

引用本文:徐林,黄富良,解孟其,等.无线光通信中雨滴末速度对散射光频谱的影响研究[J].光通信技术,2024,48(6):6-10.

无线光通信中雨滴末速度对散射光频谱的影响研究

徐林¹,黄富良²,解孟其³,王鹏³,王琛¹

(1.中国电子科技集团公司第三十四研究所,广西桂林 541004;

2.91388 部队,广东湛江;3.西安工业大学电子信息工程学院,西安 710021)

摘要:为了探究大气扰动对无线光通信(WOC)系统性能的影响,采用了 Mie 散射模型深入分析了雨中散射光的衰减情况。求解了雨滴末速度起伏的相关函数,随后应用维纳-辛钦定理计算出散射光的功率谱,并创造性地提出了将 Marshall-Palmer 分布与多种雨滴末速度模型相结合的方法,以此揭示雨滴末速度对散射光频谱的具体影响。仿真结果表明:在相同的雨滴末速度分布条件下,随着降雨率的增加,4 种雨滴末速度模型的散射光频谱的衰减也随之增大,但频谱的形状基本保持不变;532 nm 波长的信号光衰减约比 1 550 nm 波长的信号光大 1 dB。

关键词:无线光通信;米氏散射;雨滴谱;末速度;雨衰

中图分类号:TN929.12 **文献标志码:**A **文章编号:**1002-5561(2024)06-0006-05

DOI:10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2024.06.002

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Research on the influence of the raindrop terminal velocity on the spectrum of scattered light in wireless optical communication

XU Lin¹, HUANG Fuliang², XIE Mengqi³, WANG Peng³, WANG Chen¹

(1. The 34th Research Institute of CETC, Guilin Guangxi 541004, China; 2. 91388 Troops, Zhanjiang Guangdong, China;

3. School of Electronic and Information Engineering, Xi'an Technological University, Xi'an 710021, China)

Abstract: In order to explore the impact of atmospheric disturbances on the performance of wireless optical communication (WOC) systems, the Mie scattering model is used to deeply analyze the attenuation of scattered light in rain. First, the correlation function of the raindrop terminal velocity fluctuations is solved, and then the Wiener-Khinchin theorem is applied to calculate the power spectrum of the scattered light. A method combining Marshall-Palmer distribution with multiple raindrop terminal velocity models is creatively proposed to reveal the specific impact of raindrop terminal velocity on the received light intensity spectrum. The simulation results show that, under the same distribution of raindrop terminal velocity, as the rainfall rate increases, the attenuation of the scattered light spectrum of the four raindrop terminal velocity models also increases, but the shape of the spectrum remains basically unchanged, the attenuation of the beacon light with a wavelength of 532 nm is about 1 dB more than that of the signal light with a wavelength of 1 550 nm.

Key words: wireless optical communications, Mie scattering, drop size distribution, terminal velocity, rainfall attenuation

0 引言

与光纤通信相比,恶劣的信道环境对无线光通信

(WOC)系统的性能影响显著,尤其是在雨、雾、沙尘暴等条件下,散射光对 WOC 系统的影响尤为严重^[1-3]。李应乐等人^[4]借鉴电磁波散射理论,对比分析了多种常见的雨滴谱,深入探讨了散射电磁波的衰减特性。他们的研究表明,运动介质不仅会引起散射电磁波频谱的变化,还会因雨滴的运动导致电磁波功率波动,从而使不同雨滴末速度谱下的电磁波接收表现出不同的动态衰减特征。然而,该研究既没有具体探讨运动介质对散射光频谱的影响,也没有分析雨滴末速度对光强动态特征的影响。

收稿日期:2024-09-13。

基金项目:陕西省教育厅科研自然专项(20JK0679)资助。

作者简介:徐林(1980—),男,河北石家庄人,学士,研究员,主要研究方向为无线激光通信、伺服控制等。负责完成和即将完成国家级、省部级项目 10 余项,获省部级科技进步一等奖 2 项、省部级科技进步三等奖 3 项。



鉴于此, 本文专注于在 WOC 系统中研究雨滴末速度对散射光频谱的影响。

1 雨滴速度对散射光的影响

雨滴引起的光散射示意图如图 1 所示。平面波传播距离为 L , 该平面波经过下落速度为 U 的雨滴发生散射, 入射方向为 $\hat{i}$, 出射方向为 $\hat{o}$ 。

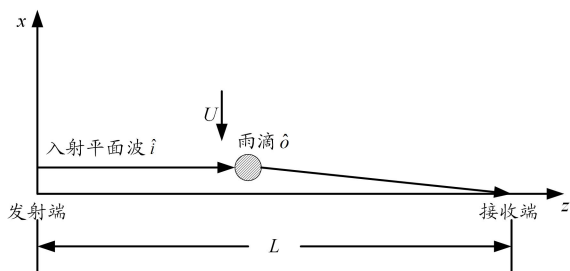
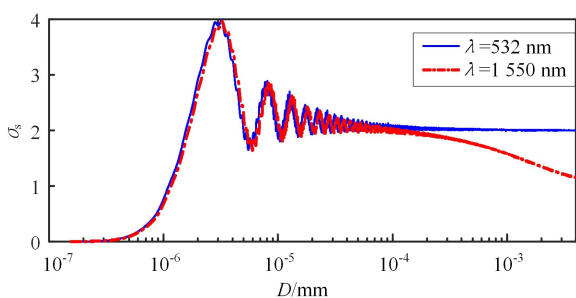
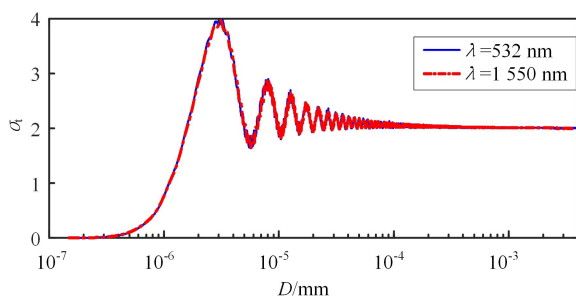


图 1 雨滴引起的光散射示意图

由于 WOC 系统的传播距离远大于雨滴直径, 因此本文假设雨滴为球形, 适用于 Mie 散射理论计算散射光强。Mie 散射理论是用于计算球形粒子对电磁波散射的经典理论, 它考虑了粒子的尺寸、形状、折射率和入射波的波长等因素, 能够以无穷数列求和的方式解析计算出粒子的散射截面、吸收截面和消光截面等光学参数。本文引用文献[5]中的结论, 计算得到了雨滴直径与散射截面、消光截面的关系, 如图 2 所示。可以看出, 雨滴的散射截面和消光截面符合 Mie 散射理论, 当



(a) 雨滴直径 D 与散射截面 σ_s 的关系



(b) 雨滴直径 D 与消光截面 σ_t 的关系

图 2 雨滴直径与散射截面、消光截面的关系

波长较长时, 由于水的吸收作用, 散射截面会逐渐偏离 Mie 散射的预测值。

考虑粒子运动速度的特性, 可将介质的运动速度

矢量分解为平均速度 $\bar{U}$ 和速度起伏 V_f 之和。 $\bar{U}$ 可认为是粒子平动, V_f 可用特征函数 $\chi(-k_s \tau)$ 描述, 特征函数是速度起伏概率密度 $p(V_f)$ 的积分, 如式(1)所示。

$$\chi(-k_s \tau) = \int \exp(-jk_s V_f \tau) p(V_f) dV_f \quad (1)$$

其中, k_s 为散射波矢, τ 为时差。

对于静态散射问题, 首先要求解散射粒子的微分散射截面 σ_s , 再求得散射场的相关函数, 进而求解散射场的频谱。对于粒子运动, 且不考虑转动的情况下, 可以将粒子的运动速度矢量分解为平均速度 $\bar{U}$ 和速度起伏 V_f 。相应的微分散射截面变为时变微分散射截面, 如式(2)所示。

$$\sigma_s(\hat{o}, \hat{i}, \tau) = \sigma_s(\hat{o}, \hat{i}) \chi(k_s \tau) \exp(jk_s U \tau) \quad (2)$$

微分散射截面 σ_s 与消光截面 σ_t 存在积分关系为

$$\sigma_s = \int_0^{4\pi} \sigma_t d\Omega \quad (3)$$

其中, Ω 为空间立体角。

因此, 时变散射场的相关函数 $B_u(\tau)^{[10]}$ 为

$$B_u(\tau) = \int_V \sigma_t(k_s \tau) \exp(jk_s U \tau) \exp(-\gamma_0 - \gamma') \rho dV \quad (4)$$

其中, V 为积分区域, ρ 为散射雨滴粒子数密度, γ_0 为源到粒子的光学厚度, γ' 为粒子到接收点的光学厚度。

因雨滴尺度较光波长大得多, 因此这里可以利用前向散射问题的小角度近似简化计算。散射振幅 $f(\theta)$ 在前向小范围角度 θ 内可表示为

$$|f(\theta)|^2 \cong \frac{\alpha_p \sigma_s}{\pi} \exp(-\alpha_p \theta^2) \quad (5)$$

其中, α_p 为等效脉宽参数, 其与波长 λ 和雨滴直径 D 有关, 大小为 $2.77 / (1.02\lambda/D)^2$ 。

利用维纳-辛钦定理对 $B_u(\tau)$ 做傅里叶变换, 得到散射场光功率谱 $W_u(\omega)$ 为

$$W_u(\omega) = 2 \int_{-\infty}^{\infty} B_u(\tau) e^{j\omega\tau} d\tau = (4\rho\sigma_s L) \left(\frac{\pi\alpha_p}{k^2 U^2} \right)^{\frac{1}{2}} \exp\left(-\gamma - \frac{\alpha_p \omega^2}{k^2 U^2}\right) \quad (6)$$

其中, γ 为路径光学厚度, ω 为频率。 ρ 、 γ 的计算式分别如式(7)、式(8)所示。

徐林, 黄富良, 解孟其, 等: 无线光通信中雨滴末速度对散射光频谱的影响研究

$$\rho = \int_{D_{\min}}^{D_{\max}} N(D) dD \quad (7)$$

$$\gamma = \int_{D_{\min}}^{D_{\max}} N(D) \sigma_t L dD \quad (8)$$

其中, N 为直径为 D 的雨滴的数量, $D_{\min}$ 、 $D_{\max}$ 分别为雨滴最小直径和最大直径。

2 雨滴谱末速度模型

各地降雨的雨滴谱和雨滴末速度是气象工作者的常规测量内容, 这方面也有国际公认的参考模型。Marshall-Palmer 分布(M-P 分布)是一种经典的雨滴谱分布模型, 它描述了雨滴直径与雨滴数量之间的关系, 通常用于模拟降雨过程中的雨滴尺寸分布情况。本文研究雨滴末速度对光传播的影响, 采用通用的 M-P 分布^[5]作为雨滴谱, 并结合不同的雨滴末速度对散射光强进行计算。

M-P 分布中雨滴数密度与雨滴直径的关系为

$$N(D) = 8000 \exp(-4100 p^{-0.21} D) \quad (9)$$

本文采用我国北京、西安两地的实测拟合模型(Jia@Beijing, Song@Xi'an)^[6-7]与 Battan 模型^[8]、Kinzer & Gunn 模型^[9]进行对比, 这 4 种雨滴谱模型的雨滴直径 D 与末速度 v 的关系如表 1 所示, 通过计算可得 4 种雨滴谱模型的雨滴末速度的对比情况如图 3 所示。可以看出, 4 种雨滴末速度模型的变化趋势都为单调递增, 但各自的末速度并不相同。原因在于, Battan 模型和 Song@Xi'an 模型采用了指数小于 1 的幂函数来拟合实测数据; Kinzer&Gunn 模型使用了分段的一次和二次函数; 而 Jia@Beijing 模型则采用了负指数函数进行建模。

表 1 4 种雨滴末速度模型的直径-末速度关系

模型名称	雨滴直径-末速度关系式
Battan	$v(D) = 200.8 (D/2000)^{0.5}$
Kinzer & Gunn	$v(D) = \begin{cases} 28D^2, & D \leq 0.075 \text{ mm} \\ 4.5D^2 - 0.18, & 0.075 \text{ mm} < D \leq 0.5 \text{ mm} \\ 4.0D + 0.07, & 0.5 \text{ mm} < D \leq 1.0 \text{ mm} \\ 0.425D^2 + 3.695D + 0.8, & 1.0 \text{ mm} < D \leq 3.6 \text{ mm} \end{cases}$
Jia @Beijing	$v(D) = 1.14^{0.5} [9.65 - 10.3 \exp(-0.6D)]$
Song @Xi'an	$v(D) = 5.16 D^{0.43}$

文献[5]描述了粒子尺度分布对散射的影响, 但未考虑不同的速度分布。在实际情况中, 由于大量同时存在的雨滴粒子运动速度的不同, 会引起散射光强

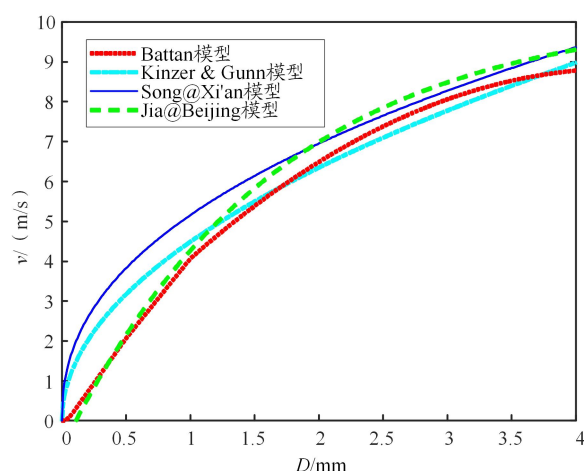


图 3 4 种雨滴末速度模型对比

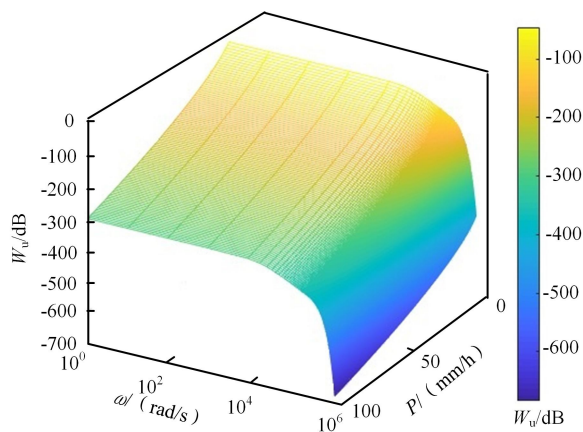
的起伏, 即粒子运动的速度分布亦会对散射光强的频谱造成影响。

3 光强频谱仿真

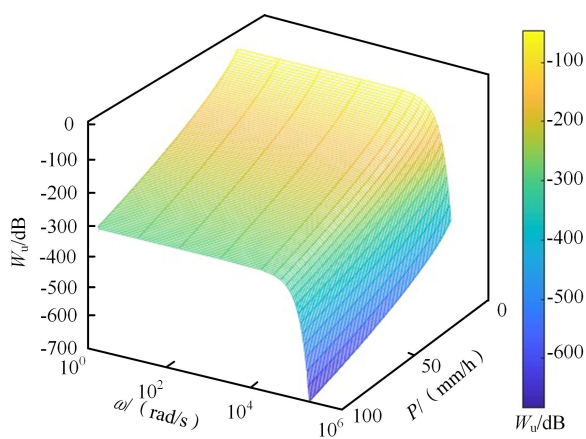
将式(7)~式(9)以及表 1 中的速度模型代入式(6)中, 可得不同雨滴末速度在 M-P 分布下的散射光频谱, 如式(10)所示。

$$W_u(\omega) = \int_{D_{\min}}^{D_{\max}} N(D) dD 4\sigma_s L \left(\frac{\pi \alpha_p(D)}{k^2 U^2(D)} \right)^{\frac{1}{2}} \times \exp \left(\int_{D_{\min}}^{D_{\max}} N(D) \sigma_t L dD - \frac{\alpha_p(D) \omega^2}{k^2 U^2(D)} \right) \quad (10)$$

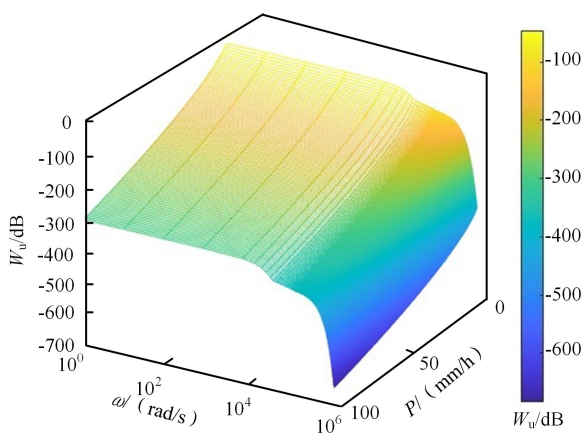
从式(10)可以看出, 散射光频谱幅度与通信距离、降雨率、频率以及雨滴末速度有关。当通信距离为 10 km、波长为 1550 nm、采用 M-P 分布雨滴谱和不同模型的情况下, 散射光频谱与降雨率的变化特性如图 4 所示。可以看出, 光强频谱随降雨率的增加而逐渐衰减, 频谱衰落速度随光强信号频率的升高而快速提



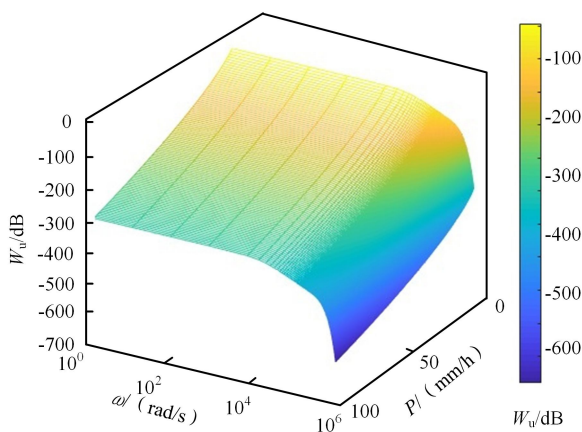
(a) Battan 模型



(b) Kinzer&Gunn 模型



(c) Jia@Beijing 模型

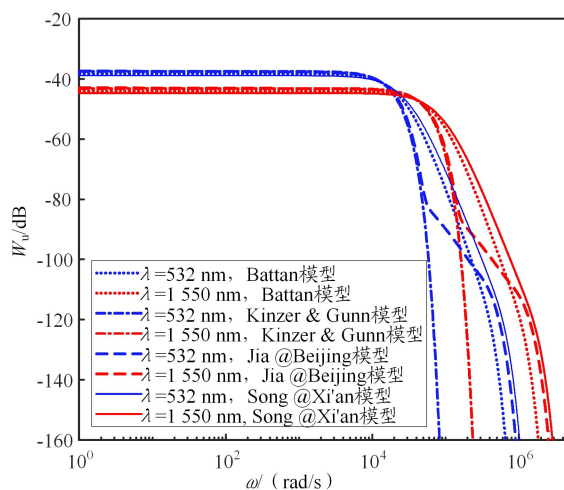


(d) Song@Xi'an 模型

图4 散射光频谱随降雨率的频域变化关系

高;随着降雨率的提高、雨滴速度的加快以及光强变化频率的增加,光强衰减会变得更加显著;同一种雨滴末速度分布情况下光强频谱衰减随降雨率增加而增加,频谱形状基本不变,仅随降雨率的增减在垂直方向上下平移。

本文在大雨天气条件下(降雨率 $P=20$ mm/h),忽略收发天线增益的影响,对 1 km 间距的单位距离上散射光频谱的衰减进行了计算。同时,还考虑了实际 WOC 系统中信标光和信号光的波长 λ ,分别设定为 532 nm 和 1 550 nm。最后,对比了该降雨量下 4 种雨滴末速度模型所对应的散射光频谱,结果如图 5 所示。可以看出,在低频段, $\lambda=532$ nm 的绿光的 W_u 衰减幅度均小于 $\lambda=1\,550$ nm 的红外光,这也是 WOC 系统使用绿光作为信标光的原因。但在高频段, $\lambda=1\,550$ nm 的红外光的衰减较 $\lambda=532$ nm 的更低,同时 $\lambda=1\,550$ nm 对应的 3 dB 带宽也大于 $\lambda=532$ nm。这表明长波长的红外光更适合无线光宽带通信。

图5 4种雨滴末速度模型对应的散射光频谱($P=20$ mm/h)

再对比不同雨滴末速度模型对频谱形状的影响: Battan 模型和 Song@Xi'an 模型都使用了幂函数模型,因此频谱函数在各频段保持了类似的变化规律;而 Kinzer&Gunn 模型和 Jia@Beijing 模型频谱在低频段衰减较 Battan 模型小,但是随着频率升高,频谱衰减会迅速增大。由于 Jia@Beijing 模型使用负指数函数作为基函数,结合图 3 分析, Jia@Beijing 模型中对于高频信号影响较大的快速雨滴分布接近 Song@Xi'an 模型,因此该模型的频谱形状在高频处会逐渐背离 Kinzer&Gunn 模型,并逐渐靠近 Song@Xi'an 模型。

将不同雨滴末速度模型的频谱曲面叠画,并取 ω 为 0 处的曲面切片,可以得到 WOC 系统接收光强随降雨率的变化情况,如图 6 所示。可以看出,信号接收光强会存在先增后降的现象,表明随着降雨率的增大,单位距离光强衰减随降雨率的提高呈现出先降后增的趋势。这与文献[9]中的结论一致。对于同一雨滴末速度模型,在对比不同波长时,发现 532 nm 信号光衰减约比 1 550 nm 信号光大 1 dB。当降雨率超过

徐林, 黄富良, 解孟其, 等: 无线光通信中雨滴末速度对散射光频谱的影响研究

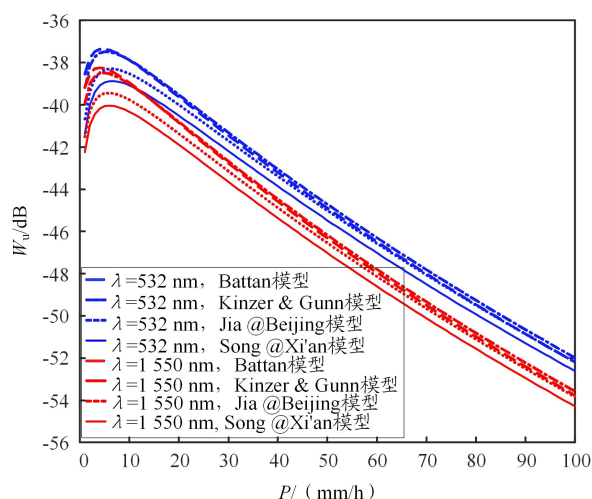


图6 信号接收光强随 P 变化情况 ($\omega=0$)

10 mm/h 后, 每增加 10 mm/h 的降雨率, 单位距离的光强衰减会额外增加约 2 dB。

4 结束语

本文基于 Mie 散射理论和 M-P 模型, 仿真计算了波长分别为 532 nm 和 1 550 nm 的光在雨中的散射场, 并进一步利用不同的雨滴末速度模型分析了散射光强频谱。研究结果显示, 除了雨滴谱和降雨率, 不同的雨滴末速度分布也会显著影响 WOC 系统散射光频谱的特性。在雨滴末速度模型中, 快速雨滴主要对频谱中的高频部分产生显著影响, 改变其形状。即便降雨强度相同, 不同类型的降雨乃至不同地区的降雨,

对 WOC 系统的影响也各不相同。这表明 WOC 系统光路上介质的运动是导致散射光频谱变化的重要因素之一, 从理论层面验证了信道中多普勒效应的普遍存在。因此, WOC 系统需具备对信道特性的实时估计能力, 以有效应对如降雨等散射信道环境对系统性能的影响, 这对高速 WOC 系统的设计提出了新的挑战和要求。

参考文献:

- [1] 李征, 廖志文, 梁静远, 等. 大气湍流模型与大气信道模型的研究与展望[J]. 光通信技术, 2023, 47(3): 9-17.
- [2] 王惠琴, 姚宇, 曹明华. 激光信号在沙尘天气下的脉冲时延和展宽[J]. 光学学报, 2017, 37(7): 333-341.
- [3] YAO H, CHEN C, NI X, et al. Analysis and evaluation of the performance between reciprocity and time delay in the atmospheric turbulence channel[J]. Optics Express, 2019, 27(18): 25000-25011.
- [4] 李应乐, 黄际英. 雨滴的衰落截面模型和参数估计[J]. 电子学报, 2004, 32(3): 505-507.
- [5] 解孟其, 柯熙政. 中国不同地区降雨中光强衰减与方差特性研究[J]. 西安理工大学学报, 2016, 32(1): 1-6.
- [6] 贾星灿, 马新成, 毕凯, 等. 北京冬季降水粒子谱及其下落速度的分布特征[J]. 气象学报, 2018, 76(1): 148-159.
- [7] 宋嘉尧, 罗俊颀, 梁谷, 等. 关中地区对流性降水雨滴谱特征分析[J]. 陕西气象, 2015 (5): 15-20.
- [8] ISHIMARU A. 随机介质中波的传播和散射[M]. 北京: 科学出版社, 1986.
- [9] 朱耀麟, 安然, 柯熙政. 降雨对无线激光通信的影响[J]. 光学学报, 2012, 32(12): 79-84.