

激光弱信号探测实验

胡晓飞 孟祥飞 张俊 李天泽 任玮辰 温阳 王冬 霍明磊

Laser weak signal detection experiment

HU Xiaofei, MENG Xiangfei, ZHANG Jun, LI Tianze, REN Weichen, WEN Yang, WANG Dong, HUO Minglei

引用本文:

胡晓飞, 孟祥飞, 张俊, 等. 激光弱信号探测实验[J]. 应用光学, 2025, 46(5): 1119–1125. DOI: 10.5768/JAO202546.0507002

HU Xiaofei, MENG Xiangfei, ZHANG Jun, et al. Laser weak signal detection experiment[J]. Journal of Applied Optics, 2025, 46(5): 1119–1125. DOI: 10.5768/JAO202546.0507002

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.5768/JAO202546.0507002>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

单光子激光主动探测信噪比数学建模与评估

Mathematical modeling and evaluation of signal-to-noise ratio for single-photon laser active detection

应用光学. 2025, 46(1): 194–201 <https://doi.org/10.5768/JAO202546.0107001>

用于眼轴长度测量的弱光信号检测系统设计

Design of weak optical signal detection system for measuring eye axial length

应用光学. 2020, 41(5): 898–903 <https://doi.org/10.5768/JAO202041.0501004>

太赫兹时域光谱仪光谱范围和信噪比校准技术

Calibration technology for spectral range and signal-to-noise ratio of terahertz time-domain spectrometer

应用光学. 2023, 44(5): 1068–1072 <https://doi.org/10.5768/JAO202344.0503002>

基于稀疏表示的激光光斑复原方法

Laser spot restoration method based on sparse representation

应用光学. 2024, 45(3): 543–548 <https://doi.org/10.5768/JAO202445.0310008>

脉冲激光测距回波信号时间选通处理技术

Time-gated processing of pulse laser ranging echo signal

应用光学. 2020, 41(6): 1284–1288 <https://doi.org/10.5768/JAO202041.0607002>

四象限探测器光斑检测原理及其研究进展

Principle and research progress of four-quadrant detector spot detection

应用光学. 2023, 44(5): 927–942 <https://doi.org/10.5768/JAO202344.0509001>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

文章编号: 1002-2082 (2025) 05-1119-07

引用格式: 胡晓飞, 孟祥飞, 张俊, 等. 激光弱信号探测实验[J]. 应用光学, 2025, 46(5): 1119-1125.

HU Xiaofei, MENG Xiangfei, ZHANG Jun, et al. Laser weak signal detection experiment[J]. Journal of Applied Optics, 2025, 46(5): 1119-1125.



在线阅读

激光弱信号探测实验

胡晓飞, 孟祥飞, 张俊, 李天泽, 任玮辰, 温阳, 王冬, 霍明磊

(北京航天飞腾装备技术有限责任公司, 北京 100094)

摘要: 半主动激光导引头因其小型化、低成本、精度高等特性, 在武器制导系统中已广泛应用。针对激光回波弱信号信噪比低, 探测能力弱的问题, 分析了影响回波弱信号的相关因子, 提出从光学系统方面抑制背景噪声, 优化光斑椭圆度、均匀度指标; 通过高速直采方式进行多特征识别判决, 实现弱信号完整波形的特征提取, 提高系统的信噪比。激光光斑质量和高速直采试验结果表明: 优化后光斑椭圆度约为95%, 均匀度为80%, 信噪比优于传统的10 dB, 有效捕获距离大于6 km。该研究满足新一代激光探测在远距离末制导、抗干扰等方面的需求, 具有一定的工程应用参考价值。

关键词: 激光弱信号; 光斑椭圆度、均匀度; 信噪比; 高速直采

中图分类号: TN249

文献标志码: A

DOI: 10.5768/JAO202546.0507002

Laser weak signal detection experiment

HU Xiaofei, MENG Xiangfei, ZHANG Jun, LI Tianze, REN Weichen,
WEN Yang, WANG Dong, HUO Minglei

(Beijing Aerospace Feiteng Equipment Technology Co., Ltd, Beijing 100094, China)

Abstract: The semi-active laser seeker has been widely used in weapon guidance systems due to its miniaturization, low cost, and high precision. Concerning the issues of low signal-to-noise ratio and weak detection ability of weak laser echo signals, this paper analyzed the relevant factors influencing weak echo signals. It was proposed to suppress background noise from the perspective of the optical system, and optimize the indicators of the spot ellipticity and uniformity. By using high-speed direct sampling method for multifeature recognition and judgment, achieving feature extraction of weak signal complete waveform, improving signal-noise ratio. The results of laser spot quality and high-speed direct sampling experiments indicated that the ellipticity of the spot is about 95%, and the uniformity is 80%, the signal-noise ratio is greater than 10 dB, the detection limited distance is greater than 6 km. This study meets the needs of laser detection in terms of long-range terminal guidance, antiinterference, and has certain engineering application reference value.

Key words: laser weak signal; ellipticity and uniformity of light spot; signal-noise ratio; high-speed direct sampling

引言

激光制导武器具有灵活、快速、精确度高、成本低等多个优异性能, 逐步占据了精确制导武器家族的重要地位, 受到越来越广泛的关注^[1]。激光

制导的原理是激光照射目标, 导引头探测器接收回波信号, 经过信号处理, 解算出导弹与目标的偏差角进行末制导, 最终精确命中目标^[2]。随着武器的制导精度、突防能力和目标观测能力的需求, 对

收稿日期: 2024-11-06; 修回日期: 2025-04-27

第一作者: 胡晓飞, E-mail: 740183340@qq.com

通信作者: 孟祥飞, E-mail: 839551748@qq.com

传统的末制导距离 6 km 提出了更高的探测要求。尤其是在战场上持续攻击多目标过程中,受背景光、后向散射、导弹尾烟,爆炸点尘烟大等外界干扰的影响下^[3],回波能量衰减、散射和衍射非常严重^[4]。如何正确识别、捕获弱回波信号,提高导引头的探测能力,是目前众多学者研究的课题。

针对激光回波信噪比低,识别和捕获难度大的问题,国内外学者在硬件电路和光学设计两个方面分别进行了相关研究工作。文献[5]中基于锁定放大信号的检测系统将信噪比改善至 10.6 dB,提高了探测距离。文献[6]中采用序列性光线追迹和非序列性光线追迹相结合的方法,仿真了导引头光学系统 $\pm 4^\circ$ 、 $\pm 1.5^\circ$ 视场内光斑均匀性指标,分别大于 75%、90%。文献[7]中设计了一套全新的回波信号检测处理系统,很好地提取了信噪比低、脉宽窄、幅值小的回波信号。文献[8]中采用高速相关采样和在线实时并行处理的算法,实现了实验室内 0.04 nW 功率信号的探测。但是,目前针对影响激光导引头接收信号强弱的相关综合因子的研究相对较少,且采用传统的峰值保持体制实现大于 6 km 的作用距离比较困难。因此,有必要对激光回波进行综合分析,找出影响信号强弱的关键因子并进行优化,以提高弱信号的探测能力。

1 弱信号探测相关因子

半主动激光制导武器主要由照射器、激光探测平台等构成,在分析弱信号探测相关因子时,需要在同等条件下进行判定。下面主要从激光雷达方程、制导原理和信噪比三个方面对导引头的外界条件与内在设计进行理论分析。

1.1 激光雷达方程

激光雷达方程如式(1)所示:

$$P_r = \frac{P_t \rho k \cos \theta \tau_t \tau_r}{\pi R^2} \quad (1)$$

式中: P_r 为入瞳处能量密度,单位 fJ/cm^2 ; P_t 为照射器能量,单位 mJ ; ρ 为漫反射系数; k 为光斑在目标表面的能量占比(默认为 1); θ 为弹目连线与目标法线的夹角,单位($^\circ$); R 为接收距离,单位 km ; τ_t 、 τ_r 为大气衰减系数。

通过式(1)可知,需要在同等条件下进行弹目距离 R 比测。设定初始弹目距离 R_0 拉距至 R_1 ,则能量由 P_0 衰减至 P_1 ,导引头接收能量与弹目距离平方成反比,如式(2)所示:

$$\frac{P_{r0}}{P_{r1}} \propto \frac{R_0^2}{R_1^2} \quad (2)$$

其次,同等条件下,进行目标反射系数 ρ 比测。设定初始反射系数 ρ_0 衰减至 ρ_1 ,则能量由 P_0 衰减至 P_1 ,能量和反射系数成正比关系,如式(3)所示:

$$\frac{P_{r0}}{P_{r1}} \propto \frac{\rho_0}{\rho_1} \quad (3)$$

在忽略大气传输影响下,室内可以通过导引头的入瞳密度大小来近似模拟反射系数衰减或者弹目距离变化,进行弱信号提取实验。入瞳密度等效电压^[9]如式(4)所示:

$$V_r = \frac{E_r S_B K_A R}{t_A} \quad (4)$$

式中:参数 E_r 、 S_B 、 K_A 、 t_A 、 R 分别表示能量电压、镜头面积、灵敏度、激光波峰时间、电阻。

在不可忽略大气衰减因子的情况下,可通过室外挂飞试验进行弹目拉距,来衡量弱信号的探测能力。

1.2 制导原理

探测器光斑的几何表达式^[10]如式(5)所示:

$$\begin{cases} P_{rx} = \frac{2k[\arcsin(\frac{x}{r}) + \frac{x}{r} \sqrt{1 - (\frac{x}{r})^2}]}{\pi} \\ P_{ry} = \frac{2k[\arcsin(\frac{y}{r}) + \frac{y}{r} \sqrt{1 - (\frac{y}{r})^2}]}{\pi} \end{cases} \quad (5)$$

式中: P_{rx} 、 P_{ry} 、 x 、 y 、 k 、 r 分别表示航向分解能量、俯仰分解能量、航向制导偏差、俯仰制导偏差、比例系数、光斑半径。

通过式(5)可知,当回波功率 P_r 进入导引头时,航向、俯仰两个方向的制导偏差精度与光学系统设计直接相关^[11],包括光学系统的透过率、探测器脉冲响应率、离焦量、光斑直径、均匀度、椭圆度等。

1.3 信噪比

探测组件信噪比如式(6)所示:

$$SINR = 20 \lg \left(\frac{V_{\min}}{\sqrt{V_n^2 + V_0^2}} \right) \quad (6)$$

式中: $V_{\min}$ 、 V_0 、 V_n 分别表示探测组件门限值、电路噪声、系统噪声(背景光噪声、探测器功率噪声)。

从式(6)可以看出:信噪比与探测组件门限值成正比,与探测器的系统噪声和电路噪声成反比^[12]。传统的峰值保持探测电路,大多数的最小探测门限值为 60 mV~100 mV,有效探测距离约为 6 km。因此,降低探测门限,提高系统信噪比,可以提高弱信号探测能力。

2 光学及软硬件设计

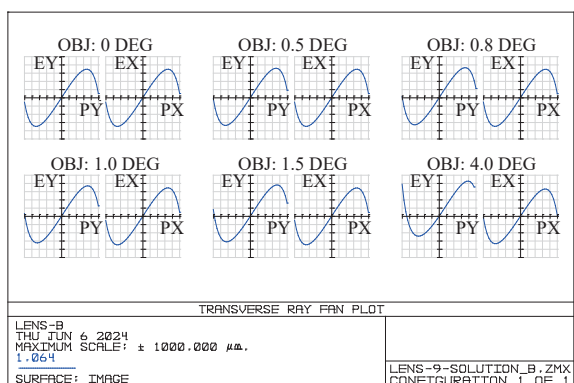
2.1 光学设计

光学设计的主要指标如下:

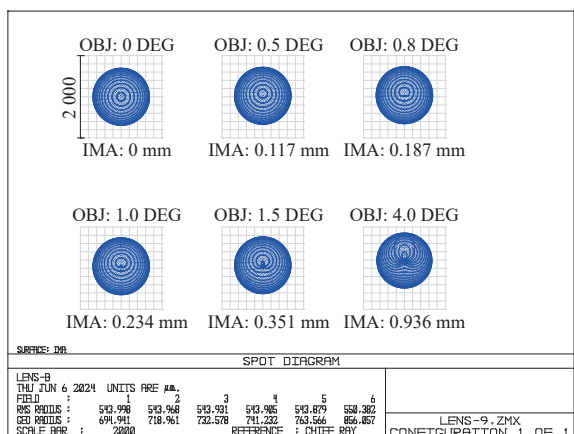
- 1) 瞬时视场: $\pm 4^\circ \pm 0.5^\circ$, 线性区: $\pm 1^\circ \pm 0.5^\circ$;
- 2) 系统畸变: $\leq 1\%$ 。

本文重点从光学成像光斑的均匀度、椭圆度、抑制杂散光等3个方面进行优化设计。

选择光源类型、窄带滤光片、透镜及模型布局, 采用序列性光线追迹的方法进行各种光学像差的校正以保证光斑质量。根据光斑的分析结果, 采用软件内置的遗传算法、梯度下降法等搜索最优的光学元件的曲率半径、厚度和材料^[13], 以及元件之间相对的位置和角度, 调整光线聚焦和扩散特性, 以控制光线的传播和分布, 从而优化光斑的均匀度和椭圆度。根据优化结果迭代改进模型, 重复光线追迹和光斑分析, 直至满足设计要求, 设计光斑直径为 1.5 mm。对典型的 0° 、 0.5° 、 0.8° 、 1° 、 1.5° 、 4° 视场的几何像差曲线、弥散斑进行仿真, 结果如图 1 所示。从仿真结果可知, 像差



(a) 几何像差曲线



(b) 典型视场弥散斑

图 1 光学系统仿真图

Fig. 1 Optical system simulation diagram

对称性良好, 光斑均匀度大于 81.1%, 椭圆度大于 98.8%, 系统得到较好优化设计。

在抑制杂散光方面, 主要从优化光学元件的位置和角度, 并在非球面镜片表面施加防反射涂层, 以减少光线在系统内部的不必要反射和散射^[14], 同时采用半高宽为 5 nm 的滤波片来抑制杂散光干扰, 计算得到系统的透射率大于 81%, 满足设计要求。

2.2 软硬件设计

在电路部分, 通过直采电路架构代替传统的峰值保持电路架构模式, 软件采用多特征识别算法。

2.2.1 直采电路架构

高速直采硬件电路主要由可编程逻辑门电路 (FPGA), 高速模数转换 (AD), 差分双巴伦、自动增益控制 (AGC)、前置放大等电路模块构成, 如图 2 所示。

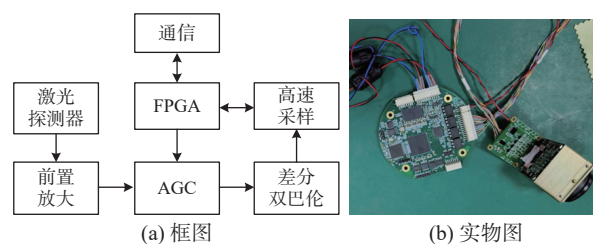


图 2 硬件电路图

Fig. 2 Hardware circuit diagram

2.2.2 多特征识别算法

多特征识别算法包含 CFAR 检测器, 脉冲特征识别算法。其中, CFAR 检测器根据背景噪声及虚警率自适应计算阈值门限, 对弱回波信号进行初步识别, 根据回波能量是否触发阈值门限值进行 0/1 二值化处理。传统的脉冲检测方案受限于低速的处理器系统和单点采样数据样本, 通常获取脉冲的幅值并采用简单的阈值门限进行判决, 门限调整速度慢, 通常为毫秒至秒级, 对于快速变化的噪声环境自适应能力弱。本文借鉴雷达信号处理中恒虚警率 (CFAR) 检测算法, 可以快速、实时调整阈值门限, 自适应各类噪声环境。

脉冲特征识别算法主要对采样波形的能量、幅值、脉宽、边沿、相位等特征进行检测, 特征匹配后进行 0/1 二值化处理。传统的脉冲识别手段只能获取到脉冲的峰值幅度单一信息, 抗干扰信号的能力有限^[15], 为了保证信号识别的虚警率和捕获概率, 难以进一步降低阈值门限。

当上述 CFAR 检测和脉冲特征识别两者同时判定为真时,则判定目标识别成功,算法流程图如图 3 所示。采用并行处理、联合检测的技术方案,相比传统常规单一的幅值检测方法,可以有效提高检测信噪比。多特征识别判决算法能自适应不同的环境变化,剔除畸变、振铃等形式的脉冲信号干扰,并通过降低阈值门限值来提高对弱信号的识别能力。

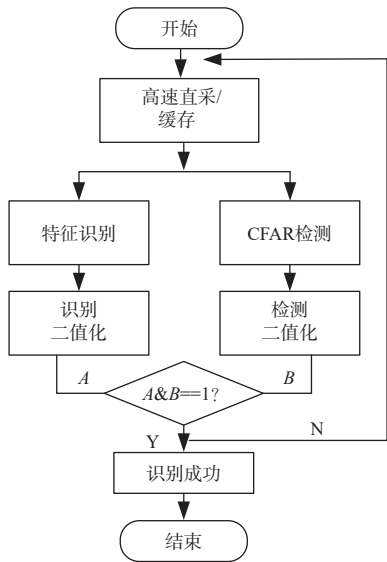


图 3 算法流程图
Fig. 3 Algorithm flowchart

3 实验

3.1 光斑质量实验

光斑质量实验原理和装置如图 4 所示。采用激光器(标号 1)、准直扩束准直系统(标号 2),使得被测镜头(标号 3)与扩束准直光斑基本共轴;调整光束质量分析仪(标号 5),即电荷耦合元件(CCD)前增加一倍显微物镜(标号 4),使被测镜头聚焦光斑成像于测量视场内,轴向微调光束质量分析仪,使成像光斑直径为 $1.5\text{ mm}\pm0.1\text{ mm}$ 。测试结果如图 5 所示。

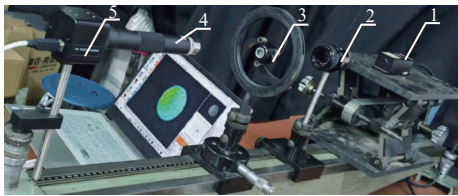
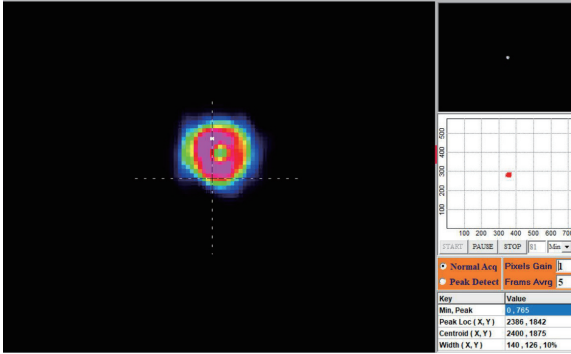
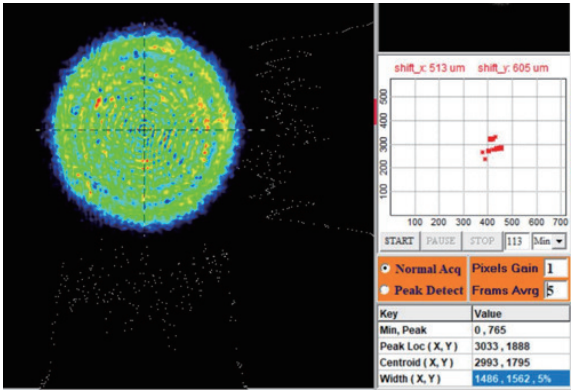


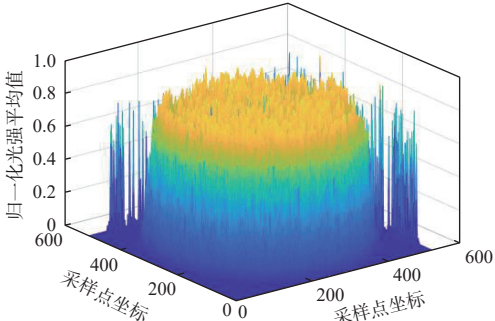
图 4 光斑质量检测试验
Fig. 4 Experiment of light spot quality detection



(a) 照射器(椭圆度90%)



(b) 光斑直径 1.5 mm(椭圆度95%)



(c) 光斑直径 1.5 mm(均匀度80.01%)

图 5 光斑均匀度

Fig. 5 Ellipticity of light spot

未安装被测镜头时,激光照射器光斑的成像均匀度较差,椭圆度为 90%。加上被测镜头后,能量粒子呈现高斯分布模式,椭圆度为 95%。相比传统全球面镜光斑设计的椭圆度 85%~90%,线性区内光斑圆度提升了 5%~10%;对光斑有效区域进行光强值归一化分析,均匀度为 80.01%,相比常规的全球面镜设计均匀度 70%,提升了约 10%,实测值与仿真设计基本保持一致,光学系统得到了优化。

3.2 室内试验

实验室内搭建测试环境,采用高动态目标模拟器(标号 1)、激光探测组件(标号 2)、高速示波器(标号 3)、PC 机(标号 4)等仪器设备,如图 6 所示。

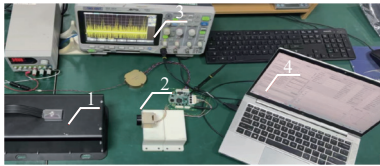


图 6 直采实验

Fig. 6 Direct sampling experiment

实验室内,在忽略大气衰减的条件下,选取参数 K_A 、 t_A 、 S_B 、 R 、 P_r 分别为 9 A/W、15 ns、5.31 cm²、10 kΩ、1 fJ/cm²时,由式(4)计算得到能量电压为 31 mV,因此对于 1 fJ/cm²的目标回波信号,需要能够检测出不大于 31 mV 的脉冲信号。

在 80 mJ 照射器在典型应用高度 3 km、斜度 10 km 的照射条件下,选取参数 ρ 、 τ_t 、 τ_r 、 θ 、 P_r 分别为 0.2、0.14、0.14、45°、1 fJ/cm²时,由式(1)计算出接收距离约为 8.5 km,即特定条件下 1 fJ/cm²等效模拟室外 8.5 km。

对探测组件第一级调控 I-V 放大处进行示波器采样,并经过 AGC 放大后对弱回波信号进行多特征识别判决,测试结果如图 7 所示。同理,对其他等效入瞳密度进行角噪声测量与识别,采集数据如表 1 所示。

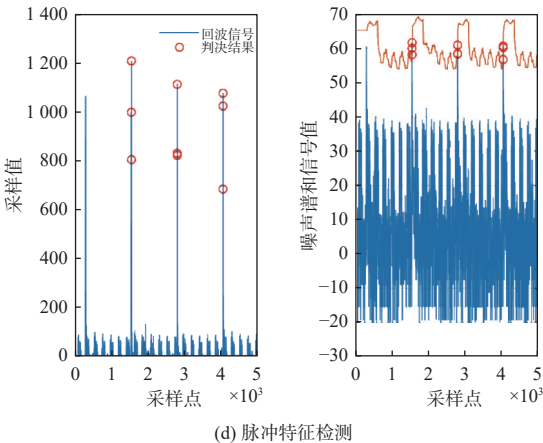
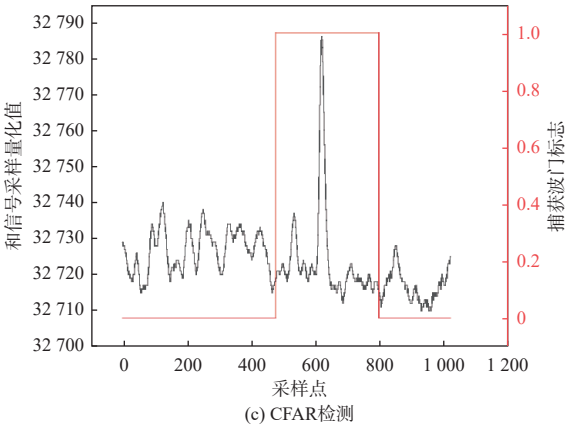
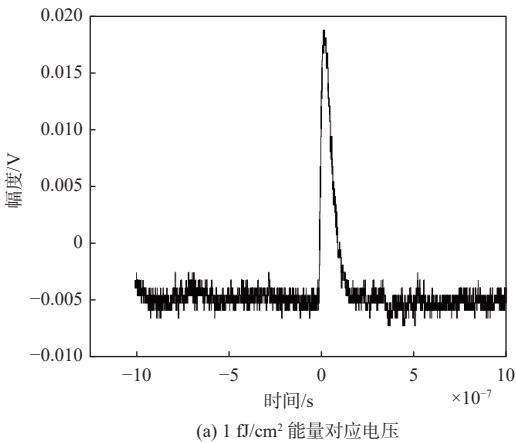
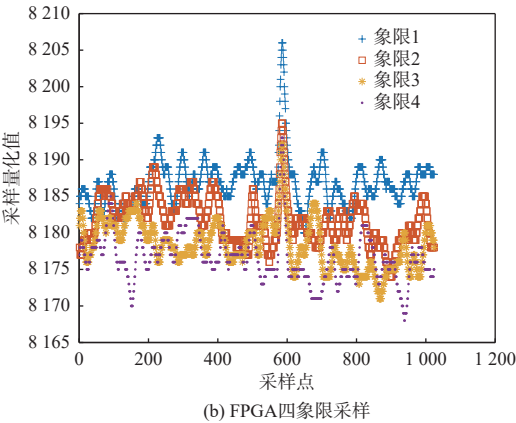


图 7 高速直采图

Fig. 7 Figures of high speed direct sampling



(a) 1 fJ/cm² 能量对应电压



(b) FPGA四象限采样

表 1 等效距离测试结果

Table 1 Equivalent distance test results

编号	入瞳密度/ (fJ/cm ²)	等效 距离/m	测角 噪声(1σ)/(°)	虚警率/‰
1	1	8 500	0.047	0
2	2	8 000	0.034	0
3	7	5 000	0.014	0
4	234	1 000	0.0022	0
5	25 389	100.0	0.0014	0

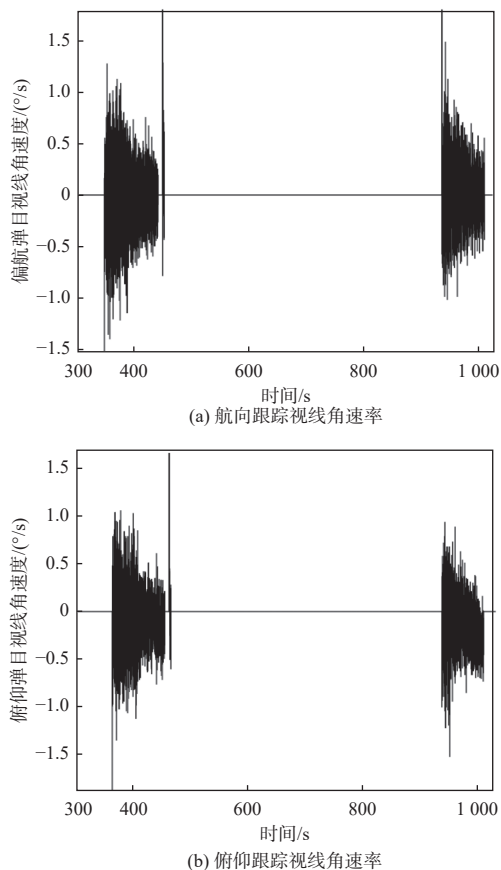
从图 7(a)可知, 1 fJ/cm² 入瞳密度对应实际探测有效脉冲电压峰值约为 25 mV, 为示波器采样获取的脉冲信号, 与上述通过式(4)理论计算值 31 mV 近似相等。通常电路噪声、背景环境等噪声累加后幅度实测约为 10 mV~20 mV, 传统方案由于采样率低, 无法获取到脉冲全部特征, 为了保证足够高的捕获概率(通常大于 98%)和较低的虚警率(通常小于 1.67%), 脉冲检测峰值应为 60 mV~100 mV, 电压检测信噪比需要大于 3~3.5 倍(约 10 dB)。通过图 7(b)、(c)可知, 四象限信号经过 AGC 被

FPGA 高速采样后,可获取到脉冲的完整波形特征数据,以供脉冲检测增强算法使用。通过图 7(d)进行 CFAR、脉冲特征并行检测识别、自适应调整阈值门限算法仿真验证,本方案可有效捕获到进入 AGC 前的 25 mV 脉冲弱信号,最低可适应电压检测信噪比约为 1.6~2 倍(约 4 dB~6 dB),检测能力相比传统方案有较大提升。

由表 1 实测值可知,在忽略大气衰减的条件下,测角误差随着入瞳密度衰减即模拟拉距实验,测角噪声阶梯增大,最大值均方根不大于 0.05° ,每次测试时长为 60 s,误捕获(测角突跳大于 0.2°)、漏捕获(丢光)的次数均为 0 次,说明虚警率全程控制在 1.67‰ 以内,室内模拟实验探测距离可达 8.5 km。对比传统最小能量值检测幅值约为 60 mV,探测距离为 6 km,探测能力得到明显提升。

3.3 挂飞实验

在室外进行挂飞拉距实验,验证在大气衰减条件下,测试导引头的探测捕获能力。试验条件如下:大气能见度大于 15 km,距离靶标 3 km 处采用地面照射,激光出光能量 80 mJ,反射系数为 0.2,导引头由 20 km 处向靶标进行平飞搜索回波信号。挂飞数据如图 8 所示。



(c) 弹目距离和捕获状态

图 8 挂飞数据

Fig. 8 Flight test data

由图 8(c)可知,导引头在 350.1 s 时,在弹目距离 9.936 km 处正确捕获目标(工作状态变为 2[稳定跟踪]),捕获距离优于传统的 6 km,导引头的跟踪视线角速率噪声随着作用距离拉近逐渐收敛,视线噪声均方根小于 $0.7^\circ/\text{s}$,即在大气环境噪声条件下,制导偏差均方根近似 0.07° ,是室内测试探测噪声的约 1.5 倍,达到预期设计目的。全程跟踪试验中未出现误判情况,多特征识别判决方式有效,背景得到有效抑制,与设计仿真结果基本一致,能够有效提高系统的信噪比和弱信号的探测能力。

4 结论

为提升激光回波信号的探测能力,论证了相关因子,提出基于光斑质量、高速直采电路架构、多特征识别的方法来提高信噪比,并进行了室内外实验,与预期设计的大于 6 km 的探测理论保持一致,具有一定的设计参考价值。因为激光弱信号探测与测试环境、外界干扰、系统耦合噪声等多方面复杂因子相关,后续将对探测系统的可靠性和抗干扰等方面作进一步探索研究。

参考文献:

- [1] WILSON J R. The future of precision-guided munitions[J]. Military & Aerospace Electronics, 2009, 20(12): 20-29.
- [2] 邢锦云. 半主动激光导引头接收装置优化研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2022.
XING Jinyun. Optimization research on receiver device of semi-active laser seeker [D]. Xi'an: Xidian University, 2022.

- [3] 刘辉, 谷琼琼, 李英博, 等. 半主动激光导引头抗后向散射干扰[J]. *制导与引信*, 2018, 39(3): 1-5.
LIU Hui, GU Qiongqiong, LI Yingbo, et al. The semi-active laser seeker against backscattering interference[J]. *Guidance & Fuze*, 2018, 39(3): 1-5.
- [4] ZONG S G, ZHANG X, DUAN Z K, et al. Research on laser dual-mode fusion detection method of ship wake bubbles[J]. *Applied Sciences-Basel*, 2024, 14(9): 1-21.
- [5] 赵子任, 吕勇, 牛春晖. 基于锁定放大的微弱激光回波信号探测系统[J]. *电子测量技术*, 2014, 37(3): 116-120.
ZHAO Ziren, LYU Yong, NIU Chunhui. Weak laser echo signal system detection based on lock-in amplifier technology[J]. *Electronic Measurement Technology*, 2014, 37(3): 116-120.
- [6] 郑建锋. 激光导引头中基于四象限探测器的光学设计[J]. *光学技术*, 2023, 49(1): 11-16.
ZHENG Jianfeng. Optical design based on four quadrant detector in laser seeker[J]. *Optical Technique*, 2023, 49(1): 11-16.
- [7] 吕明爱, 柳建, 王江. 激光测距回波信号高速采样处理技术研究[J]. *光电工程*, 2011, 38(5): 59-63.
LYU Ming'ai, LIU Jian, WANG Jiang. High-speed sampling technology in laser ranging[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2011, 38(5): 59-63.
- [8] 沈仲戔, 封常青, 高山山, 等. 基于高速相关采样的锁模激光回波实时检测[J]. *红外与激光工程*, 2017, 46(12): 1217002.
SHEN Zhongtao, FENG Changqing, GAO Shanshan, et al. Real-time detection of mode-locked laser echo signal based on high-speed correlation sampling[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2017, 46(12): 1217002.
- [9] LANG B, HUANG Q, MI C W, et al. Design of the automatic gain control device in the laser seeker[J]. *Journal of Physics: Conference Series*, 2023, 2478(6): 062011.
- [10] 胡春生. 脉冲半导体激光器高速三维成像激光雷达研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2005.
HU Chunsheng. Investigation into the high-speed pulsed laser diode 3D-imaging lidar[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2005.
- [11] MANOJLOVIC L M, BARBARIC Z P. Optimization of optical receiver parameters for pulsed laser-tracking systems[J]. *IEEE transactions on instrumentation and measurement*, 2009, 58(3): 681-690.
- [12] 张鑫, 宗思光, 余扬, 等. 水下微弱目标双通道激光探测方法研究[J]. *激光与红外*, 2023, 53(2): 185-193.
ZHANG Xin, ZONG Siguang, YU Yang, et al. Research on dual-channel laser detection method for underwater weak target[J]. *Laser & Infrared*, 2023, 53(2): 185-193.
- [13] 谢桂娟, 林晓明, 吴健, 等. 动态激光聚焦光学系统仿真设计[J]. *激光与红外*, 2023, 53(4): 597-602.
XIE Guijuan, LIN Xiaoming, WU Jian, et al. Design and simulation of dynamic laser focusing optical system[J]. *Laser & Infrared*, 2023, 53(4): 597-602.
- [14] 代金芪, 于海龙, 王君光, 等. 激光能量密度对 CMOS 探测器的感光面热应力的影响研究[J]. *应用光学*, 2024, 45(3): 568-574.
DAI Jinqi, YU Hailong, WANG Junguang, et al. Influence of laser energy density on thermal stress at photo-sensitive layer of CMOS detector[J]. *Journal of Applied Optics*, 2024, 45(3): 568-574.
- [15] 蒋衍, 朱精果, 刘汝卿, 等. 脉冲激光多回波峰值检测电路设计[J]. *红外与激光工程*, 2023, 52(5): 20220625.
JIANG Yan, ZHU Jingguo, LIU Ruqing, et al. Design of pulse laser multi-echo peak detection circuit[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2023, 52(5): 20220625.