

调频连续波激光引信云雾回波特性仿真

陈慧敏*, 王凤杰, 冯星泰, 朱雄伟

(北京理工大学 机电动态控制重点实验室, 北京 100081)

摘要: 调频连续波(FMCW)激光引信相比于脉冲激光引信具有较强的抗干扰能力,但仍会受到云雾的干扰。为研究 FMCW 激光引信系统参数对云雾回波特性的影响,利用 FMCW 激光引信探测模型,对激光引信在不同收发间距、激光波长以及相对云雾位置条件下的云雾回波特性进行仿真。仿真结果表明:FMCW 激光引信的收发间距和激光波长会对云雾回波特性产生明显影响,收发间距越大,在可见光波段和近红外波段的激光波长越短,云雾后向散射越弱。所得的仿真结果可为 FMCW 激光引信抗云雾干扰方面的优化设计提供参考。

关键词: 调频连续波激光引信; 云雾回波; 收发间距; 激光波长

中图分类号: TJ43*9.2 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201948.0406007

Simulation of the characteristics of backscattering signal from cloud and fog for FMCW laser fuze

Chen Huimin*, Wang Fengjie, Feng Xingtai, Zhu Xiongwei

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

Abstract: Frequency Modulated Continuous Wave (FMCW) laser fuze has better resistance to interference than the pulse laser fuze, but it is still affected by cloud and fog. In order to study the influence of FMCW laser fuze parameters on the cloud and fog echo, the cloud and fog echo of FMCW laser fuze in the case of different transmitting-receiving distances, laser wavelengths and relative positions was simulated by using FMCW laser fuze detection model. The simulation results show that transmitting-receiving distance and laser wavelength of FMCW laser fuze have obvious effect on the cloud and fog echo, the greater of transmitting-receiving distance and the shorter of laser wavelength in the visible light and near-infrared band, the weaker of cloud and fog echo. The simulation results of this paper can be used to optimize the design of FMCW laser fuze for the improvement of anti-interference ability.

Key words: FMCW laser fuze; cloud and fog echo; transmitting-receiving distance; laser wavelength

收稿日期: 2018-11-10; 修订日期: 2018-12-23

基金项目: 国家自然科学基金委员会与中国工程物理研究院联合基金(U1630131)

作者简介: 陈慧敏(1973-), 男, 副教授, 博士, 主要从事激光探测与目标识别方面的研究。Email: laserchm@126.com

0 引言

调频连续波 (Frequency Modulated Continuous Wave, FMCW) 激光引信探测目标的距离信息是根据接收信号与发射信号混频后得到的差频频率计算得到的,受回波信号幅值和时域波形影响较小,因此 FMCW 激光引信相比于脉冲激光引信具有较强的抗干扰能力。

目前国内在脉冲激光气溶胶回波特性仿真方面进行了大量研究。王红霞等^[1]仿真了 1.06 μm 激光在海洋性、沙尘性、水溶性和煤烟性四种不同类型气溶胶中的传输衰减特性。杨玉峰等^[2]仿真计算了 0.76~10.6 μm 波段激光在沙尘条件下的传输衰减和能见度。沈娜等^[3]计算了不同能见度下的水雾衰减系数。王广生^[4]对激光引信的云雾散射特征与识别方法进行研究。张京国等^[5-6]研究了脉冲激光引信收发间距、脉冲宽度等参数对近距云雾回波信号的影响。王凤杰等^[7]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两种情况下的云雾回波特性进行了仿真。调频连续波激光引信方面, Kai Liu 等^[8]建立了单颗粒气溶胶后向散射信号干扰模型,进行雾环境下的气溶胶颗粒群对目标回波信号的展宽研究。陈慧敏等^[9-10]建立了基于蒙特卡洛仿真的调频连续波激光引信探测模型,并对激光引信和目标均处于云雾中情况下的回波特性进行了仿真。

文中利用 FMCW 激光引信探测模型^[8],仿真分析激光引信的收发间距、激光波长以及引信、目标和云雾的相对位置对云雾回波特性的影响,为 FMCW 激光引信抗云雾干扰方面的优化设计提供参考。

1 FMCW 激光引信工作原理与探测模型

1.1 工作原理

FMCW 激光引信在发射端利用线性调频信号对激光光强进行调制,在接收端将回波信号与发射信号进行混频,利用混频后差频信号的频率获取激光的飞行时间,进而计算出目标距离。锯齿形 FMCW 激光引信的距离表达式为:

$$R = \frac{T_m c}{2\Delta F} f_{IF} \quad (1)$$

式中: T_m 为调频信号调制周期; ΔF 为调频信号带宽; f_{IF} 为发射信号与回波信号混频后输出差频信号的频率。

1.2 探测模型

FMCW 激光引信探测模型模拟 FMCW 激光引信在云雾环境中探测目标的全过程,包括 FMCW 激光收发系统模型、云雾模型、目标反射模型和光子传输模型。

FMCW 激光收发系统模型用于模拟 FMCW 激光的发射过程和接收过程。在发射端,利用激光光子数量来表征激光功率,根据 FMCW 发射信号的波形和功率依次发射激光光子。在接收端,当激光光子到达探测平面时,对其到达时刻的状态进行判断,若同时满足接收光学孔径和接收视场角条件,则认为光子进入探测器,计算光子进入探测器的时刻,并将光子在该时刻的权重计入探测器在该时刻接收到的光子累计权重。

云雾模型用于模拟云雾环境,包括云雾的能见度、粒径分布、粒子折射率等参数。粒径分布函数采用应用最广的 gamma 分布,表达式为:

$$n(r) = ar^b \exp(-cr^d) \quad (2)$$

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

目标反射模型用于模拟目标对光子的反射过程。光子到达目标平面后,随机生成反射方向,反射方向 (u_x, u_y, u_z) 的表达式为:

$$\begin{cases} u_x = \sin\theta_1 \cos\varphi_1 \\ u_y = \sin\theta_1 \sin\varphi_1 \\ u_z = \cos\theta_1 \end{cases} \quad (3)$$

式中: $\theta_1 = \pi/2 + \pi/2 \cdot \zeta_1$ 为反射方向天顶角; $\varphi_1 = 2\pi \cdot \zeta_2$ 为反射方向方位角; ζ_1 、 ζ_2 为 [0, 1] 上均匀分布的随机数。

光子传输模型用于模拟光子在云雾中的移动过程和光子与云雾粒子的碰撞过程。光子在云雾中的移动过程为光子与云雾粒子两次碰撞之间的运动过程,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:

$$\Delta s = -\frac{\ln\zeta}{\mu_t} \quad (4)$$

式中: ζ 为 [0, 1] 上均匀分布的随机数; μ_t 为云雾衰减

系数。

光子在传输过程中与云雾粒子发生碰撞后,光子的运动方向和权重会发生变化。新运动方向的散射角由散射相函数确定,非偏振状态下,散射相函数 $P(\theta)$ 的表达式为:

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

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。

光子与云雾粒子碰撞后的权重变化由单次散射比确定,表达式为:

$$\omega = \frac{Q_{sca}}{Q_{ext}} \quad (6)$$

式中: Q_{sca} 为粒子散射系数; Q_{ext} 为消光系数。

2 云雾回波特性仿真分析

利用 FMCW 激光引信探测模型,仿真研究激光引信的收发间距、激光波长以及激光引信、目标、云雾的相对位置对云雾回波特性的影响。

(1) 收发间距

将收发间距分别设定为 20、30、35、40 mm,仿真不同收发间距条件下 FMCW 激光引信的云雾回波和目标回波,分析收发间距对 FMCW 激光引信探测性能的影响。仿真参数如表 1 所示。

表 1 不同收发间距条件下的仿真参数

Tab.1 Simulation parameters in the case of different transmitting-receiving distances

Simulation parameters	Value	Simulation parameters	Value
Laser wavelength/nm	650	Cloud and fog visibility/m	8
Laser divergent angle/mrad	5	FM cycle/ μ s	50
Receiving lens diameter/mm	30	FM range/MHz	10-60
Receiving viewing angle/($^\circ$)	5	Target diffuse reflectance	0.45
Transmitting-receiving distance/mm	20, 30, 35, 40	Target distance/m	10
Photon number at wave peak	500		

图 1 为不同收发间距条件下的云雾回波仿真结果。图中横坐标为回波信号与发射信号的差频频率;纵坐标为回波光子数与发射光子数的比值,表征了回波信号的强度。由图 1 可以得出:在其他参数相同的条件下,收发间距越大,云雾产生的近距回波信号峰值越小。因此,当 FMCW 激光引信处于云雾环境中时,适当调整收发间距,可以有效削弱近距云雾的后向散射干扰。

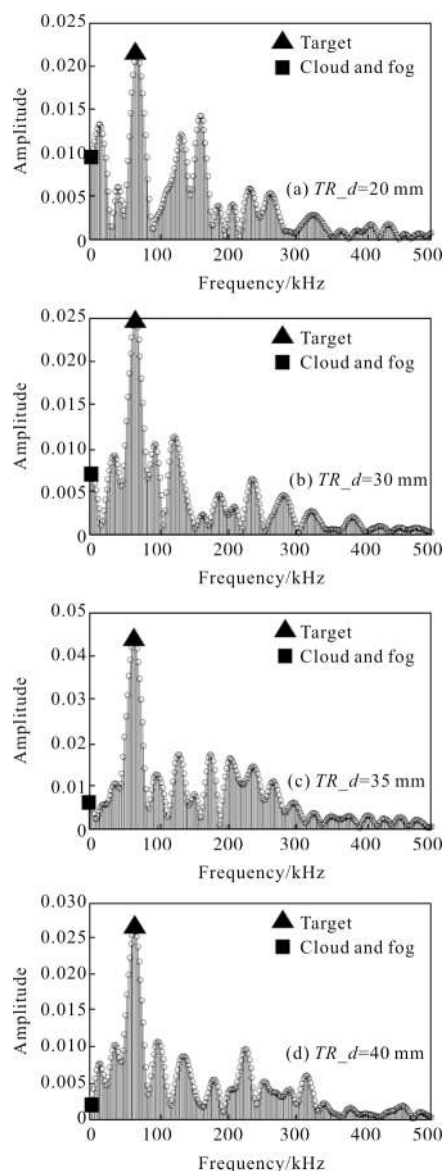


图 1 不同收发间距(TR_d)条件下的仿真结果

Fig.1 Simulation results in the case of different transmitting-receiving distances(TR_d)

(2) 激光波长

将激光波长分别设定为 532、650、808 nm,仿真

不同激光波长条件下 FMCW 激光引信的云雾回波和目标回波,分析激光波长对 FMCW 激光引信探测性能的影响。仿真参数如表 2 所示,仿真结果如图 2 所示。

表2 不同激光波长条件下的仿真参数

Tab.2 Simulation parameters in the case of different laser wavelengths

Simulation parameters	Value	Simulation parameters	Value
Laser wavelength/nm	532 650 808	Cloud and fog visibility/m	8
Laser divergent angle/mrad	5	FM cycle/ μ s	50
Receiving lens diameter/mm	30	FM range/MHz	10-60
Receiving viewing angle/($^{\circ}$)	5	Target diffuse reflectance	0.45
Transmitting-receiving distance/mm	35	Target distance/m	10
Photon number at wave peak	500		

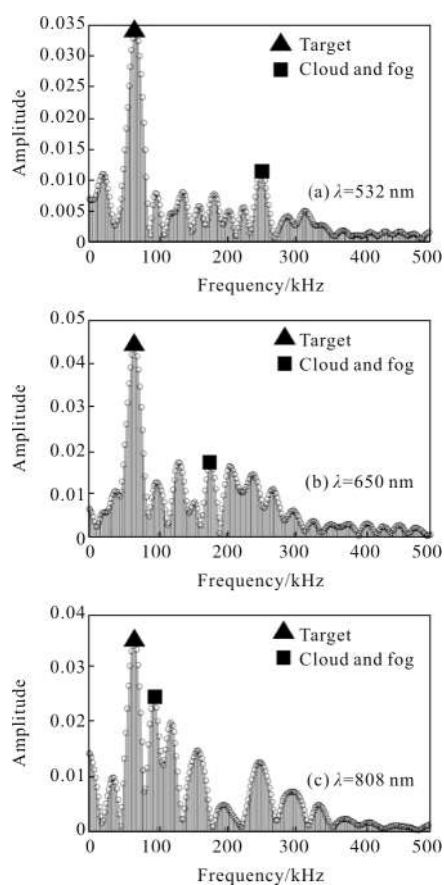


图 2 不同激光波长条件下的仿真结果

Fig.2 Simulation results in the case of different laser wavelengths

由图 2 可以得出:在其他参数相同的条件下,在可见光波段和近红外波段,激光波长越短,云雾产生的回波信号峰值越小,即云雾的后向散射越弱。因此,合理选择 FMCW 激光引信的波长,可以有效削弱云雾的后向散射干扰。

(3) 激光引信、目标、云雾的相对位置

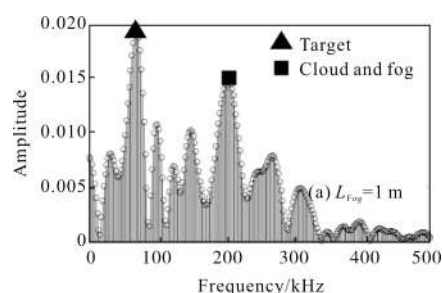
设定目标处于云雾内,引信处于云雾外且距云雾边界分别为 1、3、5 m,仿真 FMCW 激光引信的云雾回波和目标回波,分析引信、目标、云雾之间的相对位置对 FMCW 激光引信探测性能的影响。仿真参数如表 3 所示,仿真结果如图 3 所示。

表 3 激光引信、目标、云雾不同相对位置条件下的仿真参数

Tab.3 Simulation parameters in the case of different positions of laser fuze, target, and cloud and fog

Simulation parameters	Value	Simulation parameters	Value
Laser wavelength/nm	650	cloud and fog visibility/m	3
Laser divergent angle/mrad	5	FM cycle/ μ s	50
Receiving lens diameter/mm	30	FM range /MHz	10-60
Receiving viewing angle/($^{\circ}$)	5	Target diffuse reflectance	0.45
Transmitting-receiving distance/mm	35	Target distance/m	10
Photon number at wave peak	500	Distance of fuze and cloud and fog boundary	1 3 5

由图 3 可以得出:在其他参数相同的条件下,激光引信距云雾边界越远,云雾产生的回波信号峰值越小,即云雾后向散射越弱。



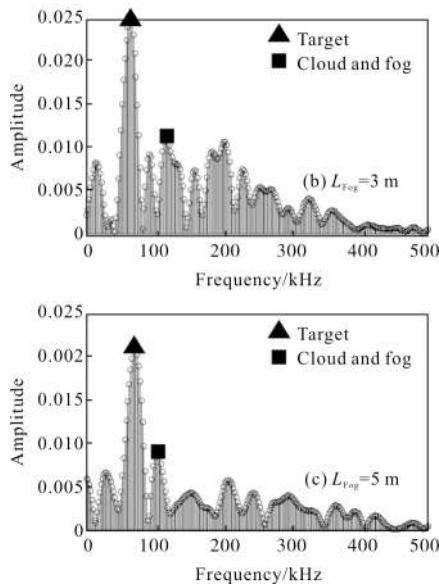


图 3 激光引信、目标、云雾不同相对位置条件下的仿真结果
Fig.3 Simulation results in the case of different positions of laser fuze, target and cloud and fog

3 结论

文中利用 FMCW 激光引信探测模型,对激光引信的收发间距、激光波长以及激光引信、目标、云雾的相对位置对云雾回波特性的影响进行了仿真研究。仿真结果表明:(1) FMCW 激光引信的收发间距越大,云雾产生的近距回波信号越弱;(2) 在可见光波段和近红外波段,FMCW 激光引信的波长越短,云雾后向散射越弱;(3) 当目标处于云雾内而引信处于云雾外时,激光引信距云雾边界越远,云雾后向散射越弱。文中的仿真结果可为 FMCW 激光引信抗云雾干扰方面的优化设计提供参考,即合理选择 FMCW 激光引信的收发间距和激光波长,可以有效削弱云雾的后向散射干扰。

参考文献:

[1] 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)
王红霞, 竹有章, 田涛, 等. 激光在不同类型气溶胶中传输特性研究[J]. *物理学报*, 2013, 62(2): 024214.

[2] Yang Yufeng, Li Ting, Li Jianxun, et al. Study on scattering characteristics of sand and dust in the infrared waveband commonly used in FSO[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2017, 46(6): 0604004. (in Chinese)

杨玉峰, 李挺, 李建勋, 等. 沙尘在 FSO 常用红外波段的散射特性研究[J]. *红外与激光工程*, 2017, 46(6): 0604004.

[3] Shen Na, Zhang Xiangjin, Guo Jing. Attenuation of laser fuze through fog [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2013, 21(4): 864-869. (in Chinese)
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.

[4] Wang Guangsheng. Characteristics and discrimination of cloud backscatter for laser fuze [J]. *Journal of Detection & Control*, 2006, 28(6): 20-24. (in Chinese)
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.

[5] Zhang Jingguo, Liang Xiaogeng, Liu Jianxin, et al. Cloud and fog backscattering laser signal affected by baseline distance [J]. *Journal of Detection & Control*, 2012, 34(6): 1-5. (in Chinese)
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.

[6] 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)
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.

[7] Wang Fengjie, Chen Huimin. Simulation of the characteristics of cloud and fog echo for pluse laser fuze [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2015, 23(10): 1-7. (in Chinese)
王凤杰, 陈慧敏. 脉冲激光引信云雾回波特性的仿真 [J]. *光学精密工程*, 2015, 23(10): 1-7.

[8] Liu Kai, Cui Zhanzhong. Influence of atmospheric aerosol single backscattering on waveform of target-reflected signal in incoherent frequency-modulation continuous-wave short-distance laser detection [J]. *Optical Engineering*, 2011, 50(1): 014301.

[9] 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)
陈慧敏, 刘洋, 朱雄伟, 等. 调频连续波激光引信回波特性的仿真分析[J]. *兵工学报*, 2015, 36(12): 2247-2253.

[10] Chen Huimin, Gao Zhilin, Zhu Xiongwei. Method of frequency modulated continuous wave laser modulation [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44(6): 1762-1765. (in Chinese)
陈慧敏, 高志林, 朱雄伟. 调频连续波激光调制方法研究 [J]. *红外与激光工程*, 2015, 44(6): 1762-1765.