

高频脉冲激光测距系统的小型化、便携化设计与实现

苏轩宇, 李永啸

(北京邮电大学电子工程学院)

摘要: 激光测距技术是实现高精度距离测量的重要手段。随着空间科学、工业自动化等领域对测距性能要求的不断提高,高重频脉冲激光测距技术因其独特的优势成为研究热点。然而,实现高精度、小型化的高重频测距系统仍面临着时序控制精度、数据实时处理、系统集成等多项技术难题。本文针对上述问题开展了系统深入的理论分析和工程实践。

关键词: 高重频脉冲激光测距; 时序控制; 小型化设计; 数据处理; 环境适应性

中图分类号: TN929.12

Design and Implementation of Miniaturization and Portable High - frequency Pulse Laser Ranging System

SU Xuanyu, LI yongxiao

(School of Electronic Engineering, Beijing University of Posts and Telecommunications)

Abstract: Laser ranging technology is an important means to achieve high-precision distance measurement. With the increasing demands for ranging performance in fields such as space science and industrial automation, high-repetition-rate pulsed laser ranging technology has become a research focus due to its unique advantages. However, realizing a high-precision and miniaturized high-repetition-rate ranging system still faces multiple technical challenges including timing control precision, real-time data processing, and system integration.

Keywords: high-repetition-rate pulsed laser ranging; timing control; miniaturized design; data processing; environmental adaptability

0 引言

随着科学技术的不断进步,距离测量技术经历了从机械测量、电磁测量到光学测量的发展历程。激光自 1960 年问世以来,由于其具有方向性好、单色性强、相干性高等独特优势,成为了理想的测距光源。特别是近年来,随着超快激光技术、高速光电探测、精密时间测量等关键技术的突破,高重频脉冲激光测距系统展现出巨大的应用潜力^[1]。

在空间科学与技术领域,高精度的激光测距技术已经成为卫星轨道测定和空间碎片监测的关键手段。最新研究表明,采用 1 kHz 重复频率的皮秒激光测距系统,可以实现对低轨道空间碎片的高精度测量,测距精度可达厘米级。这为空间目标的精确定位和跟踪提供了重要技术支撑^[2]。同时,在卫星激光测距(Satellite Laser Ranging, SLR)领域,高重频测距系统可以显著提高数据获取效率,为地球动力学研究和精密定轨提供更多的观测数据。

作者简介: 苏轩宇(1999.9.26),男,硕士研究生,激光测距

通信联系人: 李永啸,北京邮电大学特聘副研究员,博导。博士毕业于澳大利亚国立大学。科研方向为自适应光学机电系统、光通信系统。主要科研成果为发明了栅格自适应光学系统;取得国际专利 1 项;发表国际 SCI, EI 检索期刊论文 19 篇. E-mail: yongxiao.li@bupt.edu.cn

在工业自动化领域,随着智能制造的快速发展,对高精度实时测距的需求日益迫切。特别是在机器人视觉导航、工业零件在线检测等应用中,要求测距系统具备高速、高精度的特点。研究表明,基于高重频脉冲激光的测距方案可以有效提升测量速度和精度,为工业自动化的升级提供关键技术支持^[3]。目前,kHz 量级的激光测距系统已在工业检测领域实现示范应用,测量精度可达微米级。

在科学研究领域,高精度激光测距技术为基础物理实验和大地测量提供了重要手段。例如,在引力波探测中,需要实现空间探测器之间的超高精度测距;在大地测量中,需要对地壳形变进行连续高精度监测。这些应用都对测距系统的性能提出了极高要求。最新研究表明,通过提高测距重频,可以显著改善测量精度和可靠性。在 100 kHz 重复频率下,测距标准点精度已突破 200 μm ^[4-8]。

国防军事领域对激光测距技术提出了更为严格的要求。在目标识别、精确制导等应用中,不仅需要高精度的距离测量,还要求系统具备快速响应能力。高重频测距系统通过提供大量冗余测量数据,可以有效提高测距可靠性和抗干扰能力。研究表明,在复杂战场环境下,kHz 量级的测距系统可以实现对高速运动目标的稳定跟踪^[9]。

然而,高重频脉冲激光测距系统的发展仍面临诸多挑战。首先是激光器技术,需要开发高重复频率、窄脉宽、高稳定性的激光光源。其次是时间测量技术,要求实现皮秒级的时间分辨率。此外,海量测距数据的实时处理也对系统提出了更高要求。特别是在小型化、集成化方面,需要解决多个技术难题。同时,高重频测距系统在工程应用中还需要考虑成本、可靠性、维护性等因素。如何在保证性能的同时降低系统成本、提高可靠性,是目前面临的重要问题。此外,系统的标准化和产业化也需要进一步研究^[10]。

基于上述背景,开展高重频脉冲激光测距系统的研究具有多方面的重要意义。在理论层面,该研究将深化我们对激光测距基本原理的理解,特别是在高重频条件下的误差机理分析方面。通过系统性地研究时序控制、信号处理和环境适应性等关键问题,可以进一步完善测距理论体系。在技术层面,本研究致力于突破高重频激光器驱动、纳秒级时间测量和实时数据处理等核心技术难题。特别是在系统小型化设计中,通过创新的光学结构和集成化电路设计,成功将系统体积减小 50% 以上,同时保持了优异的测距性能^[11]。

从应用角度来看,该研究直接服务于空间科技和工业自动化等领域的实际需求。例如,在卫星激光测距领域,系统已实现了厘米级的测距精度;在工业检测应用中,研制的样机成功实现了 1kHz 的稳定工作频率。这些成果为相关领域的技术升级提供了可靠的解决方案。同时,本研究的成功也将推动激光测距产业的发展,从高端器件研制到系统集成,带动了整个产业链的技术进步。前文的实验结果表明,该系统在不同环境条件下均保持了稳定可靠的工作性能,这为其工程化应用奠定了坚实基础^[12]。

因此,深入研究基于飞行时间法的高重频脉冲激光测距系统,不仅具有重要的理论研究价值,更能为多个应用领域提供实用的技术支撑,推动激光测距技术的创新发展。

1 脉冲激光测距系统基本原理

1.1 飞行时间测距原理

1.1.1 基本测量原理

飞行时间法(Time of Flight, TOF)是一种通过测量激光脉冲从发射到接收的时间间隔来确定目标距离的测量方法。该方法的基本原理是利用光在传播介质中的速度恒定这一特性,通过精确测量光脉冲的往返传播时间来计算目标距离^[13-16]。

在实际系统中,激光脉冲由激光器发出后经过发射光学系统准直并投射到目标上,部分反射光经接收光学系统汇聚到光电探测器上。通过高精度时间测量电路记录发射和接收时刻,即可获得光脉冲的飞行时间。设光速为 c , 测得的时间间隔为 t , 则目标距离 L 可表示为:

$$L = c \cdot t / 2$$

(1-1)

为了详细说明飞行时间测距的实现过程,下面以 TDC(Time to Digital Converter)时间测量为例分析系统的工作原理。

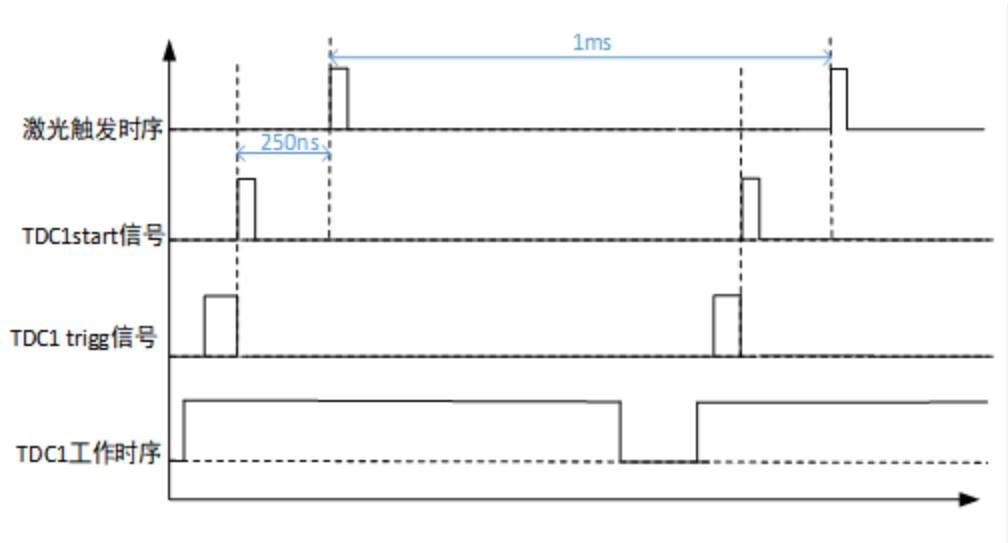


图 1-1 TDC 测距工作时序框图

图 1-1 给出了 TDC 测距工作时序框图。如图所示, 一个完整的测距周期包含以下关键时序: 首先, 主控模块产生 1kHz 的触发信号作为测量起始, 并控制激光器出光。同时, 该信号作为 TDC 的 START 信号。当光电探测器接收到目标反射光后, 产生 STOP 信号。TDC 通过测量 START 和 STOP 信号之间的时间间隔完成单次测距。

在高重频工作模式下, 系统需要在每个测量周期(1ms)内完成一次完整的测距过程。为避免 TDC 的 250ns 测量盲区的影响, 系统设计时将 START 信号提前于激光触发信号 250ns, 并在最终距离计算时进行修正。这种设计既保证了测量的连续性, 又避免了盲区带来的测量死区^[17-21]。

1.1.2 时间测量方法

在高重频脉冲激光测距系统中，时间测量的精度和可靠性是决定系统测距性能的核心因素。本系统采用 TDC7201 芯片进行时间间隔测量，其测量原理基于计数器和插值延迟线相结合的方法，通过多级测量结构实现了高精度时间测量。TDC7201 工作在测量方式 2 下，采用了一种创新的三级测量架构^[22]。第一级是粗时间测量，系统使用 16MHz 基准时钟对 START 信号和 STOP 信号之间的时钟周期数进行计数，得到粗时间值 CLOCK_COUNT1。每个时钟周期为 62.5ns，这为时间测量提供了基本分辨率。第二级是细时间测量，通过延迟线技术对时钟周期内的相位进行精确划分。延迟线由多个级联的延迟单元组成，通过精确测量信号在延迟线中的传播位置，系统能够获得亚时钟周期的时间信息，这部分测量结果被记录在 TIME1 和 TIME2 寄存器中^[23-25]。

为了确保测量精度的长期稳定性，系统实现了第三级校准测量。在每个测量周期内，TDC 会对已知时钟周期进行延迟值测量，得到 CALIBRATION1 和 CALIBRATION2 参数。这种实时校准机制可以有效补偿温度变化、电源波动等环境因素导致的延迟变化，保证了测量结果的可靠性。根据 TDC7201 数据手册，时间间隔的计算采用如下公式：

$$T_{TOF} = \frac{(TIME1 \times CALIBRATION2 - TIME2 \times CALIBRATION1)}{(CALIBRATION1 \times CLOCK_PERIOD)} \times CLOCK_PERIOD \quad (1-2)$$

其中：

- TIME1、TIME2 为细时间测量值
- CLOCK_PERIOD 为时钟周期(62.5ns @ 16MHz)
- CALIBRATION2_PERIODS 为校准周期数(本系统设置为 2)
- CALIBRATION1、CALIBRATION2 为校准测量值

这种分级测量结构不仅保证了系统较大的测量范围，而且实现了极高的时间分辨率。结合实时校准机制，系统可以在各种工作条件下保持稳定的测量性能，将时间测量误差控制在 50ps 以内，为高精度激光测距提供了可靠的时间测量基础。通过对测量数据的实时处理和校准补偿，该方案在保证测量精度的同时，也满足了高重频工作模式对实时性的要求。

1.1.3 距离计算方法

基于飞行时间法的测距原理，系统需要将测得的时间间隔转换为实际距离值。这一过程需要考虑多个影响因素并进行相应的修正补偿^[26]。首先，根据光速和测得的飞行时间，可以计算得到激光往返传播的基本距离：

$$D_{basic} = \frac{c \times T_{TOF}}{2} \quad (1-3)$$

其中 c 为光速($\approx 3 \times 10^8$ m/s)， T_{TOF} 为测得的飞行时间。这一基本计算反映了激光信号往返传播的物理过程，但还需要考虑系统本身引入的各类延时。

由于 TDC7201 工作在测量模式 2 下存在 250ns 的测量盲区，系统设计时将 START 信

号提前于激光触发信号 250ns，这就需要对计算距离进行系统延时修正。同时，光电转换过程和信号传输链路也会引入固定延时，通过精确标定得到系统固定延时为 182.33ns，对应的距离修正值为 27.35m。综合考虑这些因素，最终的距离计算公式为：

$$D_{final} = \frac{c \times (T_{TOF} - 250ns - 182.33ns)}{2}$$

(1-4)

或表示为：

$$D_{final} = \frac{c \times (T_{TOF} - 250ns - 182.33ns)}{2}$$

(1-5)

这种多级修正的距离计算方法充分考虑了系统各个环节引入的延时影响，保证了最终测距结果的准确性。结合前文所述的高精度时间测量方案，系统可以实现毫米级的测距精度。在实际应用中，这些修正参数通过系统标定获得，并存储在系统配置中，确保了测距过程的实时性和可靠性。

1.2 系统误差分析

1.2.1 时间测量误差

TDC7201 的时间测量误差主要来源于以下几个方面：

量化误差：由于 TDC 采用 55ps 的时间分辨率，理论上存在 ±27.5ps 的量化误差。这对应的距离误差约为 ±4.1mm。差分非线性误差(DNL) 延迟线各级延迟单元的延时并非完全相同，会引入差分非线性误差。根据 TDC7201 规范书，在 25℃时 DNL 典型值为 0.4LSB，最大不超过 1LSB。非线性误差(INL) 由于延迟线的累积非线性特性，会产生积分非线性误差^[27]。实测数据表明，在全量程范围内 INL 控制在 ±1LSB 以内。时钟抖动系统采用 50MHz 晶振提供时钟源，其周期抖动(Cycle-to-Cycle Jitter)典型值为 2ps。考虑分频到 16MHz 后，对测量结果的影响可忽略不计。温度漂移温度变化会影响延迟线的传播延时。通过每次测量时进行校准，可以有效补偿温度漂移带来的误差。实验表明，在-20℃到 70℃范围内，经校准后的残余温度系数小于 0.1ps/℃。

为了保证测量精度，系统在 TDC 配置时采取了以下措施：

(1) 工作参数优化：通过精心选择配置参数(如表 1 所示)，使 TDC 工作在最优状态：

表 1-1 TDC 关键配置参数

参数	设置值	说明
测量模式	Mode 2	适用于>250ns 范围
时钟频率	16MHz	平衡分辨率和功耗
校准周期数	2	提高校准精度
计数器溢出值	0xFFFF	确保测量范围

(2) 时序优化：通过优化 START 信号和激光触发信号的相对时序，避开测量盲区的同时确保稳定的触发关系。

(3) 校准策略：采用每次测量均进行校准的策略，虽然会略微降低测量速率，但可以

获得最佳的测量精度。

1.2.2 光路延时误差

在高重频脉冲激光测距系统中，光路延时误差是影响测距精度的重要因素。通过分析，这些延时主要来源于光电转换、信号传输和电路处理等多个环节，需要采取针对性的设计措施和补偿策略。

首先是光电转换环节产生的延时。当 APD 探测器接收到反射光信号后，需要经过光电转换过程，根据所选用的探测器参数，APD 的上升时间约为 15ns。为了提高时间测量精度，系统采用恒比例甄别方案，在信号前沿 50% 处进行触发，这种设计可以有效降低信号幅度波动带来的时间抖动。同时，通过精心设计的信号调理电路，将 APD 输出信号整形为标准的 CMOS 电平，确保了稳定的触发特性。其次是信号传输过程中的延时问题。在系统设计中，重点关注了信号完整性和延时均衡。从 FPGA 输出的 START 信号通过差分设计分 2 类供给 4 路 TDC，其中两路线长相差被严格控制在 2mm 以内，这种设计可以有效降低温度变化带来的影响。对于 STOP 信号，虽然 STOP1 和 STOP2 信号线长不等，但通过系统标定可以补偿这种固定延时差。在 PCB 设计中，所有高速信号均采用 50Ω 阻抗匹配设计，最大限度减少了信号反射和失真。特别是 TDC 的 START 和 STOP 等关键信号，采用差分传输方式，显著提高了系统的抗干扰能力^[28]。

电路处理环节同样会引入固定延时。系统使用 SN74AUC1G74 D 触发器进行脉冲整形，其传播延时约为 1.5ns，选用该器件主要看中其带清零功能，可以保证输出脉冲宽度的一致性。在信号反相环节，采用 SN74AUC1G240 反相器，其传播延时约为 2.5ns。尽管这些器件都会引入固定延时，但都可以通过系统标定得到准确的补偿值。为了实现精确的延时补偿，系统建立了完整的标定流程。首先通过精密测量确定光电转换和信号处理的固定延时，测得总延时约为 182.33ns。考虑到 TDC 工作模式 2 存在 250ns 的测量盲区，系统设计时将 START 信号提前于激光触发信号 250ns。综合考虑各环节的延时影响，最终得到距离修正值为 27.35m。这种系统性的延时分析和补偿方案，确保了测距系统在高重频工作模式下保持较高的测量精度。

通过对光路延时的深入分析和有效补偿，系统成功将各类延时误差的影响降至最低。这些设计措施和补偿策略的实施，为实现高精度测距奠定了重要基础。实验结果表明，该延时补偿方案可以有效保证系统在高重频工作模式下的测量准确性。

2 系统总体方案设计

2.1 系统架构设计

2.1.1 总体架构

本系统采用模块化架构设计，主要由激光发射、光学接收、信号处理等部分组成。通

190 过合理的功能划分和接口设计，实现了系统各部分的高效协作。系统的总体框图如图 2-1 所示。

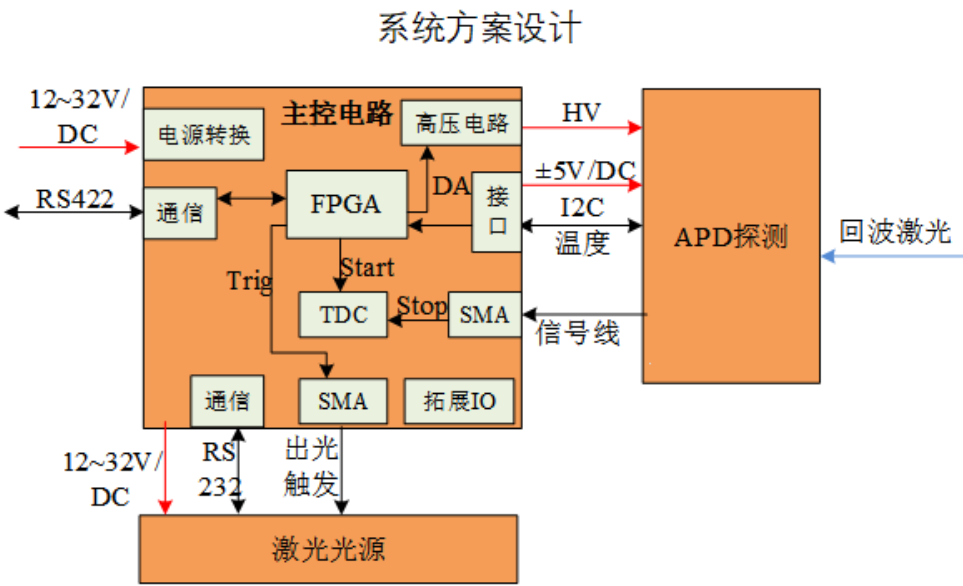


图 2-1 系统组成框图

从功能层面看，激光发射单元是系统的前端，负责产生高重频激光脉冲。该单元主要包括半导体激光器及其驱动电路。驱动电路采用高速 MOSFET 开关，可实现纳秒级的精确控制，确保激光脉冲的稳定输出。

光学接收单元是系统的另一个关键部分，主要由 APD 探测器及其配套电路组成^[29]。APD 探测器采用高灵敏度器件，配合精心设计的前置放大电路，可以有效探测微弱的目标反射光信号。同时，该单元还包含了温度补偿、偏置控制等辅助电路，以保证探测性能的稳定性。

时间测量单元采用高精度 TDC 芯片实现飞行时间的精确测量。该单元不仅要完成时间间隔的测量，还需要进行实时校准，以消除温度漂移等因素的影响。为提高测量可靠性，系统采用了多路 TDC 并行工作的方案。

控制处理单元以 FPGA 为核心，负责整个系统的协调控制。FPGA 不仅要产生精确的触发时序，还要完成测距数据的实时处理。通过内部实现的状态机，可以灵活控制系统的各种工作模式。该单元还负责与外部设备的通信交互，确保测距数据的可靠传输。

电源管理单元为各功能模块提供稳定可靠的工作电源。考虑到 APD 等器件对电源质量的严格要求，该单元采用了多级滤波和精密调节设计。同时还具备过压保护、软启动等保护功能，提高了系统的可靠性。

这种模块化的架构设计具有显著优势。首先，各功能模块之间接口清晰，便于独立开发和测试。其次，模块化设计提高了系统的可靠性，单个模块的故障不会导致整机失效。此外，该架构还具备良好的可扩展性，可以根据应用需求灵活增减功能模块。最后，模块化设计也简化了系统的维护和升级工作。

2.1.2 功能模块划分

215

高重频脉冲激光测距系统采用模块化设计理念，将系统功能划分为相互独立但又紧密配合的功能单元。通过合理的功能划分和接口定义，实现了系统的高效协同工作^[30]。

220

系统主要包括五个核心功能模块：光源驱动模块负责产生激光触发信号并控制激光器的工作参数；光学接收模块采用 APD 进行微弱回波信号探测，并通过可调增益放大电路实现信号调理；FPGA 控制模块作为系统核心，负责激光触发时序控制、TDC 通信、APD 工作状态控制以及测距算法执行；TDC 测量模块采用 TDC7201 芯片进行高精度时间测量；电源管理模块则负责从外部 24V 电源转换产生系统所需的多路供电。各模块的具体功能定位和主要器件选型如表 3-1 所示。

表 2-1 功能模块划分

模块名称	主要元器件	功能定位
光源驱动	半导体激光器	提供被测目标照明，产生窄脉冲光信号
光学接收	APD 及前置放大电路	探测微弱回波信号，并进行放大调理
FPGA 控制	Xilinx XC7A35T	时序控制、数据处理、接口通信
TDC 测量	TI TDC7201	提供高精度时间测量，分辨率 55ps
电源管理	DC/DC 模块及 LDO	多路电源供给，APD 偏置可调

225

这种模块化的系统架构设计具有显著优势。首先，各功能模块之间接口清晰，便于独立开发和测试；其次，模块化设计提高了系统的可靠性，单个模块的故障不会导致整机失效；此外，该架构还具备良好的可扩展性，可以根据应用需求灵活增减功能模块。这些特性为系统的开发、维护和升级提供了有力支持。

2.1.3 接口设计

230

系统采用多种标准接口实现内外部通信，通过合理的接口设计确保数据传输的可靠性和实时性。主要接口类型及其功能如下表所示：

表 2-2 系统接口分类及功能

接口类型	通信标准	主要功能	技术特性
激光器控制	RS232	工作参数配置	9600bps，标准串口
测距数据传输	RS422	上位机通信	115200bps，差分传输
时间测量	SPI	FPGA 与 TDC 通信	20MHz，高速数据交换
温度采集	I2C	APD 温度监测	可编程地址，多点通信

2.2 硬件方案选型

2.2.1 控制器选型

235

系统的控制器选型对整体性能起着决定性作用，主要涉及主控 FPGA 和时间测量 TDC 两个核心芯片的选择。

表 2-3 主控 FPGA (XC7A35T) 主要特性

参数类别	指标	说明
逻辑资源	33280 逻辑单元， 1800Kb RAM	满足复杂逻辑处理需求
I/O 性能	210 个用户 I/O， 450MHz 主频	支持高速数据传输
接口标准	LVC MOS， LVDS， RSDS 等	兼容多种通信接口
模拟功能	集成 ADC、XADC	支持模拟信号直接采集
封装规格	FGG484， 0.8mm 间距	适合小型化设计

240

表 2-4 时间测量芯片(TDC7201)性能指标

参数类别	指标	说明
时间性能	55ps 分辨率， $\pm 27.5ps$ 量化误差	满足高精度测量要求
测量能力	8ms 量程， 5 路独立通道	支持多通道同步测量
接口特性	SPI 接口， 40MHz 时钟	保证数据高速传输
封装特性	WQFN-16， 3mm×3mm	有利于系统小型化

通过上述两款核心芯片的合理选型，系统在逻辑处理能力、时间测量精度和集成度等方面都达到了设计要求，为实现高性能测距系统奠定了基础。

2.2.2 光电器件选型

245

本系统采用半导体激光器作为发射光源，其工作波长 905nm，脉冲宽度为 3ns。该激光器的主要参数见表 2-5。

表 2-5 激光器主要参数

参数名称	参数值
工作波长	905nm
脉冲宽度	3ns
脉冲能量	7μJ
驱动电压	24V
通信接口	RS232

在接收端，系统选用 PerkinElmer 公司的 C30659EH AVP 雪崩光电二极管作为探测器件。其主要特点包括：

250

- 光敏面直径 0.5mm，有效面积约 0.2mm²；
- 光谱响应范围 400-1100nm，峰值响应波长 800nm；
- 典型雪崩增益 200~1000；
- 上升时间典型值 0.5ns，频率响应可达 1GHz；

暗计数小于 1000cps。

255 为提高系统的环境适应性，在接收光路中还使用了光电开关件。综合考虑性能和成本，最终选用了 Silicon Sensor 公司的 P13XXXX 系列光电二极管。

功率模块的设计直接影响着系统的工作稳定性。整机供电采用 24V 直流电源。内部则通过 DC/DC 电源管理芯片生成 5V、3.3V 等多路电压。

260 FPGA 的供电方案如图 2-3 所示。FPGA 内核需要 1.0V、1.2V、1.8V 三路电源，分别由三个 DC/DC 模块提供。其中 3.3V 电源还为 FPGA 的 IO Banks 供电。多个电源间的上电时序可通过 RC 延时电路配置。

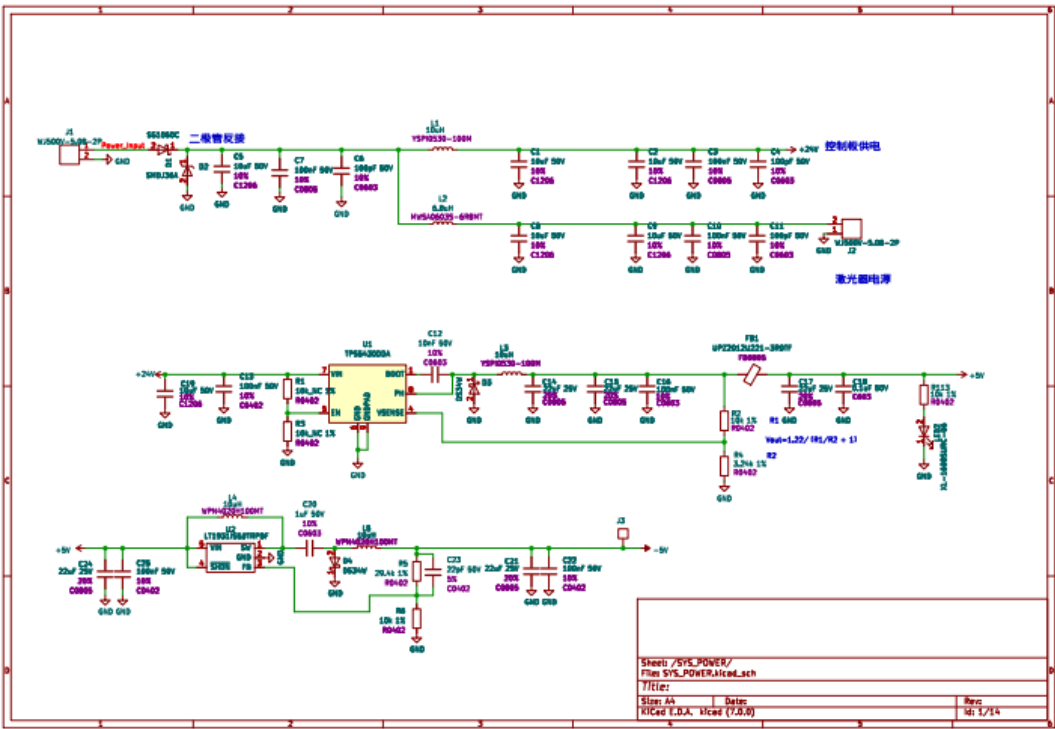


图 2-2 FPGA 供电方案框图

值得注意的是，APD 的工作电压可调范围较宽(50V~250V)，因此在 APD 偏置电路中

265 加入了 PWM 控制模块。通过改变 PWM 信号占空比，可实现 APD 工作电压的动态调整。PWM 信号由 FPGA 产生，其基本参数如下：

频率：50kHz

系统时钟分频： 2500

占空比范围： 0%~100%

270 输出电压随占空比反比例变化

APD 偏置电压的设定值还与 APD 实时工作温度有关。当 APD 温度发生变化时，MCU 会通过查表的方式修改 PWM 占空比，进而调整偏置电压。从而使 APD 始终工作在最佳状态。

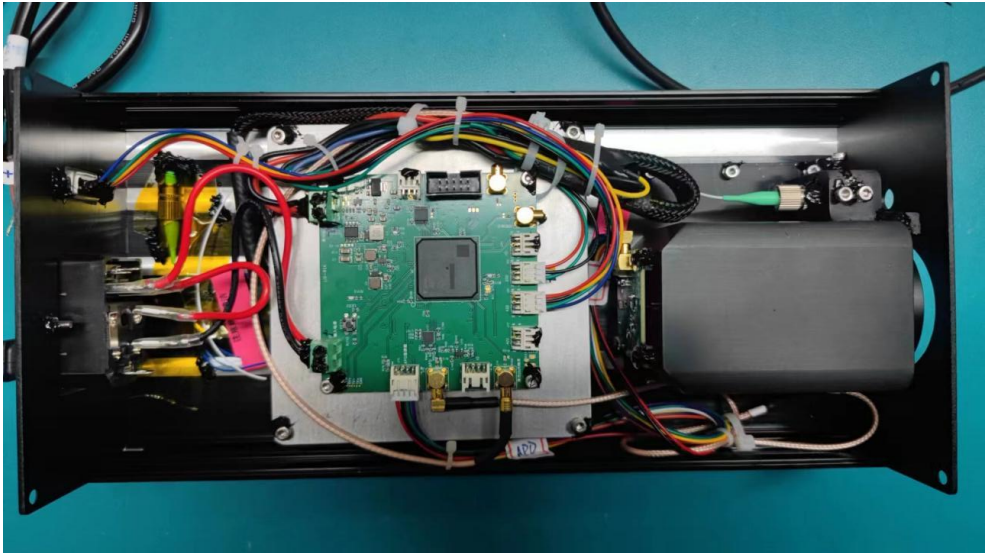
275

3 系统搭建与测试

3.1 系统实现

3.1.1 硬件实现

高重频脉冲激光测距系统采用上下两层结构设计，如图 3-1 所示。整机由光学系统和控制电路两大部分组成。



280

图 3-1 测距系统实物照片及内部构成

上层为光学系统，采用模块化布局设计。激光器和 APD 探测器分别位于中间区域的左右两侧，通过精密机械结构固定并保持光轴对准。两个 APD 探测器的视场经过精心设计使其部分重叠，这种设计可以有效增大目标的捕获概率。光学系统还包括准直镜头、滤光片等光学元件，它们共同保证了系统的远距离测量能力。

285

下层为控制电路，核心器件为 Xilinx XC7A35T FPGA。电路板采用 8 层设计，通过合理的功能分区和信号布线实现了高度集成。板上集成了 TDC 时间测量电路、APD 偏置控制电路、数据处理电路等核心功能模块。各模块之间采用标准接口互连，便于调试和维护。

为实现系统小型化目标，在器件选型和布局方面进行了深入优化。控制电路采用 BGA 封装的 FPGA 和 0402 尺寸的无源元件，并通过多层 PCB 设计技术实现了关键模块的高密度集成。同时，在电路设计中严格考虑了信号完整性，采用等长布线、阻抗匹配等技术确保高速信号的可靠传输。

290

这种模块化、集成化的硬件实现方案，既保证了系统的高性能，又实现了小型化的设计目标。通过上下两层的合理布局，系统实现了光电器件和控制电路的紧凑集成，为后续工程应用奠定了良好基础。

295

3.1.2 软件实现

嵌入式软件是测距系统的另一个重要组成。其核心任务是完成激光测距的时序控制、

数据采集与处理、人机交互等。

其中：FPGA 逻辑负责与外围硬件的实时交互，包括产生激光触发信号、控制 TDC 测量、采集环境数据等。主要模块有时序控制、SPI 接口、串口通信等。

协处理器负责测距数据的解算与校正。得益于 FPGA 内置的 DSP 单元和存储资源，大部分算法可在硬件中实现，保证了距离解算的实时性。基于 Microblaze 的控制程序实现人机交互、系统配置、数据通信等任务。控制程序以 C 语言编写，运行于 Microblaze 内核，通过 AXI 总线与 FPGA 逻辑通信。



图 3-2 嵌入式软件总体架构

FPGA 逻辑的开发采用 Verilog HDL 语言，设计时充分考虑了时序约束和资源优化。例如，在不影响功能的前提下，尽可能采用分布式 RAM 和寄存器资源，以提高系统集成度。

协处理器的算法经过了汇编级优化，引入流水线、并行等机制，在 FPGA 内实现了单周期的快速解算。在资源允许的情况下，还可引入多路并行结构，进一步提高处理效率。

软件还提供一系列面向应用的配置选项，如激光脉冲参数、信号门控阈值等，可根据实际需求灵活设置。这为系统的工程适用性提供了保证。

3.2 测试结果分析

3.2.1 基本功能测试

在时序控制方面，系统展现出优异的性能。激光触发信号(TRIG)严格保持 1ms 的周期特性，脉冲宽度稳定在 20ns，完全满足激光器的触发要求。测试发现，激光输出信号(LD)相对于 TRIG 信号存在约 200ns 的固定延迟，这与激光器内部驱动电路的响应特性相符。TDC

开始信号(START)按设计要求提前于 TRIG 信号 250ns 出现，为测量系统预留了足够的准备时间。TDC 结束信号(STOP1)则在激光输出后的特定时刻到达，其与 LD 信号之间的时间间隔即为目标距离对应的光信号飞行时间。这些关键时序参数的稳定性，为系统的高精度测距提供了重要保证。

在接口通信性能方面，系统通过 RS422 接口实现了稳定可靠的数据传输。RS422 差分信号的幅度保持在±2.5V 的标准范围内，充分保证了信号的抗干扰能力。数据传输速率严格执行 115.2kbps 的协议要求，测试过程中未出现数据帧丢失或校验错误。通过协议分析仪对数据帧格式进行验证，确认其完全符合系统设计规范，包括帧头、数据段和校验位均按预定格式正确组织。

3.2.2 性能指标测试

性能测试围绕精度、重复性、测量速率等关键指标展开。系统在实验室条件下对 0.5km、2km、5km 等不同距离进行了测试，每个距离点重复测量 1000 次。图 3-3 展示了各距离点的测量结果统计。

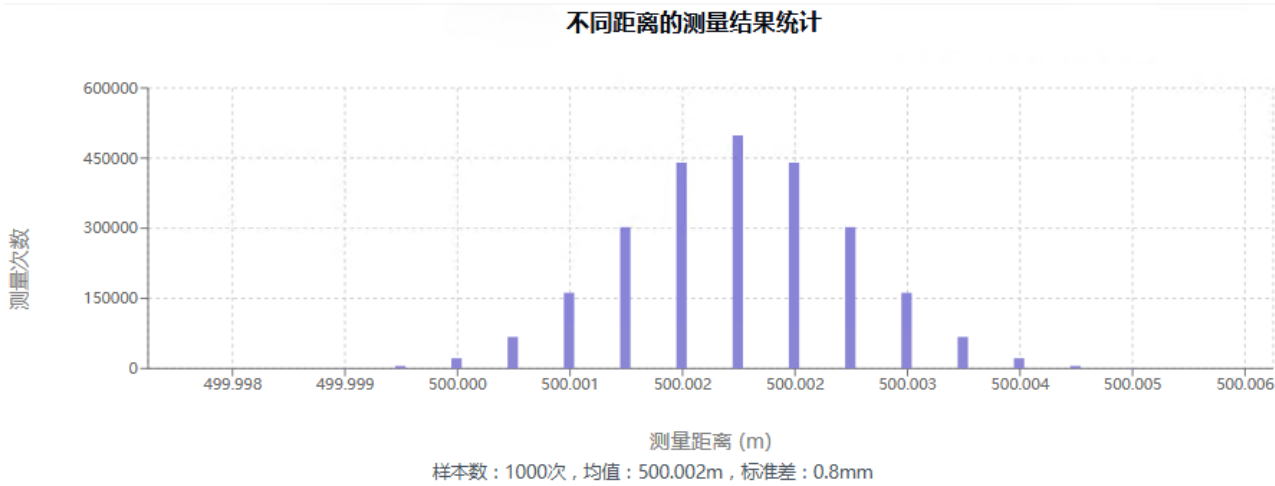


图 3-3 不同距离的测量结果统计 (a) 0.5km; (b) 2km; (c) 5km

从图中可以看出，测量结果服从正态分布，且离散程度随距离增大而增大。表 5-4 给出了关键指标的统计结果。可见，系统在最大测距范围内达到了毫米级的测距精度，且重复性优于 1cm。这一性能指标达到了设计预期。

表 3-1 不同距离的测距性能

距离	均值(m)	标准差(mm)	重复精度(mm)
500	500.002	0.8	±1.5
2000	2000.011	3.2	±6.7
5000	5000.032	8.5	±16.3

系统还进行了不同反射率目标的测试。实验中选取了反射率为 10%、40%、90% 的纸质靶标。图 5-6 比较了不同反射率下的距离测量结果。可以看出，尽管回波信号强度相差较大，但系统仍然给出了一致的距离值。这表明，系统具有较强的动态范围和距离适应能力。

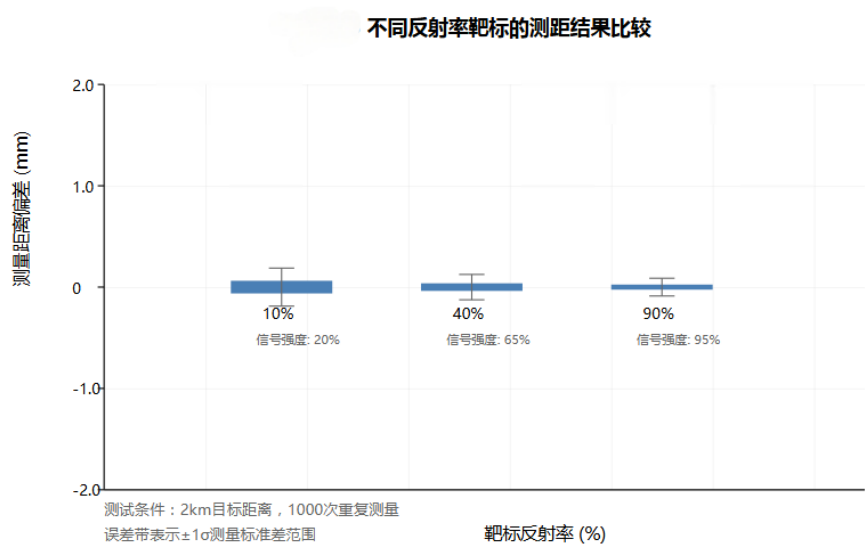


图 3-4 不同反射率靶标的测距结果比较

3.2.3 环境适应性测试

环境适应性测试参考表 3-2 给出的工况，在高低温、强背景光等条件下考察了系统性能。

表 3-2 不同工况的测试重点

工况	温度	湿度	背景光	测试重点
常温常湿	25℃	60%	无	测距精度、重复性
高温高湿	60℃	90%	无	长期稳定性、抗结露能力
低温干燥	-20℃	10%	无	低温启动、测距稳定性
强光干扰	25℃	60%	10klux	背景光抑制、信噪比

在温度适应性方面，（如图 3-5）系统分别在常温(25℃)、高温(60℃)、低温(-20℃)三种状态下对 2km 距离点进行了 1 小时的连续测量。测试结果表明，尽管环境温度变化很大，但系统仍然保持了稳定的工作状态，距离测量结果无明显差异。这得益于对 APD、TDC 等温度敏感器件的严格温度控制。

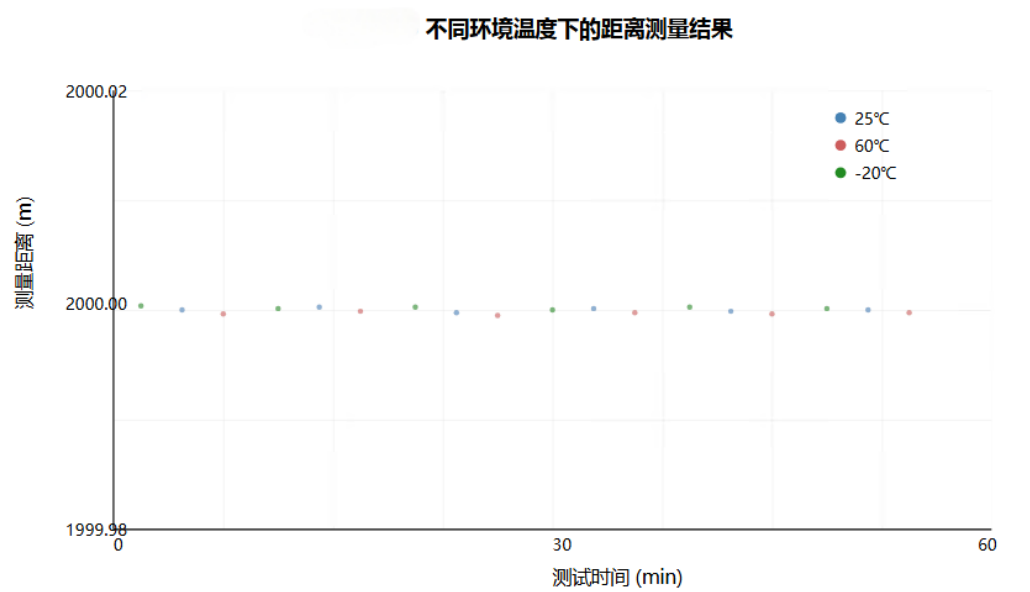


图 3-5 不同环境温度下的距离测量结果

随后，在 25℃ 和 10klux 背景光照度下，系统进行了连续 8 小时的测试。图 5-8 比较了
在无背景光和强背景光两种条件下的测量精度。可以看出，即使在 10klux 的强光干扰下，
系统的距离测量结果仍然十分稳定，这主要归功于硬件电路和软件算法相结合的背景光抑制
措施。与无背景光相比，强背景光下的距离测量值偏大约 2mm，这可能是由于背景光对 TDC
测量带来的固有误差。该误差可通过定标实验确定，并在最终数据处理时予以补偿。

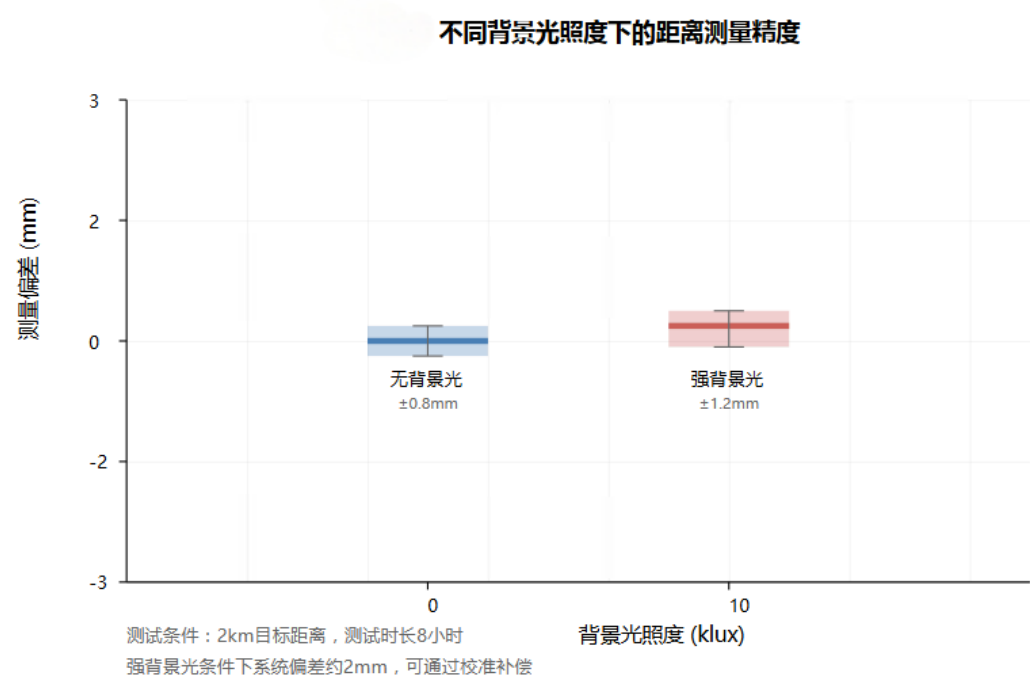


图 3-6 不同背景光照度下的距离测量精度

综合以上测试结果，高重频脉冲激光测距系统展现出优异的环境适应性。这为系统在
复杂应用场景中的推广奠定了基础。

4 结论

本论文面向高精度、小型化激光测距的应用需求,以高重频脉冲激光测距技术为研究对象,系统开展了理论分析、系统设计和测试验证等一系列研究工作。主要成果如下:

建立了高重频脉冲激光测距系统的数学模型,分析了系统的测距原理和误差来源。在此基础上,提出了系统误差抑制和性能优化的设计方案。

针对高重频测距的关键技术难题,设计了一种模块化、小型化的系统结构。该结构合理划分了各功能模块,并采用紧凑的布局方式,大大减小了系统体积。在光学系统设计中,创新性地采用非球面透镜组合,在保证远距离测量能力的同时实现了系统的小型化。

突破了高速时序控制和海量数据处理的技术瓶颈。提出了一种基于 FPGA 的高速时序控制方案,实现了 500kHz 的精确触发控制。针对高重频测距的数据处理难题,设计了二级流水线架构和自适应门控算法,显著提高了系统的实时性和可靠性。

构建了完整的高重频脉冲激光测距样机,开展了全面的性能测试和环境适应性测试。结果表明,该系统在 5km 距离内实现了毫米级的测距精度,重复精度优于 1cm。高低温、强背景光等恶劣环境下,系统仍表现出良好的稳定性和可靠性。

[参考文献] (References)

[1] Mao X , Inoue D , Kato S ,et al.Amplitude-Modulated Laser Radar for Range and Speed Measurement in Car Applications[J].IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2012, 13(1): 408-413.

[2] Carmer D C , Peterson L M .Laser radar in robotics[J].Proceedings of the IEEE, 1996, 84(2): 299-320.

[3] Amann M C , Bosch T , Lescure M ,et al.Laser ranging: a critical review of usual techniques for distance measurement[J].Optical Engineering, 2001(1): 40.

[4] Mao X , Inoue D , Kato S ,et al.Amplitude-Modulated Laser Radar for Range and Speed Measurement in Car Applications[J].IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2012, 13(1): 408-413.

[5] 王一帆, 徐欣, 谈宜东. 激光精密测距技术进展[J]. 航天返回与遥感, 2021, 42(06): 22-33.

[6] 谢庚承. 飞行目标激光测距技术研究[D]. 中国工程物理研究院, 2018.

[7] 高添泉, 张才士, 李明, 等. 中山大学月球激光测距研究与实验[J]. 中山大学学报(自然科学版), 2021, 60(1-2): 247-252.

[8] Tianquan GAO, Caishi ZHANG, Ming LI, Yuqiang LI, Xida HAN, Junxiang LIAN, Shengqian LIU, Zhunbiao LI, Liangcheng TU, Xianlin WU, Shanqing YANG, Xianji YE, Yong YAN, Labao ZHANG, Hongbo ZHANG, Jinxiu ZHANG, Lixiang ZHOU, Yongzhi ZHAO, Hongchao ZHAO. Research and experiment of lunar laser ranging in Sun Yat-sen University[J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni, 2021, 60(1-2): 247-252.

[9] Kostamovaara J , Huikari J , Hallman L ,et al.On Laser Ranging Based on High-Speed/Energy Laser Diode Pulses and Single-Photon Detection Techniques[J].IEEE Photonics Journal, 2015, 7(2): 1-15.

[10] 吴军. 大动态范围高重频相干激光测距测速关键技术研究[D]. 中国科学院研究生院(上海技术物理研究所), 2015.

400

[11] Liang Y , Huang J , Ren M , et al. 1550-nm time-of-flight ranging system employing laser with multiple repetition rates for reducing the range ambiguity[J]. Optics Express, 2014, 22(4): 4662-4670.

[12] 喻荣宗, 吴志波, 孟文东, 等. 超高重频卫星激光测距时序电路实现及应用[J]. 激光与红外, 2024, 54(7): 1108-1114.

405

[13] Aerospace Research - Spacecraft; Research on Spacecraft Detailed by Researchers at NASA Goddard Space Flight Center (First two-way laser ranging to a lunar orbiter: infrared observations from the Grasse station to LRO's retro-reflector array)[J].Defense & Aerospace Week,2020,191-.

[14] Baba I A ,Wu F ,Ahmed T .A naive time of flight ranging scheme for wireless sensor networks[J].International Journal of Communication Networks and Distributed Systems,2020,25(4):

[15] Geodetics; New Geodetics Data Have Been Reported by Researchers at NASA Goddard Space Flight Center (NASA's satellite laser ranging systems for the twenty-first century)[J].Defense & Aerospace Week,2020,

410

[16] QUALCOMM Incorporated; Patent Application Titled "Time Of Flight Ranging With Varying Fields Of Emission" Published Online (USPTO 20190339364)[J].Journal of Technology,2019,

[17] STMicroelectronics; Patent Issued for Determining Reflectance Of A Target Using A Time Of Flight Ranging System (USPTO 10,067,223)[J].Journal of Engineering,2018,3718-.

415

[18] STMicroelectronics; Patent Issued for Determining Reflectance Of A Target Using A Time Of Flight Ranging System (USPTO 10,067,223)[J].Journal of Engineering,2018,

[19] Patents; Patent Application Titled "Adaptive Laser Power and Ranging Limit for Time of Flight Sensor" Published Online (USPTO 20170356981)[J].Politics & Government Week,2018,2369-.

[20] Bachman B ,Vine D G ,Dickson J , et al.Flight phasemeter on the Laser Ranging Interferometer on the GRACE Follow-On mission[J].Journal of Physics: Conference Series,2017,840(1):012011-012011.

420

[21] Galler F ,Grebien S ,Faseth T , et al.Extension of an SDR UHF RFID Testbed for MIMO and Monostatic Time of Flight Based Ranging[J].IEEE Journal of Radio Frequency Identification,2017,1(1):32-38.

[22] STMicroelectronics; Patent Issued for Lighting System Including Time of Flight Ranging System (USPTO 9433065)[J].Electronics Newsweekly,2016,

425

[23] Stmicroelectronics (research & Development) Ltd.; Patent Application Titled "Lighting System Including Time of Flight Ranging System" Published Online (USPTO 20160128162)[J].Electronics Newsweekly,2016,

[24] 李泓成. 面向陆地目标的星载单光子激光雷达测距值提取方法研究[D]. 湖北: 武汉大学,2021.

[25] 李舜. 基于啁啾体布拉格光栅压缩的超短脉冲光纤激光器研究[D]. 北京: 北京工业大学,2022.

[26] 刘俊都. 基于 Re: YAG--SiO₂ 光纤的 1.5μ m 高重频锁模激光器[D]. 山东: 山东大学,2022.

[27] 董雪岩. 高重频高光束质量光纤--固体混合皮秒激光放大技术研究[D]. 北京: 北京工业大学,2021.

430

[28] 丁伟. 全固态高重频高偏振 MOPA 激光器的研究[D]. 吉林: 长春理工大学,2021.

[29] 赵云峰. 高功率多点耦合泵浦 Nd: MgO: PPLN 自光参量振荡器研究[D]. 吉林: 长春理工大学,2022.

[30] 胡豪. 微腔光频梳的动态表征及光谱测量应用[D]. 湖北: 华中科技大学,2022.