

降雨粒子的无线紫外光散射特性

赵太飞, 赵思婷, 段钰楨, 张 颖

西安理工大学自动化与信息工程学院, 陕西 西安 710048

摘 要 紫外光与降雨粒子相互作用发生散射, 散射光特性改变能够反映降雨粒子的相关物理特性(如粒子尺寸参数、浓度、形态), 因此研究粒子的物理参数对散射光特性的影响对有效提高光谱法定量探测降水的精度有很大意义。由于雨滴在非球形降水粒子中具有代表性, 以群雨滴粒子为例, 采用 T 矩阵理论, 利用紫外光直视和非直视单次散射模型, 分析了入射光波长、群雨滴粒子形态、降雨强度、粒径大小与散射光强之间的关系。并用蒙特卡洛方法仿真分析了非球形群雨滴粒子在不同降雨强度和粒径下散射角与散射光强之间的关系, 以及降雨环境中的风切变对紫外光散射特性的影响。通过理论及仿真分析, 得到了不同群雨滴粒子形态下的路径损耗, 不同降雨强度、风切变率和粒径下的散射光强分布。仿真结果表明: 在紫外光直视与非直视通信方式下, 降雨环境中的通信质量比晴天条件下的通信质量差, 即路径损耗增大。当粒径分布已知时, 随着降雨强度的增大, 衰减系数增大, 路径损耗增加, 且直视通信方式的路径损耗比非直视降低 7 dB 左右。随着降雨强度、风切变率和粒子粒径的增大, 散射光强曲线整体呈下降趋势, 其中, 降雨强度的变化对散射光强分布影响程度最大。相同通信距离时, 不同降雨强度下的紫外光散射光强分布均随着散射角的增大而减小, 当散射角继续增大到 90° 时, 有效散射体体积逐渐减小, 接收到的光子能量减小, 暴雨中的散射光强衰减程度最大。相同降雨强度下考虑风切变时, 相比较无风时的路径损耗增大 5 dB 左右。除此之外, 还研究了椭圆形和切比雪夫形粒子对紫外光散射光强的影响, 结果表明当粒子粒径分布相同时, 椭圆形粒子的散射光强衰减较广义切比雪夫形粒子大。根据散射粒子的散射光强分布以及路径损耗能够区分雨滴粒子是否由相同粒径及形态组成, 为粒子测量提供理论基础。分析降水中群雨滴粒子的光散射特性, 为提高光谱法评估降水衰减的数值模拟方面提供理论依据, 为光学技术在探测识别降水现象等气象领域的广泛应用提供了设计参考。

关键词 紫外光; 降雨粒子; 散射光强; T 矩阵

中图分类号: TN926

文献标识码: A

DOI: 10.3964/j.issn.1000-0593(2019)08-2431-06

引 言

降水是指云中液态水或固态水向地面降落的一种天气现象, 是全球热循环和气候变化的重要研究对象。降雨粒子的相关物理特性参数在人工影响天气研究和测雨雷达定标等领域有重要应用。随着光学技术的发展, 光谱探测技术逐渐成为测量降雨粒子物理特性的主流方向^[1]。光在大气传输中, 散射粒子的光强分布能够反映粒子的尺寸大小和形态, 从而对降水现象进行准确识别^[2]。“日盲”紫外光是波长在 200~280 nm 的紫外线, 大气中的臭氧分子对该波段的太阳光有极强的吸收作用, 在此波段紫外光可近似认为无背景干扰噪

声, 其他干扰源也很难实施远距离干扰, 具有全天候、宽视场接收等优点^[3]。

目前, 将光学散射探测、雷达探测等技术应用于降水现象的测量, 其中光散射技术主要是利用降水粒子在可见光或近红外光波段的散射效应, 根据散射光信号强度、频率等特性来确定降水量和降水类型。对粒子光散射特性研究已经有一定基础, Saverio Mori^[4]等研究了雾滴、水滴、雪花以及小冰雹粒子对自由空间光散射特性的影响。Vo Quang Sang^[5]等研究了紫外-可见光波段水体中悬浮颗粒物的散射光强特性, 结果表明散射光强分布与粒子形状和粒子旋转角有关, 随着粒子旋转角的增大, 散射光强有所减小。Gong^[6]等研究了雾滴粒子的紫外光散射特性, 结果表明适当增加雾滴粒子

收稿日期: 2018-05-28, 修订日期: 2018-09-20

基金项目: 国家自然科学基金-中国民航局航联合研究基金项目(U1433110), 陕西省重点产业链创新计划项目(2017ZDCXL-GY-06-01), 陕西省教育厅服务地方专项计划项目(17JF024)资助

作者简介: 赵太飞, 1978 年生, 西安理工大学自动化与信息工程学院教授 e-mail: zhaotaifei@163.com

浓度更利于减小散射光强衰减。Sun^[7]等采用蒙特卡洛法研究了气溶胶在光谱宽度为 0.2~1.6 μm 的信道脉冲响应。

以上研究主要针对粒子浓度对光散射衰减特性的影响。对粒子粒径、形态等粒子物理特性对散射光强的影响研究相对较为薄弱,特别是对紫外光在降水环境下的散射角和散射光强的分析研究更少。因此研究降水环境中紫外光散射特性、散射光强分布对利用紫外光测量降水强度、粒子形态以及粒径分布具有重要意义。

从非球形群雨滴粒子散射和衰减理论出发,依据 T 矩阵理论和蒙特卡洛方法,利用紫外光直视(line-of-sight, LOS)和非直视(non-line-of-sight, NLOS)单次散射模型,仿真分析了非球形群雨滴粒子在不同降雨强度、风切变率、粒子形态以及粒径分布下对紫外光散射特性的影响。

1 理论基础

1.1 T 矩阵散射理论

粒子在入射场照射下,表面产生电流并形成散射场,入射场 E^{inc} 和散射场 E^{sca} 可展开为矢量球面波函数形式^[8]

$$E^{\text{inc}}(r) = \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{m=-n}^n [a_{nm} RgM_{nm}(k_1 r) + b_{nm} RgN_{nm}(k_1 r)] \quad (1)$$

$$E^{\text{sca}}(r) = \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{m=-n}^n [p_{nm} M_{nm}(k_1 r) + q_{nm} N_{nm}(k_1 r)], \quad |r| > r_0 \quad (2)$$

式中, $k_1 = 2\pi/\lambda$ 是环境介质中的波数, r_0 为以坐标原点为中心的散射体最小外接球半径, $M_{nm}(kr)$ 和 $N_{nm}(kr)$ 是基于第一类 Hankel 函数 $h_n^{(1)}(kr)$ 的矢量波函数, $RgM_{nm}(kr)$ 和 $RgN_{nm}(kr)$ 是 Bessel 函数矢量波函数。平面入射波展开系数表示为

$$a_{nm} = 4\pi(-1)^m i^n d_n E_0^{\text{inc}} C_{nm}^*(\vartheta^{\text{inc}}) \exp(-im\varphi^{\text{inc}}) \quad (3)$$

$$b_{nm} = 4\pi(-1)^m i^{n-1} d_n E_0^{\text{inc}} B_{nm}^*(\vartheta^{\text{inc}}) \exp(-im\varphi^{\text{inc}}) \quad (4)$$

由 Maxwell 方程和边界条件线性特征,散射波系数与入射波系数具有线性相关性,具体可表示为^[8]

$$\begin{cases} p_{mm} = \sum_{n'=1}^{\infty} \sum_{m'=-n'}^{n'} (T_{mmn'n'}^{11} a_{m'n'} + T_{mmn'n'}^{12} b_{m'n'}) \\ q_{mm} = \sum_{n'=1}^{\infty} \sum_{m'=-n'}^{n'} (T_{mmn'n'}^{21} a_{m'n'} + T_{mmn'n'}^{22} b_{m'n'}) \end{cases} \quad (5)$$

入射场与散射场之间可用以下矩阵表示

$$\begin{bmatrix} p \\ q \end{bmatrix} = T \begin{bmatrix} a \\ b \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} T^{11} & T^{12} \\ T^{21} & T^{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a \\ b \end{bmatrix} \quad (6)$$

当 T 矩阵已知时,散射波系数可由式(6)得到,进而可以计算得到非球形粒子的消光截面、散射截面、吸收截面,具体的计算公式如式(7)^[9]

$$\begin{cases} C_{\text{ext}} = -\frac{2\pi}{k^2} \text{Re} \sum_{n=1}^{n_{\text{max}}} \sum_{m=-n}^n [T_{nnnn}^{11} + T_{nnnn}^{12}] \\ C_{\text{sca}} = -\frac{2\pi}{k^2} \sum_{n=1}^{n_{\text{max}}} \sum_{n'=1}^{n_{\text{max}}} \sum_{m=-n}^n \sum_{m'=-n'}^{n'} \sum_{i=1}^2 \sum_{j=1}^2 |T_{mmi'n'}^{ij}| \end{cases} \quad (7)$$

非球形粒子消光和散射系数可表示为

$$Q_{\text{ext, sca}} = C_{\text{ext, sca}}/G \quad (8)$$

1.2 非球形降雨粒子模型

根据不同尺寸自由下落的雨滴形状,选取近似椭球形和广义切比雪夫模型来模拟雨滴粒子。图 1(a)是椭球形粒子形状示意图,其中: a 和 b 分别为水平半轴和旋转半轴; α 是旋转轴与 z 轴的夹角。

Beard 和 Chuang 提出的雨滴形状模型(B-C 模型)如图 1(b)所示,可近似看作是通用的切比雪夫粒子,具体表达式为^[10]

$$r(\theta) = r_0 \left[1 + \sum_{n=0}^N c_n T_n(\cos\theta) \right] \quad (9)$$

其中, $r(\theta)$ 表示不同角度对应的粒子半径, r_0 为不失真球半径,式中的粒子尺寸被定义为等效表面积球体半径 r_s 或等效体积球体半径 r_v 。

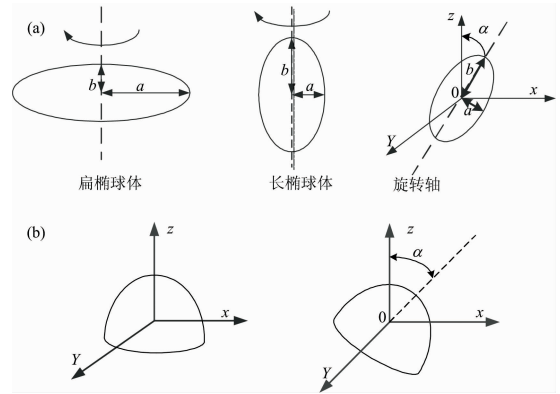


图 1 (a) 椭球形粒子形状示意图;

(b) 切比雪夫粒子形状示意图

Fig. 1 (a) Diagram of ellipsoid particles shape;

(b) Diagram of chebyshev particle shape

1.3 降雨环境中的紫外光散射信道模型

雨滴谱是对应于单位空间体积内直径在 $D \sim D+d$ 内的雨滴大小分布。一般选取负指数分布即 M-P 分布,具体的谱分布表示形式为^[11]

$$N(D) = N_0 \exp(-\Lambda D) \quad (10)$$

式中, $N(D)$ 为单位体积内直径为 D 的雨滴数目, $N_0 = 8\,000 \text{ m}^{-3} \cdot \text{mm}^{-1}$, $\Lambda = 4.1R^{-0.21} (\text{mm}^{-1})$, R 表示的是降雨率 ($\text{mm} \cdot \text{h}^{-1}$)。根据文献^[11]选取不同的降雨类型,结合负指数 M-P 雨滴谱分布,可得到单位体积内降雨衰减系数,如表 1 所示。

表 1 266 nm 紫外光在不同降雨强度下的衰减系数
Table 1 Attenuation coefficient of 266 nm UV light under different rainfall intensities

降雨类型	降雨率 /(mm · h ⁻¹)	散射系数 /m ⁻¹	吸收系数 /m ⁻¹
Light rain	5	1.2 × 10 ⁻³	0.906 × 10 ⁻³
Middle rain	12.5	3.3 × 10 ⁻³	2.1 × 10 ⁻³
Heavy rain	25.0	5.7 × 10 ⁻³	3.65 × 10 ⁻³
Rainstorm	100	9.3 × 10 ⁻³	6.03 × 10 ⁻³

紫外光 LOS 通信单次散射链路模型如图 2(a)所示, 发射端光源 T_x 以发散角 ϕ_1 发射光信号, 接收器 R_x 接收视场角 ϕ_2 , T_x 与 R_x 之间距离为 r , V 为有效散射体积。根据紫外光 LOS 散射链路模型, 接收光功率表达式可表示为^[12]

$$P_{r, \text{los}} = P_t \left(\frac{\lambda}{4\pi r} \right)^2 e^{-K_e r} \frac{4\pi A_r}{\lambda^2} \quad (11)$$

其中, P_t 为发射功率, r 为通信距离, λ 为波长, A_r 为接收孔径面积。 K_e 为大气信道的消光系数, 雨滴粒子对光束能量的衰减由散射系数 K_s 和吸收系数 K_a 表示, 波长为 λ 的紫外光在降雨环境中的消光系数可表示为^[13]

$$K_e = K_s + K_a \quad (12)$$

紫外光 NLOS 单次散射几何模型如图 2(b)所示。 θ_1 为发送仰角, θ_2 为接收仰角, θ_s 是散射角, NLOS 通信链路中接收光功率表达式^[13]

$$P_r = \frac{P_t A_r K_s P_s \phi_2 \phi_1^2 \sin(\theta_1 + \theta_2)}{32\pi^3 r \sin\theta_1 \left(1 - \cos \frac{\phi_1}{2} \right)} \exp \left[-\frac{K_e r (\sin\theta_1 + \sin\theta_2)}{\sin(\theta_1 + \theta_2)} \right] \quad (13)$$

其中, P_t 是发送功率, A_r 是接收孔径面积, K_s 是散射系数, ϕ_1 和 ϕ_2 分别为发送端发散角和接收视场角, P_s 为散射角 θ_s 的相函数, 且 $\theta_s = \theta_1 + \theta_2$, r 为通信距离。

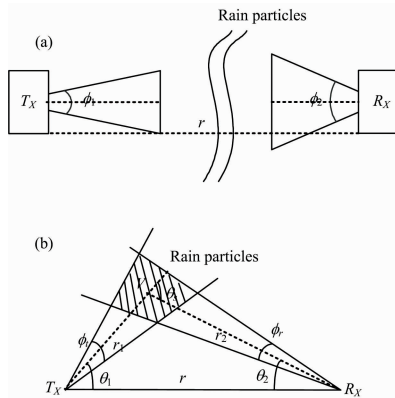


图 2 紫外光信道模型

(a): LOS 链路模型; (b): NLOS 链路模型

Fig. 2 The channel model of UV

(a): LOS communication system; (b): NLOS communication system

2 仿真结果与分析

2.1 不同波长下路径损耗随降雨强度的变化

采用 T 矩阵理论和蒙特卡洛方法仿真了不同波段内路径损耗随降雨强度的变化, 以近似椭球形雨滴粒子为例, 选取等体积球半径为 0.5 mm 的雨滴粒子作为散射粒子进行仿真, 并与文献[9]中给出的衰减值进行对比, 通信距离 $r = 1$ km。

由图 3 可看出, 路径损耗随降雨强度的增大而增大, 不同波段内的路径损耗变化程度不同。文献[9]是对球形粒子不同入射波长下路径损耗随降雨强度的衰减仿真, 本工作采用 T 矩阵和蒙特卡洛方法将不同波段球形与非球形雨滴粒

子仿真结果与文献中数据进行对比, 仿真条件相同时, 路径损耗变化趋势基本相同。当紫外光波长为 266 nm 时随着降雨强度的增大, 路径损耗增加约为 10 dB 左右。

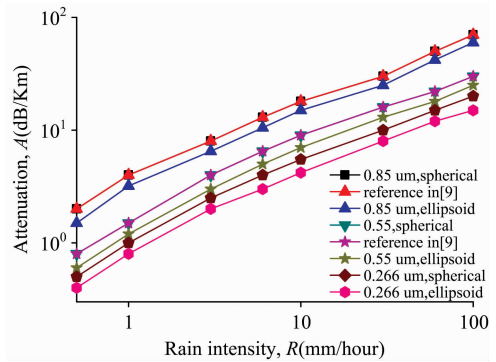


图 3 不同波长下路径损耗随降雨强度的变化

Fig. 3 Changes of path loss with rainfall intensity at different wavelengths

2.2 非球形群雨滴粒子路径损耗分析

形变量为 2 的近似椭球形粒子在不同降雨强度下紫外光 LOS 和 NLOS 单次散射模型路径损耗仿真结果如图 4 所示, 其中 NLOS 通信的收发仰角 $\theta_1 = \theta_2 = 20^\circ$, 发散角 $\phi_1 = 6^\circ$, 接收视场角 $\phi_2 = 80^\circ$, 晴朗天散射系数和消光系数分别取 0.75×10^{-3} 和 $1.25 \times 10^{-3} \text{ m}^{-1}$ 。入射波长 $\lambda = 266 \text{ nm}$, 发射功率 0.8 mW, 接收孔径 A_r 为 1.66 cm^2 。

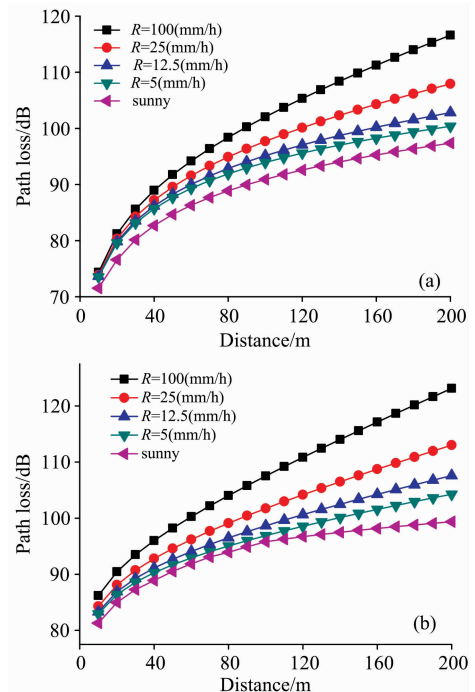


图 4 近似椭球形粒子通信距离对路径损耗的影响

Fig. 4 Influence of communication distance on path loss for ellipsoid-like particles

由图 4(a)可看出, 紫外光 LOS 通信时, 相同通信距离下, 暴雨中的衰减大于小雨和中雨情况, 路径损耗大。主要

原因在于 LOS 通信时,信道的散射特性由衰减系数决定,小雨衰减系数较小,暴雨中的衰减较大,故其路径损耗随着降雨强度的增大而增大。由图 4(b)可看出,紫外光 NLOS 通信方式下,路径损耗的变化趋势与图 4(a)一致,且 LOS 通信方式下的衰减比 NLOS 大约小 7 dB。主要原因在于紫外光 NLOS 通信主要依靠大气散射和吸收作用实现,小雨中单位体积内雨滴数目较多,散射作用大于吸收作用,随着降雨强度的增大,暴雨中的吸收作用增强,紫外透过率降低。

图 5 分别针对紫外光 LOS 和 NLOS 单次散射几何模型对形变 $\xi=0.1$ 的切比雪夫形群雨滴粒子的仿真。由图可看出,切比雪夫形雨滴粒子的散射特性与椭球形粒子相类似,路径损耗随着降雨强度的增加而增大。通信距离相同时,切比雪夫形粒子的路径损耗略小于椭球形粒子,原因在于椭球形粒子散射截面较切比雪夫形粒子大,能够较大提高入射光衰减效率,因此椭球形粒子路径损耗较大。

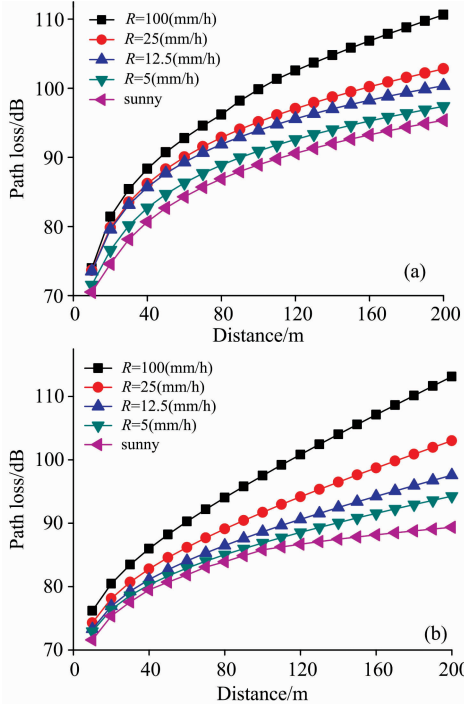


图 5 切比雪夫形粒子通信距离对路径损耗的影响
Fig. 5 Influence of communication distance on the path loss for Chebyshev particles

2.3 不同降雨强度和不同粒径下非球形群雨滴的散射光强分析

以形变量为 2 的椭球形群雨滴粒子为例,采用蒙特卡洛方法仿真了紫外光 NLOS 通信方式在不同降雨强度和粒径下散射角对散射光强的影响。其中发射光子数目 $M=10^5$,通信距离 $r=100$ m,并用接收到光子能量表征粒子散射光强分布。

图 6 为不同降雨强度下椭球形群雨滴粒子散射光强分布曲线,随着散射角增大,散射光强曲线整体呈下降趋势。原因在于当散射角较小时,有效散射体较大,随着散射角增大,有效散射体变小,接收到总光子能量减小,因此散射光

强减小。图 7 为假设降雨强度 $R=25 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$,不同粒径下散射角对散射光强影响。由图可看出,当散射角较小时,不同粒径下雨滴散射光强差别不大。原因在于相对于降雨强度引起的衰减,粒径变化引起散射系数相差不大,因此其散射光强相差较小。通过研究散射角与散射光强的关系,可以反推出降雨强度和粒子粒径分布。

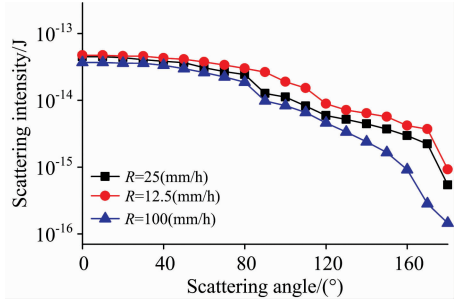


图 6 不同降雨强度下散射角对散射光强的影响
Fig. 6 Changes of scattering angle on scattering intensity under different rainfall intensities

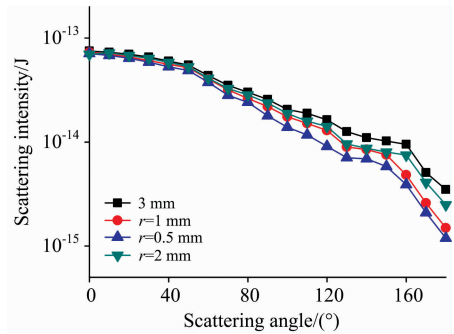


图 7 不同粒径下散射角对散射光强的影响
Fig. 7 Changes of scattering angle on scattering intensity under different particles sizes

2.4 降雨环境中风切变对椭球形群雨滴粒子散射特性的影响

雨滴在下落过程中,以对称轴沿铅直方向的单个椭球模型为例描述,如图 8 所示,当水平环境风场存在垂直切变时,降落中的雨滴粒子与水平风场之间存在相应的速度差,水平方向会存在风力 F_v ,雨滴粒子倾斜角 α 取决于粒子末速度 V_∞ 与环境风场垂直切变率 $\omega_s^{[14]}$: $\tan\alpha = \omega_s V_\infty / g$. 倾斜角 α

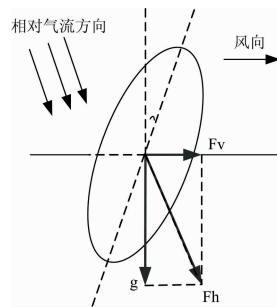


图 8 风对雨滴的作用
Fig. 8 The effect of wind on raindrops

的取值范围如图 9 所示。

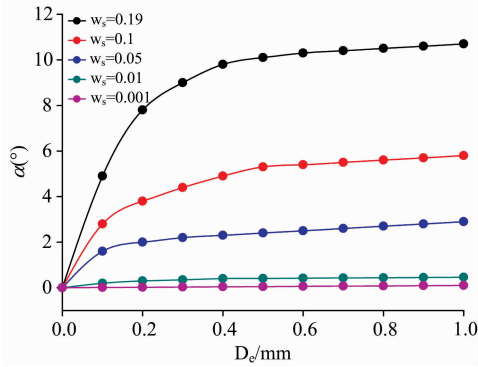


图 9 雨滴粒子倾斜角与风切变率的关系

Fig. 9 The inclination angle of raindrop particle and vertical wind shear rate

针对降雨环境中风切变对粒子散射光强分布的影响, 选取等效球半径 0.5 mm, 不考虑风切变对粒子形态的影响。当风切变率 $w_s = 0.001 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 和风切变率 $w_s = 0.1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 时, 分析了椭圆形雨滴粒子在不同降雨强度下对路径损耗

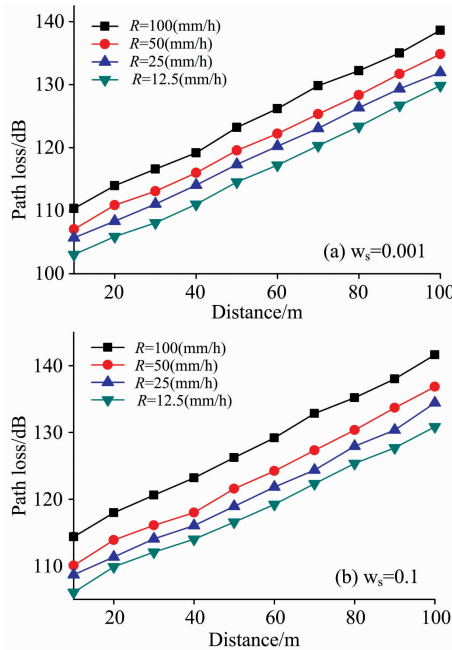


图 10 椭圆形雨滴粒子在不同风切变率下对路径损耗的影响

Fig. 10 Changes of path loss with different wind shear rate for ellipsoidal particles

References

[1] Jorge F, Riva C, Rocha A. IET Microwaves Antennas & Propagation, 2018, 12(4): 479.
 [2] Zhang Shihua, Wang Jingyuan, Xu Zhiyong. Optics & Laser Technology, 2016, 80: 51.
 [3] ZHAO Tai-fei, KE Xi-zheng (赵太飞, 柯熙政). Acta Physica Sinica (物理学报), 2012, 61(11): 285.
 [4] Mori S, Marzano F S. Effects of Multiple Scattering Due to Atmospheric Water Particles on Outdoor Free Space Optical Links. European Conference on Antennas and Propagation. IEEE, 2014: 1042.

的影响, 结果分别用图 10(a)和(b)表示。由图 10(a)可看出, 通信距离相同时路径损耗随着降雨强度的增大而增大。相同降雨强度下考虑风切变时, 图 10(b)的路径损耗相比图 10(a)时增大了约 5 dB。原因在于当考虑风切变时, 雨滴粒子散射截面较垂直方向有所减小, 散射光强减小, 路径损耗呈现增大趋势。降雨环境中的风切变使得紫外光衰减程度更大, 为动态复杂环境中的粒子测量提供理论依据。

图 11 当通信距离 $r = 100 \text{ m}$, 降雨强度 $R = 50 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 时, 给出不同风切变率下散射角对散射光强的影响。风切变对散射光强分布的影响程度不同, 随着风切变率的增大, 群雨滴粒子下落倾斜角增大, 散射光强不断减小。与文献[5]中所给结论一致, 随着单个粒子倾斜角的增大, 散射光强曲线整体呈下降趋势, 对于群雨滴粒子而言散射光强随倾斜角的增大不断减小。

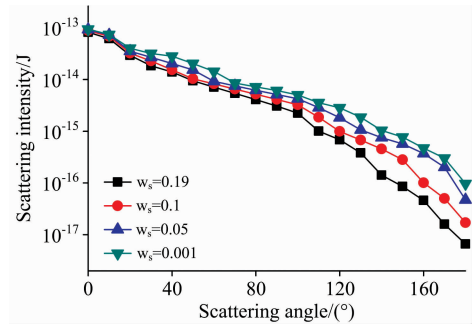


图 11 不同风切变率下散射角对散射光强的影响

Fig. 11 Changes of scattering angle with scattering intensity under different wind shear rates

3 结 论

针对无线紫外光在降雨环境传输时, 散射光会与降雨粒子发生散射, 造成不同程度的衰减。依据 T 矩阵理论和蒙特卡洛方法, 研究了紫外光 LOS 和 NLOS 两种通信方式中不同降雨强度下群雨滴粒子散射特性。仿真结果表明, 降雨强度、风切变率、非球形粒子形状、以及粒径大小等参数都会影响散射光强分布, 其中, 降雨强度的影响程度最大。采用 NLOS 通信方式时, 与 LOS 情况类似, 当通信距离较短时, 小雨时的路径损耗较小, 暴雨中的路径损耗最大, 其通信效果较晴天差; 切比雪夫形粒子的散射光强较椭圆形的大; 相同降雨强度下考虑风切变时, 相比较无风时路径损耗增大 5 dB 左右。这对模拟复杂动态环境中粒子散射特性, 利用紫外光谱探测降雨粒子形状、尺寸和相态具有重要实用价值。

- [5] Vo Quang Sang, FENG Peng, MI De-ling, et al(Vo Quang Sang, 冯 鹏, 米德伶, 等). Spectroscopy and Spectral Analysis(光谱学与光谱分析), 2015, 35(10): 2691.
- [6] GONG Jia-min, LI Chen, JIANG Xiao-bo(巩稼民, 李 晨, 姜小波). Semiconductor Optoelectronics, 2016, 37(1): 87.
- [7] Sun Yu, Gong Chen, Xu Zhengyuan, et al. IEEE Photonics Journal, 2017, 9(3): 53.
- [8] SHAO Chang-cheng, MA Jin-ji(邵长城, 麻金继). Journal of Atomic and Molecular Physics(原子与分子物理学报), 2010, 27(3): 475.
- [9] Grabner M, Kvicera V. Journal of Lightwave Technology, 2014, 32(3): 513.
- [10] LIU Xi-chuan, GAO Tai-chang, QIN Jian(刘西川, 高太长, 秦 健). Acta Physica Sinica(物理学报), 2010, 59(3): 2156.
- [11] Howard J, Gerogiokas M. IEEE Transactions on Antennas & Propagation, 2003, 30(1): 141.
- [12] KE Xi-zheng(柯熙政). UV Ad-Hoc Network Theory(紫外光自组织网络理论). Beijing: Science Press(北京: 科学出版社), 2011. 44.
- [13] Xu Changming, Zhang Hongming, Cheng Julian. Optics Express, 2015, 23(18): 23259.
- [14] YANG Tong-xiao, WANG Zhen-hui, ZHANG Pei-chang(杨通晓, 王振会, 张培昌). Plateau Weather(高原气象), 2009, 28(5): 997.

Research on Wireless Ultraviolet Scattering Characteristics of Rainfall Particles

ZHAO Tai-fei, ZHAO Si-ting, DUAN Yu-zhen, ZHANG Ying

School of Automation and Information Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China

Abstract As ultraviolet light will be scattered by rainfall particles, the changes of scattered light characteristics can reflect the physical properties (such as particle size parameters, density and shape) of rainfall particles. Therefore, it is of great significance to study the influence of the physical parameters of the particles on the characteristics of the scattered light that can effectively improve the accuracy of the detection of precipitation by spectroscopy. Due to the representation of raindrops in non-spherical precipitation particles, in this paper, the raindrop particles are taken as an example. Using the UV line-of-sight and non-line-of-sight scattering models, we analyzed the relationship between the scattered light intensity and a series of object parameters, including wavelength of incident light, the morphology of raindrop particles, rainfall intensity and particle size. For non-spherical raindrop particles, we also simulated and analyzed the relationship between scattering angle and scattered light intensity at different particle size, rainfall intensity and the influence of wind shear in rainfall on ultraviolet light scattering properties using Monte Carlo method. Through theoretical and simulation analysis, the path loss under different groups of raindrop particle shapes, the scattered light intensity distribution under different rainfall intensity, wind shear rate and particle size were obtained. The simulation results show that the communication quality in the rainfall environment is worse than that in the sunny day, which means greater path loss under UV LOS and NLOS communication. When the particle size distribution is known with the increase of rainfall intensity, attenuation coefficient increase and the path loss increase, the attenuation of LOS communication can be less than about 7 dB for NLOS communication. With the increase of rainfall intensity, wind shear rate and particle size, scattered light intensity curve shows a downward trend, among which, the change in rainfall intensity has the greatest effect on the scattered light intensity. When the communication distance is the same, the intensity distribution of UV light scattering under different rainfall intensity decreases with the increase of scattering angle, when the scattering angle increases by more than 90 degrees, the effective scattering volume decreases, the received photon energy decreases, so the scattering intensity in rainstorm attenuation is larger. Under the same rainfall intensity, when the wind shear is taken into account, the scattering intensity decreases, and the path loss increases about 5 dB when compared with that without wind. In addition, the effects of ellipsoid and Chebyshev particles on the intensity of UV light scattering have also been studied in this paper, which show that when the particle size is the same, the attenuation of ellipsoid particles is larger than that of Chebyshev particles. The scattered light intensity distribution and path loss of the scattering particles can be used to distinguish whether the raindrop particles are composed of the same particle size and morphology, providing a theoretical basis for particle measurement. And we analyzed the characteristics of light scattering of raindrop particles in rainfall, which provides a theoretical basis for improving the numerical simulation of rainfall attenuation assessment by spectroscopy and also provides a design reference for the wide application of optical technology in the detection and identification of rainfall phenomena and other meteorological fields.

Keywords Ultraviolet; Rainfall particles; Scattering intensity; T matrix

(Received May 28, 2018; accepted Sep. 20, 2018)