

雨滴谱模型对雨衰减计算的适用性分析

宋 博^{1,2}, 王红星^{1,2}, 刘 敏^{1,2}, 吴晓军^{1,2}, 孙晓明^{1,2}

(1. 海军航空工程学院, 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)

摘要:雨滴谱分布模型是影响红外激光在雨中传输性能的一个重要因素。尽管现有的雨滴谱模型很多,但并未形成统一的结论,具体应用中模型的选择没有依据,使得计算中模型的选择具有一定的盲目性。针对此问题,论文从 Mie 散射理论出发,采用理论分析与仿真分析相结合的方法,讨论了几种雨滴的谱分布特性,比较了几种典型雨滴谱模型下的光传输衰减特性,分析了雨滴尺寸分布在计算大气衰减时的差异。并通过与实测雨衰减数据进行比较,最终得到了 L-P 模型对大雨条件下的衰减计算较为准确, Joss 模型对小雨条件下的衰减计算较为准确的结论。论文的结论对于无线光通信等应用领域中模型的合理选择具有一定的指导意义。

关键词:红外激光;降雨衰减;雨滴谱分布;适用性

中图分类号: O436.2; TN929.12 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1001-5078.2012.03.015

Raindrop size distribution model for applicability analysis of rain attenuation

SONG Bo^{1,2}, WANG Hong-xing^{1,2}, LIU Min^{1,2}, WU Xiao-jun^{1,2}, SUN Xiao-ming^{1,2}

(1. Navy Aeronautical Engineering University, Yantai 264001, China;

2. Key Laboratory on Signal & Information Processing of Shandong Province, Yantai 264001, China)

Abstract: Rain drop-size distribution model is an important factor that affects transmission performance of infrared and laser in the rain. Although many rain drop-size distribution models exist at present, yet it has not formed a common conclusion and there is no basis for model selection in specific applications. That makes some calculations and design work difficult. In view of this problem, the paper starts from the Mie scattering theory, combining theoretical analysis with simulation, to discuss several kinds of raindrop spectrum distribution characteristics. Attenuation characteristics of some typical rain drop-size distribution models are compared. By comparing the analysis results with the actual rain attenuation data, it comes to the conclusion that the L-P model is more accurate for heavy rain and the Joss model is more accurate for light rain. Some conclusions are helpful for choosing model when analyzing optical systems such as wireless optical communication.

Key words: infrared laser; rain attenuation; rain drop-size distribution

1 引言

雨滴谱是在一定的降雨时,不同尺寸的雨滴在空间单位体积中的分布情况,也称为雨滴尺寸分布。实际降水粒子的尺度谱是复杂多变的,它随着地域、降水云类型和大气底层状态的不同而变化。最早的雨滴尺寸分布是由 Wiesner 测量的^[1],随后 Laws 和 Parsons 等人测得了经典的 L-P 雨滴尺寸分布^[2]。

而 Marshall 和 Palmer 等人结合 Laws 和 Parsons 的结论,提出了负指数模型^[3],即 M-P 雨滴尺寸分布。Joss^[4]等人对降雨类型进行细分,得到了广延雨、毛

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:宋 博(1985-),男,硕士研究生,主要从事光通信信道模型方面的研究。E-mail:330487101@qq.com

收稿日期:2011-07-20;修订日期:2011-08-11

毛雨和暴雨三种情况下的雨滴尺寸分布,其方程与 M-P 分布是一样的,只是参数有所不同。由众多雨滴谱模型的产生可看出,雨滴谱的种类比较多,并且相互之间有一定的联系。

魏合理^[5]等人在 M-P 雨滴尺寸分布模型的基础上,对在合肥地区测量的雨衰减数据进行拟合,计算得出降雨衰减与降雨量关系,发现理论计算结果与测量结果在大雨情况下差别较大。胡中华^[6]等人利用 Weibull 雨滴尺寸分布,计算降雨衰减随降雨量的变化,但在较小降雨量的条件下,计算的衰减结果偏小。以上研究只选择了一种雨滴谱进行雨衰减的计算,而对比多种雨滴谱情况下的雨衰减大小,可能得到更准确度结果。因此,比较雨滴谱分布之间的差别,分析雨滴谱分布的特点对研究激光在雨中的传输具有重要意义。

2 雨滴尺寸分布特性

雨滴形状与其尺寸大小有关,最小雨滴等价于在云中发现的微小水滴,最大雨滴一般不会大于 4 mm。当半径大于 4 mm 时,雨滴是不稳定的,会发生破裂。因此,雨滴半径通常在 0.05 ~ 4 mm。

雨滴对光波传播的影响主要取决于雨滴尺度分布、散射和吸收截面。其中雨滴尺寸分布是在一定降雨率情况下,不同尺寸的雨滴在空间单位体积中的分布状况。雨滴的大小及在空间中的分布都是随机的,一般情况下人们用雨滴尺寸分布函数 $N(D)$ 来描述雨滴的尺寸分布情况,单位是 $\text{m}^{-3} \cdot \text{mm}^{-1}$, D 表示雨滴直径,单位是 mm。

由于降雨这一自然现象在发生时间和地域上的不确定性,因此在不同地区测量数据的基础上得到了许多雨滴尺寸分布模型,如 Laws-Parsons 分布^[2]、Marshall-Palmer 分布^[3]、Joss 分布^[4]、Weibull 分布^[7]、广州雨滴谱分布^[8]、对数正态分布^[9]、gamma 分布^[10]等。

3 几种雨滴谱衰减的计算

与 Mie 散射相关的参量主要有散射效率因子和散射相函数^[11],雨滴在不同谱分布下的散射特性,包括散射效率因子、吸收效率因子和衰减效率因子,其定义为散射、吸收和衰减的总辐射能量与入射到半径为 r 的粒子几何截面上的辐射能量之比,即散射截面 σ_{sca} 、吸收截面 σ_{abs} 和衰减截面 σ_{ext} 与粒子的几何截面之比^[12]:

$$Q_{\text{sca}}(\alpha, m) = \frac{\sigma_{\text{sca}}}{\pi r^2} \quad (1)$$

$$Q_{\text{abs}}(\alpha, m) = \frac{\sigma_{\text{abs}}}{\pi r^2} \quad (2)$$

$$Q_{\text{ext}}(\alpha, m) = \frac{\sigma_{\text{ext}}}{\pi r^2} \quad (3)$$

其中, r 为粒子半径; $Q_{\text{ext}} = Q_{\text{sca}} + Q_{\text{abs}}$ 。 Q_{sca} 和 Q_{abs} 为散射和吸收效率因子,它是粒子复折射指数 $m(f, T)$ ^[13-14] 和尺度参数 $x = 2\pi r/\lambda$ 的函数,可由 Mie 散射理论精确的计算。

波长为 λ 、强度为 I_0 的光辐射通过距离为 L 的介质后,其强度为 I ,根据 Bouguer 定律^[15],可写成:

$$I = I_0 \exp\left(-\int_0^L \sigma_{\text{ext}}(\lambda) dl\right) \quad (4)$$

式(12)中, σ 为消光系数,对于球形粒子得消光可由下式计算:

$$\sigma(\lambda) = \int_{r_1}^{r_2} \pi r^2 Q_{\text{ext}} n(r) dr \quad (5)$$

式(13)中, $n(r)$ 为粒子尺度谱分布。

对于 Marshall-Palmer 指数分布雨滴谱,雨滴的平均尺度分布:

$$n(D) = a \exp(-bJ^{0.21} D) \quad (6)$$

式中, J 为降雨强度 (mm/h); D 为雨滴的直径 (mm); 参数的典型值为 $a = 8000 \text{ m}^{-3} \cdot \text{mm}^{-1}$, $b = 4.1$ 。雨滴相对于红外波长可认为是大粒子,这时取 $Q_{\text{ext}}(x, n) \approx 2$,积分式(5)考虑所有粒子积分区间取 $r_1 = 0, r_2 = \infty$,可得:

$$\sigma(\lambda) = 0.365J^{0.63} \quad (7)$$

式(7)表明衰减与波长无关,只是降雨强度的函数。同理,其他几种雨滴谱分布也可计算出衰减公式^[16]。

4 雨滴谱的适用性分析

雨滴对光传输影响主要取决于雨的尺度分布、密度、散射和吸收截面以及对频率的依赖关系。雨滴的尺度分布取决于降雨强度 R (mm/h)。本文利用 Matlab 软件对几种雨滴谱模型下降雨量与衰减之间的关系进行仿真,计算不同的降雨量条件下的衰减。如图 1 所示,是拟合几种雨滴谱的衰减曲线。

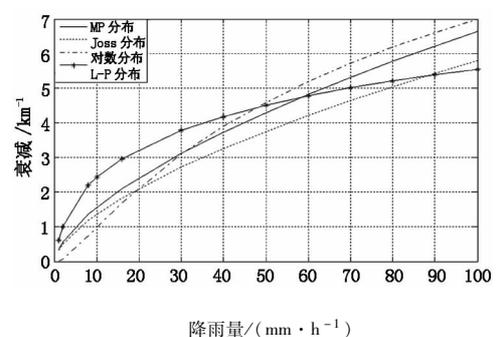


图 1 雨滴谱模型降雨衰减

由图1可以得出:

(1)各个雨滴谱模型衰减都是随着降雨量的增大而增大。当降雨量小于50 mm/h时,L-P雨滴谱模型衰减值大于其他模型。当降雨量大与50 mm/h时,L-P模型下的雨衰减值增长速度比其他模型慢。说明有可能L-P雨滴谱对小雨条件下的雨滴分布估计有所不足。

(2)对数分布降雨模型(图中点划线)随着降雨量的增大,降雨衰减增长较快,可能在在大雨条件下的雨滴分布估计失误。而Joss降雨模型计算出的衰减整体较低,对降雨衰减的估计较为准确。

由于理论计算的结果与实际是有偏差的,通过与实际测量数据比较能更好地看出理论模型的优点与不足。1996年,魏合理^[5]等人在合肥地区对红外辐射在雨中的衰减进行测量,得出了测量数据,本文将测量数据与理论模型仿真的曲线进行比较。如图2所示,是理论模型与拟合曲线的降雨衰减。

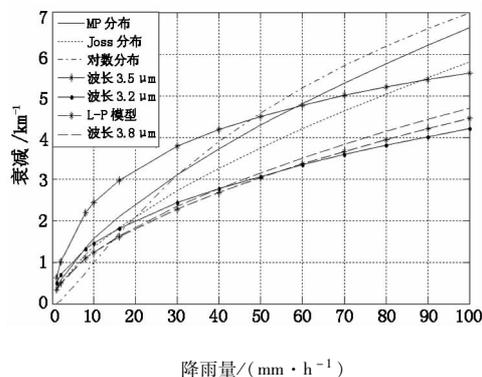


图2 实验测量数据与理论模型降雨衰减

如图2所示,可以得出:

(1)实验数据拟合的曲线衰减要小于仿真曲线。降雨量小于10 mm/h时,几种模型计算的衰减值与实验数据相差不多,当降雨量大于20 mm/h时,仿真结果与实验数据的差别开始变大,并且随着降雨量的增大逐渐增大。

(2)降雨量在20~100 mm/h的区间里,L-P模型的衰减值比实验拟合的曲线整体高约2 dB,说明通过对L-P模型进行调整,L-P模型能较好地模拟计算激光通过降雨的衰减。

(3)Joss模型在降雨量小于40 mm/h的情况下,与实验拟合曲线较为吻合,在大于40 mm/h(即大雨或者暴雨)的情况下,对降雨的衰减估计发生

失真,这是由于在大雨的情况下,雨滴的前向散射会对激光传输有较大的影响,通过对雨滴的前向散射纠正^[5]可以得到更为准确的模型,在Joss模型下对降雨衰减的估计也较为准确。

5 结论

文章针对雨衰的理论计算中雨滴尺度谱模型的选择没有理论依据的问题,采用理论分析和仿真分析相结合的方法,对几种雨滴谱模型下的降雨衰减与实际测量数据进行比较,得到L-P模型对小雨时的雨滴数量分布估计过高,在暴雨情况下进行雨衰减计算较为准确。Joss雨滴谱模型在小雨、中雨、大雨情况下对雨滴谱的模拟较为准确,对雨衰减的计算可以得到较为准确的结果。M-P对大雨的雨滴数量分布估计过高,不利于大雨条件下的雨衰减计算。但理论计算的雨衰减与测量数据差别较大,这主要是没考虑雨滴的前向散射造成的,在理论的计算中要将雨滴的前向散射因素考虑进去。

参考文献:

- [1] Tomohiro Oguchi. Electromagnetic wave propagation and scattering in rain and other hydrometeors [J]. Proceeding of the IEEE, 1983, 71(9): 1029 - 1077.
- [2] Laws J O, Parsons D A. The relationship of raindrop size to intensity [J]. Trans Am Geophys Union, 1943, 24: 452 - 460.
- [3] Marshall J S, Palmer W M. The distribution of raindrops with size [J]. J Meteorol, 1948, 5: 165 - 166.
- [4] Joss J, J C Thams, A Waldvogel. The variation of raindrop size distributions at lacamo [C]. Toronto: Proc. of the Intern. Col on Cloud Physics, 1968, 369 - 373.
- [5] Wei H L, Liu Q H, Song Z F, et al. Extinction of infrared radiation by rain [J]. Journal of Infrared and Millimeter Waves, 1997, 16(6): 418 - 424. (in Chinese)
魏合理, 刘庆红, 宋正方, 等. 红外辐射在雨中的衰减 [J]. 红外与毫米波学报, 1997, 16(6): 418 - 424.
- [6] Hu Z H, Chen J B, Liu Y, et al. A study of optical transmission through rain [J]. College Physics, 2007, 26(7): 34 - 39. (in Chinese)
胡中华, 陈家璧, 刘雅, 等. 光在雨中传输的研究 [J]. 大学物理, 2007, 26(7): 34 - 39.
- [7] Jing H, Sano H, Sekin M. Weibull raindrop-size distribution and its application to rain attenuation [J]. IEE Proc

- Micro Antenna propagation,1997,144(3):197-200.
- [8] Qiu S B,Chen J H. The distributions of raindrop sizes in guangzhou[J]. Chinese Journal of Radio Science,1995,10(4):73-77. (in Chinese)
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.
- [9] Ajayi G O,Olsen R L. Modeling of a tropical raindrop size distribution formicrowave and millimeterwave application [J]. Radio Science,1985,20(2):193-202.
- [10] Maitra A. Modeling of raindrop size distribution from multiwavelength rain attenuation measurements [J]. Radio Science,1999,34(3):657-666.
- [11] Liebe H J,Hufford G A Manabe T. A model for the complex permittivity of water at frequencies below 1 THz[J]. Internat. Infrared and mm Waves, 1991, 12 (7): 659-675.
- [12] Jonathan H J,Dong L W. Ice and water permittivities for millimeter and sub-millimeter remote sensing application [J]. Atmos. Sci. Let,2004,5:146.
- [13] Wang Q H,Zhang Y Y,Lai J C, et al. Application of Mie theory in biological tissue scattering characteristics analysis[J]. Acta Phys. Sin,2004,56:1203. (in Chinese)
王清华,张颖颖,来建成,等. Mie理论在生物组织散射特性分析中的应用[J]. 物理学报,2004,56:1203.
- [14] Zhang H Y,Zhao W J, Ren D M. Improved algorithm of Mie scattering parameter based on matlab[J]. The Journal of Light Scattering,2008,20:102. (in Chinese)
张合勇,赵卫疆,任德明. 球形粒子 Mie 散射参量的 Matlab 改进算法[J]. 光散射学报,2008,20:102.
- [15] Song Zhengfang. Fundamentals of applied atmospheric optics[M]. Beijing: Meteorological Press, 1990, 12: 19. (in Chinese)
宋正方. 应用大气光学基础[M]. 北京: 气象出版社, 1990,12:19.
- [16] An Y Y. Laser transmission technology[J]. Laser & Infrared,2002,32(6):435-438. (in Chinese)
安毓英. 激光传输技术[J]. 激光与红外,2002,32(6): 435-438.
-