

雨雾共存天气 1.55 μm 波长激光动态传输特性

俞任姣*, 李振华**, 来建成, 王春勇, 吴志祥

南京理工大学理学院, 江苏 南京 210094

摘要 针对雨雾共存的特殊天气条件下现有大气衰减计算模型的不足,通过引入雨对雾的清除机制,对现有模型进行改进,提出一种更为精确、且能反映大气衰减动态特性的计算模型,并采用 Monte-Carlo 方法对激光在大气中的传输进行仿真分析。结果表明:降雨强度与雾的清除效应呈正相关,由于雨雾共存天气的雨量不大,随着雨对雾的清除,大气透射率逐渐增大;在降雨率为 1 mm/h 的情况下,平流雾的透射率大约在降雨 5 h 后趋于稳定,辐射雾则需要更长的时间。所提修正模型对无线光通信等相关领域中大气衰减的估计和评价具有参考意义。

关键词 散射; 大气衰减; 雨雾共存天气; 透射率; Monte-Carlo 仿真

中图分类号 TN249

文献标志码 A

doi: 10.3788/CJL202148.1306002

1 引言

激光在大气中的传输性能是指光波通过大气所引起的光学特性的变化。大气对激光传输的主要影响包括:大气气体分子散射与吸收造成的辐射能量损失的大气衰减^[1];大气中悬浮的气溶胶粒子和各种降水粒子(如云、雾、雨、雪等)对光波的吸收和散射效应引起的衰减^[2];大气折射率随大气温度、气压和湿度等的随机起伏造成的光束强度的起伏(闪烁)、光束的扩展和漂移,使得光束质量变差^[3-6];光在大气中传输的非线性效应等^[7]。在近红外区,大气的吸收作用可忽略不计,大气衰减由散射决定,主要贡献来自于雨滴、雾滴等降水粒子。雨和雾是自然界中最常见的天气现象,激光在雨和雾中的传输特性一直是热点问题^[8-10],但是关于雨雾共存天气作为一种单独天气现象的研究却鲜有报道。

雨雾共存是一种比较特殊的大气现象,降雨率一般小于 3 mm/h^[11]。这是由于降雨率较大时,雨滴会对雾滴产生清除作用,共存现象消失。实验观测表明^[12-13],雨雾共存的天气现象时有发生,而且多出现在冬春季节的连阴雨时段。激光在雨雾共存天气中传输,不仅要受到雨的衰减,还要受到雾的衰减,由于降雨率较小,通常情况下雾的衰减要比雨的

衰减大。路远等^[14]使用传统经验公式分别计算雨和雾天的大气衰减,并对其进行了简单线性叠加,提出了一种雨雾共存时红外波段大气衰减的简易计算方法。该方法简单方便,但并未考虑到雨对雾的作用,存在衰减的重复计算。刘敏等^[15]从由能见度得到的大气衰减中将雨的衰减剔除,根据波长与衰减的关系反演得到所需波段激光的雾衰减,最后对雨衰减和修正后的雾衰减进行叠加得到雨雾共存天气的大气衰减,避免了重复计算的误差。

本文从降雨对雾的清除原理出发,在已有模型上进行改进,提出一种雨雾共存天气下大气衰减的预测模型,动态展示雨雾共存天气大气衰减和透射率随时间的变化。

2 雨对雾的清除

在雨雾共存天气,降雨过程对雾有显著的清除效果,随着雾不断被雨滴所清除,雾的尺度分布将发生变化。这种悬浮于大气中的颗粒由于降水冲刷而沉降的过程被称为湿沉降,湿沉降的主要机制为布朗扩散、拦截和惯性碰撞。布朗扩散机制主要对尺度小的雾滴起作用,这些雾滴在布朗力的作用下作无序运动,被大尺度的雨滴捕集而被湿去除,雾滴尺度越小被捕集的几率越大。如果雨滴的流线与雾滴

收稿日期: 2020-10-12; 修回日期: 2020-11-10; 录用日期: 2021-01-11

基金项目: 国家自然科学基金(61971225)

通信作者: *renjiao_yu@163.com; **lizhenhua@njjust.edu.cn

的轨迹交叉,则雾滴被雨滴拦截,这种机制对任意尺度的雾滴都起作用,拦截效率取决于雨滴与雾滴的尺度比。对于尺度较大的雾滴而言,其与雨滴的碰撞主要是惯性作用,气溶胶越大越易发生碰撞。这些机制非常复杂,受各种外部因素影响,比如雾尺度谱、雨滴尺度谱、雾滴和雨滴本身的物理化学特性、雨水含水量及环境温度等。可以利用考虑湿沉降的通用动力学方程来描述雾尺度分布变化^[16-18],通过雾尺度谱随时间的演变过程来量化雾在降雨过程的

湿沉降。

$$\partial n(d, t) / \partial t = -\Lambda(d) n(d, t), \quad (1)$$

式中: $n(d, t)$ 为雾尺度分布函数,表示时刻 t 、尺度为 d 的雾滴在单位体积内的数密度; $\Lambda(d)$ 为清除系数,表示雾滴被雨滴清除的速率,单位为 s^{-1} 。

采用 Gamma 分布模型来描述初始时刻的雾尺度分布,雾主要分为平流雾和辐射雾两类。雾滴粒径分布 $n(d)$ 与能见度 V 的关系^[19-23]分别为

$$\text{平流雾: } n(d) = 0.2647 \times 10^7 V^{1.15} d^2 \exp(-0.4179 V^{0.43} d), \quad (2)$$

$$\text{辐射雾: } n(d) = 0.7760 \times 10^{10} V^{1.7} d^2 \exp(-2.061 V^{0.54} d)。 \quad (3)$$

同时,采用不同降雨率情况下误差较小的对数正态分布的雨滴尺度谱:

$$N(D) = \frac{N_d}{\sqrt{2\pi} D \ln \sigma_{dg}} \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{\ln D - \ln D_{dg}}{\ln \sigma_{dg}} \right)^2 \right], \quad (4)$$

式中: N_d 、 D_{dg} 、 σ_{dg} 分别为单位体积内的雨滴总数目、雨滴几何平均尺度、雨滴几何标准偏差; D 为粒子直径。本文假设雨滴尺度谱不随时间而变动。典型的小雨、中雨和大雨的参数如表 1 所示^[24],3种降雨类型是按照降雨率来界定的。

表 1 不同降雨类型的相关参数

Table 1 Related parameters of different rainfall types

Type of rainfall	Rain rate $R /$ ($\text{mm} \cdot \text{h}^{-1}$)	Number density $N_d /$ m^{-3}	Average scale $D_{dg} /$ mm	Standard deviation σ_{dg}
Light rain	1	172.00	0.72	2.0
Moderate rain	10	285.45	1.22	2.0
Heavy rain	100	473.73	2.08	2.0

3 激光在雨雾天传输衰减计算

衰减系数是衡量激光在大气传输中衰减性能的重要指标,它是一个由衰减截面 σ_e 和粒子谱分布 $N(D)$ 确定的函数,计算公式^[25]为

$$\mu = \int_0^\infty \sigma_e N(D) dD = \int_0^\infty \pi D^2 Q_e(x, m) N(D) / 4 dD, \quad (5)$$

式中: $Q_e(x, m)$ 为衰减效率因子, x 为粒子尺度参数, m 为粒子的复折射率。在讨论激光传输受到雨雾的衰减影响时,雨粒子的粒径与入射激光波长相比,雨滴是大粒子。根据 Mie 理论,此时衰减效率因子趋于定值 2。而雾滴直径与入射波长相当,衰减效率因子起伏较大,不能看作常数。

已经给出了不同降雨率下雨滴的尺度谱,由于雨雾共存天气多出现在冬春季节的连阴雨时段,降雨率较小,假设降雨率不随时间变化,则雨滴尺度谱与时间无关,只与降雨率有关。通过(5)式计算得到

不同降雨率下雨的衰减系数 μ_r ,如表 2 所示。

表 2 不同降雨率下雨的衰减系数

Table 2 Attenuation coefficient of rain with different rain rates

$R / (\text{mm} \cdot \text{h}^{-1})$	1	10	100
μ_r / km^{-1}	0.362	1.78	7.20

利用(1)式可以得到不同类型雾、不同类型降雨下,雾滴粒径分布谱随时间演变的详细信息^[26-27]。由于雾的尺寸分布在不断变化,雾的衰减系数 μ_f 也在不断变化。同样根据(5)式计算得到雾的衰减系数随时间变化,如图 1 所示。设雾的初始能见度为 1 km。

根据(2)、(3)式可以看出,在能见度相同的情况下,两种雾的粒子数密度不同,因此两种雾的初始衰减系数不同。随着时间的推移,不同雾的衰减系数下降的速度不同,由于平流雾粒子直径大,清除速率大,衰减系数下降的速度也快。

雨雾共存天气下的总衰减 $\mu(t)$ 表示为雨衰减与清除后雾衰减的和:

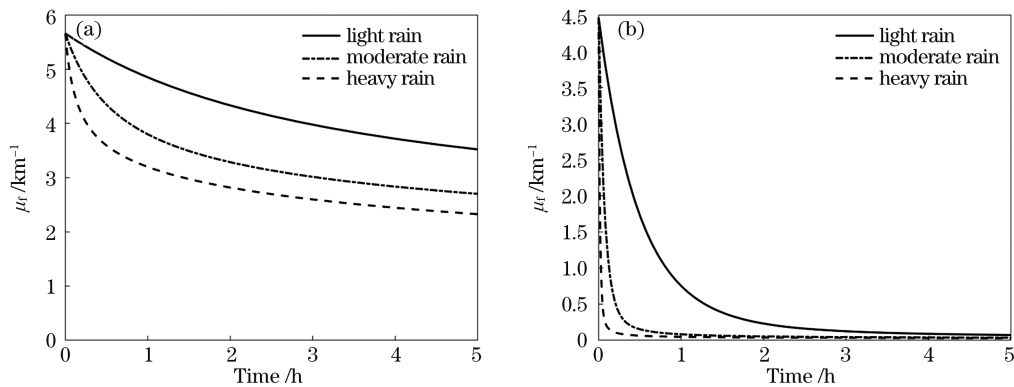


图 1 雾衰减随时间的变化关系。(a)辐射雾;(b)平流雾

Fig. 1 Relationship between fog attenuation and time. (a) Radiation fog; (b) advection fog

$$\mu(t) = \mu_r + \mu_t(t). \quad (6)$$

由 Lambert-Beer 定律的指数衰减规律可得

$$\tau(t) = \exp[-\mu(t)L], \quad (7)$$

式中: L 为传输距离, 单位为 m。将雨和雾的衰减相加, 可以得到雨雾共存情况下的衰减系数, 代入 (7) 式, 取传输距离 100 m, 可以得到辐射雾和平流雾在三种类型降雨情况下透射率随时间的变化关

系, 如图 2 所示。

从图 2 可以看出, 随着降雨对雾的清除, 透射率逐渐增大。常言道, 雨过天晴, 万物清晰, 说的就是降雨过后能见度变好。辐射雾雾滴大多是中等尺度气溶胶, 很难被降雨过程湿去除, 因此透射率随时间缓慢增加。平流雾雾滴粒径大, 在中雨和大雨的情况下, 快速被清除, 随后透射率处于定值。

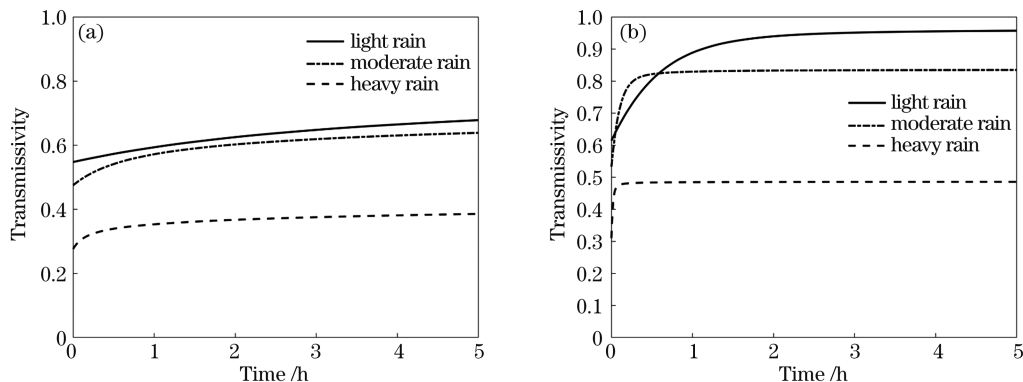


图 2 透射率随时间的变化关系。(a)辐射雾;(b)平流雾

Fig. 2 Time dependence of transmissivity. (a) Radiation fog; (b) advection fog

4 Monte-Carlo 仿真

当激光照射空间体积的粒子群时, 如果粒子间距数倍于粒子的半径, 所有粒子的散射可认为是相互独立的, 忽略邻近散射粒子的影响, 散射光强度是可以相互叠加的。Lambert-Beer 衰减定律便是在单次散射假设的基础上建立起来的。然而激光入射浓度较高的粒子群时, 经粒子散射后, 一部分散射光会被另一颗粒子再次散射到达激光接收机, 此时称为二次散射。同样, 激光束入射粒子群时会发生三次或多次散射。虽然多次散射的能量相比直射光能量要小得多, 但要考虑多次散射时激光接收机接收的能量要稍微大于单次散射的能量。本节将利用 Monte-Carlo 模型研究激光在雨雾中的多次散射。

4.1 Monte-Carlo 模型

Monte-Carlo 方法广泛运用于激光在大气介质中传输特性的仿真研究。Monte-Carlo 法将激光看作一系列光子, 然后逐个追踪各个光子的状态, 最后利用追踪到的光子的统计分布来表示激光的分布特征。在整个 Monte-Carlo 模拟过程中, 大气中粒子的分布是完全随机的, 所以光子在这些介质中运动时会与大气中的粒子发生随机碰撞。运用 Monte-Carlo 法解光子传输问题的一般过程包括光子随机产生、光子随机迁移、光子碰撞过程、光子终止判断及数据统计处理^[28]。

将激光脉冲看作是大量光子的组成, 根据实验室所使用的激光参数, 对光子进行初始化。考虑激光脉冲在时域上的一个冲击响应, 在激光束的横截

面上的光强分布服从高斯分布,并有 5 mrad 的发散角。每个光子的初始发射点被设置在原点(0,0,0),光子初始方向为 (μ_x, μ_y, μ_z) ,具有的形式为

$$\begin{cases} \mu_x = \sin \theta_0 \cos \varphi_0 \\ \mu_y = \sin \theta_0 \sin \varphi_0, \\ \mu_z = \cos \theta_0 \end{cases} \quad (8)$$

式中: θ_0 为服从标准正态分布的随机数; φ 为在 $[0, 2\pi]$ 均匀分布的随机数。当 θ_0 最大值取 2 时,激光束在束腰位置时的光束发散角恰好是 5 mrad。

为了描述组成激光脉冲的光子与雨滴和雾滴相互作用的情况,从 Lambert-Beer 定律出发,首先定义激光在介质传输过程中,光子两次相邻散射间的距离为散射步长 $L^{[29]}$:

$$L = -\frac{\ln \zeta}{\mu}, \quad (9)$$

式中: ζ 为 $[0, 1]$ 均匀分布的随机数; μ 为雨衰减和雾衰减的叠加。沿初始方向移动步长 L 后,光子发生碰撞,光子碰撞后的方向是由散射相函数 $p(\theta, \varphi)$ 决定的。在这里将雨滴和雾滴简化成球型粒子进行处理,由球型粒子的散射特性可知,粒子对光子的散射在与光子传输方向垂直的平面内各向同性,该平面内的 φ 在 $[0, 2\pi]$ 均匀取值。散射方向 (θ, φ) 由散射方向与入射方向的夹角 θ 及在与入射方向垂直平面内的方位角 φ 组成。

$$\varphi = 2\pi\zeta_2, \quad (10)$$

$$\theta = \arccos \left\{ \frac{1}{2g} \left[(1 + g^2) - \frac{(1 - g^2)^2}{(1 + g - 2g\zeta_3)} \right] \right\}, \quad (11)$$

式中:由 Henyey-Greenstein 相函数可得到(11)式中中等号右边第二项 $^{[27]}$, ζ_2, ζ_3 均为 $[0, 1]$ 均匀分布的随机数; g 为各向异性因子。主要考虑雨雾粒子与光子之间的碰撞,通过计算某一时刻雨雾粒子数密度的比值,对其与 $[0, 1]$ 区间内均匀分布的随机数的数值大小进行比较,判断与光子发生碰撞的粒子类型。

假设光子已经经历了 n 次碰撞,则第 $n+1$ 次碰撞点的位置为

$$\begin{cases} X_{n+1} = X_n + L_n \times u \\ Y_{n+1} = Y_n + L_n \times v, \\ Z_{n+1} = Z_n + L_n \times w \end{cases} \quad (12)$$

式中: L_n 为第 n 次到第 $n+1$ 次碰撞的光子随机步长。

$$\begin{cases} u = \sin \theta \cos \varphi \\ v = \sin \theta \sin \varphi. \\ w = \cos \theta \end{cases} \quad (13)$$

利用 Poole 等提出的统计加权法 $^{[30]}$,光子初始权值 $W_0 = 1$,认为光子与粒子碰撞时同时产生吸收与散射,每次碰撞后权值都会相应衰减,碰撞后的权值等于碰撞前的权值乘以介质的单次散射反照率 ω ,即 $W_{n+1} = W_n \times \omega$ 。其中,单次散射反照率为散射截面与消光截面之比,在计算前需判断介质粒子的类型。设定一个光子湮灭阈值 γ ,当 $W_n < \gamma$ 时(本文 $\gamma = 10^{-6}$),认为光子湮灭,停止跟踪。在光子运动过程中,如果光子跑到激光发散角之外的范围,也停止跟踪。

当光子到达接收平面时,如果光子坐标 (x, y) 满足

$$\sqrt{x^2 + y^2} \leq D'/2, \quad (14)$$

则认为探测器能够接收到该光子,其中 D' 为探测器孔径。对接收到的光子数量进行统计,可以得到激光在雨雾中传输的透射率。

4.2 模拟结果分析与讨论

降雨率较大时会使雨雾共存状态消失,且与辐射雾相比,平流雾透射率随时间的变化较为明显,接下来将进行雨(小雨)雾(平流雾、辐射雾)共存情况下激光传输的仿真研究。取初始能见度为 1 km,降雨率为 1 mm/h。模拟出射光子总数为 10^6 个,发散角为 5 mrad,传输距离为 100 m。计算中用到的降雨参数如表 3 所示。

表 3 降雨参数
Table 3 Parameters of rain

g	μ_r/m^{-1}	ω
0.8545	0.362×10^{-3}	0.6801

基于 Mie 散射理论,结合实时变化的雾滴分布,可以得到辐射雾、平流雾参数随时间的变化,如表 4 和表 5 所示。

雨滴的尺寸大于雾滴,其前向散射现象更加明显,各向异性因子较大。雨滴中的含水量高,吸收大,单次散射反照率偏小。平流雾含水量高于辐射雾,因此平流雾反照率大于辐射雾。由于雨对平流雾的清除较为明显,平流雾的密度减小,单位体积雨滴的占比增大,吸收增强,散射减弱,粒子群的反照率增大。

根据上文的讨论,考虑多次散射时激光的透射率应大于仅考虑单次散射的透射率,但从图 3 可以看出,在传输距离为 1000 m、透射率小于 5% 时,利用 Monte-Carlo 方法计算得到的透射率大于 Lambert-Beer 的计算结果,而在其他情况下反之。

表 4 辐射雾参数随时间的变化

Table 4 Variation of radiation fog parameters with time

Parameter	0 h	0.5 h	1 h	2 h	3 h	4 h	5 h
g	0.8313	0.8304	0.8361	0.8317	0.8360	0.8304	0.8332
μ_t/m^{-1}	0.0058	0.0054	0.0051	0.0046	0.0042	0.0040	0.0038
ω	0.9991	0.9991	0.9992	0.9992	0.9992	0.9992	0.9992

表 5 平流雾参数随时间的变化

Table 5 Variation of advection fog parameters with time

Parameter	0 h	0.5 h	1 h	2 h	3 h	4 h	5 h
g	0.8015	0.7955	0.7940	0.8019	0.8201	0.8336	0.8421
μ_t/m^{-1}	0.0044	0.0020	8.81×10^{-4}	2.56×10^{-4}	1.28×10^{-4}	8.69×10^{-5}	6.76×10^{-5}
ω	0.9945	0.9953	0.9960	0.9976	0.9986	0.9989	0.9991

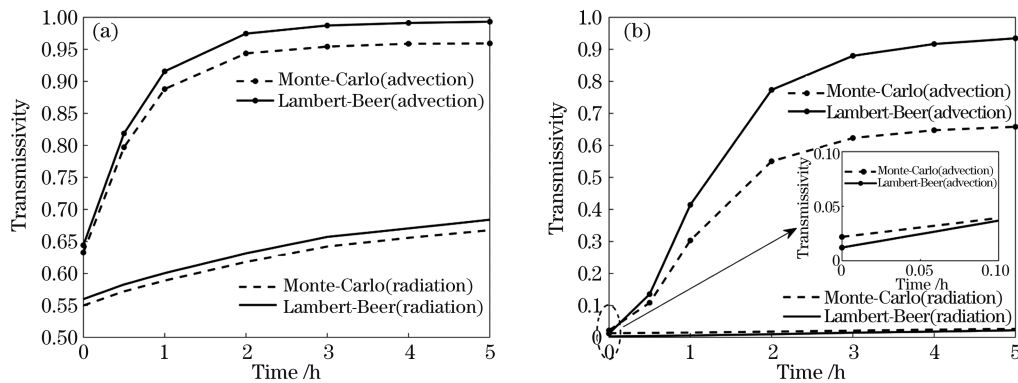


图 3 不同传输距离下透射率随时间的变化关系。(a) 100 m; (b) 1000 m

Fig. 3 Time dependence of transmissivity under different transmission distances. (a) 100 m; (b) 1000m

这是因为在衰减较小的情况下,由(9)式计算得到的散射步长较大,因此在固定传输距离范围内发生的散射次数少。由于粒子在发生碰撞后难以到达接收平面, Monte-Carlo 方法计算结果偏小。在粒子数密度、传输距离增大后,散射次数增加,粒子经多次散射后被接收的概率增加,因此 Monte-Carlo 方法计算得到的透射率稍大于 Lambert-Beer 的计算结果。随着时间的推移,由于降雨对雾的清除,雾滴粒子数密度减小,两种方法计算的数值差距增大。

如上分析,在计算激光在雨雾中传输的透射率时,如果激光传输距离短或者能见度大于等于 1 km 时,可以忽略多次散射作用,运用 Lambert-Beer 公式计算透射率,大大增加计算速率。

5 结 论

采用雨滴的对数正态尺度分布模型、辐射雾和平流雾 Gamma 分布模型,利用考虑湿沉降的通用动力学方程来描述雾随雨滴清除的动态变化,包括不同类型雾的清除过程,或者说雾尺度分布谱随时

间演变的细节信息,揭示了不同雨强对雾的清除效果。从大气衰减的基本原理出发,由于雾的尺度分布模型发生变化,激光在大气中的传输衰减也在变化。针对该现象,提出了一种计算雨雾共存天气下大气衰减的预测模型,动态地展示了大气衰减和透射率随时间的演变。最后通过 Monte-Carlo 理论对激光在大气中的传输进行仿真分析,在一定程度上验证了所提模型的合理性。所提计算模型对无线光通信等相关领域中大气衰减的估计和评价具有参考价值。虽然从理论分析的角度验证了所提模型的合理性,但仍然需要进行大量的实验分析和验证。

参 考 文 献

- [1] Li Z D. Loss and refraction of laser transmitting in the atmosphere[J]. Infrared and Laser Engineering, 2003, 32(1): 73-77.
李正东. 激光在大气传输中的损耗和折射[J]. 红外与激光工程, 2003, 32(1): 73-77.
- [2] Rensch D B, Long R K. Comparative studies of extinction and backscattering by aerosols, fog, and

- rain at 10.6 micro and 0.63 micro [J]. Applied Optics, 1970, 9(7): 1563-1573.
- [3] Li S G, Nie J S, Sun X Q. Effect of atmospheric refraction and chromatic dispersion on laser transmission [J]. Chinese Journal of Quantum Electronics, 2004, 21(5): 679-682.
李双刚, 聂劲松, 孙晓泉. 大气折射和色散对激光传输的影响[J]. 量子电子学报, 2004, 21(5): 679-682.
- [4] Zhang J Q, Zhai Y W, Fu S Y, et al. Propagation properties of radially-polarized vector beams under a turbulent atmosphere[J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(11): 1101001.
张建强, 翟焱望, 付时尧, 等. 径向偏振矢量光束在大气湍流下的传输分析[J]. 光学学报, 2020, 40(11): 1101001.
- [5] Di H P, Zhang Q B, Zhou M C, et al. Propagation of ringairy Gaussian vortex beams in anisotropic non-Kolmogorov turbulence atmosphere [J]. Chinese Journal of Lasers, 2018, 45(3): 0305001.
狄颢萍, 张淇博, 周木春, 等. 圆艾里高斯涡旋光在各向异性非 Kolmogorov 湍流大气中的传输[J]. 中国激光, 2018, 45(3): 0305001.
- [6] Si W T, Wang W C, Yuan G F, et al. Atmospheric refraction correction method based on angular intersection[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2020, 57(13): 130102.
司文涛, 王伟超, 袁光福, 等. 基于测角交汇的大气折射修正方法[J]. 激光与光电子学进展, 2020, 57(13): 130102.
- [7] Hu Z P, Feng Z C. Nonlinear effect of intense laser propagation in atmosphere[J]. Western Electronics, 1990(4): 1-6.
胡志平, 冯志超. 强激光大气输中的非线性效应[J]. 西部电子, 1990(4): 1-6.
- [8] Preston F W. Visibility of the landscape during rain [J]. Nature, 1920, 106(2663): 343-344.
- [9] Vasseur H, Gibbins C J. Prediction of apparent extinction for optical transmission through rain [J]. Applied Optics, 1996, 35(36): 7144-7150.
- [10] 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.
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.
- [11] Wei G N. Can rain and fog coexist at the same time [J]. Journal of Guangxi Meteorology, 1987, 8(4): 32.
韦革宇. 雨和雾能否同时并存[J]. 广西气象, 1987, 8(4): 32.
- [12] Yan W L, Liu D Y, Pu M J, et al. Formation and structure characteristics of precipitation fog in Nanjing[J]. Meteorological Monthly, 2010, 36(10): 29-36.
严文莲, 刘端阳, 濮梅娟, 等. 南京地区雨雾的形成及其结构特征[J]. 气象, 2010, 36(10): 29-36.
- [13] Liu D, Zhou G B, Xiang B, et al. Cause analysis of fog formation in Chongqing [J]. Meteorological Science and Technology, 2004, 32(6): 461-466.
刘德, 周国兵, 向波, 等. 重庆雾的天气成因[J]. 气象科技, 2004, 32(6): 461-466.
- [14] Lu Y, Ling Y S. The simple method to calculate the atmosphere transmittance of infrared radiation [J]. Infrared Technology, 2003, 25(5): 45-49, 53.
路远, 凌永顺. 红外辐射大气透射比的简易计算[J]. 红外技术, 2003, 25(5): 45-49, 53.
- [15] Liu M, Wang H X, Wang Q, et al. A revision model of the calculation of atmospheric attenuation in water fogs weather[J]. Chinese Journal of Lasers, 2011, 38(10): 1005002.
刘敏, 王红星, 王倩, 等. 雨雾共存天气下大气衰减计算的修正模型[J]. 中国激光, 2011, 38(10): 1005002.
- [16] Wang M X, Zhang R J. Frontier of atmospheric aerosols researches [J]. Climatic and Environmental Research, 2001, 6(1): 119-124.
王明星, 张仁健. 大气气溶胶研究的前沿问题[J]. 气候与环境研究, 2001, 6(1): 119-124.
- [17] Zhao H B, Zheng C G. Numerical simulation of wet removal of aerosols when raindrop falling [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2005, 25(12): 1590-1596.
赵海波, 郑楚光. 降雨过程中气溶胶湿沉降的数值模拟[J]. 环境科学学报, 2005, 25(12): 1590-1596.
- [18] Yao K Y, Guo J, Fu Y F, et al. Rain scavenging of aerosol particles [J]. Climatic and Environmental Research, 1999, 4(3): 297-302.
姚克亚, 郭俊, 傅云飞, 等. 气溶胶粒子的降雨清除[J]. 气候与环境研究, 1999, 4(3): 297-302.
- [19] Li S J, Jiang W A. Estimation of fog's impact on visibility[J]. Journal of Civil Aviation University of China, 2010, 28(6): 1-3, 8.
李素娟, 蒋维安. 雾对能见度的影响估算[J]. 中国民航大学学报, 2010, 28(6): 1-3, 8.
- [20] Sun C, Wang H X, Fu G X, et al. Study of the attenuation characteristics of the laser transmitting in fog[J]. The Journal of Light Scattering, 2011, 23(3): 201-205.
孙超, 王红霞, 傅关新, 等. 雾对激光的衰减特性研究[J]. 光散射学报, 2011, 23(3): 201-205.
- [21] Song Z F. Fundamentals of applied atmospheric optics: transmission of light waves in the atmosphere and remote sensing application [M]. Beijing: China Meteorological Press, 1990: 45-56.

- 宋正方. 应用大气光学基础: 光波在大气中的传输与遥感应用[M]. 北京: 气象出版社, 1990: 45-56.
- [22] Zhao Z W, Wu Z S. Millimeter-wave attenuation due to fog and clouds [J]. *International Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 2000, 21(10): 1607-1615.
- [23] Liao G N. Introduction to atmospheric radiation[M]. Guo C L, Zhou S J, Transl. 2nd ed. Beijing: China Meteorological Press, 2005: 18-29.
[美]廖国男. 大气辐射导论[M]. 郭彩丽, 周诗健, 译. 2 版. 北京: 气象出版社, 2005: 18-29.
- [24] Wang Y, Zhu B, Kang H Q, et al. Theoretical and observational study on below-cloud rain scavenging of aerosol particles[J]. *Journal of University of Chinese Academy of Sciences*, 2014, 31(3): 306-313, 321.
王瑛, 朱彬, 康汉青, 等. 气溶胶云下清除理论及观测研究[J]. *中国科学院大学学报*, 2014, 31(3): 306-313, 321.
- [25] Gao G Q. Study of laser propagation and attenuation through the rain and fog environment [D]. Xi'an: Xi'an University of Science and Technology, 2014: 30-35.
- 高国强. 雨雾天环境中对激光传输衰减的研究[D]. 西安: 西安科技大学, 2014: 30-35.
- [26] Feingold G, Levin Z. The lognormal fit to raindrop spectra from frontal convective clouds in Israel[J]. *Journal of Climate and Applied Meteorology*, 1986, 25(10): 1346-1363.
- [27] Sheng P X, Mao J T, Li J G. Atmospheric physics [M]. 2nd ed. Beijing: Peking University Press, 2013: 78-85.
盛裴轩, 毛节泰, 李建国. 大气物理学[M]. 2 版. 北京: 北京大学出版社, 2013: 78-85.
- [28] Wilson B C, Adam G. A Monte Carlo model for the absorption and flux distributions of light in tissue[J]. *Medical Physics*, 1983, 10(6): 824-830.
- [29] Taminiu T H, Moerland R J, Segerink F B, et al. $\lambda/4$ resonance of an optical monopole antenna probed by single molecule fluorescence [J]. *Nano Letters*, 2007, 7(1): 28-33.
- [30] Poole L R, Venable D D, Campbell J W. Semianalytic Monte Carlo radiative transfer model for oceanographic lidar systems [J]. *Applied Optics*, 1981, 20(20): 3653-3656.

Dynamic Propagation Characteristics of 1.55- μm Wavelength Laser in Rain and Fog Coexisting Weather

Yu Renjiao*, Li Zhenhua**, Lai Jiancheng, Wang Chunyong, Wu Zhixiang
School of Science, Nanjing University of Science & Technology, Nanjing, Jiangsu 210094, China

Abstract

Objective The coexistence of rain and fog is a common atmospheric phenomenon in winter. When laser is transmitted in rain and fog weather, the attenuation is not only affected by rain but also by fog. Because of the small rainfall rate, fog attenuation is usually greater than rain. Globally, numerous studies have been conducted on the transmission characteristics of laser in rain and fog individually, but research on laser transmission characteristics in rain and fog coexisting weather is inadequate. To the best of our knowledge, the interaction between raindrops and fog droplets has not been considered. In this study, based on the mechanism of rain clearing fog, we improve the existing models and propose a prediction model of atmospheric attenuation in rain and fog coexisting weather, which dynamically shows the changes of atmospheric attenuation and transmittance with time in rain and fog coexisting weather. We believe that the findings of this study will have reference significance for the estimation and evaluation of atmospheric attenuation in wireless optical communication and related fields.

Methods In rain and fog coexisting weather, the precipitation process has a significant effect on fog removal. As fog is removed by raindrops, the scale distribution of fog will change. In this article, we employ the general dynamic equation considering wet deposition to study the dynamic change of fog with the removal of raindrops. Then, we use the lognormal scale distribution model of raindrops and Gamma distribution model of radiation fog and advection fog to calculate the total attenuation of rain and fog after clearing. Further, we employ Lambert-Beer law to reckon the transmittance of laser after a certain distance. Finally, the numerical results are compared with the Monte-Carlo simulation results to verify the rationality of the proposed model to a certain extent.

Results and Discussions The rainfall intensity positively correlates with the fog removal effect. Since the rainfall

in rain and fog coexisting weather is small, the attenuation of fog gradually decreases with the removal of fog by rain (Fig. 1). When the rainfall rate is 1 mm/h, the transmittance of advection fog tends to be stable after 5 h of rainfall, whereas, the radiation of fog takes a longer time (Fig. 2). The water content of advection fog is higher than that of radiation fog, so the albedo of advection fog is higher than that of radiation fog. Owing to the obvious removal of advection fog by rain, the density of advection fog decreases, the proportion of raindrops per unit volume increases, the absorption increases, the scattering weakens, and the albedo of particle swarm increases (Tables 4 and 5). When the transmission distance is 1000 m and transmittance is less than 5%, the transmittance calculated using the Monte-Carlo method is larger than that calculated using the Lambert-Beer law, and vice versa in other cases.

Conclusions In this article, we employed the lognormal scale distribution model of raindrops and Gamma distribution model of radiation fog and advection fog to study dynamic change of fog with raindrop removal using the general dynamic equation considering wet deposition. Based on the basic principle of atmospheric attenuation, the attenuation of laser propagation in the atmosphere changes with the fog scale distribution model. Because most of the radiation fog droplets are medium-sized aerosols, they are difficult to be wet removed by rainfall, so the transmittance increases slowly with time. The droplet size of the advection fog is large and quickly removed in the case of moderate and heavy rain, and then the transmittance is at a fixed value. Through Monte-Carlo simulation analysis of laser transmission in the atmosphere, in the case of small attenuation, the photon moving step is larger, the scattering times in a fixed distance range are less, the particles hardly reach the receiving plane after the collision, and the calculation results of the Monte-Carlo method are minute. With the increase in particle number density and transmission distance, the number of scattering increases, and the transmittance calculated using the Monte-Carlo method is slightly higher than that calculated using the Lambert-Beer law. Over time, owing to the removal of fog by rainfall, the droplet number density decreases, and the numerical difference between the two methods increases.

Key words beam transmission; scattering; atmospheric attenuation; rain and fog coexisting weather; transmittance; Monte-Carlo simulation

OCIS codes 290.4210; 290.1310; 290.4020