

## 气溶胶环境下 FMCW 与脉冲激光探测性能对比

陈 鹏<sup>1,2</sup>, 赵继广<sup>3</sup>, 宋一铄<sup>3</sup>, 王 燊<sup>4</sup>

- (1. 航天工程大学 研究生院, 北京 101416;
2. 北京市遥感信息研究所, 北京 100192;
3. 航天工程大学 电子与光学工程系, 北京 101416;
4. 北京空间信息中继传输技术研究中心, 北京 100094)

**摘 要:** 研究了气溶胶干扰的情况下调频连续波 (FMCW) 和脉冲激光探测体制的探测性能, 并进行两种体制探测性能的量化对比。基于蒙特卡罗方法建立了气溶胶干扰下的目标探测模型, 研究了不同距离目标的探测结果, 论证了 FMCW 与脉冲两种体制进行比较的可行性, 并量化对比了二者的探测性能。以沙尘气溶胶为例进行了仿真和实验室环境内的测距实验, 结果表明: FMCW 激光探测系统可以通过提高调制频率来得到更好的探测性能; 在气溶胶环境下, FMCW 激光探测比脉冲体制有更高的信号杂波比 (SCR), 意味着更好的探测性能和更强的抗后向散射干扰能力。在气溶胶能见度较低且距离分辨力相同的条件下, 400 MHz 初始调制频率的 FMCW 系统探测性能较脉冲体制探测性能提升约 8~10 dB。

**关键词:** 调频连续波; FMCW; 激光探测; 气溶胶; 后向散射抑制; 信号杂波比

**中图分类号:** TN247 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA20190399

## Comparison on detection performance of FMCW and pulsed lidar in aerosol environment

Chen Peng<sup>1,2</sup>, Zhao Jiguang<sup>3</sup>, Song Yishuo<sup>3</sup>, Wang Shen<sup>4</sup>

- (1. Graduate School, Space Engineering University, Beijing 101416, China;
2. Beijing Institute of Remote Sensing Information, Beijing 100192, China;
3. Department of Electronics and Optical Engineering, Space Engineering University, Beijing 101416, China;
4. Beijing Space Information Relay and Transmission Technology Center, Beijing 100094, China)

**Abstract:** The detection performance of frequency modulated continuous wave (FMCW) and pulsed laser detection systems under aerosol interference were investigated, and the detection performance comparison between the two systems was proposed. Based on Monte Carlo method, the target detection model under aerosol interference was established. The detection results of different distance targets were studied. The feasibility of comparing the two systems of FMCW and pulse system was demonstrated, and the quantitative comparison of the detection performance of the two systems was carried out. Taking the phosphorus smoke aerosol as an example, the simulation and the distance measurement experiment in the fog chamber were carried out. The results show that the FMCW laser detection system can improve the detection performance by increasing the modulation

收稿日期: 2020-02-08; 修订日期: 2020-03-10

基金项目: 国家自然科学基金 (61805284)

作者简介: 陈鹏 (1990-), 男, 博士生, 主要从事复杂环境下激光探测方面的研究。Email: chenpeng\_7777@163.com

导师简介: 赵继广 (1967-), 男, 教授, 博士, 主要从事目标探测识别理论与技术方面的研究。Email: 315302189@qq.com

frequency. In an aerosol environment, FMCW laser detection has a higher signal-to-clutter ratio (SCR) than the pulse system, which means better detection performance and stronger resistance to backscattering interference. Under the condition of low aerosol visibility and the same range resolution, the detection performance of the FMCW system with 400 MHz initial modulation frequency is about 8-10 dB higher than that of the pulse system.

**Key words:** frequency modulated continuous wave; FMCW; laser detection; aerosol; backscattering suppression; signal-to-clutter ratio

## 0 引言

激光近距离探测目前主要有两种体制——脉冲激光探测和调频连续波 (frequency modulated continuous wave, FMCW) 激光探测<sup>[1-2]</sup>, 在高技术侦察和精确制导领域发挥着至关重要的作用<sup>[3]</sup>。但是, 环境中的气溶胶会对激光探测系统产生严重影响, 尤其是后向散射干扰可能导致虚警, 这已成为限制激光近距离探测发展和应用的瓶颈问题。

针对气溶胶干扰下的脉冲及 FMCW 激光探测技术, 国内外开展了大量研究。对于脉冲体制, 王凤杰研究了气溶胶参数对脉冲激光探测回波的影响<sup>[2]</sup>, 孙小龙研究了脉冲激光在气溶胶中的传输特性<sup>[4]</sup>, Jokela 通过实验研究了雾和雪对脉冲激光探测性能的影响<sup>[5]</sup>, Cowell 研究了多种抑制气溶胶干扰的方法。对于 FMCW 激光探测体制, 陈慧敏研究了典型能见度气溶胶条件下的激光探测回波<sup>[1, 6]</sup>, 刘博虎研究了激光波长、气溶胶粒子尺寸对信噪比的影响<sup>[7]</sup>, 并比较了多种信号处理方法抗干扰的能力<sup>[8]</sup>。张伟研究了气溶胶条件下 FMCW 激光近距离探测的回波, 提出一种基于目标和后向散射信号频域差异的判别方法<sup>[9]</sup>。北京理工大学多个团队研究了基于 FMCW 激光引信的制导技术, 主要对 FMCW 激光引信的调制方式、系统性能以及在探测技术中的优缺点进行了研究。

Caimi 对比了脉冲体制和连续波体制的成像性能, 发现带有距离门的脉冲体制可以抑制近距离的后向散射, 此时脉冲体制的探测性能优于连续波体制<sup>[10]</sup>。但对于文中研究的激光近距离探测来说, 距离门方法有两个主要缺点<sup>[11]</sup>: 一是门信号产生了探测盲区, 对于本就范围很近的近距离探测, 盲区可能会导致漏警; 二是距离门需要提供关于目标距离的先验信息, 对于存在快速相对运动的非合作目标, 先验信息不容易获取。因此文中在对比两种体制近距离探测性能时, 直接对比了没有距离门的情况。Agishev 对比了

脉冲体制和 FMCW 体制在理想条件下的测距性能<sup>[12]</sup>, 但他没有考虑气溶胶的干扰。

尽管两种体制的相关研究比较多, 但目前尚未见到关于气溶胶环境下 FMCW 与脉冲体制的探测性能对比的研究。文中对比了气溶胶环境下两种体制的探测性能, 并通过仿真和实验得到量化对比结果, 为气溶胶环境下激光近距离探测的发展和应用提供参考。

## 1 激光探测原理及性能评价指标

### 1.1 FMCW 激光探测原理

随着光电子技术的进展, 非相干调频连续波激光探测技术引起了国内外学者的广泛关注, 并成为了激光探测领域的研究热点之一。调频连续波激光探测综合了连续波雷达与激光探测的优点, 具有精度高、无模糊距离远、多目标分辨、可同时测距和测速等优点, 在中近距离激光探测中具有很大的潜力<sup>[13-14]</sup>。国内多家单位在实验室环境下进行了静止目标的探测试验, 并取得了较好的实验结果, 目前正致力于运动目标检测、抗干扰和三维成像等方面的研究。

FMCW 体制利用线性调频射频副载波信号, 对光载波信号的强度进行调制, 有用信息在副载波的频率中, 因此不易受到光传输环境的影响, 抗干扰能力强。FMCW 系统结构图如图 1 所示。

用于调制连续波激光器发射信号功率的 FMCW 信号可以表示为:

$$s_t(t) = A_0 \cos(2\pi f_0 t + \pi k t^2 + \theta_0) \quad (1)$$

式中:  $t$  为时间;  $A_0$  为信号幅度;  $k$  为调频斜率;  $\theta_0$  为信号相位。

连续波激光器发射信号功率可表示为:

$$P_t(t) = P_{t0} [1 + m \cos(2\pi f_0 t + \pi k t^2 + \theta_0)] \quad (2)$$

式中:  $P_{t0}$  为发射信号直流光功率;  $m$  为调制深度。

距离为  $R$  的目标形成的回波信号功率  $P_r(t)$  可表示为:

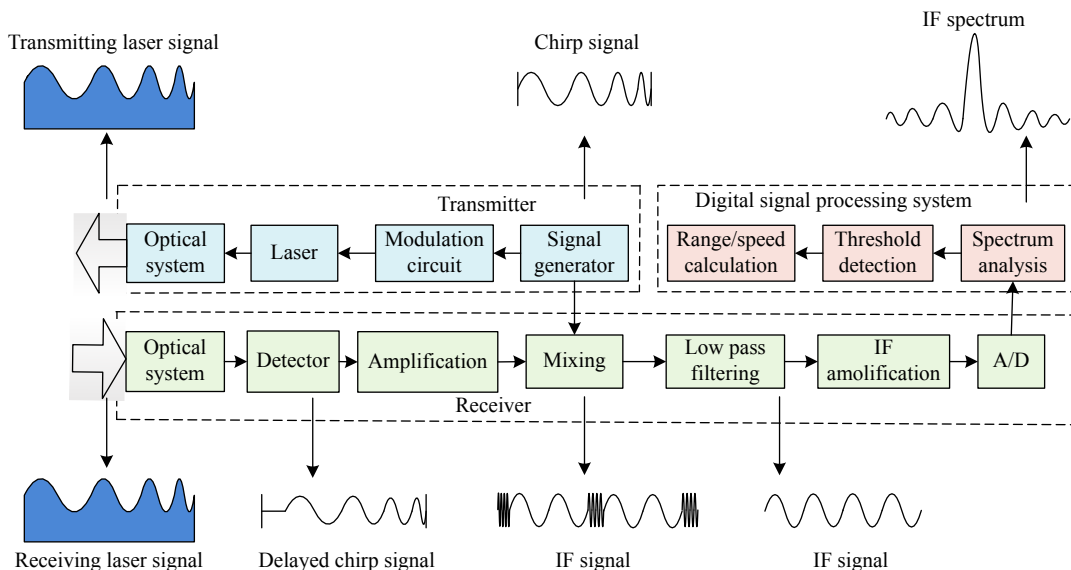


图 1 FMCW 激光探测系统结构图

Fig.1 Block diagram of FMCW laser detection system

$$P_r(t) = P_{r0} \left[ 1 + m \cos(2\pi f_0(t - \tau) + \pi k(t - \tau)^2 + \theta_0 + \phi_0) \right] \quad (3)$$

式中： $P_{r0}$ 为回波信号直流光功率； $\tau = 2R/c$ 为激光往返于目标和测距仪的时间， $c$ 为光速； $\phi_0$ 为目标反射引入的附加相位。回波信号与本振信号光电混频，经过低通滤波后得到差频信号：

$$s_{IF}(t) = A_{IF} \cos(2\pi k\tau t + 2\pi f_0\tau - \pi k\tau^2 - \phi_0) \quad (4)$$

式中： $A_{IF}$ 为中频信号幅度。代入 $k = B/T$ 和 $\tau = 2R/c$ ，可得中频信号频率：

$$f_{IF} = (2BR)/(cT) \quad (5)$$

因此可以得到目标距离<sup>[15]</sup>：

$$R = (cT)/(2B)f_{IF} \quad (6)$$

## 1.2 强后向散射干扰信号情况下的探测性能评价指标

对于激光近距探测来说，测距精度是很重要的性能参数，但在后向散射干扰比较严重的气溶胶环境下，更加重要的是正确检测到目标信号并减少虚警。因此文中着重研究的是探测性能而非测距性能，即能够在气溶胶环境下抑制后向散射、正确发现目标的能力。

经典的激光雷达方程没有考虑较强的近距离气溶胶后向散射信号的干扰，其检测灵敏度的主要限制因素为接收机噪声，此时根据噪声方差设置恒虚警的阈值，超过阈值即判断为目标。但在气溶胶后向散射较强的环境下，干扰信号远大于接收机噪声，极易超过阈值门限，大的干扰信号甚至能够遮蔽真实目标的回波，从而限制激光的探测性能。当接收机收到的后

向散射干扰比噪声大很多时，激光雷达的信号处理与一般情况（接收机噪声为主要限制灵敏度因素的情况）是不一样的<sup>[16]</sup>。在这种干扰和杂波占主导的条件下，常用的指标为信号杂波比（SCR），即信号和杂波功率的比值。其中信号指所需的目标信号，杂波指后向散射干扰信号。对于脉冲测距体制，计算方法如公式（7）所示，其中 $s(t)$ 为激光脉冲信号的时域响应， $\Delta t_{tgt}$ 和 $\Delta t_{bs}$ 分别代表时域信号中后向散射信号和目标信号所在的时间段。

$$SCR(dB) = 10 \times \lg \left( \frac{\frac{1}{\Delta t_{tgt}} \int_{\Delta t_{tgt}} |s(t)|^2 dt}{\frac{1}{\Delta t_{bs}} \int_{\Delta t_{bs}} |s(t)|^2 dt} \right) \quad (7)$$

对于 FMCW 测距体制，SCR 的计算方法如公式（8）所示：

$$SCR(dB) = 10 \times \lg \left( \frac{\frac{1}{\Delta f_{tgt}} \int_{\Delta f_{tgt}} |H(\omega)|^2 d\omega}{\frac{1}{\Delta f_{bs}} \int_{\Delta f_{bs}} |H(\omega)|^2 d\omega} \right) \quad (8)$$

式中： $H(\omega)$ 为混频后的中频频谱； $\Delta f_{tgt}$ 和 $\Delta f_{bs}$ 分别为中频频谱中目标和后向散射信号所在的频段。

SCR 可体现探测性能，描述了目标信号和后向散射干扰的相对大小，揭示了目标被正确识别的可能性。在理想情况下检测目标时，SCR 为较大正值，此时目标信号的功率远超过后向散射干扰及接收机噪声。当 SCR 在 0 附近时，目标信号的功率与干扰及噪

声功率相近,此时系统的探测结果是不可靠的。当 SCR 小于 0 时,目标信号功率低于干扰功率,此时系统无法正确探测到目标,系统产生虚警。要说明的是,虽然文中关注重点是 SCR 值,但它不是唯一可以表示探测性能的参数。

在实际应用中,到底是后向散射干扰占主导还是接收机噪声占主导是不固定的、难以预测的。因此在信号检测时需要采取双重判别,在阈值判别的基础上增加峰值检测(FMCW 体制的阈值和峰值检测都是在频域进行处理的)。若有 1 个以上信号超过阈值,则对其进行峰值判别,当目标信号幅度不再是回波的最大值时,两种体制目标探测就会失效。

## 2 基于蒙特卡罗方法的气溶胶建模

目前气溶胶多次散射的主要建模方法分为三种:

解析方法、实验方法和蒙特卡罗方法<sup>[17]</sup>。其中解析法的突出优点是物理概念清晰,能够明确阐释粒子散射特性的本质,计算精度最高,但求解的要求特殊,适用范围最小,计算量庞大。实验方法是建立实验室条件下的气溶胶环境,在此基础上进行光传输实验,模拟真实沙尘条件下激光传输效果。因为实验条件有限,这种方法的分析范围受到很大限制。蒙特卡罗方法不需要引入约束条件、边界条件或人为假设,仿真的重复性好,能够定性分析探测系统参数及环境变化对结果影响的趋势性规律。经过国内外学者的证实,该方法得出的规律与真实情况吻合,能在一定程度上预测实际结果。因此文中采用蒙特卡罗方法模拟激光与气溶胶相互作用,仿真了条件下的气溶胶的时域特性,及其对激光探测性能的影响。蒙特卡罗仿真流程如图 2 所示。

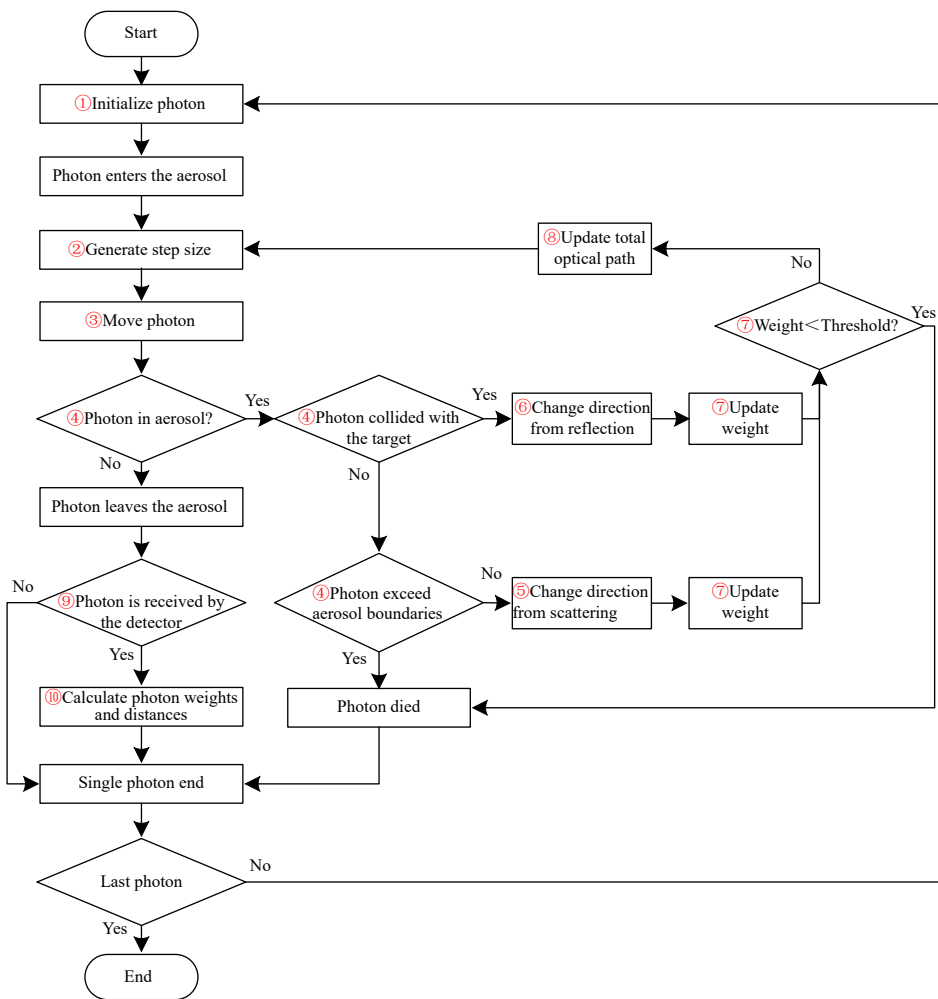


图 2 蒙特卡罗仿真流程图

Fig.2 Flow chart of Monte Carlo simulation

蒙特卡罗仿真是后续研究的基础,可得到气溶胶环境下目标探测的冲激响应。将其与 FMCW 和脉冲信号卷积即分别得到两种探测体制接收到的时域响应。由于蒙特卡罗仿真不是文中重点,所以并未具体展开,详细的步骤可参见参考文献 [18]。

### 3 气溶胶环境下 FMCW 与脉冲体制探测性能对比

为了模拟实际沙尘扬尘气溶胶的效果,此节以沙尘气溶胶为例,研究不同调制频率的 FMCW 体制和脉冲体制的探测结果,分析两种体制不同参数对比的可行性,并进行量化对比,最后进行实验验证。

#### 3.1 FMCW 与脉冲体制不同参数对比的可行性分析

由于 FMCW 与脉冲两种体制的参数有诸多不同,在比较二者性能之前需要对参数的差异进行分析,证明这种比较的可行性。脉冲体制的参数中与 FMCW 不同的包括波长、功率、脉宽(可转化为距离分辨率)等,此小节着重分析这些参数的差异。

##### (1) 波长分析

两种体制的激光波长不同,气溶胶对不同波长的散射吸收特性会有所区别。由于沙尘粒子在 532 nm 波长和 660 nm 波长下的复折射率均为 1.53-0.008i,因此在相同的气溶胶粒子成分条件下,气溶胶的散射和吸收系数相同。因此,文中认为沙尘气溶胶对 532 nm 和 660 nm 两种波长的散射和吸收作用相等。

##### (2) 发射功率分析

脉冲及 FMCW 激光探测体制的功率相差较大,在没有强干扰的情况下,瞬时功率较大的脉冲体制可探测更远的目标,但是在气溶胶后向散射干扰较强的条件下,功率的差异对测距影响很小,不影响系统探测性能(即信杂比 SCR)。以单次散射假设下脉冲体制的信杂比解析式为例,由文献可知 SCR 可表示为<sup>[17]</sup>:

$$SCR = \frac{S}{C} = \frac{2e^{-2\mu_c R} \rho S_1}{\mu_s P(\pi) R^4 \int_{R_0}^{R_c} \frac{e^{-2\mu_c R} S(r)}{r^4} dr} \quad (9)$$

式中:  $\mu_c$  和  $\mu_s$  分别为消光系数和散射系数;  $R$  为目标距离;  $\rho$  为目标反射率;  $S_1$  为目标截面积;  $P(\pi)$  为 180° 方向的散射相函数;  $R_0$  和  $R_c$  为由收发视场交叉导致的最近点和最远点。令最大作用距离  $R_{max}$  与最小可分辨 SCR 对应,写成后向散射干扰下的雷达方程为:

$$R_{max} = \left( \frac{2e^{-2\mu_c R} \rho S_1}{\left(\frac{S}{C}\right)_{min} \mu_s P(\pi) \int_{R_0}^{R_c} \frac{e^{-2\mu_c R} S(r)}{r^4} dr} \right)^{1/4} \quad (10)$$

与经典的激光雷达方程不同,在后向散射干扰较强的条件下,激光雷达方程中并没有明显地出现发射功率,意味着发射功率差异对探测能力影响不明显。这是因为提高发射功率在增强目标信号的同时,也会以相同的比例增强干扰信号,没有提高真实目标的可检测性。对于激光探测系统来说,发射功率需要满足接收机处杂波功率大于接收机噪声。

所以对于不同功率的脉冲与 FMCW 激光探测系统,可以直接进行探测性能的对比。

##### (3) 距离分辨率分析

脉冲宽度  $\tau$  决定了脉冲激光探测系统的距离分辨率  $\delta R$ , 可表示为:

$$\delta R = \frac{1}{2} \tau c \quad (11)$$

在气溶胶干扰较强的条件下,脉冲宽度越窄,距离分辨率越高,不同位置的气溶胶后向散射叠加到一起的程度就越弱,导致干扰信号比较弱,因此信杂比 SCR 较高,探测性能更好,抗气溶胶后向散射干扰的能力就越好。综上所述,距离分辨率与系统探测性能有直接关系。

对于 FMCW 体制,距离分辨率为<sup>[19]</sup>:

$$\delta R = \frac{c}{2B} \quad (12)$$

对于脉冲和 FMCW 激光探测体制,距离分辨率是一个很重要的参数,且与系统探测性能有直接关系。因此为了对比两种体制的探测性能,必须先将距离分辨率统一,在此基础上才能进行探测性能的对比。相同距离分辨率下,10 ns 脉宽的脉冲体制对应 100 MHz 扫频带宽的 FMCW 体制。虽然当两种体制具有相同的分辨率时,脉冲体制需要的信号处理带宽远远大于 FMCW 体制,但为了方便比较,忽略探测系统对带宽的限制,在此基础上对二者探测性能进行比较。

综上所述得出结论,虽然两种体制参数多有不同,但在文中的设定条件下可以进行探测性能的对比,即比较两种体制抑制气溶胶后向散射的能力。

#### 3.2 FMCW 与脉冲体制的探测结果

此节对不同调制频率的 FMCW 探测结果进行仿真



对比,各项仿真参数如表 1 所示。仿真的目的是研究信号和后向散射的相对大小,而不是计算出信号的绝对值,所以接收机的量子效率和增益都设为 1。为给 FMCW 的探测性能提供参考,选取同样具有多目标探测

能力的脉冲体制作为参考信号,令二者具有同样的距离分辨率。文中研究的激光近距离探测系统的作用距离在 10 m 以内,设定目标距离 6~10 m(其中探测器距离气溶胶边界 1~5 m,气溶胶边界距离目标板 5 m)。

表 1 激光探测的仿真参数

Tab.1 Simulation parameters of laser detection

Parameter	Value	Parameter	Value
FMCW system parameters			
Laser wavelength/nm	660	Emission-receiving distance/mm	10
Laser divergence angle/mrad	5	FM cycle/ $\mu$ s	50
Receiver lens diameter/mm	10	Initial modulation frequency/MHz	10-400
Detector photosensitive surface/ $\mu$ m	250	Bandwidth/MHz	100
Pulse system parameters			
Laser wavelength/nm	532	Emission-receiving distance/mm	10
Laser divergence angle/mrad	5	Receiver lens diameter/mm	10
Detector photosensitive surface/ $\mu$ m	250	Pulse width/ns	10
Aerosol and target parameters			
Complex refractive index	1.53-0.008i	Particle size parameter/ $\mu$ m	0.3-3
Visibility/m	40	Target distance/m	6-10
		Target reflectivity	0.5

为了研究调制频率对 FMCW 激光探测性能的影响,此节仿真了固定气溶胶能见度和目标距离条件下不同调制频率的探测结果。其中气溶胶能见度为 40 m,目标距离 10 m,由蒙特卡罗仿真得到此条件下截止频率和极限频率分别为 53 MHz 和 90 MHz,因此分别以较小的频率、截止频率和极限频率(10、53、90 MHz)作为 FMCW 的起始调制频率,分析不同调制频率的测量结果。不同起始调制频率的中频频谱如图 3(b)~(d) 所示。将 FMCW 体制与同样距离分辨率的脉冲激光探测进行比较(即脉冲宽度 10 ns),计算了脉冲激光体制的时域响应,如图 3(a) 所示。

由图 3(a) 可以看出,在设定的仿真条件下,脉冲激光探测的回波中后向散射干扰很强,占据了回波的主要成分,无法通过阈值判别和峰值检测来判断目标,此时将引发虚警。对于 3 种典型的 FMCW 起始调制频率,当频率为 10 MHz 时的中频信号后向散射占据主导,而 53 MHz 和 90 MHz 目标信号占据主导,后向散射信号被明显衰减,如图 3(b)~(d) 所示。这说明当调制频率大于截止频率或极限频率时,可以有效抑制后向散射干扰。若是继续增大初始调制频率,目

标和后向散射幅度都逐渐减小,但由于目标衰减较慢,目标幅度始终大于后向散射幅度,此时后向散射被更加明显抑制。随着调制频率的提高,FMCW 系统的信杂比持续增大,远超过脉冲体制。

仿真说明了在气溶胶环境下,FMCW 探测体制可以抑制后向散射,当调制频率越高时,对后向散射的抑制效果越明显。下面对于各种探测结果进行量化分析。

### 3.3 FMCW 与脉冲体制探测性能对比

此节仿真了不同距离的条件下脉冲与 FMCW 两种体制的探测性能,并用 SCR 值进行量化,实现两种体制的探测性能的比较。仿真条件中,气溶胶环境选取能见度在 40 m,目标距离选择为常用的 6~10 m。两种体制的 SCR 值仿真结果如图 4 所示。在这种低能见度条件下的 SCR 值普遍较低,当 SCR 值低于 0 时(低于红色虚线),代表后向散射信号强度大于目标信号,此时干扰信号将遮蔽目标信号,在阈值门限与峰值检测的双重判别规则下将引发虚警。

由图 4 可以看出,相同距离处的脉冲体制与 FMCW 体制的探测性能不同,其中 FMCW 体制的探测性能随初始调制频率的升高而变好,而脉冲体制的

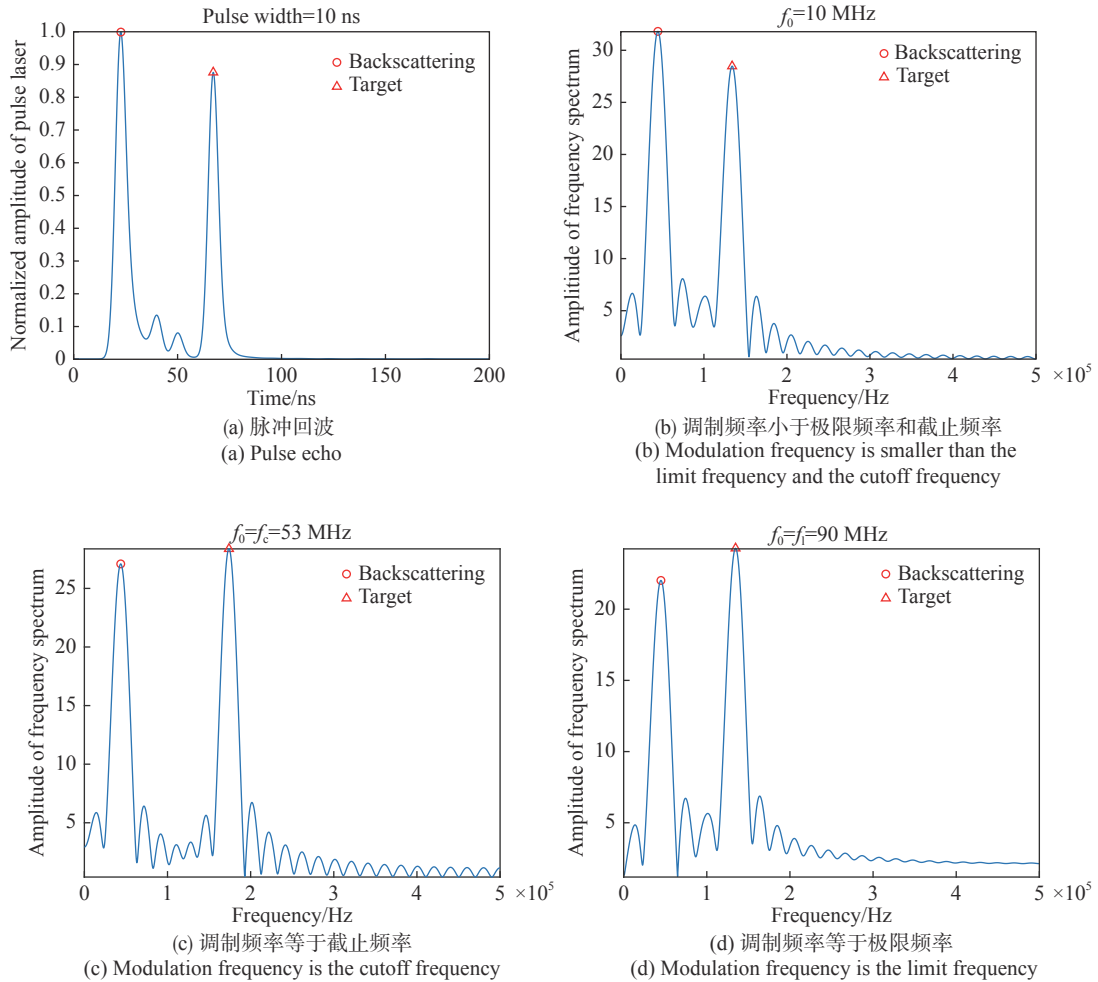


图 3 多种初始调制频率的 FMCW 中频频谱和脉冲回波

Fig.3 FMCW IF spectrum with various initial modulation frequencies and pulse echo

性能与初始调制频率为 10 MHz 的 FMCW 体制性能接近。当调制频率大于 10 MHz 时, FMCW 系统性能优于脉冲体制。在图 4 中的仿真条件下, 当 FMCW

系统的初始调制频率大于 200 MHz 时, 系统的 SCR 值都为正值, 表示可以正确进行目标探测。而在探测系统距离气溶胶边界较近的情况下, 脉冲体制和初始调制频率较低的 FMCW 体制 SCR 小于 0, 由于后向散射过强而无法完成探测任务。

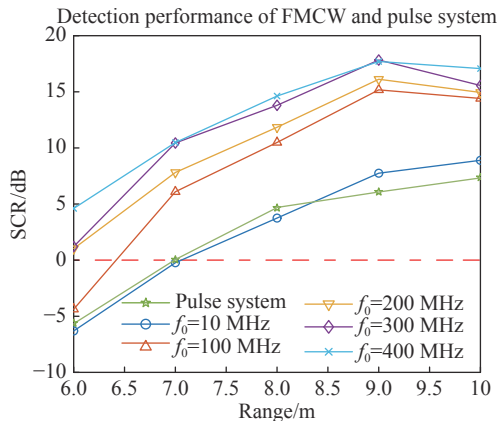


图 4 FMCW 体制与脉冲体制的探测性能

Fig.4 Detection performance of FMCW and pulse system

由仿真可知, 在不同的探测距离下, FMCW 的 SCR 值高于脉冲体制, 并且随着调制频率的增加, SCR 值还会继续升高, 这意味着获得更好的探测性能。400 MHz 调制频率的 FMCW 系统探测性能较脉冲体制探测性能提升 8~10 dB。随着探测系统逐渐靠近气溶胶边界, 两种体制的 SCR 都在下降, 脉冲体制的 SCR 值更容易变成负值, 使目标淹没在后向散射中无法识别。FMCW 体制探测性能下降的幅度更小, 可以实现更大的探测范围。仿真说明了 FMCW 体制具有抗后向散射干扰的能力, 在较浓气溶胶环境下的具有优势。

3.4 实验验证

为了验证 3.3 小节仿真得到的结论,此节进行了

实验验证,在激光探测系统和目标之间放置模拟沙尘气溶胶实验箱,实验的设置如图 5(a) 所示。

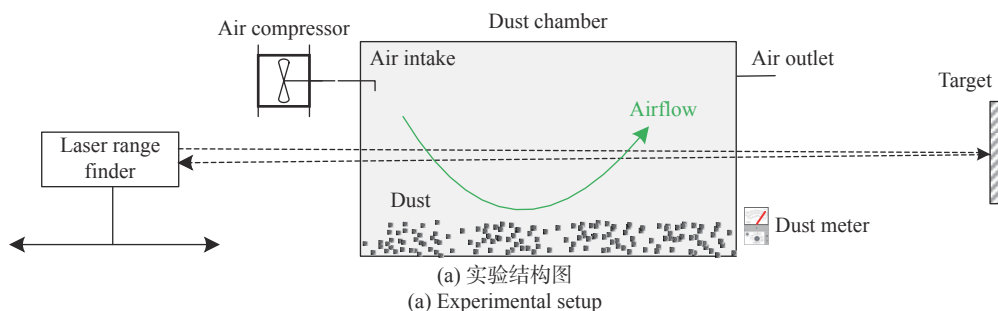


图 5 实验结构图和实景图

Fig.5 Diagram of experimental structure and scene

实验箱是一个由亚克力板制成的长方体容器 (2 m×0.8 m×0.8 m), 箱两端有空气入口和带有过滤阀的空气出口,利用空气压缩机向实验箱底部吹气,将箱内的沙尘粒子扬起,以模拟沙尘气溶胶。为了防止实验箱的壁板遮挡后向散射,在实验箱两端开有透光口,激光通过该口穿过实验箱在目标之间往返进行测距。根据参考文献 [20] 可知,绝大多数的沙尘气溶胶粒子尺寸都在 0~5 μm 范围内,适合使用 LD-5 粉尘仪进行浓度测量。利用 LD-5 粉尘仪实时监控气溶胶的参数,它可以测量气溶胶的质量浓度,再根据气溶胶的粒径分布和折射率换算成能见度。

使用 FMCW 或脉冲激光测距仪对烟雾中的目标进行探测。其中目标板固定在实验箱的右侧,探测系统可在实验箱左侧 0~5 m 范围内移动,模拟不同距离的测量结果。对于 FMCW 激光测距系统,结构框图如图 1 所示。发射系统中,采用 RIGOL 公司的 DG5352 生成 chirp 信号,该信号经过功率放大后对 660 nm 连续波激光二极管进行调制。接收系统中,探测器采用了 Thorlabs 公司的高速硅光电探测器 DET025A/M,

采用了 RFMD 公司的线性通用放大芯片 RF2360 来设计放大器电路。混频器由 AD 公司的 AD831 及外围电路构成。对混频器输出信号进行滤波和 AD 转换后,输入给计算机进行数字信号处理。具体参数与 3.2 节中的仿真参数一致。对于脉冲测距系统,对发射脉冲和接收脉冲分别进行 AD 转换,输入给计算机进行信号处理。

在实验过程中,笔者发现在较浓气溶胶条件下(能见度为 30~55 m),几种不同能见度下探测性能的趋势是相同的。因此以一个典型的能见度下的探测结果,进行着重分析。当能见度为 40 m 时,不同调制频率的 FMCW 系统和脉冲系统的探测性能如图 6 所示。

随着初始调制频率的升高, FMCW 体制的 SCR 值不断升高。这意味着 FMCW 体制通过增大调制频率可以提高系统的探测性能。初始调制频率为 10 MHz 的 FMCW 探测系统的 SCR 值与脉冲体制相近。当 FMCW 体制的初始调制频率提高至 400 MHz 时, SCR 值较脉冲体制提升 8~10 dB,意味着系统探测



性能的提升。实验结果表明,在气溶胶环境下,FMCW 体制具有抑制气溶胶后向散射干扰的能力。因此,在存在气溶胶干扰的条件下,FMCW 体制探测性能优于脉冲体制。

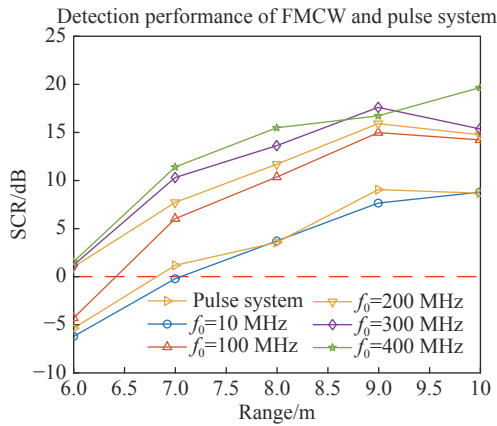


图 6 FMCW 体制与脉冲体制的探测性能

Fig.6 Detection performance of FMCW and pulse system

实验与仿真结果的趋势一致,验证了在仿真中得到的结论,即在气溶胶环境下,FMCW 体制比脉冲体制具有更好的抗气溶胶干扰能力。随着调制频率的增大,FMCW 体制的抑制后向散射的能力提高。

下一步的实验研究中需要更精确的控制实验条件,如使用粒度分析仪精确测量粒子尺度,在实验箱的不同位置测量气溶胶的能见度等。

#### 4 结 论

针对沙尘气溶胶的后向散射信号对激光近距探测造成的严重干扰,文中分别研究了 FMCW 和脉冲体制的探测性能,并进行了两种体制探测性能的量化对比。首先基于蒙特卡罗方法建立了气溶胶环境的光散射模型,然后论证了 FMCW 与脉冲体制性能对比的可行性,接着仿真分析了不同调制频率对 FMCW 探测性能的影响,最后通过仿真和实验对比了相同气溶胶能见度、相同距离分辨率条件下 FMCW 与脉冲体制的探测性能。

仿真和实验证明了 FMCW 激光探测具有抑制气溶胶后向散射的能力,并且可以通过提高调制频率来得到更好的探测性能。当存在气溶胶干扰时,FMCW 系统的 SCR 高于脉冲探测系统,意味着获得更好的探测性能和更低的虚警率。在气溶胶能见度较低且

距离分辨力相同的条件下,400 MHz 调制频率的 FMCW 系统探测性能较脉冲体制探测性能提升 8~10 dB。

后续将继续研究气溶胶环境下的 FMCW 激光探测技术,包括不同带宽和波形的 FMCW 体制的探测性能,促进 FMCW 激光近距探测的发展和运用。下一步还将深入研究实际战场环境中的复合气溶胶,包括各种金属粉、非金属粉以及碳烟、磷烟等气溶胶对激光探测的影响。

#### 参考文献:

- [1] Chen Huimin, Wang Fengjie, Feng Xingtai, et al. Simulation of the characteristics of backscattering signal from cloud and fog for FMCW laser fuze [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2019, 48(4): 0406007. (in Chinese)  
陈慧敏, 王凤杰, 冯星泰, 等. 调频连续波激光引信云雾回波特性仿真[J]. *红外与激光工程*, 2019, 48(4): 0406007.
- [2] Wang F, Chen H, Ma C, et al. Construction of backscattering echo caused by cloud in laser fuze [J]. *Optik*, 2018, 171: 153-160.
- [3] Cui Zhazhong. Some issues on the fuze development [J]. *Journal of Detection & Control*, 2008, 30(2): 1-4. (in Chinese)  
崔占忠. 引信发展若干问题[J]. *探测与控制学报*, 2008, 30(2): 1-4.
- [4] Sun Xiaolong. Research on transmission characteristics of laser fuze pulse laser ranging system in the dust environment[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2015. (in Chinese)  
孙小龙. 激光引信脉冲激光测距系统在烟尘环境中的传输特性研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2015.
- [5] Jokela M, Kutila M, Pyykönen P. Testing and validation of automotive point-cloud sensors in adverse weather conditions [J]. *Applied Sciences*, 2019, 9(11): 2341.
- [6] 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仿真分析[J]. *兵工学报*, 2015, 36(12): 2247-2253.
- [7] Liu B, Song C, Duan Y. The characteristics simulation of FMCW laser backscattering signals [J]. *Optical Review*, 2018, 25(2): 197-204.
- [8] Liu B, Song C, Li Y, et al. A frequency-modulated-continuous-wave laser detection system based on the four-quadrant

- photodetector [J]. *Applied Physics B*, 2018, 124(9): 1–9.
- [9] Zhang W, Li Y, Huang Z, et al. Fog backscattering interference suppression algorithm for FMCW laser fuze based on normalized frequency spectrum threshold [J]. *Optik - International Journal for Light and Electron Optics*, 2017, 131: 188–193.
- [10] Caimi F M, Kocak D M, Dalglish F, et al. Underwater imaging and optics: Recent advances[C]//IEEE, 2008.
- [11] Nash J K, Lee R W, Mullen L J. Tailoring of RF coded optical pulses for underwater 3D imaging: a comparison of modulated pulse lidar to traditional short pulse lidar[C]. Washington: MTS, 2015.
- [12] Agishev R R. Analytic comparison of some features of pulse-lidar and CW-FM-ladar remote sensing[C]//Orlando: SPIE, 2003.
- [13] Stann B L, Dammann J F, Giza M M, et al. RF Coherent Detection on Top of Direct Detection Lidar[M]//Encyclopedia of Modern Optics. 2nd ed. Elsevier, 2018: 5, 1-13.
- [14] Song Y, Du X, Zeng Z. On the research of avalanche photodiodes-based heterodyne in FMcw laser rangefinder [J]. *Optik-International Journal for Light and Electron Optics*, 2014, 125(12): 2895–2898.
- [15] Bu Yuming, Du Xiaoping, Zeng Chaoyang, et al. Research progress and trend analysis of non-scanning laser 3D imaging radar [J]. *Chinese Optics*, 2018, 11(5): 711–727. (in Chinese)
- 卜禹铭, 杜小平, 曾朝阳, 等. 无扫描激光三维成像雷达研究进展及趋势分析[J]. *中国光学*, 2018, 11(5): 711–727.
- [16] Skolnik M I. Radar Handbook[M]. New York: McGraw Hill Book Co., 2008.
- [17] Gong Maolin. The mechanism study of the back-scattering effect to the active detecting[D]. Chengdu: Chinese Academy of Sciences (Institute of Optics and Electronics), 2015. (in Chinese)
- 公茂林. 后向散射对主动探测的影响机理研究[D]. 成都: 中国科学院研究生院(光电技术研究所), 2015.
- [18] Wang Z, Cui S, Yang J, et al. A novel hybrid scattering order-dependent variance reduction method for Monte Carlo simulations of radiative transfer in cloudy atmosphere [J]. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 2017, 189: 283–302.
- [19] Du Xiaoping, Zhao Jiguang, Zeng Chaoyang, et al. FMCW Laser Detection Technology[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2015. (in Chinese)
- 杜小平, 赵继广, 曾朝阳, 等. 调频连续波激光探测技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 2015.
- [20] Yang Yufeng, Qin Jianhua, Li Ting, et al. Calculation for the number concentration of dust aerosol particles and characteristics of laser transmission [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2017, 46(S1): S106006. (in Chinese)
- 杨玉峰, 秦建华, 李挺, 等. 沙尘气溶胶粒子数量浓度计算及激光传输特性[J]. *红外与激光工程*, 2017, 46(S1): S106006.