

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2311320

基于时域可区分特征的双飞秒激光 多目标绝对距离测量*

胡新源, 杨凌辉, 宋有建, 杨朔, 韩森森

(天津大学精密仪器与光电子工程学院 天津 300072)

摘要:伴随当前航空、航天、大型科学仪器智能制造场景下多环节、多过程、多装备制造与制造信息不断融合优化,正推动长度测量需求从传统局部、单参数、离线、分时测量快速转变为全局、多目标的在线、实时、同步测量,现有激光测距方法受到原理限制,在精度、实时性与并行能力等方面面临瓶颈。本文提出了一种基于飞行时间法的双飞秒激光多目标绝对距离测量系统,设计特定的光纤分束方案,使飞秒激光光源同时到达多个目标,并构造时域可区分特征匹配多组脉冲,携带距离信息的脉冲经强度互相关模块后进入FPGA数据处理单元,实现多路绝对距离的实时解算,并完成系统的集成化设计。实验表明系统在2 kHz的更新速度下阿伦偏差评定的测量精度优于 10^{-5} m,与干涉仪对比的测距偏差小于4 μ m,在此基础上,搭建平行光路结构实现多自由度的同时测量,测量偏差优于5"。

关键词: 飞秒激光;多目标测量;绝对距离;FPGA;系统集成

中图分类号: TH741 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 460.4030

Dual femtosecond laser multi-target absolute distance measurement based on distinguishable features in temporal domain

Hu Xinyuan, Yang Linghui, Song Youjian, Yang Shuo, Han Senmiao

(College of Precision Instrument and Opto-Electronics Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract: With the continuous fusion and optimization of multi-link, multi-equipment manufacturing process and information in the current intelligent manufacturing scenarios of aviation, aerospace and large scientific instruments, the demand for distance measurement is being promoted from the traditional local, single-parameter, off-line and time-sharing to the global, multi-objective online, real-time and synchronous. The existing laser ranging methods are limited by principle and face bottlenecks in precision, real-time performance and parallel capability. This article develops a dual-femtosecond laser multi-target absolute distance measurement system based on the time-of-flight method. A specific fiber beam splitting scheme is designed to make femtosecond laser pulses reach multiple targets at the same time. Multiple sets of pulses with distinguished feature matching in the temporal domain are constructed. The pulses carrying distance information are transferred into the FPGA data processing unit after the intensity cross-correlation module, and the real-time multiple absolute distances and realizing the integrated design of the whole system are calculated. Finally, the system for verification and the experiment results show that the ranging accuracy of the system is better than 4 μ m and the allen deviation is better than 10^{-5} m at the updating speed of 2 kHz. On this basis, the parallel optical path structure is established to realize the simultaneous measurement of multiple degrees of freedom, and the measurement deviation is better than 5".

Keywords: femtosecond laser; multi-target measurement; absolute distance; field programmable gate array; system integration

0 引言

作为现代几何量测量研究公认的基石和制造质量

检验的最重要依据之一,精密测长方法及仪器一直伴随人类制造理念的更新而不断演化发展,从早期大规模机械化生产中保证互换性的机械长度量仪到数字化制造中与加工机构紧密集成的光栅尺、干涉仪,先进精

密测长技术已经成为高端制造业发展的重要基础和先决条件。另一方面,当前航空、航天、船舶等智能制造场景中多环节、多过程、多装备制造工艺与制造信息不断融合优化,也在不断推动长度测量需求从传统局部、单参数、离线、分时测量快速转变为全局、多目标的在线、实时、同步测量,成为现场进一步准确获取三维空间中位置、姿态、形貌等几何参数的基础支撑技术^[1-4]。如在大型望远镜的制造过程中^[5],通过在天线结构上集成多路绝对测距通道,可监控副镜多维度运动,从而显著缩短设计周期;在粒子加速器设计过程中^[6],应用高精度多路测距系统可以对组件进行定位和监控,实现部件的微米级对准;在工业生产领域,多路测距系统能够实现机床和三坐标测量机的自动校准和高精度的几何监控^[7],实现微米量级偏差补偿。

激光测距能够获得稳定溯源到光波长量级的长度信息,是目前高精度距离测量的主要手段。现有测距方法原理上可分为干涉法和飞行时间法等^[8],均需要依赖对强度、峰值等时域光电传感信号进行分析处理。长期以来,受限于信号质量和处理手段,只能实现点对点的单目标测量。对于实际应用中多路距离同时测量的场景,只能利用多个测距仪实现,测量中需要解决数据同步性差、不同光源之间的溯源基准不一致等一系列问题,且光源成本高,系统复杂鲁棒性差,一般只在计量装置内使用。近年来,基于光频扫描干涉(frequency scanning interferometry, FSI)原理^[9]的多目标绝对长度测量方法及系统得到快速发展,光频扫描以线性调频激光作为测距光源,将目标信号的识别和处理转换到频域进行,通过不同距离目标的频谱特征实现多目标识别解决多目标测量问题。如英国国家物理实验室 Hughes 等^[10]设计的 FSI 绝对测距系统,以及德国 ETALON 公司开发的 Absolute Multiline Technology 系统等已在大型强子对撞机(large hadron collider, LHC)超环面仪器(a toroidal LHC apparatus, ATLAS)变形测量^[11-12]及机床校准领域获得应用。但是 FSI 测距中光频扫描读取精度从根本上决定其测距精度,测距速度受到扫描时间影响,测距时必须通过参考干涉仪、气体吸收腔等外部设备来进行光频非线性校准和光频溯源,系统成本、复杂度仍然较高。

飞秒激光的出现使得长度计量产生了新的飞跃,其时域上表现为宽度在飞秒量级的超短脉冲,在频域上是等间隔、超宽带的谱线,可作为精密光学频率标尺,既能解决传统干涉测量无法获得绝对距离的问题,又显著提升了飞行时间法绝对距离测量的精度和速度,具有现场可溯源的高精度绝对测距能力。随着近年来,基于光纤的飞秒激光器的出现,使得飞秒激光作为光源的测距系统在小型化、集成化潜力上更为突出。基于飞秒激光多

路距离测量也一直是该领域研究热点,自 2000 年日本计量研究所 Minoshima 等^[13]首次提出了利用飞秒激光测距后,国内外学者相继开展了飞秒激光绝对距离的测量技术的研究^[13-22]。2015 年,韩国科学技术研究院 Han 等^[23]以双光梳作为光源,并用平衡互相关法实现了对多个目标绝对距离测量,并实现轴向距离、俯仰和偏摆角度的同时测量;2018 年,天津大学 Liu 等^[24]采用光学衍射元件(diffraction optical element, DOE)分束,实现了飞秒脉冲互相关多路测距;2021 年,清华大学 Zhou 等^[25]提出了一种基于双光梳光谱相位辨析的动态三自由度测量方法,在双光梳绝对测距技术基础上,以特制的光栅角锥作为合作靶镜,1 kHz 测量速度下,实现轴向距离与二维姿态角的同时测量。在实际应用中,基于飞行时间法的飞秒激光绝对距离解算方法具有测量结果更加稳定、测量速度快、易于集成化等特点,可广泛应用于具有大尺寸,高精度距离测量需求的工业现场。但是,飞秒激光信号超短脉冲、超宽带特性决定,在通过单个系统同时测量多个目标距离时,多目标时域信号的特征构造以及实时识别与处理要求已经超过现有基于 PC 架构系统的处理能力,是将单路测距仪器扩展到多路距离同时测量难点。

综上,本文通过构造合理的时域可区分特征,基于脉冲光强差异实现了多测量脉冲的匹配与识别,赋予单设备测量空间多个目标长度的能力,可使一维空间的长度测量拓展到三维空间的多目标长度测量。基于稳定的分束测量方案,通过高性能现场可编程门阵列(field programmable gate array, FPGA)平台及实时寻峰算法实现多路距离的实时解算并完成了系统的集成化设计,最终构建了基于飞行时间法的小型化全集成飞秒激光多目标绝对测距仪。

最后,依托天津大学精密测试技术及仪器国家重点实验室搭建实验系统,结果表明多目标测距系统在 2 kHz 更新速率下得到的每路测距偏差均小于 4 μm ,可实现高精度的多目标绝对距离测量。在此基础上,进一步采用三路平行光实现多自由度并行测量,验证了系统对俯仰角、偏摆角以及绝对距离同时测量的能力。

1 多目标测量原理

基于双飞秒激光的多目标测量系统如图 1 所示,使用自主设计的飞秒激光器,两台激光器均处于自由运转状态,中心波长为 1 564 nm,其中一台重复频率 f_r 的激光器作为信号光源,另一台重复频率 $f_r - \Delta f_r$ 的激光器作为本振光源,信号光源发出的光脉冲序列首先入射至环形器,出射后经 1×3 的光纤分束器分为三路,分束器的输出光纤端面(FC/PC 光纤接头)经过了特殊镀膜处理,保证每一路镀膜的透反比不同,以构造各脉冲的光强可区分特征。

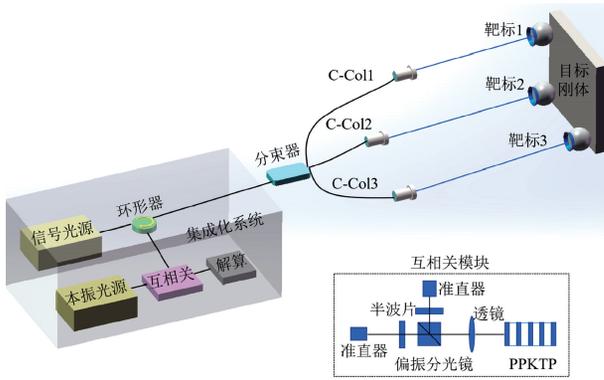


图1 多目标绝对距离测量系统

Fig. 1 Multi-target absolute distance measurement system

镀膜的光纤端面分别连接到准直器 (C-Col) 中,测距时以此端面作为每一路测量基准,其中透射部分通过准直器后出射至自由空间,经过目标靶镜反射后返回准直器,反射部分直接返回准直器,经由共线式迈克尔逊干涉仪结构,使飞秒脉冲序列携带待测目标的飞行时间信息,乘以光速即可获得绝对距离。同时,各参考端面前的光纤长度不同,可以保证每一路参考脉冲在时域上是可区分的^[26-27],结合脉冲的光强差异区分各路的参考脉冲,并匹配其对应的测量脉冲,即可实现多路距离的测量。

强度互相关模块对上述携带距离信息的光脉冲进行异步光学采样^[28],各路的参考脉冲和测量脉冲经过准直器和半波片后,与本振光源产生的光束在偏振分光镜处合束,再经过凸透镜汇聚后入射到周期极化磷酸氧钛钾晶体 (periodically poled KTP, PPKTP) 晶体,产生非线性光和频信号,由于两台激光器频率之间存在 Δf_r 的微小差别,信号脉冲和本振脉冲之间会存在微小的时间延迟,因此,当两束光混合时,每个本振光会和信号光产生交叠,本振光以 Δf_r 为步长不断扫描信号光,在经过 $N = f_r / \Delta f_r$ 个信号光周期后,本振光完成对信号光一个完整周期的采样,因此 Δf_r 在测距系统中代表了测距值的更新速率,在本系统中, $f_r = 51.8 \text{ MHz}$, $\Delta f_r = 2 \text{ kHz}$ 。

经互相关模块后展宽的飞秒脉冲,其形状符合高斯脉冲^[29],如图2所示,图中包含了参考脉冲 Ref1、Ref2、Ref3,目标脉冲 Tar1、Tar2、Tar3 以及下一周期参考脉冲 Ref1'、Ref2'、Ref3'。

为了计算得到绝对距离,只需要知道展宽脉冲的飞行时间 t_{TOF}^* ,信号光源的重复频率 f_r 以及重复频率差 Δf_r 的数值,由于飞秒脉冲的飞行时间 t_{TOF} 与 t_{TOF}^* 之间存在式(1)的对应关系:

$$t_{TOF} = \frac{\Delta f_r}{f_r} t_{TOF}^* \quad (1)$$

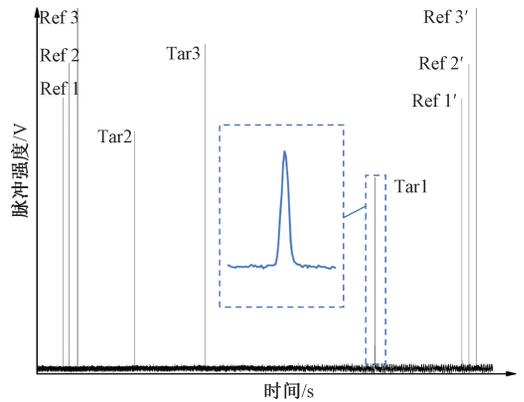


图2 展宽脉冲和 Tar1 局部放大图

Fig. 2 Stretching pulse and Tar1 local amplification

因此,待测绝对距离 d 可以表示为:

$$d = \frac{c}{2n_g} \times \frac{\Delta f_r}{f_r} t_{TOF}^* \quad (2)$$

而 Δf_r 是相邻两个展宽参考脉冲峰值位置时间差的倒数,展宽脉冲的飞行时间是通过计算展宽参考脉冲和展宽目标脉冲之间的时间差得到的,因此距离值可以改写为:

$$d_i = \frac{c}{2n_g} \times \frac{1}{f_r} \times \frac{t_{tari} - t_{refi}}{t'_{refi} - t_{refi}} \quad (3)$$

式中: t_{refi} 为各路参考脉冲对应时刻, t_{tari} 为目标脉冲对应时刻, t'_{refi} 下一周期参考脉冲对应时刻, c 为真空中的光速, n_g 表示空气的折射率, f_r 是信号光源的重复频率。

经互相关模块展宽的脉冲可利用雪崩光电二极管转换成电信号,由低通滤波器去除高频噪声的干扰后进入数据处理单元模块实时解算绝对距离。

2 信号处理与解算

本设计中信号处理与解算单元使用自主设计的 PCB 电路板,以 ZYNQ 系列 FPGA 芯片作为数据处理核心, ZYNQ 是近年来出现的一款全可编程片上系统 (all-programmable SoC),主要由两个部分组成: ARM Cortex-A9 为核心构成的处理系统 (processing system, PS) 和基于 FPGA 的可编程逻辑 (programmable logic, PL) 部分,将 ARM 处理器的软件编程特性与 FPGA 的硬件编程特性结合,可实现软硬件协同设计。

2.1 片上系统框架

片上系统的算法架构如图3所示,PL 部分实时处理 AD9640 芯片 (125 MHz, 14 位) 采集的数据,采用 Verilog 硬件描述语言编写 AD 数据采集和预处理、飞秒激光器重复频率 f_r 计数 IP 核,得到高斯脉冲拟合点和脉冲间距,通过 FIFO 缓存后由 DMA 搬运到 DDR3 中,PS 端读

取 DDR3 中数据解算多路距离;PS 端的串口控制激光器腔内的电动光纤延迟线,在接近死区时,微调激光器的重复频率让参考光和目标光分离;通过以太网实现与上位机通讯显示测量结果。

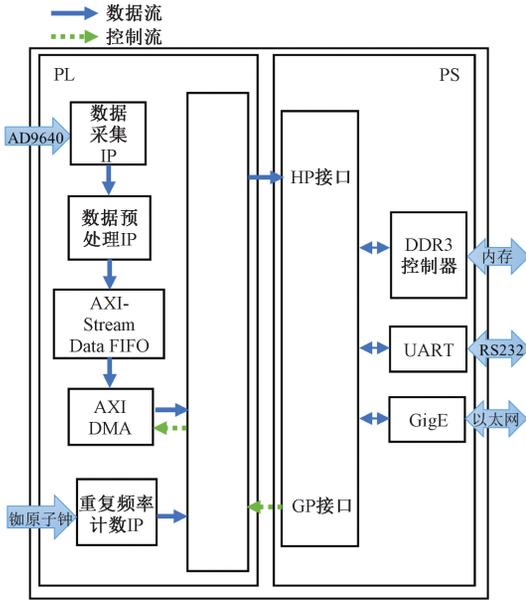


图 3 片上系统架构

Fig. 3 System-on-chip framework

2.2 绝对距离解算实现

数据经预处理模块设置的阈值,保留用于高斯曲线拟合的采样点,将底噪的采样点位置置零,经预处理之后的波形如图 4 所示。

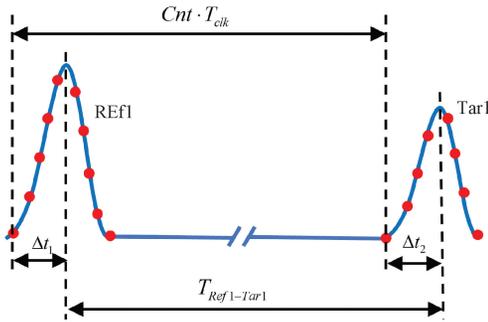


图 4 预处理后波形

Fig. 4 Waveform after pre-preprocessing

为了精确计算得到脉冲之间的时间差,首先在 PL 端记录从一个脉冲起始点到下一个脉冲起始点间采样点个数 Cnt ,并将 Cnt 值以及阈值之上的采样点写入 FIFO 中缓存,通过 DMA 搬运到 DDR3 内存中,CPU 读取内存中的拟合点,采用最小二乘法拟合高斯曲线,和频后脉冲的数学表达式为:

$$Y(t) = A \exp\left[-\frac{(t - \mu)^2}{2\tau^2}\right] + C \quad (4)$$

式中: A 为脉冲振幅, μ 表示峰值时刻, τ 为脉冲强度下降至幅值的 $10^{-0.5}$ 倍时的半宽度, C 表示脉冲的偏置大小。

利用 AD 采集到的信号点并选取合适的初值,就可以计算得到峰值时刻,在拟合过程中,对式(4)两边取对数,令:

$$\begin{cases} y = \ln[(Y - C)/A] \\ a_1 = -1/2\tau^2 \\ a_2 = \mu/\tau^2 \\ a_3 = -\mu^2/2\tau^2 \end{cases} \quad (5)$$

则式(4)可化为:

$$y = a_1 t^2 + a_2 t + a_3 \quad (6)$$

即将高斯拟合转化为二次曲线拟合,此时峰值时刻可以表示为:

$$\mu = -\frac{a_2}{2a_1} \quad (7)$$

若由 AD 获得的采样点集为 $\{(t_i, y_i), i = 1, 2, \dots, N\}$, 式(5)的二次拟合方程组可以表示为:

$$\begin{bmatrix} \sum_{i=1}^N t_i^4 & \sum_{i=1}^N t_i^3 & \sum_{i=1}^N t_i^2 \\ \sum_{i=1}^N t_i^3 & \sum_{i=1}^N t_i^2 & \sum_{i=1}^N t_i \\ \sum_{i=1}^N t_i^2 & \sum_{i=1}^N t_i & N \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \\ a_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^N t_i^2 y_i \\ \sum_{i=1}^N t_i y_i \\ \sum_{i=1}^N y_i \end{bmatrix} \quad (8)$$

通过解算式(8)的矩阵方程,可以计算每个脉冲的峰值位置并得到 $\Delta t_1, \Delta t_2$ 。因此,图 4 中参考脉冲和目标脉冲峰值间的精确时间差 $T_{Ref1-Tar1}$ 为:

$$T_{Ref1-Tar1} = Cnt \times T_{clk} - \Delta t_1 + \Delta t_2 \quad (9)$$

式中: T_{clk} 为 AD 芯片采样周期。

两参考脉冲之间的准确距离由同样的方法计算得到,同时根据式(3),为了计算绝对距离,还需要获得 f_c, n_g, c 三个参数的值:重复频率计数模块将激光器重复频率参考到铷原子钟输出的整形之后的 10 MHz 方波信号,计算飞秒脉冲在参考信号每一个时间窗口内的脉冲数量,计数结果通过 AXI 总线发送到 PS 端,PS 端进行浮点数运算,准确计算重复频率的数值,更新频率为 2 kHz;同时通过 Ciddor 公式修正空气折射率;解算多路距离时根据拟合脉冲峰值大小匹配每一路距离对应的参考脉冲和目标脉冲,分别计算各脉冲峰值之间精确的时间差,最终由式(3)计算多路绝对距离。

3 实验验证与分析

为了验证本系统多路测距性能,依托天津大学精密测试技术及仪器国家重点实验室自主研发的双光梳绝对测距集成系统,搭建了如图 5 所示的空间光路,三路测量

光经镀膜准直器出射,调节3个准直器的姿态使之成为三束平行的测量光入射到目标角锥反射镜(corner cube prisms, CCR),3个角锥固定于金属板上作为目标靶镜,

经过目标靶镜出射后射向平面镜 M1、M2、M3,经反射后原路返回,携带三路距离信息,经解算后同时得到三路绝对距离值。

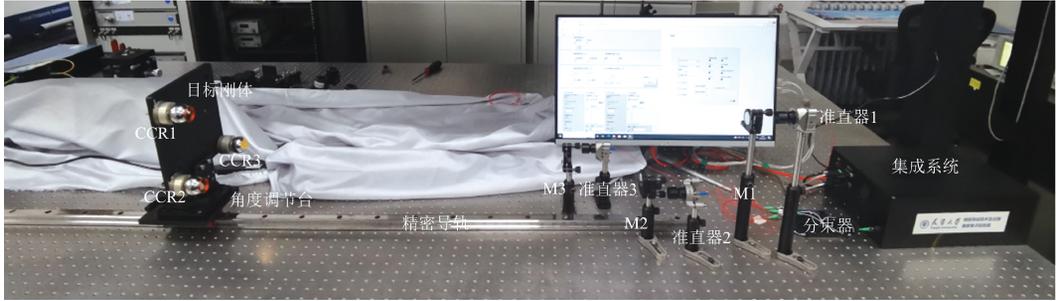


图5 实验装置图

Fig. 5 Diagram of system experiment

图5中定义平行于测量光的方向为Z轴,X轴过角锥2和3所在的方向,Y轴连接角锥1和2。当目标板沿着Z轴进行移动过程中,其位姿的变化,即俯仰角和偏摆角可以分别表示为:

$$\begin{cases} \theta_x = \sin^{-1}\left(\frac{\Delta l_{12}}{4A_1}\right) \\ \theta_y = \sin^{-1}\left(\frac{\Delta l_{23}}{4A_2}\right) \end{cases} \quad (10)$$

式中: A_1 、 A_2 分别为角锥顶点2到角锥顶点1、3的距离,利用 Absolute Multiline Technology 系统对 A_1 、 A_2 的值进行标定; Δl_{12} 、 Δl_{23} 分别表示目标靶镜绕 X 轴、Y 轴两个方向偏转时,角锥顶点1和3相对角锥顶点2沿 Z 轴方向的距离变化量。

3.1 测距重复性分析

对系统测距值的重复性进行分析,在 2 kHz 更新速率下,移动目标刚体分别至位于 0.5 倍无模糊范围内的 386.6 mm 处,以及接近 0.5 倍无模糊范围的 1 367.3 mm 位置处,测量两个位置的绝对距离值,得到阿伦偏差曲线如图6所示,可以看出,两条曲线的下降趋势大致相同,且优于 10^{-5} m,但是在更接近一半无模糊范围的 1 367.3 mm 处,双光梳的时间抖动^[30-31]会带来更大的影响。

3.2 精度比对分析

为了验证系统的测量精度,在 1.5 m 的行程内与商用激光干涉仪进行对比实验,以此评估系统的测距精度。实验过程中,使目标刚体在精密导轨上以 100 mm 为步长移动 10 步,目标靶镜每移动到一个位置时,分别用测距系统和激光干涉仪测量绝对距离,分别精确计算两种方式得到的位移变化量,进行测距精度比对,得到如图7所示的测量结果,测量系统每段位移的测距精度均优于 $4 \mu\text{m}$ 。

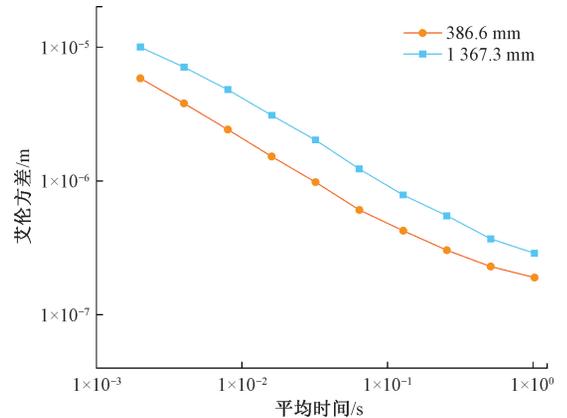


图6 测距系统测量结果与阿伦偏差

Fig. 6 Results and Allan deviation at two distances

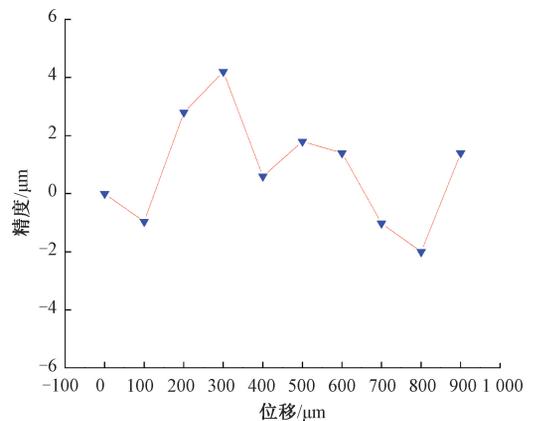


图7 测距系统与干涉仪对比实验结果

Fig. 7 Precision results compared with laser interferometer

接着,控制角度调节台使目标刚体分别绕 X 轴和 Y 轴方向进行角度旋转,在 $1\ 000''$ 角度范围内,以 $100''$ 为步长和自准直仪进行角度比对,实验结果如图8所示,两轴的角度偏差优于 $5''$ 。

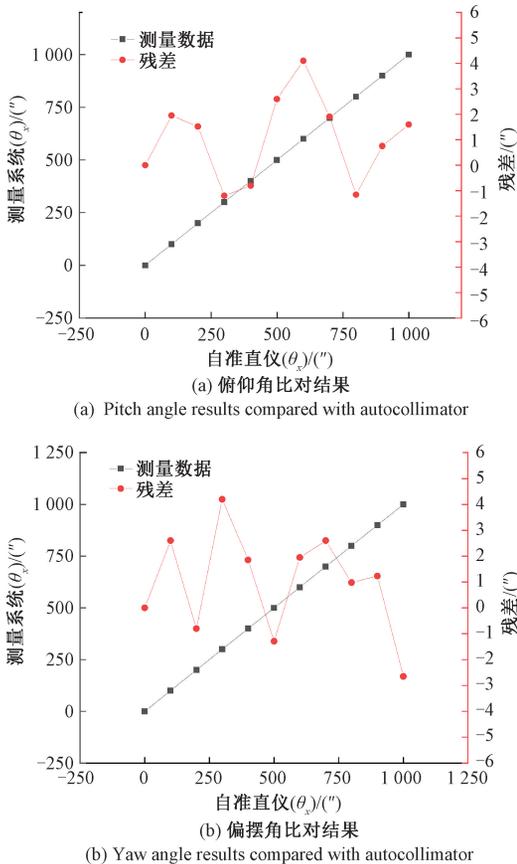


图 8 俯仰角/偏摆角对比实验结果

Fig. 8 Pitch/ yaw angle precision comparison results

3.3 误差分析

目前实验系统中影响测量精度和稳定性的因素主要集中在激光器本身性能和数据采集两方面。其中,双飞秒激光器重复频率稳定性和信号采集解算误差较为显著。如在不锁定激光器腔长的情况下,测量过程中受到环境温度和振动等因素影响,激光器的重复频率会随着测量时间的延长而产生漂移,仪器连续工作 6 h 以上的情况下,激光器重复频率的漂移大约为几十赫兹,由式(3)可知,对测距精度的影响约在 $3 \mu\text{m}$ 以内。信号采集和解算是一个将模拟量数字化并计算的过程,信号采集过程中,采样率、采样位数和采样时钟会影响测距精度。AD 芯片的采样速率越高,每个脉冲获得的采样点数越多,高斯曲线拟合寻峰精度越高,则测距精度越高。本系统目前使用的 AD 芯片为 125 MHz 采样率,14 bit 采样位数,对测距系统带来的误差基本可以忽略,每个脉冲宽度为 50 ns 的峰中可以得到采样点数约为 5~6 个,基本满足寻峰解算要求,如进一步提高采样速率,峰值点精度可进一步提高。

4 结 论

本文研究了基于飞行时间法的双飞秒激光多目标绝对距离测量方法,通过构造合理的时域可区分特征并基于高性能 FPGA 设计实时解算算法,实现了多目标绝对距离的并行测量,并构建集成化测量仪器。测量系统在 2 kHz 的更新速率下,对位于 386.6 mm 和 1367.3 mm 位置处的距离精确测量,实验结果表明系统具有良好的测量重复性,阿伦偏差评定的测量精度优于 10^{-5} m ;并与商用激光干涉仪在 1.5 m 的行程范围内进行对比实验,结果表明系统距离测量偏差小于 $4 \mu\text{m}$;最后验证了该系统具有实现空间多自由度同时测量的能力,测角精度优于 $5''$ 。该系统集成化程度高,可广泛应用于工业和生产现场,在长达几米甚至几十米的测量范围内,测量精度保持在微米量级,具有更新速度快,精度高,量程大,集成便携等优势,在大尺寸长度、角度以及位姿测量中有广阔的应用潜力。后续将继续优化激光器结构,提高激光器长时工作的稳定性;进一步优化信号处理系统的硬件及算法设计,优化系统的内部整体布局,以不断提高测量系统精度和稳定性。

参考文献

- [1] 李广云, 范百兴. 精密工程测量技术及其发展[J]. 测绘学报, 2017, 46(10): 1742-1751.
LI G Y, FAN B X. The development of precise engineering surveying technology[J]. Acta Geodetica et Cartographica Sinica, 2017, 46(10): 1742-1751.
- [2] VIKAS, SAHU R K. A review on application of laser tracker in precision positioning metrology of particle accelerators [J]. Precision Engineering, 2021, 71: 232-249.
- [3] 杨叔子, 丁汉, 李斌. 高端制造装备关键技术的科学问题[J]. 机械制造与自动化, 2011, 40(1): 1-5.
YANG SH Z, DING H, LI B. Scientific problems Originated from key technologies of advanced manufacturing equipments [J]. Machine Building and Automation, 2011, 40(1): 1-5.
- [4] 林嘉睿, 郭烽, 齐峰, 等. 船舶数字化制造的测量技术创新[J]. 中国测试, 2018, 44(12): 1-5, 18.
LIN J R, GUO F, QI F, et al. Innovative measurement technology for digital shipbuilding [J]. China Measurement and Test, 2018, 44(12): 1-5, 18.
- [5] 张景旭. 地基大口径望远镜系统结构技术综述[J]. 中国光学, 2012, 5(4): 327-336.
ZHANG J X. Overview of structure technologies of large

- aperture ground-based telescopes [J]. *Chinese Optics*, 2012, 5(4): 327-336.
- [6] 郭迎钢, 李宗春, 李广云, 等. 粒子加速器工程控制网研究进展与展望[J]. *测绘通报*, 2020(1): 136-141.
GUO Y G, LI Z CH, LI G Y, et al. Progress and prospect of engineering control network for particle accelerator [J]. *Bulletin of Surveying and Mapping*, 2020(1): 136-141.
- [7] 杨婧, 冯其波. 数控机床空间几何误差测量研究进展[J]. *仪器仪表学报*, 2017, 38(8): 1901-1911.
YANG J, FENG Q B. Research progress on volumetric geometric error measurement of numerical control (NC) machine tools [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2017, 38(8): 1901-1911.
- [8] 陈千颂, 杨成伟, 潘志文, 等. 激光飞行时间测距关键技术进展[J]. *激光与红外*, 2002(1): 7-10.
CHEN Q S, YANG CH W, PAN ZH W, et al. A brief introduction on the development of laser time-of-flight distance measurement technology [J]. *Laser and Infrared*, 2002(1): 7-10.
- [9] DENG Z W, LIU Z G, JIA X Y, et al. Dynamic cascade-model-based frequency-scanning interferometry for real-time and rapid absolute optical ranging [J]. *Optics Express*, 2019, 27(15): 21929-21945.
- [10] HUGHES B, CAMPBELL M, LEWIS A, et al. Development of a high-accuracy multi-sensor, multi-target coordinate metrology system using frequency scanning interferometry and multilateration [C]. *Videometrics, Range Imaging and Applications XIV*, 2017: 1033202.
- [11] COE P A, HOWELL D F, NICKERSON R B. Frequency scanning interferometry in ATLAS: Remote, multiple, simultaneous and precise distance measurements in a hostile environment[J]. *Measurement Science and Technology*, 2004, 15(11): 2175-2187.
- [12] DALE J, HUGHES B, LANCASTER A J, et al. Multi-channel absolute distance measurement system with sub ppm-accuracy and 20 m range using frequency scanning interferometry and gas absorption cells [J]. *Optics Express*, 2014, 22(20): 24869-24893.
- [13] MINOSHIMA K, MATSUMOTO H. High-accuracy measurement of 240 m distance in an optical tunnel by use of a compact femtosecond laser [J]. *Application Optics*, 2000, 39(30): 5512-5517.
- [14] 周维虎, 石俊凯, 纪荣祎, 等. 飞秒激光频率梳精密测距技术综述[J]. *仪器仪表学报*, 2017, 38(8): 1859-1868.
- ZHOU W H, SHI J K, JI R Y, et al. High-precision distance measurement using femtosecond laser frequency comb[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2017, 38(8): 1859-1868.
- [15] 李岩. 光频梳在精密测量中的应用[J]. *仪器仪表学报*, 2017, 38(8): 1841-1858.
LI Y. Precision measurement and spectroscopic applications of femtosecond optical frequency combs[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2017, 38(8): 1841-1858.
- [16] CODDINGTON I, SWANN L, NENADOVIC L. Rapid and precise absolute distance measurements at long range[J]. *Nature Photonics*, 2009, 3(6): 351-356.
- [17] ZHOU S Y, XIONG S L, ZHU Z B, et al. Simplified phase-stable dual-comb interferometer for short dynamic range distance measurement[J]. *Optics Express*, 2019, 27(16): 22868-22876.
- [18] 安慰宁, 张福民, 吴翰钟, 等. 一种基于飞秒光频梳频域干涉的绝对测距方法[J]. *仪器仪表学报*, 2014, 35(11): 2458-2465.
AN W N, ZHANG F M, WU H ZH, et al. Absolute distance measurement method based on frequency-domain interference using a femtosecond optical frequency comb[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2014, 35(11): 2458-2465.
- [19] ZHU Z B, XU G Y, NI K, et al. Synthetic-wavelength-based dual-comb interferometry for fast and precise absolute distance measurement [J]. *Optics Express*, 2018, 26(5): 5747-5757.
- [20] 崔鹏飞, 杨凌辉, 林嘉睿, 等. 飞秒光学频率梳在精密绝对测距中的应用[J]. *激光与光电子学进展*, 2018, 55(12): 134-148.
CUI P F, YANG L H, LIN J R, et al. Application of femtosecond optical frequency comb in precision absolute distance measurement [J]. *Laser and Optoelectronics Progress*, 2018, 55(12): 134-148.
- [21] 柏汉泽, 汪幸杰, 彭康狄, 等. 精密光梳测距的发展[J]. *光学与光电技术*, 2022, 20(4): 112-122.
BAI H Z, WANG X J, PENG K D, et al. Development of precision optical comb ranging [J]. *Optics and Optoelectronic Technology*, 2022, 20(4): 112-122.
- [22] 吴冠豪, 周思宇, 杨越棠, 等. 双光梳测距及其应用[J]. *中国激光*, 2021, 48(15): 250-267.

- WU G H, ZHOU S Y, YANG Y T, et al. Dual-comb ranging and its applications [J]. Chinese Journal of Lasers, 2021, 48(15): 250-267.
- [23] HAN S, KIM Y J, KIM S W. Parallel determination of absolute distances to multiple targets by time-of-flight measurement using femtosecond light pulses[J]. Optics Express, 2015, 23(20): 25874-25882.
- [24] LIU Y, LIN J R, YANG L H, et al. Construction of traceable absolute distances network for multilateration with a femtosecond pulse laser [J]. Optics Express, 2018, 26(20): 26618-26632.
- [25] ZHOU S Y, LE V, XIONG S L, et al. Dual-comb spectroscopy resolved three-degree-of-freedom sensing[J]. Photonics Research, 2021, 9(2): 243-251.
- [26] ZHOU S Y, LIN C, YANG Y T, et al. Multi-pulse sampling dual-comb ranging method[J]. Optics Express, 2020, 28(3): 4058.
- [27] JIANG Y, KARP S, JALALI B. Time-stretch LiDAR as a spectrally scanned time-of-flight ranging camera[J]. Nature Photonics, 2020, 14(1): 14-18.
- [28] ZHANG H Y, WEI H Y, WU X J, et al. Absolute distance measurement by dual-comb nonlinear asynchronous optical sampling [J]. Optics Express, 2014, 22(6): 6597-6604.
- [29] JIANG Y, LIU Q, CAO H, et al. Peak detection based on FPGA using quasi-newton optimization method for femtosecond laser ranging[J]. IEEE Access, 2020, 8: 47776-47786.
- [30] SHI H, SONG Y, LIANG F, et al. Effect of timing jitter on time-of-flight distance measurements using dual femtosecond lasers[J]. Optics Express, 2015, 23(11): 14057-14069.
- [31] 梁飞, 宋有建, 师浩森, 等. 双飞秒激光测距系统的测量精度分析[J]. 光电子·激光, 2015, 26(8): 1553-1560.
- LIANG F, SONG Y J, SHI H S, et al. Measurement precision analysis for the rapid ranging systems based on dual femtosecond lasers[J]. Journal of Optoelectronics · Laser, 2015, 26(8): 1553-1560.

作者简介



胡新源, 2021年于天津大学精密仪器与光电子工程学院获得学士学位, 现为天津大学硕士研究生, 主要研究方向为激光及光电测试技术。

E-mail: huxy@tju.edu.cn

Hu Xinyuan received her B.Sc. degree from School of Precision Instrument and Opto-electronics Engineer, Tianjin University in 2021. She is currently a master student at Tianjin University. Her main research interest is laser and photoelectric testing technology.



杨凌辉(通信作者), 2010年于天津大学获得博士学位, 现为天津大学精密仪器与光电子工程学院副教授。主要研究方向为激光与光电测试、大尺寸精密测量技术。

E-mail: icelinker@tju.edu.cn

Yang Linghui (Corresponding author) received his Ph.D. degree from Tianjin University in 2010. He is currently an associate professor at Tianjin University. His main research interests include laser and photoelectric testing technology, and large scale precision measurement.