光电器件

DOI：10.16818/j.issn1001－5868.20241213001

轻量化激光测距系统时间精度提升方法研究

尹 俊[1,2*]，易学东[2]，冉 建[2]，张建华[2]，周建勇[2]，何 达[2]，曹 飞[2]

（1. 集成电路与微系统全国重点实验室，重庆 400060；2. 重庆光电技术研究所，重庆 400060）

摘 要： 针对智能无人平台对激光测距技术提出的大量程、高精度、高实时性与轻量化集成需求，文章提出一种基于现场可编程门阵列（FPGA）的激光脉冲飞行时间测量与数据处理方法。该方法解决了传统激光测距法依赖专用时间数字转换器及恒比定时阈值鉴别电路带来的系统复杂、可扩展性差等问题。利用FPGA高频时钟计数和多相位时间内插技术实现了1 ns的测量精度。针对不同距离下激光回波功率变化引入的时间游走误差，设计了脉宽补偿法进行时间校正。样机测距试验结果表明，在10 m～5 km测距范围内，时间精度达到1 ns，测距误差为±0.15 m，同时满足大量程与高精度测距需求。

关键词： 激光测距；时间测量；现场可编程门阵列；脉宽补偿

中图分类号： TN386.5 **文章编号：** 1001－5868(2025)03－0470－08

Time-Accuracy Improvement Method for Lightweight Laser-Ranging System

YIN Jun[1,2], YI Xuedong[2], RAN Jian[2], ZHANG Jianhua[2], ZHOU Jianyong[2], HE Da[2], CAO Fei[2]

（1. National Key Laboratory of Integrated Circuits and Microsystems, Chongqing 400060, CHN;
2. Chongqing Optoelectronics Research Institute, Chongqing 400060, CHN）

Abstract: In this study, a laser-pulse flight-time measurement and data-processing method is designed based on a field-programmable gate array (FPGA) in response to the large-scale, high-precision, highly real-time property and lightweight integration requirements of laser-ranging technology proposed by intelligent unmanned platform. Additionally, the method is devised to address the challenges of complex systems and subpar scalability caused by the dependence of conventional laser-ranging methods on dedicated time-to-digital converters and constant-ratio timing-threshold discrimination circuits. A measurement accuracy of 1 ns is achieved using the high-frequency clock counting of the FPGA and multiphase time interpolation. A pulse-width compensation method is designed to correct the time drift error caused by changes in the laser echo power at different distances. The ranging results of the prototype show that the time accuracy reaches 1 ns and the measuring error is ±0.15 m within the range of 10 m to 5 km, thus satisfying the requirements of large range and high precision simultaneously.

Key words: laser ranging; time measurement; field-programmable gate array; pulse width compensation

0 引言

近年来距离成像技术，尤其是激光测距三维成像技术已经在安防监控[1]、生态监测[2]、导航测绘[3]等领域得到广泛应用[4]。随着人工智能时代的到来与低空经济的兴起，智能无人设备在高速飞行（如

收稿日期：2024－12－13.

*通信作者：尹 俊

巡检、物流）、复杂地形导航（如山区测绘）及动态避障等场景下对测距系统提出诸如高动态场景适应性、实时避障与导航能力以及高集成度、低功耗等高性能需求[5-6]。因此，开展大量程、高精度、轻量化的激光测距技术研究，推动无人机平台测距模组朝着小型化、低功耗、高精度方向发展，是未来低空飞行器激光探测技术的发展趋势。

目前，应用最广泛的测距方法是脉冲飞行时间测距法[7]，该方法通过测量激光发射脉冲与回波之间的时间间隔得到目标距离信息。传统激光测距系统利用 TDC 芯片进行高精度时间测量[8-9]，再通过 DSP、ARM 等芯片进行数据处理，系统结构复杂、功能专一、实时性与可扩展性差[10]。使用现场可编程门阵列（FPGA）开发时间测量算法，测时精度同样能够达到亚纳秒量级，对应测距精度优于 ±0.3 m，满足几千米测距量程对时间精度的要求[11-12]。此外，脉冲法时间测量精度容易受时刻鉴别的影响[13]，在不同距离下回波功率不同导致波形前沿斜率发生变化，使用固定阈值进行时刻鉴别会出现“时间游走”现象[14]。传统激光测距系统通过设计恒比定时阈值鉴别电路[15-16]，在回波信号分别通过延时器和衰减器处理后，再通过高速比较器得到数字信号。该数字触发信号的起点只与回波信号前沿的恒定比例点有关，与回波信号的幅度无关。而设计恒比定时阈值鉴别电路将进一步增加系统电路复杂性，不利于功能扩展与系统集成。

为满足无人机、自动驾驶等智能无人平台对激光测距系统提出的大量程、高精度与轻量化集成需求，本文从激光测距系统量程、精度与响应速度协同优化设计出发，基于 FPGA 实现脉冲飞行时间测量算法设计与数据处理。针对时间游走误差，开展飞行时间与回波宽度测试实验，并设计多项式数据拟合脉宽补偿算法以进行误差校正。

1　基于 FPGA 的激光测距原理分析

基于 FPGA 的激光测距原理如图 1 所示，通过测量激光发射脉冲 T_0 与回波脉冲 T_1 的时间差来计算测距系统与目标的距离。其中，T_0 由发射激光近场后向散射产生，避免使用激光驱动的触发电信号而引入微秒级的时间抖动[17]。前置放大器为低噪声回波信号放大整形电路。FPGA 完成 T_0 与 T_1 高精度时间测量与误差校正，然后通过 SPI 通信将飞行时间信息传给后端。

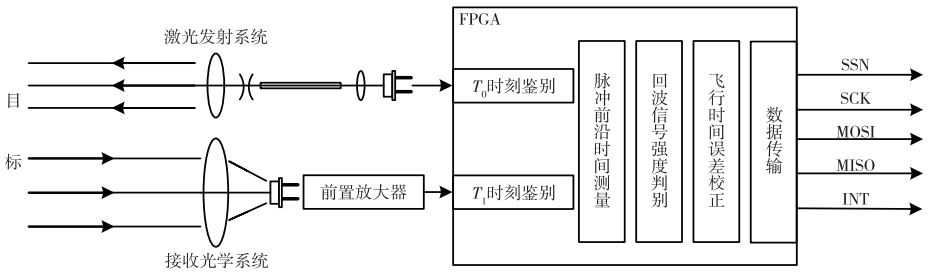


图 1　基于 FPGA 的激光测距原理框图

2　时间测量算法设计与仿真

2.1　FPGA 时间测量算法设计

传统激光测距系统使用 FPGA 进行时间测量最直接的方法是时钟计数法，原理如图 2 所示，激光脉冲飞行时间 T 即为回波脉冲 T_1 与发射脉冲 T_0 之间的时钟周期计数。时钟计数法的测量精度取决于时钟周期，要达到 1 ns 的精度需要使用 1 GHz 的时钟工作频率，而过高的时钟频率会带来系统稳定性变差与成本升高等问题。

通过调研发现，在使用百兆频率的时钟情况下，单时钟周期内做时间内插同样能够达到纳秒精

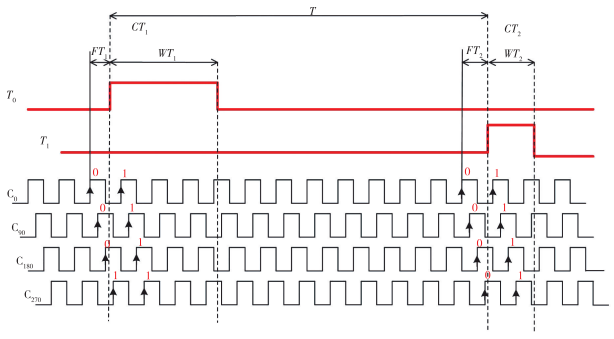


图 2　脉冲飞行时间测量原理图

度。如图 2 中将 250 MHz 时钟分为相位依次相差 90°的四个时钟 C_0、C_{90}、C_{180} 和 C_{270}，时钟周期为 4 ns。当发射脉冲 T_0 到来时，C_0 时钟计数值 CT_1=12 ns；

当回波脉冲 T_1 到来时，C_0 时钟计数值 CT_2=60 ns。通过直接使用时钟计数法测量得到脉冲飞行时间为 48 ns，时间精度为 4 ns。为提高时间精度，采用 C_0～C_{270} 这四组时钟同时对脉冲前沿采样，以时钟内插的方式将 4 ns 的精度提高到 1 ns。

多相位时钟内插可分为将脉冲信号（T_0/T_1）输入触发器阵列的时钟端口 C_K 或者数据端口 D 两种方法。采用 T_0/T_1→C_K 的方法如图 3 所，该方法需在 FPGA 内部例化两组硬件分别处理 T_0/T_1 的上升沿和下降沿，同时 T_0/T_1 还接入粗时间寄存器的 C_K 端口以记录粗时间。T_0/T_1 存在上沿与下沿分别取触发粗时间计数器，因此需要设计粗时间选择逻辑。然而，整个系统结构复杂，且 T_0/T_1 与粗计数时钟周期间的随机性可能导致粗计数存在死区时间。

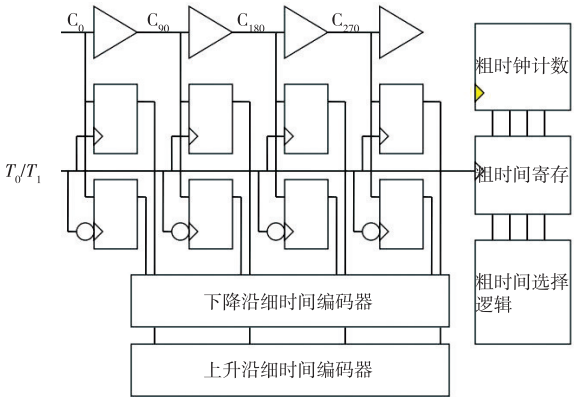


图 3　多相位时钟内插采样原理图

如图 4 所示，通过改变信号输入端口，采用 T_0/T_1→D 的方法可以简化设计，使用单组阵列和编码器即可数字化 T_0/T_1 上升沿和下降沿到来的时间。同时设计时钟域转换功能与部分解码功能合并，细时间仅需两次触发即可完成解码操作，且输出与系统时钟同步，可直接与读出级接口互联，支持无死区操作。该设计基于 FPGA 架构与双周期解码，可实现纳秒级响应，支持多通道高速平台实时数据处理，显著提高系统效率和扩展灵活性。

细时间解码的工作原理是通过 C_0 主时钟对采样结果进行一次寄存。为避免相邻时钟竞争冒险，C_{270} 时钟采样结果由 C_{90} 时钟进行寄存。通过前后采样两次，即可得到一组 7 bit 值。由于脉冲前沿落在某个区间的采样编码值是确定的，通过比对编码值即可准确判断脉冲前沿所在的区间，进而得到相应的精确时间。

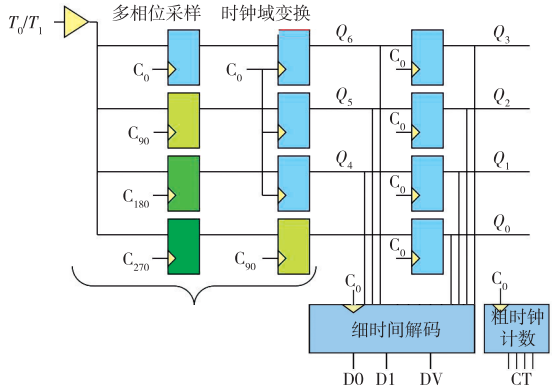


图 4　改进型多相位时钟内插采样原理图

根据图 5 所示的多相位时钟内插细时间测量原理，图 2 中 T_0/T_1 脉冲前沿细时间测量结果如下：T_0 前沿与 C_0 前沿之间的精确时间 FT_1=2 ns，T_1 前沿时间 FT_2=3 ns。因此，图 2 中激光脉冲更精确的飞行时间 $T=(CT_2-4+FT_2)-(CT_1-4+FT_1)$=49 ns，精度为 1 ns。对比直接计数法测得的时间为 48 ns，精度为 4 ns，时间精度提高了 4 倍。

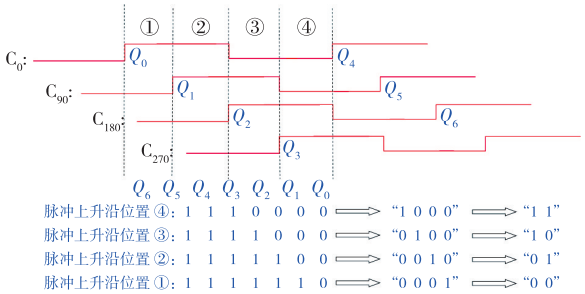


图 5　多相位时钟内插测量脉冲前沿时间原理图

回波强度等级的判别通过测量脉冲宽度实现。通过测量脉冲下降沿的时间减去上升沿的时间即可得到脉冲宽度。脉冲下降沿时间测量需要将脉冲反相，时间测量原理同脉冲上升沿测量一致。

2.2　时间测量算法功能仿真

脉冲时间与宽度测量算法功能仿真在 Modelsim10.1 中进行，设置主时钟频率为 250 MHz，测试脉冲 T_0 宽度为 15 ns。仿真结果如图 6 所示，C_0～C_{270} 为 4 个相移 90°采样时钟，Start 为待测信号，FT_p 为脉冲上升沿精确时间，FT_n 为脉冲下降沿精确时间，CT 为 250 MHz 时钟计数器时间，WT 为脉冲宽度。T_0 前沿位于 C_{180} 与 C_{270} 之间，细时间为 2 ns；T_0 后沿位于 C_{90} 与 C_{180} 之间，细时间为 1 ns。T_0 前后沿被采样后经过两个时钟周期输出数据，解码处理时间与图 4 一致。最终测量 T_0 前沿时间为 6 546 ns、脉冲宽度为 15 ns，精度±1 ns，功能仿真结果与设定值以及算法设计精度一致。

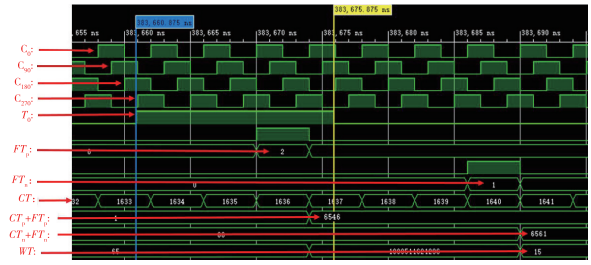


图 6　时间测量算法功能仿真

3　激光测距硬件实现

激光测距硬件系统主要由 InGaAs 雪崩光电探测器、1 534 nm 人眼安全激光器、收发光学镜头、高压电源板、激光驱动板以及信号处理电路板等组成，产品实物如图 7 所示。



（a）光学收发接口设计　　（b）内部电路结构设计

图 7　激光测距系统硬件实物图

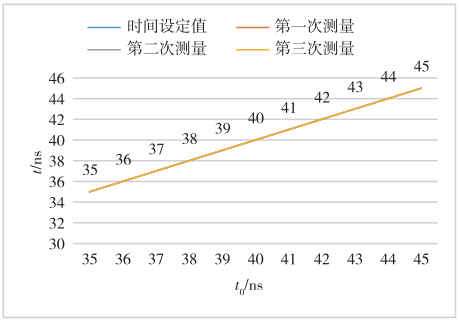
针对无人机、自动驾驶等智能无人平台，所设计的激光测距系统采用结构紧凑和低功耗的解决方案。整机尺寸为 116 mm×76 mm×35 mm，质量为 250 g，功耗小于 10 W。测距系统配备 20 mm 口径光学系统，选择 300 μj 激光器实现最远 5 km 测量距离。为保证光束质量，激光器配置 13 倍扩束准直镜头，使激光在长距离传播后，更多能量能集中到目标上。在回波接收电路上，测距系统使用低噪声、高增益 InGaAs 雪崩光电探测器，实现最大灵敏度探测，保证以更低的脉冲能量完成远距离测量。为确保在整个工作温度范围内探测器的偏置电压最优，设计温度控制偏压[18]，并进行出厂校准。

4　激光测距实验与校正

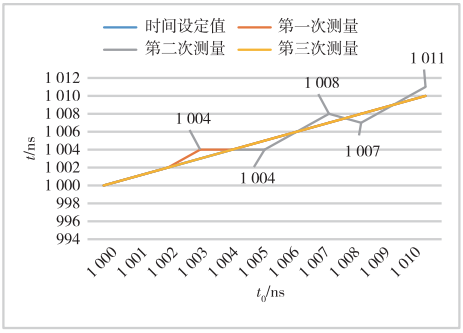
4.1　激光测距精度测试

为满足在室内条件下开展不同距离激光测距时间精度测试，一般可采用的方法包括电学延迟模拟法和光学延迟模拟法[19]。电学延迟法是通过标准信号源控制激光信号延迟时间，从而模拟激光在不同距离下的飞行时间；光学延迟法是使用不同长度的光纤模拟激光信号实际传输的距离。电学延迟法相比光学延迟法调整范围更广、延迟时间设置更灵活，因此采用电学延迟模拟法开展不同距离下激光测距时间精度测试。

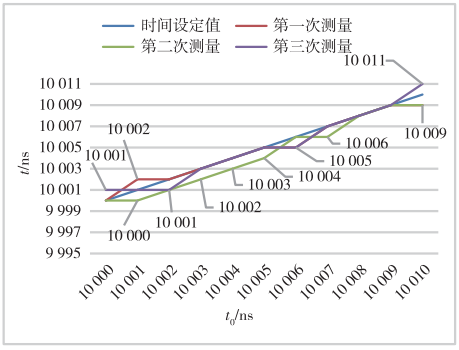
利用是德科技 81160A 型标准脉冲信号发生器控制激光器产生不同时间间隔脉冲信号。信号发生器脉冲周期 t_0 依次取 35，1 000，10 000 和 50 000 ns，对应目标距离为 5.25，50，1 500 和 7 500 m。步长为 1 ns 增加脉冲周期，数量为 10，记录对应时间测量值 t 如图 8 所示。测试结果显示，在实验室条件下时间测量误差为 ±1 ns，与算法设计精度相符。



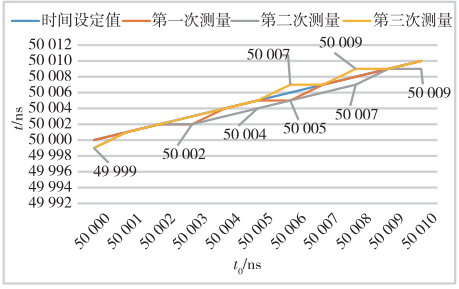
（a）模拟目标距离 5.25 m 时间精度测试



（b）模拟目标距离 150 m 时间精度测试



（c）模拟目标距离 1.5 km 时间精度测试



（d）模拟目标距离 7.5 km 时间精度测试

图 8　实验室测试时间测量精度

4.2 时间游走测试与误差校正

通过使用真实目标(靶板)开展激光测距试验,发现距离L越近,误差越大,如图9所示。进一步分析发现,激光回波在近距离处幅度变大,导致在固定阈值下脉宽变宽、时刻鉴别点提前,进而引起近距离测量值偏小问题。

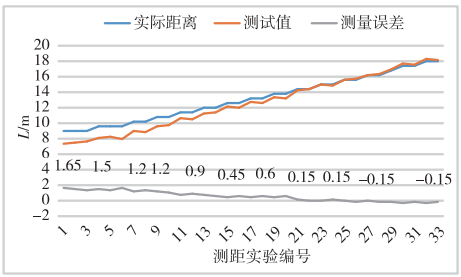


图9 时间游走误差测试

为验证回波脉冲宽度与时间测量误差的关系,搭建如图10所示的飞行时间与回波宽度测试平台。



图10 飞行时间与回波宽度测试平台

测试原理如图11所示,使用信号源驱动激光器,将激光脉冲经过衰减器、光纤输入到测距系统用于测量脉冲宽度。同时,使用示波器测量信号源同步信号与时刻鉴别数字脉冲时间间隔作为激光初始飞行时间t_0。然后,调节光衰减器,记录信号幅度改变后的飞行时间t_1和脉冲宽度w_1,并计算$\Delta t=t_1-t_0$,Δt即为脉冲幅度改变引起的时间游走误差。继续调节光衰减器,记录脉冲幅度连续改变时信号脉宽w与时间游走误差Δt的变化关系。

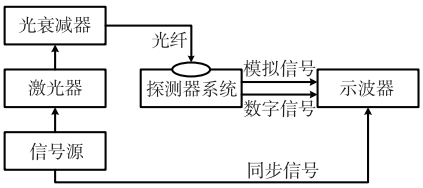


图11 回波脉冲宽度与时间测量误差验证平台框图

如图12记录了信号脉宽w和时间游走误差Δt的变化关系。

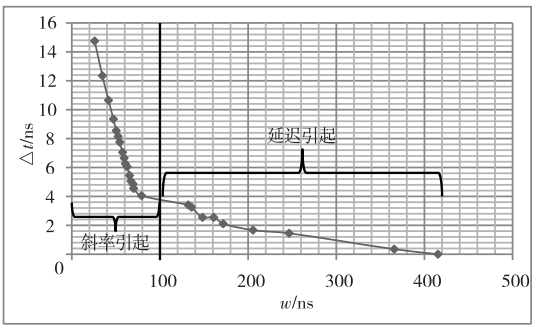


图12 激光脉冲宽度与误差关系

通过分析可知,在固定阈值下时间游走主要包括两种类型:一种是由于信号幅度变化导致斜率变化引起的时间游走,该类型的时间游走程度不仅与信号幅度的大小直接相关,还与探测器的上升时间有关,探测器响应越快(即上升时间越短),时间游走的程度越小,反之越大;另一种是当信号饱和后,幅度基本保持不变,但是电路的延迟特性发生微小改变引起的时间游走。为了有效校正时间测量误差,需要将数据分为饱和前和饱和后分别进行多项式数据拟合。具体方法是利用信号脉冲宽度和时间游走原始数据,根据最小二乘法反求多项式模型的系数,最后再将求得的多项式模型写入时间测量模块进行原始数据校正。本研究所采用的二次多项式模型公式如下:

$$Y=AX^2+BX+C \tag{1}$$

式中,X为信号脉冲宽度,Y为时间游走,A,B,C是待求解的模型参数。最小二乘法就是不断优化A,B,C的值,使$|AX^2+BX+C-Y|$的值达到最小。根据图12测试数据得出斜率校正模型如下:

$$y=-0.004\,3x^2+1.178\,5x-11.087 \tag{2}$$

使用脉宽补偿算法开展近距离测距试验,结果如图13所示,此时测距误差已满足设计精度。

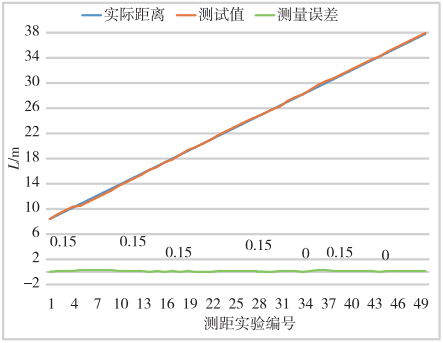


图13 脉宽补偿法校正测距误差

4.3　测距量程测试

所设计的激光测距系统最大测量距离为 5 km，在室内条件下需要采用消光比进行验证[20]。方法如下：(1)在室内距离测距系统 50 m 处建立目标板并测量其与测距系统的实际距离；(2)在测距系统接收镜头前加 100 倍衰减片，使用示波器观察回波信号的强弱与噪声；(3)使用测距系统测量与目标板距离；(4)计算测量误差。

实验选用的 100 倍衰减片实物如图 14 所示，回波信号与噪声幅度如图 15 所示。在经过 100 倍衰减片后，接收信号幅度为噪声的 100 倍，等效于可探测能量还可降低 100 倍。根据接收能量与距离的平方成反比[21]，可以认为最大探测距离为 50 m 的 100 倍，即 5 km。最大量程测试结果如图 16 所示，测试距离为（50.4±0.15）m，换算成实际距离为（5 040±0.15）m。



图 14　100 倍衰减片实物图

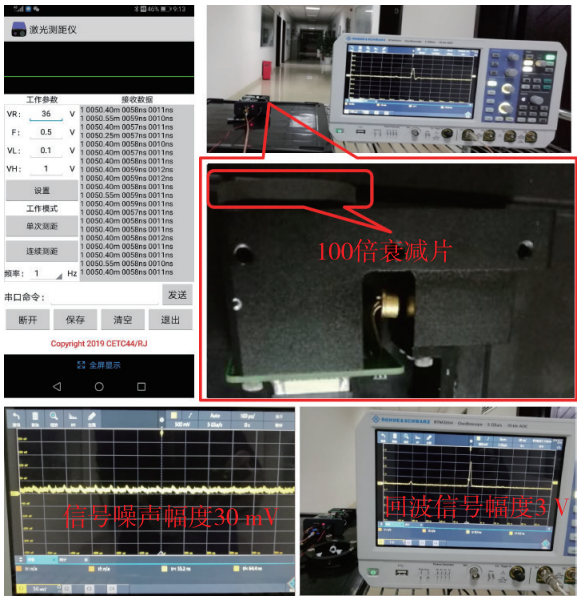


图 15　室内测距最大量程验证平台

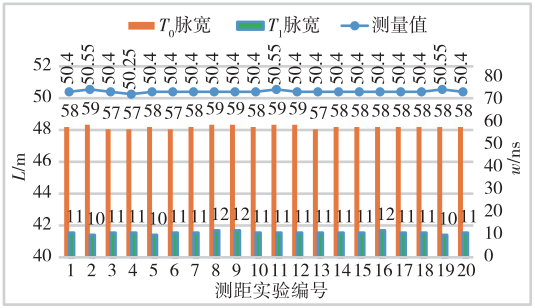


图 16　最大量程测距试验

4.4　测距系统性能分析

根据智能无人平台对激光测距系统应用需求出发，对所设计的测距系统性能指标展开分析。

首先，所设计的激光测距系统在量程 10 m～5 km 内测距精度为±0.15 m（对应测时误差为 1 ns），表明系统在高速移动场景下仍能保持定位准确性。例如，当无人平台以 100 m/s（360 km/h）的速度高速运行时，经过 1 ns 时间平台产生 0.000 1 mm 位移，远低于系统测距误差。因此，无人平台因自身运动导致的动态误差可忽略不计，测距系统在 10 m～5 km 距离内具备高动态场景适应性，在航空光电探测领域已达到行业先进水平[22]。

测距系统时间解码时间为两个 FPGA 时钟周期，以 250 MHz 时钟频率为例，测时延迟时间为 8 ns。纳秒级响应时间保证系统具备超快数据刷新率。结合 FPGA 的并行处理能力，该系统可支持无人平台在高速运动时仍能实时更新环境三维数据，满足紧急避障（如导弹目标拦截需微秒级响应）与导航等对实时性要求极高的应用需求。

基于 FPGA 设计脉宽补偿法校正动态误差，突破了传统测距技术中量程提升导致精度下降的瓶颈。此外，FPGA 设计平台简化了系统架构，使系统在保持高性能的同时实现功耗/体积优化。对比传统激光雷达，该系统更适配高速小型无人机对载荷空间的严苛限制。

5　结论

本文针对智能化无人平台激光测距对大量程、高精度与轻量化集成应用的需求，基于 FPGA 实现了激光测距算法的设计与校正，并采用脉宽补偿法校正误差进一步提升了测时精度稳定性。实验测试结果表明，该测距系统在 10 m～5 km 量程下测距精度可达±0.15 m，响应速度达到纳秒级。此外，基于 FPGA 简化硬件设计、优化测时算法，实现大

量程、高精度、快响应与轻量化的多方位性能统一。结合单片集成式高响应光电探测器应用[23],凭借其轻量化、高实时性与高集成度的显著优势,特别适用于无人机、无人驾驶等航空三维探测领域,展现出极为重要的工程应用价值。

参考文献:

[1] 刘 军,党震宇. 基于嵌入式与Web技术的激光测距远程监控系统[J]. 电子测量技术,2009,32(12):110-113,130.
Liu Jun, Dang Zhenyu. Embedded and Web-based technology, remote monitoring system, laser range finder[J]. Electronic Measurement Technology, 2009, 32(12): 110-113, 130.

[2] 黄 麟,张晓丽. 三维成像激光雷达遥感技术在林业中的应用[J]. 世界林业研究,2006,19(4):11-17.
Huang Lin, Zhang Xiaoli. Applications of lidar and 3D remote sensing in forestry[J]. World Forestry Research, 2006, 19(4): 11-17.

[3] 沈 严,李 磊,阮友田. 车载激光测绘技术[J]. 红外与激光工程,2009,38(3):437-440,451.
Shen Yan, Li Lei, Ruan Youtian. Mobile mapping technology by vehicle-borne lidar[J]. Infrared and Laser Engineering, 2009, 38(3): 437-440, 451.

[4] 王新伟,孙 亮,张 岳,等. 激光距离选通三维成像技术研究进展(特邀)[J]. 红外与激光工程,2024,53(4):31-49.
Wang Xinwei, Sun Liang, Zhang Yue, et al. Advances of laser range-gated three-dimensional imaging (Invited)[J]. Infrared and Laser Engineering, 2024, 53(4): 31-49.

[5] 周 宇. 脉冲式激光测距仪的研究与设计[D]. 武汉:华中师范大学,2016.
Zhou Yu. Research and design of pulsed laser range finder[D]. Wuhan: Central China Normal University, 2016.

[6] 邓 磊,毛智慧. 无人机载轻小型遥感器的林业应用进展研究[J]. 地理空间信息,2024,22(5):1-13.
Deng Lei, Mao Zhihui. Application developments of miniature imagers for UAV-based remote sensing in forestry[J]. Geospatial Information, 2024, 22(5): 1-13.

[7] 王洪喆,辛德胜,张剑家,等. 脉冲激光测距时间间隔测量技术[J]. 强激光与粒子束,2010,22(8):1751.
Wang Hongzhe, Xin Desheng, Zhang Jianjia, et al. Pulsed laser ranging time-interval measuring technique[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2010, 22(8): 1751.

[8] 仲 峰,万莉萍,岳宇军. 高精度时间测量芯片TDC-GP2在激光测距中的应用[J]. 工业控制计算机,2007,20(4):69-70,72.
Zhong Feng, Wan Liping, Yue Yujun. High-precision interval measuring chip TDC-GP2 in accurate distance measuring[J]. Industrial Control Computer, 2007, 20(4): 69-70, 72.

[9] 郭晋远,袁剑辉. 激光脉冲测距专用CMOS高速高增益读出芯片设计[J]. 半导体光电,2022,43(6):1130-1135.
Guo Jinyuan, Yuan Jianhui. Design of high speed and high gain CMOS readout chip for laser pulse ranging[J]. Semiconductor Optoelectronics, 2022, 43(6): 1130-1135.

[10] 谢志鹏,卞春江,孟 新. 基于FPGA的激光测距控制系统设计[J]. 微计算机信息,2009,25(8):190-191,187.
Xie Zhipeng, Bian Chunjiang, Meng Xin. Design of laser distance measurement control system based on the FPGA[J]. Microcomputer Information, 2009, 25(8): 190-191, 187.

[11] 祁 迹,邓 智,刘以农. 一种基于FPGA的高精度单周期TDC设计[J]. 核电子学与探测技术,2011,31(4):378-381,385.
Qi Ji, Deng Zhi, Liu Yinong. A design of high resolution one-clock-cycle TDC based on FPGA[J]. Nuclear Electronics & Detection Technology, 2011, 31(4): 378-381, 385.

[12] 陈 晖,郑 福,翟光杰. 基于时间标记的60皮秒FPGA精密时间测量系统[J]. 电子设计工程,2016,24(8):68-71.
Chen Hui, Zheng Fu, Zhai Guangjie. A 60 ps FPGA precise time measurement system based on time-stamping[J]. Electronic Design Engineering, 2016, 24(8): 68-71.

[13] 赖慧敏,刘 杰,刘红海,等. 激光雷达接收机中时刻鉴别模块的研究和设计[J]. 半导体光电,2024,45(2):303-307.
Lai Huimin, Liu Jie, Liu Honghai, et al. Design of time discrimination module in LiDAR receiver[J]. Semiconductor Optoelectronics, 2024, 45(2): 303-307.

[14] 纪荣祎,赵长明,任学成. 脉冲激光测距时刻鉴别方法的研究[J]. 红外,2010,31(11):34.
Ji Rongyi, Zhao Changming, Ren Xuecheng. Study of timing discriminator for pulsed laser range finder[J]. Infrared, 2010, 31(11): 34.

[15] 冯国旭,常保成. 高精度激光测距技术研究[J]. 激光与红外,2007,37(11):1137-1140.
Feng Guoxu, Chang Baocheng. Study of high precision laser ranging technology[J]. Laser & Infrared, 2007, 37(11): 1137-1140.

[16] 刘 鹏,栗 苹,陈慧敏,等. 脉冲激光引信恒比定时浮动阈值电路[J]. 探测与控制学报,2009,31(3):19-23.
Liu Peng, Li Ping, Chen Huimin, et al. Fluctuating threshold circuit based on constant fraction discrimination for pulse laser fuze[J]. Journal of Detection & Control, 2009, 31(3): 19-23.

[17] 冉 建,曹 飞,姜 俊,等. 大电流、高稳定脉冲激光器驱动电路设计与数学分析[J]. 红外与激光工程,2020,49(S1):20200184.
Ran Jian, Cao Fei, Jiang Jun, et al. Design and mathematical analysis of driving circuit for high current and high stability pulsed laser[J]. Infrared and Laser Engineering, 2020, 49(S1): 20200184.

[18] 张建华,尹 俊,朱 斌,等. 基于单片机多模式控制的APD偏压电路模块设计[J]. 半导体光电,2022,43(2):400-404.

Zhang Jianhua, Yin Jun, Zhu Bin, et al. Design of APD bias circuit module based on multi-mode control of single chip microcomputer[J]. Semiconductor Optoelectronics, 2022, 43(2): 400-404.

[19] 权贵秦，郝睿鑫，于　洵. 一种室内标定激光测距准确度方法的研究[J]. 国外电子测量技术，2013，32(9)：42-45.
Quan Guiqin, Hao Ruixin, Yu Xun. Method of indoor-calibration about laser ranging accuracy [J]. Foreign Electronic Measurement Technology, 2013, 32(9): 42-45.

[20] 冯　波. 脉冲激光测距技术研究[J]. 电子世界，2021(8)：63-64.
Feng Bo. Research on pulse laser ranging technology [J]. Electronics World, 2021(8): 63-64.

[21] 胡蕴航，王灵杰，刘　洋，等. 单光子激光主动探测信噪比数学建模与评估[J]. 应用光学，2025，46(1)：194-201.
Hu Yunhang, Wang Lingjie, Liu Yang, et al. Mathematical modeling and evaluation of signal-to-noise ratio for single-photon laser active detection[J]. Journal of Applied Optics, 2025, 46(1): 194-201.

[22] 张　苍. 城市地形三维激光测绘雷达选点误差控制方法[J]. 北京测绘，2025，39(3)：312-315.
Zhang Cang. Control method for point selection error of urban terrain by 3D laser surveying and mapping radar[J]. Beijing Surveying and Mapping, 2025, 39(3): 312-315.

[23] 李　明，傅　婧，蒋君贤，等. 单片集成式高响应光电探测器件设计[J]. 半导体光电，2024，45(5)：687-692.
Li Ming, Fu Jing, Jiang Junxian, et al. Design of monolithic integrated high-response photodetection device [J]. Semiconductor Optoelectronics, 2024, 45(5): 687-692.

作者简介：

尹　俊(1988—)，男，重庆市合川区人，博士研究生，工程师，主要从事探测器、图像传感器测试应用研究。