

doi:10.3788/gzxb20124112.1422

脉冲宽度对云雾回波的影响研究

张京国¹, 梁晓庚², 刘建新², 牛青坡², 唐俊²

(1 西北工业大学, 西安 710072)

(2 中国空空导弹研究院, 河南 洛阳 471009)

摘 要: 云雾后向散射会产生引发激光引信虚警的回波信号. 基于蒙特卡罗法, 对云雾散射回波进行了模拟仿真, 并定量给出了云雾散射回波的波形、波峰位置、脉宽和峰值功率随发射脉冲宽度的变化规律. 研究表明, 回波峰值功率随着发射脉宽的增大而增大, 且当发射脉宽增大到 50ns 后趋于饱和, 峰值功率将不随脉冲宽度的变化而变化; 脉冲展宽的程度随发射脉宽的增大而减弱; 发射脉宽对云雾散射回波波峰位置的影响较小. 给出的回波信号模拟仿真结果可以为窄脉冲激光引信的目标识别以及探测阈值和脉冲宽度等参量的优化设计提供依据.

关键词: 激光引信; 米氏散射; 后向散射; 脉冲宽度

中图分类号: TJ43⁺9.2

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2012)12-1422-5

0 引言

激光引信具有对目标的主动全向探测能力、启动位置控制准确度高、探测视场方向性尖锐、不易受电子干扰等特点, 因此一直受到重视, 并得到广泛的应用^[1-6]. 但由于工作波段的原因, 激光引信也存在着受自然环境如云雾、沙尘影响较大的缺点, 成为制约激光引信发展和应用的“瓶颈”问题, 而窄脉冲激光引信具有抗云雾干扰能力强的优点.

由于激光发射脉冲在时间上有一定宽度, 而云雾在空间上有一定纵深, 对激光具有可穿透性, 云雾散射回波信号是云雾空间的分布特性和发射脉冲波形联合调制的结果, 是不同发射时刻和不同空间纵深位置的散射信号的叠加, 因此激光发射脉冲宽度对云雾散射回波信号有影响. 当激光发射脉冲宽度缩减到几纳秒时, 进入云雾内层的激光波束后向散射回来的能量与云雾表层后向散射回来的能量在时间上不能重叠, 这样就降低了云雾后向散射回波强度, 并且窄脉冲被目标反射或被云雾悬浮粒子散射后携带有丰富的目标信息和背景干扰信息, 便于目标识别.

目前, 国内外对激光引信云雾回波特征^[1-3]及其抗干扰技术^[4-6]开展了大量的研究工作, 但就脉冲宽度对回波特性影响的定量研究还鲜有报道, 多是定性分析和近似公式计算. 本文主要对发射脉宽为纳秒至几十纳秒的激光脉冲在云雾悬浮粒子中的传输特性进行模拟仿真分析, 研究发射脉冲宽度对回波特性的影响, 为激光引信抗云雾干扰提供技术支撑.

1 云雾回波信号模拟分析

云雾是相对密集的悬浮粒子所组成的散射体, 是一种不稳定的可穿透性目标, 云雾等液态悬浮粒子在一般情况下可近似为球形. 当散射微粒尺寸相当于或大于光波长时, 产生米氏散射^[7-8]. 各种浓度的云雾粒子的半径在 1~60 μm 之间, 而激光引信的波长一般在 0.8~1.1 μm 范围内, 因此云雾粒子的米氏散射效应对激光引信形成回波干扰. 一般通过蒙特卡罗法^[9-10], 来研究云雾散射产生的激光回波信号. 云雾对激光引信近红外光散射产生的回波信号蒙特卡罗模拟法, 就是直接从物理问题出发, 根据大量光子运动状态总结出来的统计规律, 利用随机数来模拟光子的真实物理过程, 使光子运动的统计规律得以重现, 得到仿真试验数据, 再进行分析推断, 最后得到一次散射和多次散射回波的规律.

在蒙特卡罗模拟法中, 光子运动过程的模拟大致分为两大步: 第一步确定光子的初始状态 S_0 ; 第二步由状态 S_m 来确定状态 S_{m+1} . 第二步又分为二个过程, 第一个过程是确定散射的位置, 是一个输运过程; 第二个过程是确定光子的权值、经历时间以及碰撞后的运动方向余弦, 称为碰撞过程, 并且在碰撞过程发生前还需要确定光子模拟过程是否结束.

云雾液态悬浮粒子可近似为球体, 对于激光引信, 云雾悬浮粒子对光子的散射作用为米氏散射. 其散射相位函数采用 H-G 函数的修正公式^[8]

$$f(\theta) = \frac{3}{2} \frac{1-g^2}{2+g^2} \frac{1+(\cos\theta)^2}{(1+g^2-2g\cos\theta)^{3/2}} \quad (1)$$

第一作者: 张京国(1966—), 男, 研究员, 博士, 主要研究方向为引信目标特性和引战配合研究. Email: zhangjg2703@126.com

收稿日期: 2012-06-05; 修回日期: 2012-10-08

式中, g 为非对称因子.

散射后光子的运动方位角 $\varphi_{m+1} = 2\pi\zeta$ 在 $(0, 2\pi)$ 之间均匀分布, ζ 为 $(0, 1)$ 之间的随机数. 光子散射角可由抽样函数得到^[9-10]

$$\theta_{m+1} = \arccos \{ [(1+g^2) - (1-g^2)^2 \cdot (1-g+2g\xi)^{-2}] / 2g \} \quad (2)$$

光子被云雾粒子散射后新的方向余弦为^[9-10]

$$\begin{aligned} U_{m+1} &= \frac{\sin \theta_{m+1}}{\sqrt{1-W_m^2}} (U_m W_m \cos \varphi_{m+1} - \\ &V_m \sin \varphi_{m+1}) + U_m \cos \theta_{m+1} \\ V_{m+1} &= \frac{\sin \theta_{m+1}}{\sqrt{1-W_m^2}} (V_m W_m \cos \varphi_{m+1} + \\ &U_m \sin \varphi_{m+1}) + V_m \cos \theta_{m+1} \\ W_{m+1} &= -\sin \theta_{m+1} \cos \varphi_{m+1} \sqrt{1-W_m^2} + \\ &W_m \cos \theta_{m+1} \end{aligned} \quad (3)$$

设散射后光子的运动方向余弦表示为 (U', V', W') , 则散射角余弦为

$$\cos \theta_{s,m+1} = W_{m+1} W' + U_{m+1} U' + V_{m+1} V' \quad (4)$$

式中

$$\begin{aligned} U' &= \frac{l_s - x_{m+1}}{\sqrt{(x_{m+1} - l_s)^2 + y_{m+1}^2 + (z_{m+1} - R)^2}} \\ V' &= \frac{-y_{m+1}}{\sqrt{(x_{m+1} - l_s)^2 + y_{m+1}^2 + (z_{m+1} - R)^2}} \\ W' &= \frac{R - z_{m+1}}{\sqrt{(x_{m+1} - l_s)^2 + y_{m+1}^2 + (z_{m+1} - R)^2}} \end{aligned} \quad (5)$$

式中, l_s 是激光引信收发间距; R 为弹体半径; $(x_{m+1}, y_{m+1}, z_{m+1})$ 是第 $m+1$ 个碰撞点的位置坐标.

在相邻两次散射间, 光子的运动长度 L 服从分布 $f(L) = \exp[-(\sigma_s + \sigma_a)L]$

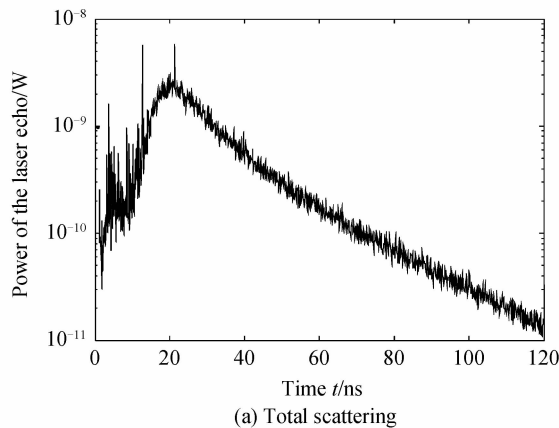
式中, σ_s 和 σ_a 分别为散射系数和吸收系数.

光子运动的自由程的抽样函数表示为^[9]

$$L = -\ln \xi / (\sigma_s + \sigma_a) \quad (7)$$

式中, ξ 为 $(0, 1)$ 之间的随机数.

为了能够得到光子的历史信息, 需要对每一碰



撞点处的光子被探测器捕获的概率进行统计. 在确定了碰撞点状态 S_{m+1} 后, 就开始确定这一碰撞点处的光子被捕获的概率. 当光子在探测视场和视野区域内时, 光子有可能被捕获. 光子被探测器捕获的概率为

当光子进入探测视场和视野范围时, 被探测器捕获的概率为

$$P_{m+1} = K_{m+1} f(\theta_{s,m+1}) \exp[-\sigma(z_{m+1} - R - H^*) / \cos \theta_r] S \cos^3 \theta_r / 4\pi(z_{m+1} - R)^2 \quad (8)$$

式中, K_{m+1} 是光子的权值; σ 是衰减系数; H^* 是激光引信与云雾边缘的间距; S 是探测面积; 接收表面法线方向与光子入射方向的夹角表示为

$$\theta_r = \arccos \frac{z_{m+1} - R}{\sqrt{(x_{m+1} - l_s)^2 + y_{m+1}^2 + (z_{m+1} - R)^2}} \quad (9)$$

式中, l_s 是激光引信基线长度; R 为弹体半径; $(x_{m+1}, y_{m+1}, z_{m+1})$ 是第 $m+1$ 个碰撞点的位置坐标.

利用蒙特卡罗法, 可模拟给出发射脉冲无限窄条件下的云雾散射回波信号, 即云雾散射脉冲响应函数. 由于脉冲响应函数是云雾散射系统的传递函数, 在云雾散射系统中, 任何到达接收系统的回波信号都可以由发射信号与脉冲响应函数的卷积得到, 因此利用模拟给出的脉冲响应函数, 就可以分析在任意形状发射脉冲信号下的云雾散射回波信号. 激光引信的发射脉冲为高斯形, 表示为

$$P(t) = P_0 \exp[-2.77t^2/\tau^2] \quad (10)$$

式中, τ 为发射脉冲半功率宽度, P_0 为峰值功率.

式(10)与脉冲响应函数卷积, 可得激光引信云雾回波信号, 因此发射脉冲宽度影响云雾散射回波信号特性.

2 云雾散射回波随发射脉冲宽度的变化规律

图1为冲激响应函数曲线. 图2为不同发射脉

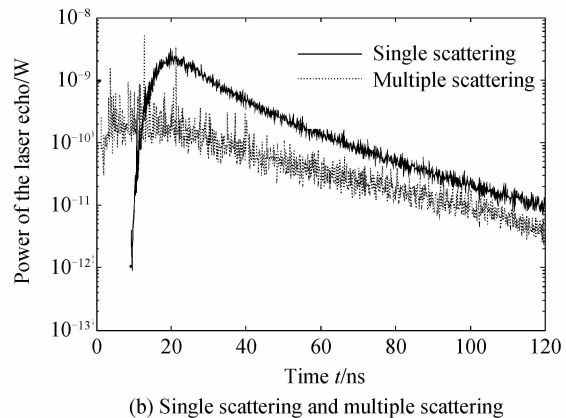


图1 冲激响应函数曲线

Fig. 1 Curve of impulse response function

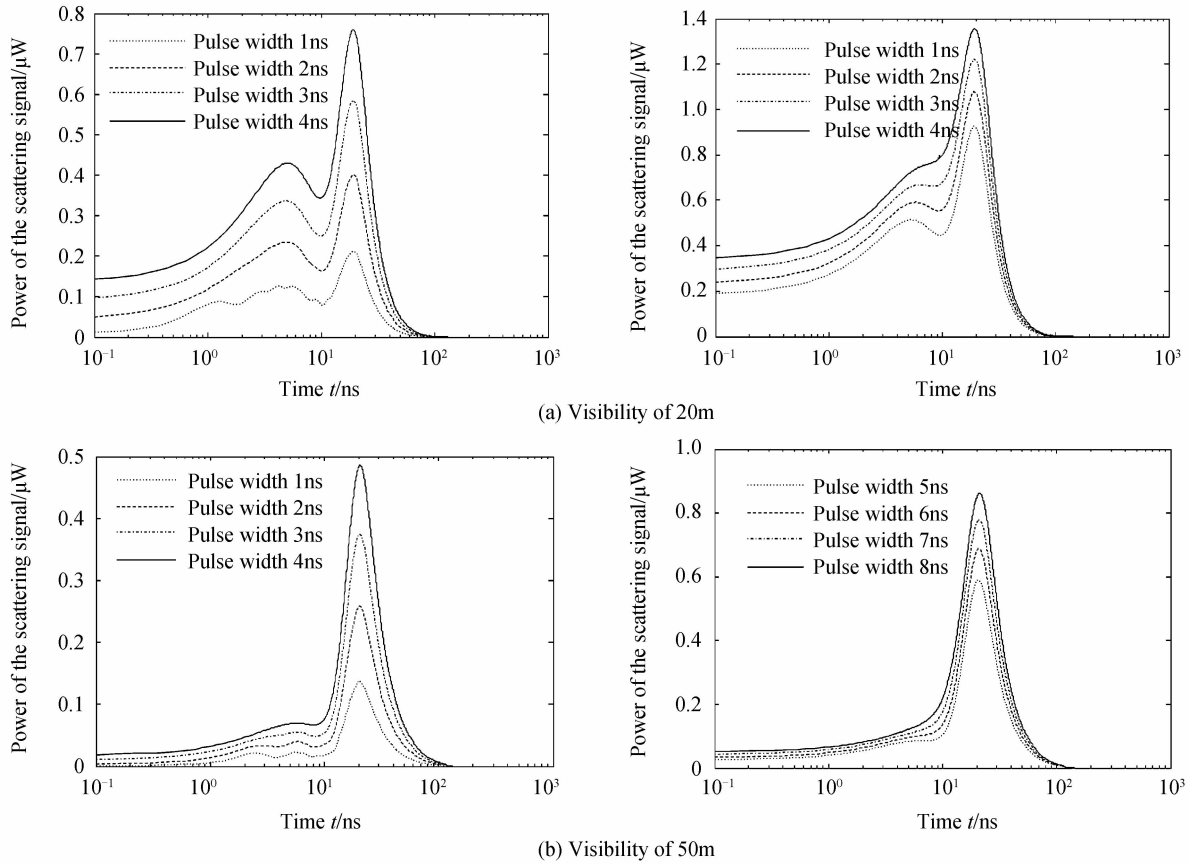


图 2 在不同的发射脉冲宽度下云雾散射回波波形曲线

Fig. 2 Wave shape curve of fog-scattering echo in the different transmitting pulse width

宽下, 云雾散射回波波形的变化曲线; 图 3 为云雾散射回波峰值功率与冲激响应峰值功率的比值随发射脉宽的变化规律; 图 4 为回波脉宽与发射脉宽的比值随发射脉宽的变化规律; 图 5 为云雾散射回波波峰位置随发射脉宽的变化规律. 图 1~图 5 仿真所用的波长为 $0.9 \mu\text{m}$, 云雾粒子的尺度在 $0.5 \sim 5 \mu\text{m}$ 范围内按均匀分布随机产生.

从图 1 可以看出, 在刚开始小于 15 ns 的时间段内, 多次散射在总回波中起主导作用, 单次散射的贡献很小, 而在大于 15 ns 的时间段内, 单次散射在

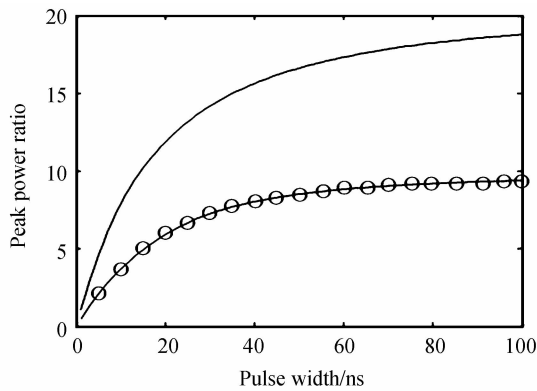


图 3 不同脉宽下的云雾散射回波峰值功率与冲激响应峰值功率的比值

Fig. 3 Peak power ratio of the variable-pulse-width laser echo and impulse response

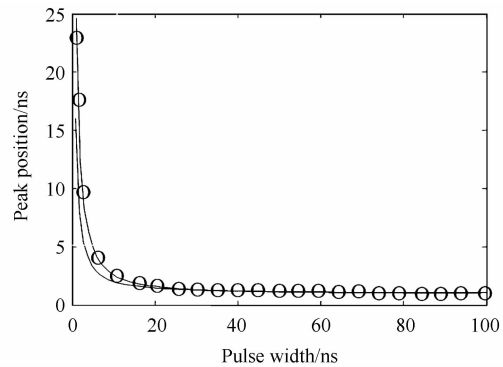


图 4 回波脉冲宽度与发射脉冲宽度的比值随发射脉冲宽度的变化规律

Fig. 4 Ratio of receiving pulse width and transmitting pulse width variable with transmitting pulse width

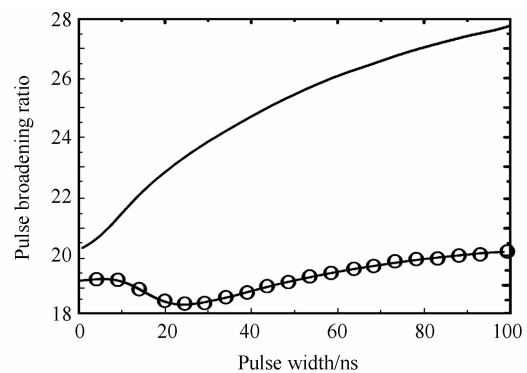


图 5 回波脉冲波峰位置随发射脉冲宽度的变化规律

Fig. 5 Peak power of the laser echo variable with transmitting pulse width

总的回波中起主导作用;相对于多次散射,单次散射回波强度随时间变化更剧烈,在初始阶段迅速增大,并在大约 $2H_0/c$ 处达到最大(H_0 为盲区距离),之后又迅速下降.从图 2 可以看出,在发射脉冲宽度和能见度较小时,云雾散射回波会发生明显的畸变,出现两个波峰,分别由单次散射和多次散射产生,且随着发射脉宽的增大,波形趋近于高斯波形.从图 3 可以看出,回波峰值功率随着发射脉宽的增大而增大,且当发射脉宽增大到 50 ns 后趋于饱和,峰值功率将不随发射脉宽的变化而变化,且云雾能见度越小(即悬浮粒子的密度越大),那么靠缩短脉冲宽度所获得的消弱云雾回波强度的效果就越差,这种现象的原因就在于云雾悬浮粒子的密度越大,散射信号在云雾中的贯穿深度就越小,从图 4 可以看出,脉冲展宽的程度随发射脉宽的增大而减弱,且当发射脉宽增大到 10 ns 后,脉冲展宽程度变得很弱.从图 5 可以看出,发射脉宽对云雾散射回波波峰位置的影响较弱,当能见度较大时,发射脉宽越大,回波波峰相对于发射脉冲的波峰延时越大.

3 结论

本文就脉冲宽度对激光引信云雾散射回波的影响进行了模拟分析,研究结果表明:1)当发射脉宽较小时,激光引信云雾回波出现了分别对应于单次散射和多次散射的两个波峰,且随着发射脉宽的增大,波形趋近于高斯波形;2)云雾回波峰值功率随发射脉宽的增大而增大,且当发射脉宽增大到 50 ns 后趋于饱和,峰值功率将不随发射脉宽的变化而明显变化,且云雾能见度越小,那么靠缩短脉冲宽度所获得的消弱云雾回波强度的效果就越差;3)脉冲展宽的程度随发射脉宽的增大而减弱,且当发射脉宽增大到 10 ns 后,脉冲展宽变得很弱;4)发射脉宽对云雾散射回波波峰位置的影响较小,给出的回波信号模拟仿真结果可以为激光引信脉冲宽度的优化设计提供依据.

参考文献

- [1] ZHANG Hui, WANG Yong-tian. A Monte-Carlo based backscattering signal simulation for laser fuze[J]. *Journal of System Simulation*, 2004, **16**(8): 1624-1626.
- [2] WANG Guang-sheng. Characteristics and discrimination of cloud backscatter for laser fuze[J]. *Journal of Detection & Control*, 2006, **28**(6): 20-24.
王广生. 激光引信云雾后向散射的特征与识别[J]. *探测与控制学报*, 2006, **28**(6): 20-24.
- [3] GAO Chong, LIU Jian-xin, ZHANG Jing-guo, et al.. Monte-Carlo based backscattering signal of clouds and fogs for laser fuze[J]. *Aero Weaponry*, 2008, (3): 50-53.
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.
- [4] SONG Lei, CHEN Shao-hua. Technologies of anti-interference of clouds and smog for air-to-air missiles laser fuze[J]. *Journal of Projecties, Rockets, Missiles and Guidance*, 2007, **27**(4): 153-156.
空空导弹激光引信抗云烟干扰技术研究[J]. *弹箭与制导学报*, 2007, **27**(4): 153-156.
- [5] LIU Bin. System design of target identification and anti-jamming with laser-fuze[J]. *Journal of Detection & Control*, 2002, **22**(8): 898-901.
刘斌. 激光引信目标识别及抗干扰设计[J]. *探测与控制学报*, 2005, **27**(3): 20-25.
- [6] ZHANG Yi-fei, DENG Fang-lin. Key technologies of clouds and ballistic missiles's laser fuze[J]. *Journal of Detection & Control*, 2004, **26**(3): 29-33.
张翼飞,邓方林,陈卫标. 导弹激光引信抗云层干扰关键技术研究[J]. *探测与控制学报*, 2004, **26**(3): 29-33.
- [7] YUAN Yi-jun, REN De-ming, HU Xiao-yong. Computing scattering phase function by recursive formula of Mie theory[J]. *Chinese Journal of Light Scattering*, 2006, **17**(4): 366-371.
袁易君,任德明,胡孝勇. Mie 理论递推公式计算相位散射函数[J]. *光散射学报*, 2006, **17**(4): 366-371.
- [8] ZHU Meng-zhen, ZHANG Hai-liang, JIA Hong-hui, et al. Study of ultraviolet scattering phase function based on Mie scattering theory[J]. *The Journal of Light Scattering*, 2007, **19**(3): 225-229.
朱孟真,张海良,贾红辉,等. 基于 Mie 散射理论的紫外光散射相函数研究[J]. *光散射学报*, 2007, **19**(3): 225-229.
- [9] JIA Hong-hui, CHANG Sheng-li, LAN Yong, et al.. Non-line-of-sight light propagation model based on monte carlo method[J]. *Journal of Optoelectronics Laser*, 2007, **18**(6): 690-697.
贾红辉,常胜利,兰勇,等. 大气光通讯中基于蒙特卡罗方法非视线光传输模型[J]. *光电子·激光*, 2007, **18**(6): 690-697.
- [10] JIA Hong-hui, CHANG Sheng-li, YANG Jian-kun et al. Monte-Carlo simulation of atmospheric transmission characteristics in non-line-of-sight ultraviolet communication[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2007, **36**(5): 955-960.
贾红辉,常胜利,杨建坤,等. 非视线紫外通信大气传输特性的蒙特卡罗模拟[J]. *光子学报*, 2007, **36**(5): 955-960.

Effect of pulse width on Cloud-and-Fog Backscattering Signal

ZHANG Jing-guo¹, LIANG Xiao-geng², LIU Jian-xin², NIU Qing-po², TANG Jun²

(1 *Northwestern Polytechnic, Xi'an 710072, China*)

(2 *China Airborne Missile Academy, Luoyang, Henan 471009, China*)

Abstract: Scattering effects of clouds and fogs produce the backscattering signal which results in false alarm for laser fuse. Based on the Monte-Carlo technology, cloud-and-fog scattering effects are simulated, and rules of wave shape and peak power of cloud-and-fog scattering echo variable with baseline distance are qualitatively given. Results show that peak power and pulse broadening extent of the laser echo goes up with pulse width increasing. However, when pulse width increases to 50 ns, peak power is saturated. Simulated results may provide target discrimination and optimized design of detecting threshold and transmitting pulse width for laser fuse with reference.

Key words: Laser fuse; Mie scattering; Backscatter; Pulse width