

文章编号 1004-924X(2015)增-0001-07

脉冲激光引信云雾回波特性仿真

王凤杰, 陈慧敏*

(北京理工大学 机电动态控制重点实验室, 北京 100081)

摘要:针对脉冲激光引信易受云雾等自然环境的干扰而产生虚警的问题,研究了脉冲激光引信云雾回波特性。基于 Mie 散射理论,采用蒙特卡罗方法,建立了脉冲激光云雾传输模型,分别对脉冲激光引信和目标均处于云雾中以及目标处于云雾中而脉冲激光引信处于云雾外这两种情形下的云雾回波进行了仿真,获取了在引信与目标同处于云雾中而引信与目标距离为 10 m,能见度分别为 1,3,5,10 m 时的回波信号,以及当目标处于云雾中而脉冲激光引信处于云雾外,能见度为 3 m,引信与目标距离为 10 m,云雾边界分别为 0,1,3,5,7,9 m 时的动态回波特性。分析了云雾参数和位置对云雾回波的影响,以及云雾回波和目标回波的波形差异。该研究可为脉冲激光引信的抗云雾干扰研究提供相应的理论支持。

关键词:脉冲激光引信;云雾回波;蒙特卡罗法;仿真

中图分类号:TJ430.68 文献标识码:A doi:10.3788/OPE.20152313.0000

Simulation of characteristics of cloud and fog echo for pluse laser fuze

WANG Feng-jie, CHEN Hui-min*

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

* *Corresponding author, E-mail:laserchm@126.com*

Abstract: Pulse laser fuze is susceptible to the interference of natural environment, such as cloud and fog, and easy to produce a false alarm. Therefore, this paper researches the cloud and fog echo characteristics of the pulse laser fuze. On the basis of Mie scattering theory, a pulse laser transmission model for the cloud and fog is established by using Monte Carlo simulation. The cloud and fog echoes in two conditions are simulated. The first condition is that both pulse laser fuze and target are in the inside of cloud and fog, and the other is that the target is in the inside of cloud and fog and the pulse laser fuze in the outside. At the first condition, the echo signals are acquired when the distance between pulse laser fuze and target is 10 m and the visibility are 1,3,5 and 10 m, respectively. At the second condition, the dynamic echo characteristics are obtained when the distance between pulse laser fuze and target is 10 m, the visibility is 3 m and the cloud and fog boundaries are 0,1,3,5,7 and 9 m, respectively. Moreover, it analyzes the influences of cloud and fog parameters and position, on the cloud and fog echo, and the waveform difference of cloud and fog echo and target echo. This research provides the theoretical support for the anti-interference of pulse laser fuzes.

Key words: pulse laser fuze; cloud and fog echo; Monte Carlo method; simulation

收稿日期:2015-06-09;修订日期:2015-06-25.

基金项目:北京理工大学机电动态控制重点实验室基金资助项目(No.9140C360202130C36129)

1 引言

脉冲激光引信伴随着半导体技术和激光技术的发展而快速发展,目前已经实现工程化,但它易受云雾等自然环境的干扰而产生虚警。脉冲激光引信的云雾回波特性是脉冲激光引信抗云雾干扰研究的前提条件,也是后续信号处理的依据。

关于激光引信云雾回波特征及其抗干扰技术,相关单位开展了大量研究工作。张辉等^[1]提出了一种基于蒙特卡罗法的激光引信回波信号仿真技术。高宠、张京国等^[2-6]基于蒙特卡罗法,研究了激光引信结构特征和脉冲信号特征对云雾回波信号的影响。王广生^[7]提出了云雾后向散射信号的数学模型,论述了光子在一次散射和多次散射时对回波信号的影响。沈娜等^[8]建立了水雾对激光光束的传输衰减模型,计算了不同能见度下的水雾衰减系数。刘斌^[9]提出了解决激光引信目标识别及抗云雾、目标尾气和阳光干扰的措施和方法。张翼飞等^[10]提出将时变增益控制、距离选通、多停止脉冲计数、脉宽测量及逻辑判别等多项关键技术结合起来,应用于弹道导弹激光引信抗云层干扰的研究。宋磊等^[11]设计出了一种多重处理、软硬结合的激光引信,用于某型空空导弹激光引信的抗云烟干扰。宋雪平等^[12]进行了云雾对激光后向散射的理论分析和实验。杨若愚等^[13]提出了一种基于多门限的周视激光引信抗干扰方法,在确定了云雾干扰和目标的回波特性的基础上,设计了一种能够应对云雾环境的抗干扰算法。孟祥盛^[14-15]、陈慧敏^[16]提出了基于偏振的抗云雾干扰方法。

本文基于 Mie 散射理论,采用蒙特卡罗方法,建立了脉冲激光云雾传输模型,研究了脉冲激光引信和目标均处于云雾中以及目标处于云雾中而脉冲激光引信处于云雾外两种情形下的脉冲激光引信的云雾回波特性。

2 脉冲激光引信云雾传输建模

脉冲激光引信云雾传输模型包括脉冲激光收发系统模型、云雾模型和光子传输模型。

2.1 脉冲激光收发系统模型

脉冲激光收发系统模型用于模拟脉冲激光发

射接收系统,涉及激光波长、峰值功率、发射光学系统束散角、接收光学系统尺寸、接收视场角、收发间距等特征。其中激光波长、发射光学系统束散角、接收光学系统尺寸、发射光学系统中心和接收光学系统中心之间的收发间距等参数在初始化中进行设定,峰值功率由系统发射的光子数量表示。

2.2 云雾模型

云雾模型用于模拟云雾环境,可以模拟云雾的能见度、粒径分布、粒子折射率等特征。

云雾粒径分布函数采用应用最广的 gamma 分布,其表达式为^[17]:

$$n(r) = ar^b \exp(-cr^d), \quad (1)$$

式中: $n(r)$ 为粒径分布函数, r 为粒子半径; a , b , c , d 为拟合参数,根据不同的云雾条件进行设定。

由于本文主要研究云雾粒子,因此云雾粒子折射率采用水的折射率。而水的折射率与激光波长存在对应关系,复折射率的表现形式为 $\tilde{m} = m(\lambda) - ik(\lambda)$,文献[18]中给出了波长为 905 nm 激光对应的水的折射率 $m(\lambda) = 1.328$, $k(\lambda) = 4.86 \times 10^{-7}$ 。

2.3 光子传输模型

光子传输模型用于模拟光子在云雾中的传输过程,核心参数包括散射自由程、散射相函数和单次散射比等。

2.3.1 散射自由程

光子在云雾中传输时与云雾粒子发生随机碰撞,从 Lambert-Beer 定律出发,定义光子两次碰撞间的距离为散射自由程,其表达式为^[19]:

$$\Delta s = -\frac{\ln \xi}{\mu_t}, \quad (2)$$

式中: ξ 为[0,1]上均匀分布的随机数, μ_t 为云雾衰减系数,表达式为^[20-21]:

$$\mu_t(\lambda) = \frac{3.912}{V} \cdot \left(\frac{\lambda}{0.55}\right)^{-q}, \quad (3)$$

式中: V 为能见度, λ 为波长, q 为经验系数。M. Naboulsi 等^[22]给出了 q 的分段函数:

$$q = \begin{cases} 1.6 & (V > 50 \text{ km}) \\ 1.3 & (6 \text{ km} < V < 50 \text{ km}) \\ 0.16V + 0.34 & (1 \text{ km} < V < 6 \text{ km}) \\ V - 0.5 & (0.5 \text{ km} < V < 1 \text{ km}) \\ 0 & (V < 0.5 \text{ km}) \end{cases} \quad (4)$$

2.3.2 散射相函数

散射相函数表征的是光子与云雾粒子碰撞后在各个方向的散射强度,用于光子与云雾粒子碰撞后的散射角抽样。非偏振状态下,散射相函数 $P(\theta)$ 的表达式为^[23]:

$$P(\theta) = \frac{|S_1(\theta)|^2 + |S_2(\theta)|^2}{\sum_{n=1}^{\infty} (2n+1)(|a_n|^2 + |b_n|^2)}, \quad (5)$$

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。根据 Mie 散射理论,其表达式分别为:

$$S_1(\theta) = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2n+1}{n(n+1)}(a_n\pi_n + b_n\tau_n), \quad (6)$$

$$S_2(\theta) = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2n+1}{n(n+1)}(a_n\tau_n + b_n\pi_n), \quad (7)$$

式中: π_n, τ_n 为散射角函数,用于描述散射振幅函数关于散射角 θ 的分布特征。

2.3.3 单次散射比

单次散射比表征的是光子与云雾粒子碰撞后的光子权重变化,表达式为:

$$\omega = \frac{Q_{sca}}{Q_{ext}}, \quad (8)$$

式中: Q_{sca} 为粒子散射系数, Q_{ext} 为消光系数。

粒子散射系数 Q_{sca} 和消光系数 Q_{ext} 的计算公式分别为:

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

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

3 脉冲激光引信云雾回波特性仿真

脉冲激光引信云雾回波特性的蒙特卡罗仿真流程如图 1 所示。

仿真中,发射信号波形为高斯脉冲:

$$A(t) = A_0 \exp\left(-\frac{(t-\tau)^2}{\delta^2}\right), \quad (11)$$

式中给定参数为: $A_0 = 1, \tau = 15 \text{ ns}, \delta = 5 \text{ ns}$ 。整个系统的仿真参数设定如表 1 所示。

根据脉冲激光引信和目标相对于云雾的位置关系,分两种情况进行云雾回波特性仿真。

3.1 脉冲激光引信和目标均处于云雾中

设定脉冲激光引信距目标 10 m,图 2 给出了引信与目标同处于云雾中时,能见度分别为 1,3,

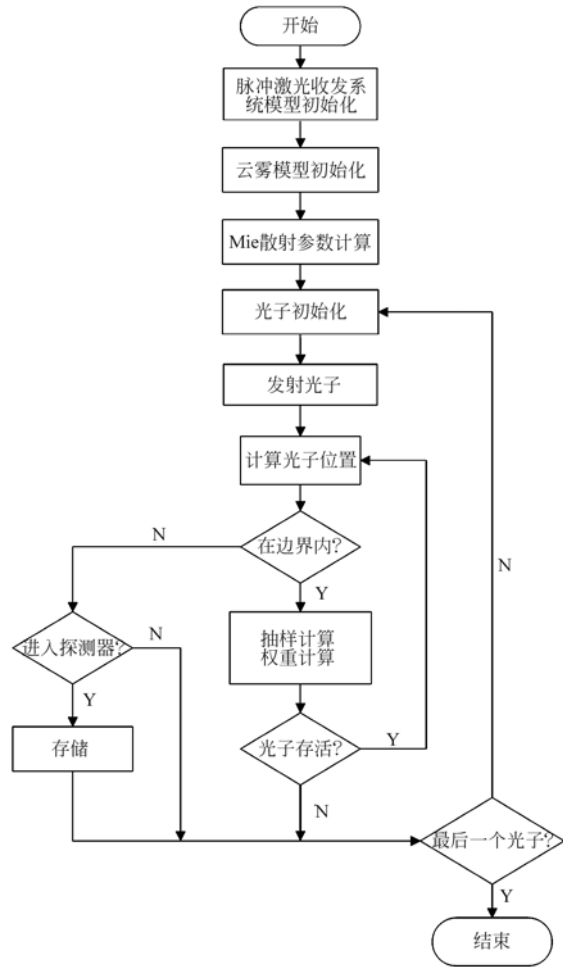


图 1 脉冲激光引信云雾回波特性仿真流程图

Fig.1 Flow chart of cloud and fog echo simulation for pulse laser fuze

表 1 仿真参数

Tab.1 Simulation parameters

系统参数	设定值	系统参数	设定值
中心波长/nm	905	收发间距/mm	25
发射系统直径/nm	10	峰值光子数	100 000
发射束散角/mrad	5	云雾能见度/mm	1 ~ 10
接收镜头直径/mm	30	目标表面	漫反射
接收视场角/mrad	21.4	目标距离/mm	10

5,10 mm 时的回波信号,图中回波信号幅度为归一化幅度。由图 2 可以看出,能见度越小,云雾回波幅值越大(相对于目标回波幅值);当能见度足够小,即云雾浓度足够大时,激光引信仅能接收到

云雾回波。对比云雾与目标的回波波形可见,云雾回波信号下降沿变缓,有明显的时域展宽现象,因此,可以通过波形分析区分云雾回波和目标回波。当引信和目标同处于云雾中时,云雾回波信号主要由近距云雾产生,因此,可以通过调整收发间距和视场角、增大近距盲区,来提高脉冲激光引信抗云雾干扰的能力。

3.2 目标处于云雾中而脉冲激光引信处于云雾外

图3给出了目标处于云雾中而脉冲激光引信处于云雾外时,脉冲激光引信的回波信号。仿真条件为:能见度 $V=3\text{ m}$,目标距离 10 m ,云雾边界 D_{Cloud} 分别为 $0, 1, 3, 5, 7, 9\text{ m}$ 。由图3可以看出,云雾回波信号主要由边界附近的云雾产生。

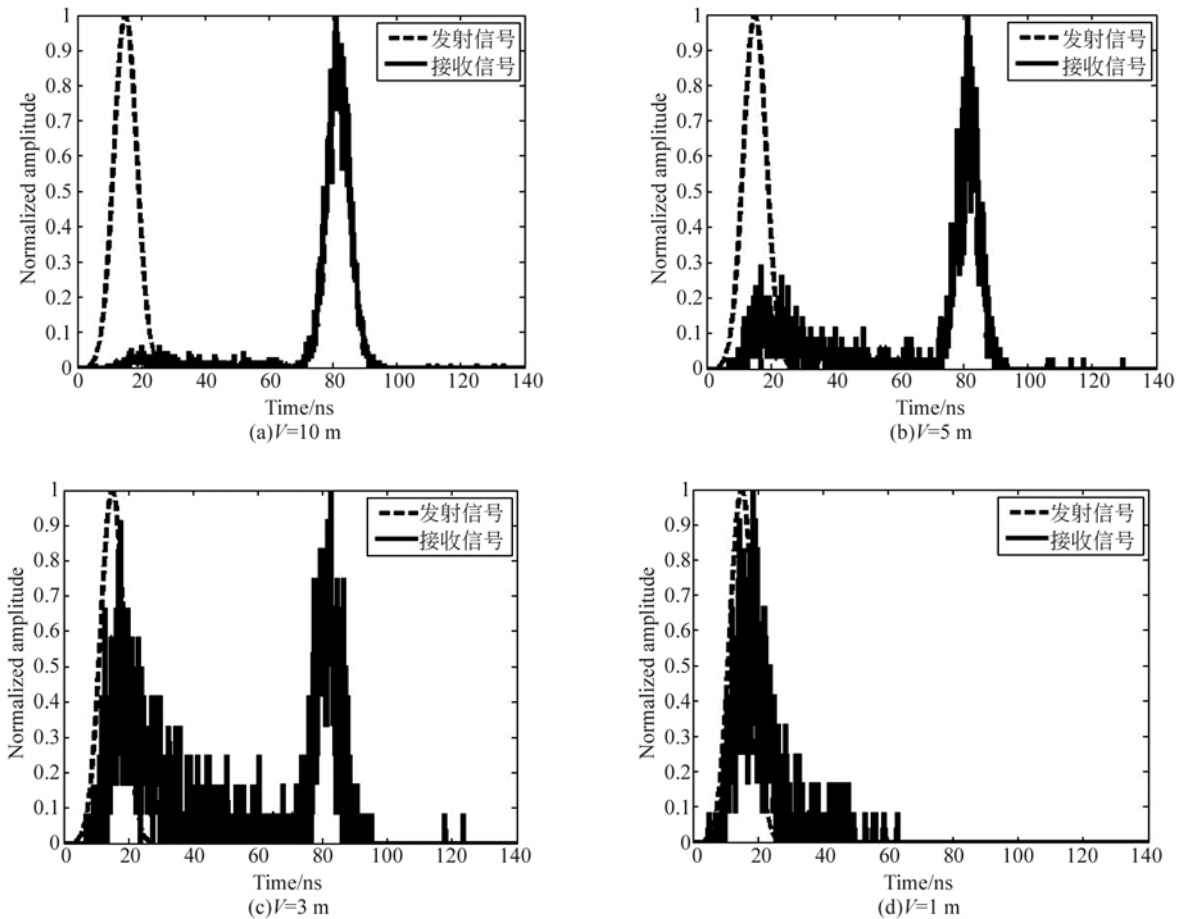
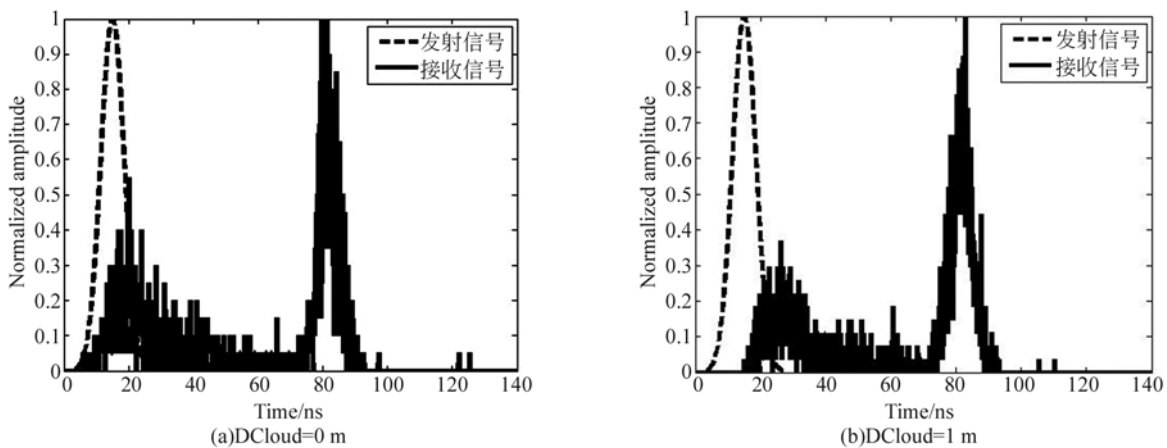


图2 脉冲激光引信和目标均处于云雾中时的回波信号

Fig.2 Echo when pulse laser fuze and target inside cloud and fog



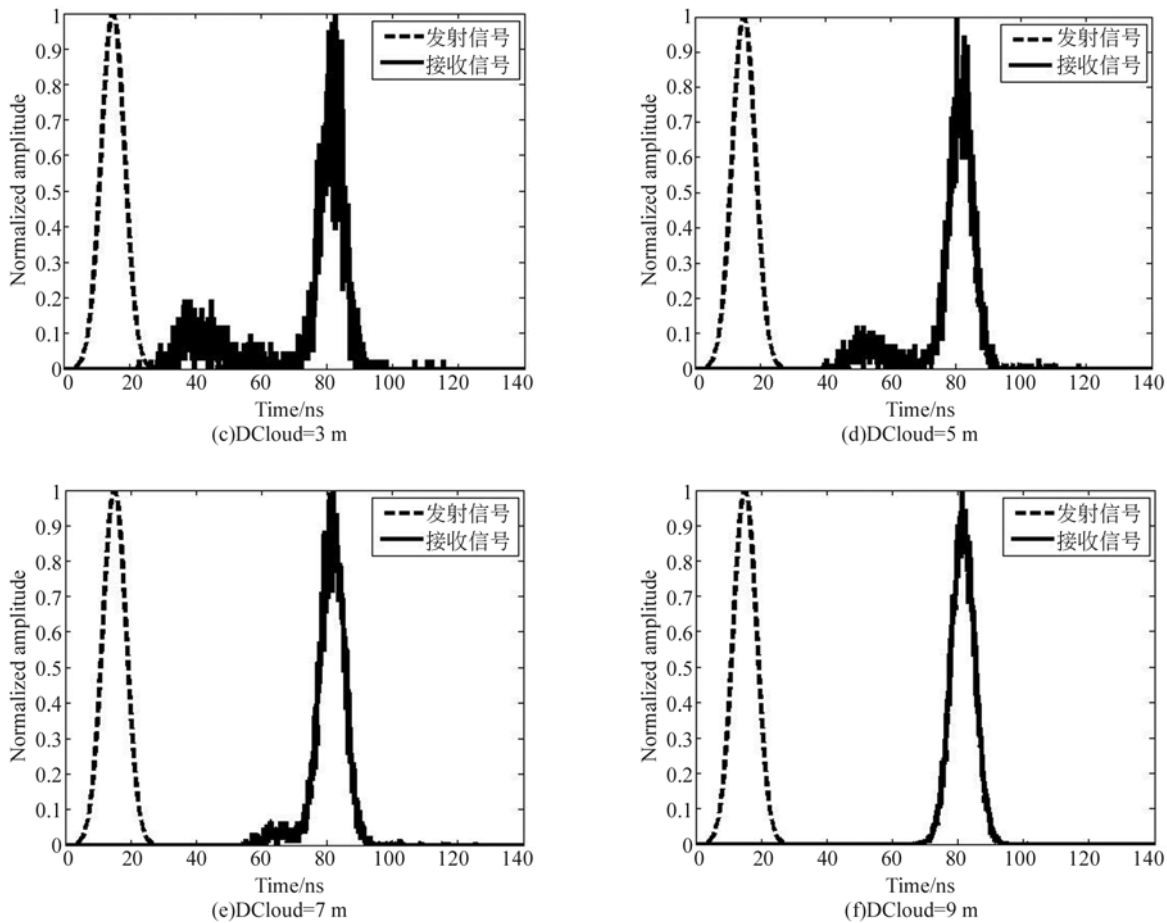


图3 目标处于云雾中而脉冲激光引信处于云雾外时的回波信号

Fig. 3 Echo when target inside cloud and fog and pulse laser fuze in the outside

4 结论

本文基于 Mie 散射理论,采用蒙特卡罗法,建立了脉冲激光云雾的传输模型。当引信与目标同处于云雾中时,引信与目标距离 10 m 的条件下,仿真得到了能见度分别为 1, 3, 5, 10 m 时的回波

信号,得出了能见度越小,云雾回波幅值越大(相对于目标回波幅值)的结论。当目标处于云雾中而脉冲激光引信处于云雾外时,仿真得到了在能见度为 3 m,引信与目标距离 10 m,云雾边界分别为 0, 1, 3, 5, 7, 9 m 时的动态回波特性。该研究可为脉冲激光引信的抗云雾干扰研究提供理论支持。

参考文献:

- [1] 张辉,王涌天.一种基于蒙特卡罗法的激光引信回波信号仿真技术[J].系统仿真学报,2004,16(8):1624-1629.
ZHANG H, WANG Y T. A Monte-Carlo based back-scattering signal simulation for laser fuze[J]. *Journal of System Simulation*, 2004, 16(8): 1624-1629. (in Chinese)

- [2] 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.
GAO CH, LIU J X, ZHANG J G, *et al.*. Monte-Carlo based backscattering signal of clouds and fogs for laser fuze[J]. *Aero Weaponry*, 2008(3): 50-53. (in Chinese)
- [3] 张京国,高宠,刘建新,等.近距云雾回波蒙特卡罗模拟与实验测量[J].强激光与粒子束,2012,24(12):2920-2924.

- ZHANG J G, GAO CH, LIU J X, *et al.*. Monte Carlo simulation and experimental study on cloud-and-fog backscattering signals[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2012, 24(12): 2920-2924. (in Chinese)
- [4] 张京国, 刘建新, 牛清坡, 等. 近距云雾散射激光回波特征[J]. 探测与控制学报, 2012, 34(5): 1-4. ZHANG J G, LIU J X, NIU Q P, *et al.*. Characters of cloud and fog backscattering of laser[J]. *Journal of Detection&Control*, 2012, 34(5): 1-4. (in Chinese)
- [5] 张京国, 梁晓庚, 刘建新, 等. 激光引信收发间距对云雾回波的影响[J]. 探测与控制学报, 2012, 34(6): 1-5. ZHANG J G, LIANG X G, LIU J X, *et al.*. Cloud and fog backscattering laser signal affected by baseline distance [J]. *Journal of Detection&Control*, 2012, 34(6): 1-5. (in Chinese)
- [6] 张京国, 梁晓庚, 刘建新, 等. 脉冲宽度对云雾回波的影响研究[J]. 光子学报, 2012, 41(12): 1421-1426. ZHANG J G, LIANG X G, LIU J X, *et al.*. Effect of pulse width on cloud-and-fog backscattering signal [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2012, 41(12): 1421-1426. (in Chinese)
- [7] 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. WANG G SH. Characteristics and discrimination of cloud backscatter for laser fuze [J]. *Journal of Detection & Control*, 2006, 28(6): 20-24. (in Chinese)
- [8] 沈娜, 张祥金, 郭靖. 水雾对激光引信的衰减[J]. 光学精密工程, 2013, 21(4): 864-869. SHEN N, ZHANG X J, GUO J. Attenuation of laser fuse through fog [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2013, 21(4): 864-869. (in Chinese)
- [9] 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. LIU B. System design of target identification and anti-jamming with laser-fuze [J]. *Journal of Detection & Control*, 2005, 27(3): 20-25. (in Chinese)
- [10] 张翼飞, 邓方林, 陈卫标. 弹道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. ZHANG Y F, DANG F L, CHEN W B. Key technologies of anti-interference of clouds for ballistic missile's laser fuze [J]. *Journal of Detection&Control*, 2004, 26(3): 29-33. (in Chinese)
- [11] 宋磊, 陈少华. 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, 2006, 27(4): 153-156. SONG L, CHEN SH H. Technologies of anti-interference of clouds and smog for air-to-air missile's laser fuze [J]. *Daodan Yu Zhidao Xuebao*, 2006, 27(4): 153-156. (in Chinese)
- [12] 宋雪平, 贾晓东, 章一凡, 等. 云雾对激光后向散射特性试验研究[J]. 红外与激光工程, 2010, 39(2): 260-265. SONG X P, JIA X D, QIN Y F, *et al.*. Experiment research on laser backscattering characteristic of fog [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2010, 39(2): 260-265. (in Chinese)
- [13] 杨若愚, 梁谦, 于海山. 一种基于多门限的周视激光引信抗干扰方法研究[J]. 航空兵器, 2014(3): 20-23. YANG R Y, LIANG Q, YU H SH, *et al.*. Study of novel anti-interference method for panoramic laser fuze based on the multi-threshold [J]. *Aero Weaponry*, 2014(3): 20-23. (in Chinese)
- [14] 孟祥盛. 基于偏振探测的激光引信[J]. 航空兵器, 2008(1): 42-44. MENG X SH. A laser fuze based on polarization detection [J]. *Aero Weaponry*, 2008(1): 42-44. (in Chinese)
- [15] 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. MENG X SH. Applications of the polarization detection in laser fuse anti-environmental interference [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42(7): 1716-1719. (in Chinese)
- [16] 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. CHEN H M, LIU X Y. Backscattering polarization characteristics of pulsed laser fuze with coaxial optical system with water fog [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2015, 23(3): 626-631. (in Chinese)
- [17] E. J. 迈卡特尼. 大气光学[M]. 北京: 科学出版社, 1988. MCCARTNE E J. *Optics of the Atmosphere* [M]. Beijing: Science Press, 1988. (in Chinese)
- [18] HALE G M, QUERRY M R. Optical constants of water in the 200 nm to 200 μm wavelength region [J]. *Appl. Opt.*, 1973, 12(3): 555-563.
- [19] WITT A N. Multiple scattering in reflection nebulae

- I: A monte carlo approach [J]. *Astophys. J. Suppl. Ser.*, 1977, 35:1-6.
- [20] KRUSE P W. *Elements of Infrared Technology: Generation, Transmission, and Detection* [M]. New York: John Wiley and Sons, 1962.
- [21] KIM I I, MCARTHUR B, KOREVAAR E J. Comparison of laser beam propagation at 785 nm and 1550 nm in fog and haze for optical wireless communications[J]. *SPIE*, 2001, 4214: 26-37.
- [22] NABOULSI M A, SIZUM H. Fog attenuation prediction for optical and infrared waves[J]. *Opt. Eng.*, 2004, 43:319-329.
- [23] MISHCHENKO M I, MACKOWSKI D W, TRAVIS L D. Scattering of light by bispheres with touching and separated components [J]. *Appl. Opt.*, 1995, 34(21):4589-4598.

作者简介:



王凤杰(1989-),男,山东临沂人,博士研究生,2014年于山东农业大学获得硕士学位,主要从事激光引信抗干扰的研究。E-mail:bitwfi@163.com

通讯作者:



陈慧敏(1973-),男,河北临城人,副教授,1998年、2005年于北京理工大学分别获得学士、博士学位,主要从事激光引信抗干扰的研究。E-mail: laserchm@126.com