

文章编号:1001-5078(2023)07-1010-09

· 激光应用技术 ·

## 基于不同材质气溶胶下激光回波特性研究

李 婷, 赵 旭, 李连鹏

(北京信息科技大学 高动态导航技术北京市重点实验室, 北京 100192)

**摘 要:**激光引信易受到气溶胶的干扰,造成引信的虚警,对激光抗气溶胶干扰的研究一直是亟待解决的难题。大气环境中气溶胶的组分是多样的,因此研究不同材质气溶胶的激光回波具有重要意义,而烟雾和云雾是不同材质气溶胶的典型代表。本文基于 Mie 散射理论和蒙特卡罗随机逻辑方法,分别建立了激光烟雾、云雾单次和多次散射模型,对比分析了不同脉冲宽度 10 ns、20 ns 和 50 ns 的光束、不同材质气溶胶烟雾和云雾、不同散射次数的回波特性,得到了不同脉冲宽度激光在不同材质气溶胶下的散射回波规律。仿真结果表明:激光发射脉冲宽度越小和气溶胶能见度越大,目标回波和气溶胶回波的区分效果越好;激光在云雾中的透过率高于烟雾,反射率低于烟雾;激光在烟雾中的衰减度高于云雾。该结论可为研究激光引信在气溶胶环境下后向散射回波特性和提高抗干扰能力提供了研究思路。

**关键词:**激光引信;气溶胶;散射模型;回波;衰减度

**中图分类号:**TJ95;TN249 **文献标识码:**A **DOI:**10.3969/j.issn.1001-5078.2023.07.005

## Study on laser echo characteristics based on aerosol of different materials

LI Ting, ZHAO Xu, LI Lian-peng

(Beijing Key Laboratory of High Dynamic Navigation Technology, Beijing Information Science & Technology University, Beijing 100192, China)

**Abstract:** Laser fuze is susceptible to aerosol interference, which causes false alarm in the fuze. The research of laser anti aerosol interference is always a difficult problem to be solved. The components of aerosols in the atmospheric environment are diverse, so it is of great significance to study the laser echo of aerosols with different materials, and smoke and cloud are typical representatives of aerosols of different materials. In this paper, based on Mie scattering theory and Monte Carlo random logic method, single and multiple scattering models of laser smoke and cloud fog are established respectively. The echo characteristics of laser with different pulse widths of 10 ns, 20 ns and 50 ns, different materials of aerosol smoke and cloud, and different scattering times are compared and analyzed, and the scattering echo law of laser with different pulse widths under different materials of aerosol is obtained. The simulation results show that the smaller the laser emission pulse width and the greater the aerosol visibility, the better the discrimination effect between target echo and aerosol echo; the transmittance of laser in cloud is higher than that of smoke, and the reflectivity is lower than that of smoke; the attenuation degree of laser in smoke is higher than that in cloud particles. This conclusion can provide a research idea for studying the back-scattering echo characteristics of laser fuze in aerosol environment and improving the anti-interference capability.

**Keywords:** laser fuze; aerosol; scattering model; echo; attenuation

**基金项目:**国家重点研发计划项目(No. 2020YFC1511702)资助。

**作者简介:**李 婷(1998-),女,硕士研究生,主要从事激光雷达探测与抗干扰方面的研究。E-mail:2021020454@bistu.edu.cn

**通讯作者:**赵 旭(1988-),男,博士,副研究员,硕士生导师,主要从事激光雷达、制导与控制、仿生机器人方面的研究。

E-mail:zhaoxu@bistu.edu.cn

**收稿日期:**2022-08-12

## 1 引言

随着激光技术的发展,激光引信已广泛应用于军事武器装备中,在战争中发挥着重要作用。随着俄乌冲突的持续推进,我们要深刻认识未来智能化战争的发展趋势<sup>[1]</sup>,高技术武器装备已经使现代战争模式发生了根本性的变化<sup>[2]</sup>,具有抗干扰的高精度激光引信是高技术武器装备重要研究方向之一。战场环境是复杂多变的,往往伴随着多种材质气溶胶的存在。因此,研究不同材质气溶胶的激光散射回波特性具有重要意义。

目前,国内外专家学者已经对气溶胶环境下的激光散射回波方面做了大量研究,主要从发射激光本身特性方面和不同气溶胶环境方面研究分析激光回波特性。

(1) 基于激光自身特性方面。激光可分为脉冲波和连续波,二者的探测性能各有优劣。激光的波长、脉冲激光发射脉宽和发射功率等,都会对回波特性造成影响。宋承天等<sup>[3]</sup>研究了烟尘气溶胶对连续波激光引信消光系数和散射系数的影响,从而分析回波特性;陈鹏等<sup>[4]</sup>在沙尘气溶胶环境下,对调频连续波和脉冲体制探测性能进行了量化对比;李京等<sup>[5]</sup>以不同脉冲宽度的激光信号为主要研究对象,分析云雾气溶胶环境的散射回波功率比,得出了随着脉冲宽度的增加云雾后向散射回波功率明显增加的结论;马超等<sup>[6]</sup>研究了不同波长激光在气溶胶环境下的消光特性和散射特性。

(2) 基于气溶胶环境方面。大气气溶胶有水溶性、沙尘性、煤烟性等,不同材质气溶胶的传输特性、粒径分布、扩散程度等都不同。Banakh 等<sup>[7]</sup>研究了存在湍流情况下激光光束的反射,首次报告了激光雷达回波信号的平均功率的放大效应与折射湍流强度、发射接收孔径等的关系;刘丹丹等<sup>[8]</sup>研究了边界层气溶胶和流层气溶胶在不同介质层传输背景下透过率的影响;Wang 等<sup>[9]</sup>以云雾为研究对象,分析了回波的构造以及云层中颗粒大小参数对回波的影响;Xiao 等<sup>[10]</sup>研究了不同多分散气溶胶环境中的后向散射回波特性;Sun 等<sup>[11]</sup>研究了水云气溶胶多层离散随机介质对激光的多次偏振散射特性;王风杰等<sup>[12]</sup>研究了云雾中有目标和无目标两种场景下的脉冲式激光回波特性规律;包家倩等<sup>[13]</sup>在烟尘散射研究方法中提出了基于 T 矩阵法的散射相函数,分

析了不同烟尘湿度和浓度的情况下对回波特性的影响;陈慧敏等<sup>[14]</sup>在不同烟雾环境下,分析得到了脉冲式激光引信后向散射特性规律。

上述关于激光在气溶胶下的散射回波的研究大多是对一种材质气溶胶的衰减系数、不对称因子、能见度等影响。而大气气溶胶是指大气气体分子与大气中悬浮的固体和液体微粒组成的多相体混合物<sup>[15]</sup>。不同地域气溶胶组分时不同的,气溶胶组分分布具有随机性、不确定性,在此方面的研究还存在两方面的不足:一方面是对不同组分和材质的气溶胶的光学特性的研究;另一方面是缺乏全球气溶胶分布状态与混合气溶胶组分的准确认识<sup>[15]</sup>。研究不同组分和材质气溶胶激光散射回波是分析混合气溶胶激光散射回波的重要部分。本文基于 Mie 散射理论,采用蒙特卡罗随机逻辑的方法,建立了不同分散系的气溶胶模型,仿真分析了云雾和烟雾两种不同材质气溶胶的散射回波特征量化对比,为激光引信近距离探测和抗干扰技术提供了研究方向。

## 2 基本原理

### 2.1 激光传输特性

激光在大气中的传输是大气所引起的激光光学特性的变化,而造成此变化的主要因素是大气气体分子和大气中悬浮的气溶胶微粒。

大气中存在气体分子对激光吸收较弱的波段,这些区域被称为大气窗口<sup>[16]</sup>。选取在大气窗口范围内的波长,可以避免大气气体分子的吸收峰,因此可忽略大气气体分子所引起的吸收效应,如激光脉冲引信可选取的大气窗口范围内的波长有 860 nm、905 nm 等<sup>[16]</sup>。此外,在标准大气条件下近地层大气分子衰减系数比气溶胶粒子的衰减系数小两个数量级,激光在大气中传输的能量衰减主要是气溶胶衰减的影响,故激光波长选取在大气窗口范围内时可以忽略大气分子的影响。本文选取了 905 nm 脉冲激光,主要考虑气溶胶对激光的散射吸收特性影响。

大气中气溶胶粒子数浓度较低时,可认为激光在传播过程中发生单次散射;当有较高的气溶胶粒子数浓度时,需考虑多次散射的情况。激光在气溶胶环境下的衰减不仅与粒子数密度、粒径等有关,还与气溶胶的种类有关。不同材质的气溶胶散射、吸收、衰减特性不同,对激光回波的影响也不同。

## 2.2 可行性分析

蒙特卡罗方法在研究不确定事件中具有不可比拟的优势,仿真的重复性好。该方法不需要约束条件的介入,可以定性分析不同变化对结果的趋势性,并能在一定程度上预测实际结果<sup>[4]</sup>。

蒙特卡罗方法在随机介质中光的传输应用就是将光束分解开成无数个光子,进而研究光子与随机介质中微粒之间的相互作用关系。本文应用蒙特卡罗法的仿真就是将气溶胶对激光散射和吸收作用等效为一系列光子和粒子的随机碰撞<sup>[17]</sup>。此外,该方法在仿真过程中,气溶胶粒子的分布、光子的行走、光子的碰撞散射等是概率随机的,符合实际复杂介质环境下不稳定传输的情况。

本文采用云雾、烟雾两种不同材质的气溶胶分别建模、仿真分析两种气溶胶环境下激光散射回波特性,可以将两种不同材质的气溶胶看作球形粒子,采用 Mie 散射理论和蒙特卡罗方法模拟光子与气溶胶粒子的碰撞和光子的移动过程。二者的不同在于云雾是液体颗粒,烟雾是固体颗粒、粒子尺寸不同和衰减系数、复折射率等粒子本身性质不同。但光子与气溶胶的碰撞模型本质是相同的,例如文献[10]研究了脉冲激光云雾后向散射的回波特性,文献[11]研究了脉冲激光烟雾后向散射特性,二者使用的碰撞模型和光子的移动过程的本质是相同的。

能见度的测量学术界广泛使用对比阈值,世界气象组织明确将对比阈值为 0.05 对应的可视化距离定义为气象光学视程<sup>[18]</sup>。当阈值为 0.05 时,可得到式:

$$0.05 = \exp(-\mu V) \quad (1)$$

$$V = \frac{-\ln 0.05}{\mu} = \frac{2.996}{\mu} \quad (2)$$

式中,  $\mu$  为衰减系数;  $V$  为能见度。

## 3 探测模型

该探测模型主要包括接收发射模型、气溶胶传输模型和激光接收模型。激光发射模型发射脉冲宽度为 10 ns、20 ns、50 ns 波长为 905 nm 的激光脉冲信号,并进行发射参数的设定,发射的激光光子经过气溶胶传输过程后被接收模型接收回波信号,探测模型整体框图如图 1 所示。

### 3.1 激光发射模型

选取发射接收分离式激光探测系统,并以激光

引信发射窗口为坐标原点,从坐标原点向激光引信接收方向为  $X$  正半轴,发射激光轴向为  $Z$  轴正半轴,垂直于  $XZ$  平面竖直向上为  $Y$  轴,建立激光探测坐标系,其坐标系如图 2 所示。激光探测系统发射的激光在时域上波形表达式为<sup>[19]</sup>:

$$P(t) = P_0 \exp\left[-\frac{(t-t_0)^2}{2\tau^2}\right] \quad (3)$$

式中,  $P_0$  为峰值功率;  $t_0$  为脉冲峰值时刻;  $\tau$  为脉冲宽度。

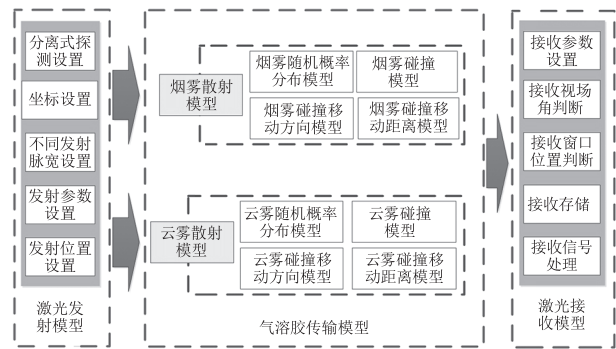


图 1 探测模型整体框图

Fig. 1 Overall block diagram of detection model

将发射激光光束分解为大量光子,模拟光子与气溶胶的相互作用。光子的初始能量与其发射功率有关,其表达式为<sup>[20]</sup>:

$$E_0 = \frac{P_0}{N_0} \quad (4)$$

式中,  $N_0$  为峰值功率对应的光子数。以激光束腰半径作为光子为发射点,光子发射位置为:

$$\begin{cases} x = \omega_0 \xi_0 \\ y = \omega_0 \xi_1 \\ z = 0 \end{cases} \quad (5)$$

式中,  $\omega_0$  为激光束腰半径;  $\xi_0, \xi_1$  为随机数。光子发射的方向为:

$$\begin{cases} u_x = \sin\theta_0 \cos\phi_0 \\ u_y = \sin\theta_0 \sin\phi_0 \\ u_z = \cos\theta_0 \end{cases} \quad (6)$$

式中,  $\theta_0 = |(\theta/2) \cdot \xi_2|$  为光子发射方向天顶角,其中  $\theta$  为激光光束发散角;  $\xi_2$  为标准正态分布随机数;  $\phi_0 = 2\pi \cdot \xi_3$  为光子发射方向方位角,  $\xi_3$  为  $[0, 1]$  区间上均匀分布随机数。发射后的光子能量变为:

$$E' = \eta_l E \quad (7)$$

式中,  $\eta_l$  为发射镜头透过率;  $E$  为光子初始能量。

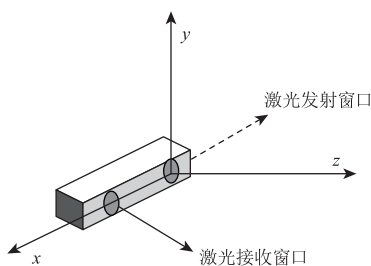


图2 激光探测系统坐标系示意图

Fig. 2 Schematic diagram of coordinate system of laser detection system

### 3.2 气溶胶传输模型

#### a. 碰撞模型

光子与气溶胶粒子碰撞后能量会发生改变,光子的能量变为

$$E'' = \frac{Q_{sca}}{Q_{ext}} E' \cdot \alpha \quad (8)$$

式中,  $E'$  为碰撞前的光子能量;  $\alpha$  为比例因子,  $Q_{sca}$  和  $Q_{ext}$  分别为粒子的散射系数和消光系数,其表达式分别为:

$$Q_{sca} = \frac{2}{x^2} \sum_{n=1}^{\infty} (2n+1) (|a_n|^2 + |b_n|^2) \quad (9)$$

$$Q_{ext} = \frac{2}{x^2} \sum_{n=1}^{\infty} (2n+1) \text{Re}(a_n + b_n) \quad (10)$$

式中,  $x = \frac{\pi d}{\lambda}$  为粒子尺寸参数,其中  $d$  为云雾粒子直径;  $\lambda$  为激光波长;  $a_n$  和  $b_n$  是 Mie 散射系数。

#### b. 碰撞后光子移动方向模型

碰撞后光子的移动方向发生了改变,其方向变为:

$$\begin{cases} u'_x = \frac{\sin\theta_{sca}}{\sqrt{1-u_z^2}} (u_x u_z \cos\phi_{sca} - u_y \sin\phi_{sca}) + u_x \cos\theta_{sca} \\ u'_y = \frac{\sin\theta_{sca}}{\sqrt{1-u_z^2}} (u_y u_z \cos\phi_{sca} - u_x \sin\phi_{sca}) + u_y \cos\theta_{sca} \\ u'_z = -\sin\theta_{sca} \cos\phi_{sca} \sqrt{1-u_z^2} + u_z \cos\theta_{sca} \end{cases} \quad (11)$$

当  $|u_z| > 0.99999$  时,式(11)调整为:

$$\begin{cases} u'_x = \sin\theta_{sca} \cos\theta \\ u'_y = \sin\theta_{sca} \sin\phi_{sca} \\ u'_z = \frac{u_z}{|u_z|} \cos\theta_{sca} \end{cases} \quad (12)$$

式中,  $(u_x, u_y, u_z)$  为碰撞前的光子移动方向;  $\theta_{sca}$  为散射天顶角,由 Mie 散射相函数抽样确定;  $\phi_{sca}$  为散射方位角,为  $[0, 2\pi]$  区间上的均匀分布随机函数。

#### c. 光子碰撞后的移动距离模型

如果光子与气溶胶粒子碰撞后的能量小于所设定的阈值,则认为光子已消亡,不再进行移动、碰撞,也不被接收模型所接收,停止对该光子的仿真追踪。如果满足所设定的条件,光子则沿(3)中所提到的新方向继续移动,进而再次碰撞气溶胶粒子或探测到目标。移动距离为:

$$\Delta s = -\frac{\ln\xi}{\mu_t} \quad (13)$$

式中,  $\xi$  为  $[0, 1]$  区间上均匀分布的随机数;  $\mu_t$  为气溶胶衰减系数。移动后光子的位置变为:

$$\begin{cases} x' = x + u_x \cdot \Delta s \\ y' = y + u_y \cdot \Delta s \\ z' = z + u_z \cdot \Delta s \end{cases} \quad (14)$$

式中,  $(x, y, z)$  为前一次碰撞的光子的位姿。如果光子一直在气溶胶中内部,其传输就是不断移动碰撞的过程。文献[21]对多种云雾环境下散射次数进行了研究,结果指出后向散射回波主要集中在4次以内,平均主要集中在2次附近,本文主要进行了1~3次碰撞散射进行了研究。

### 3.3 激光接收模型

当光子的移动方向  $u_z < 0$  时,则认为光子返回探测模型,到达激光探测接收窗口的位置为:

$$\begin{cases} x_0 = x + u_x \frac{-z}{u_z} \\ y_0 = y + u_y \frac{-z}{u_z} \\ z_0 = 0 \end{cases} \quad (15)$$

式中,  $(x, y, z)$  为光子与气溶胶粒子最后一次碰撞的位置;  $(u_x, u_y, u_z)$  为光子与粒子碰撞后移动方向。判断光子是否在接收窗口内,即:

$$(x_0 - d)^2 + y_0^2 \leq R^2 \quad (16)$$

式中,  $d$  为收发光轴的间距;  $R$  为接收镜头的半径;且光子入射角不大于接受视场角的一半。本系统使用的是分离式激光收发探测系统,回波光子被接收的时刻和能量为:

$$\begin{cases} t = t_0 + \frac{S}{c} \\ E''' = \eta_t E'' \end{cases} \quad (17)$$

式中,  $t_0$  为激光光子发射时刻;  $S$  为探测过程中的移动距离;  $c$  为光速;  $E''$  为最后一次碰撞的能量;  $\eta_t$  为接收镜透过率。接收目标回波功率为<sup>[22]</sup>:

$$P_r(c) = \frac{P\eta_r\rho c\cos\theta A}{\pi L^2}e^{-2cL} \quad (18)$$

式中,  $P$  为探测到目标后的功率或最后一次碰撞的功率;  $\eta_r$  为接收透镜的透过率;  $\rho$  为目标反射系数;  $\theta$  为激光发射方向与目标平面法线之间所夹锐角, 因激光发射角比较小, 所以  $\cos\theta \approx 1$ ;  $A$  为接收系统的有效孔径;  $c$  为不同参量条件下气溶胶对激光的衰减系数;  $L$  为传输距离。

#### 4 仿真分析

假设仿真中气溶胶是均匀分布的, 波长  $\lambda$  设定为 905 nm, 发射脉宽为 10 ns、20 ns、50 ns。目标采用镍铬金属, 其反射系数为 0.68981。并结合第 2 节的分析和建立的探测模型, 进行脉冲激光回波信号仿真。文中研究的气溶胶环境下目标及收发模型均处于气溶胶环境中, 仿真参数如表 1 所示, 总体仿真流程图如图 3 所示。

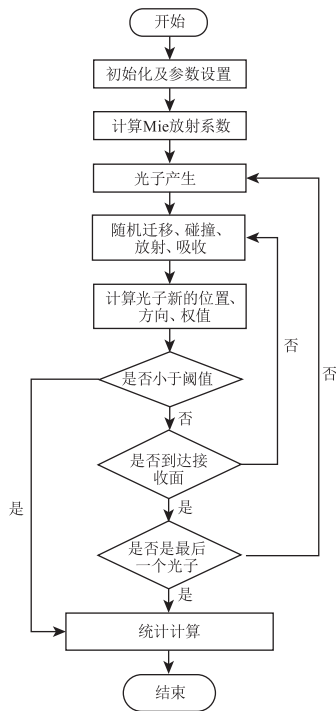


图 3 仿真流程图

Fig. 3 Simulation flow chart

##### 4.1 无气溶胶目标回波

在无气溶胶环境下, 发射 10 ns、20 ns、50 ns 脉宽的 905 nm 的激光脉冲信号, 对比分析不同脉宽对目标的影响。假设光束完全落在目标上, 仿真无气溶胶下目标在 3 m、6 m 处回波如图 4 所示。由图 4 可以看出, 在无气溶胶的情况下, 脉宽基本不影响目标回波峰值, 目标距离发射接收端越远, 峰值越小,

并且在时序上后移。

表 1 仿真参数

Tab. 1 Simulation parameters

参数	数值
波长/nm	905
脉冲宽度/ns	10、20、50
收发间距/nm	50
目标反射率	0.68981
发射系统直径/mm	20
脉冲发射功率/W	70
接收系统直径/mm	30
云雾复折射率	$1.3280 \times 10^{-6.0080} - 7i$
烟雾复折射率	$1.750 - 0.430i$

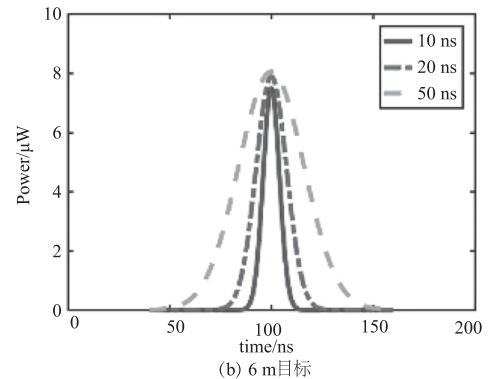
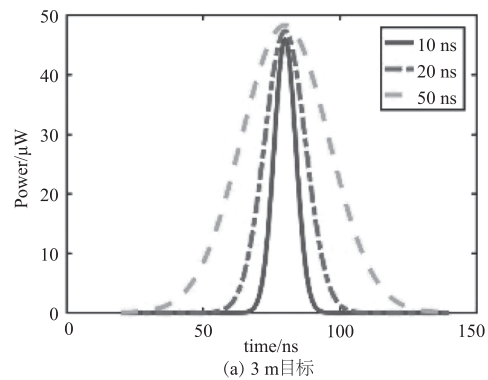


图 4 不同脉宽和不同目标距离回波

Fig. 4 Echo with different pulse width and different target range

##### 4.2 气溶胶环境中无目标情况

由于气溶胶是大气环境中的分散系, 易做无规则的自由运动, 所以激光光子与气溶胶的碰撞散射存在多种情况: 光子与气溶胶碰撞散射一次后就被接收系统接收、光子与气溶胶碰撞二次或三次及以上后被接收系统接收、碰撞后光子能量小于所设定的阈值认为光子已消亡等。文献[21]研究了云雾后向散射回波次数, 表明散射次数主要集中在 4 次以内, 平均碰撞次数集中在 2 次。由式(13)可知, 随机移动距离和衰减系数有关, 云雾和烟雾衰减系

数不同产生的移动距离也不同。为了更清晰的分析云雾和烟雾气溶胶散射回波特性,仿真 100 m 能见度下单次碰撞模型,如图 5(a)烟雾气溶胶环境随机移动距离 2.3683 m,单次碰撞散射回波,图 5(b)云雾气溶胶环境随机移动距离 6.3606 m,单次碰撞散射回波。从图 5 可以看出两种气溶胶环境下都存在脉宽越小,回波功率越小的现象;从时序上可以看出,云雾比烟雾在时序上延时更长,即烟雾气溶胶环境下,光子随机移动距离相对较短;云雾随机移动距离下的一次散射回波峰值是烟雾随移动距离下的一次散射回波峰值的 1/5 左右。

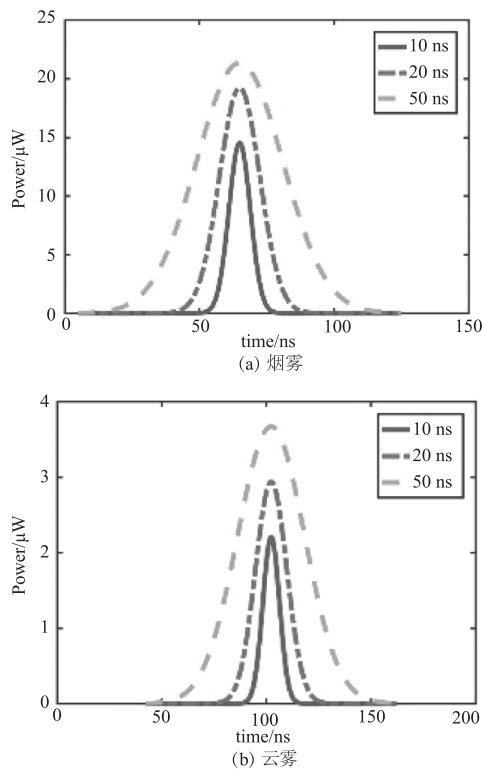


图 5 单次碰撞散射回波

Fig.5 Single collision scattering echo

图 6 为相同能见度 50 m 条件下,激光烟雾和云雾散射回波。由图 6 可以看出,窄脉冲散射回波起伏较明显,宽脉冲回波趋近于钟型回波;烟雾散射回波起峰时间较前,即烟雾气溶胶下光子较先发生碰撞,云雾环境下光子传播时间更长,移动距离更远;两种气溶胶环境下,随着光子连续碰撞次数的增加,光子能量逐渐趋于零,即光子小于所设定的阈值认为光子已消亡,停止对该光子的跟踪。由图 5 和图 6 可知,烟雾回波峰值功率高于云雾回波峰值功率,即该波长下的激光光子与烟雾粒子碰撞的反射率高于云雾粒子;激光光子在云雾中移动距离比烟雾中

远,即该波长下的激光光子在云雾气溶胶环境下的透过率高于烟雾气溶胶环境,且与气溶胶粒子发生碰撞的概率更高。

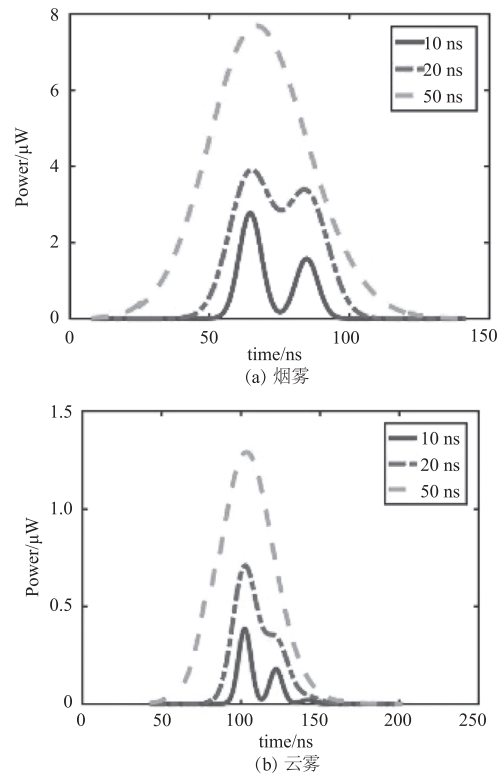
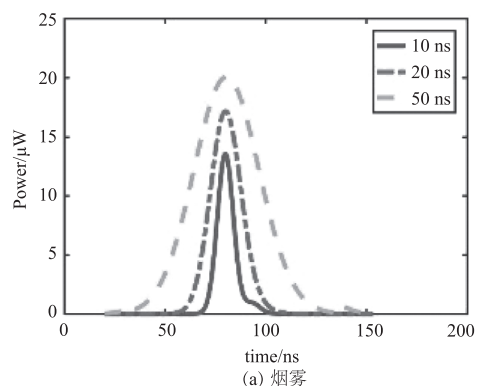


图 6 相同能见度下多次回波散射

Fig.6 Multiple echo scattering in the same visibility

### 4.3 气溶胶中存在目标的情况

满足事件发生概率的条件下,气溶胶中存在目标的回波情况有:直接探测到目标,先与气溶胶发生碰撞散射又探测到目标,探测到目标后返回时又碰撞气溶胶等情况。图 7 仿真条件为 5 m 能见度,目标位于 3 m 处,图 7(a)为烟雾气溶胶散射回波,图 7(b)为云雾气溶胶散射回波。图 7 表明,该条件下两种气溶胶激光回波大致相同,大部分光子在传输过程中直接探测到目标。云雾环境下激光回波峰值相对较高,这与云雾吸收系数相对较小吻合。



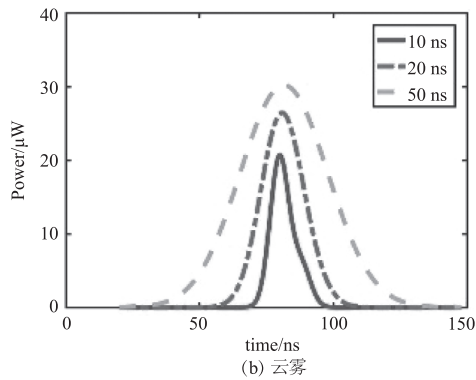
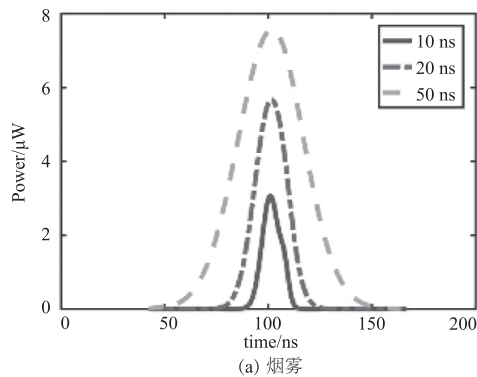


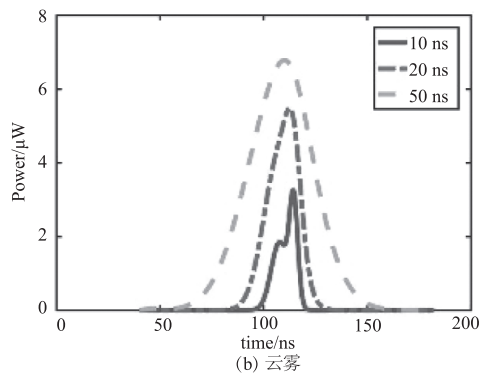
图 7 5m 能见度下目标在 3m 处回波散射

Fig. 7 Echo scattering of target at 3 meters under 5 meters visibility

图 8 的仿真条件为 5 m 能见度下目标位于 6 m 处,图 8 表明,窄脉宽激光对区分气溶胶和目标有较明显的特征。该能见度下,云雾气溶胶环境下,窄脉宽激光散射回波对云雾和目标区分较明显,且目标回波峰较陡。



(a) 烟雾



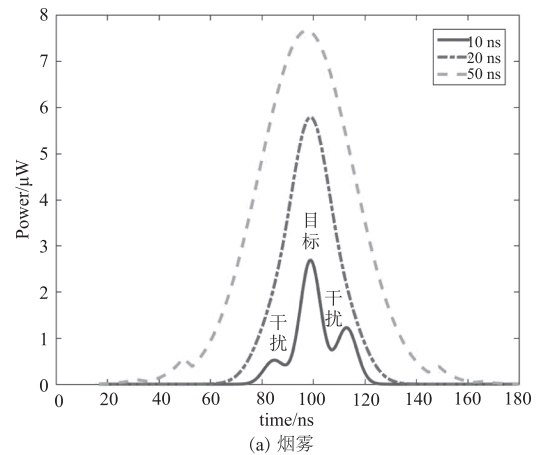
(b) 云雾

图 8 5 m 能见度下目标在 6 m 处回波散射

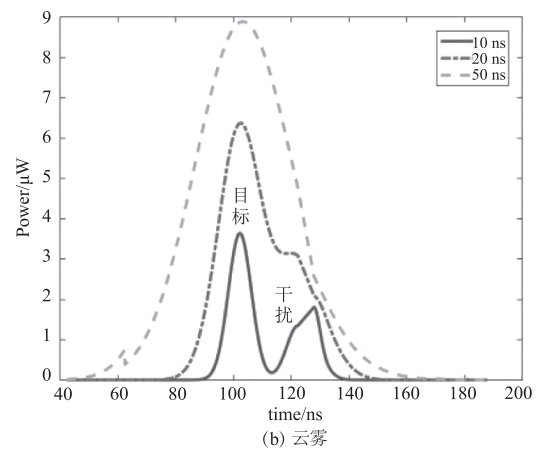
Fig. 8 Echo scattering of target at 6 meters under 5 meters visibility

图 9 的仿真条件为 50 m 能见度下目标处于 6 m 处,宽脉冲激光回波近似高斯脉冲,窄脉宽激光回波目标峰值相对较高,目标回波波峰较陡,干扰回波峰较缓,故窄脉冲能更好的区分目标和气溶胶。光子在不同材质气溶胶环境下,光子与目标和气溶胶微粒碰撞次序不同,云雾回波峰值高于烟雾回波峰值,云雾环境下目标峰值功率高于烟雾气溶胶目标回波,故激

光在烟雾气溶胶的衰减度高于云雾气溶胶。



(a) 烟雾



(b) 云雾

图 9 50 m 能见度下目标在 6 m 处回波散射

Fig. 9 Echo scattering of target at 6 meters under 50 meters visibility

## 5 结论

本文使用蒙特卡罗仿真模拟烟雾和云雾气溶胶微粒自由运动模型,发射模型发射不同脉冲宽度的 905 nm 波长激光光子在气溶胶环境传输过程中发生碰撞散射的过程,对烟雾、云雾两种气溶胶环境散射回波和目标回波进行了分析。结果表明:(1)能见度越大和发射脉冲宽度越小,激光引信回波能更好的区分目标和气溶胶回波;(2)无目标气溶胶环境下,光子与烟雾随机碰撞距离较小,回波时间更短。其他相同条件下,云雾气溶胶透过率高于烟雾气溶胶,烟雾气溶胶反射率高于云雾气溶胶;(3)气溶胶环境存在目标时,其他仿真条件一定时,光子与目标和气溶胶微粒概率碰撞次序不同,激光光子更容易与烟雾粒子发生碰撞,且激光在烟雾气溶胶的衰减度高于云雾气溶胶。

此外,烟雾微粒的粒径更小,在大气环境下更易发生扩散,接下来还需要结合烟雾扩散模型、大气风向等因素。根据本文的研究结果,可进一步

研究复杂外界环境下混合气溶胶散射回波特性,可为实际复杂气溶胶环境下激光抗干扰提供理论基础。

### 参考文献:

- [1] Dong Dafei, An Hongruo, Guo Hua. Development trend and experience and lessons of russianmilitary UAV combat use[J]. Aerodynamic Missile, 2020, (9): 65 - 70. (in Chinese)  
董达飞,安洪若,郭华. 俄军无人机作战使用发展趋势及经验教训[J]. 飞航导弹, 2020, (9): 65 - 70.
- [2] Guo Jing. Study on the transmission characteristic of pulse laser for near-field fixed-distance in the rain[D]. Nanjing. Nanjing University of Science and Technology, 2012. (in Chinese)  
郭婧. 近场定距脉冲激光在降雨中的大气传输特性研究[D]. 南京:南京理工大学, 2012.
- [3] Song Chengtian, Zhang Yyan, Liu Qiang, et al. Echo characteristics of continuous wave laser fuze in aerosol environment[J]. Acta Armamentarii, 2021, 42(3): 499 - 510. (in Chinese)  
宋承天,张垚彦,刘强,等. 气溶胶环境影响下连续波激光引信回波特性[J]. 兵工学报, 2021, 42(3): 499 - 510.
- [4] Chen Peng, Zhao Jiguang, Song Yishuo, et al. Comparison on detection performance of FMCW and pulsed lidar in aerosol environment[J]. Infrared and Laser Engineering, 2020, 49(6): 187 - 196. (in Chinese)  
陈鹏,赵继广,宋一铄,等. 气溶胶环境下 FMCW 与脉冲激光探测性能对比[J]. 红外与激光工程, 2020, 49(6): 187 - 196.
- [5] Li Jing, Mei Hao, He Chenglin, et al. Laser fuze anti-interference method based on pulse width modulation technique[J]. Infrared and Laser Engineering, 2020, 49(4): 52 - 57. (in Chinese)  
李京,梅浩,何成林,等. 基于脉冲宽度调制技术的激光引信抗干扰方法[J]. 红外与激光工程, 2020, 49(4): 52 - 57.
- [6] Ma Chao, Chen Huimin, Qi Bin, et al. Transmission characteristics of lasers with different wavelengths in typical aerosol particles[J]. Acta Armamentarii, 2020, 41(S2): 249 - 256. (in Chinese)  
马超,陈慧敏,齐斌,等. 不同波长激光在典型气溶胶粒子中的传输特性[J]. 兵工学报, 2020, 41(S2): 249 - 256.
- [7] Banakh V A, Falits A V. Amplification of laser echo signal in a turbulent atmosphere[J]. Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer, 2019, 237: 106616.
- [8] Liu Dandan, Huang Yinbo, Yan Zhengquan, et al. Influence of the boundary layer aerosol model on the mid-infrared light-wave transmission[J]. Laser & Infrared, 2015, 45(2): 189 - 193. (in Chinese)  
刘丹丹,黄印博,严正权,等. 边界层气溶胶类型对红外光波传输的影响[J]. 激光与红外, 2015, 45(2): 189 - 193.
- [9] Wang F, Chen H, Yang S, et al. Comparison of detection performance of near-, mid-, and far-infrared laser fuzes in clouds[J]. Applied Optics, 2018, 57(27): 8078 - 8086.
- [10] Dong X, Hu Y H, Zhao N X, et al. Characteristics of heterodyne lidar echoes in different polydisperse aerosol environments[J]. OPTIK, 2018, 174: 655 - 664.
- [11] Sun X, Xiao S, Wan L, et al. Monte carlo simulation of polarization lidar multiple scattering by multi-layer discrete random media[J]. Chinese Journal of Lasers, 2015, 42(12): 1213001.
- [12] Wang Fengjie, Chen Huimin, Lu Changping. Study on cloud echo waveform characteristics of pulsed laser fuze[J]. Guidance & Fuze, 2019, 40(2): 22 - 27. (in Chinese)  
王凤杰,陈慧敏,陆长平. 脉冲激光引信的云雾回波波形特征仿真研究[J]. 制导与引信, 2019, 40(2): 22 - 27.
- [13] Bao Jiaqian, Zha Binting, Zhang H, et al. Simulation method of pulse laser fuze echo in dust environment[J]. Infrared and Laser Engineering, 2021, 50(5): 79 - 87. (in Chinese)  
包家倩,查冰婷,张合,等. 脉冲激光引信烟尘环境回波模拟计算方法[J]. 红外与激光工程. 2021, 50(5): 79 - 87.
- [14] Chen Huimin, Ma Chao, Qi Bin, et al. Study on backscattering characteristics of pulsed laser fuze in smoke[J]. Infrared and Laser Engineering, 2020, 49(4): 38 - 44. (in Chinese)  
陈慧敏,马超,齐斌,等. 脉冲激光引信烟雾后向散射特性研究[J]. 红外与激光工程. 2020, 49(4): 38 - 44.
- [15] Tang Xiaoyun. Backscattering properties of dust and soot-contaminated dust aerosols[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2019. (in Chinese)  
唐笑运. 沙尘与含黑炭沙尘混合气溶胶的后向散射特性研究[D]. 杭州:浙江大学, 2019.



- [16] Chen Huimin, Jia Xiaodong, Cai Kerong. Laser fuze technology [M]. The First Edition. Beijing: National Defense Industry Press, 2016. (in Chinese)  
陈慧敏, 贾晓东, 蔡克荣. 激光引信技术 [M]. 第一版. 北京: 国防工业出版社, 2016.
- [17] Chen Peng, Zhao Jiguang, Song Yishuo, et al. Influence of microscopic characteristics of aerosol particles on backscattering echo [J]. Chinese Journal of Lasers, 2019, 46 (4): 242 - 249. (in Chinese)  
陈鹏, 赵继广, 宋一铄, 等. 气溶胶粒子微观特性对后向散射回波的影响 [J]. 中国激光, 2019, 46 (4): 242 - 249.
- [18] Chen Xiaochuan. Study on the relationship between visibility and particle concentration in fog monitoring [D]. Xi'an: Shaanxi Normal University, 2017. (in Chinese)  
陈小川. 大雾监测中能见度与颗粒物浓度关系的研究 [D]. 西安: 陕西师范大学, 2017.
- [19] Sun Moqi, Liu Xing, Wang Minghui. Pulse laser target echo signal separation algorithm in cloud environment [J]. Foreign Electronic Measurement Technology, 2019, 38 (11): 11 - 17. (in Chinese)  
孙墨祺, 刘星, 王明辉. 云雾环境下脉冲激光目标回波信号分离算法 [J]. 国外电子测量技术, 2019, 38 (11): 11 - 17.
- [20] Chen Huimin, Li Tie, Liu Ximin, et al. Short-range laser detection technology [M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 2018. (in Chinese)  
陈慧敏, 李铁, 刘锡民, 等. 近程激光探测技术 [M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2018.
- [21] Wang Fengjie, Chen Huimin, Ma Chao, et al. Research on the characteristics of fog backscattering laser echo [J]. Infrared and Laser Engineering, 2018, 47 (5): 103 - 107. (in Chinese)  
王凤杰, 陈慧敏, 马超, 等. 云雾后向散射激光回波特性研究 [J]. 红外与激光工程, 2018, 47 (5): 103 - 107.
- [22] Gou Yepeng, Liu Xing, Guo Jiachong, et al. Pulse laser echo signal separation method based on wavelet analysis [J]. Laser & Infrared, 2022, 52 (1): 136 - 144. (in Chinese)  
苟晔鹏, 刘星, 郭甲崇, 等. 基于小波分析的脉冲激光回波信号分离方法 [J]. 激光与红外, 2022, 52 (1): 136 - 144.