

doi:10.3788/gzxb20144311.1114002

降雨对激光定距系统后向散射特性的影响

郭婧¹, 张合², 赵学健¹

(1 南京邮电大学 物联网学院, 南京 210003)

(2 南京理工大学 智能弹药技术国防重点学科实验室, 南京 210094)

摘 要: 由于激光光束在降雨中传输时会产生雨滴的后向散射, 引起定距系统的虚警、失效等. 以几何光学散射理论为基础, 建立雨滴后向散射模型并计算不同降雨条件下的后向散射系数, 结合工程应用计算不同降雨条件和传输距离下的系统信噪比, 分析雨滴后向散射对系统信噪比的影响. 计算结果表明, 传输距离一定时, 系统信噪比将随着降雨率的增大而减小, 暴雨中衰减率高达 11%; 在相同降雨条件下, 作用距离从 10 m 增大至 15 m, 信噪比衰减率达到 46% 以上. 降雨大小和作用距离是影响系统信噪比的重要因素, 为脉冲激光定距系统在降雨环境下的目标识别以及高抗干扰性能的优化提供了依据.

关键词: 激光定距; 后向散射; 几何光学散射; 信噪比; 激光脉冲; 降雨衰减

中图分类号: TJ430

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2014)11-1114002-5

Study on Backscattering Characteristics of Laser Ranging System in the Rain

GUO Jing¹, ZHANG He², ZHAO Xue-jian¹

(1 College of Internet of Things, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210003, China)

(2 ZNDY of Ministerial Key Laboratory, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

Abstract: The laser beam transmitting in the rain would be scattered and attenuated by the raindrops, so that the laser ranging system will be false alert and invalidation. Based on geometric optics theory, the raindrop backscattering model was founded, and the backscattering coefficients of different rainfall rates were calculated. Combined with engineering application, the signal-to-noise ratio at different rainfall rates and transmission distances were calculated, and the affect of raindrop backscattering to the system SNR is analyzed. The calculation results indicate that the system SNR is decreasing with the increasing of the rainfall rates and the attenuation rate is up to 11% in the heavy rain. And at the same rainfall rate, the attenuation rate of SNR is up to 46% or more when the distance increases from 10 m to 15 m. The rainfall rate and distance are the important factors to affect the system signal-to-noise ratio, so the study on backscattering characteristics has important instruction for the design and optimization of high anti-interfering performance laser ranging system.

Key words: Laser ranging; Backscattering; Geometrical optics; Signal to noise ratio; Laser pulses; Rainfall

OCIS Codes: 140.3070; 010.1290; 010.1300; 290.1310; 290.4210

0 引言

激光定距系统具有对目标探测的主动性、探测视场方向性尖锐和不易受电子干扰等优点, 一直受到格外重视, 并得到广泛应用^[1-2]. 激光定距系统由于工作在电磁波的高频段——光波段, 在本质上有较强的抗

电磁干扰能力, 但主要缺点是穿透大气能力不够, 烟尘、云雾、雨雪等对激光的吸收和散射要比微波和毫米波大得多. 激光光束在大气中传输时会与大气中的各种粒子发生作用, 产生粒子的吸收和散射效应, 使得接收端的激光透过率功率减小、光斑扩展及廓形发生畸变, 或者介质后向散射造成系统虚警等^[3]. 因此, 研究

基金项目: 江苏省高校自然科学研究面上项目(No. 12KJB20012)、江苏省高校自然科学基金(No. 12KJB520012)和南京邮电大学人才引进项目(No. NY213046)资助

第一作者: 郭婧(1984—), 女, 博士, 讲师, 主要研究方向为激光近程探测与目标识别. Email: guojing@njupt.edu.cn

收稿日期: 2014-04-11; **录用日期:** 2014-08-08

<http://www.photon.ac.cn>

大气粒子散射回波信号,对实现高抗干扰性能的激光定距系统具有重要意义。

降雨是自然界中非常普遍的现象,它对激光产生严重的衰减和散射,从而给激光定距系统的应用带来一定的影响。目前,国内外只是针对激光大气、激光云雾后向散射及其抗干扰技术^[4-11]开展了大量的研究工作,而降雨对激光的后向散射特性研究还鲜有报道,并且多数研究中都采用蒙特卡罗法和实验测量法进行定性分析,本文基于几何光学散射理论,研究了降雨对激光后向散射特性的影响并给出不同降雨条件下的后向散射系数,结合某型号激光定距系统计算了不同降雨条件和传输距离下的系统信噪比(Signal to Noise Ratio, SNR),分析了雨滴后向散射对系统信噪比的影响。

1 雨滴的光散射特性

大气中存在着各种悬浮粒子,诸如云滴、雾滴、雨滴,气溶胶等,每个粒子周围其散射强度在空间具有三维特征分布类型,图1为发射光束在散射介质中的传播示意图。粒子的光散射分布形式极大地依赖于粒子尺度与入射波长的比值,并且粒子尺度不同时,其形状也有所不同。对于球形粒子,其散射现象可以分为三类,即瑞利(Rayleigh)散射、米氏(Mie)散射和无选择性散射。当粒子尺度远远小于波长时的散射称为Rayleigh散射,大气中主要的Rayleigh散射体是大气的气体分子;当粒子尺寸与激光波长差不多时,产生的散射是Mie散射;而当粒子尺寸远大于激光波长时,则产生无选择性散射。

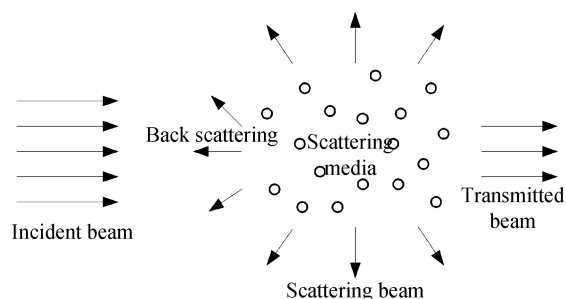


图1 光束在散射介质中的传播示意图

Fig. 1 Sketch map of beam transmitting in the scattering medium

由大气散射理论可知,当粒子尺度很大时,光散射分布变得复杂,对光波的散射主要集中在前向,整体散射很强,并集中在前向一个很小的角度内,在其它角度上出现次极大和极小^[12]。因此,当激光发射信号入射到雨滴后,由于光的散射作用会使一部分光沿着光信号传输的路径返回进入探测系统接收视场,当信号达到一定的强度,并且满足某些条件时,将会被误判为目标回波信号,从而造成系统虚警,使系统完全失效。

激光光束在降雨介质中传播时,近似地将雨滴看作球形粒子,描述球形粒子光散射的严格理论是Mie散射理论。Mie理论虽然精确,但计算繁琐,特别是随着颗粒粒径增加,求解的复杂叠加项就越多,带来的计算误差就越大。因此Mie理论的数值计算受到粒子的尺寸参量 α 限制,对于雨滴等大粒子的散射计算不适用。

雨滴的直径远大于激光波长,雨滴对激光的散射也就是微粒尺寸参量 $\alpha \gg 1$ 时的散射问题。研究表明,当颗粒尺寸远大于激光波长时,光散射主要集中在前向角度范围内,因此可用夫琅禾费(Fraunhofer)衍射理论计算代替颗粒前向散射^[13]。但衍射光的分布范围窄,84%的衍射光能都集中在角度为 $\theta_a = \sin^{-1}(1.22\pi/\alpha)$ 的前向爱里斑之内,而对于后向大角度的光散射分布,还必须考虑光束在颗粒表面产生的反射与折射的影响,称之为光束几何散射。

图2为球形颗粒的几何光学散射示意图。在某一角度的平行光入射后,经过球形颗粒的光被部分反射和折射,光线的方向遵循反射定理和折射定理。入射到球内的折射光线在粒子内表面存在同样的现象:一部分光线折射出球粒子,而另一部分被球粒子内表面反射回粒子内部。所有反射和折射光线的复振幅由菲涅耳系数决定。随着光线折、反射次数的增加,从球粒子内部出射的光线强度趋向于零。

设非吸收透明球粒子直径为 D ,折射率为 n ,环境折射率为1。入射光线与球表面的夹角为 τ ,进入球粒子内部的折射光线与粒子表面之间的夹角为 τ' ,出射光线相对于入射光线的偏转角为 $\theta(\tau)$ 。

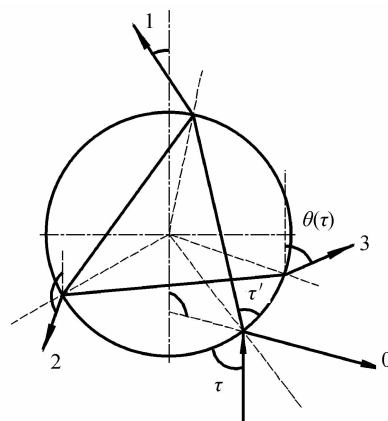


图2 光的几何散射

Fig. 2 Geometric scattering of light

2 雨滴后向散射模型

由上述分析可知,几何光学散射是光束在球形颗粒表面产生的反射和折射光线,文献^[14]研究表明,对于非吸收颗粒,96%以上的几何散射光能由反射和第一次折射产生,而对于吸收颗粒,比例更高,所以可以

将在任意吸收性质颗粒内部经过 2 次以上反射后的出射光能忽略. 因此,降雨对激光的后向散射,其本质是入射光束在雨滴表面产生的光线反射.

根据文献[14],可以推导出平面光入射下经过反射后的两个不同偏振方向的出射光强度分布表达式为

$$I_j(\tau) = \frac{D^2}{4r^2} I_0 \epsilon_j^{(0)} G^{(0)} \quad (j=1,2) \quad (1)$$

式中, I_0 为入射光强度, r 为颗粒到观察面的距离, ϵ_j 和 G 分别由式(2)和(3)描述,其中, r_1 和 r_2 为菲涅耳反射系数, θ 为反射光线与入射方向的夹角.

$$\epsilon_j^{(0)} = r_j^2 \quad (2)$$

$$G^{(0)} = \frac{\sin \tau \cos \tau}{\sin \theta |d\theta/d\tau|} = \frac{\sin \tau \cos \tau}{2 \sin \theta} \quad (3)$$

将式(2)和式(3)代入式(1),对于非偏振光,粒子后向散射光强度分布为

$$I_{bs}(\theta) = \frac{I_0 D^2}{r^2} \frac{\epsilon_1 + \epsilon_2}{2} G = E \frac{D^2 G(\epsilon_1 + \epsilon_2)}{8} \quad (4)$$

计算机编程对直径为 1 mm 的球形雨滴进行后向散射的角度散射截面计算,其分布曲线如图 3 所示, X 轴为散射角度, Y 轴为后向散射光照强度 $I_{bs}(\theta)$ 与入射光辐照度 E 的比值,即角度散射截面.

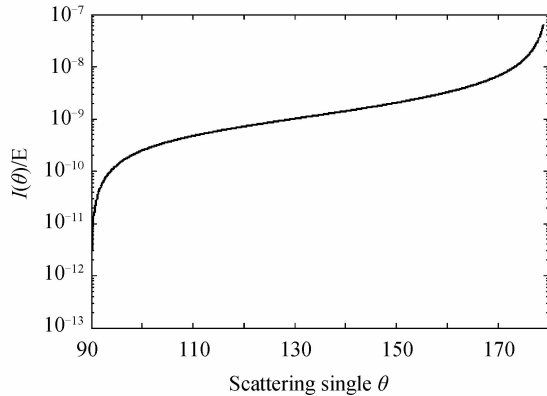


图 3 后向散射角度分布

Fig. 3 Backscattering distribution

对式(4)进行积分推导,得到球形雨滴的后向散射截面为

$$\sigma_{bs}(D) = \frac{I_{bs}(D)r^2}{I_0} = \frac{\pi D^2}{4} \int (\epsilon_1 + \epsilon_2) G \sin \theta d\theta \quad (5)$$

由于在实际降雨过程中,雨滴的间距远大于雨滴的半径,因此可认为每个雨滴的后向散射都是独立的,不受其它雨滴散射的影响,雨滴的后向散射功率可直接叠加. 假设单位体积内直径 D 的雨滴个数,即雨滴尺寸分布函数为 $N(D)$,则单位体积雨滴的后向散射系数为

$$\mu_{bs}(\lambda) = \int \sigma_{bs}(D) N(D) dD \quad (6)$$

文献[15]利用 1992 年夏季广州地区雨滴尺寸分布测量数据和广义 Gamma 模型,通过优化计算得到了广州地区雨滴尺寸分布模型,这一模型与实测雨滴尺

寸分布间有较好的一致性,最后得到雨滴尺寸分布模型为

$$N(D) = 230600 R^{0.364} D^{-0.274} \cdot \exp(-7.411 R^{-0.0527} D^{0.452}) \quad (7)$$

根据式(6)并结合雨滴尺寸分布式(7),分别计算了 1.064 μm 激光在不同降雨条件下单位体积雨滴的平均后向散射系数 $\mu_{bs}(\lambda)$,单位 m^{-1} ,如表 1 所示.

表 1 不同降雨条件下单位体积雨滴后向散射系数
Table 1 Raindrop backscattering coefficients at different rainfall rates

Rainfall rate/ (mm · h ⁻¹)	2.5	12.5	50	100
Backscattering coefficient/m ⁻¹	3.19e-6	1.07e-5	2.98e-5	4.93e-5

3 雨滴后向散射对激光定距系统的信噪比影响

为了使激光定距系统在降雨条件下能够准确可靠地获得敌方目标信息,在满足一定的虚警率和探测率的情况下,激光定距系统的光电探测信噪比 SNR 必须大于系统要求的数值.

光电探测的噪音电流主要有:前置放大器的热噪音电流 i_{th} 、背景辐射的散粒噪音电流 i_{bg} 以及探测器的暗电流噪音电流 i_d ,其表达式为

$$i_{th}^2 = 4(kT \cdot B_n) \cdot NF/R_L \quad (8)$$

$$i_{bg}^2 = 2eI_{bg} \cdot B_n = 2eSP_b \cdot B_n \quad (9)$$

$$i_d^2 = 2eI_d \cdot B_n = 2eI_{d0} 2^{0.1(T-298)} \cdot B_n \quad (10)$$

式中: k 是波尔兹曼常量; T 是环境温度(K); B_n 是噪音等效带宽; R_L 是等效源输入阻抗; NF 为前放噪音系数; I_{bg} 和 I_d 分别为各噪音电流的直流分量; P_b 为背景光功率; e 是电子电量; S 为光电探测器的响应度, I_{d0} 为温度为 25℃ 时的暗电流噪音电流.

激光定距系统光电探测器接收到的回波信号电流

$$i_{sig}^2 = S^2 P_r^2 \quad (11)$$

由式(8)~(11)可得到光电探测输出的信噪比 SNR 的表达式为

$$\text{SNR} = \frac{i_{sig}}{\sqrt{i_{th}^2 + i_{bg}^2 + i_d^2}} \quad (12)$$

激光定距系统的背景光功率噪音主要来自于阳光的直接辐射、自然背景辐射、大气对阳光的散射等. 一般情况下,背景光功率 P_b 表示为

$$P_b = E_b \Delta\lambda A_r \Omega(\eta_r, \theta_r) \quad (13)$$

式中, E_b 表示背景辐射的光谱辐射亮度; $\Delta\lambda$ 表示滤光片带宽; $\Omega(\eta_r, \theta_r)$ 表示接收视场, A_r 为接收系统透镜孔径面积.

在降雨条件下,雨滴的后向散射光功率会进入到激光定距系统的接收视场,此时系统的背景光功率不仅要考虑一般情况下的背景辐射,还要考虑雨滴对激

光信号产生的后向散射影响. 激光定距系统在降雨中的后向散射功率可表示为

$$P_{bs} = \frac{P_0 c \tau A_r \eta_r \eta_t \mu_{bs}(\lambda)}{2L^2} e^{-2 \int_0^L \alpha(\lambda, r) dr} \quad (14)$$

式中, P_{bs} 是激光系统接收的雨滴后向散射功率; P_0 是激光系统激光器的发射功率; η_r 是激光系统发射光学系统的效率; η_t 是激光系统接收光学系统的效率; c 是光速; τ 是激光脉冲宽度; $\alpha(\lambda, r)$ 为距离 r 处的降雨衰减系数; $\mu_{bs}(\lambda)$ 是单位体积雨场后向散射系数; L 是激光在雨中传输的距离. 因此, 背景光功率 P'_b 应重新按表达式(15)计算

$$P'_b = P_b + P_{bs} = E_b \Delta \lambda A_r \Omega(\eta_r, \theta_r) + \frac{P_0 c \tau A_r \eta_r \eta_t \mu_{bs}(\lambda)}{2L^2} e^{-2 \int_0^L \alpha(\lambda, r) dr} \quad (15)$$

为了分析降雨后向散射对激光定距系统产生的虚警作用, 结合某型号激光定距系统来计算不同降雨条件下以及不同作用距离雨滴后向散射对激光系统信噪比 SNR 的影响. 根据式(9)、(13)、(15)以及表 1 对定距系统在不同作用距离以及不同降雨条件下的信噪比进行计算, 计算结果如表 2、表 3 所示.

表 2 作用距离 10 m 时不同降雨率下的 SNR

Table 2 SNR of different rainfall rates at distance 10 m

$R/(\text{mm} \cdot \text{h}^{-1})$	$P_b/\mu\text{W}$	i_{bg}^2/A^2	$i_{sig}/\mu\text{A}$	SNR
0	1.58	2.53e-17	6.00	128.3
2.5	1.77	2.83e-17	5.99	126.5
12.5	2.38	3.81e-17	5.92	126.2
50	2.68	4.29e-17	5.81	123.8
100	5.59	8.94e-17	5.42	114.3

表 3 作用距离 15 m 时不同降雨条件下的 SNR

Table 3 SNR of different rainfall rates at distance 15 m

$R/(\text{mm} \cdot \text{h}^{-1})$	$P_b/\mu\text{W}$	i_{bg}^2/A^2	$i_{sig}/\mu\text{A}$	SNR
0	1.58	2.53e-17	3.21	68.7
2.5	1.69	2.70e-17	3.20	68.4
12.5	2.03	3.25e-17	3.17	67.7
50	2.19	3.50e-17	3.10	66.2
100	3.84	6.14e-17	2.88	61.1

从表 2 和表 3 中的计算结果可以发现, 激光定距系统作用距离在 10 m 和 15 m 时, 激光信号在 $R=2.5$ mm/h 的小雨中穿透率很高, 后向散射也比较微弱, 随着降雨率的增大, 激光回波信号衰减增加, 雨滴后向散射回波信号有所增强, 尤其在暴雨中 SNR 减小程度更为显著, 衰减率达到 11%. 因此, 激光信号在传输距离一定时, 降雨率是影响系统信噪比的主要因素. 另外, 激光信号在雨中传输时相对于无雨情况仍有较高的透射率, 相比雾、云层等大气环境, 激光在雨中的传输衰减系数要小得多, 后向散射能量也比较小, 这是由于雨滴粒子尺度大, 属于无选择性散射, 对光波的散射主要集中在前向, 整体散射很强, 并集中在前向一个很小的

角度内.

比较激光定距系统作用距离分别为 10 m 和 15 m 情况下的信噪比 SNR 计算结果看出, 在激光定距系统各方面参量已确定的情况下, 定距系统作用距离的变化对信噪比 SNR 的影响非常大, 作用距离增大, 信噪比 SNR 的减小非常明显, 在无雨和降雨情况下衰减率都达到了 46% 以上. 对定距系统信噪比分析中发现, 前置放大器的热噪音是噪音的主要成分, 比暗电流噪音和背景噪音要大很多, 是影响定距系统信噪比的主要因素.

4 结论

激光光束在降雨中传输时会与雨滴粒子发生作用, 产生粒子的吸收和散射效应, 雨滴的后向散射会造成系统虚警、失效等. 以几何光学散射理论为基础, 研究了降雨引起激光的后向散射特性并给出不同降雨条件下的后向散射系数, 结合某型号激光定距系统计算了不同降雨条件和传输距离下的系统信噪比, 分析了雨滴后向散射对系统信噪比的影响. 计算结果表明, 在传输距离一定时, 激光定距系统的信噪比随着降雨率的增大而减小, 暴雨中的衰减率高达 11%; 而在相同的降雨条件下, 定距系统作用距离的变化对信噪比的影响非常大, 作用距离从 10 m 增大至 15 m, 信噪比衰减率达到 46% 以上. 因此, 研究大气粒子散射回波信号以及降雨的后向散射特性, 对设计实现高抗干扰性能的激光定距系统具有重要的参考指导作用.

参考文献

- [1] ZHANG Jing-guo, LIANG Xiao-geng, LIU Jian-xin, *et al.* Effect of pulse width on cloud-and-fog backscattering signal [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2012, **41**(12): 1422-1425. 张京国, 梁晓庚, 刘建新, 等. 脉冲宽度对云雾回波的影响研究 [J]. *光子学报*, 2012, **41**(12): 1422-1425.
- [2] GUO Jing, ZHANG He, WANG Xiao-feng. Beam spread characteristics of laser fuze in the rain [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2012, **39**(1): 0113001-1-6. 郭婧, 张合, 王晓峰. 激光引信在降雨中的光束扩展特性研究 [J]. *中国激光*, 2012, **39**(1): 0113001-1-6.
- [3] SUN Xian-ming, WANG Hai-hua, LIU Wan-qiang, *et al.* Nonspherical model for sand dust storm and its application to the research of light multiple scattering [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2010, **30**(5): 1506-1510. 孙贤明, 王海华, 刘万强, 等. 沙尘暴粒子的非球形模型及其对激光的多次散射特性研究 [J]. *中国激光*, 2010, **30**(5): 1506-1510.
- [4] SONG Xue-ping, JIA Xiao-dong, QIN Yi-fan, *et al.* Experiment research on laser backscattering characteristic of fog [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2010, **39**(2): 260-265. 宋雪平, 贾晓东, 覃一凡, 等. 云雾对激光后向散射特性试验研究 [J]. *红外与激光工程*, 2010, **39**(2): 260-265.
- [5] YANG Rui-ke, HAN Xiang-e, HAO Yue. Propagation characteristics of infrared pulse waves through windblown sand and dust atmosphere [J]. *International Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 2007, **28**: 181-189.

- [6] ZHANG Shi-quan. The analysis of scattering effect for the transmission of $1.06\ \mu\text{m}$ laser in lower altitude atmosphere[J]. *International Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 2007, **28**: 491-497.
- [7] WANG Chun-hui, ZHANG Jian, LI Ming-zhuo, *et al.* Characteristic of multiply backscattered signal of meteorological lidar[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2007, **36**(10): 1881-1883.
王春晖,张建,李明卓,等. 激光气象雷达多次后向散射信号特性分析[J]. 光子学报, 2007, **36**(10): 1881-1883.
- [8] ZHANG Hai-zhuang, KONG Ya-nan, MENG Zhi-yong, *et al.* $1.06\ \mu\text{m}$ Laser atmosphere to the back scattering intensity [J]. *Optics & Optoelectronic Technology*, 2012, **10**(4): 21-23.
张海庄,孔亚南,孟智勇,等. $1.06\ \mu\text{m}$ 激光大气后向散射强度仿真计算研究[J]. 光学与光电技术, 2012, **10**(4): 21-23.
- [9] YANG Yu-chuan, LONG Chao, TAN Bi-tao, *et al.* Study on the influence of atmosphere back-scattering on laser pulse[J]. *Laser & Infrared*, 2013, **43**(5): 482-485.
杨雨川,龙超,谭碧涛,等. 大气后向散射对主动探测激光脉冲的影响[J]. 激光与红外, 2013, **43**(5): 482-485.
- [10] ZHANG Jing-guo, LIANG Xiao-geng, LIU Jian-xin, *et al.* Monte Carlo simulation and experimental study on cloud-and-fog backscattering signals [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2012, **24**(12): 2920-2924.
张京国,梁晓庚,刘建新,等. 近距云雾回波蒙特卡罗模拟与实验测量[J]. 强激光与粒子束, 2012, **24**(12): 2920-2924.
- [11] SHI Bo, NIE Sen, MA Xiao-min, *et al.* Lidar measurements of cirrus clouds lidar ratio[J]. *Journal of Atmospheric and Environmental Optics*, 2012, **7**(1): 1-5.
史博,聂森,麻晓敏,等. 卷云消光后向散射比的激光雷达测量[J]. 大气与环境光学学报, 2012, **7**(1): 1-5.
- [12] 麦卡特尼 E J. 大气光学:分子和粒子散射[M]. 潘乃先等译. 北京:科学出版社, 1988: 12-37.
- [13] HODKINGSON J R, GREENLEAVES I. Computations of light-scattering and extinction by spheres according to diffraction and geometrical optics, and some comparisons with the mie theory [J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 1963, **53**(5): 577-588.
- [14] GUO Jing, ZHANG He, WANG Xiao-feng. Attenuation and transmission of laser radiation at 532 nm and 1064 nm through rain [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(1): 0101004.
郭婧,张合,王晓锋. 降雨对 $0.532\ \mu\text{m}$ 和 $1.064\ \mu\text{m}$ 激光传输的衰减特性研究[J]. 光学学报, 2011, **31**(1): 0101004.
- [15] ZHAO Zhen-wei. Raindrop size distribution model and prediction of rain attenuation in Guangzhou [J]. *Chinese Journal of Radio Science*, 1995, **10**(4): 33-37.
赵振维. 广州地区雨滴尺寸分布模型及雨衰减预报[J]. 电波科学学报, 1995, **10**(4): 33-37.