

相干激光引信在云雾干扰下的回波特性研究

王凤杰, 刘锡民, 陆长平

(上海无线电设备研究所, 上海 201109)

摘要: 为分析相干激光引信在云雾干扰下的探测性能, 基于 Mie 散射理论和 Monte Carlo 方法建立了相干激光引信在云雾中的探测模型, 仿真获取相干激光引信在多种云雾干扰场景下的探测回波, 分析回波信号的时域和频域特性, 以及云雾能见度、探测位置和探测角度对回波特性的影响。研究结果表明, 相干激光引信可利用回波频域特征准确探测和识别目标, 且不易受云雾能见度、探测位置和探测角度等因素的影响。结果证明: 相干激光引信在云雾干扰下具有优良的探测性能。

关键词: 相干激光引信; 云雾; 回波特性; 仿真

中图分类号: TJ43⁺9.2 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA202049.0403006

Study on echo characteristics of coherent laser fuze in cloud and fog

Wang Fengjie, Liu Ximin, Lu Changping

(Shanghai Radio Equipment Research Institute, Shanghai 201109, China)

Abstract: In order to analyze the performance of coherent laser fuze under cloud and fog interference, the detection model of coherent laser fuze in cloud and fog was created based on Mie scattering theory and Monte Carlo method. Through simulation, the echoes of coherent laser fuze were obtained in various scenes. The time-domain and frequency-domain characteristics of echoes were analyzed, as well as the influence of cloud and fog visibility, detection position, and detection angle on echoes. The results show that the coherent laser fuze can accurately identify the target by using the frequency-domain characteristics, and is not easily affected by factors such as cloud and fog visibility, detection position, and detection angle. The results demonstrate the excellent detection performance of coherent laser fuze in cloud and fog.

Key words: coherent laser fuze; cloud and fog; echo characteristics; simulation

收稿日期: 2020-01-02; 修订日期: 2020-02-20

作者简介: 王凤杰 (1989-), 男, 工程师, 博士, 主要从事激光引信技术方面的研究。Email: bitwfj@163.com

0 引言

如何提高抗云雾干扰能力,降低在云雾环境中的虚警,是对空武器平率和漏警率台激光引信亟待解决的一大难题^[1]。目前已有多种技术方案尝试解决这一难题,如双色激光探测技术利用云雾对不同波长激光散射特性的差异来识别干扰^[2-3]、复合体制探测技术通过引入对云雾干扰不敏感的探测体制来提高抗干扰能力^[4]、超窄脉冲技术通过降低云雾后向散射强度来削弱干扰^[5]、相干探测技术利用速度特性进行目标与干扰的识别^[6]等。

上述技术方案中,相干激光引信技术是基于激光相干探测原理,将目标反射回来的信号光和由本振激光器输出的本振光进行相干混频,获取回波信号的振幅、频率和相位等信息,实现对目标的探测与识别^[6]。董骁^[7]建立仿真模型,数值模拟了 4 种典型气溶胶对相干激光雷达的回波特性。刘波^[8]搭建测试平台开展了相干激光雷达测速试验,分析了相干激光雷达的测速精度,并提出了多项优化方法。上述研究的对象均为远距离探测的激光雷达,其结论不一定适用于近距探测的激光引信。

因此,建立仿真模型,开展相干激光引信在云雾干扰环境下的探测回波特性研究,分析其抗云雾干扰性能。

1 相干激光引信探测模型

相干激光引信原理框图如图 1 所示。激光器发射的激光通过分束器件分为两路:一路作为探测光,通过发射光学系统发射到外界中探测目标;另一路则作为本振光,与回波光进行相干混频。探测光回波通过接收光学系统返回引信内部,与本振光合束后送入光电探测器中,利用光电探测器的平方律探测特性得到包含目标信息的相干差频信号,并由信号处理系统

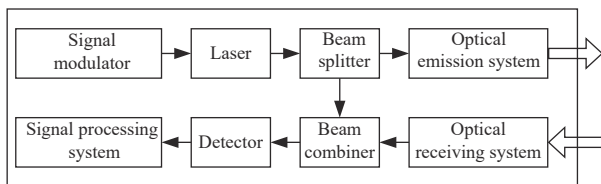


图 1 相干激光引信原理框图

Fig.1 Schematic diagram of coherent laser fuze

解算出目标的距离、速度等信息。

根据相干激光引信的工作原理,建立相干激光引信探测模型,具体包括激光发射模型、激光在云雾中的传输模型、目标散射模型和激光接收模型。

1.1 激光发射模型

相干激光引信中,激光器发射的激光在时域上为固定幅度连续信号,在频域上为三角波信号,表达式为:

$$f = \begin{cases} f_{\min} + \frac{2(f_{\max} - f_{\min})}{T}t, & 0 < t \leq \frac{T}{2} \\ f_{\max} - \frac{2(f_{\max} - f_{\min})}{T}t, & \frac{T}{2} < t \leq T \end{cases} \quad (1)$$

式中: f_{\max} 为频域信号的上限值; f_{\min} 为频域信号的下限值; T 为频域信号周期。

激光器发射的激光被分为探测光与本振光,其功率分别为:

$$\begin{cases} P_{RF} = RP_{trans} \\ P_{LO} = (1 - R)P_{trans} \end{cases} \quad (2)$$

式中: P_{RF} 为探测光功率; P_{LO} 为本振光功率; P_{trans} 为激光器发射的功率; R 为探测光的分光比。

探测光通过光学系统发射到外界环境中进行探测,光子发射位置为^[9]:

$$\begin{cases} x_t = w_0\xi_1 \\ y_t = w_0\xi_2 \\ z_t = 0 \end{cases} \quad (3)$$

式中: w_0 为激光束腰半径。光子发射方向为^[10]:

$$\begin{cases} u_{xt} = \sin\theta_t \cos\varphi_t \\ u_{yt} = \sin\theta_t \sin\varphi_t \\ u_{zt} = \cos\theta_t \end{cases} \quad (4)$$

式中: θ_t 为光子发射方向天顶角; φ_t 为光子发射方向方位角。

1.2 激光在云雾中的传输模型

在云雾中,根据粒子粒径分布抽样确定碰撞粒子的粒径。其中,云雾粒径分布函数为^[11]:

$$N(r) = ar^\alpha \exp(-br^\beta) \quad (5)$$

式中: r 为云雾粒径; a 、 b 、 α 和 β 为分布参数。

光子与粒子碰撞后的能量变为^[12]:

$$E_{as} = \frac{Q_{sca}}{Q_{ext}} E_{bs} \quad (6)$$

式中: E_{bs} 为散射前的光子能量; Q_{sca} 为粒子的散射系数; Q_{ext} 为粒子的消光系数,表达式为^[13]:

$$Q_{sca} = \frac{2}{x^2} \sum_{n=1}^{\infty} (2n+1)(|a_n|^2 + |b_n|^2) \quad (7)$$

$$Q_{ext} = \frac{2}{x^2} \sum_{n=1}^{\infty} (2n+1)\text{Re}(a_n + b_n) \quad (8)$$

式中: x 为粒子尺寸参数; a_n 、 b_n 为 Mie 散射系数。

光子与云雾粒子碰撞散射后的移动方向变为^[14]:

$$\begin{cases} u'_{xs} = \frac{\sin\theta_{sca}}{\sqrt{1-u_{zs}^2}}(u_{xs}u_{zs}\cos\varphi_{sca} - u_{ys}\sin\varphi_{sca}) + u_{xs}\cos\theta_{sca} \\ u'_{ys} = \frac{\sin\theta_{sca}}{\sqrt{1-u_{zs}^2}}(u_{ys}u_{zs}\cos\varphi_{sca} + u_{xs}\sin\varphi_{sca}) + u_{ys}\cos\theta_{sca} \\ u'_{zs} = -\sin\theta_{sca}\cos\varphi_{sca}\sqrt{1-u_{zs}^2} + u_{zs}\cos\theta_{sca} \end{cases} \quad (9)$$

当 $|u_{zs}| > 0.99999$ 时, 公式 (9) 调整为:

$$\begin{cases} u'_{xs} = \sin\theta_{sca}\cos\varphi_{sca} \\ u'_{ys} = \sin\theta_{sca}\sin\varphi_{sca} \\ u'_{zs} = u_{zs}/|u_{zs}| \cdot \cos\theta_{sca} \end{cases} \quad (10)$$

式中: φ_{sca} 为散射方位角; θ_{sca} 为散射天顶角, 根据 Mie 散射相函数抽样确定^[15]:

$$P_{Mie}(\theta_{sca}) = \frac{|S_1(\theta_{sca})|^2 + |S_2(\theta_{sca})|^2}{\sum_{n=1}^{\infty} (2n+1)(|a_n|^2 + |b_n|^2)} \quad (11)$$

式中: $S_1(\theta)$ 、 $S_2(\theta)$ 为散射振幅函数。

与粒子碰撞后的光子沿着新方向继续移动, 移动距离为^[16]:

$$\Delta s = -\frac{\ln\xi}{\mu_t} \quad (12)$$

式中: μ_t 为云雾衰减系数。

1.3 目标散射模型

当光子在移动过程中遭遇目标, 会被目标散射从而改变方向和能量。平面目标对光子的散射方向为:

$$\begin{cases} u'_{xr} = \sin\theta_{ref}\cos\varphi_{ref} \\ u'_{yr} = \sin\theta_{ref}\sin\varphi_{ref} \\ u'_{zr} = \cos(\pi - \theta_{ref}) \end{cases} \quad (13)$$

式中: φ_{ref} 为散射方位角; θ_{ref} 为散射天顶角。当目标为朗伯散射体时, φ_{ref} 为 $[0, 2\pi]$ 区间上的均匀分布随机数, θ_{ref} 根据目标在各方向的散射强度抽样确定, 朗伯反射体沿各方向的散射强度为:

$$P_t(\theta_{ref}) = \cos\theta_{ref} \quad (14)$$

目标散射后的光子能量变为:

$$E_{ar} = \eta_t E_{br} \quad (15)$$

式中: E_{br} 为目标散射前的光子能量; η_t 为目标反射率。

1.4 激光接收模型

若光子在散射后被引信接收, 根据公式 (16) 计算光子的飞行时间, 根据公式 (17) 计算光子的光频。

$$t = \frac{L}{c} \quad (16)$$

式中: L 为光子的飞行距离; c 为光速。

$$f_{rec} = f_{trans} + \frac{2v}{\lambda} \cos\theta \quad (17)$$

式中: f_{trans} 为光子发射时的光频; λ 为激光波长; v 为散射体 (目标或云雾) 的移动速度; θ 为散射体移动方向与光子飞行方向之间的夹角。

统计引信接收的全部光子的飞行时间和光频, 得到回波光时的域信号和频域信号。将回波光与本振光进行相干混频, 混频后的相干信号能量为:

$$E = 2\sqrt{E_{echo}E_{LO}} \quad (18)$$

式中: E_{echo} 为回波光的能量; E_{LO} 为本振光的能量。相干信号的频率为:

$$f_{IF} = f_{RF} - f_{LO} \quad (19)$$

式中: f_{RF} 为回波光的光频; f_{LO} 为回波光接收时的本振光光频。

2 相干激光引信回波特性仿真与分析

2.1 引信位于云雾内部时的回波特性

在引信位于云雾内部的场景中, 目标为一块反射率 0.3 的朗伯体平板, 位于云雾内部, 与引信相向飞行, 飞行速度为 340 m/s, 脱靶距离为 5 m; 云雾粒径范围为 0.1 ~ 50 μm , 能见度分为 10、30、50 和 80 m 四档, 以 20 m/s 的速度与目标同向移动; 引信以 60° 倾角 (探测光束与弹体之间的夹角) 发射波长为 1 550 nm 的激光对目标进行探测, 激光束在子午方向和弧矢方向的发散角均为 5 mrad, 激光发射与接收共用一套光学系统, 孔径为 25.4 mm, 子午方向和弧矢方向的接收视场角均为 21 mrad。仿真主要参数值如表 1 所示, 仿真场景如图 2 所示。

表 1 引信位于云雾内部时的主要仿真参数值

Tab.1 Main parameters of model when the fuze is located cloud and fog

Simulation parameters	Value	Simulation parameters	Value
Dip angle of fuze/(°)	60	Laser wavelength/nm	1 550
Laser divergence angle/mrad	5	Receiving field angle/mrad	21
Visibility of cloud and fog/m	10, 30 50, 80	Optical lens diameter/mm	25.4
Particle diameter of cloud and fog/ μm	0.1-50	Speed of cloud and fog/ $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	20
Complex index of refraction	$1.317-8.55\times 10^{-5}i$	Target distance/m	5
Target reflectivity	0.3	Target speed/ $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	340

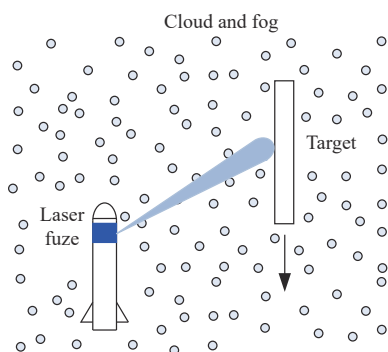
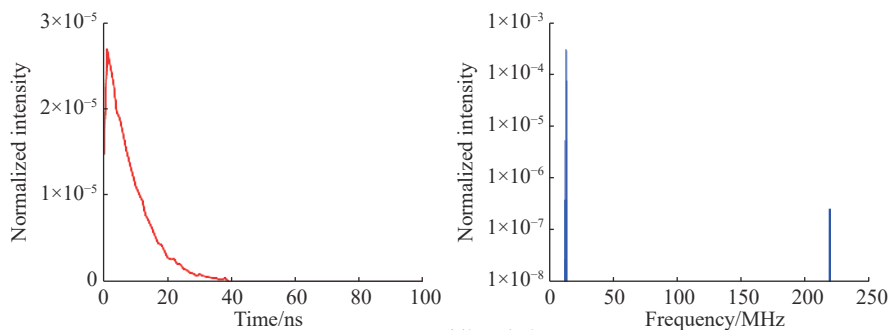


图 2 引信位于云雾内部时的仿真场景示意图

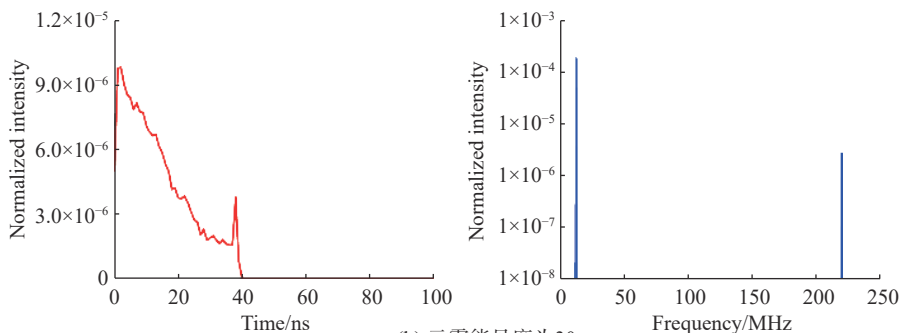
Fig.2 Schematic diagram of simulation scene when the fuze is inside cloud and fog

当云雾能见度分别为 10、30、50 和 80 m 时，相干激光引信接收到的回波信号的时域波形与频域

波形如图 3 所示。观察图 3 中的时域波形，当云雾能见度为 10 m 时，目标回波完全被云雾回波淹没，回波信号无法反映引信周围的目标与环境状态；当云雾能见度依次增大至 30、50 和 80 m 时，目标回波逐渐增强，回波信号呈现出双波峰特征，但是考虑到体目标也可能产生此类回波，因此引信依然无法根据回波信号进行准确判断。再观察图 3 中的频域波形，四种能见度条件下的回波信号在频域上均出现了两个清晰的点频信号：第一个点频信号位于 13 MHz 处，是由云雾回波形成的；第二个点频信号位于 219 MHz 处，显然是由目标回波形成的；目标回波与云雾回波在频域上差异明显，极易分辨。上述结果表明，在低能见度环境和低信噪比条件下，相干激光引信可以利用频域特征准确识别出目标和云雾。



(a) 云雾能见度为 10 m
(a) Visibility of cloud and fog is 10 m



(b) 云雾能见度为 30 m
(b) Visibility of cloud and fog is 30 m

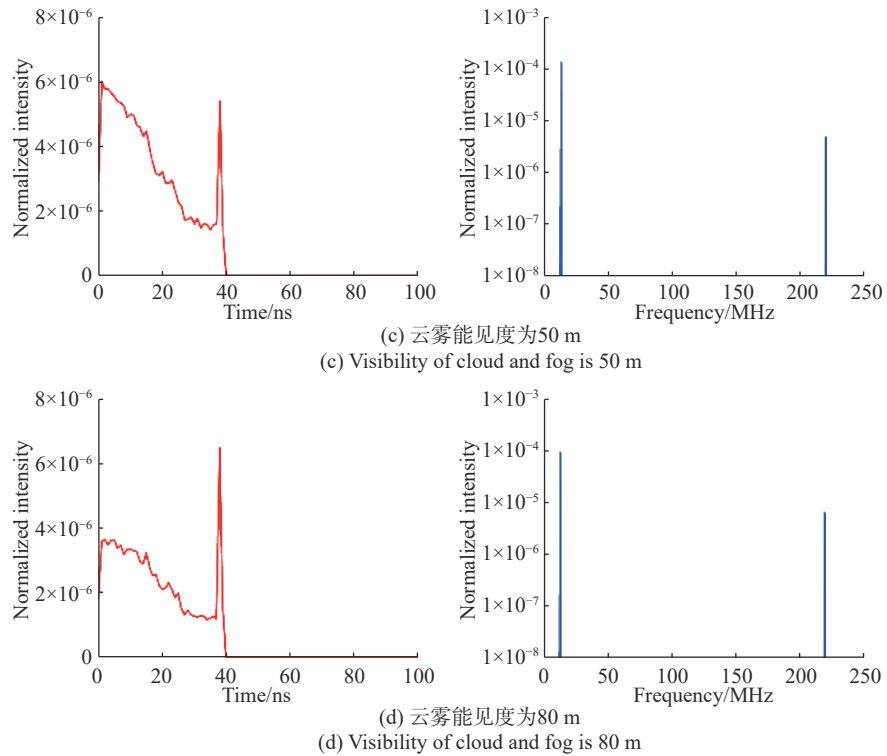


图 3 引信位于云雾内部时相干回波信号的时域波形与频域波形

Fig.3 Time-domain waveform and frequency-domain waveform of echoes when the fuze inside cloud and fog

2.2 引信位于云雾外部时的回波特性

在引信位于云雾外部的场景中, 云雾边界距离引信 5 m, 目标脱靶距离为 10 m, 其余状态与引信位于云雾内部时的场景相同。仿真场景如图 4 所示。

图 5 为四种云雾能见度条件下, 相干激光引信位于云雾外部时回波信号的时域波形和频域波形。图 5 中的结果与图 2 相比, 引信回波信号的时域波形在时刻、幅度等方面均发生了变化, 而频域波形只有信号幅度出现了一些变化, 频点位置未发生改变。上述结果表明, 引信、目标和云雾之间的位置关系, 不会影响相干激光引信对目标和云雾的准确识别。

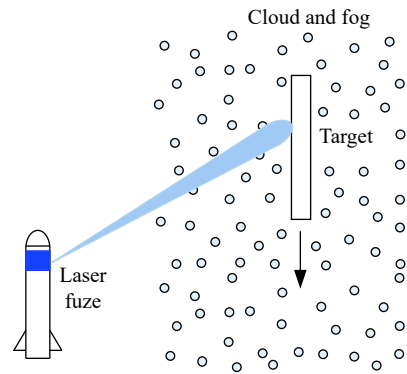
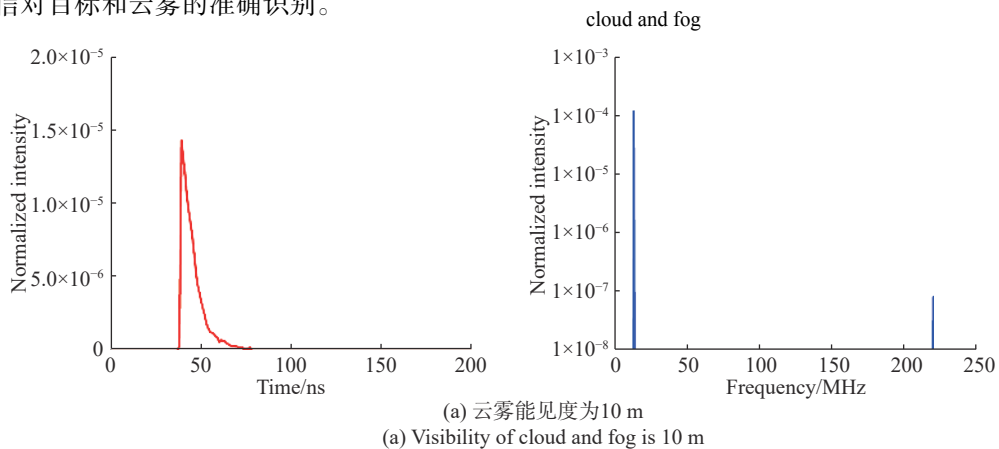


图 4 引信位于云雾外部时的仿真场景示意图

Fig.4 Schematic diagram of simulation scene when the fuze is outside



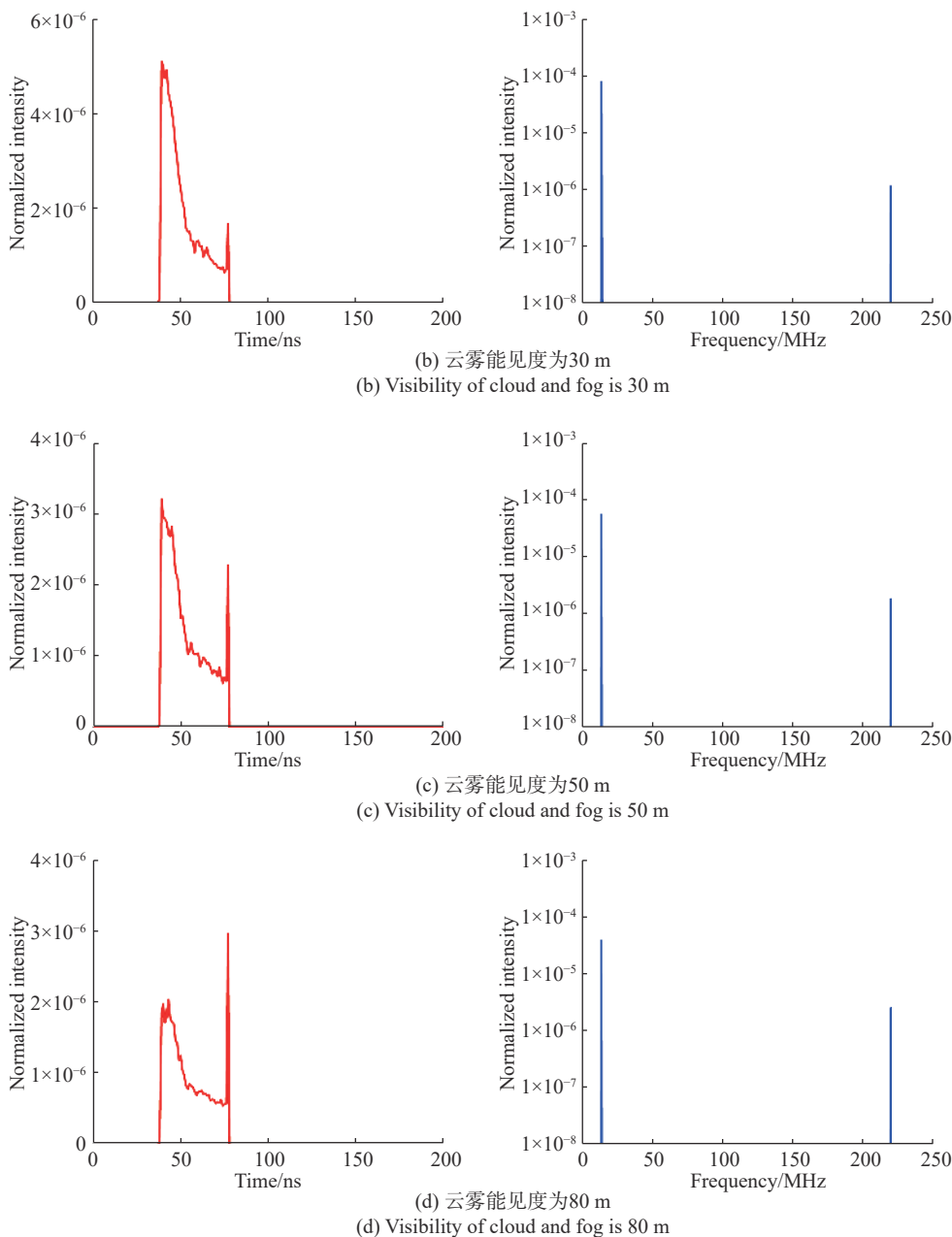


图 5 引信位于云雾外部时相干回波信号的时域波形与频域波形

Fig.5 Time-domain waveform and frequency-domain waveform of echoes when the fuze outside cloud and fog

2.3 不同探测角度时的回波特性

探测角度是指引信发射的激光束与目标飞行方向之间的夹角, 其对引信回波的频域特征具有重要影响。当目标飞行速度为 340 m/s 时, 目标回波频移与与探测角度的关系如图 6 所示, 图中阴影区域为云雾移动速度 20 m/s 时的云雾回波频移范围。观察图 6, 当探测角度为 0°或 180°, 即探测光束与目标飞行方向平行时, 目标回波的频移量最大, 为 438.7 MHz; 当探测角度为 90°, 即探测光束与目标飞行方向垂直时, 目

标回波的频移量最小, 为 0 Hz。当探测角度在 86.6° ~ 93.4°这一狭窄区间时, 目标回波的频移落入云雾回波频移范围 (0 ~ 25.8 MHz) 内, 即目标回波与云雾回波可能在频域发生混叠, 导致引信无法准确区分目标与云雾; 而在其他区间内, 目标回波的频移均超过了云雾回波频移最大值, 即目标回波与云雾回波在频域上区分明显, 引信可准确识别出目标。上述结果表明, 在绝大部分探测角度下, 相干激光引信可利用频域特征区分出目标与云雾。

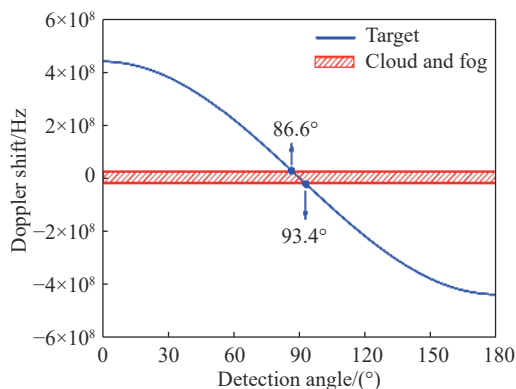


图 6 目标回波频移与探测角度之间的关系

Fig.6 Relationship between target Doppler shift and detection angle

3 结 论

文中建立相干激光引信在云雾中的探测模型, 仿真研究了多种因素影响下相干激光引信在云雾干扰环境中探测回波的时域特性和频域特性研究结果表明: (1) 相干激光引信的目标回波与云雾回波在频域上差异明显, 引信可利用这一特征准确识别目标和云雾; (2) 云雾能见度、探测位置和探测角度等因素对相干激光引信在云雾中探测性能的影响很小。文中研究成果验证了相干激光引信在云雾干扰下的优良探测性能。

参考文献:

- [1] Wang Fengjie, Chen Huimin, Ma Chao, et al. Construction of backscattering echo caused by cloud in laser fuze [J]. *Optik*, 2018, 171: 153–160.
- [2] 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)
- [3] 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)
- [4] 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)
- [5] He Chenglin, Liang Qian. Receive circuit's study of ultra-narrow pulse laser fuze [J]. *Aero Weaponry*, 2013(1): 57–60. (in Chinese)
- [6] Liu Ximin, Zhang Jianhua, Yang Dezhao, et al. Review on coherent laser fuze [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2018, 47(3): 0303001. (in Chinese)
- [7] Dong Xiao, Hu Yihua, Xu Shilong, et al. Echoing characteristics of coherent Lidar in different aerosol environments [J]. *Acta Optica Sinica*, 2018, 38(1): 0101001. (in Chinese)
- [8] Liu Bo, Cao Changdong, Sui Xiaolin, et al. Experiment of laser coherence Doppler velocimetry [J]. *Laser & Infrared*, 2018, 48(12): 1486–1490. (in Chinese)
- [9] Wang Fengjie, Chen Huimin, Yang Shangxian, 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] 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): 0506002. (in Chinese)
- [11] McCartney E J. Optics of the Atmosphere: Scattering by Molecules and Particles[M]. Hoboken: John Wiley & Sons. Inc, 1976.
- [12] Zhang Wei, Li Yilin, Huang Zhonghua. Research on the characteristics of fog backscattering signals for frequency modulated continuous wave laser fuze [J]. *Optik*, 2016, 127(20): 9046–9055.
- [13] Wang Fengjie, Chen Huimin. Simulation of characteristics of cloud and fog echo for pluse laser fuze [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2015, 23(10): 1–7. (in Chinese)
- [14] Guo Jing, Zhang He, Zhang Xiangjin. Propagating characteristics of pulsed laser in rain [J]. *International Journal of Antennas and Propagation*, 2015: 292905.
- [15] 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)
- [16] Berrocal E, Sedarsky D L, Paciaroni M E, et al. Laser light scattering in turbid media I: Experimental and simulated results for the spatial intensity distribution [J]. *Optics Express*, 2007, 15(17): 10649–10665.