

文章编号:1001-5078(2012)01-0022-04

· 激光应用技术 ·

传输波束对无线光通信误码率性能的影响分析

吴晓军^{1,2}, 王红星^{1,2}, 刘敏^{1,2}, 朱宗健³

(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,研究通信系统性能时多数是在平面波、球面波条件下进行的,而实际无线光通信系统发射的激光是高斯波束,所以研究不同波束对通信系统性能的影响具有重要意义。本文从孔径平均效应出发,运用理论分析和实验仿真的方法,在不考虑湍流内、外尺度影响的前提下,首先描述了高斯波束条件下,孔径平均因子随孔径尺寸的变化趋势,并且比较了不同湍流强度条件下孔径平均效应的差异;在OOK调制和非相干检测条件下,比较不同传输波束在弱湍流大气中传输时,孔径平均在改善误码率性能方面存在的差异。结果表明:高斯波束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:无线光通信;高斯波束;孔径平均;误码率

中图分类号:TN249 **文献标识码:**A **DOI:**10.3969/j.issn.1001-5078.2012.01.005

Analysis of the effect of transmitting beam on the BER performance of FSO communication system

WU Xiao-jun^{1,2}, WANG Hong-xing^{1,2}, LIU Min^{1,2}, ZHU Zong-jian³

(1. Depart of Electronic and Information Engineering, Naval Aeronautical and Astronautical University, Yantai 264001, China;

2. Key Laboratory of Shandong Province on Signal and Information Processing, Yantai 264001, China;

3. The Unit 91960 of People's Liberation Army, Shantou 515074, China)

Abstract: Most present researches of FSO system are based on the assumption of plane wave or spherical wave, while the actual transmitting beam of FSO system is Gaussian beam, so the study of the effect of different transmitting beam on the performance of FSO system is important. Starting from the aperture averaging effect, without considering the impact of the turbulent inner and outer scale, the effect of turbulent strength on the aperture averaging effect is analyzed under the Gaussian beam condition. It's shown that the aperture averaging effect is more obvious by increasing the turbulent strength. And then, under the weak turbulent condition, the effect of transmitting beam on the improvement of BER performance by aperture averaging effect is simulated. The results show that Gaussian-beam wave has the most apparent impact on BER performance, and saturation occurs first, followed by spherical wave. Plane wave is relatively gentle.

Key words: optical wireless communications; Gaussian-beam wave; aperture averaging effect; BER

1 引言

无线光通信与其他通信方式相比,具有传输带宽高、抗电磁干扰能力强、组网机动灵活和保密性好等优点,近几年来一直是通信领域研究的热点。

在现有的无线光通信系统中,光源发出的激光束基本都是高斯光束,而目前在研究通信系统性能的时候,通常是将传输光束近似看作平波或球面波

来处理^[1]。2010年,法国的 M. A. Khalighi, N. Aitamer 等人研究了强湍流条件下平面波、球面波以及高斯光束下的孔径尺寸对平均因子的影响,发现存

基金项目:山东省“泰山学者”建设工程专项经费项目资助。

作者简介:吴晓军(1984-),男,硕士研究生,助理工程师,主要研究方向为无线光通信理论等。E-mail:195358836@qq.com

收稿日期:2011-07-04; **修订日期:**2011-12-26

在一定的差异,而在不同传输波束条件下接收孔径对通信系统性能的影响是否有所不同仍有待研究^[2];2005年,马里兰大学的 Heba Yuksel 在他的博士论文中总结了平面波以及球面波条件下的孔径平均效应模型,并研究了湍流对通信系统性能的影响,但是没有考虑高斯波束条件下,孔径平均对性能的影响^[3];2010年,日本早稻田大学的 Chedlia Ben Naila 和 Abdelmoula Bekkali 研究了高斯光束下不同强度湍流对误码率性能(BER)的影响,得出了孔径平均效应对强湍流的抑制最明显,但仍然没有对比分析不同光束条件下误码率性能之间的差异^[4]。从上面的总结可以看出,目前的大多数研究要么是将传输波束近似看作平面波或球面波处理,要么只是单独分析高斯波束条件下湍流对无线光通信系统性能的影响,而不同传输波束在影响通信系统误码率方面必然会有差异,所以有必要对比分析三种波束如何对误码率产生影响,这对于无线光通信理论研究具有重要的实际意义。

本文首先介绍高斯波束条件下的孔径平均效应,分析了不同强度对湍流平均效应的影响,并且研究了平面波、球面波以及高斯光束条件下误码率随孔径尺寸的变化趋势,旨在分析出不同传输波束对无线光通信系统误码率性能影响的差异。

2 孔径平均效应

在本文中,我们只考虑基模高斯波束,并且是在准直激光束的条件下讨论的。此时,接收端的光强起伏方差为^[5]:

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

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 是入射波束的半径; $\Omega_c = 2L/kW_c^2$ 是表征聚光透镜半径的量纲一参数,而 W_c 是高斯透镜的半径。从等式(1)中容易看出,当聚光透镜半径等于入射波的半径时(即 $\Omega_c = \Lambda_1$), $\sigma_I^2(D) = 0$, 表示此时不会出现光强闪烁现象。在本文中我们只考虑在没有内尺度和外尺度影响时的孔径平均效应。

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:

$$\sigma_{\ln x}^2(D) = 2.61 C_n^2 k^2 L \int_0^\infty \kappa^{-8/3} \times \exp\left\{-\frac{L\kappa^2}{k(\Lambda_1 + \Omega_c)}[(1 - \bar{\Theta}_1\xi)^2 + \Lambda_1\Omega_c\xi^2]\right\} \times \left\{1 - \cos\left[\frac{L\kappa^2}{\kappa}\left(\frac{\Omega_c - \Lambda_1}{\Omega_c + \Lambda_1}\right)\xi(1 - \bar{\Theta}_1\xi)\right]\right\} d\kappa d\xi \quad (2)$$

如果在几何光学近似下, $\Omega_c = 16L/kD^2$, D 表示孔径尺寸。如果将积分变量变为 $\eta = L\kappa^2/k$ 时,式(2)变为:

$$\sigma_{\ln x}^2(D) \cong 0.53 \sigma_1^2 \left(\frac{\Omega_c - \Lambda_1}{\Omega_c + \Lambda_1}\right)^2 \int_0^\infty \xi^2 (1 - \bar{\Theta}_1\xi)^2 \times \int_0^\infty \eta^{1/6} \exp\left[-\frac{\eta}{\eta_x} \left[1 + \frac{\eta_x}{\Lambda_1 + \Omega_c} ((1 - \bar{\Theta}_1\xi)^2 + \Lambda_1\Omega_c\xi^2)\right]\right] d\eta d\xi \quad (3)$$

在式(3)当中如果对保留的积分采取进行近似计算,则等式变为:

$$\sigma_{\ln x}^2(D) \cong 0.49 \sigma_1^2 \left(\frac{\Omega_c - \Lambda_1}{\Omega_c + \Lambda_1}\right)^2 \times \left(\frac{1}{3} - \frac{1}{2}\bar{\Theta}_1 + \frac{1}{5}\bar{\Theta}_1^2\right) \left[\frac{\eta_x}{1 + 0.40\eta_x(2 - \bar{\Theta}_1^2)/(\Lambda_1 + \Omega_c)}\right]^{7/6} \quad (4)$$

此时:

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

而式(5)当中的 σ_B^2 表示高斯波束的 Rytov 方差:

$$\sigma_B^2 \cong 3.86 \sigma_1^2 \left\{0.40[(1 + 2\bar{\Theta}_1)^2 + 4\Lambda_1^2]^{5/12} \times \cos\left[\frac{5}{6}\tan^{-1}\left(\frac{1 + 2\bar{\Theta}_1}{2\Lambda_1}\right)\right] - \frac{11}{16}\Lambda_1^{5/6}\right\} \quad (6)$$

按照同样的思路,我们可以推出小尺度条件下对数光强起伏方差为:

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

此时:

$$\eta_y = 3 \left(\frac{\sigma_1}{\sigma_B}\right)^{12/5} (1 + 0.69\sigma_B^{12/5}) \quad (7)$$

将式(4)和式(7)代入 $\sigma_I^2(D) = \exp[\sigma_{\ln x}^2(D) + \sigma_{\ln y}^2(D)] - 1$ 中^[6],得到高斯波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 $A = \frac{\sigma_i^2(D)}{\sigma_i^2(0)}$ 中^[7], 就可以得到高斯波束下的孔径平均因子。

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^[8]:

$$\text{SNR} = \frac{\langle i_s \rangle}{\sigma_i^2} = \frac{\text{SNR}_0}{1 + A\sigma_i^2\text{SNR}_0} \quad (8)$$

式中, SNR_0 为无湍流时的信噪比; A 为孔径平均因子; σ_i^2 为光强起伏方差。

对于 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^[9]:

$$\text{BER} = 0.5 \exp(-0.5 \text{SNR}) \quad (9)$$

把式(8)代入式(9)得:

$$\text{BER} = 0.5 \exp\left(-0.5 \times \frac{\text{SNR}_0}{1 + A\sigma_i^2\text{SNR}_0}\right) \quad (10)$$

上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。从式(9)可以看出, 由于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, 下面通过仿真进一步分析该结论。

4 仿真与结果分析

4.1 不同湍流强度下的孔径平均因子

在本仿真实验中, 假设: 波长 $\lambda = 0.633 \mu\text{m}$, 波束半径 $W_0 = 1 \text{ cm}$, 传输距离 $L = 500 \text{ m}$ 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。

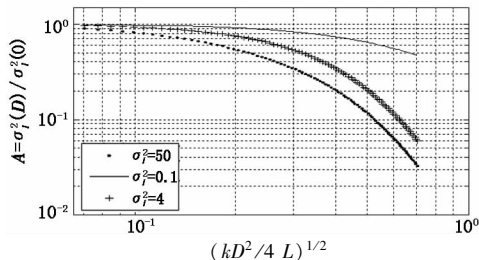


图1 不同湍流强度下平均因子随 $(kD^2/4L)^{1/2}$ 的变化

从图1中可以看出:

(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。

对于平面波和球面波来说, 这一结论同样适用, 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 $0 < (kD^2/4L)^{1/2} < 10^{-1}$ ($1 < D < 1.4 \text{ mm}$) 时, 不同湍流强度下的孔径平均因子基本上相同; 当 $(kD^2/4L)^{1/2} > 10^{-1}$ ($D > 1.4 \text{ mm}$) 时, 随着湍流强度的不断增强, 孔径平均因子的下降趋势越来越明显, 也就是说, 接收孔径对强湍流的抑制效果更加明显。

4.2 不同传输波形下的误码率分析

假设: $\text{SNR}_0 = 35 \text{ dB}$, $\sigma_i^2 = 0.432$ 。在这里, 只考虑弱湍流情况, 平面波和球面波采用文献[10]中提到的孔径平均效应模型。误码率随孔径尺寸的变化趋势如图2所示。

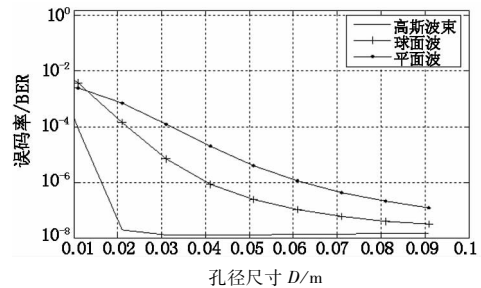


图2 不同传输波束下误码率随孔径尺寸的变化

从图2中可以看出:

(1) 随着孔径尺寸的不断增大, 误码率会随之降低, 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; 对于球面波束和平面波束而言, 当 $D < 9 \text{ cm}$ 时, 误码率变化较为明显, 当 $D > 9 \text{ cm}$ 时, 误码率的变化不是很明显。所以, 无限制的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也各不相同。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模型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, 接收孔径的平均效应必然存在差异, 针对这一问题, 首先介绍了高斯波束条件下的孔径平均效应, 并且对比了不同湍流强度对平均效应的影响, 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。孔径平均在不同波束

条件下对误码率的影响也会有所不同。本文在仿真实验的基础上,对比了平面波、球面波和高斯波束条件下,误码率随着孔径尺寸变化趋势的差异。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 Heming, Zhao Xinyan. Principle and application of laser[M]. Beijing: Electronic Industry Press, 2009: 64 – 88. (in Chinese)
陈鹤鸣, 赵新彦. 激光原理及应用[M]. 北京: 电子工业出版社, 2009: 64 – 88.
- [2] M A Khalighi, N Schwartz, S Bourennane. Turbulence mitigation by aperture averaging in wireless optical systems[C]. 2009, 6: 59.
- [3] Heba Yuksel. Studies of the effects of atmospheric turbulence on free space optical communications[D]. 2005: 67 – 80.
- [4] Chedlia Ben Naila, Abdelmoula Bekkali. BPSK intensity modulated free-space optical communications using aperture averaging[C]. IEEE Trans. Commun, 2010, .
- [5] Larry C Andrews, Ronald L Phillips. Laser beam scintillation with applications [C]. SPIE Optical Engineering Press, 2001: 189 – 192.
- [6] Andrews L C. Aperture averaging of optical scintillations: power fluctuations and the temporal spectrum[C]. Waves Random Media, 2000, 10: 53 – 70.
- [7] V I Tatarski. Wave propagation in a turbulent medium [C]. New York: McGraw-Hill, 1961, Reprinted by Dover, New York, 1967.
- [8] Wei Zhenyan, Chen Hui. Design of received aperture in wireless optical communication based on aperture averaging effect [C]. Electronic Design Engineer, 2010, 4 (18): 55 – 56. (in Chinese)
韦珍艳, 陈辉. 基于孔径平滑效应的无线光通信接收孔径的设计[C]. 电子设计工程, 2010, 4 (18): 55 – 56.
- [9] Haykin S. Communications systems [M]. 3th ed. New York: John Wiley & Sons Inc, 1994: 532 – 540.
- [10] Linda Marie Wasiczko. Technique to mitigate the effects of atmospheric turbulence on free space optical communication links[D]. 2004: 37 – 44.