

## 激光与光电子学进展

## 低成本亚毫米精度单光子测距技术

李舒毅, 詹淇, 李召辉, 吴光\*

华东师范大学精密光谱科学与技术国家重点实验室, 上海 200241

**摘要** 单光子探测技术具有高灵敏度、低时间抖动、低功耗等独特优势,在激光测距和成像中的应用越来越广泛。基于此,提出一种低成本的高精度单光子测距技术。利用窄脉冲电路驱动激光二极管产生脉宽为 160 ps 的窄脉冲激光,利用多像素光子计数器研制时间抖动为 417 ps 的低时间抖动单光子探测器,降低系统的整体时间抖动,并搭建高精度单光子测距实验装置。测距实验结果表明,在 2 m 的测距量程内,单光子测距系统的距离测量精度可达 370  $\mu\text{m}$ @RMS。实验装置采用同轴光路设计,结构简单,易于集成,为实现小型化低功耗高精度单光子测距系统提供了一种可行性的解决方案。

**关键词** 激光测距; 单光子探测器; 亚毫米; 光子计数

中图分类号 TN214

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP230964

## Low-Cost Submillimeter-Precision Single-Photon Ranging

Li Shuyi, Zhan Qi, Li Zhaohui, Wu Guang\*

State Key Laboratory of Precision Spectroscopy, East China Normal University, Shanghai 200241, China

**Abstract** The single-photon detection technique has unique advantages, such as high sensitivity, low timing jitter, and low power consumption. Thus, its applications in laser ranging and imaging are becoming increasingly widespread. In this paper, we introduce a low-cost high-precision single-photon ranging system, in which a narrow pulse laser generated by the laser diode with a pulse width of 160 ps and a low timing jitter single-photon detector based on a multi-pixel photon counter with a timing jitter of 417 ps are used to reduce the overall timing jitter of the system. The ranging experiment results show that within the 2-meter ranging range, the distance measurement accuracy of the single-photon ranging system could reach 370  $\mu\text{m}$ @RMS. The experimental device adopts a coaxial optical path design, with a simple structure and easy integration, providing a feasible solution for achieving a miniaturized, low-power, high-precision single photon ranging system.

**Key words** laser ranging; single-photon detector; submillimeter; photon counting

## 1 引言

激光因其能量集中、相干性好和方向性好等特点,在测距领域应用广泛<sup>[1-8]</sup>。根据不同的应用需求,激光测距朝着远距离以及高精度两个方向发展。传统的高精度激光测距方法包括三角测距法、干涉法和飞行时间法<sup>[9-15]</sup>。三角测距法根据目标物、激光光源和接收器件之间的几何关系计算距离信息;干涉法则基于迈克尔孙干涉仪的原理,根据干涉条纹的移动计算距离信息;飞行时间法则通过光子的飞行时间测量距离。在不同的激光测距技术之中,基于时间相关单光子计数的飞行时间法测距技术具有高灵敏度、低时间抖动、低

功耗等独特优势,被广泛应用于各个领域<sup>[16-17]</sup>。近年来国内外对单光子测距技术的研究也十分火热:2019年,南京理工大学Ye等<sup>[18]</sup>将回波光信号分离至两个探测器中,基于泊松分布概率重建光信号分布,有效抑制了回波脉冲强度波动引起的随机误差,测距系统精度达到 3.5 mm,但该探测系统需要两个单光子探测器,成本较高;2021年,华东师范大学吴琛怡等<sup>[19]</sup>选用低时间抖动的光源和探测器以及高精度计时器,并引入参考系统,有效提升了系统的测距精度,在 2 m 处系统测距精度可以达到 65  $\mu\text{m}$ @RMS (RMS 是均方根的缩写,该系统用残差值的均方根值表征测距精度),该测距系统精度很高,但其参考系统光路复杂,不利于系统

收稿日期: 2023-03-28; 修回日期: 2023-05-05; 录用日期: 2023-05-08; 网络首发日期: 2023-05-18

基金项目: 国家重点研发计划(2021YFB2801100)、国家自然科学基金(11804099, 62075062, 62175067)、上海市教育发展基金会和上海市教育委员会“晨光计划”(21CGA31)、华东师范大学幸福之花基金(2021ST2110)

通信作者: \*gwu@phy.ecnu.edu.cn

的集成化;同年,中国科学技术大学 Wang 等<sup>[20]</sup>在开发非视域成像系统的同时,实现了 180  $\mu\text{m}$  的深度测量精度,但该系统使用的是时间分辨率为 1.4 ps、暗计数为 5 count/s 的频率上转换单光子探测器,光学系统复杂,难以小型化,实用性较弱;2022 年,加拿大国立科学研究所 Crockett 等<sup>[21]</sup>通过远窄于光子回波峰的门控信号对光子回波反复取样,重构光子回波计数峰,将探测系统抖动压缩到与门控信号相同的数量级,从而数十倍地提高测距精度,但这种方法需要保证入射光极弱,难以实用化。近年来,对于低成本小型化的单光子测距系统的研究也在进行:2020 年,美国弗吉尼亚大学 Park 等<sup>[22]</sup>使用异构集成的氮化镓高电子迁移率晶体管(GaN HEMT)和垂直腔面发射激光器(VCSEL)搭建小型单光子测距系统,整个系统测距精度达到 980  $\mu\text{m}$ @RMS。

本文提出一种低成本的高精度单光子测距系统。该系统能够在探测距离为 2 m 的目标时,实现 370  $\mu\text{m}$ @RMS 的探测精度,未使用插值法处理数据时具有 480  $\mu\text{m}$ @RMS 的探测精度。采用低时间抖动的单光子探测器和小尺寸激光二极管,结构简单,成本相较于前文所述诸工作较低廉。通过窗片反射引入参考光,探测光路简单。整个系统具有精度较高、易于集成、成本低、功耗低等特点,为单光子测距技术的小型化、实用化提供了一种可行的解决方案。

## 2 高精度单光子测距技术

### 2.1 单光子测距实验装置

单光子测距实验装置如图 1 所示,由激光光源、

高精度单光子探测器、基于时间相关单光子计数技术(TCSPC)的高精度计时器以及现场可编程门阵列(FPGA)板卡组成。激光光源选用波长为 850 nm 的 VCSEL,由 FPGA 板卡产生脉冲宽度为 400 ps 的周期性脉冲信号,采用带宽为 10 GHz 的光纤耦合 VCSEL 产生窄脉冲激光信号,脉冲宽度为 160 ps,脉冲重复频率为 9.9 MHz。基于硅光电倍增管(SiPM)研制单光子探测器,探测器的时间抖动为 417 ps。系统采用同轴收发光路设计,激光二极管输出的脉冲光信号经过放置于聚焦透镜之前的光纤准直器转换为空间光,透过窗片之后照射到目标表面,接收透镜收集的目标漫反射的回波光信号直接耦合至单光子探测器的靶面上。为了提高测距系统的抗背景噪声能力,在单光子探测器之前放置线宽为 10 nm 的窄带滤光片,滤除背景光噪声的干扰。在回波信号处理端,利用高精度计时器(PicoQuant, HydraHarp 400)采集回波信号的飞行时间,其中,以 FPGA 板卡产生的激光脉冲同步信号作为时间间隔测量的“开始”信号、单光子探测器的输出信号作为时间间隔测量的“停止”信号,经过多周期的累积计数,得到回波光信号到达时间的统计分布图,从而获得目标的距离信息。为了降低单光子测距系统的整体时间抖动,计时器的时间分辨率设置为 16 ps。为了进一步标定单光子测距系统的测距精度,采用激光干涉仪(SJ6000)测量目标的位移量,激光干涉仪的距离测量分辨率为 1 nm,线性测量精度达到  $0.5 \times 10^{-6}$ 。

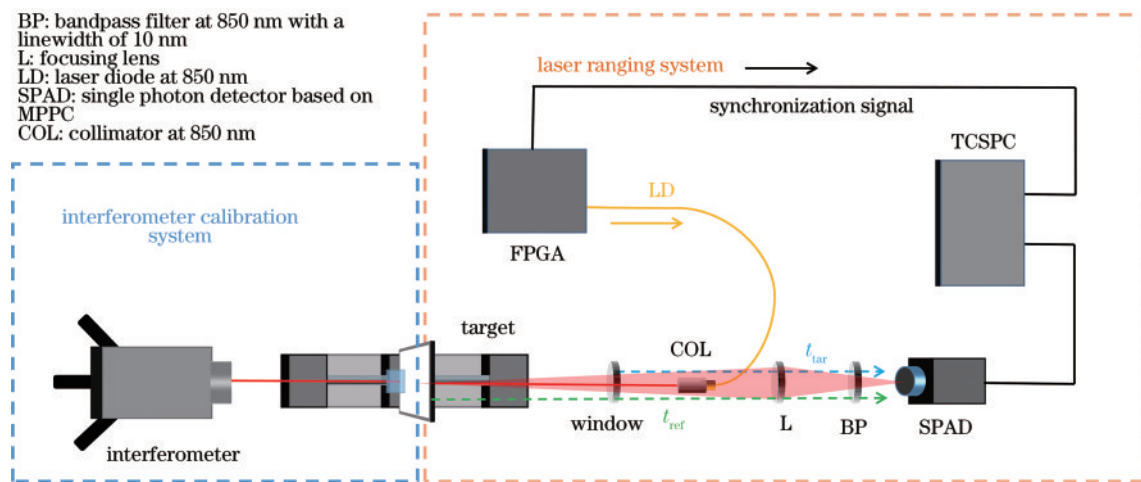


图 1 高精度单光子测距原理图

Fig. 1 Schematic diagram of the high-precision single-photon ranging

### 2.2 低时间抖动光子飞行时间测量

单光子测距系统使用飞行时间法测距。飞行时间法测距的基本原理是出射激光照射到待测目标时,通过接收系统将目标漫反射的回波光信号耦合至探测器靶面,结合时间间隔测量模块得到出射激光脉冲与回

波光信号到达的时间间隔  $t$ ,从而计算出待测目标与系统之间的距离  $D=ct/2$ ,其中,  $c$  为空气中的光速,  $t$  为光子的往返飞行时间。在所提测距系统中,光子的飞行时间包含 3 个部分:  $t=t_{\text{FT}}+t_s+t_D$ ,其中,  $t_{\text{FT}}$  为光子实际飞行时间,  $t_s$  是系统的自身的时间抖动,  $t_D$  是系统的延时

漂移量。因此,如何抑制系统的自身时间抖动  $t_s$  和延时漂移  $t_b$  是提高单光子测距精度的关键。

系统自身时间抖动  $t_s$  由 3 部分构成:

$$t_s = \sqrt{t_{\text{SPAD}}^2 + t_{\text{pulse}}^2 + t_{\text{TCSPC}}^2}, \quad (1)$$

式中:  $t_{\text{SPAD}}$  为单光子探测器时间抖动;  $t_{\text{pulse}}$  为激光脉冲宽度;  $t_{\text{TCSPC}}$  为计时器精度。由式(1)可知,选用低时间抖动单光子探测器、窄脉宽激光光源以及高精度计时器可以有效提高系统测距精度。

所提系统使用北京敏光科技有限公司生产的多模光纤耦合的 850 nm VCSEL 结构激光二极管 LSVLD850-10G, 直接调制速率可以达到 10 Gbit/s, 可以产生窄脉冲激光。设计了窄脉冲驱动电路, 使用 Xilinx 公司生产的 XC7A35T-1CPG236C FPGA 芯片产生重复频率为 9.9 MHz、脉冲宽度为 4 ns 的脉冲信号, 结合后续窄脉冲放大电路, 最终得到脉冲宽度为

400 ps 的驱动信号。为了标定激光二极管出射激光的脉冲宽度, 将激光二极管输出的光信号衰减之后送入 Picoquant 公司生产的 PDM 系列时间抖动为 35 ps 的单光子探测器, 并使用同公司生产的高精度计时器 Hydrharp400 计时, 得到的入射光信号的光子计数分布如图 2(a) 所示, 其中, 横轴为光子到达探测器表面时间, 纵轴为归一化后的光子计数, 最终测得激光二极管输出的光脉冲宽度为 160 ps。另外, 激光二极管输出光功率为 2.157  $\mu\text{W}$ , 光脉冲频率为 9.9 MHz, 则单脉冲激光能量约为 0.22 pJ, 可以满足在 2 m 之内的距离测量要求。激光二极管使用 TO-56 封装, 尺寸很小。而且激光二极管由 FPGA 芯片驱动, 在后续工作中可将 TCSPC 在 FPGA 芯片上实现, 进一步提高系统集成度。相较于传统的使用大尺寸激光器作为光源的单光子测距系统, 所提系统使用激光二极管实现亚毫米距离测量精度, 成本低廉。

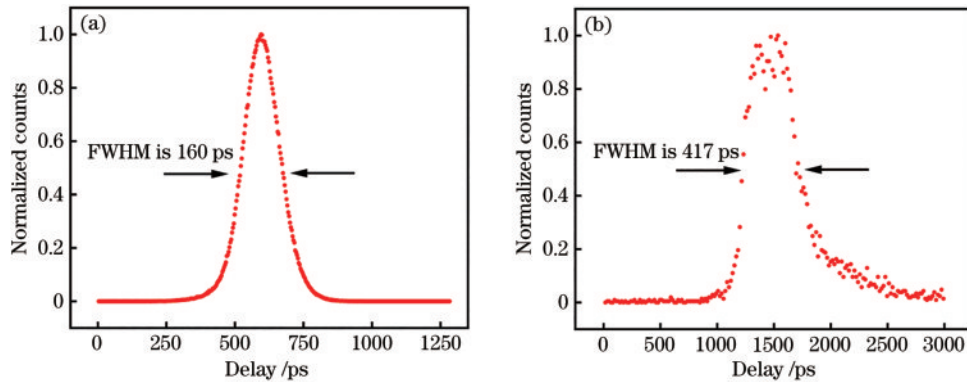


图 2 光源以及探测器时间抖动标定结果。(a)光源标定结果;(b)探测器标定结果

Fig. 2 Calibration results for time jitter of the light source and detector. (a) Calibration results for the light source; (b) calibration results for the detector

所提系统使用自研的单光子探测器, 探测器的时间抖动主要来自两方面: SiPM 固有的时间抖动以及信号读出电路的时间抖动。探测器使用滨松光子公司生产的 S13360-1375PE 型 SiPM, 该型号 SiPM 自身固有的时间抖动较小, 而且适用于  $-20\text{ }^{\circ}\text{C} \sim +60\text{ }^{\circ}\text{C}$  的环境, 可以覆盖绝大多数使用场景; SiPM 的固有时间抖动还受偏置电压以及工作温度的影响, 为了实现理想的时间抖动, 在调试探测器时反复改变 SiPM 的偏置电压, 观察探测器整体的时间抖动变化, 从而寻找到最佳的偏置电压值, 本探测器中 SiPM 偏置电压为 58 V。在电路中引入温度控制电路, 通过内部热敏电阻的温度反馈主动控制制冷片的工作状态, 将 SiPM 的工作温度稳定在  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ , 从而保证探测器时间抖动的稳定。在信号读出电路中, 采用被动抑制技术抑制 SiPM 雪崩, 结合高速比较器 (ADCPM553, TI) 提取 SiPM 输出的模拟信号, 该比较器的上升沿与下降沿很窄, 可以有效降低探测器的时间抖动。为了进一步标定探测器的时间抖动, 使用 PicoQuant 公司生产的 PDL 800-D 激光驱动器驱动皮秒脉冲激光器作为光源, 产生脉冲宽

度为 80 ps 的 709 nm 窄脉冲激光, 用透镜将出射激光耦合至单光子探测器靶面, 并使用高精度计时器 Hydrharp400 记录光子到达时刻, 累计 30 s 后可以得到如图 2(b) 所示的光子计数分布图, 探测器时间抖动参数由半峰全宽 (FWHM) 表示, 可以看出, 探测器时间抖动为 417 ps。另外, 探测器的暗计数为 73000 count/s, 单光子探测器在 850 nm 的探测效率为 5%。

减小计时器的时间分辨率可以提高测距系统的测距精度, 但是在 FPGA 芯片上实现的 TCSPC 技术时间分辨率有限, 所提系统为了模拟使用 FPGA 实现 TCSPC 技术, 将高精度计时器的时间分辨率设置为 16 ps。保持目标物距离不发生改变, 使用上述单光子探测器和窄脉冲激光光源以及高精度计时器进行距离测量, 得到的光子计数分布图即为测距系统的整体时间抖动, 如图 3 所示, 系统总体时间抖动为 480 ps。

系统的延时漂移  $t_b$  主要受到 3 个因素的影响: 1) 回波信号均方根脉宽, 回波信号均方根脉宽的增加会显著增加延时漂移, 系统中, 选用窄脉宽的激光光源, 通过压缩光脉冲宽度降低回波信号的均方根脉宽;

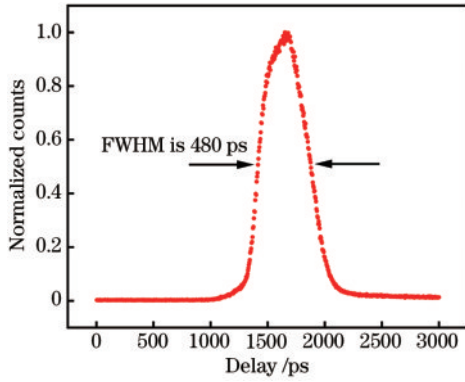


图3 测距系统时间抖动

Fig. 3 Timing jitter of ranging system

2) 回波信号光子数的波动, 当每脉冲回波信号光子数变化时, 会导致系统延时漂移增加, 针对不同的应用场景, 回波光子数的变化较大, 而且这部分误差是不可预估的, 因此在实际应用中, 通过降低出射激光的能量, 使回波信号光子数维持在较低水平, 降低回波信号光子数的波动<sup>[23]</sup>, 所提系统利用回波率来表征回波信号的光子数, 所有数据均在 10% 的回波率情况下测得; 3) 单光子雪崩二极管 (SPAD) 的工作温度, APD 的雪崩电压与其工作温度密切相关, APD 反向偏压固定的情况下, 工作温度的变化会对探测器性能产生较大影响。所提系统使用的探测器件为 SiPM, 由多个工作在盖革模式下的 APD 并联而成, 当 APD 的工作温度变化时, SiPM 的灵敏度、噪声、极间电容等都会随之变化, 从而导致探测器的时间特性发生改变, 增大系统的延时漂移。针对由 APD 工作温度引起的延时漂移, 通常采用补偿技术对温度改变引起的变化进行补偿: 一方面, 用热敏电阻测得 APD 的工作温度并通过半导体制冷片进行温度补偿, 使 APD 工作在一个相对恒定的温度; 另一方面, 可以微调 APD 的反向偏压来进行延时漂移补偿。但是, 由于所提系统要求的探测精度较高, 仅使用传统的补偿方法无法满足高精度探测的需求, 因此, 在回波信号处理中增加了参考信号, 如图 1 所示。将窗片漫反射的回波信号作为参考信号, 在图 1 中用蓝色虚线表示, 由于窗片漫反射的回波光信号和目标漫反射的回波光信号都经由同一探测器和计时器处理, 两路信号的延时漂移走势几乎一致, 通过计算窗片与目标回波信号的两个计数峰之间的时间间隔  $t = t_{\text{tar}} - t_{\text{ref}}$ , 即可得到窗片与目标之间的相对距离, 可以大幅减小系统的延时漂移。

实验中, 为了测量系统的延时漂移, 将目标固定在同一位置多次测量, 平均每分钟测一次, 其测量结果如图 4 所示, 横坐标为测量开始时间, 纵坐标为光子到达探测器靶面时间 (延迟时间), 方块表示目标反射信号, 圆点为参考窗片反射信号, 三角形对应的是目标反射信号与窗片反射信号之间的差值, 为二者之间的相对距离。为了更好地展示回波信号和参考信号的延时漂

移, 对回波信号和参考信号数据进行处理, 分别减去 43400 ps 和 40700 ps, 拉近两个信号之间的距离, 但两个信号各自的变化量不变。图 4 中用虚线标出了每个信号的延时漂移范围, 结果显示, 目标反射信号和参考窗片反射信号的延时漂移分别为 8.13 ps 和 8.14 ps, 而在引入参考窗片之后, 两者之间相对延时漂移变化范围为 2.19 ps, 由此可知, 引入参考窗片可以有效降低系统时间抖动, 提高系统测量精度和稳定性。

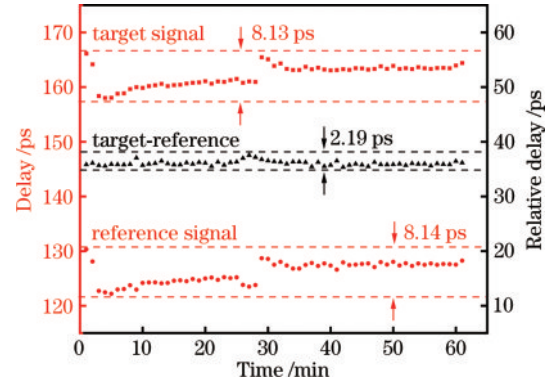


图4 单光子测距延时漂移

Fig. 4 Time delay shift of single-photon ranging system

### 2.3 数据处理

在回波信号处理中, 通过对计时器得到的回波光光子计数峰进行数据处理, 可以获得目标的位置信息。通常, 回波光光子计数峰的处理方法有两种: 峰值法和质心法。其中, 峰值法提取计数峰的峰值对应的时间作为回波光光子到达时间, 这种方法的优点是方便快捷, 但是测量精度受计时器分辨率影响很大, 且浪费了计数峰其他位置包含的信息, 测量精度没有质心法高。所提系统采用质心法, 将计数峰各个位置的计数作为权重进行累加平均, 从而得到目标反射的回波光光子到达时间。计时器采集到的计数峰中的光子到达时间记为  $X = (x_1, x_2, \dots, x_n)$ , 对应的光子计数记为  $Y = (y_1, y_2, \dots, y_n)$ , 其质心位置可用式 (2) 计算:

$$X_{\text{center}} = (x_1, x_2, \dots, x_n) \begin{pmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \vdots \\ y_n \end{pmatrix} \div \sum_{i=1}^n y_i \quad (2)$$

实验中, 通过计算得到的质心位置即为光子的到达时间, 选取回波计数大于峰值二分之一的点作为有效数据点, 进行质心法运算, 窗片和目标反射的回波信号峰均采用质心法计算得到各自的位置信息。在使用质心法之前, 对数据进行插值处理, 图 5 为相邻数据点之间插值个数与测距精度之间的关系, 横坐标表示相邻数据点之间的插值个数, 纵坐标表示系统的测距精度, 用拟合残差的均方根进行衡量。可以看出, 插值处理可以显著提升系统的测距精度, 但当插值数量大于 4 时, 测距精度趋于平稳, 没有明显改善。数据插值影

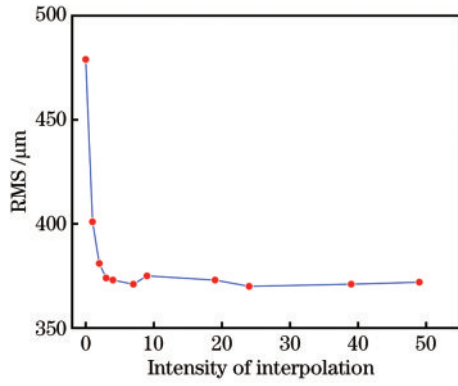


图 5 插值密度与测距精度的关系

Fig. 5 Relationship between interpolation density and ranging accuracy

响测距精度的原因可能是当计时器的分辨率不够时,使用峰值的二分之一作为阈值导致不同数据组之间参与质心法运算的数据个数波动较大,而插值法可以在一定程度上抑制参与质心法运算的数据个数波动。在本文中,相邻数据点之间线性插值个数设置为4,可以在保证测距精度的同时提高计算效率。

### 3 单光子测距实验

为了验证单光子测距系统的距离测量精度,在实验室环境下进行高精度目标位移测量实验。实验中,将目标固定在高精度步进电机 KH-01 上,步进电机单步位移量为  $0.625 \mu\text{m}$ ,满足测距实验要求,为进一步标定系统测距精度,在目标后方安装角反射镜用于干涉仪位移标定。本实验中目标物与步进电机并非一体,目标物使用螺丝固定在步进电机上,在实验过程中认为目标物相对于步进电机无位移,不带来测距误差。在搭建光路时,无法保证出射激光光路与干涉仪光路完全平行,因此实际测量距离和干涉仪标定距离存在固有误差,从而带来测距误差。单光子测距系统从目标正面照射,通过调节步进电机来改变目标的位置,单次步进距离为  $500 \mu\text{m}$ ,共进行 39 次移动,总位移量为  $19.5 \text{ mm}$ ,共计 40 个位置的距离信息,每点测量累积时间为  $15 \text{ s}$ ,干涉仪实际测得位移量为  $19.4944882 \text{ mm}$ 。使用干涉仪标定结果作为横坐标,测距系统测量结果作为纵坐标绘制测量结果示意图,具体如图 6 所示,图中黑色点为实际测量结果,直线是测量结果的线性拟合,表示测距系统测得的目标位移量与目标实际移动距离之间的关系,具体为:  $y=0.914x+0.010 \text{ mm}$ 。测距值与拟合值的差值如图中残差曲线所示,用残差值的均方根值表征测距精度,其计算公式如式(3)所示,其中,  $D(D_1, D_2, \dots, D_{40})$  为对应位置的残差,最终得到的测距精度为  $370 \mu\text{m}@RMS$ 。

$$V_{\text{RMS}} = \sqrt{\frac{D_1^2 + D_2^2 + \dots + D_{40}^2}{40}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{40} D_i^2}{40}} \quad (3)$$

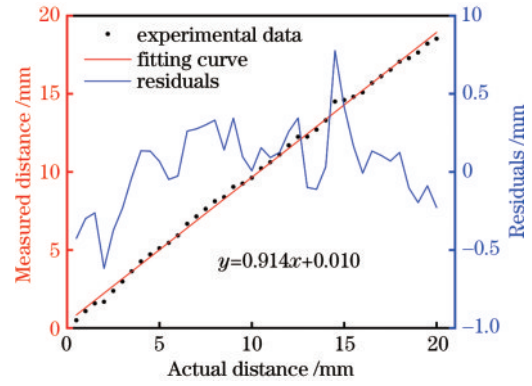


图 6 单光子测距误差分析

Fig. 6 Error analysis of single-photon ranging

## 4 结 论

提出一种高精度单光子测距技术,实现了在  $2 \text{ m}$  距离下  $370 \mu\text{m}@RMS$  的距离测量精度,而且系统结构简单易于集成,很好地兼顾了低成本与高精度的双重要求。通过窄脉冲电路驱动激光二极管产生脉冲宽度为  $160 \text{ ps}$  的窄脉冲激光,使用 SiPM 器件研制时间抖动为  $417 \text{ ps}$  的低抖动单光子探测器,同时引入系统内部反射作为参考信号,有效减小系统的延时漂移。在数据处理方面,通过质心法和线性插值方法提高单光子测距的测距精度,为小型化低功耗高精度单光子测距提供了一种可行的方案。

### 参 考 文 献

- [1] 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): 7800215.
- [2] Xue M Y, Gao C X, Niu L Q, et al. High precision linear frequency modulation ranging system based on semiconductor laser[J]. Modern Physics Letters B, 2018, 32(11): 1850136.
- [3] Liang Y, Huang J H, 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.
- [4] 杨梦雪, 李祝莲, 李语强. 基于贪婪动态融合的卫星激光测距优化算法[J]. 激光与光电子学进展, 2023, 60(7): 0728001.  
Yang M X, Li Z L, Li Y Q. Satellite laser ranging optimization algorithm based on greedy dynamic fusion [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2023, 60(7): 0728001.
- [5] 谭显裕. 激光雷达测距方程研究[J]. 电光与控制, 2001, 8(1): 12-18.  
Tan X Y. Research on ranging equation for laser radar[J]. Electronics Optics & Control, 2001, 8(1): 12-18.
- [6] 万超, 郝浩, 赵清源, 等. 单光子探测在无线光通信收发技术中的应用[J]. 激光与光电子学进展, 2022, 59(5): 0500001.

- Wan C, Hao H, Zhao Q Y, et al. Application of single photon detection in wireless optical communication transceiver technology[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2022, 59(5): 0500001.
- [7] 宋宏, 张云菲, 吴超鹏, 等. 水下相位式激光测距定标方法[J]. *红外与激光工程*, 2019, 48(4): 0406008.  
Song H, Zhang Y F, Wu C P, et al. Calibration method of underwater phase laser ranging[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2019, 48(4): 0406008.
- [8] Massa J S, Wallace A M, Buller G S, et al. Laser depth measurement based on time-correlated single-photon counting[J]. *Optics Letters*, 1997, 22(8): 543-545.
- [9] Palojarvi P, Ruotsalainen T, Kostamovaara J. A 250-MHz BiCMOS receiver channel with leading edge timing discriminator for a pulsed time-of-flight laser rangefinder [J]. *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, 2005, 40(6): 1341-1349.
- [10] 张鹏, 崔建军. 外差干涉仪非线性误差补偿抑制与测量研究进展[J]. *激光与光电子学进展*, 2021, 58(11): 1100003.  
Zhang P, Cui J J. Research progress in nonlinear error compensation suppression and measurement of heterodyne interferometer[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2021, 58(11): 1100003.
- [11] Chen H F, Jiang B, Shi Z Y. Synthetic model of nonlinearity errors in laser heterodyne interferometry[J]. *Applied Optics*, 2018, 57(14): 3890-3901.
- [12] Liu K, Chen F. Laser ranging method and the development of laser[J]. *Science and Technology Information*, 2008, 1(30): 387-388.
- [13] 朱铮涛, 裴炜冬, 李渊, 等. 基于远心镜头的激光三角测距系统研究与实现[J]. *激光与光电子学进展*, 2018, 55(3): 031002.  
Zhu Z T, Pei W D, Li Y, et al. Research and implementation of laser triangulation system based on telecentric lens[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2018, 55(3): 031002.
- [14] 王巍, 王广, 王伊昌, 等. 一种低暗计数率 CMOS 单光子雪崩二极管[J]. *半导体光电*, 2019, 40(2): 166-170.  
Wang W, Wang G, Wang Y C, et al. A CMOS single photon avalanche diode with low dark count rate[J]. *Semiconductor Optoelectronics*, 2019, 40(2): 166-170.
- [15] Pellegrini S, Buller G S, Smith J M, et al. Laser-based distance measurement using picosecond resolution time-correlated single-photon counting[J]. *Measurement Science and Technology*, 2000, 11(6): 712-716.
- [16] 张瀚夫, 刘杰, 安其昌, 等. 基于单光子计数三维成像的目标姿态获取方法[J]. *激光与光电子学进展*, 2023, 60(8): 0811031.  
Zhang H F, Liu J, An Q C, et al. Single-photon counting 3D imaging-based target attitude acquisition[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2023, 60(8): 0811031.
- [17] 汪琳莉, 吴琛怡, 祁慧宇, 等. 多波束单光子雷达的多通道计时测量[J]. *激光与光电子学进展*, 2022, 59(2): 0204001.  
Wang L L, Wu C Y, Qi H Y, et al. Multi-channel timing measurement for multi-beam single-photon radar [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2022, 59(2): 0204001.
- [18] Ye L, Gu G H, He W J, et al. A reconstruction method for restraining range walk error in photon counting Lidar via dual detection[J]. *Journal of Optics*, 2019, 21(4): 045703.
- [19] 吴琛怡, 汪琳莉, 施皓天, 等. 百微米精度的单光子测距[J]. *物理学报*, 2021, 70(17): 174201.  
Wu C Y, Wang L L, Shi H T, et al. Single-photon ranging with hundred-micron accuracy[J]. *Acta Physica Sinica*, 2021, 70(17): 174201.
- [20] Wang B, Zheng M Y, Han J J, et al. Non-line-of-sight imaging with picosecond temporal resolution[J]. *Physical Review Letters*, 2021, 127(5): 053602.
- [21] Crockett B, van Howe J, Montaut N, et al. High-resolution time-correlated single-photon counting using electro-optic sampling[J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2022, 16(10): 2100635.
- [22] Park M, Baek Y, Dinare M, et al. Hetero-integration enables fast switching time-of-flight sensors for light detection and ranging[J]. *Scientific Reports*, 2020, 10: 2764.
- [23] 黄科, 李松, 马跃, 等. 单光子激光测距的漂移误差理论模型及补偿方法[J]. *物理学报*, 2018, 67(6): 064205.  
Huang K, Li S, Ma Y, et al. Theoretical model and correction method of range walk error for single-photon laser ranging[J]. *Acta Physica Sinica*, 2018, 67(6): 064205.