(\frac{Q}{\sqrt{2}} \right) \right] = \frac{1}{2} \left[\operatorname{erfc} \left(\frac{1}{\sqrt{2} \times \delta_{n,x}^2} \right) \right] \quad (9)$$

在实际通信系统中, 为保证接收端在发射光束之内, 发射光束发散角不会很小。光束到达接收端时, 光斑尺寸通常要比接收孔径大很多。因此, 用平面波近似是可行的。在弱起伏条件下, 只考虑 $\sqrt{\lambda L} \gg l_0$ 的情况, l_0 为湍流内尺度, 实际中这种情况总是满足的。光束传输距离 L 后, 接收平面的归一化相关系数为 $B(r, L)$, 它可表示为^[4]:

$$B(r, L) = \frac{\int_0^\infty J_0 \left(\frac{1}{r} \sqrt{\frac{xk}{L}} \right) \left(1 - \frac{\sin x}{x} \right) x^{-4/3} dx}{\int_0^\infty \left(1 - \frac{\sin x}{x} \right) x^{-4/3} dx} \quad (10)$$

式中, r 表示大气信道间距(即发射孔径间距); k 为波数; $J_0 \left(\frac{1}{r} \sqrt{\frac{xk}{L}} \right)$ 为零阶贝塞尔函数。

当发射天线数目一定时, 随着大气信道间距变大, 各光束通过相同大气湍流的可能性降低, 信道相关性下降, 使光束间相互补偿的几率提高, 所以接收面上光

强起伏较小,从而导致系统误比特率降低;随着传输距离的增加,系统误比特率降低。仿真结果如图2所示。

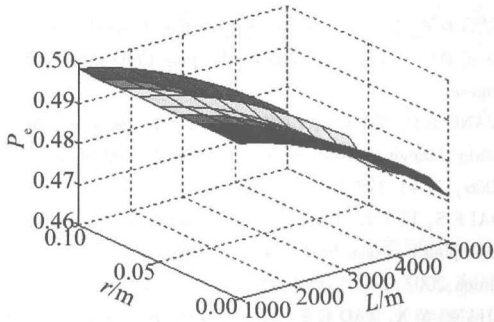


Fig. 2 Relation between bit error rate and transmission space and the channel space ($n=4$)

在舰船激光通信系统中,系统要求误比特率小于 10^{-9} ,当 $n=4, r=0$ 时, $\langle \delta_x^2 \rangle$ 要小于0.667方可满足系统要求。在弱起伏条件下($\langle \delta_x \rangle < 0.3$),改变光束间的相关系数 r ,得到系统误比特率和 $\langle \delta_x^2 \rangle$ 的关系如图3和图4所示。

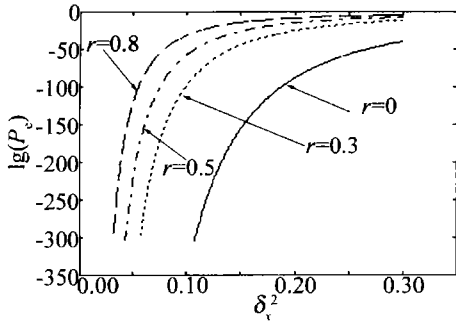


Fig. 3 Relation between bit error rate and logarithm oscillation amplitude variance ($n=4$)

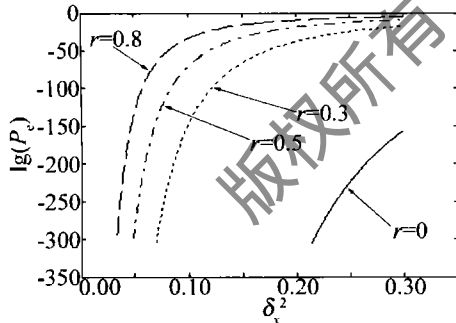


Fig. 4 Relation between bit error rate and logarithm oscillation amplitude variance ($n=8$)

根据达维斯对湍流强度的划分:强湍流 $C_n^2 > 2.5 \times 10^{-13} \text{ m}^{-2/3}$, 中等湍流 $6.4 \times 10^{-17} \text{ m}^{-2/3} < C_n^2 < 2.5 \times 10^{-13} \text{ m}^{-2/3}$, 弱湍流 $C_n^2 < 6.4 \times 10^{-17} \text{ m}^{-2/3}$, 当 $\lambda = 1.55 \mu\text{m}$ 时,湍流强度发生变化,系统误比特率和传输距离的关系如图5所示。从图5可以看出,湍流强度增加,系统误比特率上升,在湍流强度 $C_n^2 = 6 \times 10^{-15} \text{ m}^{-2/3}$ 时,为满足系统误比特率 10^{-9} 的要求,通信距离约为3817m。当 $C_n^2 = 3 \times 10^{-14} \text{ m}^{-2/3}$, λ 分别为 $1.55 \mu\text{m}$, $0.86 \mu\text{m}$ 时,系统误比特率和传输距离的关系如图6

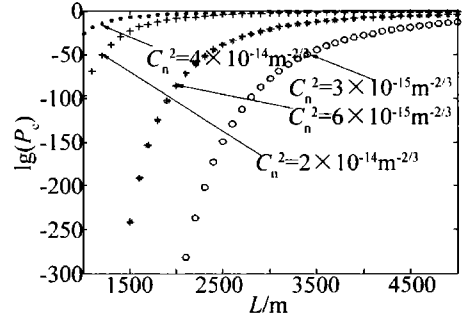


Fig. 5 Relation between bit error rate and transmission space ($n=4, r=0.3$)

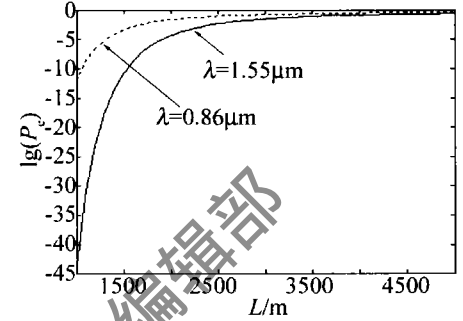


Fig. 6 Relation between bit error rate and transmission space ($n=4, r=0.3$)

所示。从图6可以看出,传输激光波长增大,可以使系统误比特率降低。

洋面上空大气湍流特性^[10-12],当气温与海温相差越大时,温度起伏对湍流影响最大;相反,海面湿度越小,湍流强度越强。在较低湿度条件下,尤其在红外窗口区,湿度扰动对湍流影响特别大。当气温小于海温时,湍流强度随着海面风速的增大而增大,后随风速的增大而减弱;相反,湍流强度总体上随着海面风速的增大而减弱。从图3和图4可以看出,发射天线数目一定,相关系数越大,系统误比特率越高。同时随着 $\langle \delta_x^2 \rangle$ 增加,系统误比特率逐渐增大。当光强起伏一定时,可通过增加发射天线数目或减小相关系数,降低误比特率,从而满足了系统要求,降低了大气湍流对系统误比特率造成的影响。

2 结论

由以上讨论可知,在舰船激光通信系统中采用多光束发射和接收技术可以降低大气湍流对系统误比特率造成的影响,在满足系统误比特率要求的前提下,要综合考虑发射天线数目、相关系数、湍流强度以及传输激光波长对系统误比特率的影响。根据洋面上的大气湍流特性,选择合适的多光束发射/接收系统,减轻大气湍流对系统误比特率造成的影响,从而降低系统误比特率,增加有效通信距离。

参考文献

[1] WU S H. Laser communication wireless between ships [J]. Laser & Infrared, 2003, 33(2): 91-93 (in Chinese).

- [2] LIU W H, WU J. Influence of space between atmospheric channels and beams' number on scintillation[J]. Optics & Optoelectronic Technology, 2003, 1(4): 15-17 (in Chinese).
- [3] LI X, ZHANG X Z, LÜ K, *et al.* The effect of turbulence on the channel in the laser communication between the ships [J]. Applied Science and Technology, 2008, 35(4): 15-17 (in Chinese).
- [4] WU J, YUE S X. Theory of light transmit in random medium[M]. Chengdu: Chengdu Telecommunication Engineering College Press, 1988: 128-148 (in Chinese).
- [5] XING J B, XU G L, ZHANG X P, *et al.* Effect of the atmospheric turbulence on laser communication system[J]. Acta Photonica Sinica, 2005, 34(12): 1850-1852 (in Chinese).
- [6] XU G Q. Fiber-optic communications technology[M]. Beijing: China Machine Press, 2003: 437 (in Chinese).
- [7] ZHANG Y X. The transmission and imaging of the light wave in random medium[M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2002: 211-214 (in Chinese).
- [8] GUO Y. Research on technology for atmosphere duet on the sea and APT simulation[D]. Wuhan: Naval University of Engineering, 2007: 30-40 (in Chinese).
- [9] DENG D Z. Atmospheric channel affecting to wireless-laser communication[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2004: 29-38 (in Chinese).
- [10] WANG L L, KE X Z, CHENG L X. The testing system for optical power through atmosphere[J]. Chinese Journal of Light Scattering, 2006, 17(4): 378-383 (in Chinese).
- [11] DAI F S, LI Y K. Estimation of the optical turbulence in the marine atmospheric surface layer based on meteorological[J]. Acta Optica Sinica, 2007, 27(2): 191-196 (in Chinese).
- [12] ZHANG Y X, TAO C K. Effects of the turbulent scales on aperture averaging of a Gaussian-Schell beam propagation in a turbulent atmosphere[J]. Laser Technology, 2005, 29(3): 318-321 (in Chinese).

(上接第 260 页)

- (1): 1-7.
- [7] XIAO X, ZHAO G P, LÜ B D. Improvement of the simulation algorithm of flattened Gaussian beams passing through hard-aperture optics [J]. Laser Technology, 2005, 29(1): 106-108 (in Chinese).
- [8] JI X L, LÜ B D. Focal shifts of flattened Gaussian beams passing through an aperture lens [J]. Laser Technology, 2003, 27(1): 55-57 (in Chinese).
- [9] LUO Sh R, LÜ B D. Propagation of flattened gaussian beams through an aperture optical system [J]. Chinese Journal of Lasers, 2002, 29(5): 425-428 (in Chinese).
- [10] LÜ B D, LUO Sh R. Approximate propagation equations of flattened Gaussian beams passing through a paraxial *ABCD* systems with hard-edge aperture [J]. Journal of Modern Optics, 2001, 48(15): 2169-2178.
- [11] COLLINS S A. Lens-system diffraction integral written in terms of matrix optics [J]. J O S A, 1970, 60(7): 1168-1177.

版权所有 ©