

不同传输模型条件下的孔径平均效应分析

吴晓军^{1,2} 王红星^{1,2} 孙雪³ 宋博^{1,2}

¹海军航空工程学院电子信息工程系, 山东 烟台 264001
²山东省信号与信息处理重点实验室, 山东 烟台 264001
³中国人民解放军 91960 部队, 广东 汕头 515074

摘要 在无线光通信中,通信系统发射的光束通常近似看作平面波或球面波,而实际的发射光束是高斯波束,所以在研究通信系统性能指标时必然会存在差异。运用理论分析和实验仿真的方法,在不考虑湍流内、外尺度影响和弱湍流的前提下,对比分析了平面波、球面波以及高斯光束模型条件下孔径平均效应的差异。在此基础上,进一步分析了三种传输模型在误码率(BER)性能方面的差异。结果表明,高斯波束条件下孔径平均对误码率的影响明显,最先达到饱和状态,球面波次之,平面波较为平缓。

关键词 光通信;无线光通信;传输波束;孔径平均;误码率

中图分类号 TN929.12 文献标识码 A doi: 10.3788/LOP48.120101

Analysis of Aperture Averaging Effect under Different Transmitting Beam Models

Wu Xiaojun^{1,2} Wang Hongxing^{1,2} Sun Xue³ Song Bo^{1,2}

¹Department of Electronic Engineering, Naval Aeronautical and Astronautical University, Yantai, Shandong 264001, China
²Key Laboratory of Shandong Province on Signal and Information Processing, Yantai, Shandong 264001, China
³The Unit 91960 of People's Liberation Army, Shantou, Guangdong 515074, China

Abstract The transmitting beams are usually approximated as plane wave or spherical wave in free space optical communication (FSO) systems. But the actual beam is a Gaussian beam, and there are many differences when we study the performance of FSO system with the approximation model. By using the methods of theoretical analysis and simulation, without considering the impact of the inner and outer scales of turbulence, we analyze the difference of aperture averaging effect among different transmitting beams. The differences of bit-error rate (BER) performance are then analyzed. The results show that Gaussian wave has apparent impact on the improvement of BER performance by aperture averaging, and saturation is reached firstly, followed by spherical wave. Plane wave is relatively gentle.

Key words optical communications; optical wireless communication; transmitting beam; aperture averaging effect; bit-error rate

OCIS codes 010.1330; 010.3310; 060.4510

1 引言

无线光通信具有传输带宽高、组网机动灵活、抗电磁干扰能力强、保密性好等优点,近年来一直是通信领域研究的热点^[1]。当激光信号经过大气时,大气湍流造成接收光强的闪烁现象,影响通信信号的正确接收,

收稿日期: 2011-08-08; 收到修改稿日期: 2011-08-23; 网络出版日期: 2011-10-21

基金项目: 山东省“泰山学者”建设工程专项经费资助课题。

作者简介: 吴晓军(1984—),男,硕士研究生,助理工程师,主要从事无线光通信理论方面的研究。

E-mail: 195358836@qq.com

导师简介: 王红星(1962—),男,教授,博士生导师,主要从事光通信技术、现代通信新技术等方面的研究。

E-mail: buaawhx@163.com

导致通信链路产生较大的误码率(BER)。大量的实验表明,孔径平均效应在一定程度上可以改善误码率性能,有效地提高通信质量,是抑制大气湍流的有效方法^[2]。2005年,Yukse^[3]推导了平面波和球面波传输模型下的孔径平均效应模型,发现随着湍流强度的不断增强,平均效应越来越明显。2001年,张逸新等^[4]在考虑内外尺度和湍流强度影响的条件下,分别得出了平面波和球面波的孔径平均因子公式,使得孔径平均效应模型更加完善。现有的孔径平均效应分析多数只是在平面波和球面波条件下进行的,而实际的发射光束为高斯光束,所以对比分析三种传输模型下的孔径平均效应具有很重要的实际意义。

本文提出了平面波、球面波以及高斯光束的孔径平均效应模型,在此基础上对比分析了平均因子随孔径尺寸的变化趋势,并且研究了三种传输模型对无线光通信误码率性能影响的差异。

2 孔径平均效应模型

光波在湍流大气中的光强起伏一般称为闪烁,闪烁强度随探测面积的增大而减小(孔径大小达到一定的尺寸会出现饱和),这种效应称为孔径平均效应^[5],最早是在20世纪50年代从天文观测中发现的。现有的孔径平均效应模型多数是在平面波以及球面波条件下建立的,在这里就不加以推导,直接使用现有的孔径平均因子公式。相对而言,高斯光束更加符合无线光通信系统的实际情况,但是现有的文献中很难找到在高斯光束条件下开展的孔径平均效应研究。

本文只考虑基模高斯光束,并且限定在准直激光束的条件下讨论。此时,接收端的光强起伏方差为^[6]

$$\sigma_1^2(D) = 8\pi^2 k^2 L \int_0^{1/\infty} \kappa \Phi_n(\kappa) \exp\left\{-\frac{L\kappa^2}{k(\Lambda_1 + \Omega_G)} [(1 - \bar{\Theta}_1 \xi)^2 + \Lambda_1 \Omega_G \xi^2]\right\} \times \left\{1 - \cos\left[\frac{L\kappa^2}{\kappa} \left(\frac{\Omega_G - \Lambda_1}{\Omega_G + \Lambda_1}\right) \xi (1 - \bar{\Theta}_1 \xi)\right]\right\} d\kappa d\xi, \quad (1)$$

式中 $k = 2\pi/\lambda$ 是空间波数, $\Phi_n(\kappa)$ 是表示折射率起伏的三维功率谱密度, L 表示传输距离, Λ_1 是入射光束的半径, $\Omega_G = 2L/(kW_G^2)$ 是表征聚光透镜半径的无量纲参数。从(1)式中很容易看出,当聚光透镜半径等于入射波的半径时(即 $\Omega_G = \Lambda_1$), $\sigma_1^2(D) = 0$, 表示此时不会出现光强闪烁现象。

在忽略内尺度和无限外尺度的条件下,高斯光束的对数光强起伏方差为

$$\sigma_{\ln r}^2(D) \approx 0.53\sigma_1^2 \left(\frac{\Omega_G - \Lambda_1}{\Omega_G + \Lambda_1}\right)^2 \int_0^1 \xi^2 (1 - \bar{\Theta}_1 \xi)^2 \int_0^\infty \eta^{1/6} \exp\left\{-\frac{\eta}{\eta_r} \left[1 + \frac{\eta_r}{\Lambda_1 + \Omega_G} [(1 - \bar{\Theta}_1 \xi)^2 + \Lambda_1 \Omega_G \xi^2]\right]\right\} d\eta d\xi. \quad (2)$$

在几何光学近似下, $\Omega_G = 16L/(kD^2)$ 。

在(2)式中如果对保留的积分进行近似计算,则等式变为

$$\sigma_{\ln r}^2(D) \approx 0.49\sigma_1^2 \left(\frac{\Omega_G - \Lambda_1}{\Omega_G + \Lambda_1}\right)^2 \left(\frac{1}{3} - \frac{1}{2} \bar{\Theta}_1 + \frac{1}{5} \bar{\Theta}_1^2\right) \left[\frac{\eta_r}{1 + 0.40\eta_r(2 - \bar{\Theta}_1)/(\Lambda_1 + \Omega_G)}\right]^{7/6}, \quad (3)$$

此时

$$\eta_r = \frac{\left(\frac{1}{3} - \frac{1}{2} \bar{\Theta}_1 + \frac{1}{5} \bar{\Theta}_1^2\right)^{-6/7} (\sigma_B/\sigma_1)^{12/7}}{1 + 0.56\sigma_B^{12/5}}, \quad (4)$$

式中 σ_B^2 表示高斯光束的 Rytov 方差。

按照同样的思路,可以推出小尺度条件下对数光强起伏方差为

$$\sigma_{\ln y}^2(D) \approx 1.06\sigma_1^2 \int_0^{1/\infty} \frac{1}{(\eta + \eta_y)^{11/6}} \exp\left[-\frac{\eta(1 - \bar{\Theta}_1 \xi)^2}{\Lambda_1 + \Omega_G}\right] d\eta d\xi \approx \frac{1.27\sigma_1^2 \eta_y^{-5/6}}{1 + 0.40\eta_y/(\Lambda_1 + \Omega_G)}, \quad \eta_y \gg 1 \quad (5)$$

此时 $\eta_y = 3\left(\frac{\sigma_1}{\sigma_B}\right)^{12/5} (1 + 0.69\sigma_B^{12/5})$ 。将(3)式和(5)式代入 $\sigma_1^2(D) = \exp[\sigma_{\ln r}^2(D) + \sigma_{\ln y}^2(D)] - 1$ 中^[7], 得到高斯光束下的光强起伏方差。然后将所得结果代入孔径平均因子的定义式 $A = \sigma_1^2(D)/\sigma_1^2(0)$ 中, 就可以得到高斯光束下的孔径平均因子。

平面波和球面波的孔径平均因子采用文献[3]中的模型, 即: $A = \{1 + 1.062[kD^2/(4L)]^{7/6}\}^{-1}$ (平面

波); $A = \{1 + 0.214[kD^2/(4L)]^{7/6}\}^{-1}$ (球面波)。

3 误码率模型

在湍流大气中,误码率是衡量无线光通信系统性能的重要指标。通信系统的误码率与平均接收功率、光强起伏方差、接收噪声等因素密切相关。

假设接收机的噪声为高斯白噪声,检测器的输出电流是随机变化的, $i = i_S + i_N$ (i_S 为信号电流, i_N 为噪声电流),则 $\sigma_i^2 = \sigma_S^2 + \sigma_N^2$ 。当不考虑其他湍流影响因素时,经过湍流的信噪比为^[6]

$$R_{SN} = \frac{\langle i_S \rangle}{\sigma_i^2} = \frac{R_{SN0}}{1 + A\sigma_i^2 R_{SN0}}, \quad (6)$$

式中 R_{SN0} 为无湍流时的信噪比。

对于开关键控(OOK)调制的无线光通信系统而言,假设信道为高斯白噪声信道,在非相干检测下,误码率为^[8]

$$R_{BE} = 0.5 \exp(-0.5 R_{SN}). \quad (7)$$

将(6)式代入(7)式得

$$R_{BE} = 0.5 \exp\left(-0.5 \times \frac{R_{SN0}}{1 + A\sigma_i^2 R_{SN0}}\right). \quad (8)$$

(8)式就可以将误码率与孔径平均因子联系起来,进而与孔径尺寸建立关系。从(8)式可以看出,随着孔径尺寸的不断增大,孔径平均因子减小,孔径效果明显,进而使得误码率也随之降低。

4 仿真分析

4.1 不同传输模型下的孔径平均效应

在仿真实验中,假设波长 $\lambda = 1.55 \mu\text{m}$,波束半径 $W_0 = 1.59 \text{ cm}$,传输距离 $L = 500 \text{ m}$,光强起伏方差 $\sigma_i^2 = 1.38$,并且采用准直激光束。为了讨论方便,不考虑湍流内、外尺度对通信系统的影响。仿真得到的孔径平均因子 A 随 $d = [kD^2/(4L)]^{1/2}$ 的变化关系如图 1 所示。

从图 1 可以看出:1) 随着孔径尺寸的不断增大,孔径平均因子的下降趋势逐渐变快,说明孔径平均效果越明显。在这一点上,三种传输模型是一致的。所以说不管在何种传输波形下,大孔径接收都可以有效地抑制大气湍流效应。2) 当 $[kD^2/(4L)]^{1/2} < 0.7749$ 时,孔径平均因子的变化趋势都相对较为平缓,当 $[kD^2/(4L)]^{1/2} > 0.7749$ 时,孔径平均因子的变化趋势明显的加快。同时可以看出,高斯波束孔径平均因子下降趋势最为明显,球面波次之,平面波最为平缓,说明三种波束的孔径平均效果依次递减。

4.2 不同传输模型下的误码率性能

假设无湍流时的信噪比 $R_{SN0} = 35 \text{ dB}$,光强起伏方差 $\sigma_i^2 = 0.432$ 。误码率随孔径尺寸的变化趋势如图 2 所示。

从图 2 可以看出:1) 随着孔径尺寸的不断增大,误码率降低,这与前面的理论分析结果一致。对于高斯波束而言,当 $D < 2.2 \text{ cm}$ 时,接收孔径对误码率的改善非常明显,而当 $D > 2.2 \text{ cm}$ 时,误码率基本不发生变化;对

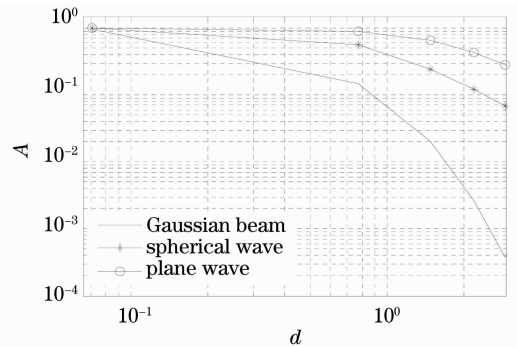


图 1 不同传输模型条件下孔径平均因子 A 随 $d = [kD^2/(4L)]^{1/2}$ 的变化

Fig. 1 Relation between aperture averaging factor A and $d = [kD^2/(4L)]^{1/2}$ under different transmitting beams

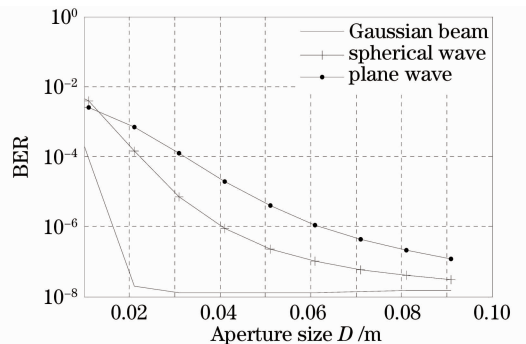


图 2 不同传输波束下误码率随孔径尺寸的变化

Fig. 2 Relation between BER and aperture size under different transmitting beams

于球面波束和平面波束而言,当 $D < 9$ cm 时,误码率变化较为明显,当 $D > 9$ cm 时,误码率的变化不是很明显。所以,无限制地增加接收孔径尺寸不仅造成制作工艺上的困难和成本的增加,而且对误码率的改善也会达到饱和。2) 在不同的传输波形条件下,孔径平均对误码率的影响各不相同。在高斯波束条件下,接收孔径对误码率的影响最为明显,并且很快达到饱和状态,球面波束次之,平面波变化最为平缓。所以,在条件允许的情况下,选择合适的传输波束对改善误码率也具有一定的参考价值。

5 结 论

在不同传输波束条件下,孔径平均效应必然存在差异。针对这一问题,首先在平面波、球面波以及高斯光束条件下的孔径平均效应模型的基础上,仿真分析了孔径平均因子随孔径尺寸的变化趋势,结果表明:随着湍流强度的不断增强,孔径平均效应会越来越明显。其次,通过建立误码率模型,研究了不同传输波束对无线光通信系统误码率性能的影响差异,结果表明,高斯波束条件下,孔径平均对误码率的影响最为明显,球面波次之,而平面波变化相对比较缓慢。

参 考 文 献

- 1 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
- 2 M. A. Khalighi, N. Schwartz, S. Bourennane *et al.*. Fading reduction by aperture averaging and spatial diversity in optical wireless systems[J]. *J. Optical Communications and Networking*, 2009, **1**(6): 580~593
- 3 Heba Yuksel. Studies of the Effects of Atmospheric Turbulence on Free Space Optical Communications[D]. College Park, University of Maryland, 2005. 67~80
- 4 Zhang Yixin, Chi Zeyang. Laser Wave Propagation and Imaging Throng Atmosphere[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2001. 154~165
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, 2001. 154~165
- 5 Ma Xiaoshan, Zhu Wenyue, Rao Ruizhong. Annular-aperture averaging factor of scintillations in turbulent atmosphere[J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(9): 1543~1545
马晓珊, 朱文越, 饶瑞中. 湍流大气中光波闪烁的圆环孔径平均因子[J]. *光学学报*, 2007, **27**(9): 1543~1547
- 6 Larry C. Andrews, Ronald L. Phillips. Laser Beam Scintillation with Applications [M]. Bellingham: SPIE Optical Engineering Press, 2001. 189~192
- 7 L. C. Andrews, R. L. Phillips, C. Y. Hopen. Aperture averaging of optical scintillations: power fluctuations and the temporal spectrum[J]. *Waves Random Media*, 2000, **10**(1): 57~74
- 8 S. Haykin. Communications Systems[M]. 3th ed. New York: Wiley, 1994. 532~540