

降雨和雾气天气下自由空间光通信性能研究

王涵 张涛

(海南大学信息科学技术学院, 海南 海口 570228)

摘要 天气的影响会导致自由空间光通信系统性能恶化。利用 Mie 理论和两种雨滴谱分布模型, 计算了不同降雨量下大气激光传输的衰减; 根据 Kim 和 AlNaboulsi 模型计算了激光在不同能见度下的衰减。研究了降雨和雾气对自由空间光通信系统性能的影响, 分析了不同降雨量时降雨和雾气天气条件下传输距离与误码率的关系以及发射功率与误码率的关系。结果表明, 降雨量不同会影响通信距离; 雾天衰减比雨天衰减更为严重, 通信距离变短, 为保证系统正常工作, 可以适当加大发射功率。

关键词 自由空间光通信; 天气; 传输距离; 误码率

中图分类号 TN929.12 文献标识码 A doi: 10.3788/LOP49.080101

Analysis of Performance for Free-Space Optical Communications with Rain or Fog Weather Condition

Wang Han Zhang Tao

(College of Information Science and Technology, Hainan University, Haikou, Hainan 570228, China)

Abstract The influence of weather can deteriorate the performance of free-space optical communication system. Based on the Mie theory and two kinds of raindrop spectral models, the laser attenuation induced by rain with different raining rates is calculated. The laser attenuation due to visibility is calculated using Kim model and AlNaboulsi model. The performances of free-space optical communications in rain and fog weather are studied. The relation between the bit error rate and the transmission range, as well as that between the bit error rate and the transmission power, is analyzed in different raining rates and rain or fog weather condition. The results show that raining rate influences the transmission ranges, and the attenuation induced by fog is much bigger than rain, which leads to a shorter transmission range. To guarantee the normal work of the system, the transmission power can be appropriately increased.

Key words free-space optical communications; weather; transmission range; BER

OCIS codes 010.1290; 010.1310; 010.3310

1 引言

自由空间光通信作为一种潜在的高速链接, 具有抗干扰能力强、频谱可自由使用、高数据速率传输等优点。自由空间光通信不是取代已经发展成熟的光纤通信和微波通信, 而是发挥自身特色, 成为整个通信网络中的一个环节, 与其他通信方式相互补充、配合, 被认为是解决“最后一公里”问题不错的选择方案^[1]。

自由空间光通信系统最大的缺点是容易受大气环境的影响, 不同的天气条件和大气湍流^[2]都会导致系统性能的恶化。研究显示在中度雾气条件下激光的衰减可达到 120 dB/km, 而在热带地区降雨引起的衰减对激光传输有着巨大的影响^[3,4]。因此, 在不同天气下对自由空间光通信传输性能时行分析具有实际意义。

本文主要分析降雨和雾气两种天气情况下激光的衰减特性。讨论了自由空间光通信系统在两种天气条件下的误码性能, 对比了不同环境下的传输性能。

收稿日期: 2012-03-15; 收到修改稿日期: 2012-05-08; 网络出版日期: 2012-06-07

作者简介: 王涵(1986—), 男, 硕士研究生, 主要从事自由空间光通信方面的研究。E-mail: hanwang1214@126.com

导师简介: 张涛(1971—), 男, 副教授, 硕士生导师, 主要从事海域自由空间光通信、千兆比特无源光网络(GPON)媒质接入控制(MAC)协议等方面的研究。E-mail: awgcn@163.com

2 激光在大气中的衰减效应

激光的大气衰减是指大气对激光的吸收和散射作用引起的信号能量的减弱。衰减系数表示为

$$\alpha(\lambda) = A(\lambda) + S(\lambda), \quad (1)$$

式中 $A(\lambda)$ 为吸收系数, $S(\lambda)$ 为散射系数。

对于大气分子的吸收作用,不同大小的气体分子对激光的吸收是根据激光波长而定的,当激光波长处于大气窗口时,吸收较小。大气窗口在近红外波段为 $1.5 \sim 1.8 \mu\text{m}$ 。

国际电信联盟无线电通信组 (ITU-R) 建议^[5],当激光波长大于 $0.8 \mu\text{m}$ 时,大气分子的散射对激光的损耗可以忽略不计。因此,当波长处于大气窗口时,大气分子的吸收和散射都可以不考虑,只有粒子散射引起的衰减。所以本文选择 1550 nm 波长的激光传输,讨论雨粒子和雾气粒子对激光的衰减影响。

3 降雨和雾气衰减模型

3.1 Mie 散射理论

粒子散射遵从散射定理,又叫米氏 (Mie) 散射。在 Mie 理论中,给出了不同尺度和不同折射率粒子的散射特性。当粒子尺度大到可以和激光波长相比时,在已知传输介质中粒子尺度分布、粒子浓度以及复折射率的情况下,由介质引起的激光衰减就可以用 Mie 理论计算。

用 Mie 理论求解,可得到粒子的散射截面^[6]

$$Q_{i,j}(D) = \frac{2\pi}{k^2} \sum_{n=1}^{\infty} (2n+1) \text{Re}(z_n + b_n), \quad (2)$$

式中 D 为粒子直径, k 为波数; z_n 和 b_n 为 Mie 散射系数,它们是关于复折射率、波长、粒子半径的函数。大气引起的信号衰减可由下式计算:

$$a = 4343 \times \int_0^{\infty} Q_{i,j}(r) n(r) dr, \quad (3)$$

式中 $a(\text{dB/km})$ 为衰减系数, r 为粒子半径, $n(r)$ 为粒子的雨滴尺度分布。

3.2 降雨衰减模型

假设雨粒子为球形形状,用雨滴谱分布来研究降雨特性。在过去几十年,通过实地的测量数据得到了几种雨滴尺寸分布模型,如 Laws-Parsons 分布、Marshall-Palmer 分布、Joss 分布^[7]、对数正态分布、gamma 分布、广州雨滴尺寸分布等。本文主要讨论广州雨滴尺寸分布和 Joss 分布。

3.2.1 广州雨滴尺寸分布

中国电波传播研究所的赵振维研究了我国亚热带广州地区的降雨特征,根据测量得到了广州地区雨滴尺寸的分布模型^[8~10]

$$n(r) = 2.306 \times 10^5 R^{0.364} (2r)^{-0.274} \exp(-\Lambda), \quad (4)$$

$$\Lambda = 7.41R^{-0.0527} (2r)^{0.452}, \quad (5)$$

式中 R 为降雨量, $n(r)$ 为粒子的雨滴尺寸分布, r 为雨滴半径。

3.2.2 Joss 雨滴尺寸分布

Joss 等^[7]在瑞士测量了雨滴尺寸分布,他们将降雨分为毛毛雨、广布雨和雷暴雨,每种降雨类型分别表示为

$$\begin{cases} n(r) = 60000 \exp(-11.4R^{-0.21})r \\ n(r) = 14000 \exp(-8.2R^{-0.21})r, \\ n(r) = 2800 \exp(-6R^{-0.21})r \end{cases} \quad (6)$$

根据不同降雨模型,运用(3)式进行衰减计算,分析结果如图1所示。

从图1可以看出降雨越大,衰减越大。在暴雨情况下,降雨量达到 60 mm/h 左右, Joss 雷暴雨和广州雨

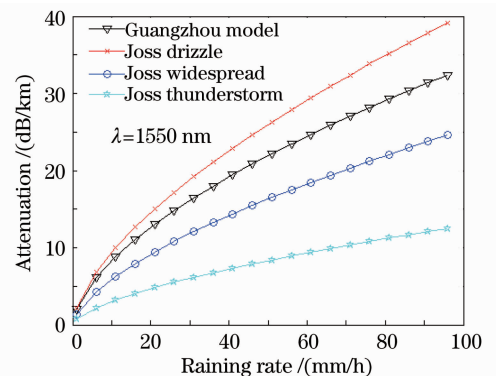


图1 两种雨滴谱模型衰减与降雨量的关系
Fig. 1 Attenuation versus raining rate in two raining models

模型计算得到的衰减系数相差 15 dB/km, Joss 雷暴雨造成的衰减偏小。当降雨量达到 30 mm/h 左右时, Joss 广布雨和广州雨模型计算得到的衰减系数出现 4 dB/km 左右的差值。Joss 毛毛雨和广州雨模型在降雨量为 5 mm/h 左右造成的衰减系数相差不大。从两类分布模型的公式可以看出, 衰减误差的产生跟计算时采用的雨滴大小有关。

3.3 雾气衰减模型

根据雾的形成地域和形成原理, 把雾分为两类: 平流雾和辐射雾。海雾一般为平流雾, 内陆雾一般为辐射雾。

由 Kruse^[11], Kim^[12] 和 AlNaboulsi^[13] 提出的 3 种模型是被用来在能见度传输范围内估计由雾气引起衰减的常用模型。

由 Kim 模型得到的衰减模型为^[12]

$$a_{\text{fog}} = \frac{3.91}{v} \left(\frac{\lambda}{550} \right)^{-q}, \quad (7)$$

式中 v 为能见度(km), λ 为激光波长, q 为粒子散射分布系数。在 Kruse 模型中, q 的取值为

$$q = \begin{cases} 1.6 & v > 50 \text{ km} \\ 1.3 & 6 \text{ km} < v \leq 50 \text{ km} ; \\ 0.585v^{1/3} & v \leq 6 \text{ km} \end{cases} \quad (8)$$

在 Kim 模型中, q 的取值为

$$q = \begin{cases} 1.6 & v > 50 \text{ km} \\ 1.3 & 6 \text{ km} < v \leq 50 \text{ km} \\ 0.16v + 1.34 & 1 \text{ km} < v \leq 6 \text{ km} \\ v - 0.5 & 0.5 \text{ km} < v \leq 1 \text{ km} \\ 0 & v \leq 0.5 \text{ km} \end{cases} \quad (9)$$

由(7),(8)式可以看出, 波长越长衰减就越小, 所以选取波长为 1550 nm 的激光所受衰减相比其他更短红外波长的激光更小。

AlNaboulsi 平流雾衰减模型为^[13,14]

$$a_{\text{adv}} = \frac{0.11478\lambda + 3.8367}{v}, \quad (10)$$

辐射雾衰减模型为

$$a_{\text{rad}} = \frac{0.18126\lambda^2 + 0.13709\lambda + 3.7502}{v}, \quad (11)$$

散射衰减则由下式计算:

$$a_{\text{fog}} = \frac{10}{\ln 10} (a). \quad (12)$$

通过公式计算 3 种模型下大气衰减与能见度的关系, 如图 2 所示。

由图 2 可以看出, 能见度越低, 大气衰减越大。平流雾和辐射雾得出的结果略有差别, Kim 模型下的衰减更小, 因此在针对具体地域时, 要根据统计数据来选取适当的衰减模型, 这样才不会造成大的误差。

4 系统性能

在自由空间光通信系统中, 大气导致的激光信号衰减是非常严重的, 特别是在降雨和雾气天气中, 通信链路时。光电探测器接收功率 P_r 可以表示为

$$P_r = \frac{\pi R_r^2}{\pi \theta^2 L^2} P_t A_{\text{FSO}}, \quad (13)$$

式中 P_t 为激光发射功率, πR_r^2 为探测器接收面积, θ 为光束发散角, L 为传输距离, A_{FSO} 为雨滴粒子或雾粒子

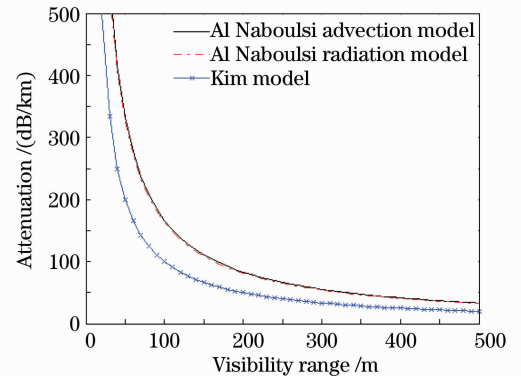


图 2 3 种模型的衰减与能见度系数的关系
Fig. 2 Attenuation versus visibility in three models

散射引起的激光衰减:

$$A_{\text{FSO}} = \exp(-aL), \quad (14)$$

式中 a 为在雨滴或雾气下的衰减系数。

假设系统是点对点通信,采用的强度调制/直接检测方式,接收端直接探测光电流强度,只考虑接收噪声影响,误码率(BER)公式可以表示为^[15]

$$R_{\text{BE}} = \frac{1}{2} \operatorname{erfc}\left(\frac{SP_r}{\sqrt{2}\sigma^2}\right), \quad (15)$$

式中 S 为光电检测器灵敏度, σ^2 为噪声方差,

$$\sigma^2 = 2eSP_rB, \quad (16)$$

式中 B 为系统带宽。

5 数值仿真与分析

根据前面的粒子衰落公式和误码率公式,对自由空间光通信性能进行仿真分析。文中雨滴衰减采用 ITU-R 提出的修正模型^[11] $a_{\text{rain}} = 1.076R^{0.67}$, 雾气衰减采用的是 AlNaboulsi 平流雾(海雾)模型。其他参数选择为: $R_r = 10 \text{ cm}$, $\lambda = 1550 \text{ nm}$, $B = 2 \text{ GHz}$, $\theta = 1 \text{ mrad}$, $L = 1 \text{ km}$, $P_t = 10 \text{ mW}$ 。

图 3 为在降雨量为 5、30、60 mm/h,即小雨、中大雨、暴雨条件下,传输距离与误码率的关系。在小雨环境中,正常的传输距离可以达到 1000 m 左右,随着降雨强度加大,在误码率要求小于 10^{-9} 的条件下,传输距离变得很短,可以看出,暴雨时正常传输距离小于 500 m。图 4 表示小雨天气和海雾天气下传输距离与误码

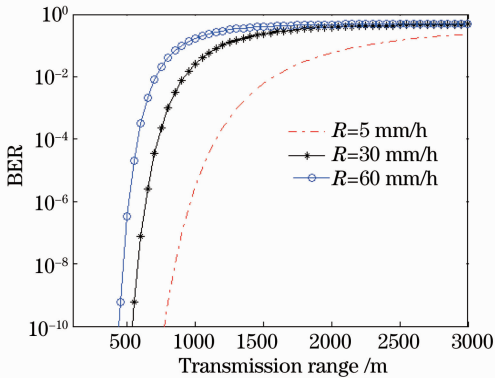


图 3 不同降雨量下误码率与传输距离的关系
Fig. 3 BER versus transmission range under different raining rates

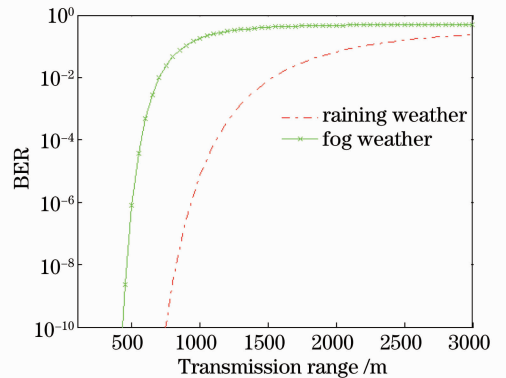


图 4 两种天气下误码率与传输距离的关系
Fig. 4 BER versus transmission range under two weather conditions

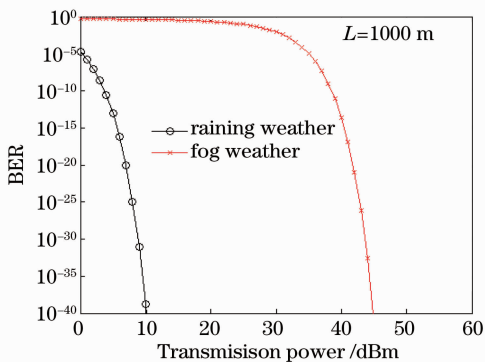


图 5 两种天气下误码率与发射功率的关系
Fig. 5 BER versus transmission power under two weather conditions

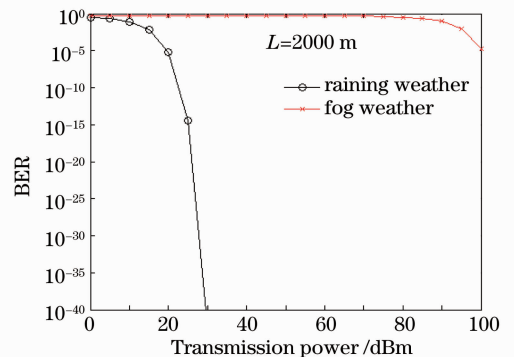


图 6 传输距离为 2 km 时,两种天气下误码率与发射功率的关系

Fig. 6 BER versus transmission power under two weather conditions with 2000 m distance

率的关系,明显可以看出激光受雾气的衰减影响大于受降雨的影响,海雾造成的衰减相当于暴雨时的衰减。

图5和图6给出了两种天气环境下在不同传输距离时误码率随发射功率的变化。由仿真结果可以看出,在传输距离为1000 m时,雨天所需要的激光发射功率为10 dBm。而雾天因为衰减程度大于降雨天,所需的发射功率就更大。在“最后一公里”传输中,为降低雨、雾天对系统的影响,可以通过加大发射功率来保证通信质量。从图6可以看出在相同天气情况下,传输距离增大为2000 m,为保证通信正常,可以通过适当提高发射功率来实现。但是高发射功率也就是需要高质量的激光发射器,同时发射功率的提高也会带来更大噪声影响,这些在分析系统性能时都是需要考虑的。

6 结束语

在设计自由空间光通信系统时,首先要考虑的是成本和通信的最大距离。海南岛属于热带季风气候区,空气湿度大,年降水1600 mm以上,因此降雨和雾气是影响自由空间光通信系统最主要的天气因素。通过数值仿真分析了这两种天气对系统的影响,从而为现实中合理设计应用于海南地区的自由空间光通信系统提供了参考依据。

参 考 文 献

- 1 Vincent W. S. Chan. Free-space optical communications[J]. *J. Lightwave Technol.*, 2006, **14**(12): 4750~4760
- 2 Yang Shiji, He Zhiping, Jia Jianjun *et al.*. Research of the transmittance of atmospheric turbulent channels[J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(11): 2860~2863
杨世骥, 何志平, 贾建军 等. 湍流大气信道激光透射率的研究[J]. *中国激光*, 2010, **37**(11): 2860~2863
- 3 S. SheikhMuhamma, B. Flecker, E. Leitgeb *et al.*. Characterization of fog attenuation in terrestrial free space optical links [J]. *Opt. Eng.*, 2007, **46**(6): 066011
- 4 Wajdi Al-Khateeb, Rafiqul Islam. Rain fade analysis for practical free space optic link in tropical region [C]. 4th International Conference on Mechatronice (ICOM), 2011
- 5 ITU-R. Attenuation by Atmospheric Gases [S]. ITU, 2012, ITU-R P. 676-9
- 6 Yang Ruike, Ma Chunlin, Han Xiang'e *et al.*. Study of the attenuation characteristics of laser propagation in the atmosphere [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2007, **36**(suppl.): 415~418
杨瑞科, 马春林, 韩香娥 等. 激光在大气中传输衰减特性研究[J]. *红外与激光工程*, 2007, **36**(增刊): 415~418
- 7 J. Joss, J. C. Thams, A. Waldvogel. The variation of raindrop size distribution at Lacarno [C]. Proc. Int. Conf. Cloud Physics, 1968, 369~373
- 8 Zhao Zhenwei. The analytic approximation of rain attenuation [J]. *Chinese J. Radio Science*, 1996, **11**(1): 51~53
赵振维. 雨衰减的解析近似[J]. *电波科学学报*, 1996, **11**(1): 51~53
- 9 Zhao Zhenwei. Computed transmission through rain in 1~400 GHz in Guangzhou [J]. *Chinese J. Radio Science*, 1996, **11**(2): 10~17
赵振维. 广州地区1~400 GHz降雨传播特性的计算[J]. *电波科学学报*, 1996, **11**(1): 10~17
- 10 T. Ho, S. Trisno, A. Desai. Performance and analysis of reconfigurable hybrid FSO/RF wireless networks[C]. *SPIE*, 2005, **5712**: 119~130
- 11 P. W. Kruse, L. D. mcGlauchlin, R. B. McQuistan. Elements of Infrared Technology: Generation, Transmission and Detection [M]. New York: Wiley, 1962. 448
- 12 I. Kim, B. McArthur, E. Korevaar. Comparison of lasr beam propagation at 785 and 1550 nm in fog and haze for optical wireless communication [C]. *SPIE*, 2001, **4214**: 26~37
- 13 M. Al Naboulsi, H. Sizum, F. de Fornel. Fog attenuation prediction for optical and infrared waves[J]. *Opt. Eng.*, 2004, **43**(2): 319~329
- 14 O. Bouchet, T. Marquis. FSO and quality of service software prediction[C]. *SPIE*, 2005, **5892**: 58920
- 15 J. Llorca, A. Desai, E. Baskaran. Optimizing performance of hybrid FSO/RF networks in realistic dynamic scenarios[C]. *SPIE*, 2005, **5892**: 589207
- 16 ITU-R. Prediction Methods Required for the Design of Terrestrial Free-Space Optical Links[S]. ITU, 2007, ITU-R P. 1814