

激光在雨中传输的衰减特性分析及实验研究

夏云芝¹, 邓贤君¹, 唐 潇^{2*}, 敖 珺³, 马春波³

(1. 南华大学 电气工程学院, 湖南 衡阳 421001; 2. 南华大学 机械工程学院, 湖南 衡阳 421001;
3. 桂林电子科技大学 信息与通信学院, 广西 桂林 541001)

摘 要:降雨会对激光传输造成严重的衰减。通过分析常用的雨的经验模型, 用 Matlab 仿真对各种模型进行了对比, 发现当降雨量为广布雨时, Weibull 分布、Joss 和 Gamma 分布结果几乎一致, 而 M-P 模型的衰减特性则为稍微偏大; 当降雨量为毛毛雨和雷阵雨时, Joss 模型的衰减特性与其它模型相比分别为相对偏大和相对偏小。为了验证模型的正确性及对桂林本地天气的适用性, 通过多次实验得出: 532 nm 波长激光在雨衰减信道下传输衰减与 M-P 模型更接近, 即 M-P 模型更加适用于全年降雨天气较多的桂林的大气雨衰减预测。

关键词:激光传输; 降雨衰减; 大气信道; M-P 模型

中图分类号: TN24 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-0062(2019)05-0054-06

Analysis and Experimental Study on Attenuation Characteristic of Laser Propagation in Rain

XIA Yunzhi¹, DENG Xianjun¹, TANG Xiao^{2*}, AO Jun³, MA Chunbo³

(1. School of Electric Engineering, University of South China, Hengyang, Hunan, 421001, China;
2. School of Mechanical Engineering, University of South China, Hengyang, Hunan 421001, China;
3. School of Information and Communication, Guilin University of Electronic Technology,
Guilin, Guangxi 541001, China)

Abstract: The raindrops would lead to serious attenuation to the laser signal. In this work, an empirical models (like M-P, Weibull, etc) simulated by Matlab indicate that the predicted attenuation characteristic of Weibull model is same as that of Joss and Gamma models when rainfall is widespread while the attenuation characteristics of M-P model is slightly larger. In addition, the characteristic of Joss model is larger when the rainfall is drizzle, and smaller when the thunderstorm occurs. In order to verify the correctness of the

收稿日期: 2019-03-31

基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金项目(61401193; 41904163); 湖南省教育厅科学研究资助项目(18C0416)

作者简介: 夏云芝(1989-), 女, 硕士, 主要从事光通信信号处理、大气信道特性分析等方面的研究。E-mail: summer-saylm@163.com。* 通信作者: 唐 潇(1990-), 男, 讲师, 博士, 主要从事光功率定标、辐射计测量等方面的研究。E-mail: tangxiao1022@126.com

model and its applicability to the local weather in Guilin, multiple experiments were carried out. The experimental result shows that the predicted attenuation of M-P model is closer to measurement result, the M-P distribution is more suitable for laser transmission attenuation prediction through rain in Guilin.

key words: laser propagation; rain attenuation; atmospheric channel; M-P model

0 引言

激光在大气中的传输对研究大气介质的光学特性具有十分重要的意义。大气衰减效应是激光大气传输的重要影响因素之一,这主要是由于大气气体分子以及气溶胶粒子的吸收、散射作用造成的^[1]。当前很多学者都针对激光在大气中的传输特性进行了分析和研究,但是由于研究角度和侧重点的不同,并且缺乏本地实测数据,在实际应用中仍存在较大困难。

降雨是自然界普遍的天气现象,它会对激光传输产生严重的衰减。目前国内外对于估算激光大气的衰减特性的已存在常用的经验模型^[2],并取得了一定的研究成果,如 ITU-R 提出的衰减计算模型,以及 L-P, M-P 模型等,国内也有学者对广州地区的雨滴尺寸分布进行了大量的实验研究得出了当地适用的分布模型。这些模型虽然较为接近的估算到相应天气条件下的大气衰减系数,在实际应用中,不同的地区的大气衰减特性仍存在较大差异。本文以现有的常用经验模型为基础,分析了激光在雨的天气条件下的衰减特性,并从桂林本地的天气情况出发,得出了一系列实测结果,通过分析得出适宜桂林本地雨的天气条件下激光大气传输衰减的估算方法。

1 雨的衰减预测模型

降雨是大自然最常见的自然现象之一,它是由于地球表面水蒸气蒸发遇冷后变成小水滴,经碰撞后形成的^[1]。由于雨分子分布的随机性,激光在降雨天气条件下通信时,会受到较大的影响^[2]。目前,已有经验模型对激光在雨信道的传输衰减进行预测,也有很多学者对雨滴尺度分布进行了研究,得出了雨滴的尺度分布模型。

1) 工程应用中的经验公式

特殊的雨衰减 γ_{rain} (dB/km) 通过以下关系式来计算^[3]:

$$\gamma_{\text{rain1}} = k \cdot R^{\alpha}$$

$$\gamma_{\text{rain2}} = 0.29 + \frac{R}{2.53} - \left(\frac{R}{20.3}\right)^2 \quad (1)$$

其中,降雨率 R (mm/h), 参数 k 和 α 取决于雨的特性,表 1 提供了由这些指标确定的一些值^[3],图 1 描绘了 γ_{rain} 与降雨率 R 之间的关系。

表 1 工程经验模型计算参数

Table 1 Parameters of the engineering empirical model

位置	k	α
日本	1.58	0.63
法国	1.076	0.67

两种模型衰减系数随降雨率关系如图 1。

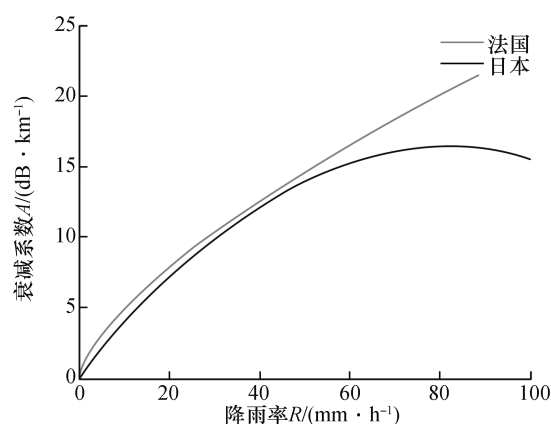


图 1 衰减系数与降雨率的变化关系

Fig. 1 The relation between attenuation coefficient and rainfall

从图 1 中可以看出,两种模型估算的衰减系数均随着降雨率的增大而增大,在采用法国地区的系数模型时,衰减系数估算稍大,而日本地区系数模型在降雨率超过 80 mm/h 时,会有轻微下降。

2) 雨滴的尺寸分布模型

雨滴尺寸分布或雨滴谱是指一定的降雨率,不同尺寸的雨滴在空间的分布状况,可采用雨滴尺寸分布函数 $N(D)$ 来描述雨滴的尺寸分布情况,常见的雨滴尺寸分布有: Laws-Parsons 分布 (L-P 分布)^[4]、Marshall-Palmer 分布 (M-P 分布)^[5]、Joss 分布^[6]、对数正态分布^[7]、Gamma 分布^[8]、Weibull 分布^[9]、广州雨滴尺寸分布^[10]等。

Marshall 和 Palmer 在 L-P 模型的基础上提出了 M-P 模型,指出雨滴的尺寸分布是服从负指数分布的,其表达式为^[5]:

$$N(D) = 8 \times 10^3 \exp(-4.1R^{-0.21}D) \quad (2)$$

Joss 等人通过实验将降雨类型分为:毛毛雨(Drizzle)、广布雨(Widespread)和雷暴雨(Thunderstorm),几种类型的雨滴尺寸分布表达式系数不同,但均服从负指数分布,表示式分别为:

$$\begin{aligned} \text{毛毛雨: } N(D) &= 60\,000 \exp(-5.7R^{-0.21}D) \\ R &< 5, 0.1 < D < 2.2 \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \text{广布雨: } N(D) &= 14\,000 \exp(-4.1R^{-0.21}D) \\ 5 \leq R < 25, 1.8 < D < 3.2 \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \text{雷暴雨: } N(D) &= 2\,800 \exp(-3.0R^{-0.21}D) \\ R &\geq 25 \end{aligned} \quad (5)$$

与 Joss 将降雨类型进行分类不同,Weibull 适用于估算不同降雨类型的雨滴尺寸分布,表达式如式(6)^[9]。

$$N(D) = N_0 \frac{\eta}{\sigma} \left(\frac{D}{\sigma}\right)^{\eta-1} \exp\left[-a\left(\frac{D}{\sigma}\right)^\eta\right] \quad (6)$$

Sekine 提出了一种较为常用的 Weibull 分布参数: $N_0 = 1\,000$, $\eta = 0.95R^{0.14}$, $\sigma = 0.26R^{0.42}$, $a = 1$ 。

Gamma 分布的表达式为^[8]:

$$N(D) = N_0 D^2 e^{-\Lambda D} \quad (7)$$

其中, $N_0 = 64\,500R^{-0.5}$, $\Lambda = 7.09R^{-0.27}$ 。

根据 Mie 散射理论^[11],雨滴对光波的特征衰减可根据下式计算得到^[12]:

$$A = 4.343 \times 10^3 \times 0.25 \int_{D_{\min}}^{D_{\max}} \pi D^2 Q_e(x, m) \cdot N(D) dD \quad (\text{dB/km}) \quad (8)$$

其中 $D_{\min}$, $D_{\max}$ 分别是雨滴的最小和最大半径, $Q_e(x, m)$ 为雨滴的衰减效率因子,它们都是粒子折射率和尺度参数的函数。因为雨滴的半径在 $50\, \mu\text{m} \sim 5\, \text{mm}$ 之间,雨滴的半径远大于光波波长,根据 H. C. Van de Hulst 提出的近似公式^[13],可近似认为衰减效率因子^[14] $Q_e(x, m) \approx 2$ 。对以上几种模型进行仿真,衰减系数与降雨率的关系如图 2。

从图 2 中可以看出, Joss 分布的毛毛雨模型和雷暴雨模型计算结果与其他几种模型计算结果偏差较大,其他几种模型的衰减预测结果虽存在差异,但较为接近,尤其是 gamma 分布和 Weibull 分布,并且曲线上升趋势一致。从 Joss 分布的几种仿真中可以看出,毛毛雨条件下雨衰系数上升的很快,而雷暴雨时,降雨率对衰减系数影响趋势

较为平缓,有时毛毛雨的会大于广布雨和雷暴雨。而从其他几种模型的预测结果可以看出衰减系数与降雨率成正比,并无下降趋势。

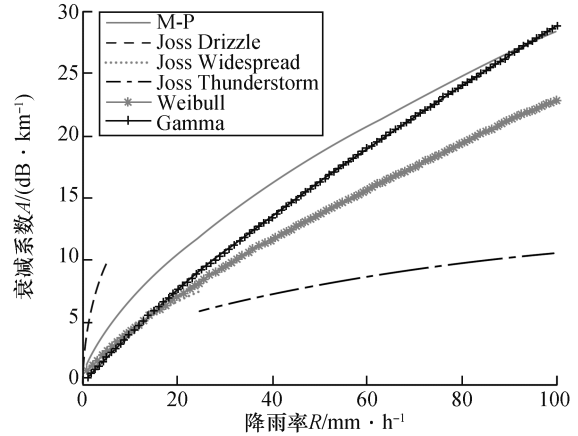


图 2 各模型衰减系数

Fig. 2 Attenuation curves of different models

2 衰减信道测量实验

2.1 实验测试方法和实验装置

实验装置^[15]如图 3 所示。整个测量过程中,以透过天文望远镜后的激光功率为发射功率。基于一系列科研工作的开展,论文中所有的光通信实验均选用 532 nm 的激光器进行实验,图 4 为实验时的装置图。

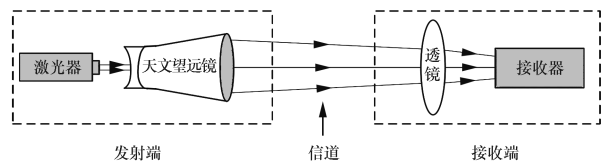


图 3 实验理论装置图

Fig. 3 Experimental system

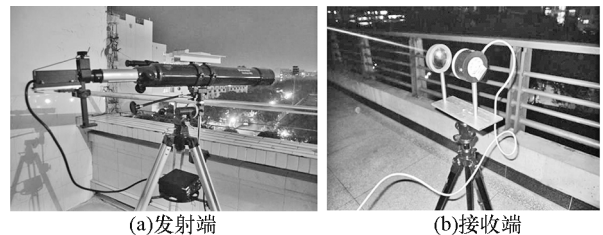


图 4 实验装置图

Fig. 4 Experimental devices

实验过程中采用的器材规格如下:

- 1) 发射端
激光器:型号为 MSL-III-532
- 2) 接收端
功率计:COHERENT LABMAX TOP
透镜:直径 8 cm
- 3) 气象数据测量
能见度仪:锦州阳光科技发展有限公司开发的 NJD-1 能见度仪
气象站:由锦州阳光科技发展有限公司开发的 PC-4 型便捷式阳光气象站

2.2 雨的衰减信道测量

降雨是常见的天气现象,雨引起的衰减是激光在大气中传输时的重要影响因素之一,会对激光通信造成影响,严重时会导致通信链路中断。桂林是一个降雨天气较多的城市,经常出现持续雨天气,在现有的雨滴尺寸分布模型的基础上,对

桂林本地的雨衰进行测量及特性分析,具有十分重要的意义^[16]。

选择桂林多雨的春季,从 2013/04/29 到 2013/05/27 多次进行实验,将数据进行整体,剔除不合理数据后,实验数据的剔除的主要原则如下:

1) 相同降雨率条件下,剔除衰减系数过高和过低数据。

2) 由于天气数据 4 min 更新一次,剔除因降雨率不稳定从而导致衰减数据不准确的值。

综合以上两个原则,将数据进行处理后得出的一系列实验测量数据如表 2。

采用雨衰理论分析模型对不同降雨量条件下的衰减系数进行预测,得出与实验结果的对比值,如表 3。

表 2 雨衰实验测量结果
Table 2 Experimental measuring results

时间	环境温度 /℃	环境湿度 RH/%	露点温度 /℃	瞬时风向 /(°)	10 min 平均风速 /(m·s ⁻¹)	降雨量 /(mm·h ⁻¹)	发射 功率/mW	接收 功率/mW
2013/04/29 12:37-12:41	23.4	85.6	20.85	154	0.2	2.4	22.36	19.45
2013/04/29 12:51-13:01	23.2	86.1	20.75	216	0.3	2.4	22.36	19.19
2013/04/29 13:11-13:16	23.0	86.3	20.59	182	0.7	12.0	22.36	11.99
2013/04/29 13:06-13:11	23.1	86.2	20.67	194	1.0	14.4	22.36	14.09
2013/04/29 13:11-13:16	23.0	86.3	20.59	182	0.7	12.0	22.36	11.99
2013/05/08 10:35-10:37	22.3	87.9	20.20	101	0.0	12.0	27.20	16.57
2013/05/08 10:37-10:41	22.1	87.8	19.98	28	0.0	6.0	27.20	19.07
2013/05/10 06:24-06:27	20.8	87.8	18.70	75	1.1	6.0	28.18	20.56
2013/05/10 06:27-06:31	20.8	87.9	18.72	19	1.0	3.0	28.18	21.16
2013/05/10 06:47-06:53	20.8	87.8	18.70	149	0.1	4.0	28.18	22.06
2013/05/10 06:53-06:59	20.8	87.8	18.70	326	0.2	4.0	28.18	21.46
2013/05/10 07:11-07:15	20.7	87.8	18.60	106	0.0	6.0	28.18	20.66
2013/05/10 07:15-07:19	20.6	87.8	18.51	75	0.1	6.0	28.18	20.26
2013/05/10 07:25-07:31	20.6	87.8	18.51	140	0.0	2.0	28.18	23.56
2013/05/10 07:31-07:37	20.8	87.8	18.70	264	0.5	2.0	28.18	23.26
2013/05/10 07:37-07:43	20.8	87.8	18.70	199	0.6	4.0	28.18	20.56
2013/05/10 07:43-07:49	20.7	87.8	18.60	126	0.0	6.0	28.18	18.96
2013/05/10 07:49-07:55	20.7	87.8	18.60	137	0.0	8.0	28.18	17.46
2013/05/10 08:01-08:07	20.6	87.8	18.51	118	0.1	8.0	29.22	17.96
2013/05/10 08:07-08:13	20.7	87.8	18.60	334	0.0	4.0	29.22	21.46
2013/05/10 08:13-08:19	20.7	87.8	18.60	180	0.0	4.0	29.22	22.76
2013/05/26 11:03-11:07	25.1	1.3	-32.16	174	0.2	15.0	28.70	13.70
2013/05/26 11:10-11:12	24.9	1.3	-32.28	171	0.3	12.0	28.70	15.80

表 3 雨衰各模型衰减系数
Table 3 Attenuations of empirical models

时间	降雨量 /(mm·h ⁻¹)	实验衰减系数 /(dB·km ⁻¹)	M-P 分布 /(dB·km ⁻¹)	Joss 分布 /(dB·km ⁻¹)	Weibull 分布 /(dB·km ⁻¹)	Gamma 分布 /(dB·km ⁻¹)
2013/4/29 12:37-12:41	2.4	1.916 2	2.747 2	6.834 0	1.700 6	1.240 6
2013/4/29 12:41-12:51	1.2	2.029 8	1.774 5	4.644 9	1.127 7	0.688 2
2013/4/29 12:51-13:01	2.4	2.101 2	2.747 2	6.834 2	1.700 6	1.240 6
2013/4/29 13:06-13:11	14.4	6.346 9	8.492 8	5.503 9	5.561 9	5.688 4
2013/4/29 13:11-13:16	12	8.565 1	7.572 6	4.923 3	4.896 8	4.872 1
2013/5/08 10:35-10:37	12	6.811 7	7.572 6	4.923 3	4.896 8	4.872 1
2013/5/08 10:37-10:41	6	4.880 4	4.894 3	3.103 5	3.056 8	2.703 2
2013/5/10 06:24-06:27	6	4.332 9	4.894 3	3.103 5	3.056 8	2.703 2
2013/5/10 06:27-06:31	3	3.937 6	3.162 2	7.700 2	1.953 4	1.499 7
2013/5/10 06:47-06:53	4	3.365 1	3.790 8	8.945 3	2.345 1	1.915 1
2013/5/10 06:53-06:59	4	3.744 1	3.790 8	8.945 3	2.345 1	1.915 1
2013/5/10 07:11-07:15	6	4.266 2	4.894 3	3.103 5	3.056 8	2.703 2
2013/5/10 07:15-07:19	6	4.534 9	4.894 3	3.103 5	3.056 8	2.703 2
2013/5/10 07:25-07:31	2	2.461 0	2.448 9	6.187 7	1.522 0	1.062 5
2013/5/1007:31-07:37	2	2.637 1	2.448 9	6.187 7	1.522 0	1.062 5
2013/5/10 07:37-07:43	4	4.332 9	3.790 8	8.945 3	2.345 1	1.915 1
2013/5/10 07:43-07:49	6	5.446 4	4.894 3	3.103 5	3.056 8	2.703 2
2013/5/10 07:49-07:55	8	6.579 1	5.866 7	3.786 8	3.707 3	3.452 0
2013/5/10 8:01-08:07	8	6.689 1	5.866 7	3.786 8	3.707 3	3.452 0
2013/5/10 08:07-08:13	4	4.242 2	3.790 8	8.945 3	2.345 1	1.915 1
2013/5/10 08:13-08:19	4	3.433 8	3.790 8	8.945 3	2.345 1	1.915 1
2013/5/26 11:03-11:07	15	10.153 9	8.713 6	5.640 0	5.723 9	5.889 1
2013/5/26 11:10-11:12	12	8.193 8	7.572 6	4.923 3	4.896 8	4.872 1

采用 Matlab 绘图,将各实验测量衰减系数散点与各模型理论预测结果对比如图 5 所示。

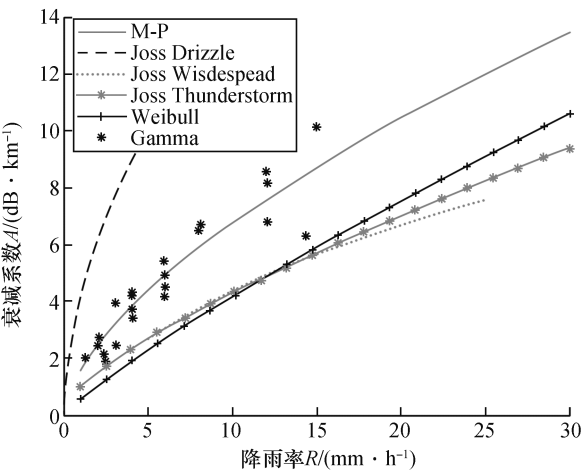


图 5 理论衰减预测模型与实验结果对比
Fig. 5 Experimental measurements and theoretical results

从图 5 可以看出,桂林的降雨在 15 mm/h 以内居多,由于雨滴的密集程度及降雨变化率,所测实验结果有波动,从图中可以看出,桂林的雨衰减实验结果与 M-P 模型预测结果相符。

3 结 论

激光在雨信道下的传输衰减与降雨量变化十分密切,通过对 M-P 分布、Weibull 分布、Joss 和 Gamma 分布等雨的尺寸分布模型分析发现,几种模型对 532 nm 激光在大气中的雾的衰减预测结果十分接近,在降雨量为广布雨时,Weibull 分布、Joss 和 Gamma 分布结果几乎一致,M-P 模型衰减稍大,但 Joss 模型在降雨量为毛毛雨时衰减相对偏大,雷暴雨时衰减相对偏小。实验数据表明,532 nm 激光在常年降雨的桂林地区雨衰减实验结果与 M-P 分布的预测结果更为接近,同一天气条件下,降雨量越大,衰减越大,即 M-P 模型更适用于降雨量较多的桂林的大气雨衰减预测。后续

可通过更多的实验数据分析桂林地区的雨的尺寸分布,得出桂林地区的雨滴尺寸分布模型及雨衰减计算经验公式。

参考文献:

- [1] 梁铨廷. 物理光学[M]. 北京:电子工业出版社,2008
- [2] 王林林,段锦,付军,等. 降雨量对激光传输距离的影响分析[J]. 应用激光,2015,35(1):99-103.
- [3] International Telecommunication Unim. Prediction methods required for the design of terrestrial free-space optical links[S]. Geneva:International Telecommunication Union Press,2007:1814.
- [4] LAWS J O,PARSONS D A. The relation of raindrop-size to intensity [J]. Transactions, American geophysical union, 1943,24(2):248-262.
- [5] MARSHALL J S,PALMER W M K. The distribution of raindrops with size[J]. Journal of meteorology, 1948,5(4):165-166.
- [6] JOSS J,THAMS J C,WALDVOGEL A. Variation of raindrop size distribution at Locarno[C]//Bulletin of the American Meteorological Society. Boston: Amer Meteorological SOC,1968:605-608.
- [7] SEKINE M,CHEN C D,MUSHA T. Rain attenuation from log-normal and Weibull raindrop-size distributions [J]. IEEE transactions on antennas and propagation, 1987,35(3):358-359.
- [8] ULBRICH C W. Natural variations in the analytical form of the raindrop size distribution [J]. Journal of climate and applied meteorology,1983,22(10):1764-1775.
- [9] JIANG H,SANO M,SEKINE M. Weibull raindrop-size distribution and its application to rain attenuation [C]// IEE Proceedings-Microwaves, Atennas and Propagation. London:the Institution of Engineering and Technology, 1997:197-200.
- [10] 仇盛柏,陈京华. 广州雨滴尺寸分布[J]. 电波科学学报,1995,10(4):73-77.
- [11] 麦卡特尼 E J. 大气光学分子和粒子散射[M]. 潘乃先,译. 北京:科学出版社,1998:122-334.
- [12] 李娣. 大气信道对无线激光通信影响的研究[D]. 桂林:桂林电子科技大学,2011:27-30.
- [13] VAN DE HULST H C. Light scattering by small particles [M]. New York:Dover Publications,1981.
- [14] 郭婧,张合,王晓峰. 降雨对 532 nm 和 1064 nm 激光传输的衰减特性研究 [J]. 光学学报,2011,31(1):101004.
- [15] 王喆,汪井源,徐智勇,等. 远红外激光雨中传输损耗的研究 [J]. 红外与激光工程,2015,44(10):3093-3097.
- [16] 魏朕,沈娜,张祥金. 532 nm 激光在雨中传输衰减模型的改进与实验 [J]. 红外与激光工程,2018,47(11):1106004.

(责任编辑:扶文静)