

# 不同能见度下接收孔径对无线光通信 误码率性能影响分析

吴晓军<sup>1,2</sup> 王红星<sup>1,2</sup> 刘敏<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> 海军航空工程学院电子信息工程系, 山东 烟台 264001  
<sup>2</sup> 山东省信号与信息处理重点实验室, 山东 烟台 264001

**摘要** 在无线光通信中,能见度是影响链路性能的关键因素之一。建立了不考虑大气湍流影响下的误码率(BER)模型,在此基础上,结合实际的能见度数据,运用实验仿真的方法,研究了不同能见度条件下接收孔径对无线光通信系统误码率性能的影响。结果表明:不同能见度条件下,误码率性能随接收孔径的变化趋势存在一定的差异。随着能见度值的逐渐升高,误码率值越低,说明通信系统性能越好,接收孔径对误码率的改善效果越明显。同时,还结合工程实践中通信系统误码率性能的要求,对不同的能见度条件下,选择合适的接收孔径尺寸也进行了详细的分析,为建立实际的无线光通信链路提供理论参考依据。

**关键词** 光通信;无线光通信;能见度;误码率;接收孔径

**中图分类号** TN929.12 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201333.1006003

## Affect Analysis of Receiving Aperture on Bit-Error Rate Performance in Free Space Optical Communication Systems under Different Visibilities

Wu Xiaojun<sup>1,2</sup> Wang Hongxing<sup>1,2</sup> Liu Min<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Department of Electronic Engineering, Naval Aeronautical and Astronautical University, Yantai, Shandong 264001, China

<sup>2</sup> Key Laboratory of Shandong Province on Signal and Information Processing, Yantai, Shandong 264001, China

**Abstract** Visibility is a crucial factor of affecting link performance in free space optical (FSO) communication. The bit-error rate (BER) model which does not consider the effect of turbulence is built. On this basis, the affect of receiving aperture on BER under different visibilities is studied by combing the actual visibility data and using the method of simulation. The results show that there are many differences between receiving aperture and BER under different visibilities. If the visibility is high, the BER is much lower, and the performance of system is better. The improvement of the receiving aperture on BER is obvious. At the same time, combining the requirement for BER in engineering practice, the choice of appropriate receiving aperture is discussed under different visibilities, which provides valuable theoretical reference for building the FSO communication link.

**Key words** optical communications; free space optical communication; visibility; bit-error rate; receiving aperture

**OCIS codes** 000.6800; 010.1290; 010.1300; 060.4510

### 1 引言

无线光(FSO)通信起源于古代的烽火通信,而现代意义上的光通信源自于爱因斯坦的受激辐射概

念的提出及激光器的正式出现<sup>[1]</sup>。FSO通信兼具微波通信和光纤通信的优点,同时还具备通信容量大、保密性好和架设简单的优点,已成为未来通信领

收稿日期: 2013-04-07; 收到修改稿日期: 2013-05-13

基金项目: 山东省“泰山学者”建设工程专项经费

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

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

域的发展趋势<sup>[2-3]</sup>。但由于激光信号在大气中传输时,容易受到大气衰减和大气湍流效应的影响,导致通信系统性能大大降低,进而严重影响了FSO通信的推广及应用。

能见度是反映气象条件的重要参数,其好坏直接影响到大气衰减系数的大小和FSO通信系统的误码率。本文通过建立合适的误码率模型,研究不同能见度条件下接收孔径对误码率性能的影响,所得结果对建立实际FSO通信链路具有一定的指导意义。

## 2 大气衰减模型

激光在大气中传播时,由于大气作用产生的能量衰减主要是来自于大气分子和气溶胶粒子的吸收和散射。在一般情况下,传播距离 $L_{\text{atm}}$ 可以表示为<sup>[4]</sup>

$$L_{\text{atm}} = \exp(-\sigma L), \quad (1)$$

式中 $\sigma$ 为大气衰减系数,单位为 $\text{km}^{-1}$ ,它由四部分组成, $\sigma = \alpha_m + \alpha_a + \beta_m + \beta_a$ ,其中 $\alpha_m$ 为大气分子吸收系数, $\alpha_a$ 为气溶胶粒子微粒的吸收系数, $\beta_m$ 为气体分子散射系数, $\beta_a$ 为气溶胶粒子的散射系数。

研究表明,大气分子吸收在大气衰减中处于次要地位。大气对不同波长的光束有着不同的透射率,且存在多个透射率接近100%的“通信窗口”,因而在进行FSO通信系统设计时,只要选择工作波长落在这些通信窗口之内,则可忽略大气吸收所导致的功率衰减,即可认为 $\alpha_m \approx 0$ 。此外,由于瑞利散射系数和波长的四次方成反比,在近红外波段瑞利散射系数很小,所以 $\beta_m$ 也可忽略。对于气溶胶(雾霾的主要成分)而言,其对激光能量的吸收非常小,可以忽略不计,因此 $\alpha_a \approx 0$ 。综上所述,对于水平传输的激光来说,低层大气的主导衰减仅是米氏散射。由于能见度是大气气溶胶浓度的宏观表示<sup>[5]</sup>,所以 $\sigma$ 可以用与能见度有关的经验公式表示为<sup>[6]</sup>

$$\sigma = \beta_a = \frac{3.912}{V} \left( \frac{\lambda}{\lambda_0} \right)^{-q}, \quad (2)$$

式中 $V$ 表示大气能见度, $\lambda$ 为通信波长, $\lambda_0 = 550 \text{ nm}$ , $q$ 为波长修正因子,它与大气中粒子尺寸和密度分布(即能见度)有关。根据能见度差异而取不同值,具体对应关系如下<sup>[7]</sup>:

$$q = \begin{cases} 0.585 V^{1/3}, & V \leq 6 \text{ km} \\ 1.3, & 10 \text{ km} \leq V \leq 12 \text{ km}, \\ 1.6, & V \approx 23 \text{ km} \end{cases} \quad (3)$$

此模型是Kruse提出的,可以看出,该模型对于能

见度小于6 km的描述太过粗略。Kim等对 $q$ 值进行了修正,模型如下<sup>[8]</sup>:

$$q = \begin{cases} 1.6, & V > 50 \text{ km} \\ 1.3, & 6 \text{ km} < V < 50 \text{ km} \\ 0.16V + 0.34, & 1 \text{ km} < V < 6 \text{ km} \\ V - 0.5, & 0.5 \text{ km} < V < 1 \text{ km} \\ 0, & V < 0.5 \text{ km} \end{cases}, \quad (4)$$

此模型相对Kruse模型比较精确,在后面仿真实验时,将利用此模型计算大气衰减系数。

表1为不同天气条件下,工作波长为850 nm的大气衰减系数<sup>[4]</sup>。

表1 不同天气、工作波长为850 nm时的大气衰减系数和能见度表

Table 1 Atmospheric attenuation coefficient and visibility under different weathers at the wavelength of 850 nm

Weather	Atmospheric attenuation / (dB/km)	Visibility
Very clear	0.20~0.52	50~20 km
Clear	0.52~1.0	20~10 km
Haze	1.0~2.9	10~4 km
Cloudy	2.9~5.8	4~2 km
Mist	5.8~14.0	2~1 km
Light fog	14.0~34.0	1000~500 m
Moderate fog	34.0~84.9	500~200 m
Dense fog	84.9~339.6	200~50 m

从表1中可以看出,随着能见度的降低,大气衰减系数逐渐增大,对FSO通信来说,其链路性能也必将受到影响,下面通过建立误码率模型来分析该问题。

## 3 误码率模型

激光在大气中传输时,主要受到衰减和湍流的影响,此处只讨论能见度对FSO通信误码率性能的影响,为了研究具有针对性和方便性,建立了不考虑大气湍流影响时的误码率模型,同时考虑到实际的通信系统,采用的激光为高斯光束。

不考虑大气湍流的影响,假设探测器的输出电流为<sup>[9]</sup>

$$i = i_s + i_N, \quad (5)$$

式中 $i_N$ 为噪声电流,主要由探测时的输出噪声造成的, $i_s$ 是平均信号电流,定义为<sup>[4]</sup>

$$i_s = RP_s = RP_R/2, \quad (6)$$

式中 $P_R$ 为发送“1”时,接收机接收到的信号光功率; $P_s$ 为无湍流影响时接收机接收到的平均光功

率,单位为 W;对于开/关键控(OOK)调制,  $P_S = P_R/2$ ;  $R = \eta e / (h\nu) = \eta e \lambda / (hc)$  表征探测器灵敏度,  $\lambda$  是激光波长,  $\eta$  是探测器量子效率,  $e = 1.6 \times 10^{-19}$  C 为电子电荷,  $h = 6.625 \times 10^{-34}$  J/s 为普朗克常量,  $\nu$  为光波频率,  $c = 3 \times 10^8$  m/s 为光速。

探测器的输出噪声主要包括散粒噪声、热噪声和背景光噪声<sup>[4-6]</sup>。假设接收机为光电二极管(PIN)接收机,散粒噪声主要是由于热激发作用随机产生的电子所造成的起伏,其方差  $\sigma_{SN}^2 = 2eBi_S$ ,  $B$  为探测器后续滤波器的带宽<sup>[9]</sup>;热噪声是由热力学温度在零度以上的物体内部电子的无规则热运动造成的,其方差  $\sigma_{TN}^2 = 4K_B TB/R_L$ <sup>[9-11]</sup>,  $K_B$  是玻尔兹曼常数,其值为  $1.38 \times 10^{-34}$  J/K<sup>[4]</sup>,  $T$  为等效噪声温度,  $R_L$  为负载阻抗;背景光噪声的方差  $\sigma_{BN}^2 = 2eRP_B B$ ,  $P_B$  为背景光功率。

假设上述三种噪声统计独立,则总噪声电流方差为<sup>[9]</sup>

$$\sigma_N^2 = \sigma_{SN}^2 + \sigma_{TN}^2 + \sigma_{BN}^2. \quad (7)$$

定义探测器的输出信噪比  $R_{SN}$  为接收光电流与噪声电流均方值的比,即<sup>[9-11]</sup>

$$R_{SN} = \frac{i_S}{\sigma_N}, \quad (8)$$

将(6)式和(7)式代入(8)式得<sup>[9]</sup>

$$R_{SN} = \frac{RP_S}{\sqrt{2eBR(L_{atm}P_S + P_B) + \frac{4K_B TB}{R_L}}}. \quad (9)$$

若光检测器接收的光功率较大,信号产生的噪声——散粒噪声占主导地位,这时便可忽略热噪声和背景光噪声的影响<sup>[3,10]</sup>,这种现象称为散粒噪声限制下的接收。此时(9)式简化为<sup>[4]</sup>

$$R_{SN} = \sqrt{\frac{RP_S}{2eB}} = \sqrt{\frac{\eta \lambda P_S}{2hcB}}. \quad (10)$$

当不考虑指向误差和大气湍流影响时,接收端光强的空间分布可以看成是服从  $I(0, L)$  的均匀分布,FSO 通信系统接收光功率为<sup>[12]</sup>

$$P_R = P_T L_{geo} L_{atm}, \quad (11)$$

式中  $P_T$  为激光发射功率,  $L_{geo}$  表示通信系统的几何衰减,高斯光束条件下可以表示为<sup>[10]</sup>

$$L_{geo} = \frac{\pi^2 \theta^2 D^2}{8\lambda^2 + \frac{(L\pi\theta^2)^2}{2}}, \quad (12)$$

式中  $\theta$  为激光束的发散角,  $D$  为接收孔径,  $L$  为传输距离。

将(1)、(12)代入(11)式可得

$$P_S = P_R/2 = \frac{P_T L_{geo} L_{atm}}{2} = \frac{P_T \pi^2 \theta^2 D^2 \exp(-\sigma L)}{16\lambda^2 + (L\pi\theta^2)^2}. \quad (13)$$

定义误码率为<sup>[10]</sup>

$$P_e = P(1)P(0/1) + P(0)P(1/0), \quad (14)$$

式中  $P(1)$ 、 $P(0)$  分别是发送比特“1”和“0”的概率,  $P(0/1)$  为当发送“1”比特而被判决为“0”比特的概率,  $P(1/0)$  为当发送“0”比特而被判决为“1”比特的概率。在这里仅考虑“0”和“1”比特是等概率发射的情况,即  $P(1) = P(0) = 1/2$ , 则为<sup>[13]</sup>

$$P_e = \frac{P(0/1) + P(1/0)}{2}. \quad (15)$$

设判决门限为  $i_D$ ,  $P(0/1)$  和  $P(1/0)$  的值取决于采样值,  $i$  的概率密度函数  $P_1(i)$  和  $P_0(i)$ , 在不考虑湍流影响时,通常认为其服从高斯随机过程,则

$$P_1(i) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_N} \exp\left[-\frac{(i-i_S)^2}{2\sigma_N^2}\right], \quad (16)$$

$$P_0(i) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_N} \exp\left(-\frac{i^2}{2\sigma_N^2}\right), \quad (17)$$

因此

$$P(0/1) = P_1(i < i_D) = \int_{-\infty}^{i_D} P_1(i) di = \frac{1}{2} \operatorname{erfc}\left(\frac{i_S - i_D}{\sqrt{2}\sigma_N}\right), \quad (18)$$

$$P(1/0) = P_0(i > i_D) = \int_{i_D}^{\infty} P_0(i) di = \frac{1}{2} \operatorname{erfc}\left(\frac{i_D}{\sqrt{2}\sigma_N}\right), \quad (19)$$

式中

$$\operatorname{erfc}(z) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_z^{\infty} \exp(-t^2) dt, \quad (20)$$

称为余误差函数<sup>[14]</sup>。

可以看出,  $P_e$  的值取决于判决门限  $i_D$ , 因此可以通过优化  $i_D$  来最小化  $P_e$ , 最小值发生在选取的  $i_D$  满足

$$i_D = \frac{i_S}{2} \quad (21)$$

的条件,此时有<sup>[14]</sup>

$$P_e = \frac{1}{2} \left[ \operatorname{erfc}\left(\frac{i_S}{2\sqrt{2}\sigma_N}\right) \right] = \frac{1}{2} \operatorname{erfc}\left(\frac{R_{SN}}{2\sqrt{2}}\right), \quad (22)$$

(22)式即为 OOK 调制下的 FSO 通信系统,不考虑湍流影响时的系统误码率模型,选择最佳判决门限。

## 4 仿真与结果分析

由于此项研究是为将来建立海上 FSO 通信链路服务的,因此为了能够准确地反应不同能见度下接收孔径对 FSO 通信误码率性能的影响,采用了威海地区和丹东两个海滨城市某日的能见度数据,具体参数如表 2 和表 3 所示。

表 2 威海地区的参数

Table 2 Parameters of Weihai

Time	Visibility /km	$q$ factor	Attenuation
0:00	0.1	0	39.12
6:00	3	0.82	0.5576
12:00	12	1.3	0.0848
18:00	30	1.3	0.0339

表 3 丹东地区的参数

Table 3 Parameters of Dandong

Time	Visibility /km	$q$ factor	Attenuation
0:00	20	1.3	0.0509
6:00	25	1.3	0.0407
12:00	12	1.3	0.0848
18:00	10	1.3	0.1017

为了能够更加直观地反映不同能见度条件下,接收孔径对 FSO 通信系统误码率性能的影响,结合已有 FSO 系统的参数,进行了仿真实验。其实验参数设置如表 4 所示。

表 4 仿真实验参数设置

Table 4 Parameters of simulation

Parameter	Value
Responsibility $R$	0.9 A/W
Propagation distance $L$	1.5 km
Wavelength $\lambda$	1550 nm
Bandwith $B$	1 GHz
Rytov variance $\sigma_r^2$	0.1
Quantum efficiency $\eta$	0.7
Divergent angle $\theta$	2 mrad

在已有实际数据及设定参数的基础上,对不同能见度下,误码率随接收孔径尺寸的变化趋势进行了研究,其仿真结果如图 1 和图 2 所示。

从图 1 中可以看出:1)不同能见度条件下,接收孔径对通信系统误码率性能的影响存在一定的差异,具体表现为:当能见度为 0.1 km 时,误码率随着孔径尺寸的增加基本不发生变化,一直保持在较高的水平,说明接收孔径对误码率的改善效果不够明显,此时可以采取增加发射功率的方法来改善误码率的性能指标;当能见度为 3、12、30 km 时,误码率随着孔径尺寸的增加逐渐下降,说明此时接收孔径对误码率的改善效果明显。同时随着能见度的升

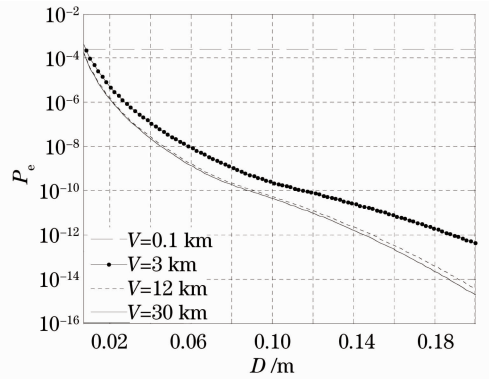


图 1 威海地区不同能见度下误码率随孔径尺寸变化  
Fig. 1 Relationship between aperture and bit-error rate under different visibilities of Weihai

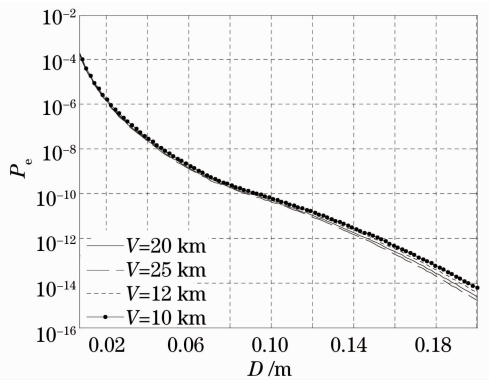


图 2 丹东地区不同能见度下误码率随孔径尺寸的变化  
Fig. 2 Relationship between aperture and bit-error rate under different visibilities of Dandong

高,误码率的下降趋势加快,说明在能见度较高的情况下,接收孔径的改善效果越好。2)在工程实际中,按照通信系统误码率满足的要求<sup>[15]</sup> ( $P_e \leq 10^{-9}$ ),不同能见度下的最佳孔径尺寸  $D_{opt}$  也有所区别,具体情况如下:当  $V=3$  km 时,  $D_{opt}=8.1$  cm;当  $V=12$  km 时,  $D_{opt}=6.5$  cm;当  $V=30$  km 时,  $D_{opt}=6$  cm。从以上结果可以看出,随着能见度的升高,接收孔径的最佳尺寸逐渐降低。此结论可以为建立实际 FSO 通信测试链路时,选择合适的接收孔径提供参考依据。

从图 2 中可以看出:虽然能见度存在一定的差异,但从表 3 可知计算出相应的波长修正因子  $q$  值都为 1.3,根据(3)式可知,此能见度同属于平均能见度情况,且接收孔径对误码率的改善效果比较明显。另外在工程实践中,需满足误码率小于  $10^{-9}$  的要求,不同能见度下的最佳接收孔径尺寸虽然不同,但是差异非常微小,为 6 cm 左右,为了方便起见,可以统一采用同一尺寸的接收孔径。

## 5 结 论

通过建立不考虑湍流影响下的误码率模型,对不同能见度条件下接收孔径对FSO通信系统性能的影响情况进行了研究。从分析中可知,不同的能见度条件下误码率随接收孔径尺寸的变化趋势存在一定的差异,具体表现为:随着能见度的增大,接收孔径对误码率的改善效果越明显,同时还结合工程实践中误码率的要求,对不同能见度下,选择合适的接收孔径进行了相应的讨论。该结论对建立实际的FSO光通信链路具有一定的指导意义。

## 参 考 文 献

- 1 Su Minsheng, Chen Changying. Development of wireless optical communication in China [J]. *Optical Communication*, 2004, (10): 20-21.  
苏民生, 陈长缨. 无线光通信在国内的发展状况[J]. *光通信*, 2004, (10): 20-21.
- 2 Jia Kejun, Xue Jianbin, Peng Duo, *et al.*. Modulation technologies under weak atmospheric turbulence channel [J]. *Chinese J Lasers*, 2009, 36(3): 569-570.  
贾科军, 薛建彬, 彭 铎, 等. 弱湍流信道中的调制技术[J]. *中国激光*, 2009, 36(3): 569-570.
- 3 Liu Dan, Liu Zhi, Wang Puyao, *et al.*. Anti-jamming modulation/demodulation technology of atmospheric laser communication system [J]. *Chinese J Lasers*, 2012, 39(7): 0705004.  
刘 丹, 刘 智, 王璞瑶, 等. 一种大气激光通信系统抗干扰调制/解调技术[J]. *中国激光*, 2012, 39(7): 0705004.
- 4 Li Yuquan, Zhu Yong, Wang Jiangping. Theory and Technology of Optical Communication [M]. Beijing: Science Press, 2009. 158-164, 356-357, 315-316.  
李玉权, 朱 勇, 王江平. *光通信原理与技术*[M]. 北京: 科学出版社, 2009. 158-164, 356-357, 315-316.
- 5 Meng Xiangqian, Hu Shunxing, Wang Yingjian, *et al.*. Aerosol scattering phase function and visibility based on charge coupled device [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(9): 0901001.  
孟祥谦, 胡顺星, 王英俭, 等. 基于电荷耦合器件探测气溶胶散

- 射相函数与大气能见度的研究[J]. *光学学报*, 2012, 32(9): 0901001.
- 6 Song Zhengfang. Application of Atmospheric Optical Foundation [M]. Beijing: China Meteorological Press, 1990. 11-59.  
宋正方. *应用大气光学基础*[M]. 北京: 气象出版社, 1990. 11-59.
- 7 P W Kruse, L D McGlauchlin, R B McQuistan. Elements of Infrared Technology: Generation, Transmission and Detection [M]. New York: Wiley, 1962.
- 8 I I Kim, B McArthur, E J Korevaar. Comparison of laser beam propagation at 785 nm and 1550 nm in fog and haze for optical wireless communications [C]. SPIE, 2001, 4214: 26-37.
- 9 Chen Chunyi, Yang Huamin, Jiang Huilin, *et al.*. Performance analysis of large-aperture receiving and selection of aperture size in atmospheric optical communication [J]. *Chinese J Lasers*, 2009, 36(11): 2957-2960.  
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): 2957-2960.
- 10 Yu Kun. The Study of BER Performance in Wireless Optical Communication [D]. Henan: Henan Normal University, 2008. 25-26.  
于 坤. 无线激光通信系统误码率特性研究[D]. 河南: 河南师范大学, 2008. 25-26.
- 11 L C Andrews, R L Phillips, C Y Hopen. Theory of optical scintillation [J]. *J Opt Soc Am A*, 1999, 16(6): 1417-1429.
- 12 Liu Min. Modeling and Analysis of Wireless Optical Communication Channel [D]. Yantai: Naval Aeronautical and Astronautical University, 2011. 15-16.  
刘 敏. 无线光通信信道模型的建立与分析[D]. 烟台: 海军航空工程学院, 2011. 15-16.
- 13 Jian Dianjun. The study of the Characteristics of Atmospheric Channel in Wireless Optical Communication System [D]. Xi'an: Xidian University, 2008. 47-48.  
鉴佃军. 无线光通信系统的大气信道特性研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2008. 47-48.
- 14 Ye Qixiao. Practical Mathematical Manual (2nd Edition) [M]. Beijing: Science Press, 1992.  
叶其孝. *实用数学手册(第2版)*[M]. 北京: 科学出版社, 1992.
- 15 Fan Changxin, Cao Lina. Communication Principles [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2007. 12-14.  
樊昌信, 曹丽娜. *通信原理*[M]. 北京: 国防工业出版社, 2007. 12-14.

栏目编辑: 王晓琰