

## 基于脉冲宽度调制技术的激光引信抗干扰方法

李 京, 梅 浩, 何成林, 左 翼, 孙珞珂

(中国空空导弹研究院, 河南 洛阳 471009)

**摘 要:** 针对激光引信易受云烟雾干扰的问题, 提出了一种基于脉冲宽度调制技术的激光引信抗干扰方法。计算了不同脉冲宽度条件下的云烟雾后向散射回波功率, 并给出了云烟雾后向散射回波功率随发射脉冲宽度的变化规律。分析了不同云烟雾条件下使用不同发射脉冲宽度探测时所得到的回波功率比。实验结果表明, 在使用不同脉冲宽度激光探测条件下, 云烟雾激光后向散射功率比大于 3, 使用该方法可有效提升激光引信抗干扰性能。

**关键词:** 激光引信; 脉冲宽度调制; 烟雾; 抗干扰

中图分类号: TN216 文献标志码: A DOI: 10.3788/IRLA202049.0403007

## Laser fuze anti-interference method based on pulse width modulation technique

Li Jing, Mei Hao, He Chenglin, Zuo Yi, Sun Luoke

(China Airborne Missile Academy, Luoyang 471009, China)

**Abstract:** In view of the problem that laser fuze is easily interfered by fog and smoke, a new laser fuze anti-interference method based on pulsed width modulation technique was proposed. The fog echo signal power of different pulse width was computed, and the variation of echo signal power under the influence of transmitted pulse duration was given. The echo signal power ratio in different fog and aerosols environment was analyzed by using different pulse width to detect. The experiment results show that by using different pulse width to detect, the ratio of backscattering power is usually more than 3. Therefore, this method can be used to improve anti-interference ability of laser fuze.

**Key words:** laser fuze; pulse width modulation; fog; anti-interference

收稿日期: 2019-12-12; 修订日期: 2020-01-27

作者简介: 李京 (1983-), 男, 高级工程师, 主要从事激光探测系统方面的研究。Email: eric140523@163.com

## 0 引言

激光引信具有体积小, 功耗低, 结构简单, 启动精度高, 探测视场方向性强, 不易受无线电干扰等特点, 因此激光引信在空空导弹中受到越来越广泛的应用<sup>[1-2]</sup>。美国的响尾蛇导弹 AIM-9X、以色列的怪蛇-4/5 和法国的西北风等多种导弹上均配备了激光引信<sup>[3-4]</sup>。但是激光引信也存在一些不可忽视的问题, 如易受云雾、悬浮粒子后向散射干扰, 使得激光引信在某些条件下的使用受到一定的限制<sup>[5-6]</sup>。空空导弹在攻击低空、超低空及掠海目标时, 可能经常处于自然界云雾或者战场烟雾中, 数据表明, 在低空、超低空环境下, 自然界云雾和战场烟雾的能见度可能低于 100 m, 甚至达到 50 m 能见度的强浓雾量级。因此, 提高激光引信抗云烟雾干扰能力, 提升其战场环境适应性, 是激光引信需要着力解决的关键问题。

传统激光引信抗干扰方法包括拉大收发基线设置近距盲区、波门选通等。近年来发展的新体制抗干扰技术包括超窄脉冲探测技术、成像探测技术、双色探测技术等。文中提出了一种新型的基于脉冲宽度调制的激光引信抗干扰技术, 仿真和实测结果表明, 在调制使用宽、窄脉冲探测时, 云烟雾的后向散射功率有明显区别。为激光引信抗干扰研究提供了一种新的思路。

## 1 目标和云雾对不同宽度脉冲激光的响应情况

### 1.1 实体目标对不同宽度脉冲激光的响应情况

工程设计中, 激光引信通用的回波功率计算公式(小视场)如下:

$$P_r = \frac{P_t \tau_1 \tau_2 \rho A_r}{\pi R^2} \quad (1)$$

式中:  $P_t$  为出口光功率;  $\tau_1$  为发射光学系统效率;  $\tau_2$  为接收光学系统效率;  $\rho$  为目标反射系数;  $A_r$  为接收系统有效通光口径;  $R$  为距离。

从式中可以看出, 实体目标对激光脉冲的响应情况与光学系统参数、反射系数等参数有关, 与脉冲宽度无关。所以从理论上分析, 在接收带宽足够的情况下, 实体目标对不同宽度激光脉冲的响应情况是一致的。

### 1.2 云雾对不同宽度脉冲激光的响应情况

激光引信的后向散射特性可以借助于云雾的脉冲和传递特性来进行研究。对于后向散射的计算, 可以利用云雾的已知光学特性如散射系数、散射指标来进行定量估算。研究云雾对脉冲激光的后向散射特性首先要求解云雾的脉冲特性, 利用它来估算后向散射的形式和参数<sup>[7-12]</sup>。

脉冲激光器辐射的光子首先被散射到跨度为  $H \sim H + \Delta H$  的一层介质中, 且散射后其传输轨迹处于接收视场角  $\Omega_\Pi$  中, 最后到达接收机, 需要满足以下要求:

- (1) 光子散射, 通过从  $0 \sim H$  的距离;
- (2) 光子在从  $H \sim H + \Delta H$  的间隔内散射;
- (3) 多次反射的光子的轨迹处于接收视场角的内部;
- (4) 多次反射的光子到达接收机。

这些事件发生的概率分别为:

$$\begin{aligned} p(1) &= e^{-\sigma_s H} \\ p(2) &= \frac{S(H)}{H^2 \Omega_\Pi^2} \sigma_s \Delta H \\ p(3) &= f(\theta) \frac{S_{BX}}{H^2} \\ p(4) &= e^{-\sigma_s} \end{aligned} \quad (2)$$

式中:  $\sigma_s$  为散射系数;  $S(H)$  为接收物镜的覆盖面积;  $\Omega_\Pi$  为接收视场角;  $f(\theta)$  为散射指标;  $S_{BX}$  为接收机入射孔径面积。

由于可以认为事件 1、2、3、4 为独立事件, 于是光子后向散射到达接收机的概率可表达为:

$$p = p(1)p(2)p(3)p(4) = \sigma_s \frac{S_{BX}}{H^2} f(\theta) \frac{S(H)}{H^2 \Omega_\Pi^2} e^{-\sigma_s \Delta H} \Delta H \quad (3)$$

当发射脉冲宽度为  $\tau_n$  时, 在光脉冲的持续时间  $\tau_n$  内发射的光子数为:

$$\bar{n} = \frac{P_0 \tau_n}{h\nu} \quad (4)$$

在这种情况下, 云雾的脉冲特性可表示为:

$$h_\Pi = S_{BX} f(\theta) \sigma_s \frac{S(H)}{4\pi H^2 \Omega_\Pi^2} e^{-\sigma_s H} \quad (5)$$

根据其脉冲特性, 反映到接收机输入端上的干扰光学信号的包络可以表示为如下形式:

$$P_\Pi(H) = \int_0^H h_\Pi(R) P_N(H-R) dR \quad (6)$$

式中:  $P_N$  为接收物镜输入端上后向散射信号的功率大小;  $P_{\Pi}(H)$  为决定辐射强度包络的函数。

激光引信的发射脉冲通常可表示为指数形式的脉冲, 其辐射功率可表示为:

$$P_N(t) = P_0 e^{t/\tau_n} \quad (7)$$

综合上文的推导, 对于指数形式的脉冲其接收机输入端上的干扰光学信号的包络可表示为:

$$P_{\Pi}(H) = P_0 S_{BX} f(\theta) \sigma_s \int_{H_0}^H \frac{S_H(R)}{R^2} e^{-2\sigma_s(R-H^*) - k_m(H-R)} dR \quad (8)$$

式中:  $H^*$  为到云雾边缘的距离;  $k_m$  为一个与脉冲宽度有关的常数, 表示为:

$$k_m = \frac{2}{C\tau_n} \quad (9)$$

由以上公式可以看出, 云雾对脉冲激光的后向散射是一个与  $k_m$  有关的函数, 而  $k_m$  是一个与脉冲宽度有关的常数。由此可知, 接收机接收到的云雾后向散射功率与脉冲宽度有关。根据以上公式仿真计算在一定参数条件下云雾后向散射功率与脉冲宽度的关系。

图 1 为不同脉冲宽度下回波功率与云雾特性关系, 仿真了在不同云雾特性下脉冲宽度分别为 100 ns、50 ns、20 ns 和 10 ns 条件下回波功率的变化曲线。从图中可以看出, 不同脉冲宽度下回波功率随云雾特性的变化趋势基本相同, 但是不同脉冲宽度条件下的回波功率有明显区别。图 2 为不同云雾特性下回波功率与脉冲宽度的关系, 从图中可以看出, 在不同云雾

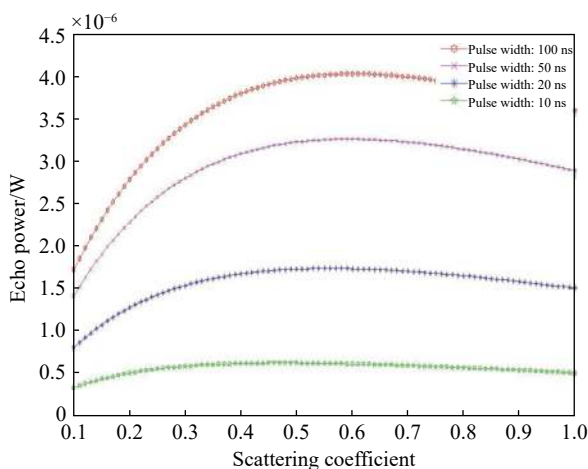


图 1 不同脉冲宽度下回波功率与云雾特性关系

Fig.1 Relationship between echo power and fog under different pulse width

特性下, 脉冲宽度越小, 回波功率越小, 100 ns 脉冲的回波功率与 10 ns 脉冲的回波功率有明显区别。云雾后向散射的回波功率随着脉冲宽度的增加而明显增加。

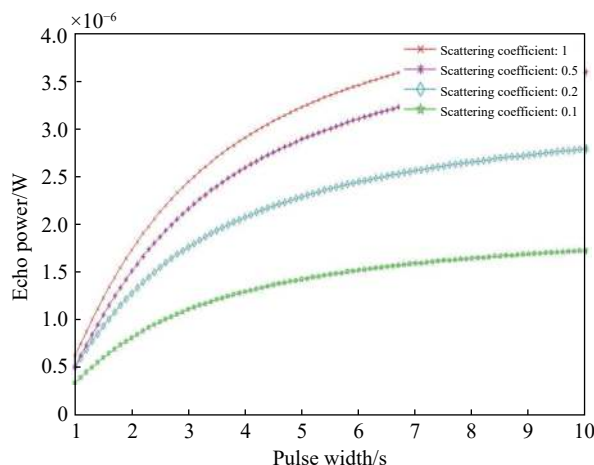


图 2 不同云雾特性下回波功率与脉冲宽度的关系

Fig.2 Relationship between echo power and pulse width under different fog

## 2 不同脉冲宽度条件下云雾后向散射功率比分析

激光引信抗云雾干扰的难点在于当云雾浓度较大时, 云雾所产生的干扰回波与目标回波在特征上非常相似, 激光引信很难区分接收的回波来自于云雾还是真实的目标。为了提高激光引信对目标和云雾的区分能力, 可以改变引信系统的某些参数, 然后对云雾干扰和被测目标的反应进行分析, 当系统参数发生变化时, 要保证在反射信号中干扰信号的特征剧烈变化, 而目标信号的特征变化最小, 借此来识别出目标和干扰。

根据上节的理论分析, 目标反射的回波功率与发射脉冲宽度无关, 即使用不同宽度的发射脉冲对目标进行探测, 宽脉冲与窄脉冲的回波功率相当。而云雾后向散射功率与脉冲宽度密切相关, 脉冲越窄回波功率越小, 此时使用宽脉冲和窄脉冲依次探测时, 两者的回波功率比值明显。使用宽度调制的方法发射一组不同宽度的脉冲串, 利用不同宽度间的回波功率比值来判定回波来自于云雾还是来自于目标。

图 3 为不同云雾特性条件下使用宽度为 100 ns

的发射脉冲产生的后向散射功率分别与 50 ns、20 ns 以及 10 ns 宽度的发射脉冲产生的后向散射功率的比值。从图中可以看出,脉冲宽度为 100 ns 和 50 ns 时,云雾后向散射功率比不大,即脉冲宽度从 100 ns 减小到 50 ns,云雾散射回波功率的减小并不明显。当脉冲宽度为 100 ns 和 20 ns 时,其后向散射功率比大于 2,此时可以认为脉冲宽度为 20 ns 时,云雾产生的干扰相比于 100 ns 时减小了一半以上。当发射脉冲宽度减小到 10 ns 时,此时 100 ns 和 10 ns 所产生的云雾干扰功率有非常明显的区别,其功率比大于 5,并且随着云雾浓度的增加,其功率比有继续增大的趋势。

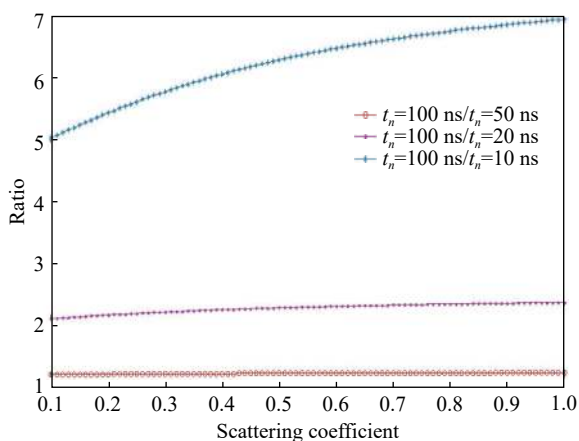


图 3 不同脉冲宽度间的云雾后向散射功率比

Fig.3 Backscattering power ratio of fog between different pulse width

在参数一定的情况下,计算不同脉冲宽度的回波功率比值。

$$\begin{aligned} \frac{P(\tau_n = 100 \text{ ns})}{P(\tau_n = 50 \text{ ns})} &= 1.21 \\ \frac{P(\tau_n = 100 \text{ ns})}{P(\tau_n = 20 \text{ ns})} &= 2.12 \\ \frac{P(\tau_n = 100 \text{ ns})}{P(\tau_n = 10 \text{ ns})} &= 5.01 \end{aligned} \quad (10)$$

由以上计算结果可以看出,回波功率随着脉冲宽度的减小而减小,但是,对于脉冲宽度较宽时,功率的减小幅度并不明显,100 ns 脉冲宽度与 50 ns 脉冲宽度回波功率的比值仅为 1.21。但是当脉冲宽度进一步减小时,回波功率急剧减小,100 ns 脉冲宽度与 10 ns 脉冲宽度回波功率的比值达到了 5.01。

在接收系统带宽足够的情况下,归一化探测能力之后,理论上 100 ns 和 10 ns 的回波功率比为 1,而云雾干扰回波在 100 ns 和 10 ns 时回波功率的比值达到了 5.01,通过调制激光器发射形式,使用 50~100 ns 的宽激光脉冲和 5~10 ns 的窄激光脉冲组成序列脉冲串进行探测,利用两者之间的功率比可以有效区分出目标和云雾。

### 3 基于脉冲宽度调制技术的激光引信系统设计及实验研究

通过上文的理论计算和仿真分析,使用 50~100 ns 的宽激光脉冲和 5~10 ns 的窄激光脉冲组成序列脉冲串进行探测,利用两者之间的功率比可以有效区分出目标和云雾。根据上述思想,设计了基于脉冲宽度调制技术的激光引信系统原理框图如图 4 所示。

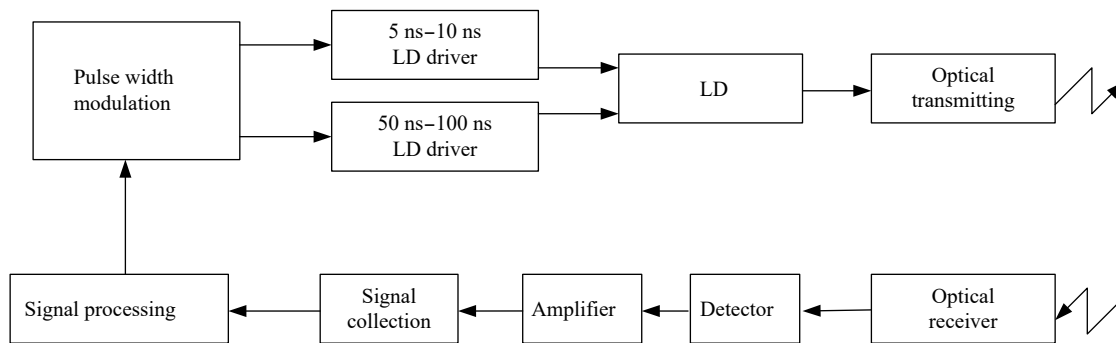


图 4 组成框图

Fig.4 Composition block diagram

信号处理电路产生 50~100 ns 和 5~10 ns 的时钟信号,两种宽度的时钟信号按照一定的时序送给脉冲宽度调制电路,时序控制如图 5 所示。

脉冲宽度调制电路将时序控制信号放大、整形后通过功率驱动电路分别产生宽窄不同的激光器驱动信号,激光器通过发射光学系统轮流发出两种宽度的

激光脉冲。

探测器通过接收光学系统接收到回波之后通过预放大和主放送给信号采集与数字化处理系统,提取回波的幅度信息送给信号处理电路,信号处理电路根据接收到的两种脉冲宽度的幅值比来完成目标与干扰的识别。

目标识别流程如图 6 所示。

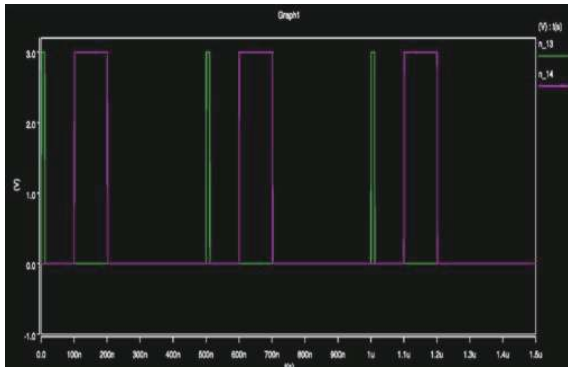


图 5 时序控制

Fig.5 Sequence control

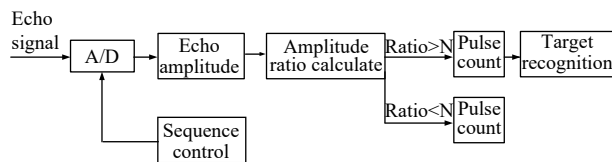


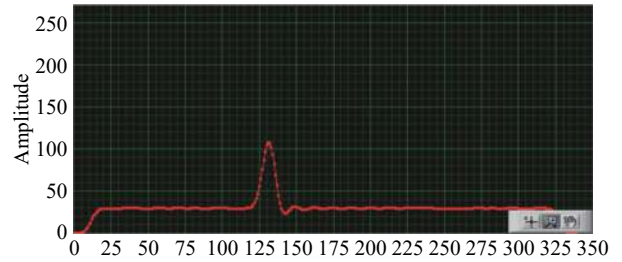
图 6 目标和干扰识别流程框图

Fig.6 Flow diagram of target and interference recognition

基于以上设计,研制原理样机实测云雾和目标对窄脉冲激光的响应情况。样机选取了 5 ns 和 100 ns 两种脉冲宽度进行试验测量,采用高速 A/D 电路对回波信号进行实时采集,A/D 电路采样频率为 1 GHz,精度为 8 位,以数字量 0~255 表征 0~800 mV 电压采集范围。

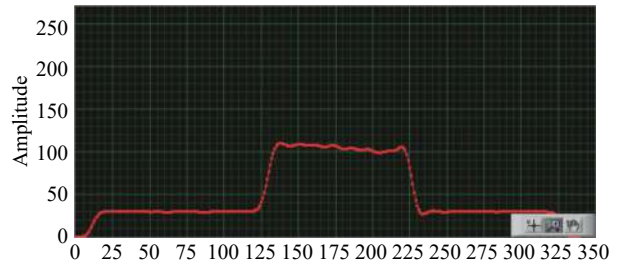
图 7 为归一化探测能力之后,使用 5 ns 和 100 ns 脉冲激光对 9 m 处目标探测时的回波响应情况。在 5 ns 脉冲宽度探测时目标回波峰值为 106,在 100 ns 脉冲宽度探测时,回波峰值为 109。

图 8 为 20 m 能见度烟雾干扰对不同宽度激光脉冲的后向散射回波。在 5 ns 脉冲宽度探测时,烟雾干扰回波峰值为 62,在 100 ns 脉冲宽度探测时,烟雾干扰回波峰值为 208。



(a) 脉冲宽度 5 ns, 目标距离 9 m

(a) Pulse width 5 ns, target distance 9 m



(b) 脉冲宽度 100 ns, 目标距离 9 m

(b) Pulse width 100 ns, target distance 9 m

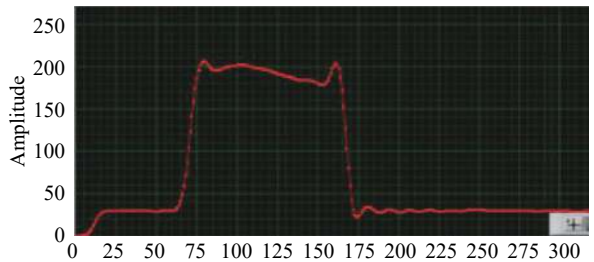
图 7 5 ns 和 100 ns 目标回波强度对比

Fig.7 Comparison of echo power from target between 5 ns and 100 ns



(a) 脉冲宽度 5 ns, 能见度 20 m

(a) Pulse width 5 ns, visibility 20 m



(b) 脉冲宽度 100 ns, 能见度 20 m

(b) Pulse width 100 ns, visibility 20 m

图 8 5 ns 和 100 ns 云雾后向散射回波强度对比

Fig.8 Comparison of backscattering power from fog between 5 ns and 100 ns

经计算,目标的归一化回波幅值比为 1.03,接近于 1。20 m 能见度烟雾干扰的归一化回波幅值比为 3.35。

实验结果表明,在探测系统带宽足够的情况下,

使用宽窄脉冲序列进行探测时,目标的归一化回波幅值比接近于 1。而烟雾干扰的散射特性与脉冲宽度息息相关,在 20 m 能见度干扰条件下,其归一化回波幅值比为 3.35。由于归一化过程中存在量化误差,且仿真中使用的烟雾干扰参数与实际产生的烟雾干扰参数并不完全一致,实验过程中引入误差,实际测试的烟雾干扰回波幅值比小于理论计算的结果,但使用该方法得到的烟雾干扰归一化回波幅值比和目标依然有显著区别。利用该特性可以有效地识别目标和烟雾干扰,方法切实有效。

## 4 结 论

文中从理论上分析了目标和云雾对不同宽度脉冲激光的响应情况,仿真计算了在不同云雾特性下脉冲宽度分别为 100 ns、50 ns、20 ns 和 10 ns 条件下回波功率的变化曲线,得到了在不同云雾特性下,脉冲宽度越小,回波功率越小,后向散射的回波功率随着脉冲宽度的增加而明显增加的结论。在此基础上计算了不同脉冲宽度下目标和云的归一化回波幅值比,并通过实验证明了使用宽窄激光脉冲组成序列脉冲串进行探测,利用两者之间的归一化幅值比区分出目标和云干扰的可行性。该方法可以有效地识别目标和云雾干扰,有助于提升激光引信的抗云雾干扰性能。

## 参考文献:

- [1] Chen Nianjiang. Review of 3D laser imaging technology [J]. *Laser & Infrared*, 2015, 45(10): 1152–1156. (in Chinese)
- [2] Wang Xiaojun, Ma Heng, Zhang Shunfa. Laser gray imaging fuze technology for air-to-air missile [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2018, 47(3): 0303002. (in Chinese)
- [3] Chen Huimin, Li Ping, Zhang Yingwen. Research on laser fuze technology based on MEMS/MOEMS[C]// Proc of SPIE, 2007, 6724: 1-5.
- [4] Ren Hongguang, Yu Haishan, Huo Lijun, et al. Anti-interference of dual-wavelength laser fuze [J]. *Journal of Detection & Control*, 2015, 37(1): 1–4. (in Chinese)
- [5] Zhang Haojun, Zhao Jianlin. GaN-based blue-violet laser diodes used in anti-interfere from fog for proximity-fuze [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2011, 38(7): 0702007. (in Chinese)
- [6] Yang Ruoyu, Liang Qian, Yu Haishan. Study of novel anti-interference method for panoramic laser fuze based on the multi-threshold [J]. *Aero Weaponry*, 2014(3): 20–23. (in Chinese)
- [7] Wang Fengjie, Chen Huimin, Ma Chao, et al. Construction of backscattering echo caused by cloud in laser fuze [J]. *Optik*, 2018(171): 153–160.
- [8] Li Hanshan, Zhang Xiaoqian. Laser echo characteristics and detection probability calculation on the space projectile proximity fuze [J]. *Optik*, 2019(183): 713–722.
- [9] Zhang Jingguo, Liang Xiaogeng, Liu Jianxin, et al. Effect of pulse width on cloud-and -fog backscattering signal [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2012, 41(12): 1421–1426. (in Chinese)
- [10] 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)
- [11] Chen Shanshan, Zhang He, Xu Xiaobin. Echo characteristic of planar target in pulsed laser fuze detection [J]. *Acta Armamentarii*, 2018, 39(6): 1095–1102. (in Chinese)
- [12] Wang Hongxia, Zhu Youzhang, Tian Tao, et al. Characteristics of laser transmission in different types of aerosols [J]. *Acta Physica Sinica*, 2013, 62(2): 024214. (in Chinese)