

## 云雾后向散射激光回波特性研究

王凤杰,陈慧敏,马 超,龙胤宇

(北京理工大学 机电动态控制重点实验室,北京 100081)

**摘 要:**气溶胶后向散射激光回波在气溶胶内部的散射特性对其波形特征有着重要影响。为获取气溶胶后向散射激光回波的散射特性,文中以云雾为研究对象,建立激光云雾传输模型,仿真云雾后向散射激光回波在云雾内部的多次散射过程,统计不同云雾质量浓度和云雾距离条件下的激光回波的散射次数和传输时间,得到激光回波的散射次数范围和同次散射回波特征,以及云雾质量浓度和云雾距离对散射次数的影响规律。文中研究结果可为分析气溶胶后向散射激光回波特征提供重要支撑。

**关键词:**气溶胶; 云雾; 后向散射激光回波; Monte Carlo; 散射次数

**中图分类号:** TN249 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201847.0506002

## Research on the characteristics of fog backscattering laser echo

Wang Fengjie, Chen Huimin, Ma Chao, Long Yinyu

(Science and Technology on Electromechanical Dynamic Control Laboratory,  
Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

**Abstract:** The scattering characteristics of aerosol backscattering laser echo in aerosol has important influence on the waveform characteristics. In order to obtain the scattering characteristics of aerosol backscattering laser echo, we took fog as the research subject, and simulated the multiple scattering process of backscattering signal in fog by using the model of laser propagation in fog, and calculated the scattering times and propagation time under different fog mass concentrations and fog distances, and analyzed the range of scattering times, the features of same-scattering times echo, and the influence of fog mass concentration and fog distance on the scattering times. The results of this paper can provide an important support for the analysis of the characteristics of aerosol backscattering laser echo.

**Key words:** aerosol; fog; backscattering laser echo; Monte Carlo; scattering times

收稿日期:2017-12-08; 修订日期:2018-01-10

基金项目:国家自然科学基金委员会与中国工程物理研究院联合基金(U1630131); 上海航天科技创新基金(sast2017-074)

作者简介:王凤杰(1989-),男,博士生,主要从事气溶胶传输特性方面的研究。Email: bitwfj@163.com

导师简介:陈慧敏(1973-),男,副教授,博士,主要从事激光探测与目标识别方面的研究。Email: laserchm@126.com

## 0 引言

激光引信凭借其优越性能在精确制导弹药中得到了广泛应用,但是激光引信容易受到气溶胶的干扰,导致探测性能下降<sup>[1-2]</sup>,如何提高气溶胶干扰环境下的探测性能,是激光引信亟待解决的重要问题。针对这一问题,研究人员提出了超窄脉冲探测技术<sup>[3-4]</sup>、边沿检测技术<sup>[5]</sup>、偏振探测技术<sup>[6-8]</sup>、双色激光探测技术<sup>[1,9]</sup>、激光与无线电复合探测技术<sup>[10]</sup>等多种解决思路。其中,超窄脉冲探测技术、边沿检测技术和偏振探测技术均是利用气溶胶后向散射回波与硬目标反射回波的特征差异来识别和排除杂波干扰。而气溶胶后向散射回波特征与其在气溶胶内部的散射次数等散射特性密切相关,通过研究气溶胶后向散射回波的散射特性,有助于更深入地分析其特征。

因此,文中以云雾为研究对象,建立激光云雾传输模型,仿真分析云雾后向散射激光回波的散射次数等特性。

## 1 仿真模型与仿真方法

### 1.1 仿真模型

文中基于 Mie 散射理论和 Monte-Carlo 方法,建立了激光云雾传输模型,可以模拟激光的发射过程、云雾传输过程和接收过程等。

模拟激光发射过程时,模型根据光子的发射方向和位置,按照时间顺序发射光子,并利用发射光学整形系统对光子传输方向进行调整。发射时刻的光子方向为<sup>[11]</sup>:

$$\begin{cases} u_x = \sin\theta_0 \cos\varphi_0 \\ u_y = \sin\theta_0 \sin\varphi_0 \\ u_z = \cos\theta_0 \end{cases} \quad (1)$$

式中: $\theta_0 = [(\theta'/2) \cdot \zeta_3]$ 为发射方向天顶角, $\theta'$ 为激光发射束散角, $\zeta_3$ 为标准正态分布随机数; $\varphi_0 = 2\pi \cdot \zeta_4$ 为发射方向方位角, $\zeta_4$ 为区间[0,1]上的均匀分布随机数。发射时刻光子的位置为:

$$\begin{cases} x = \omega_0 \zeta_1 \\ y = \omega_0 \zeta_2 \\ z = 0 \end{cases} \quad (2)$$

式中: $\omega_0$ 为激光束腰半径; $\zeta_1$ 、 $\zeta_2$ 为标准正态分布随

机数。

模拟激光在云雾中传输过程时,模型根据散射自由程确定光子与云雾粒子两次碰撞之间的移动距离<sup>[2]</sup>:

$$\Delta s = -\frac{\ln\zeta_1}{\mu_t} \quad (3)$$

式中: $\zeta_1$ 为区间[0,1]上均匀分布的随机数; $\mu_t$ 为云雾消光系数。光子与云雾粒子碰撞后的散射方向根据 Mie 散射相函数抽样确定<sup>[12]</sup>:

$$P(\theta) = \frac{|S_1(\theta)|^2 + |S_2(\theta)|^2}{\sum_{n=1}^{\infty} (2n+1) (|a_n|^2 + |b_n|^2)} \quad (4)$$

式中: $a_n$ 、 $b_n$ 为 Mie 散射系数; $S_1(\theta)$ 、 $S_2(\theta)$ 为散射振幅函数。碰撞后的光子权重由单次散射比确定:

$$\omega = \frac{Q_{sca}}{Q_{ext}} \quad (5)$$

式中: $Q_{sca}$ 为粒子散射效率因子; $Q_{ext}$ 为粒子消光效率因子。

模拟激光接收过程时,模型对因云雾后向散射而返回的光子依次判断其能否进入接收光学整形系统,以及经过光学整形后能否进入光电探测器。若两项条件均满足要求,则光子被成功接收,形成回波。云雾后向散射回波光子的传输时间为:

$$t = \frac{L}{c} \quad (6)$$

式中: $L$ 为光子在传输过程中的移动距离; $c$ 为光速。云雾后向散射回波光子的散射次数通过统计光子在传输过程中与云雾粒子的碰撞次数而得到。

### 1.2 仿真方法与条件

利用激光云雾传输模型,仿真多种云雾质量浓度和云雾距离条件下,云雾对冲击信号激光所产生后向散射回波的散射过程,记录所有后向散射光子的散射次数和传输时间,统计得到云雾后向散射激光回波的散射次数分布,以及单次散射回波的时域波形,并分析云雾质量浓度和云雾距离对散射次数的影响。激光云雾传输模型的仿真流程如图 1 所示。

仿真中,激光波长设为 860 nm,激光调制信号设为冲击信号;云雾粒子直径设为 5  $\mu\text{m}$ ,云雾质量浓度设为 0.1、0.4、0.7、1  $\text{g}/\text{m}^3$  四组,云雾与激光探测系统距离设为 0、2、5、8 m 四组,分别用于分析云雾质量浓度和云雾距离对仿真结果的影响。仿真中

的主要参数如表 1 所示。

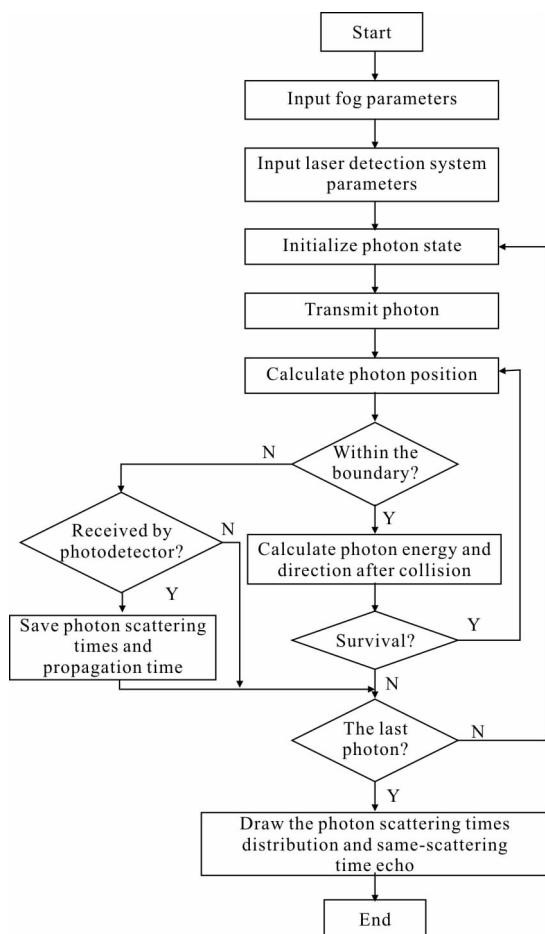


图 1 激光云雾传输模型仿真流程

Fig.1 Simulation flow chart of laser propagation model in fog

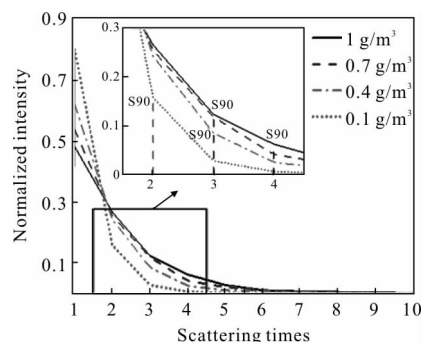
表 1 仿真模型主要参数表

Tab.1 Main parameters of simulation model

Simulation parameters	Value	Simulation parameters	Value
Emission-receiving distance/mm	35	Laser wavelength/nm	860
Laser divergence angle/mrad	5	Laser beam waist radius/mm	0.11
Emission optical lens diameter/mm	12.7	Emission optical lens focal length/mm	50.8
Photodetector diameter/mm	5	Receiving optical lens diameter/mm	25.4
Receiving optical lens focal length/mm	75	Complex index of refraction	$1.33-2.93 \times 10^{-7}i$
Fog particle diameter/ $\mu\text{m}$	5	Fog concentration/ $\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$	0.1, 0.4, 0.7, 1
Fog distance/m	0, 2, 5, 8		

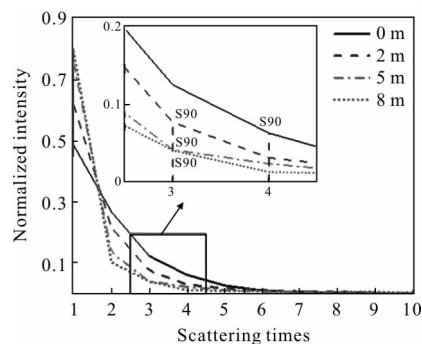
## 2 仿真结果与讨论

图2为云雾后向散射激光回波强度在散射次数上的分布。其中,图2(a)为云雾距激光探测系统0 m,云雾质量浓度分别为0.1、0.4、0.7、1  $\text{g}/\text{m}^3$ 时的分布图;图2(b)为云雾质量浓度为1  $\text{g}/\text{m}^3$ ,云雾距激光探测系统分别为0、2、5、8 m时的分布图;S90为散射次数分布参数,表示回波能量累积到90%时的散射次数。



(a) 不同云雾质量浓度

(a) Various fog mass concentrations



(b) 不同云雾距离

(b) Various fog distances

图 2 云雾后向散射激光回波在散射次数上的强度分布

Fig.2 Intensity distribution of fog backscattering laser echo on the scattering times

图 2(a)中,云雾质量浓度为1  $\text{g}/\text{m}^3$ 时,散射次数分别为1~5次的回波能量占比为48.3%、26.7%、12.4%、6.3%和2.8%,回波能量随散射次数增加呈现明显的衰减趋势,其他云雾质量浓度条件下的结果也呈现相同的趋势;说明任意云雾质量浓度条件下,云雾后向散射激光回波强度在散射次数上均呈现递减分布。云雾质量浓度为0.1、0.4、0.7、1  $\text{g}/\text{m}^3$ 时的参数S90分别为2次、3次、3次和4次,说明任意云雾质量浓度条件下,云雾后向散射激光回波的

散射次数主要集中在 4 次以内。

图 2(b)中,所有云雾距离条件下的回波能量均随散射次数增加呈现衰减趋势,说明任意云雾距离条件下,云雾后向散射激光回波强度在散射次数上均呈现递减分布。云雾距激光探测系统分别为 0、2、5、8 m 时的参数  $S_{90}$  分别为 4 次、3 次、3 次和 3 次,说明任意云雾距离条件下,云雾后向散射激光回波的散射次数主要集中在 4 次以内。

根据云雾后向散射激光回波的散射次数及其能量占比,计算得到平均散射次数,如表 2 所示。

表 2 多种云雾质量浓度和距离条件下的云雾后向散射激光回波平均散射次数

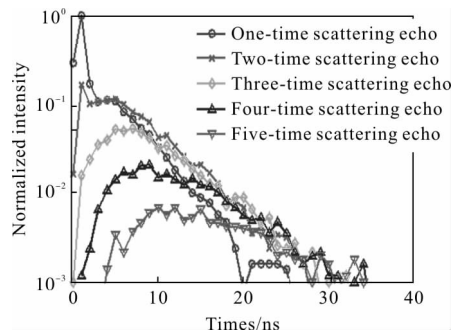
Tab.2 Average scattering times of fog backscattering laser echo under condition of various fog mass concentrations and fog distances

Fog distance/m	Fog mass concentration/ $\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$	Mean of scattering times
0	0.1	1.26
0	0.4	1.63
0	0.7	1.89
0	1	2.09
2	1	1.90
5	1	1.69
8	1	1.67

表 2 中,当云雾距激光探测系统 0 m,云雾质量浓度为  $0.1 \text{ g/m}^3$  时,回波平均散射次数为 1.26 次,当云雾质量浓度分别增大到  $0.4、0.7、1 \text{ g/m}^3$  时,回波平均散射次数相应增加到 1.63 次、1.89 次和 2.09 次,说明云雾后向散射激光回波的总体散射次数与云雾质量浓度呈正相关。当云雾质量浓度为  $1 \text{ g/m}^3$ ,云雾距激光探测系统分别为 0、2、5、8 m 时,回波平均散射次数分别为 2.09 次、1.90 次、1.69 次和 1.67 次,呈现递减趋势,说明云雾后向散射激光回波的总体散射次数与云雾距离呈负相关。

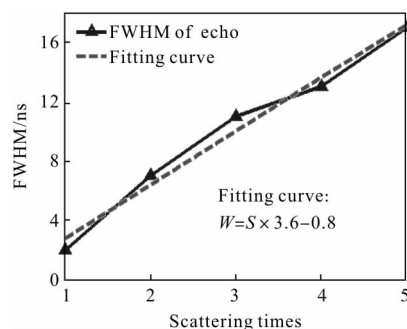
图 3 为云雾质量浓度为  $1 \text{ g/m}^3$ ,云雾距激光探测系统 0 m 时,云雾后向散射激光回波内的同次散射回波的时域波形及其半高宽度 (Full Width Half Maximum, FWHM)。图 3(a)中列出了 1~5 次散射回

波的时域波形,可以看出,所有同次散射回波均为具有一定时间跨度的脉冲信号,说明同次散射回波出现了时域展宽现象。图 3(b)中,散射次数分别为 1~5 次的回波的 FWHM 为 2、7、11、13、17 ns。



(a) 回波波形

(a) Echo waveform



(b) 回波半高宽度与散射次数的关系

(b) Relationship between waveform FWHM and scattering times

图 3 云雾后向散射激光回波内的同次散射回波

Fig.3 Same-scattering times echo in fog backscattering laser echo

上述结果说明,散射次数越多,回波的时域展宽越明显,且回波时域宽度与散射次数上近似呈线性关系,拟合函数为:

$$W = S \times 3.6 - 0.8 \quad (7)$$

式中:  $W$  为回波时域宽度, ns;  $S$  为回波散射次数。

### 3 结论

文中利用激光云雾传输模型,对多种云雾质量浓度和云雾距离条件下的云雾后向散射激光回波的散射次数和同次散射回波特征进行了研究,得出以下结论:云雾后向散射回波的散射次数主要集中在 4 次以内,总体散射次数与云雾质量浓度呈正相关,与云雾距离呈负相关;云雾后向散射激光回波内的同次散射回波在强度和时域展宽方面存在差异,散

射次数越多,回波强度越小,时域展宽越明显。文中研究结果可为分析气溶胶后向散射激光回波特征提供重要支撑。

#### 参考文献:

- [1] Xie Shaoyu, Zhao Yiqiang, Wang Jinhua, et al. Laser fuze anti-surf based on two wavelength detection [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2017, 46(4): 0406005. (in Chinese)  
谢绍禹, 赵毅强, 王金花, 等. 双色探测激光引信抗海浪技术[J]. 红外与激光工程, 2017, 46(4): 0406005.
- [2] Chen Huimin, Liu Yang, Zhu Xiongwei, et al. Simulation of the characteristics of backscattering signals for frequency modulated continuous wave laser fuze [J]. *Acta Armamentarii*, 2015, 36(12): 2247-2253. (in Chinese)  
陈慧敏, 刘洋, 朱雄伟, 等. 调频连续波激光引信回波特性仿真分析[J]. 兵工学报, 2015, 36(12): 2247-2253.
- [3] He Chenglin, Liang Qian. Receive circuit's study of ultra-narrow pulse laser fuze [J]. *Aero Weaponry*, 2013(1): 57-60. (in Chinese)  
何成林, 梁谦. 超窄脉冲激光引信接收机研究 [J]. 航空兵器, 2013(1): 57-60.
- [4] Niu Qingpo, Gao Chong. Research on features of target signal range profile on laser fuze [J]. *Computer Measurement & Control*, 2013, 21(11): 3098-3099. (in Chinese)  
牛青坡, 高宠. 激光引信目标回波距离像特性研究 [J]. 计算机测量与控制, 2013, 21(11): 3098-3099.
- [5] Gao Chong, Liu Jianxin, Zhang Jingguo, et al. Monte-Carlo based backscattering signal of clouds and fogs for laser fuze [J]. *Aero Weaponry*, 2008(3): 50-53. (in Chinese)  
高宠, 刘建新, 张京国, 等. 基于蒙特卡罗法的激光引信云雾回波信号研究[J]. 航空兵器, 2008(3): 50-53.
- [6] Liu Ying, Lv Ning. Analysis on polarization characteristics of cloud and mist backscattering by laser fuze [J]. *Laser & Infrared*, 2015, 45(9): 1028-1033. (in Chinese)  
刘莹, 吕宁. 激光引信云雾后向散射的偏振特性分析[J]. 激光与红外, 2015, 45(9): 1028-1033.
- [7] Meng Xiangsheng. Applications of the polarization detection in laser fuze anti-environmental interference [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42(7): 1716-1719. (in Chinese)  
孟祥盛. 偏振技术在激光引信抗烟雾干扰中的应用分析 [J]. 红外与激光工程, 2013, 42(7): 1716-1719.
- [8] Chen Huimin, Liu Xinyang. Backscattering polarization characteristics of pulsed laser fuze with coaxial optical system with water fog [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2015, 23(3): 626-631. (in Chinese)  
陈慧敏, 刘新阳. 收发同轴脉冲激光引信在水雾中的后向散射偏振特性[J]. 光学精密工程, 2015, 23(3): 626-631.
- [9] Zhang Haojun, Zhao Jianlin. Dual-wave technology used in laser-fuze anti-interfere [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011, 40(6): 1070-1074. (in Chinese)  
张好军, 赵建林. 采用双色技术的激光引信抗干扰技术 [J]. 红外与激光工程, 2011, 40(6): 1070-1074.
- [10] Fu Chun, Pan Xi, Song Chengtian. Frequency modulated continuous wave laser and radio compound detecting technology [J]. *Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology*, 2016, 14(1): 40-45. (in Chinese)  
付春, 潘曦, 宋承天. 调频连续波激光与无线电复合探测技术[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2016, 14(1): 40-45.
- [11] Zhai Chao. Research on laser pulse temporal broadening caused by horizontal atmospheric layer [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2013. (in Chinese)  
翟超. 水平大气信道对激光脉冲时域展宽特性影响研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2013.
- [12] Wang Fengjie, Chen Huimin. Simulation of the characteristics of cloud and fog echo for pulse laser fuze [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2015, 23(10): 1-7. (in Chinese)  
王凤杰, 陈慧敏. 脉冲激光引信云雾回波特性仿真 [J]. 光学精密工程, 2015, 23(10): 1-7.