

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2211619

# 基于 FPGA 的高速动态测量数据采集系统\*

林师远 李文慧 孙双花 叶孝佑  
(中国计量科学研究院 北京 100029)

**摘要:** 针对长距离多轴激光干涉测长同步动态数据采集问题,研制基于 FPGA 的高速动态测量数据采集系统及上位机动态测量软件。采用 FPGA 挂载 DDR3 的硬件系统方案,提出基于边沿检测捕捉外触发同步信号、构造读写 FIFO 结合 MIG IP 核实现读写逻辑的方法设计离线系统,满足降低测量软件的实时性要求。硬件与上位机建立串口通信,实现温度、大气压强、湿度等多参数多路环境传感器的实时采样及激光波长对空气折射率的实时修正。在触发脉冲重复间隔  $T_{PRI} \leq 20 \mu s$  的条件下,与商品干涉仪进行动态测量比对,实现差值小于 8 nm。实验结果表明该系统在 50 kHz 采样率下实现了纳米级高精度测量,且无数据缺失、误码现象,可广泛应用于高速、高精度的动态测量数据采集。

**关键词:** FPGA; 动态测量; 数据采集; 激光干涉测量

**中图分类号:** TB921    **文献标识码:** A    **国家标准学科分类代码:** 510.99

## FPGA-based high-speed data acquisition system for dynamic measurement

Lin Shiyuan Li Wenhui Sun Shuanghua Ye Xiaoyou  
(National Institute of Metrology, Beijing 100029, China)

**Abstract:** Aiming at the problem of synchronous dynamic data acquisition of long-distance multi-axis laser interferometry, a high-speed dynamic measurement data acquisition system based on FPGA and a computer dynamic measurement software are developed. Using the hardware system scheme of DDR3 mounted on FPGA, the offline system is designed based on edge detection and capture of the external trigger signal. Read or write FIFO combined with MIG IP core was constructed to realize FPGA logic, which meets the requirement of reducing the real-time performance of measurement software. The hardware establishes serial communication with the computer to realize real-time sampling of multi-parameter and multi-channel environment sensors such as temperature, atmospheric pressure, and humidity, which achieve real-time correction of air refractive index. The difference is less than 8 nm with pulse repetition interval  $T_{PRI} \leq 20 \mu s$ , while the dynamic measurement is compared with the interferometer product. The result shows that the system can achieve high precision measurement at the nanoscale at the sampling rate of 50 kHz without losing data or error code. The system can be widely used in high-speed and high-precision dynamic measurement data acquisition.

**Keywords:** FPGA; dynamic measurement; data acquisition; laser interferometry

## 0 引言

近年来,数据采集系统被广泛应用于精密测量、工业制造、航空航天等各领域。实际工程应用中,为了满足测量过程中对数据精确性、实时性和同步性的严格要求,数据采集系统应具有高速率、高精度、系统稳定和采集通道多等特点<sup>[1-3]</sup>。目前应用在干涉测量中的主流数据采集方案主要分为软硬件两类,一类是由计算机软件通过指令查询干涉

仪的方式获取测量值。该方法受限于通信协议的传输速率以及程序指令执行的速度,并且外触发信号需要先传输到计算机,再由计算机发出数据锁存的指令,触发时刻与实际采样时刻存在较大延时。另一类则是设计硬件系统。该方案在速度、尺寸以及可靠性方面存在优势<sup>[4-5]</sup>。以单片机或 DSP 作为控制核心的传统硬件方案,本质上还是通过执行指令的方式进行采集,并不能有效解决动态测量中实时性和同步性的问题。而与单片机和 DSP 相比,基于现场可编

收稿日期:2022-10-07

\* 基金项目:国家重点研发计划项目(2017YFF0204803)资助

程逻辑门阵列(field programmable gate array,FPGA)的数据采集系统具有实时性好、编程配置灵活、开发周期短、抗干扰能力强及内部资源丰富等优点,因此被广泛应用于各类数据采集场景<sup>[6-8]</sup>。针对高速数据采集需求,国内外许多企业和研究机构开发了满足各种不同应用场景的数据采集产品,如美国NI公司的622X、665X系列数据采集板卡,Keysight公司的34980A多功能测量单元与北京阿尔泰科技生产的PCI2322板卡等。其中,PCI2322板卡不支持外触发采样功能,NI公司系列采集卡主要面向D/A转换设计,34980A则主要面向特定型号干涉仪设计,两者采样率可达到10MHz,但在某些具体的应用场合存在一定的局限性。

在动态干涉测量中,要求数据采集系统配合高速外触发信号进行干涉仪多轴测量数据的采集,通常由两种方法实现。一种是实时传输的方式,测量数据不经过缓存,计算机通过指令查询或是触发中断的方式获取当前数据。该方法不仅受限于通信接口的传输速率,且数据采集过程中会频繁占用计算机操作系统时间,存在状态竞争,将造成实时数据的丢失。另一种方法是基于离线系统设计,即测量数据经由系统集成的FIFO缓存后再上传到计算机进行后续处理及分析,该方法对于后续软件进行数据处理及运算的实时性要求不高,具体实现更为简单,但不利于数据的实时处理和分析。

针对上述方法存在的不足,本文基于Xilinx FPGA设计了用于激光干涉测量的高速动态测量数据采集系统。设计通过边沿检测捕捉外触发信号,挂载DDR3以满足高速、大容量的数据需求。利用C#.NET编程技术编写动态测量软件,实现温度、大气压强、湿度等多参数多路环境传感器的实时采样,以Edlen公式法进行空气折射率实时修正,保证测量的准确性<sup>[9-10]</sup>。经实验验证,本系统能够实现高速、高精度的动态测量数据采集。

### 1 动态测量系统

该数据采集系统面向基于多轴激光干涉仪的坐标测量机应用,装置的动态测量系统框图如图1所示,可分为光学系统和数据采集系统两部分。光学系统包括激光光源、干涉参考镜、干涉测量镜、干涉信号的接收器以及构成光路的分光镜与转向镜。数据采集系统则包括将测量信号及参考信号转换为表征测量值的数字信号的数据采集卡,采集、处理数字信号的FPGA和上位机,以及用于空气折射率修正的温湿度和气压传感器<sup>[11-13]</sup>。

#### 1.1 光学系统

光学系统原理如图2所示。激光光源采用Keysight 5517D氦氖双频激光,光源内部的氦氖双频激光器发射出正交线性偏振的两束频率相近的可相干光 $f_1$ 和 $f_2$ 。分光镜1分出的一小部分光再经过分光镜2后,一部分通过光电探测器,将 $f_1$ 和 $f_2$ 的幅值差作为电反馈信号提供给激

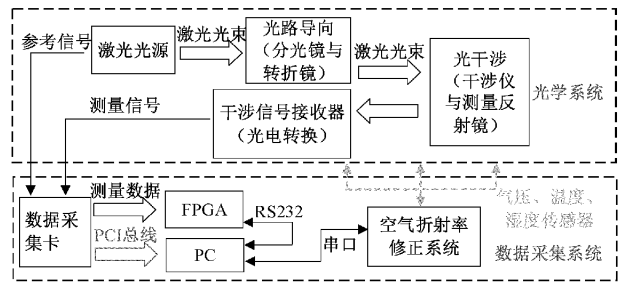


图1 动态测量系统框图

光谐振腔调谐电路。分光镜2分出的另一部分光同样经过光电转换,作为计算多普勒频差 $\Delta f_1$ 的参考频率 $f_1 - f_2$ ,输出至位移采集系统。

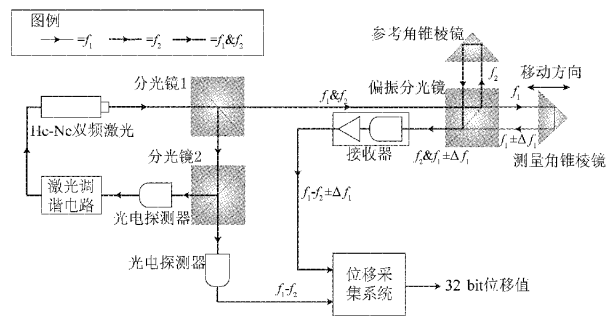


图2 光学系统原理

分光镜1分出的其余大部分光则入射到偏振分光棱镜(PBS)。PBS透射 $f_1$ ,反射 $f_2$ 。 $f_2$ 通过固定不动的角锥棱镜(参考镜)反射后作为参考光, $f_1$ 透过PBS,通过随待测平面移动的角锥棱镜(测量镜)反射后作为测量光与 $f_2$ 发生干涉。如果测量镜与PBS的距离保持不变,则参考光和测量光频差 $f_1 - f_2$ 与参考频率相等。当测量镜位置发生变化时,由于多普勒效应,产生多普勒频移 $\Delta f_1$ ,它包含了测量镜的位移信息。根据运动方向的不同,反射光频率为 $f_1 \pm \Delta f_1$ 。测量光 $f_1 \pm \Delta f_1$ 与参考光 $f_2$ 发生干涉。干涉信号接收器采用Keysight E1708A进行光电转换与信号处理、放大后,输出频率为 $f_1 - f_2 \pm \Delta f_1$ 的差分方波信号<sup>[14-15]</sup>。

设测量角锥棱镜在 $[t_0, t_1]$ 时间内以速度 $v$ 移动了距离 $L$ ,双频激光干涉仪的参考信号和测量信号经过处理输出脉冲,脉冲计数为 $C$ ,则 $C$ 与 $L$ 的关系为:

$$C = \int_{t_0}^{t_1} (f_1 + \Delta f_1 - f_2) dt - \int_{t_0}^{t_1} (f_1 - f_2) dt = \frac{2L}{\lambda_n} = \frac{2nL}{\lambda} \quad (1)$$

式中: $n$ 为空气折射率, $\lambda_n$ 为测量光在折射率为 $n$ 的介质中的波长, $\lambda$ 为测量光真空波长,因此由式(1)可得出被测位移 $L$ 为:

$$L = C \frac{\lambda}{2n} \quad (2)$$

### 1.2 数据采集系统

为了解决系统测量速度慢的问题,本文基于 FPGA 设计了新的数据采集系统,大幅提高了测量速度。

系统原先的动态测量数据采集原理如图 3 所示。由单片机接收并处理干涉仪外触发信号,干涉仪数据处理板卡采用 Keysight N1231A,板卡提供了 PMAC 兼容连接器的 24 bit 数字接口,与单片机引脚相连。当检测到外触发信号高电平,单片机对干涉仪原始数据进行锁存,并将 24 bit 数据通过串口发送至计算机。由于 24 bit 的数据位长仅对应 ±5 mm 测量范围,不能满足长距离动态测量的需求,因此必须利用板卡 PCI 接口读数结合串口读数,通过高位与低位的数据拼接实现长距离测量。通过 PCI 总线可读取全部 32 bit 数据,当外触发信号到来时,首先通过串口通信获取低 24 bit 数据,再由 PCI 总线获取高 8 bit 数据,拼接而成的 32 bit 测量数据对应测量范围可达到 1.3 m。然而低 24 bit 数据和高 8 bit 的数据采样存在延时。为了保证测量值的有效可靠,只能让装置保持较低的运行速度进行测量,在采样的延时里尽量保持高 8 bit 数据不变,在牺牲测量速度的前提下获取测量的准确度。

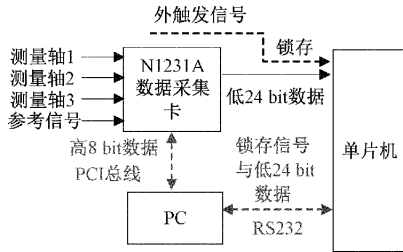


图 3 原数据采集系统原理图

新的数据采集系统使用 Keysight N1231B 干涉仪数据处理板卡,该板卡支持 3 个测量轴的差分方波信号输入,分辨率达到 0.3 nm。由于 N1231A 和 N1231B 均未支持触发缓存功能,若通过 PCI 总线实时获取测量值,计算机需要发送指令读数,整个过程的延时过高,无法实现快速同步测量。N1231B 卡提供了数字接口支持 32 bit 的测量数据输出,不需要进行高低位的数据拼接。

如图 4 所示,设计了基于 FPGA 的高速动态测量数据采集系统获取测量值,实现数据的外触发采集。该系统以 50 MHz 的主频时钟实现外触发脉冲边沿检测采样。同时,FPGA 挂载的 DDR3 SDRAM 为系统提供了大容量和高速的存储资源支撑。DDR3 SDRAM 时钟频率为 312.5 MHz,数据位宽总共 16 bit,采用双沿触发,采样的带宽可达到 10 Gb/s,适用于高速率、大吞吐量的数据采集。整个系统可实现最快 50 ns 的脉冲采样间隔,这受限于 N1231B 卡的最高数据更新频率。在 FPGA 内构建写 FIFO、读 FIFO、MIG IP 核以及串口控制逻辑,实现对 DDR3 SDRAM 的读写。构建 FIFO,实现输入输出不同数据位宽的转换以及跨时钟域的数据传输,通过 Xilinx 公司

提供的 MIG IP 核实现复杂的 DDR 接口逻辑控制,并将 MIG 配置为 AXI4 接口,以更小的面积、更低的功耗实现高带宽、低延迟的数据传输。串口控制逻辑负责与计算机建立通信,同时将测量结果传输给上位机。

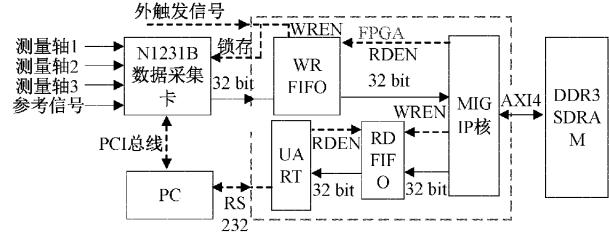


图 4 数据采集系统原理

数据采集系统采样时序图如图 5 所示。N1231B 卡内部时钟频率为 20 MHz,在每个时钟的上升沿检测 Hold 信号的电平状态。当 Hold 为低时,输出 32 bit 数据的更新频率为 20 MHz。当 Hold 为高电平时,输出数据锁存不变,因此外触发信号可直接作为 N1231B 卡的 Hold 锁存信号。设计 FPGA 的边沿检测逻辑,FPGA 的主频 sys\_clk 为 50 MHz,先将外触发信号打一拍生成 reg[0]进行同步,再打一拍生成 reg[1]用于逻辑运算。将 reg[0]与 ~reg[1]进行与运算,生成外触发信号的上升沿检测脉冲作为 WR\_FIF O 的写使能信号 WREN,从而将 32 bit 数据写入 FIFO。

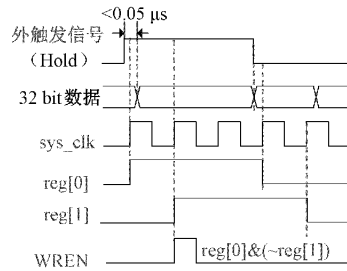


图 5 数据采集系统采样时序图

### 1.3 上位机软件设计与空气折射率修正

N1231B 卡与上位机通过 PCI 总线建立协议通信,并基于 C#.NET 开发了上位机动态测量软件,运行于 Microsoft.NET 开发环境。N1231B 卡提供了动态链接库 (dynamic link library, DLL)。DLL 是一个包含可由多个程序同时使用的代码和数据的动态链接库,一个应用程序内可包含多个 DLL 文件,一个 DLL 文件也可能被几个应用程序所共用,库内包含了应用程序接口函数 (application programming interface, API)。上位机动态测量软件通过.NET 平台支持的 DllImport 类,声明返回变量类型以及调用方法的名称,从而调用不同的 API 函数,该类的主要属性如表 1 所示。

以命令 GetRawPosVelAll 为例,首先需要实现 DLL 的调用,其次再声明方法返回值与传递参数。其中,传递的参数 N1231BHandle 是指向 N1231B 卡的句柄,Position 为

表1 DllImport 类常用属性

名称	说明
CallingConvention	调用约定,决定函数参数传送时入栈和出栈的顺序
CharSet	指示如何向方法封送字符串参数
EntryPoint	指示调用方法的名称
ExactSpelling	指示 EntryPoint 是否必须与入口点的拼写完全匹配

波长差细分计数值, Velocity 为速度值, Valid 为采集有效标志。该部分源代码如下所示,在主程序中调用该函数即可获取 3 个轴 32 bit 的细分计数值。

调用 DLL 的程序代码为:

```
[DllImport (" N1231B. dll ", EntryPoint = "N1231BGetRawPosVelAll", CharSet = CharSet. Ansi, ExactSpelling = false, CallingConvention = CallingConvention. Cdecl)]
```

声明调用方法、返回变量类型的代码为:

```
public static extern N1231B_RETURN N1231BGetRawPosVelAll ( N1231B _ HANDLE N1231BHandle, ref Int64 pPosition1, ref Int32 pVelocity1, ref Int64 pPosition2, ref Int32 pVelocity2, ref Int64 pPosition3, ref Int32 pVelocity3, ref UInt64 pValid);
```

API 函数通过访问寄存器,实现获取当前位移值、清零、预置数、读数等操作。一般情况下,N1231B 卡可供调用的 API 函数如表 2 所示。

表2 N1231B 卡 API 函数

函数名称	说明
N1231BFind	获取已安装的 N1231B 卡信息
N1231BOpen	用于获取句柄
N1231BClearStatusAll	清除所有状态标志位
N1231BPreSetRawAll	清除所有错误标志位并预设到指定位置
N1231BGetRawPosVelAll	获取位移值和速度值
N1231BClose	在关闭程序时必须调用

上位机动态测量软件流程如图 6 所示。计算机首先与 N1231B 卡通过 PCI 总线进行连接,调用 API 函数实现采集卡的初始化、获取位移值、预置数及清零等功能。建立计算机与各传感器的串口通信,通过定时器触发的方式向传感器发送指令,自动获取环境参数。与此同时,软件还负责与 FPGA 进行串口通信,在软件面板上设置串口号与波特率,控制 FPGA 开始或结束测量。开始测量后,FPGA 接收外触发脉冲,测得值暂时缓存于 DDR3 SDRAM 中,并且通过串口告知计算机保存当前环境参数值。测量结束后,

将缓存数据全部发送至计算机。

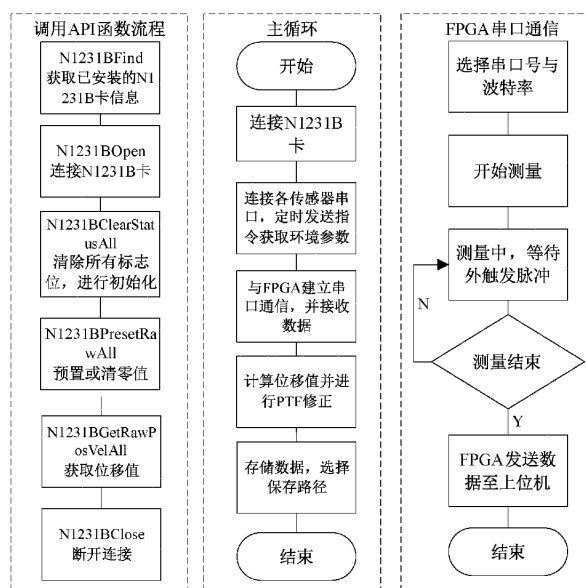


图6 上位机动态测量软件流程

N1231B 卡利用插值算法在式(2)的基础上完成了 1 024 倍细分,通过 32 bit 数字接口或 PCI 接口输出细分后的脉冲计数值  $c$ , 5517D 激光波长  $\lambda = 633 \text{ nm}$ ,  $n$  为当前环境空气的折射率除以真空中空气折射率的比值。最后计算出位移值  $L$  的公式为:

$$L = \frac{c \cdot \lambda}{2 \cdot 048 \cdot n} \tag{3}$$

根据式(3)可以看出,位移值  $L$  的精度主要受 3 个因素的影响。5517D 激光光源的稳频精度可达到  $\pm 0.02 \times 10^{-6}$ , 而计数值  $c$  的误差为计数器的量化误差,大小为亚纳米量级。因此空气折射率的测算直接影响了测量精度。空气折射率与当前环境的温度、湿度、气压和空气成分有关<sup>[16]</sup>。可采用折射率仪直接测量空气折射率,也可利用基于 Edlen 公式的间接测量法<sup>[17]</sup>。Edlen 公式是 1966 年由 Bengt<sup>[18]</sup> 提出的描述压强、温度、湿度及空气成分与空气折射率的函数关系表达式。在测量装置及测量轴周围安装了温湿度和气压传感器,用于监测环境参数,使用 CTR2000 八通道温度传感器实时获取测量环境温度值,采用 Vaisala 温湿压传感器获取气压值与湿度值,传感器与计算机通过串口连接。CTR2000 的响应间隔为 2 s, Vaisala 温湿压传感器的响应间隔为 1 s。计算机获取环境参数后,通过 Edlen 公式计算出当前空气折射率。

## 2 动态测量比对实验

### 2.1 实验方案

使用该干涉仪与另一干涉仪进行比对实验,比对干涉仪在 1 nm 的测量精度下最高可达到 50 kHz 的动态测量速度。比对实验可验证动态测量系统的准确性和实时性。

该系统和比对干涉仪使用同一脉冲进行同步触发。当外触发脉冲变为高电平时, N1231B 卡的输出位置信息保持不变, 此时 FPGA 和比对干涉仪通过检测脉冲边沿变化, 将数据进行锁存。N1231B 卡的触发延时最大为  $0.05 \mu\text{s}$ , 比对干涉仪的触发延时为  $1 \mu\text{s}$ 。比对干涉仪触发脉冲脉宽要求至少为  $1 \mu\text{s}$ , 脉冲间隔至少为  $20 \mu\text{s}$ 。在本次实验中, 采样脉冲由 FPGA 使用计数器产生, 脉冲宽度为  $1 \mu\text{s}$ , 脉冲间隔可调, 每次测量采样 1 000 次。

2.2 实验光路设计及误差分析

在测量机上搭建测量光路, 光路图如图 7 所示, 该光路可实现二维三轴的测量。其中, 一个测量轴测量 X 方向, 两个测量轴测量 Y 方向。

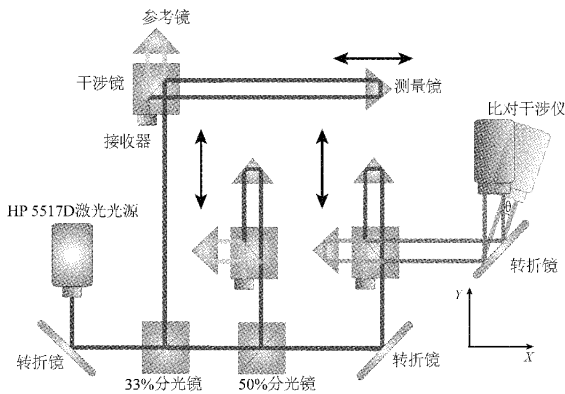


图 7 比对实验光路图

由于比对干涉仪只能实现单轴测量, 搭建光路时, 使两干涉仪共测量光路, 测量其中一个 Y 方向测量轴的位移。在理想状态下, 测量光路与运动平台处于同一轴线, 两干涉仪使用相同脉冲信号同步触发测量, 相同测量点所采样的位移值应相同。然而, 在安装调整激光干涉仪光路时, 激光光源 5517D 和比对干涉仪与位移平台运动的轴线之间都存在倾角, 设倾角角度分别为  $\lambda$  和  $\theta$ , 导轨沿 Y 轴运动的距离为  $L_y$ , 两者测量的距离分别为  $L_d$  和  $L_r$ , 则测得值与导轨实际移动的距离关系分别为  $L_d = L_y / \cos\lambda$  和  $L_r = L_y / \cos\theta$ 。因此, 两干涉仪测量的数据存在以下关系:

$$L_d - L_r = L_y \left( \frac{1}{\cos\lambda} - \frac{1}{\cos\theta} \right) \quad (4)$$

测量过程中, 光路不变, 倾角  $\lambda$  和  $\theta$  为常量。由式(4)可知, 当测量镜沿 Y 方向运动时, 两干涉仪之间的测量值之差呈线性关系。处理数据时, 将该线性误差修正后, 两者的位移差体现为微小的随机误差, 这一随机误差是由环境、光路的扰动以及测量仪器自身所造成的。

2.3 实验结果

设定沿 Y 轴运动的速度分别为 50 和 100 mm/s, 在两个速度下各进行 10 组实验, 每组实验由 FPGA 定时器生成采样脉冲, 用于模拟实际测量中的外触发脉冲。每组测量 1 000 个点, 将两者采集的数据进行分析、比对。起测点设置为同一点, 两者测量值做差, 绘制折线图。导轨运动存

在加速和减速的过程, 截取处于匀速运动过程中的 500 个采样点作差值曲线, 差值曲线如图 8 所示。对 20 组测量数据进行最小二乘拟合得到拟合差值直线, 20 组位移测量值差值的拟合直线如图 9 所示。当光路不变时,  $(1/\cos\lambda - 1/\cos\theta)$  不变, 两干涉仪的差值成线性关系, 且拟合直线的斜率与速度、测量镜位置均无关, 只与倾角  $\lambda$  和  $\theta$  有关。

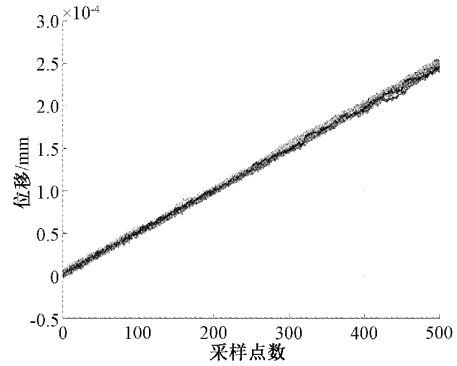


图 8 测量差值曲线

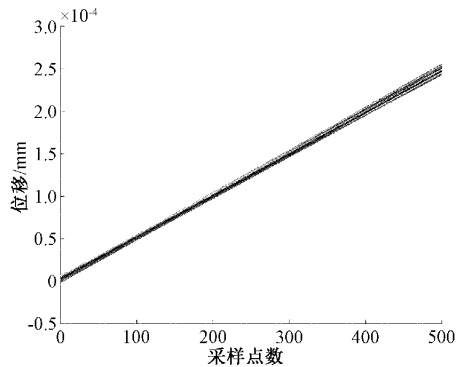


图 9 测量差值拟合直线

20 组测量数据经处理后的曲线图如图 10 所示, 将线性误差修正后两者测量差体现为 nm 级别的随机误差, 误差范围  $\Delta \leq \pm 8 \text{ nm}$ 。实验说明本文设计的数据采集系统可达到 50 kHz 的动态测量速度, 验证了系统的准确性和实时性。

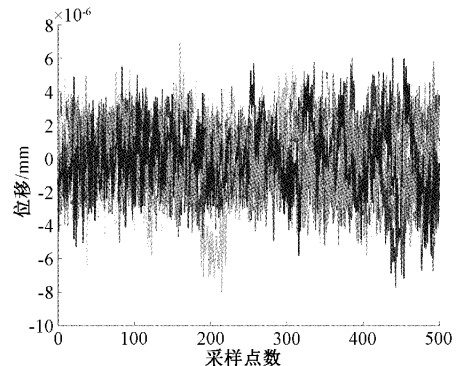


图 10 修正线性误差后的随机误差曲线

### 3 结 论

研究和设计完成的“基于FPGA的高速动态测量数据采集系统”涵盖了面向动态测量的系统硬件、固件和计算机软件,并与商品干涉仪进行对比实验验证,实验结果说明该系统具有较好的实时性和同步性,解决了数据采集系统测量速度慢和非同步的问题,该系统可广泛应用于各类测量中涉及高速数据采集的场景。

#### 参考文献

- [1] 彭宇,姜红兰,杨智明,等.基于DSP和FPGA的通用数字信号处理系统设计[J].国外电子测量技术,2013,32(1):17-21.
- [2] 易志强,韩宾,江虹,等.基于FPGA的多通道同步实时高速数据采集系统设计[J].电子技术应用,2019,45(6):70-74.
- [3] 薛倩,王一虎.基于FPGA的静电层析成像监测系统研究[J].电子测量与仪器学报,2021,35(8):53-61.
- [4] PATEL K, NAGORA U, JOSHI H C, et al. LabVIEW-FPGA-based real-time data acquisition system for ADITYA-U heterodyne interferometry[J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2021, 99:1-7.
- [5] SCHOLZ T, ROSENBERGER M, NOTNI G. Using FPGA Block-RAM for fast white light interferometry[C]. 59th IWK, Ilmenau Scientific Colloquium, 2017, 9: 11-15.
- [6] SHI N, WANG S, XUE G, et al. A real-time processing system for dual-channel six-degree-of-freedom grating ruler based on FPGA [C]. SPIE, 2021, 11895:250-260.
- [7] ZHANG E, CHEN B, ZHENG H, et al. Laser heterodyne interference signal processing method based on phase shift of reference signal[J]. Opt Express, 2018, 26(7):56-68.
- [8] WANG F C, WANG K A, CHEN Y Y, et al. Impacts of sensor layouts on the performance of a long-stroke nano-positioning stage [J]. Advances in Mechanical Engineering, 2016, 8(11):1-16.
- [9] 李萍,李建双,赫明钊,等.基于空气环境参数自动测量系统的全站仪测距精度校准技术[J].计量学报,2019,40(S1):12-16.
- [10] 陈杨,李建双,缪东晶,等.基于传感器阵列的野外基线环境参数自动测量系统研制[J].计量学报,2018,39(4):455-460.
- [11] 叶孝佑,高宏堂,孙双花,等.2 m激光干涉测长基准装置[J].计量学报,2012,33(3):193-197.
- [12] 孙双花,叶孝佑,邹玲丁,等.高等别线纹尺校准装置及校准方法研究[J].计量学报,2017,38(S1):13-17.
- [13] 劳娟娟,曹洁,孙骏柄,等.基于激光干涉比长的大范围线位移动态校准系统研究[J].中国测试,2021,47(S1):12-18.
- [14] 于海娇.双频激光干涉仪的应用研究综述[J].电子测试,2022,36(8):124-126.
- [15] 杨宏兴,付海金,胡鹏程,等.超精密高速激光干涉位移测量技术与仪器[J].激光与光电子学进展,2022,59(9):305-319.
- [16] 闵帅博,严利平,崔建军,等.高精度空气折射率测量系统设计与实现[J].计量学报,2020,41(11):1332-1338.
- [17] JANG Y S, KIM S W. Compensation of the refractive index of air in laser interferometer for distance measurement: A review[J]. International Journal of Precision Engineering and Manufacturing, 2017, 18(12): 1881-1890.
- [18] BENGT E. The refractive index of air[J]. Metrologia, 1966, 2(2): 71.

#### 作者简介

林师远,硕士研究生,主要研究方向为仪器科学与技术。

E-mail:lsyh704@163.com

孙双花(通信作者),博士,研究员,主要研究方向为几何量计量及精密测量技术。

E-mail:sunshh@nim.ac.cn