

文章编号 1004-924X(2013)04-0864-06

## 水雾对激光引信的衰减

沈 娜<sup>1\*</sup>, 张祥金<sup>2</sup>, 郭 婧<sup>2</sup>

(1. 南京理工大学 瞬态物理国家重点实验室, 江苏 南京 210094;

2. 南京理工大学 机械学院, 江苏 南京 210094)

**摘要:** 由于水雾会使激光信号产生严重的衰减, 从而影响激光引信探测的应用, 本文着重研究了绿激光在水雾中传输的衰减特性。首先, 基于 Mie 散射理论, 建立了水雾对 0.532  $\mu\text{m}$  绿激光光束的传输衰减模型; 然后, 通过仿真计算, 对比分析了激光在不同能见度水雾下的衰减特性; 最后, 通过水雾模拟实验验证了衰减模型的准确性。理论分析和实验结果表明, 激光光束的衰减明显受水雾能见度的影响, 并随着能见度的降低而增大; 0.532  $\mu\text{m}$  激光在水雾中的穿透率较高, 能见度在 50 m 时可以达到 60% 以上。实验测得的光能量的透射值与计算值基本一致, 最大误差在 4% 左右, 证明了水雾衰减模型的正确性。得到的结果为绿激光在水雾环境下的目标探测系统中的应用提供了理论和实验依据。

**关键词:** 激光探测; 激光引信; 水雾衰减; 雾滴散射; 蓝绿激光

**中图分类号:** TJ430 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20132104.0864

## Attenuation of laser fuse through fog

SHEN Na<sup>1\*</sup>, ZHANG Xiang-jin<sup>2</sup>, GUO Jing<sup>2</sup>

(1. National Key Laboratory of Instant Physics, Nanjing University of Science and Technology,

Nanjing 210094, China; 2. College of Mechanical Engineering,

Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

\* Corresponding author, E-mail: snbox@163.com

**Abstract:** The serious attenuation of laser signals caused by fog will take some influences on the laser fuse detection. Therefore, this paper focuses on the attenuation characteristics of a green laser in the fog. On the basis of Mie scattering theory, an attenuation model of laser radiation by the fog at 0.532  $\mu\text{m}$  is established, and the attenuation characteristics of the laser at different visibilities are contrasted and analyzed by simulation and calculation. Then, the veracity of attenuation model is validated by a simulated fog experiment. Theory analysis and experimental results indicate that the laser beam is dependent on the visibilities in the fog, and it increases with decreasing visibilities. The laser at 0.532  $\mu\text{m}$  has a stronger transmittance in the fog and it can be above 60% at a visibility of 50 m. Furthermore, the light transmission values measured in the experiment are basically consistent with calculated ones and the maximum error between them is about 4%, which proves the correctness of the attenuation model of laser radiation at 0.532  $\mu\text{m}$ . The study provides theoretical basis for the green laser ap-

收稿日期: 2012-10-30; 修订日期: 2012-12-12.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No. 60908037)

plication in a detection system worked in the fog.

**Key words:** laser detection; laser fuse; fog attenuation; fog drop scattering; blue green laser

## 1 引言

激光引信具有测距精度高、抗电磁干扰能力强、可与红外或雷达等构成复合引信,且体积小、重量轻等优点,现已广泛装备到空空导弹和反坦克导弹上。激光近炸引信的使用环境恶劣,激光光束在降雨、沙尘暴、云、雾等环境介质中传播时会受到不同程度衰减,使系统性能下降,严重时甚至会造成引信失效<sup>[1]</sup>。因此,有必要开展苛刻气候条件对激光能量的衰减研究,为引信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。

目前,近地激光探测通讯系统普遍工作在红外、近红外波段,所以国内学者对红外光波在云雾介质中的传输特性做了大量的理论和实验研究。臧永强<sup>[2]</sup>等根据含水量和能见度的经验公式,得到平流雾和辐射雾的雾滴尺寸分布与能见度的关系式,结合雾的尺度分布函数广义 Gamma 模型,建立了雾对 1.064  $\mu\text{m}$  激光的信号衰减公式。孙超<sup>[3]</sup>等计算并分析了 1.06  $\mu\text{m}$  和 10.6  $\mu\text{m}$  波长激光在辐射雾和平流雾中衰减率随能见度的变化,以及透射率随传输距离的变化,证明了 10.6  $\mu\text{m}$  激光在平流雾中的衰减率大于在辐射雾中的衰减率;波长较短激光在平流雾中的透射性能更好,波长较长的激光在辐射雾中的透射性能更好。马冬冬<sup>[4]</sup>等利用双频相关函数求解雾对 10.6  $\mu\text{m}$  激光数字信号传输的幅频和相频函数以及双频互相关函数的影响,并结合雾对激光影响的散射理论得出了脉冲的起伏特征,模拟出不同能见度下激光脉冲的展宽,结果表明雾的能见度对脉冲展宽具有明显的影响。刘伟超<sup>[5]</sup>等利用 Modtran 大气辐射传输模型分析了大气环境对 1.06  $\mu\text{m}$  激光透过特性的影响,证明了 1.06  $\mu\text{m}$  激光的透过率随水平能见度的减小呈明显的下降趋势。

大量研究表明,红外波段光束的雾场透射率远低于蓝绿波段,因此对于需要在恶劣气候条件下开展长距离通讯工作和近地精确探测工作的场合,如航空航天、军事、勘测、安保等,蓝绿激光的应用前景更广阔。然而近地雾中探测通讯技术的

研究相对滞后,阻碍了蓝绿激光在近地探测通讯装备上的应用,其根本原因是缺乏能够准确描述蓝绿激光在雾中传输的理论模型。

本论文基于 Mie 散射理论,建立了雾对 0.532  $\mu\text{m}$  绿激光光束的传输衰减模型,对其衰减特性进行了数值计算和分析,并通过实验验证了衰减模型的准确性。

## 2 雾的物理特性及雾滴谱

雾是由悬浮在近地面空气中缓慢沉降的水滴或冰晶质点组成的一种胶体系统。根据雾形成的地域和机理,可把雾分成两大类:平流雾和辐射雾,海雾通常为平流雾,而内陆雾通常为辐射雾。观测表明,雾滴由于表面张力的作用,基本上都是球状,雾滴半径通常在 1~60  $\mu\text{m}$ 。温度为正时大多数雾滴半径为 7~15  $\mu\text{m}$ ,温度为负时为 2~5  $\mu\text{m}$ <sup>[6]</sup>。在浓雾中,当能见度小于 50 m 时,雾滴的半径可达 20~30  $\mu\text{m}$ ;当能见度大于 100 m 时,雾滴的平均半径大多小于 8  $\mu\text{m}$ 。

雾滴尺寸分布的描述有许多经验公式,其中应用最广的是具有两参数的 Gamma 分布模型<sup>[7]</sup>:

$$n(r) = ar^2 \exp(-br), \quad (1)$$

式中: $n(r)$  为单位体积、单位半径间隔内的雾滴数, $r$  为雾滴半径, $a$  和  $b$  为确定雾滴谱形状的参数。如果  $r$  以 m 为单位,有:

$$a = \frac{9.781}{V^6 W^5} 10^{15}, \quad (2)$$

$$b = \frac{1.304}{VW} 10^4, \quad (3)$$

式中: $V$  为雾的能见度(km), $W$  为含水量( $\text{g}/\text{m}^3$ )。含水量  $W$  和能见度  $V$  关系的经验公式为<sup>[8]</sup>:

$$W_{\text{advection fog}} = (18.35V)^{-1.43} = 0.0156V^{-1.43}, \quad (4)$$

$$W_{\text{radiation fog}} = (42.00V)^{-1.54} = 0.00316V^{-1.54}. \quad (5)$$

实验地点南京位于我国内陆,属于辐射雾类型,根据式(1)~(5)可得到不同能见度下的雾滴谱分布公式,为<sup>[9]</sup>:

$$n(r) = 9.781V^{1.7} r^2 \times \exp(4.13 \times 10^6 V^{0.54} r). \quad (6)$$

### 3 雾滴散射及传输衰减模型

雾粒子的吸收作用高于大气分子的散射,但比雾粒子散射作用至少要小一个数量级。因此在研究激光与云雾的相互作用时,主要考虑雾粒子对激光的散射作用。散射不能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,原来传播方向上激光光束的能量会衰减。

由于雾粒子半径  $r$  和激光波长  $\lambda$  满足  $\alpha = 2\pi r/\lambda > 6$  这个条件,所以用 Mie 散射理论来计算雾滴对激光的散射作用。

#### 3.1 Mie 散射

Mie 理论是描述球形颗粒光散射的严格理论,它只需假定颗粒材料是光学均匀且各向同性

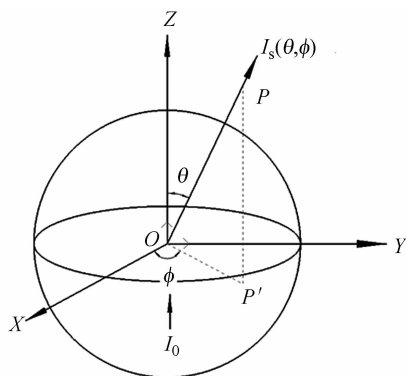


图 1 Mie 光散射几何示意图

Fig. 1 Sketch map of Mie scattering

的,就可以由 Maxwell 方程组及边界条件推导而出。散射体的光散射特性可用角散射截面  $\sigma_p(\theta, \varphi)$  表示,它定义为入射光被粒子作用的一个截面,投射到这个截面上的入射光能量等于在这个粒子的作用下向  $\theta$  方向单位立体角中所散射的光能量。设入射光光强为  $I_0$ ,沿  $Z$  轴传播,电场矢量沿  $X$  轴振动。散射体位于坐标原点  $O$ ,  $P$  为观察点,如图 1 所示。散射光与入射光之间的夹角  $\theta$  称为散射角,而  $X$  轴与  $OP$  在  $XY$  平面上的投影线  $OP'$  之间的夹角  $\varphi$  称为偏振角。于是,与散射体相距  $r$ 、位于  $P$  点处的散射光强  $I_s$  表示为<sup>[10]</sup>:

$$I_s(\theta, \varphi) = \frac{I_0}{r^2} \sigma_p(\theta, \varphi), \quad (7)$$

$$\sigma_p(\theta, \varphi) = \frac{\lambda^2}{4\pi^2} [i_1 \sin^2 \varphi + i_2 \cos^2 \varphi], \quad (8)$$

其中:  $i_1, i_2$  分别为散射光强角度互相垂直的两个偏振方向上的 Mie 强度函数,这两个函数是 Mie 理论的精髓,它们和粒子尺度参数  $\alpha$ , 折射率  $m$  以及散射角  $\theta$  有关。对式(8)在空间  $4\pi$  立体角内积分,可得到粒子的总散射截面:

$$\sigma_p(\lambda, r) = \int_0^{4\pi} \sigma_p(\theta) d\omega = \int_0^{4\pi} \frac{\lambda^2}{4\pi^2} [i_1 \sin^2 \varphi + i_2 \cos^2 \varphi] d\omega. \quad (9)$$

#### 3.2 雾衰减系数

一束波长为  $\lambda$  的平行激光光束入射到空间均匀分布的悬浮雾滴,入射光功率为  $P_\lambda(0)$ ,激光在雾中的传播距离为  $x$ ,经雾滴散射衰减后的光功率为  $P_\lambda(x)$ 。根据 Bouguer-Lambert 指数衰减定律,衰减前后的光功率存在如下的关系:

$$\tau = \frac{P_\lambda(x)}{P_\lambda(0)} = \exp[-\alpha(\lambda)x], \quad (10)$$

其中:  $\alpha(\lambda)$  是单位体积下雾滴粒子的衰减系数,可由下式表示:

$$\alpha(\lambda) = \int \sigma_p(\lambda, r) n(r) dr. \quad (11)$$

### 4 测量实验与结果

Mie 散射光强在不同  $\theta$  方向的分布是不一样的,为了分析 Mie 散射光强随散射角  $\theta$  的变化,引入散射相函数  $P(\theta)$ 。散射相函数  $P(\theta)$  定义为光在某个方向单位立体角的散射能量与所有方向单位立体角的平均散射能量的比值:

$$P(\theta) = \frac{\sigma_p(\theta)}{\sigma_p/4\pi} = \frac{i_1 + i_2}{\sum_{m=1}^{\infty} (2m+1)(|a_m|^2 + |b_m|^2)}. \quad (12)$$

利用 Matlab 软件计算出  $0.532 \mu\text{m}$  波长光束照射不同尺寸的水滴时其散射相函数  $P(\theta)$  随散射角  $\theta$  的相对变化,从而可进一步分析粒子的光散射特性。

实验用工作站的硬件配置为:双核 Intel(R) Pentium(R)4CPU 3.20 GHz 处理器;3.21 GHz 4 GB 内存。仿真条件为:水滴对红外激光的复折射率为  $n_2 = 1.327 - 2.89 \times 10^{-6}i$ ,选取尺度参数  $\alpha$

=10 和 100。分别绘制出散射相函数  $P(\theta)$  的变化曲线,如图 2,3 所示。

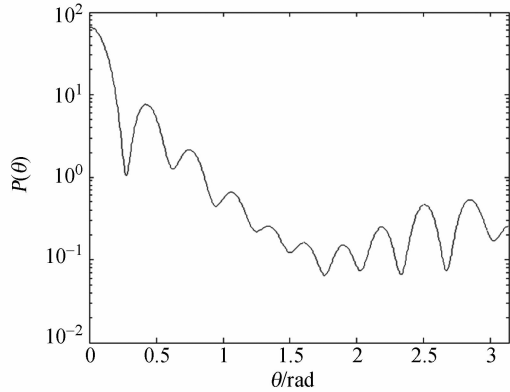


图 2  $\alpha=10$  时散射相函数  $P(\theta)$  曲线

Fig.2 Curve of scattering phase function at  $\alpha=10$

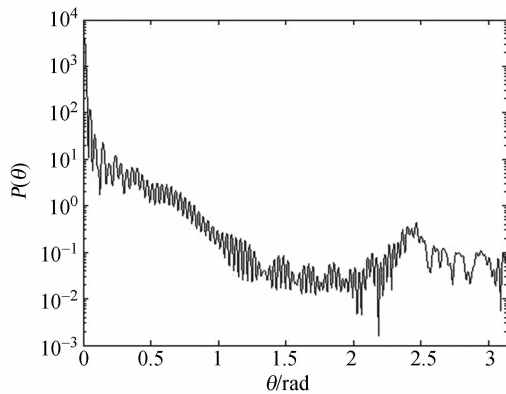


图 3  $\alpha=100$  时散射相函数  $P(\theta)$  曲线

Fig.3 Curve of scattering phase function at  $\alpha=100$

由图可见,当尺度参数  $\alpha=10$  时,散射光强主要集中在到前向一较小角度范围内,而后向散射小。散射相函数  $P(\theta)$  的分布随散射角  $\theta$  的变化呈振荡现象,出现一些极大值和极小值,  $P(\theta)$  的最小值在  $\theta=1.8$  处附近;当  $\alpha$  增大至 100 时,散射图像变得更加复杂,  $P(\theta)$  振荡得更激烈,前向散射分布的角度更窄,  $P(\theta)$  变大,而后向散射则有所减小,其余角度范围内虽有散射光强分布,但能量非常小。

根据公式(6)、(9)和(11)编程计算波长  $0.532 \mu\text{m}$  激光在不同能见度辐射雾下的散射系数,结果如表 1 所示。由表可见,激光光束的衰减受水雾能见度的影响明显,且随能见度的降低而增大。

表 1  $0.532 \mu\text{m}$  激光的散射系数

Tab.1 Scattering coefficients of  $0.532 \mu\text{m}$  laser

Visibility /m	Scattering coefficient/ $\text{m}^{-1}$	Visibility /m	Scattering coefficient/ $\text{m}^{-1}$
10	0.138	70	0.034
20	0.116	100	0.017
30	0.096	150	$8.71 \times 10^{-3}$
50	0.067	200	$5.36 \times 10^{-3}$

通过实验室模拟不同能见度水雾的激光能量透过率来验证理论模型的准确性。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来测量激光光束穿过水雾的透过率。图 4 为水雾衰减实验测量场景图。

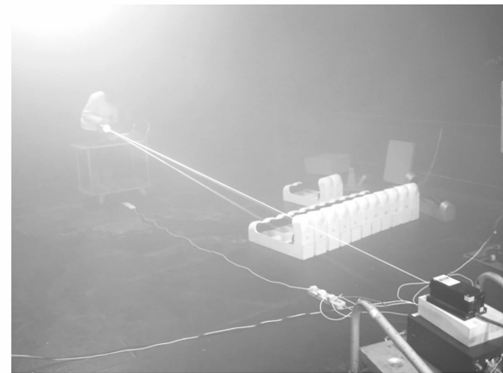


图 4 水雾衰减实验环境

Fig.4 Experimental condition of fog attenuation

发射光源为 Vector 系列的泵浦激光器,发射波长为  $0.532 \mu\text{m}$ ,光束发散角  $< 4.5 \text{ mrad}$ ,其发射功率被调整为  $15 \text{ mW}$ ,重复频率为  $10 \text{ kHz}$ ;探测装置为高灵敏度热敏探头和 LabMax 激光功率能量计,工作波段为  $0.3 \sim 11 \mu\text{m}$ ,分辨率  $< 10 \mu\text{W}$ ,功率计与激光发射器距离  $5 \text{ m}$ 。实验在云雾实验室中进行,采用水雾发生装置产生一定浓度的水雾,以测量不同浓度下的激光穿透功率。实验室有专用仪器,可以记录不同时刻的水雾能见度。图 5 为  $0.532 \mu\text{m}$  激光在不同能见度下激光透过率的计算与测量结果。其中,理论值由式(10)~(11)计算得到。

图中清晰可见,测量值与计算值基本一致,最大误差在 4% 左右。在能见度很低的时候,激光的透过率极低,在 10% 以下;随着能见度的增大,水雾的衰减减小,激光透过率呈线性增加;当能见

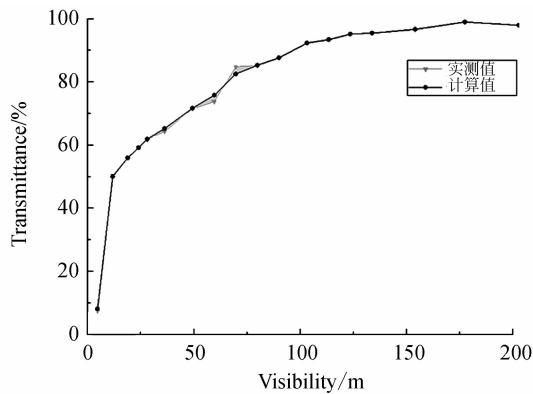


图 5 不同能见度下的激光透射率计算与测量结果  
Fig. 5 Laser transmittances of calculation and test at different visibilities

度达到 200 m 时,激光的能量衰减就非常小了。由此可知,实验结果与理论分析结论一致,证明了水雾衰减模型的正确性。

#### 参考文献:

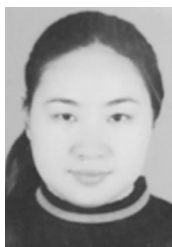
- [1] 宋雪平,刘锋,覃一凡. 云雾多次散射对激光散射信号生成的影响[J]. 红外与激光工程,2007,36(z1): 432-435.  
SONG X P, LIU F, QIN Y F. Influence of multi-scattering of cloud to making laser scattering signal [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2007, 36 (z1):432-435. (in Chinese)
- [2] 臧永强,王仕成,刘志国,等. 1.064  $\mu\text{m}$  激光制导半实物仿真大气衰减模型研究[J]. 电光与控制, 2012,19(9): 17-22.  
ZANG Y Q, WANG SH CH, LIU ZH G, *et al.*. On atmospheric attenuating model in HWIL simulation of 1.064  $\mu\text{m}$  laser guided weapons [J]. *Electronics Optics & Control*, 2012,19(9): 17-22. (in Chinese)
- [3] 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.  
SUN CH, 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. (in Chinese)
- [4] 马冬冬,刘宗福,金虎. 雾对 10.6  $\mu\text{m}$  激光数字信号传输影响研究[J]. 舰船电子对抗,2011,34(1):55-57,98.  
MA D D, LIU Z F, JIN H. Research into the influence of fog on the transmission of 10.6  $\mu\text{m}$  laser digital signal [J]. *Shipboard Electronic Countermeasure*, 2011,34(1):55-57,98. (in Chinese)
- [5] 刘伟超,齐琳琳,何宏让,等. 1.06  $\mu\text{m}$  激光大气透过特性的数值计算研究[J]. 激光与红外,2011,41(5):520-524.  
LIU W CH, QI L L, HE H R, *et al.*. Numerical study on atmospheric transmission of 1.06  $\mu\text{m}$  laser [J]. *Laser & Infrared*, 2011,41(5):520-524. (in Chinese)
- [6] 赵振维,吴振森. 确定雾滴谱的方法和雾的红外辐射衰减特性[J]. 西安电子科技大学学报(自然科学版), 2002,29(2):253-256.  
ZHAO ZH W, WU ZH S. Method for determining fog drop size distribution and fog attenuation at infrared wavelength [J]. *Journal of XIDIAN University (Natural Science)*, 2002, 29 (2): 253-256. (in Chinese)
- [7] 赵振维,林乐科,董庆生,等. 雾的雷达后向散射特性研究[J]. 电波科学学报, 2001,16(4):498-502.  
ZHAO ZH W, LIN L K, DONG Q SH, *et al.*. Radar backscattering characteristics of fog [J]. *Chinese Journal of Radio Science*, 2001, 16 (4): 498-502. (in Chinese)
- [8] LPPOLITO L J. Propagation effects handbook for satellite system design [R]. *NASA Reference Publication*, 1989.

## 5 结 论

本文以经典的 Mie 散射理论为基础,建立了水雾对 0.532  $\mu\text{m}$  激光光束的传输衰减模型。结合我国内陆雾类型给出了雾滴的 Gamma 分布模型,计算了不同能见度下的水雾衰减系数,并通过实验验证了衰减模型。研究表明,激光光束的衰减受水雾的能见度影响明显,随着能见度的降低而增大。与其它波长范围内的激光相比,0.532  $\mu\text{m}$  激光在水雾中的穿透率较高,能见度在 50 m 时可以达到 60% 以上。在模拟水雾实验中,激光能量透射率的测量值与计算值基本一致,最大误差在 4% 左右,结果证明了水雾衰减模型的正确性,为蓝绿激光在水雾环境下探测系统中的应用提供了理论依据。

- [9] 葛琦. 水雾的近、中红外消光性能研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2004.  
GE Q. *The Extinction Characters of Fog at Near and Middle Infrared* [D]. Wuhan: Wuhan University, 2004. (in Chinese)
- [10] 郭婧, 张合, 王晓锋. 雨滴对  $0.532\ \mu\text{m}$  激光光束的衰减特性[J]. 兵工学报, 2011, 32(7): 15-20.  
GUO J, ZHANG H, WANG X F. Attenuation of  $0.532\ \mu\text{m}$  laser beam through raindrops [J]. *Acta Armamentarii*, 2011, 32(7): 15-20. (in Chinese)

## 作者简介:



沈娜(1979—),女,江苏常州人,博士,助理研究员,2004年,2007年于南京理工大学分别获得硕士、博士学位,主要从事探测制导与控制方面的研究。E-mail: snbox@163.com



郭婧(1984—),女,吉林长春人,博士研究生,2007年于南京理工大学获得学士学位,主要从事引信智能化与灵巧化设计等方面的研究。E-mail: sandyguo 0826@163.com



张祥金(1970—),男,安徽和县人,博士,助理研究员,1993年于西安理工大学获得学士学位,2007年于南京理工大学获得博士学位,主要从事目标探测与识别方面的研究。E-mail: z\_x\_j888@163.com

(版权所有 未经许可 不得转载)