

降雨对 532 nm 和 1064 nm 激光传输的 衰减特性研究

郭 婧 张 合 王 晓 锋

(南京理工大学智能弹药技术国防重点学科实验室, 江苏 南京 210094)

摘要 降雨会对激光信号产生严重的衰减,从而给激光目标探测的应用带来一定影响。激光在降雨中的传输衰减已在红外波段做了大量的实验研究,而可见光波段激光在雨中的传输衰减特性还未见报道。基于夫琅禾费衍射和几何光学散射理论,建立雨滴对 532 nm 绿激光和 1064 nm 近红外激光光束的传输衰减模型,对比分析两波长激光在不同降雨量下的衰减特性,并通过实验测试验证衰减模型的准确性。理论分析和实验结果表明,两波长的散射损耗差别微小,但雨滴对 1064 nm 激光的吸收作用明显,透射率低于 532 nm,这为绿激光在降雨环境下目标探测系统中的应用提供了一定的理论和实验依据。

关键词 激光探测;降雨衰减;雨滴散射;绿激光

中图分类号 TN247 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS201131.0101004

Attenuation and Transmission of Laser Radiation at 532 nm and 1064 nm through Rain

Guo Jing Zhang He Wang Xiaofeng

(Ministerial Key Laboratory of Zhi Neng Dan Yao, Nanjing University of Science and Technology,
Nanjing, Jiangsu 210094, China)

Abstract Rainfall can bring serious attenuation to the laser signals, so it will take some influence to the laser detection system applied in the rain. The attenuation of laser beam propagating in the rain is lucubrated in the infrared range, but the attenuation of green laser in the rain has not been reported. Therefore, based on Fraunhofer diffraction and geometric optics theory, the attenuation model of laser radiation at 532 nm and 1064 nm by raindrops is founded, and the attenuation characteristics are contrasted and analyzed. Then, the veracity of attenuation model is validated by experiments. Theory analysis and experimental results indicate that the differences of the scattering loss between the two wavelengths are slight, but the absorption of the raindrops to the 1064 nm is obvious, so the transmittance of laser radiation at 1064 nm is lower than 532 nm. Attenuation and transmission characteristics of laser in rain provide theoretical basis for green laser applied in the detection system working in the rain.

Key words laser detection; rain attenuation; raindrop scattering; green laser

OCIS codes 010.0010; 140.0140; 290.0290

1 引 言

激光具有定向性、单色性、高亮度和相干性等特点,且能量可有效实现远距离传输,因而具有很好的应用前景^[1]。而激光在近地大气中的传输特性是探

测系统在大气中运行时必须研究的重要问题之一,尤其是近地大气中随机分布的各种离散悬浮粒子如降雨、沙尘暴、云和雾等对激光的散射和吸收,会使激光信号受到不同程度的衰减,使系统性能下

收稿日期: 2010-06-21; 收到修改稿日期: 2010-07-24

基金项目: 国家自然科学基金(60908037)和国家部委基金(9140A05010610BQ02)资助课题。

作者简介: 郭 婧(1984—),女,博士研究生,主要从事引信智能化与灵巧化设计方面的研究。

E-mail: sandyguo0826@163.com

导师简介: 张 合(1957—),男,教授,主要从事引信新探测技术方面的研究。E-mail: hezhangz@mail.njust.edu.cn

降^[2~4]。因此,苛刻气候条件对激光能量的衰减研究,为系统克服气候因素和大气本身对激光探测的影响提供一定的应用理论基础。

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,从而给激光探测的应用带来一定的影响。国内外学者对激光在降雨介质中传输时能量的衰减,只是针对红外、近红外波段作了大量的实验测试研究^[5~10],而蓝绿激光在雨中传输的衰减特性还未见报道,并且多数研究中都采用米氏理论作为描述雨滴粒子对激光散射衰减的严格理论。本文基于夫琅禾费衍射和几何光学散射理论,建立雨滴对532 nm和1064 nm激光光束的传输衰减模型,以Gamma分布作为雨滴谱分析计算两种波长激光在不同降雨量下的衰减特性,并通过实验验证雨滴衰减模型,为绿激光在降雨环境下探测系统中的应用提供一定的理论和实验依据。

2 激光信号降雨衰减特性

激光探测系统在大气中的传输特性^[11]

$$P_R = \frac{P_T \tau_E \tau_R \tau_F A_R \rho \cos \beta}{\pi R^2} \exp \left[-2 \int_0^R \alpha(r) dr \right], \quad (1)$$

式中 P_R 为探测器接收的激光功率, P_T 为激光器发射功率, τ_E 为发射光学系统的透射率, τ_R 为接收光学系统的透射率, τ_F 为窄带滤光片的透射率, β 为目标反射表面法线与光轴之间的夹角, A_R 为接收机光学系统孔径面积, ρ 为目标物的反射率, R 为激光光束传播距离, $\alpha(\lambda, r)$ 为距离 r 处的大气衰减系数。

为了评价激光探测系统在苛刻气象条件下的传输性能,需要考虑复杂大气环境(如雨、雾和霾等)的影响。降雨是影响激光探测光能量传输的重要因素,它会对激光束产生严重的衰减,从而给激光探测的应用带来一定影响。雨滴对激光能量的衰减由散射和吸收组成,因此波长为 λ 的激光光束在降雨中的衰减系数可表示为

$$a(\lambda) = \gamma(\lambda) + k(\lambda), \quad (2)$$

式中 $\gamma(\lambda)$ 为散射系数, $k(\lambda)$ 为吸收系数。 $\gamma(\lambda) = \int \sigma_s(D) N(D) dD$, $\sigma_s(D)$ 为雨滴微分散射截面, $N(D)$ 为雨滴尺寸分布函数。

2.1 雨滴尺寸分布函数

雨滴尺寸分布是指在单位空间体积内,直径在 $D \sim D + \Delta d$ 的雨滴的数目,即单位体积内雨滴大小的分布。研究表明,雨滴尺寸分布可以用 M-P 分布、对数正态分布和 Gamma 分布等函数来描述,其

中 M-P 和 Gamma 分布最为常用。M-P 分布是 Marshall 和 Palmer 于 1948 年提出的^[12],其形式为

$$N(D) = N_0 \exp(-\Delta D), \quad (3)$$

人们在研究中发现 M-P 谱中的参数 N_0 还与降水强度 P 有关,不是一个固定的常数。在 1984 年, Ulbrich 等^[13] 提出使用 Gamma 谱来描述雨滴尺寸分布,取得了比较好的结果, Gamma 分布是在 M-P 分布中引入一个形状因子 μ :

$$N(D) = N_0 D^\mu \exp(-\Delta D), \quad (4)$$

我国从 20 世纪 60 年代开始就已对雨滴谱进行观测和研究,对不同地区、不同降水类型的雨滴谱分布形式也做了拟合^[14]。这些研究表明, M-P 分布对于稳定降水的雨滴谱拟合效果较好,对于起伏变化较大的降水,在小滴和大滴段拟合误差较大。与 M-P 分布相比, Gamma 分布对各类降水谱的拟合效果都很好,尤其对于小滴段的描述。

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 分布模型,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

$$N(D) = 230600 P^{0.364} D^{-0.274} \times \exp(-7.411 P^{-0.0527} D^{0.452}). \quad (5)$$

2.2 雨滴散射衰减系数

激光光束在降雨介质中传播时,会发生雨滴的吸收和散射作用。散射是指光线通过不均匀的介质而偏离其原来的传播方向,散开到所有方向的现象^[16]。散射不引起激光光束能量的损耗,但会改变激光光束能量原来的空间分布,所以经散射后,会导致原来传播方向上激光光束能量的衰减。激光光束在雨介质中传播时,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米氏散射理论。米氏理论虽然精确,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,因此米氏理论的数值计算受到粒子的尺寸参数 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数 $\alpha > 1$ 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,因此可用夫琅禾费衍射理论计算代替颗粒前向散射^[17]。但衍射光的分布范围窄,84%的衍射光能都集中在 $\theta_d = \arcsin(1.22\pi/\alpha)$ 的艾里斑之内,在小散射角度范围内,夫琅禾费衍射可近似代替光散射计算,而对于大角度的光散射分

布,还必须要考虑光束在颗粒表面产生的反射与折射的影响,也称之为光束几何散射。

根据巴比涅互补原理,除中心点外,平面不透光圆屏的衍射光强分布与相同大小的圆孔衍射光强分布完全相同。因此,在一定区域内,可由圆孔的夫琅禾费衍射得到圆球颗粒的夫琅禾费衍射光强。直径为 D 的雨滴在距离 r 处的衍射光强为^[18,19]

$$I_d(\theta) = I_0 \frac{D^2 \alpha^2}{16r^2} \left[\frac{2J_1(\alpha \sin \theta)}{\alpha \sin \theta} \right]^2. \quad (6)$$

对(6)式积分推导,可得到雨滴的夫琅禾费衍射衰减截面:

$$\sigma_d(D) = \frac{I_d}{I_0} r^2 = \frac{\pi D^2}{2} \int_0^\alpha \frac{J_1^2(x)}{x} dx = \frac{\pi D^2}{4} [1 - J_0^2(\alpha) - J_1^2(\alpha)], \quad (7)$$

式中 I_0 为入射光强度,尺度参数 $\alpha = \pi D/\lambda$, θ 为衍射光与入射光方向的夹角, J_0, J_1 为零阶、一阶贝塞尔函数。

图 1 为球形颗粒的光束几何散射示意图,在某角度平行光入射后,经过球形颗粒的光被部分反射和折射。Van De Hulst^[20]给出了球形颗粒在平面光入射下经过某一次折射或反射后的两个不同偏振方向的出射光强度分布表达式:

$$I_j^{(p)}(\tau) = \frac{D^2}{4r^2} I_0 \epsilon_j^{(p)} G^{(p)} \quad (j = 1, 2), \quad (8)$$

式中 p 表示第 p 条出射光线, τ 为入射角余角, I_0 为入射光强度, D 为颗粒直径, r 为颗粒到观察面的距离, ϵ_j 和 G 分别为

$$\begin{cases} \epsilon_j^{(0)} = r_j^2 & p = 0 \\ \epsilon_j^{(p)} = [(1 - r_j^2)(1 - r_j)^{p-1}]^2 & p = 1, 2, 3, \dots \end{cases}, \quad (9)$$

$$G^{(p)} = \frac{\sin \tau \cos \tau}{\sin \theta |d\theta/d\tau|} = \frac{\sin \tau \cos \tau}{\sin \theta} \left| \frac{1}{2 - 2p \tan \tau / \tan \tau'} \right|, \quad (10)$$

式中 r_1 和 r_2 为非涅耳反射系数:

$$\begin{cases} r_1 = \frac{\sin \tau - n \sin \tau'}{\sin \tau + n \sin \tau'} \\ r_2 = \frac{n \sin \tau - \sin \tau'}{n \sin \tau + \sin \tau'} \end{cases}, \quad (11)$$

式中 n 为水的复折射率实部。

引入无量纲强度函数 $i_j^{(p)}(\alpha, \tau) = \alpha^2 \epsilon_j^{(p)} G^{(p)}$, 它是基于角度 τ 的一次反射或折射强度函数,而对于给定散射角度 θ 下各次折、反射的总强度函数为

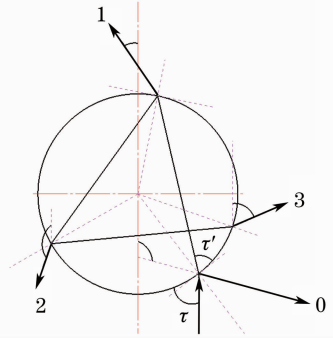


图 1 光的几何散射

Fig. 1 Geometric scattering of light

$$i_j(\alpha, \theta) = \sum_{\theta_j(\tau)=\theta} i_j^{(p)}(\alpha, \tau), \quad (j = 1, 2) \quad (12)$$

数值计算表明,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,并且第一次反射的0号线光强度远比透明颗粒情况下的1号光线弱,对于半径小于3 mm的水滴,其反射能量与总能量的比值小于1%^[21]。因此可以将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,而只考虑第一次折射光强。因此,总强度函数可近似由第一次折射强度函数表示:

$$i_j(\alpha, \theta) = i_j^{(1)}(\alpha, \theta) \quad (j = 1, 2), \quad (13)$$

将(7)~(12)式联立,对于偏振角为 φ 的线偏振激光,粒子散射光强角度分布为

$$I_g(\theta) = \frac{I_0}{r^2} \frac{\lambda^2}{4\pi^2} (i_1 \sin^2 \varphi + i_2 \cos^2 \varphi), \quad (14)$$

单个球形雨滴的几何散射衰减截面为

$$\sigma_g(D) = \frac{\lambda^2}{4\pi} \int_0^\pi (i_1 \sin^2 \varphi + i_2 \cos^2 \varphi) \sin \theta d\theta = \frac{\pi D^2}{4} \int_0^\pi (\epsilon_1 \sin^2 \varphi + \epsilon_2 \cos^2 \varphi) G \sin \theta d\theta. \quad (15)$$

因此,球形雨滴对激光光束的散射衰减截面模型为

$$\sigma_s(D) = \sigma_d(D) + \sigma_g(D). \quad (16)$$

由上述分析可知,雨滴的激光散射由夫琅禾费衍射与几何散射构成,计算机编程对直径为0.5 mm[图 2(a)]和1 mm[图 2(b)]的球形雨滴计算得到角散射截面分布 $\sigma_s(D, \theta)$ 如图 2 所示。从图中数据可以看出,更多的散射光集中到前向较窄的衍射瓣中,在较小的角度范围内,衍射光为主要透射光,但当散射角度增大时,几何散射光占主要地位,而且随着粒径的增大,角散射截面增大。

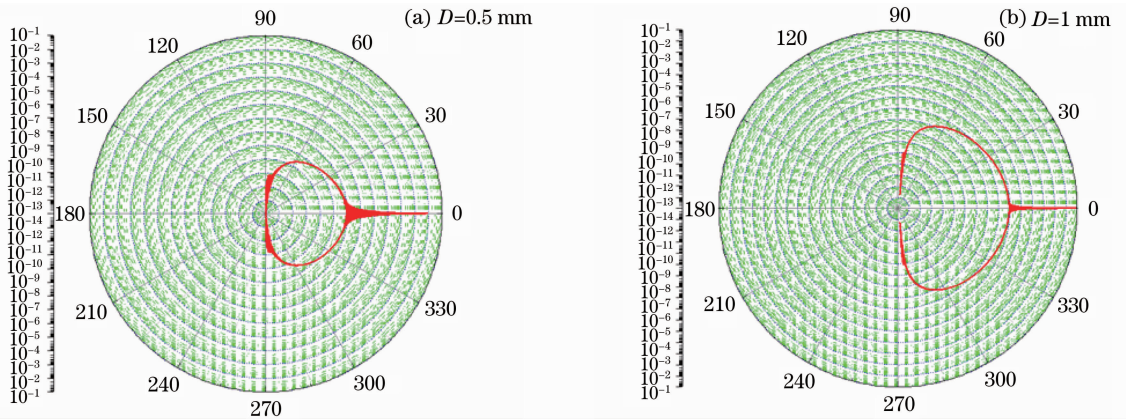


图 2 雨滴角散射截面

Fig. 2 Light scattering section of the raindrop

3 降雨衰减的数值计算及分析

激光的传输衰减特性与激光波长和气候条件有关。激光光束在降雨条件下传播时的衰减率,由吸收和散射两部分组成。吸收损耗随波长而发生变化,散射不引起激光光束能量的损耗,但会改变激光光束能量原来的空间分布,使原来传播方向上的激光光束能量的衰减。本文分别对可见光波段的 532 nm 绿激光和近红外波段的 1064 nm 激光进行降雨衰减的分析计算。

水的吸收作用与某一波长下水的复折射率虚部有关,当复折射率虚部很小时,吸收作用不显著。由于液态水在 532 nm 波长下的复折射率虚部为 1.32×10^{-9} ,水对绿激光光束的吸收近似为零,因此雨滴对 532 nm 波长的激光只存在散射作用,总衰减只由散射决定。而 1064 nm 激光对水的复折射率虚部相对较大,会存在相应的吸收率,因此雨滴对 1064 nm 激光

的衰减要同时考虑散射和吸收。由之前的分析可知,雨滴对激光的散射衰减系数为

$$\gamma(\lambda) = \int [\sigma_d(D) + \sigma_a(D)]N(D)dD. \quad (17)$$

将(5),(7),(15)式代入(17)式,得到雨滴对激光的散射衰减系数,编程计算波长为 532 nm 和 1064 nm 的激光在不同降雨状况下的散射系数和吸收系数,数值由表 1 和表 2 给出。表 1 中的散射系数也即 532 nm 绿激光光束在降雨中的衰减系数,表 2 中列出了 1064 nm 激光在不同降雨状况下的吸收系数和衰减系数。通过表 1 和表 2 可知,雨滴对激光光束的散射系数随波长变化微小,但随着降雨量的增大而增大;在 1064 nm 激光的降雨衰减中,吸收损耗高于散射,雨滴对光束的吸收作用明显,而且吸收系数随着降雨强度的增大而增加。

表 1 532 nm 激光的散射衰减系数

Table 1 Scattering coefficients of 532 nm laser

Rainfall	Precipitation /(mm/h)	Scattering coefficient /m ⁻¹	Absorption coefficient /m ⁻¹
Light rain	5.00	4.588×10^{-4}	1.4692×10^{-8}
Moderate rain	12.5	8.615×10^{-4}	3.0847×10^{-8}
Heavy rain	25.0	1.39×10^{-3}	5.3776×10^{-8}
Rainstorm	100	3.61×10^{-3}	1.6113×10^{-7}

表 2 1064 nm 激光的衰减系数

Table 2 Attenuation coefficients of 1064 nm laser

Rainfall	Precipitation /(mm/h)	Scattering coefficient /m ⁻¹	Absorption coefficient /m ⁻¹	Attenuation coefficient /m ⁻¹
Light rain	5.00	4.600×10^{-4}	0.0052	0.0057
Moderate rain	12.5	8.634×10^{-4}	0.0108	0.0117
Heavy rain	25.0	0.00142	0.0189	0.0204
Rainstorm	100	0.00366	0.0558	0.0596

图 3 为 532 nm 和 1064 nm 激光光束在传输距离为 100 m [图 3(a)] 和 200 m [图 3(b)] 时不同降雨量下透射率的数值计算曲线。从图中可知, 两波长激光的透射率都随着降雨量的增强和传输距离的增大而降低, 但相对而言 532 nm 激光光束仍有很高的透射率, 原因在于该波长的激光只存在散射衰减而没有吸收损耗。激光光束传输距离为 100 m 时, 532 nm 激光在不同降雨量下的透射率都在 96% 以上, 而 1064 nm 激光的透射率随着降雨量的增大而

减小, 由小雨中的 95% 以上, 降低至 60% 左右; 当传输距离增至 200 m 时, 532 nm 激光的透射率最低可达 80%, 1064 nm 激光光束的传输衰减显著增大, 在小雨中的透射率为 80%, 降雨强度增大后, 透射率迅速降低, 中雨中的穿透系数就已减小到 20%, 大到暴雨时的透射近似为零, 这是由于降雨强度增大后吸收作用比较严重, 导致激光穿透能力下降, 传输距离减小。

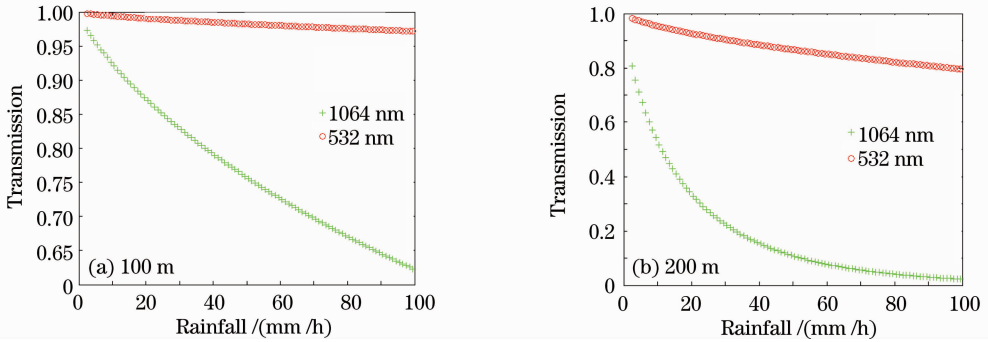


图 3 激光在不同降雨量时的透射率

Fig. 3 Transmittance of laser in the different rainfall rates

4 雨滴衰减的实验测量

(16) 式为某一波长下单个雨滴粒子的衰减系数, 由(16)式可得到具有同一直径 D 的雨滴群的衰减系数为

$$\gamma(D) = \sigma_s(D)n_s(D), \quad (18)$$

式中 $n_s(D)$ 为某一直径 D 的雨滴浓度。通过实验室模拟同一直径雨滴群的激光能量透射率验证这一模型的准确性。利用 Coherent 公司的 PM 系列高灵敏度功率计探头, 配置适当的外围仪器, 使之能测量激光光束穿过雨滴群的透射率。图 4 为雨滴衰减实验测量系统示意图, 并在与光轴线左右各 60° 处放置功率计, 使其测量大角度光散射能量。

发射光源为 Vector 系列的抽运激光器, 发射波

长分别为 1064 nm 和 532 nm, 光束发散角小于 4.5 mrad , 现将发射功率调整为 15 mW , 重复频率 10 kHz ; 探测装置为高灵敏度热敏探头和 LabMax 激光功率能量计表头, 工作波段为 $0.3 \sim 11 \mu\text{m}$, 分辨率小于 $10 \mu\text{W}$, 功率计与激光发射器距离 3 m 。实验中用与雨滴等体积的水球代表雨滴, 采用微细毛细管产生不同直径的水滴, 固定在毛细管的下方, 并将 5 个模拟雨滴按图 4 所示一线排列, 间距 10 mm , 由于毛细管的直径微小, 在测量中可忽略其对激光能量的遮挡作用。两波长激光光束分别通过不同直径雨滴群时的探测功率和原发射功率比值即为透射率。图 5 所示为 1064 nm 和 532 nm 两波长激光通过 5 个不同直径雨滴的透射率计算与测量结果。

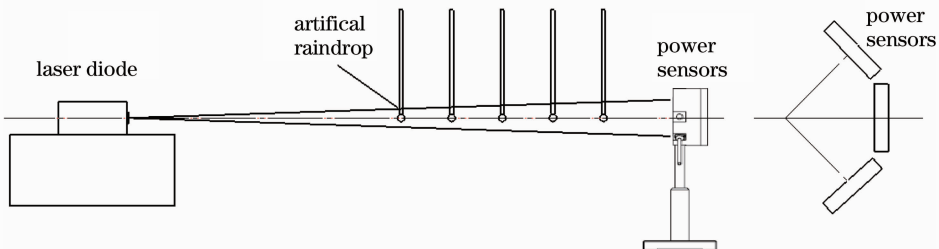


图 4 实验测试装置示意图

Fig. 4 Sketch map of experimental equipments

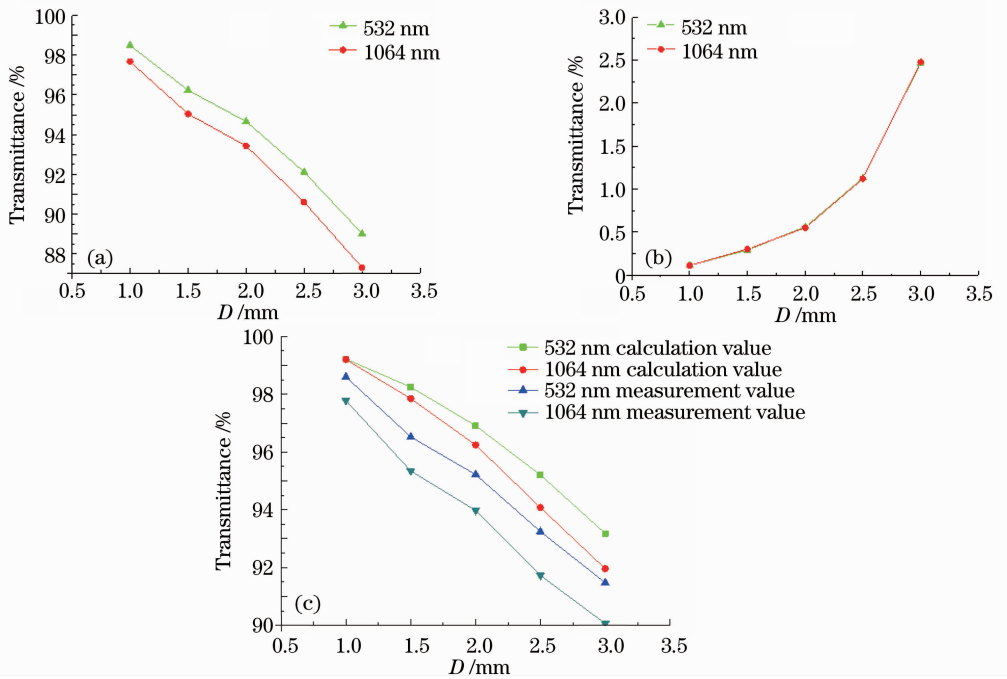


图5 激光能量透射率计算与实测值

Fig. 5 Measurement and calculation transmissivity of the lasers

图5(a)为前向功率计测量的透射率,(b)为光轴线左右对称功率计的透射率,(c)为理论数值与总透射率测量结果,其中理论值为对(18)式进行计算得到的5个雨滴的透射率,与测量值最大误差在2%左右。图中清晰可见,经过雨滴散射后,光能量主要集中在前向一定角度内,大散射角度光能较小;随着雨滴直径的增大,两波长激光的透射率都逐渐减小;不同直径雨滴对激光光束功率的透射率,532 nm绿激光的计算与实测值都高于1064 nm近红外激光。由两波长的理论数值曲线可知,由于模拟雨滴数量少,在小直径下,雨滴对1064 nm激光的吸收不明显,但随着雨滴直径的增大,两波长激光的透射率差逐渐增大,说明532 nm激光由于只存在散射而使衰减低于1064 nm,实测数值也证明了这一点。上述实验结果与理论分析结论一致,证明了雨滴衰减模型的正确性。

5 结 论

以夫琅禾费衍射和几何光学散射理论为基础,建立雨滴对532 nm和1064 nm激光光束的传输衰减模型,以Gamma分布作为雨滴谱分析计算两波长激光在不同降雨量下的衰减特性,并通过实验验证雨滴衰减模型。研究表明,雨滴对532 nm激光的能量吸收近似为零,在光传播过程中,只发生雨滴的散射衰减,并且散射系数随降雨量和传输距离的

增大而增大;而对于1064 nm激光,雨滴对光束的吸收作用明显,因此激光的透射率显著降低,并且随着降雨量和传输距离的增大迅速减小。实验室模拟不同直径的雨滴,测试两种波长的透射率,结果证明了雨滴衰减模型的正确性,532 nm绿激光得到透射率高于1064 nm近红外激光。这为绿激光在降雨环境下探测系统中的应用提供了一定的理论依据。

参 考 文 献

- 1 Yang Pengling, Feng Guobin, Wang Zhenbao *et al.*. Detector array for measuring far-field power density distribution of mid-infrared laser[J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(2): 521~525
杨鹏翎, 冯国斌, 王振宝等. 测量中红外激光远场光斑的光电阵列靶斑仪[J]. *中国激光*, 2010, **37**(2): 521~525
- 2 Yang Ruike, Ma Chunlin, Li Liangchao. Influence of multiple scattering on laser pulse propagation through sand and dust storm [J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(10): 1393~1397
杨瑞科, 马春林, 李良超. 沙尘暴多重散射对激光脉冲传输的影响[J]. *中国激光*, 2007, **34**(10): 1393~1397
- 3 Sun Xianming, Wang Haihua, Liu Wanqiang *et al.*. Nonspherical model for sand dust storm and its application to the research of light multiple scattering[J]. *Acta Optica Sinica*, 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]. *光学学报*, 2010, **30**(5): 1506~1510
- 4 Wu Zhensen, You Jinguang, Yang Ruike. Study on laser attenuation character in sand and dust storms[J]. *Chinese J. Lasers*, 2004, **31**(9): 1075~1080
吴振森, 由金光, 杨瑞科. 激光在沙尘暴中的衰减特性研究[J]. *中国激光*, 2004, **31**(9): 1075~1080
- 5 Wei Heli, Liu Qinghong, Song Fangzheng *et al.*. Extinction of infrared radiation by rain[J]. *J. Infrared Millim. 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
- 6 Wang Mian, Liu Wenqing, Lu Yihuai *et al.*. Study on the measurement of the atmospheric extinction of fog and rain by forward-scattering near infrared spectroscopy[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2008, **28**(8): 1776~1780
王 緬, 刘文清, 陆亦怀等. 基于前向近红外散射光谱测量雾和雨天大气消光的应用研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2008, **28**(8): 1776~1780
- 7 Wang Lili, Ke Xizheng, Xi Xiaoli. Analyze and calculate for laser transmit through rain[J]. *Chinese J. Light Scattering*, 2005, **17**(2): 148~153
王丽黎, 柯熙政, 席晓莉. 激光在雨中传输的分析与计算[J]. 光散射学报, 2005, **17**(2): 148~153
- 8 Ke Xizheng, Yang Lihong, Ma Dongdong. Transmitted attenuation of laser signal in rain [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2008, **37**(6): 1021~1024
柯熙政, 杨利红, 马冬冬. 激光信号在雨中的传输衰减[J]. 红外与激光工程, 2008, **37**(6): 1021~1024
- 9 T. S. Chu, D. C. Hogg. Effects of precipitation on propagation at 0.63, 3.5, and 10.6 microns[J]. *Bell Syst. Tech. J.*, 1968, **47**(5): 723~759
- 10 H. Vasseur, C. J. Gibbins. Prediction of apparent extinction for optical transmission through rain [J]. *Appl. Opt.*, 1996, **35**(36): 7144~7150
- 11 Deng Fanglin, Zhang Yifei, Yang Hui. Research on ranging performance of ballistic missile's laser fuze [J]. *J. System Simulation*, 2005, **17**(6): 1476~1479
邓方林, 张翼飞, 杨 辉. 弹道导弹激光引信测距性能研究[J]. 系统仿真学报, 2005, **17**(6): 1476~1479
- 12 J. S. Marshall, W. M. Palmer. The distribution of raindrops with size[J]. *Meteor.*, 1948, **5**(4): 165~166
- 13 C. W. Ulbrich. Natural variations in the analytical form of the raindrop size distribution [J]. *Climate Appl. Meteor.*, 1983, **22**(10): 1764~1775
- 14 Zheng Jiaoheng, Chen Baojun. Comparative study of exponential and gamma function fits to observed raindrop size distribution [J]. *Scientia Meteorologica Sinica*, 2007, **27**(1): 17~24
郑娇恒, 陈宝君. 雨滴谱分布函数的选择: M-P 和 Gamma 分布的对比研究[J]. 气象科学, 2007, **27**(1): 17~24
- 15 Zhao Zhenwei. Raindrop size distribution model and prediction of rain attenuation in Guangzhou[J]. *Chinese J. 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
- 16 Shao Litang, Wang Shimin, Tang Guanghua *et al.*. Influence of particle Mie scattering on differential optical absorption spectroscopy[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(3): 594~601
邵理堂, 王式民, 汤光华等. 颗粒物 Mie 散射对差分吸收光谱技术的影响[J]. 光学学报, 2009, **29**(3): 594~601
- 17 W. J. Wiscombe. Improved Mie scattering algorithms [J]. *Appl. Opt.*, 1980, **19**(9): 1505~1509
- 18 Xu Qiyang, Yang Kuntao, Wang Xinbing *et al.*. Blue-Green Lidar Ocean Survey [M]. Beijing: Defense Industry Publishing, 2007
徐敬阳, 杨坤涛, 王新兵等. 蓝绿激光雷达海洋探测[M]. 北京: 国防工业出版社, 2007
- 19 Volkon, N. G. Kovach, V. Yu. Light scattering by spherically symmetric heterogeneous aerosol particles[J]. *Izv. Akad. Nauk SSSR Fiz. Atmos.*, 1990, **26**(5): 517~523
- 20 Van De Hulst H. C. Light Scattering by Small Particles [M]. New York: Wiley, 1957
- 21 Oliver N. Ross, Stuart G. Bradley. Model for optical forward scattering by nonspherical raindrops [J]. *Appl. Opt.*, 2002, **41**(24): 5130~5141