

激光与光电子学进展

基于全波形采样的脉冲激光信号检测系统设计

叶茂¹, 程伟博¹, 赵毅强^{1*}, 宋毅恒², 段文浩², 包为政²¹天津大学微电子学院, 天津 300072;²光电信息控制和安全技术重点实验室, 天津 300308

摘要 为实现脉冲激光回波信号参数的高精度测量, 利用全波形采样技术设计了一种微弱激光信号检测系统, 对信号的脉宽、实时功率以及能量等参数进行分析。所提系统硬件平台使用低噪声宽动态范围模拟前端进行信号预处理, 基于现场可编程逻辑门阵列、模数转换器等模块实现数据量化与动态时域锁存。针对低采样率平台数据离散程度高引起的波形重构失真, 提出了一种基于非均匀周期触发信号的多帧积累算法以降低硬件平台成本。通过对量化数据的拟合补偿, 所提算法提升了系统激光信号参数的解算精度。所提系统对脉宽 3 ns、峰值功率 9 μ W 的脉冲激光器进行参数检测并与高采样率平台进行对比。结果表明: 所提系统对激光信号的脉宽解算误差约为 0.041 ns, 峰值功率解算误差约为 0.53 μ W, 能量积分误差约为 4.52 fJ, 所有参数重复测量不确定度小于 8%。

关键词 脉冲激光器; 微弱能量测量; 高斯拟合; 全波形数据

中图分类号 TN247

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP230857

Design of Pulse Laser Signal Detection System Based on Full Waveform Sampling

Ye Mao¹, Cheng Weibo¹, Zhao Yiqiang^{1*}, Song Yiheng², Duan Wenhao², Bao Weizheng²¹School of Microelectronics, Tianjin University, Tianjin 300072, China;²Science and Technology on Electro-Optical Information Security Control Laboratory, Tianjin 300308, China

Abstract In order to realize the high-precision measurement of pulsed laser echo signal parameters, a weak laser signal detection system that can analyze the pulse width, real-time power and energy parameters of the signal is designed by using full waveform sampling technology. The system hardware platform uses a low-noise wide-dynamic range analog front-end for signal preprocessing. The system realizes data quantization and dynamic time-domain latch based on field programmable gate array, analog to digital converter and other modules. In order to reduce the cost of the hardware platform, a multi-frame accumulation algorithm based on nonuniform periodic trigger signal is proposed to reduce the distortion of waveform reconstruction caused by high discreteness of data on low sampling rate platform. By fitting and compensating the quantized data, the algorithm improves the calculation accuracy of the system laser signal parameters. The system detects the parameters of a pulsed laser with 3 ns pulse width and 9 μ W peak power and compared with the high sampling rate platform. The results show that the calculation error of the proposed system for laser signal pulse width is about 0.041 ns, peak power calculation error is about 0.53 μ W, energy integration error is about 4.52 fJ and uncertainty of repeated measurement with all parameters is less than 8%.

Key words pulsed laser; weak energy measurement; Gaussian fitting; full waveform data

1 引言

近年来, 随着激光在各领域的迅速发展及广泛应用, 光电类设备频繁出现。此类设备使用高重复频率、窄脉宽调制的脉冲激光器作为光源, 以延长工作距离与提升抗干扰能力^[1]。针对激光发射及接收信号的检

测与计量工作对光电类装备的工作状态分析具有重要意义。在设备生产调试与实际作业时, 光热法检测系统可以实现对激光器的能量测量。然而热电堆或热释电材料受环境因素影响较大, 且对脉宽在 ns 级的窄脉冲信号响应速度较慢, 难以满足远距离微弱激光信号检测对激光脉宽与实时功率的解算要求^[2-3]。

收稿日期: 2023-03-14; 修回日期: 2023-04-16; 录用日期: 2023-05-06; 网络首发日期: 2023-07-14

通信作者: *yq_zhao@tju.edu.cn

2011年, Krishnan等^[4]提出了一种高动态范围激光能量计。通过使用多级电容, 系统具备的输入动态范围约为 67 dB, 最小检测能量约为 2 pJ。2016年, 王奇等^[5]基于光电探测器设计了一种微弱激光能量检测系统, 实现了对重复频率为 20 Hz、脉宽为 30 ns、 μJ 级脉冲激光的准确测量。2018年, White等^[6]使用 Si 陷阱探测器抑制杂散信号, 并基于电荷积分放大器设计读出电路, 通过温度补偿与校对改善系统的不准确性。系统具备对重复频率为 1 kHz、pJ 级脉冲信号的精确测量能力。2022年, 孟庆安等^[7]基于模拟积分器, 提出一种基于回波模拟器的输出能量测量与标定装置, 通过对模拟信号积分实现了对脉宽为 10~100 ns、脉冲能量为 10 fJ~1 pJ 的脉冲信号的准确测量。2023年, Zygumt等^[8]针对高功率激光回波导致的信号失真, 在读出电路后引入积分器进行峰值检测, 有效区分了相同距离下不同物体的轮廓信息。

基于时域或频域积分可以实现对微弱脉冲信号的高精度测量, 但此类方法较难处理脉宽在 5 ns 以内的脉冲信号。此外, 积分法对目标激光器的输出波形、实时光功率、激光脉宽等信息的捕捉能力较差。本文基于雪崩光电二极管 (APD) 实现光电转换, 并对信号进行全波形采样, 设计了一种光电法微弱脉冲激光信号检测系统, 可以实现对目标激光信号重复频率、实时功率、脉宽、能量等参数的精确测量。基于非均匀周期触

发信号, 提出了一种多帧积累补偿算法, 提升了低采样率平台对 ns 级微弱脉冲激光信号的检测精度。所提系统响应速度快、测量精度高, 能够实现对 ns 级脉宽、kHz 级重复频率脉冲激光信号参数检测功能。

2 微弱脉冲激光信号检测系统硬件平台设计

2.1 系统总体方案

系统面向窄脉宽脉冲激光信号的检测进行设计, 目标探测脉宽约为 3 ns, 最低探测能量为 50 fJ, 总体设计架构如图 1 所示。系统基于 APD 实现光电转换, 使用数模转换器 (DAC) 与高压模块控制 APD 偏置电压, 并利用温度传感器监测 APD 工作温度。模拟前端主要由跨阻放大器 (TIA) 与可变增益放大器 (VGA) 构成以实现模拟信号预处理。之后由模数转换器 (ADC) 对输入信号进行全波形采样, 经现场可编程逻辑门阵列 (FPGA) 处理后通过以太网控制器 (MAC、PHY) 传输至上位机 (PC) 进一步分析。由于全波形采样数据量较大, 使用 DDR3 SDRAM 实现大规模数据缓存。系统通过激光脉冲信号的实时重构, 对输入激光信号的重复频率、脉宽、能量等参数进行实时解算。结合实际应用, 系统模拟前端可提供多级增益调节以拓展动态范围, 而采集或产生触发信号可以兼容激光器内外触发的工作模式。

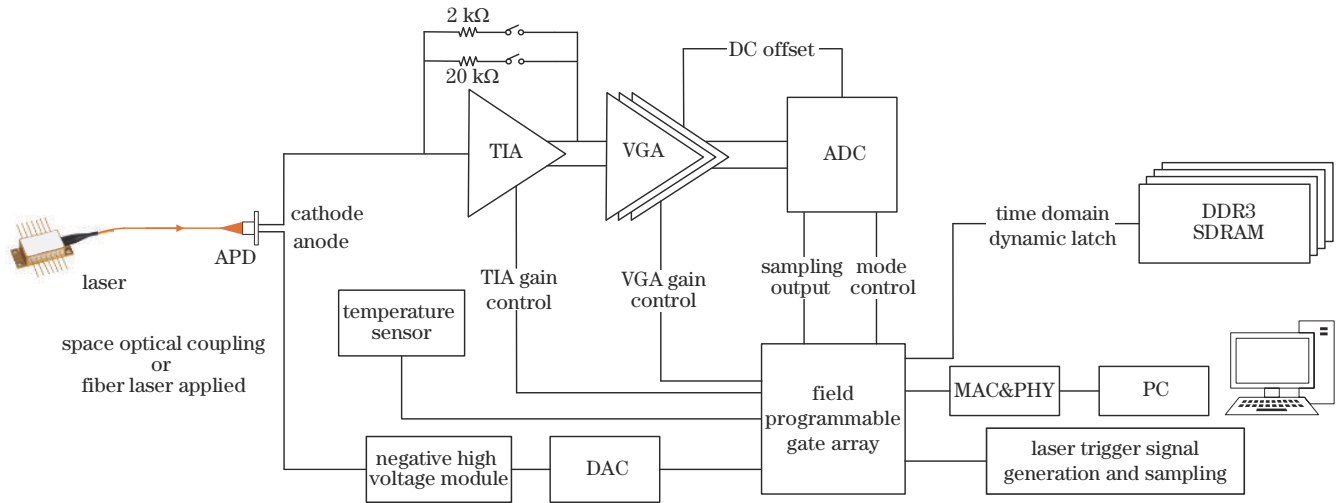


图 1 微弱脉冲激光信号检测硬件平台总体架构框图

Fig. 1 Block diagram of weak pulse laser signal detection hardware platform

2.2 APD 响应特性与模拟前端设计

系统接收通道由光电探测器和模拟前端组成, 其中探测器部分使用 APD 实现光电转换。当 APD 偏置电压低于击穿电压时器件工作在线性区, 探测器响应时间短、呈线性增益、抗电磁干扰能力强^[9-11]。当 APD 探测器未饱和时, 器件输出的响应光电流相对于入射光功率极为线性。探测器可检测的功率下限 (输出噪声电平) 即为其线性响应区间的下限, 可检测功率上限

由探测器光电流转换能力确定, 具体可表示为

$$r = M \cdot S_{\lambda}, \quad (1)$$

式中: r 为探测器在单位光功率下产生的光电流, 表征探测器光电流转换能力; M 为雪崩增益, 受探测器偏置电压控制; S_{λ} 为探测器响应度, 由入射光波长确定。当偏置电压固定时, APD 噪声方程^[12]可表示为

$$i_{n, \text{APD}}^2 = \frac{4KTB}{R_L} + 2eBi_{\text{DS}} + 2ei_{\text{DL}}BM^2, \quad (2)$$

式中: $i_{n, APD}$ 为探测器产生的总噪声电流; K 为玻尔兹曼常数; T 为绝对温度; B 为噪声带宽; R_L 为负载电阻; e 为电子电荷量; i_{DS} 为暗电流中的表面漏电流分量; i_{DL} 为暗电流中衬底电流分量。式(2)中第一项对应热噪声分量,在实际应用中抑制热噪声较为困难,这是因为增加 R_L 会让探测器与模拟前端耦合后的响应带宽大幅下降。式(2)中第二项与第三项对应散粒噪声分量。当 APD 偏置电压升高时,雪崩增益 M 会增大,探测器响应光电流信号与散粒噪声同时增大,需精准控制偏置电压,确保雪崩增益稳定,以提升信噪比,实现性能最优^[13-15]。

如图 1 所示,信号处理部分采用两个增益级实现,系统模拟前端应具备较高增益与较大带宽以避免波形失真。此外,为增强系统检测微弱信号的能力,应最大限度地抑制噪声。系统模拟前端第一级使用 TIA 将光电流转换为电压两档可调的跨阻增益可以拓宽输入动态范围。第二级使用 VGA 对信号进行进一步放大,并根据信号幅值调整增益,提升后级 ADC 信号采样质量。系统模拟前端噪声(AFE)组成可表示为

$$v_{n, AFE}^2 = (i_{n, APD} R_f)^2 + v_{n, TIA}^2 + v_{n, VGA}^2, \quad (3)$$

式中: $v_{n, AFE}$ 为模拟前端等效噪声和; R_f 为 TIA 跨阻增益; $v_{n, TIA}$ 与 $v_{n, VGA}$ 分别为 TIA 与 VGA 等效噪声。TIA 作为整个模拟前端的第一级,需尽量减少自身噪声并具备足够增益以克服后续增益级的噪声影响。由于 APD 采用负偏置电压可以降低其寄生电容,设计中采用探测器阴极与 TIA 直流耦合^[16],并进行阻抗匹配减

少信号反射以抑制噪声。TIA 增益有 2 k Ω /20 k Ω 两档可选,较大的跨阻增益也有效遏制了热噪声。

在处理光电流的同时 APD 噪声 $i_{n, APD}$ 也被 TIA 放大,基于对 APD 噪声组成的分析,通过控制雪崩增益 M 可有效弱化模型中 APD 噪声 $i_{n, APD}$ 的影响。系统通过 DAC 与负高压模块实现了对 -15~-500 V 区间内的高精度偏置电压的控制,实测调节精度为 0.22 V/LSB (最低有效位),并基于温度传感器遥测数据对 APD 温漂进行补偿。

由图 1 架构模型可知,VGA 处于第二增益级,与 TIA 之间能够实现信号差分传输且阻抗匹配良好, $v_{n, VGA}$ 在 TIA 输入端的等效噪声分量相较于其他噪声分量较小,可以忽略。为得到最佳光电流转换信噪比,并降低模拟前端增益以弱化噪声,结合所选探测器的增益随偏置电压的变化曲线,最终选择高压模块输出电压为 -110.17 V,此时 APD 对波长为 1064 nm 激光在单位光功率下产生的光电流 r 约为 5 A。通过计算可得,脉宽为 3 ns、能量为 50 fJ 的脉冲信号的峰值功率为 10~20 μ W,要求模拟前端带宽不小于 117 MHz。为保证全波形采样量化精度,依据所选 ADC 输入量程,计算得到模拟前端增益应不小于 60 dB。配置系统模拟前端增益为 76 dB 进行测试,其噪声表现如图 2 所示。实测当前增益下脉冲激光信号的带宽约为 320 MHz,输出电压摆幅约为 770 mV,输出端均方根(RMS)噪声约为 5.65 mV,该结果满足窄脉宽 fJ 级微弱脉冲信号的预处理要求。

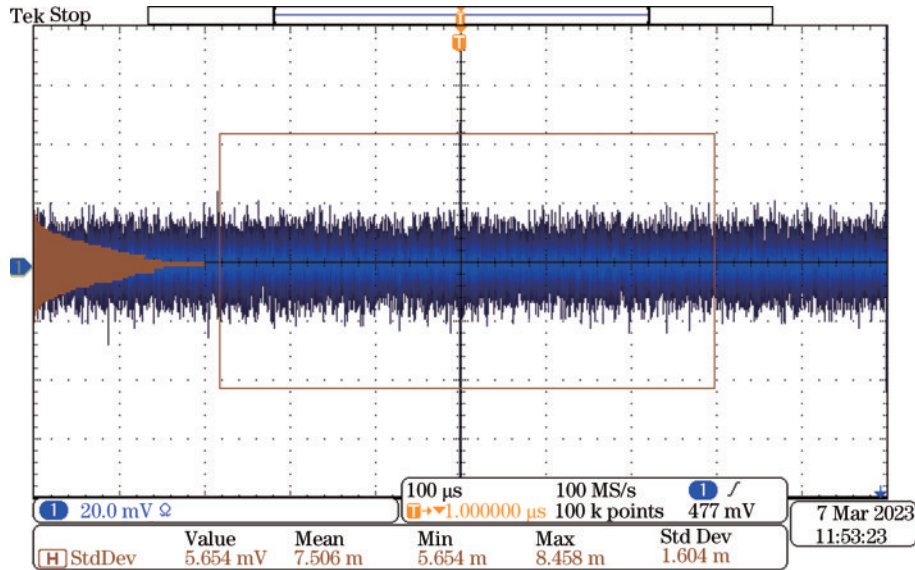


图 2 模拟前端输出端测量的噪声 RMS 值

Fig. 2 Measured RMS noise at the AFE output terminal

2.3 信号采集与数据传输

拟检测激光信号在完成 APD 光电转换与模拟前端预处理后,信号采集模块通过全波形采样量化将其转换为数字信号。为实现对高重复频率、窄脉宽激光

微弱信号的全波形采样,信号采集和处理模块主要包括 ADC 采样模块、FPGA 处理模块与 DDR3 缓存模块。其中,ADC 采样模块采样率为 1 GSa/s,输入动态范围约为 800 mV,量化位数为 12 bit。信号处理模块

将量化数据在 DDR3 芯片中进行时域数据缓存以提升系统存储深度。DDR3 芯片建立了 $256 \text{ M} \times 16 \text{ bit}$ 的接口,其最大缓存深度为 4 Gbit,最大支持时钟频率为 933 MHz。缓存在 DDR3 中的数据经过 FPGA 主控芯片的拼接、转换、整合后进行重复频率解析,打时间戳后通过网口发送至上位机。经测试网口上传速度约为 600 Mbit/s,满足存储深度为 1 kpts(1 kpts 指 1000 个采样点)、重复频率为 20 kHz 激光信号处理后的实时采集传输需求。

3 基于非均匀周期触发的信号处理

3.1 全波形采集数据特征与非均匀周期触发信号产生

激光器稳定工作后,每次照射在探测器光敏面上的脉冲功率 P 随时间的变化近似服从高斯分布,经由采样率为 1 GSa/s 的 ADC 采样后输出的全波形采样数据 $s(t)$ 可表示为

$$s(t) = c(t) + x(t) = G \cdot A \cdot \exp\left[-\frac{(t-\mu)^2}{2\sigma^2}\right] + x(t), \quad (4)$$

式中: $c(t)$ 为激光信号经过模拟前端处理后的输出; $x(t)$ 为系统引入噪声;在模拟输出信号中, G 为 APD 单位功率响应光电流 r 与模拟前端实时增益的积; A 为高斯函数幅度; μ 为高斯函数取最大值对应位置; σ 为换算波形脉宽 W_{FWHM} 的变量,换算公式可表示为

$$W_{\text{FWHM}} = \sqrt{8\ln(2\sigma^2)}. \quad (5)$$

实际情况中激光器每次发射信号的调制方式与发射重复频率相对固定,对接收到的每一帧数据而言, $[A, \mu, \sigma]$ 3 个高斯函数系数均由激光器自身参数确定。对噪声 $x(t)$ 而言,其构成包括来自于背景光及接收脉冲信号的散粒噪声、APD 及模拟前端引入的噪声、ADC 量化噪声等。在放大电路与探测器线性工作的条件下,ADC 对放大电路输出信号量化后的系统噪声 $x(t)$ 近似服从高斯分布^[17]。

所设计系统面向的脉冲信号脉宽在 3 ns 左右,采样处理模块中 ADC 采样率为 1 GSa/s,定义激光器每个发射周期为一帧。对每一帧数据而言,电路引入的波形展宽导致每帧中有效数据点数约为 7~10 个,直接对波形进行数值积分所得误差难以满足实际要求。由于系统测量对象不涉及目标反射或目标相对静止的传输,使用基于非相参的多帧积累算法可以有效提升信号质量^[18]。其基本原理是通过脉冲信号的幅度进行多帧叠加,以提升信噪比并提高检测性能。将系统量化后的 m 帧全波形数据积累叠加,得到的结果 $y(t)$ 可表示为

$$y(t) = \frac{1}{m} \sum_{j=0}^m s(t+jT) = c(t) + \sum_{j=0}^m \frac{x(t+jT)}{m}, \quad (6)$$

式中: j 为积累帧数, T 为脉冲激光发射周期。

分析 $y(t)$ 可以发现原始信号 $c(t)$ 不变,每帧噪声部分服从高斯分布,经计算处理后的全波形数据信噪比相比之前提升了 \sqrt{m} 倍。该方法使信噪比得到提升,但合成后的时域采样间隔实际并未改变。对窄脉冲低采样率场景而言,数据的数值积分不确定性并未得到改善。

由图 3(a) 可知,当激光器工作重复频率不变时,各帧信号对应采样点处幅值变化统计分布主要由噪声耦合产生,这也证明了根据式(6)对非相参数据进行多帧积累,以提升其信噪比这一方法的正确性。对 FPGA 产生的激光触发信号进行调制,在每个激光发射周期的触发信号沿引入随机延迟时间 δ ,如图 3(b) 所示(图中最右侧折线为积累输出结果),进而实现对激光信号的非均匀周期触发。后续通过补偿算法实现多帧积累,改善低采样率限制导致的波形重构精度较低问题。其中, δ 的取值下限由系统时钟频率决定,上限为系统当前存储深度与采样率乘积的一半。

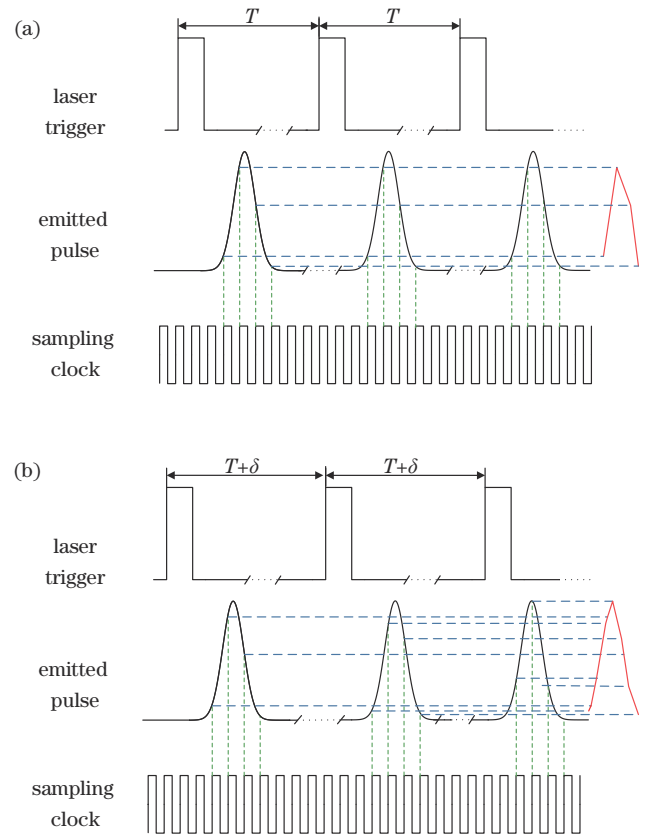


图 3 多帧积累结果。(a) 均匀周期触发信号; (b) 调制后非均匀周期触发信号

Fig. 3 Multi-frame accumulation results. (a) Uniform periodic trigger signal; (b) non-uniform periodic trigger signal after modulation

3.2 信号处理流程与波形分析结果

基于以上分析,首先在硬件上通过阈值检测配合触发或同步信号分析激光器输出重复频率(PRF),并根据当前记录长度自适应滑动采样窗口以存储数据。

之后系统生成非均匀周期触发信号,将存储的全波形数据、重复频率解析结果、系统温度与硬件回读参数等信息打包,并标记时间戳发送至上位机。

经以太网接收到数据后,上位机对其他参数的解算流程如图 4 所示。所提系统首先对数据进行解包校验,之后使用动态阈值定位脉冲信号实际位置并对数据进行剪裁。通过对剪裁后的数据进行高斯拟合,所提系统实现了对激光信号脉宽的实时解算。同时,利用高斯拟合结果对调制延时进行补偿,经多帧叠加后作为最终结果输出实时功率曲线,最后使用数值积分求解能量。通过以上处理流程,所提系统具备了对激光发射脉冲的重复频率、脉宽、实时功率与能量的解算能力,能够实现对目标激光信号的分析测量。

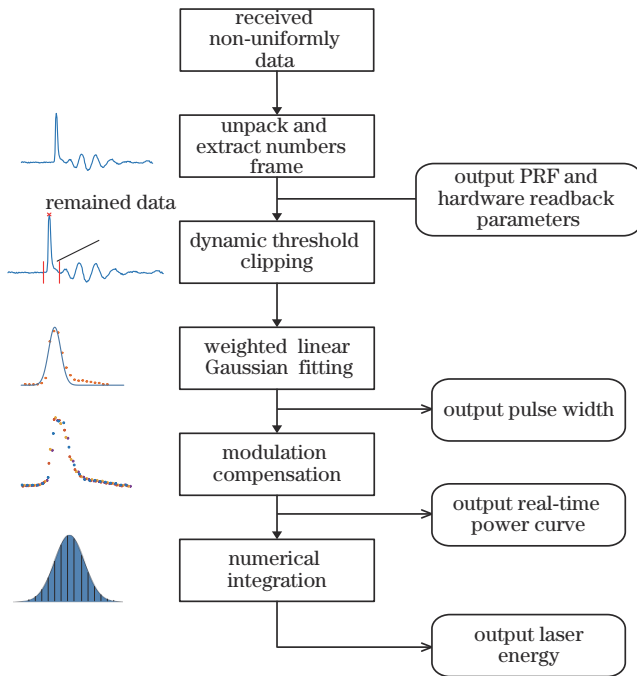


图 4 数据处理与参数解算流程图

Fig. 4 Flow chart of data processing and parameter calculation

3.3 算法实现

上位机收到的数据依据重复频率分包存储,为提高拟合精度,首先,对数据进行剪裁以减小杂散信号对后续拟合结果的影响。其次,对数据使用峰值检测算法,并以峰值坐标为中心向两侧以单位步长滑窗遍历所有信号并计算平均功率。基于拟探测脉冲信号脉宽远小于存储深度的特性,对比两侧功率可以提取出噪声平均功率。然后,设置动态阈值自噪声电平向峰值电平逼近,并以峰值时刻为参考确定上升沿与下降沿的对应坐标,裁剪结果如图 4 中对应节点所示。由于实际情况中硬件电路导致的展宽及振铃现象^[19-21],与下降沿采样点数相比,上升沿采样点数较为稀疏,最终截取的波形长度实际上应长于波形脉宽以保留更多原始波形信息。

对接收到的全波形数据而言,引入触发信号进行

重复频率调制会破坏其原有的周期性规律,但基于激光器激光发射特性,仍可以认为每帧波形所服从的函数关系相同。为了计算每帧数据的 δ ,需对数据进行拟合从而解算其函数表达式中各参数的结果。

加权线性高斯拟合在线性高斯拟合的基础上,使用加权最小二乘法抑制了噪声对拟合结果的影响,且其在实际应用中受采样频率变化影响较小^[22]。由式(6)可知,上位机接收到的全波形数据中纵坐标幅值受噪声影响有一定波动,但其脉宽受影响较小。使用加权线性高斯拟合对经过裁剪的信号进行拟合处理,分析参数 σ 来评价拟合结果并计算脉宽。之后利用拟合曲线求解每帧数据的形心坐标,通过对比形心在时间轴上的偏差,实现对非均匀周期数据的时域补偿。依据形心坐标的位置关系对数据按照实际触发时刻重新排序,以数据中形心坐标绝对值最小的数据为原点重新构建时域坐标系。针对补偿后的数据,依据数据形心坐标与原点的距离对调制系数 δ 进行赋值。通过以上流程,算法完成对非均匀周期触发信号的调制补偿,从而实现对多帧波形的交叉对齐。最后为提高波形数值积分精度,对补偿后的全波形数据使用梯形积分求解激光能量。

4 实验验证与分析

4.1 实验测试结果

使用脉宽为 3 ns 且输出稳定的 1064 nm 窄脉宽激光器作为光源,使用带有尾纤的 APD 光电探测器与在线光纤衰减器 (VOA) 相接控制激光器输出功率。依据上述分析,配置 APD 偏置电压为 110.17 V,配置 TIA 增益为 2000 Ω ,VGA 增益为 10.8 dB,包括 APD 在内系统整体增益约为 90.8 dB。上位机收到的非均匀周期激光脉冲信号如图 5 所示。

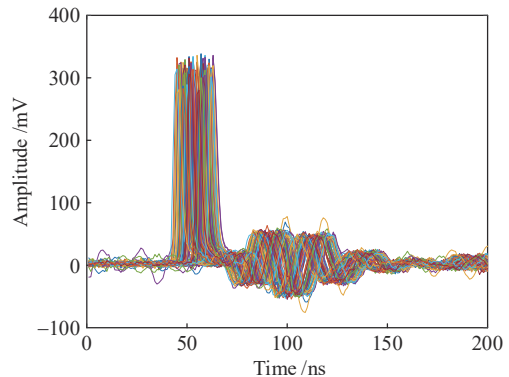


图 5 200 帧非均匀周期激光脉冲信号

Fig. 5 200 frames of non-uniform periodic laser pulse signal

任意选取上位机收到数据中时间戳连续的 10 帧数据进行处理。完成动态阈值剪裁与加权线性高斯拟合后的数据如图 6 所示。利用式(5)从拟合结果中提取脉冲脉宽,所选 10 帧数据中脉宽最大值为

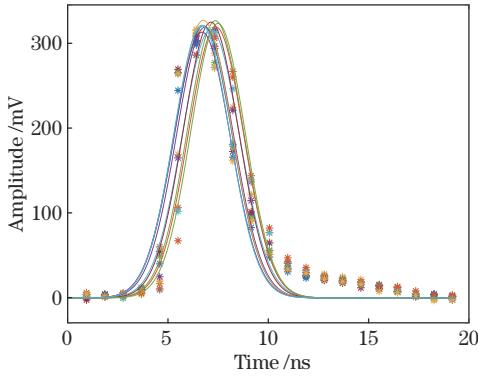


图 6 剪裁与拟合后的全波形数据(FWHM为3 ns)
Fig. 6 Full waveform data after clipping and fitting (FWHM is 3 ns)

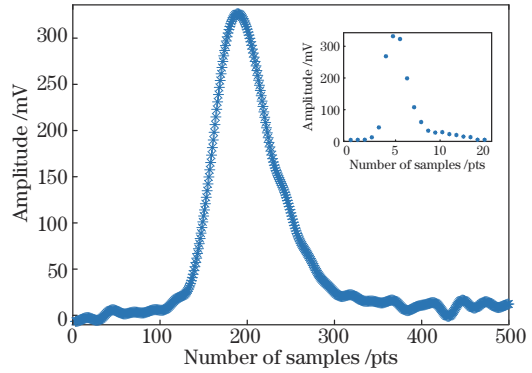


图 8 示波器采集数据与系统原始数据对比
Fig. 8 Comparison between oscilloscope data and system original data

3.069 ns, 最小值为 2.912 ns, 方差为 0.0025, 拟合结果可信度较高。对结果取均值后输出激光器脉宽测量值为 3.008 ns。继续对拟合结果进行调制补偿, 并基于系统整体增益计算光功率, 得到激光器输出光功率随时间变化曲线如图 7 所示。图 7 中信号峰值功率约为 9.5 μW , 进一步对结果进行数值积分得到单次脉冲能量约为 40.95 fJ。

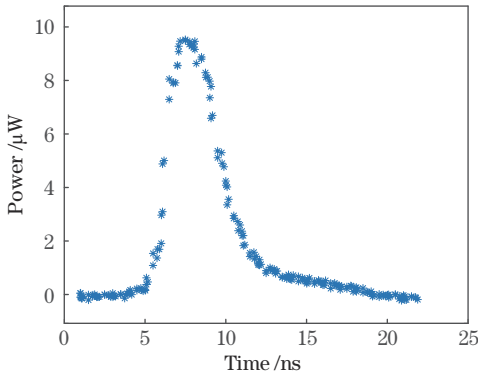


图 7 调制补偿后的激光器实时输出光功率
Fig. 7 Real-time output optical power of laser after modulation compensation

保持衰减器衰减量与模拟前端硬件配置不变, 使用高频示波器采集模拟前端输出作为对比。用于对比的高频示波器的采样率为 25 GSa/s、存储深度为 5 kpts, 其差分输入阻抗与 ADC 相同, 阻抗匹配方式相同。系统采集数据与示波器采样结果对比如图 8 所示。继续保持激光器与衰减器配置不变, 以高频示波器输出为标准, 分析 2000 次解算结果, 利用标准差 (SD) 与相对标准偏差 (RSD) 分析系统测量精度与重复测量不准确性, 结果如表 1 所示。由表 1 可知, 与高采样率平台相比, 所提系统对窄脉宽激光器发射的激光信号脉宽、重复频率、峰值功率及积分能量的测量误差较小, 并且所提系统的重复测量结果不准确性较低, 可以满足实际测试需求。

表 1 系统解算精度及重复测量误差

Table 1 Designed system accuracy and repeated measurement error

Types of data	FWHM / ns	Repetition frequency / kHz	Peak power / μW	Numerical integration / fJ
Oscilloscope	2.993	10.00	9.25	40.91
Designed system	3.069	9.99	9.49	40.95
SD	0.041	0.01	0.53	4.52
RSD / %	1.39	0.02	6.04	7.56

4.2 误差来源分析

对测试结果中的测量误差与重复测量不准确性进行分析。实验中探测器与激光器在空间耦合时对杂散光及无关谱段光的抑制能力较差。实测中发现探测器的光纤耦合效率受工艺及固定方式等影响有一定波动。针对以上问题, 对结构件及光学设计方面进行优化, 可以降低系统重复测量中的不确定度。在温度表现方面, 由于 APD 增益随温度变化明显, 致使响应光电流的幅度产生抖动。此外, 激光器工作在较高温度时其输出功率也存在一定抖动, 这将会导致系统多帧补偿效果受限, 同时也会影响测量精度。后续考虑通过标定与校准, 改善光电转换模块在不同温度下的线性度表现。同时, 由输出的全波形数据可知, 实际接收脉冲波形的下降沿展宽较为明显, 且在信号结束后伴有明显拖尾与振铃从而引起波形失真。实际应用中应在保证系统输入端动态范围的同时, 对模拟前端尤其是 TIA 的增益切换逻辑进行优化, 从而减小波形失真引入的误差。

5 结论

所设计的微弱脉冲激光信号检测系统利用 APD 线性区域响应特性实现光电转换, 配合低噪声高增益高带宽模拟前端实现在微弱信号检测场景下对激光脉冲光信号的线性转换与放大。所提系统工作方式灵活, 记录长度及触发配置等功能适配大多数激光器的全波形采样分析。通过对采集数据的处理, 所提系统具备了对脉宽为 3 ns、重复频率为 20 kHz、能量为 40 fJ

的微弱脉冲激光信号的实时高精度检测能力。基于非均匀周期积累优化低采样率导致的数据离散问题,输出超采样全波形数据供用户进一步分析。通过与高采样率系统及对自身重复测量精度测试,所提系统对脉宽及能量的单次测量精度较算法处理前得到明显提升,各参数重复测量误差不高于 8%,该结果满足对高重复频率窄脉宽微弱激光信号的检测分析需求。

参 考 文 献

- [1] 张瑞峰,崔佳敏.一种脉宽可调的窄脉冲激光器驱动电路设计[J].激光与光电子学进展,2021,58(21):2114001.
Zhang R F, Cui J M. Design of a narrow pulse laser drive circuit with adjustable pulse width[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2021, 58(21): 2114001.
- [2] Hu Y Q, Xie F, Liu Q H, et al. Microfabricated sensor device for CW and pulsed laser power measurements[J]. Optics Express, 2023, 31(2): 2330-2344.
- [3] Zhou J J, Xu S, Liu J. Review of photothermal technique for thermal measurement of micro-/ nanomaterials[J]. Nanomaterials, 2022, 12(11): 1884.
- [4] Krishnan S, Bindra K S. A sensitive and high dynamic range laser energy meter[J]. Measurement Science and Technology, 2011, 22(8): 085901.
- [5] 王奇,王晓曼,赵海丽,等.微弱激光能量监测系统的研究[J].长春理工大学学报(自然科学版),2016,39(2):62-66.
Wang Q, Wang X M, Zhao H L, et al. Research on weak laser energy detection system[J]. Journal of Changchun University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2016, 39(2): 62-66.
- [6] White M G, Porrovecchio G, Livigni D, et al. A charge integrator amplifier and trap detector for pico-joule laser pulse energy measurement[J]. Metrologia, 2018, 55(5): 699-705.
- [7] 孟庆安,樊红英,薛亮平,等.激光目标回波模拟器能量标定装置研究[J].激光技术,2022,46(6):802-807.
Meng Q A, Fan H Y, Xue L P, et al. Research on energy calibration device of laser target echo simulator[J]. Laser Technology, 2022, 46(6): 802-807.
- [8] Zygumt M, Jakubaszek M, Sędek B, et al. Real-time measurement technique of the echo signal magnitude in ToF laser scanners[J]. Measurement, 2023, 208: 112453.
- [9] Sampson R, Liu H Y, Li G F. Improving the sensitivity and bandwidth of time-of-flight scanning LIDAR using few-mode preamplified receivers[J]. Optical Engineering, 2022, 61(12): 123106.
- [10] Krishna S, Lee S, Kodati S H, et al. Linear mode avalanche photodiodes with antimonide multipliers on InP substrates[J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 2022, 58(4): 4500207.
- [11] 周畅,于笑楠,姜会林,等.基于 APD 自适应增益控制的近地无线激光通信信道大气湍流抑制方法研究[J].中国激光,2022,49(4):0406002.
Zhou C, Yu X N, Jiang H L, et al. Atmospheric turbulence suppression methods for near the earth wireless laser communication channels based on avalanche photodiode adaptive gain control[J]. Chinese Journal of Lasers, 2022, 49(4): 0406002.
- [12] 刘贺雄,周冰,高宇辰. APD 探测系统的噪声特性及其影响因素研究[J].激光技术,2018,42(6):862-867.
Liu H X, Zhou B, Gao Y C. Research of noise characteristics and influence factors of APD detection systems[J]. Laser Technology, 2018, 42(6): 862-867.
- [13] 高峰,杨进华,姜成昊,等.非扫描激光雷达系统的多脉冲积累信噪比分析[J].激光与光电子学进展,2012,49(5):051401.
Gao F, Yang J H, Jiang C H, et al. SNR analysis under multi pulse accumulation of non-scanning lidar system[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2012, 49(5): 051401.
- [14] 李旭,彭欢,王春辉.星载激光测距仪 APD 最佳雪崩增益控制技术[J].红外与激光工程,2016,45(5):0520001.
Li X, Peng H, Wang C H. APD optimal gain control investigation for spaceborne laser range finder[J]. Infrared and Laser Engineering, 2016, 45(5): 0520001.
- [15] Tan X F, Li K Y, Guo J P. A low-noise and high-accuracy transimpedance amplifier exploiting power-on-calibration technique for LiDAR[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2022, 71: 2003810.
- [16] Zheng H, Ma R, Wang X Y, et al. A linear-array receiver AFE circuit embedded 8-to-1 multiplexer for direct ToF imaging LiDAR applications[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers, 2022, 69(12): 5050-5058.
- [17] 陈向成.脉冲激光雷达回波处理方法与系统研究[D].合肥:中国科学技术大学,2015:25-27.
Chen X C. Research on echo processing methods and system of pulsed laser radar[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2015: 25-27.
- [18] 王宁,孟晋丽,刘国庆,等.机载雷达微弱目标帧间非相参积累与检测技术[J].信号处理,2021,37(2):248-257.
Wang N, Meng J L, Liu G Q, et al. Airborne radar weak target interframe noncoherent integration and detection method[J]. Journal of Signal Processing, 2021, 37(2): 248-257.
- [19] 孙俊灵,孙光民,马鹏阁,等.基于对称小波降噪及非对称高斯拟合的激光目标定位[J].中国激光,2017,44(6):0604001.
Sun J L, Sun G M, Ma P G, et al. Laser target localization based on symmetric wavelet denoising and asymmetric Gauss fitting[J]. Chinese Journal of Lasers, 2017, 44(6): 0604001.
- [20] Li X L, Yang B W, Xie X H, et al. Influence of waveform characteristics on LiDAR ranging accuracy and precision[J]. Sensors, 2018, 18(4): 1156.
- [21] 姚猛,叶继飞,李兰,等.皮秒激光辐照硅基光电二极管的饱和特性分析[J].激光与光电子学进展,2022,59(13):1304003.
Yao M, Ye J F, Li L, et al. Analysis of saturation characteristics of silicon-based photodiode irradiated by picosecond laser[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2022, 59(13): 1304003.
- [22] 周昊,毛庆洲,李清泉.采样频率和激光脉宽对全波形激光雷达测距精度的影响[J].红外与激光工程,2022,51(4):20210363.
Zhou H, Mao Q Z, Li Q Q. Influence of sampling frequency and laser pulse width on ranging accuracy of full-waveform LiDAR[J]. Infrared and Laser Engineering, 2022, 51(4): 20210363.