

基于阵列激光波形特征识别的激光引信抗干扰方法

孟祥盛^{1,2}, 李京¹, 李乐堃¹, 李铁²

- (1. 中国空空导弹研究院, 河南 洛阳 471009;
2. 机电动态控制重点实验室, 陕西 西安 710065)

摘要: 针对激光引信易受云雾等气溶胶环境的干扰问题, 提出了一种基于阵列激光波形特征识别的抗干扰方法。根据脉冲激光在气溶胶环境的散射特性, 理论分析了发射脉冲宽度以及视场角对系统在干扰环境中目标识别的影响, 仿真了目标处于干扰环境中的波形时域特征, 并通过实验样机对仿真结果进行实测验证。基于回波波形特征, 设计了一种窄视场阵列激光回波特征数字化识别的探测系统方案, 并通过虚拟样机仿真技术获取了 2° 分辨率的目标和云雾的回波阵列数据。数据分析结果表明, 由于目标形体和云雾弥散体的物理差异, 目标回波阵列的能量方差极值及均值都大于云雾, 通过设定帧内回波阵列的能量方差的阈值和帧间方差累计的方法能有效提升激光引信抗干扰性能。文中的仿真和实测结果都为基于阵列激光波形识别的抗干扰方法的有效性提供了理论和实验依据。

关键词: 激光引信; 抗干扰; 激光成像; 波形特征识别

中图分类号: TJ43 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA20210837

Laser fuze anti-interference method based on array laser echo waveform feature recognition

Meng Xiangsheng^{1,2}, Li Jing¹, Li Lekun¹, Li Tie²

- (1. China Airborne Missile Academy, Luoyang 471009, China;
2. Science and Technology on Electromechanical Dynamic Control Laboratory, Xi'an 710065, China)

Abstract: Aiming at the problem that the laser fuze is easily interfered by cloud, fog and other aerosol environment, an anti-interference method based on the array laser echo waveform feature recognition is proposed. According to the scattering theory of pulsed laser in aerosol environment, the influence of pulse width and field angle on target recognition is analyzed. The time domain characteristics of target waveform in interference environment are simulated, and the simulation results are verified. Based on the characteristics of echo waveform, a detection system scheme of narrow field array laser echo feature digital recognition is designed, and the target and cloud echo array data with 2° resolution are obtained by virtual prototype simulation technology. The results of analysis indicate that the extreme value and mean value of pulse amplitude variance of target echo array are larger than that of cloud, and the method based on array laser echo waveform feature can effectively improve the anti-interference performance. The simulation and measured results provide theoretical and experimental basis for the effectiveness of the anti-jamming method based on array laser waveform recognition.

Key words: laser fuze; anti-interference; laser imaging; waveform feature recognition

收稿日期: 2021-11-10; 修订日期: 2022-02-07

基金项目: 国防重点实验室基金重点项目 (6142601190301)

作者简介: 孟祥盛, 男, 高级工程师, 主要从事光电探测与识别方面的研究。

0 引言

激光引信具有启动精度高、抗电磁干扰能力强等优势,目前已发展成为一种主流近炸引信而被广泛应用于世界多型空空导弹。但受工作体制影响,激光引信抗云雾、烟尘等气溶胶环境的干扰能力不足,该问题严重时会导致虚警和目标识别能力下降^[1-3]。特别是随着军事光电对抗技术的发展和新的作战方式的出现,激光引信面临的战场环境日益复杂。如:在复杂气象条件下,低空掠海飞行时遇到低能见度雾团环境,飞机空中对抗过程中密集投放红外干扰弹而产生大面积烟障散布区,这些高浓度气溶胶环境都对激光引信的可靠工作带来严峻的挑战。如何提高激光引信的抗干扰问题,一直都是该领域的研究热点。在此背景需求下,传统抗干扰方法包括拉大收发基线设置近距盲区、波门选通等方式无法进一步提高其抗干扰能力。因此,近年来发展了包括激光相干检测^[4-5]、双波长探测^[6-7]、偏振光探测^[8]等抗干扰技术,但还未形成主流的解决方案。文中分析了脉冲宽度和视场角参数对目标与干扰回波特征的影响机理,提出了一种基于阵列激光回波特征识别的抗干扰方法。该方法是利用阵列激光分时扫描探测和高速 ADC 采样技术,获取阵列激光周向探测回波波形的数字化特征,通过特征分析设计了回波阵列的能量方差阈值和方差累计的目标识别与抗干扰算法。通过仿真和实测结果表明,该方法能有效提升抗干扰能力,为激光引信抗干扰研究提供了一种新的思路。

1 探测场参数对目标与干扰回波特征的影响分析

激光探测场是实现激光引信目标探测和抗干扰性能的重要决定因素,其参数中的探测视场角、激光脉冲宽度、光学基线等参数对性能的影响较大^[9]。文中在其光学基线和探测能力一定的情况下,主要从激光脉冲宽度和单次探测视场角两个因素进行分析。

1.1 激光脉冲宽度

实体目标表面散射和气溶胶介质散射存在物理学上的差异,实体表面为漫反射,其反射过程不影响回波信号的脉冲宽度。在系统带宽足够的情况下,探测系统检测到的回波幅度主要与目标漫反射系数相

关;而气溶胶介质表现为 Mie 散射,激光在气溶胶介质中传输过程,经过与气溶胶粒子多次散射的空间调制,对激光回波功率的一维时间分布产生了影响^[10]。

当激光引信激光发射系统产生高斯激光脉冲,工作于不连续的、具有边界的气溶胶环境中,根据气溶胶介质的脉冲特性,在通常的数值范围内,其后向散射过程中在激光接收系统输入端产生的气溶胶干扰光学信号包线变化特性具有如下形式^[11]:

$$P(H) = P_0 A_C f(\theta) \sigma_s \int_{H_0}^H \frac{S_H(R)}{R^2} e^{-2\sigma_s(R-H^*) - k_m(H-R)} dR \quad (1)$$

式中: $P(H)$ 为激光接收系统输入端上气溶胶干扰光学信号辐射强度包线函数; P_0 为辐射源的窗口处光功率; A_C 为激光接收系统入射光孔的面积; $f(\theta)$ 为气溶胶散射方向函数, θ 为反射表面的法线与表面—激光接收系统方向(观察方向)的夹角; σ_s 为气溶胶粒子的体积散射系数; $S_H(R) = S(R)/R^2 \theta^2$ 为接收、激光发射系统视场几何图形的重叠面积; R 为目标距离; H^* 为到气溶胶边缘轮廓的距离; H 为辐射的传播距离; H_0 为盲区深度; $k_m = 2/c\tau_n$, τ_n 为脉冲宽度。

由公式(1)可以看出,气溶胶对脉冲激光的后向散射能量与脉冲宽度有关。图1为在相同气溶胶环境下不同脉冲宽度的散射特性,仿真了 50 ns、30 ns、15 ns、10 ns 和 6 ns 的激光脉冲分别以脉宽中心处于 X 轴 0 点为时间基准,经过相同气溶胶环境后的回波功率的对比曲线。从图中可以看出,不同脉冲宽度条件下的回波功率有明显区别,脉冲越窄,回波幅度越小。

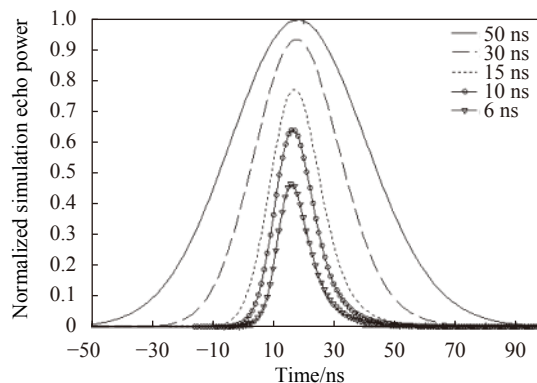


图 1 不同脉宽激光在气溶胶环境的后向散射特征

Fig.1 Backscattering characteristics of lase with different pulse width in aerosol environment

1.2 单次探测视场角

传统周视激光引信为保证对多类目标具有全向高检测概率,通常采用由 4~8 个探测象限连续拼接形成环形探测场。单个探测象限的激光发射组件和接收组件均具有较大的弧矢视场角。由于该视场角远大于远距目标最小截面形成的探测张角,在相同探测能力情况下,大视场角探测场的较多激光能量并不参与目标探测,而对于烟尘云雾等气溶胶介质环境,整个探测场的激光回波能量都会进入探测场,造成较强的后向散射干扰。基于上述问题,可将探测场进行视场细分,压缩单次探测的视场角,能有效抑制云雾、烟尘等气溶胶环境干扰回波。

根据主动激光探测原理,激光回波功率方程用下式表示:

$$P_R = \frac{P_T}{R^2 \Omega_T} \times \frac{(\rho A_T)}{\Omega_R} \times \frac{A_C}{R^2} \times \eta_T \eta_R \times \cos\theta \quad (2)$$

式中: P_R 为接收到的回波能量; P_T 为发射光能量; ρ 为目标反射率; $\eta_T \eta_R$ 为往返传输系数; Ω_T 为发射光束发散角; Ω_R 为返回光束发散角 ($\pi \times \pi$); A_T 为目标反射截面。

目标反射截面 A_T 为发射光斑在目标上的照射面积,其探测回波功率的计算以目标的最小激光截面来计算。当发射光束发散角为窄视场,其在目标距离处 Ω_T 内的投影面积小于目标形体面积时,其目标截面就是发射光斑的照射面积。当发射光束发散角为宽视场,其在目标距离内光斑投影大于目标截面时,其目标反射截面 A_C 为发射光斑在目标上的照射面积。根据公式 (2) 和几何关系,可得到相同探测能力下,宽视场与窄视场的激光发射能量关系,见公式 (3):

$$P_T^W = \frac{P_T^N \omega R}{L} \quad (3)$$

式中: P_T^W 为宽视场发射能量; P_T^N 为窄视场发射能量; L 为目标截面长度; ω 为宽视场情况下的弧矢视场角。

在目标最小截面 $L=0.6$ m, 探测距离 $R=9$ m 的条件下,当引信采用 45° 宽视场探测时,其弧矢视场角 $\omega = \pi/4$, 两种系统发射功率之比 $P_T^W/P_T^N \approx 11.8$ 。在目标探测方面,采用宽视场探测需要的激光发射功率远大于窄视场。而气溶胶环境通常能包容整个发射视场,激光发射功率大必然导致背景后向散射能量大。

图 2 是探测系统采用不同弧矢视场角回波波形曲线的仿真对比,其中 y 轴为归一化的回波功率。仿真过程采用相同发射功率和气溶胶干扰环境,采用弧矢视场角分别为 2.5° 、 8° 、 20° 、 45° 的情况下,目标的回波波形曲线对比情况。通过对比可得到如下结论:

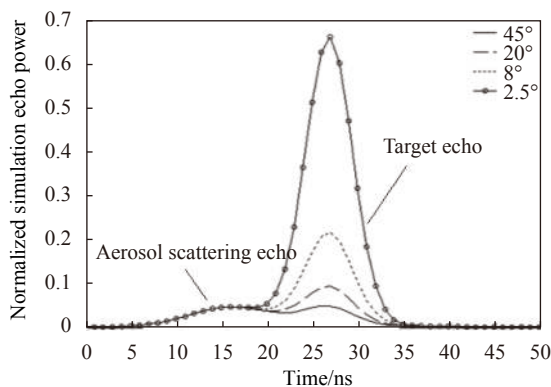


图 2 不同视场角的回波波形曲线的对比图

Fig.2 Comparison of echo waveform curves with different field angles

(1) 由于气溶胶环境能包容整个视场角,因此,当发射能量相同的情况下,不同弧矢视场角的气溶胶环境后向散射波形趋于一致,其回波特征与视场角相关性较小。

(2) 不同弧矢视场角的目标回波差异很大,采用视场角 2.5° 的目标回波功率比视场角 45° 大 10 倍以上。窄视场探测在相同干扰环境中能获得更强的目标回波,利于后级信号处理对目标回波包络的识别。

2 基于激光波形阵列特征识别的抗干扰方法

根据上述回波特性分析,采用窄视场、窄脉冲探测能显著增强激光脉冲在实体目标反射和气溶胶介质 Mie 散射两种情况下的回波特征差异。文中基于两者回波特征差异,提出一种窄视场激光阵列连续扫描探测的抗干扰方法。该方法不仅具有窄视场探测在抗干扰方法的先天优势,同时利用窄视场激光阵列扫描探测能获取周视连续空间精细化的回波波形特征,能有效提升抗干扰能力。

2.1 探测系统方案

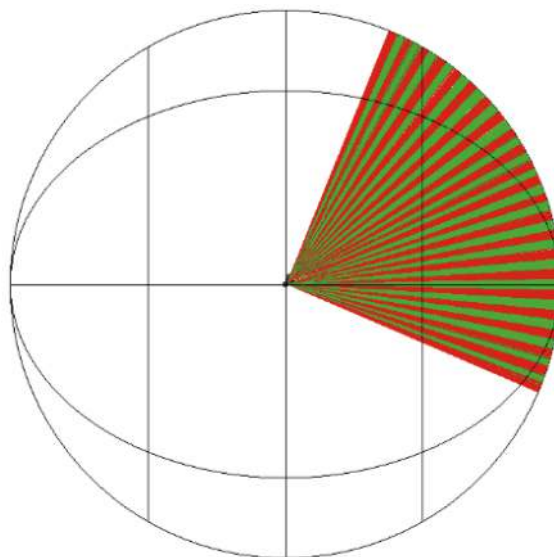
将传统多象限周视激光引信发射视场的激光光束进一步连续细分,通过发射视场整形将线阵激光器

的视场压缩和等角偏转形成角分辨率为 2° 的周视探测场。考虑到工程可实现性,引信的探测场分 8 个探测象限,每个探测象限由 23 线 2° 的激光探测通道组成,通过 8 个象限的连续拼接,覆盖周视 360° 探测场。

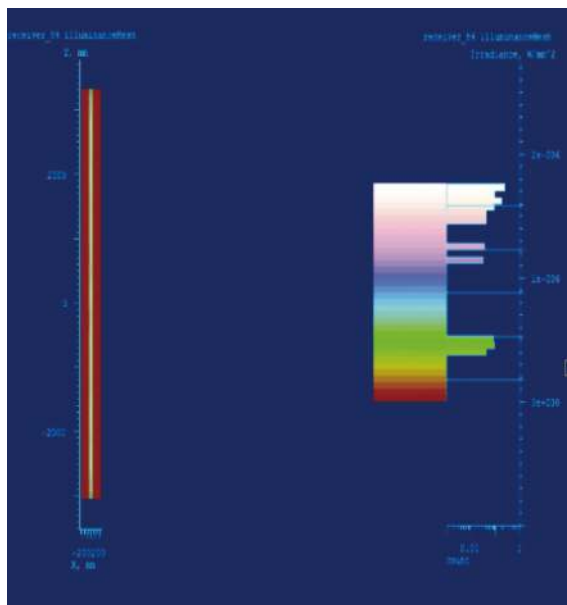
扫描激光发射系统的硬件实现由线阵半导体激光器和配套整形光学系统组成。该系统采用光机电一体化模组设计,为提高结构空间利用率,单个模组内包含了 2 个探测象限,每个象限各集成了 23 个半导体激光器芯片。每个激光器芯片后端各自集成驱动电路,并由信号处理系统的 FPGA 的多路时钟分时控制输出。激光器芯片前端装配整形光学系统,能将线阵激光器 23 个管芯通过拼接组合成 $46^\circ \times 0.5^\circ$ 的扫描场,单个管芯覆盖视场为 $2^\circ \times 0.5^\circ$ 。光学系统主要包括准直镜和偏转镜两组光学元件,其中:准直镜是将半导体激光器快轴方向准直到 0.5° ,便于发射能量的有效利用;偏转镜采用自由曲面设计,能将每个激光器芯片的慢轴方向压缩到 2° ,并利用曲面将不同位置的激光芯片等角偏转,实现在 46° 内均匀等角分布。经 LightTools 光学软件仿真,通过 2 个象限 23 线激光束进行拼接,形成 92° 的视场,单个波束边界分明,无旁瓣。图 3 为发射光学系统的远场分布与能量的仿真图。

激光接收系统由 8 个视场角为 $45^\circ \times 1.5^\circ$ 的激光接收模组组成,用于接收相应发射象限的激光回波。接收光学系统采用反远距物镜配合高折射率半球透镜的结构,通过光学浸没技术实现了焦平面尺寸的压缩,降低了探测器的结电容,可以满足纳秒级激光脉冲高速响应的需求。该光学系统同时具有低渐晕特点,该系统在 $0^\circ \sim 48^\circ$ 范围内在探测器上形成了较为均衡的能量响应,以保证扫描探测场内单个方位响应的均匀性,避免出现由于扫描视场内探测能力不一致而导致的目标灰度信息的失真。图 4 为接收系统光学追迹和不同视场的光斑能量的仿真图。

接收系统的光电探测器集成前置放大电路将回波信号放大后送至信号处理系统进行 1 GPS 高速 ADC 采样,能实时获取单线激光回波的波形特征、距离、幅度等信息,信号处理系统通过发射扫描的时间戳将接收到的信号时序融合实现单帧目标剖面数据,



(a) 远场分布追迹
(a) Far-field distribution tracing



(b) 视场能量分布
(b) Field of view energy distribution

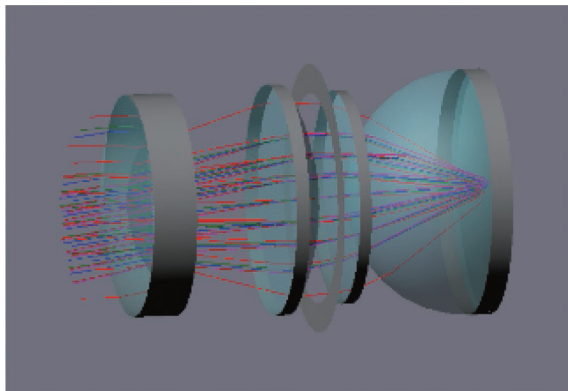
图 3 发射光学系统仿真图

Fig.3 Simulation of emission optical system

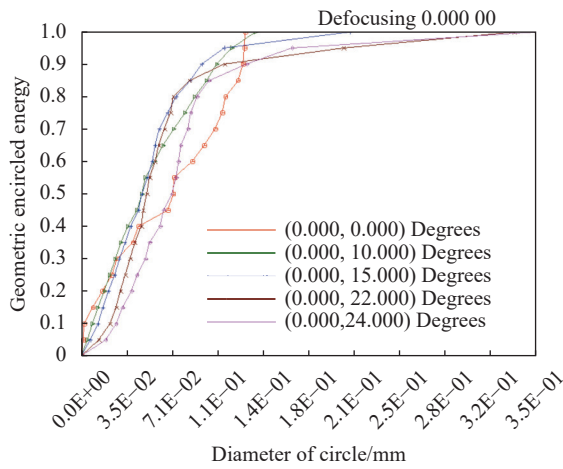
并通过两者交会过程中推扫形成目标局部图形的回波阵列数据。

由于采用多路发射共用单路接收方式,不仅在光学系统设计上便于在小体积空间内实现大角度前倾探测,能适应机载武器的结构空间上的应用需求,同时,其单元激光接收系统后端可集成高速 ADC 采样电路,能低功耗地获取全数字化的回波特征,具备回波波形全数字化特征识别与处理能力,并利用数字滤

波等技术降低杂波干扰,综合提升探测系统在干扰环境中对目标的识别能力。功能组成见图 5。



(a) 接收系统光学追迹
(a) Optical tracking of receiving system



(b) 不同视场光斑能量曲线
(b) Energy curves of light spots in different fields

图 4 接收系统光学追迹和不同视场的光斑能量仿真

Fig.4 Simulation of optical tracking of receiving system and spot energy in different fields

2.2 基于波形阵列特征识别的抗干扰方法

对于一定脉宽的单脉冲探测系统,云雾等气溶胶后向散射回波为单峰形态。而当目标处于气溶胶环境中,回波信号的特征是两者在时域上的叠加,因此,两者回波在时域上不重合时,会出现图 2 所示的双峰形态。而目标具有一定的形体尺寸,帧内各线的目标回波与干扰回波在时域上不可能完全重合。因此,当目标处于干扰环境中,可通过阵列回波的“双峰”特征数量累计快速完成目标的识别。

由于激光引信的抗干扰问题贯穿进出干扰环境的整个过程,特别是没有目标时的进入和退出环节,信号处理无法单纯利用双峰累计的方式进行目标识别。因此,需要根据目标形体和气溶胶弥散体的物理学差异影响回波阵列特征来解决该问题。由于目标的回波阵列特征与目标几何形体和表面散射特性有关,而一定距离内的气溶胶弥散体会充满整个视场,在各个角分辨率空间的回波一致性较高,其阵列特征表现为连续的“扁平化”,回波强度和距离信息均匀,不会出现目标形体边缘突变特征。一定距离内气溶胶在不同能见度下对探测系统的干扰仅是回波强度的变化,不会改变上述特征。

由于弹目交会过程中目标形体的复杂性,通常利用数字仿真技术获取目标和干扰的回波阵列特征。该技术由虚拟样机、目标模型、姿态控制等功能模块构成,能够获取不同交会姿态下的激光回波数据。将虚拟样机单次扫描视场角设定为 2°,单次扫描输出波形以 1 ns 为步进输出目标的反射回波,并通过连续扫描完成 360°周向探测,能获得单帧回波阵列数据,通过线阵推扫方式获得多帧目标的激光回波数据,组合形成目标的回波阵列。图 6 是从飞机目标正上方 0°方向 7 m 和侧上方 45°方向 7 m 两种交会过程的回波幅值阵列图,从仿真数据可以看到,阵列回波信号的幅值的空间分布呈现飞机目标形体特征,而且不同区域的回波幅值随目标不同区域的距离和目标形体散射特性变化较大。如图 6 所示,目标柱状机身边缘的回波功率明显弱于中间。正上方交会时,飞机机身中部区域的回波功率大于飞机两侧机翼部分。而从侧上方 45°方向交会时,距离飞机近的一侧的回波功率大于另一侧的回波能量。

根据对不同交会状态的回波阵列数据分析,单帧

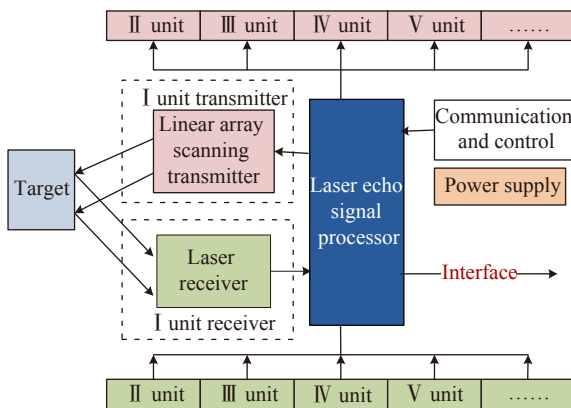
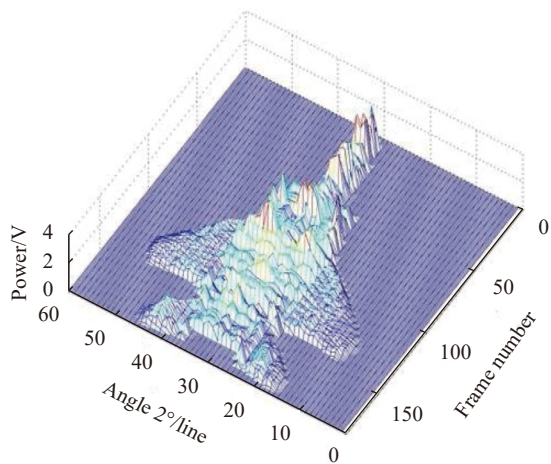
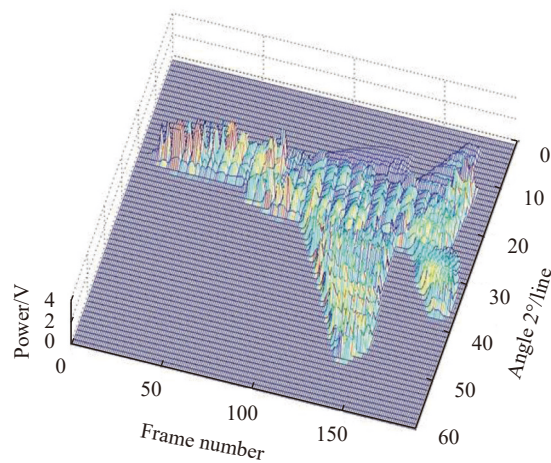


图 5 扫描成像探测系统原理图

Fig.5 Schematic diagram of scanning imaging detection system



(a) 正上方 0°
(a) 0° directly above



(b) 侧上方 45°
(b) 45° above side

图 6 典型交会过程的灰度图像

Fig.6 Grayscale image of the typical rendezvous

内不同线的激光回波信号受目标的形体和局部散射特征的差异影响而产生较大的离散性，而一定距离内的云雾等气溶胶干扰回波差异较小。因此，两者的回波特征在方差统计上存在一定的差异。图 7 是几种典型交会条件下目标与云雾回波灰度特征的均方差的对比，其中 X 轴为帧数，代表线阵扫描的次数，Y 轴为单帧内 180 线有效回波幅值的方差，图中云雾回波的方差在 180 帧内的数据平缓，其方差最大值为 0.26，方差均值为 0.24，而典型的目标回波方差在 180 帧内变化较大，除个别区域由于信号饱和、起伏补偿而导致的方差值较小外，其余方差值均大于云雾方差，3 种典型交会的方差最大值都近似为 5.9，均值分别为 0.6、1.1、2.1，因此，探测系统可通过设定帧内回波

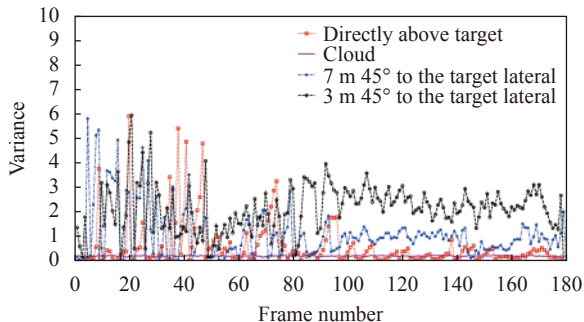


图 7 典型交会条件下目标与云雾回波能量的方差对比

Fig.7 Comparison of echo energy variance between target and smoke under typical conditions

阵列的能量方差的阈值和帧间方差累计的方式进行目标和干扰的阵列特征的识别。

基于上述波形阵列特征分析，信号处理系统还可复合帧内的距离方差进一步加强探测系统的目标识别与抗干扰能力。

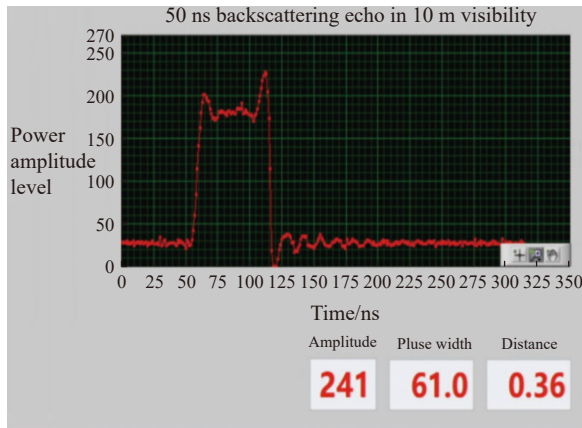
3 实验验证

为准确获取激光在干扰环境中的回波特性，在人工云雾环境实验室中开展高浓度云雾环境对激光脉冲传输特性的实测研究。实验装置采用发射视场角 $2^\circ \times 0.5^\circ$ ，激光脉冲宽度 5~100 ns 可调，探测系统在净空环境下探测距离 30 m。该装置后置配置 8 位 1 G 采样率的高速 ADC 电路，可通过通讯接口与上位机软件进行交联控制和数据采集。用该实验平台开展回波特性的数据库的建立与数据分析工作。

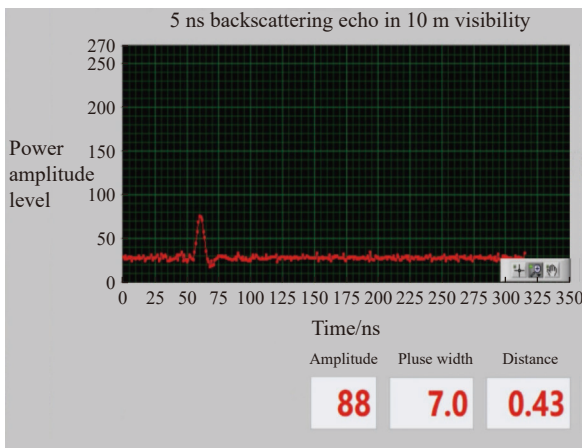
3.1 云雾环境对不同发射脉宽的反射回波特性对比

为验证脉冲宽度对气溶胶环境下的响应差异，开展了在一定能见度下云雾环境的回波特征采集实验。实验过程通过对实验样机的发射脉宽进行调整，实测峰值功率相同条件下，脉冲宽度分别 50 ns、5 ns 的激光束在 10 m 能见度云雾环境下的干扰回波特征，其上位机软件采集的结果见图 8。

经实测，脉宽 50 ns 时的后向散射回波峰值功率的幅度等级为 241，在时域上的位置为 0.36 m；脉宽 5 ns 时的后向散射回波峰值功率的幅度等级为 88，在时域上的位置为 0.43 m。采用 5 ns 发射脉宽的云雾散射回波幅度大幅降低，仅为 50 ns 脉宽的 0.36，而两者的时域位置基本一致，与文中仿真分析的结果一致。



(a) 50 ns 激光后向散射回波
(a) 50 ns laser backscattering echo



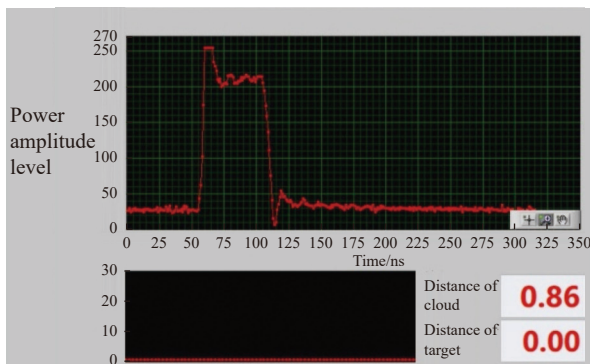
(b) 5 ns 激光后向散射回波
(b) 5 ns laser backscattering echo

图 8 在干扰环境下不同发射脉宽的回波特征对比

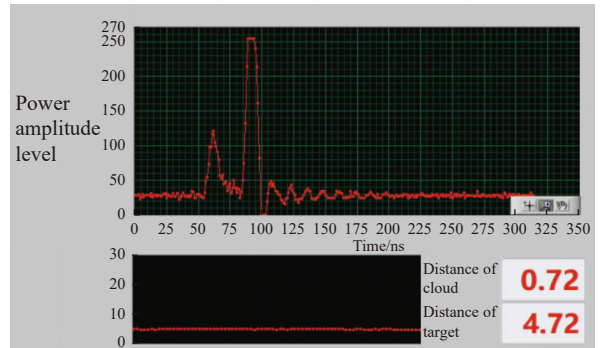
Fig.8 Comparison of echo characteristics with different pulse widths in interference environment

3.2 目标在云雾环境下的反射回波特性

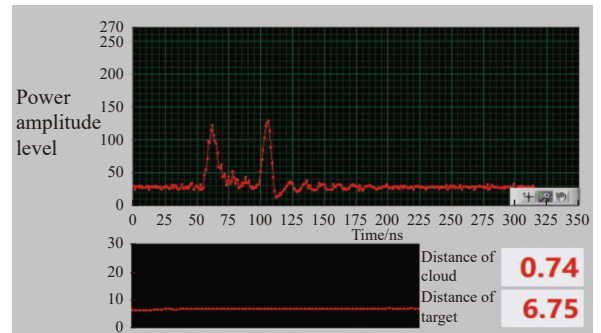
在云雾环境中,实测了目标位于不同距离时的回波特性,来获取目标处于云雾环境中回波特性。图 9



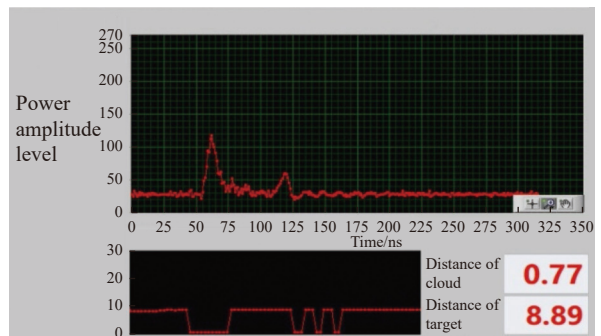
(a) 目标距离 1 m 以内
(a) Target within 1 m



(b) 目标距离 4.72 m
(b) Target at 4.72 m



(c) 目标距离 6.75 m
(c) Target at 6.75 m



(d) 目标距离 8.89 m
(d) Target at 8.89 m

图 9 低能见度云雾环境下目标处于不同距离处的回波特征

Fig.9 Echo characteristics of targets at different distances in low-visibility cloud environment

(a)~(d) 为低能见度云雾环境下目标处于不同距离时的波形特征。当目标处于近距离时,其回波信号幅度因过饱和而展宽覆盖了云雾回波,其回波宽度出现了明显的展宽。当目标渐远,目标回波与云雾回波在时域上分离。其中云雾回波的幅度和时域上位置稳定保持不变,表现为近距离范围内固定回波,而目标回波的时域位置随目标距离移动,其幅值受云雾散射而衰减,并随距离呈指数系数下降,其衰减量由云雾的浓

度和厚度决定。由于目标形体反射产生的双包络的特征概率较低,因此,通过回波阵列的双包络特征的累计可以快速识别干扰环境中的目标。

4 结 论

文中理论分析了脉冲宽度和视场角参数对系统在干扰环境中识别目标的影响,采用窄脉冲和窄视场探测能有效抑制干扰回波能量,在相同干扰环境中能获得更强的目标回波。为准确获取激光在干扰环境中的回波特性,开展了云雾环境对激光束传输特性的实测研究,实测结果表明:在相同峰值功率条件下,采用 5 ns 发射脉宽的云雾后向散射回波功率大幅降低,仅为 50 ns 脉宽的 0.36;当目标在云雾环境中,回波信号是两者时域上的叠加,目标回波的时域位置随目标距离移动,幅度随距离呈指数系数下降。

根据目标与干扰回波特性,文中提出一种利用阵列激光回波特征的数字化识别方法,并通过虚拟样机仿真技术获取了目标和云雾的回波阵列数据。根据数据分析结果,云雾回波的方差数据平缓,其方差最大值为 0.26,方差均值为 0.24;而典型目标回波方差变化较大,3 种典型交会的方差最大值都近似为 5.9,均值分别为 0.6、1.1、2.1,其余方差值和最大值均大于云雾方差,可以通过阵列回波幅值的方差阈值和方差累计进行数字化识别。该方法综合了窄脉冲和窄视场探测、目标和干扰的波形特征、空间精细化探测等多方面优势,为激光引信抗干扰研究提供了一种新的思路。

参考文献:

[1] Chen Huimin, Ma Chao, Qi Bin, et al. Study on backscattering

- characteristics of pulsed laser fuze in smoke [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2020, 49(4): 0403005. (in Chinese)
- [2] Chen Nianjiang. Review of 3D laser imaging technology [J]. *Laser & Infrared*, 2015, 45(10): 1152-1156. (in Chinese)
- [3] 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)
- [4] Liu Ximin, Zhang Jianhua, Yang Dezhao, et al. Review on coherent laser fuze [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2018, 47(3): 0303001. (in Chinese)
- [5] 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)
- [6] 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)
- [7] 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)
- [8] Meng Xiangsheng. Applications of the polarization detection in laser fuze anti-environmental interference [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42(7): 1716-1719. (in Chinese)
- [9] Wang Guangsheng. Characteristics and discrimination of cloud backscatter for laser fuze [J]. *Journal of Detection & Control*, 2006, 28(6): 20-24. (in Chinese)
- [10] Li Lekun, Li Yuan, Gao Chong, et al. Study on echo characteristics of narrow pulse laser fuze on targets in cloud [J]. *Aero Weaponry*, 2021, 28(5): 106-109. (in Chinese)
- [11] Li Jing, Mei Hao, He Chenglin, et al. Laser fuze anti-interference method based on pulse width modulation technique [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2020, 49(4): 0403007. (in Chinese)