

基于 ZYNQ 的零差激光干涉仪正交信号处理系统设计

陈玉超¹ 常胜利^{1,2} 李文博² 黄超杰² 鲍桐²

CHEN Yuchao CHANG Shengli LI Wenbo HUANG Chaojie BAO Tong

摘要

零差激光干涉仪在非接触精准测量中具有广泛应用前景,但在实际测量中设备可能会受到干扰导致信号失真,进而产生较大的测量误差。为解决这一问题,研究并设计了一种基于 ZYNQ 芯片的零差激光干涉仪正交信号处理系统,系统具有分布并行结构,使用 ZYNQ 芯片的片上 ARM 进行特征参数的提取运算,同时利用可编程逻辑阵列实现数据的处理,能够实时、准确地对正交信号进行矫正和显示。实验结果表明,所提出的系统能够有效矫正带有偏差的椭圆信号,减少测量误差;此信号处理系统在计算物体运动速度时,误差小于 0.000 1 m/s。因此,该基于 ZYNQ 的零差激光干涉仪正交信号处理系统为非接触精准测量领域带来了新的应用前景。

关键词

ZYNQ 芯片;零差激光干涉仪;误差修正;椭圆拟合

doi: 10.3969/j.issn.1672-9528.2024.01.013

0 引言

零差激光干涉仪是一种以激光波长为基准,进行精密位移测量的仪器,凭借着高精度、非接触、可溯源等许多优点,在运动物体的非接触精准测量中被广泛使用^[1-2]。它是在迈克尔逊干涉仪的基础上改进而来的,相较于普通的迈克尔逊干涉仪、零差激光干涉仪多了一路正交的输出,在理想情况下,其输出两路相位相差 90° 的正弦信号,通过对这两路信号模值的比值进行反正切运算便能换算出正交信号相位,进而求出需要检测的位移。但由于激光器本身存在功率漂移、光学元件不理想、光电接收系统噪声以及容易受环境因素干扰等问题,两路干涉信号会出现零点漂移、幅值不等和相位差不是 90° 的现象^[3]。因此,需要对两路干涉信号进行修正来提升零差激光干涉仪的分辨能力。

零差激光干涉仪输出的干涉信号需经高速 AD 采样后进行实时信号修正处理,修正信号所需要的特征参数提取算法比较复杂、计算量大,不能通过硬件电路实现,需要采用硬件电路和软件处理相结合的方式,满足要求的器件只有专用 DSP/ARM+FPGA 或者 ZYNQ 芯片。另外,对于 DDR 的控制比较繁杂,这会消耗处理器的许多资源,同时高速数据处理往往需要 DSP 或者 ARM 的计算能力,所以对处理器能力要求较高^[4-5]。如果采用 DSP/ARM+FPGA 架构的平台,虽然利用并行处理可大幅度提高数据的采集传输速率,但这些平

台接口单一,不利于标准化,操作不易随时控制,同时多芯片方案本身也会带来系统功耗增加的问题,因此这种方案并不能很好地满足设计需求^[6]。

ZYNQ 是由 Xilinx 公司推出的一款 SoC (system on chip) 芯片,其内部可分为处理逻辑 (processing logic, PL) 与处理系统 (processing system, PS) 两部分,其中 PL 端采用 Xilinx 7 系列的现场可编程阵列,等价于一个片上 FPGA,PS 端则是一块双核 ARM Cortex-A9 处理器^[7],在 ARM 处理器和 FPGA 之间采用 AXI4 通信总线,这样的布局可以在两者之间形成很高的带宽,具有很大的数据吞吐能力。由于采用了 28 nm 的制造工艺,芯片在整体设计方面满足了低功耗的设计需求,与多芯片系统的方案相比,功耗和成本都有很大程度降低。将 ZYNQ 芯片用于零差激光干涉仪的正交信号处理系统,可以满足实际测量中对于实时性和准确性的要求。

1 系统总体架构

总体上,系统由前端 AD 信号采集模块、中端 ZYNQ 信号处理模块和后端上位机信号显示模块三部分组成。

在信号采集模块部分,光干涉信号会首先经过光电探测器,从光信号转化为携带着光信息的周期电流信号;其次将信号送入 I/V 转换器,使电流信号转化为电压信号;再次经过放大器,对电流信号进行放大;然后经过滤波器,滤除干扰噪声,此时得到的就是较为可靠的电压信号^[8];最后经 A/D 转换器,将模拟信号转换为方便处理的数字信号。

在信号处理模块部分,首先需要对带有误差的干涉信

1. 湖南工业大学轨道交通学院 湖南株洲 412007

2. 湖南大学物理与微电子科学学院 湖南长沙 410082

号在信号处理电路中进行修正, 然后使用修正后的两路正交信号解调出相位值。信号修正和相位解调两个步骤需要实时进行, 使用 FPGA 流水线结构来实现^[9]。在对信号进行修正时, 需要对特征参数进行计算, 其计算量庞大且运算复杂, 因此使用 ARM 对采样数据进行周期性提取运算。如图 1 所示。系统总的处理流程为三步。第一步, 使用 AD 模块对经过光干涉信号调制后的模拟信号进行采样, 变换为数字信号后送入下一步进行处理。第二步, 对采样信号分别进行特征参数的提取和实时信号修正, 在 ARM 进行特征参数提取运算时, FPGA 的信号处理同步进行。第三步, 通过修正后的采样信号计算出相位值, 再经角度计数模块得到相位变化的周期数, 结合相位值和周期数便能解算出准确的位移量。

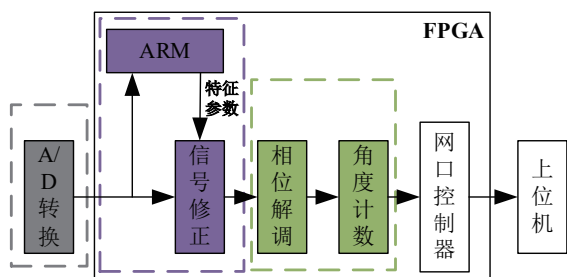


图 1 系统结构图

在上位机信号显示模块部分, 主要是对信号处理模块部分传输过来的数据进行显示。在硬件电路中, 信号的采样与计算是在同一个高速时钟频率下进行的, 会产生较多的数据。为了不影响位移量呈现的准确度与灵敏度, 使用千兆网口与上位机进行通信并进行显示。

2 非线性误差的修正

2.1 修正原理

设 A 为干涉信号的交流幅值, Φ 为待测相位, 两路干涉信号可表示为:

$$\begin{cases} I_x = A \cos \Phi \\ I_y = A \sin \Phi \end{cases} \quad (1)$$

理想条件下, 两路信号构成的李萨如图会呈现为一个圆。但在实际条件下, 由于直流偏移、交流不等幅以及非正交误差等情况的存在, 李萨如图会发生椭圆畸变, 如果将采样信号直接用于位移解算, 则会产生周期性的非线性误差, 严重影响测量精度, 因此需要对这种畸变进行修正。针对这个问题, Heydemann^[10]提出了一种椭圆拟和校准算法用来评估测量数据误差并对其进行非正交误差校准。这个方法已经在各种光学干涉仪的非线性校准中被广泛采用。

在信号修正时, 通过使用基于最小二乘法^[11]的椭圆拟合算法, 拟合出椭圆的各个参数, 再通过这些参数得到其相对

于正圆的畸变值 (特征参数), 就可以对采样信号进行修正。实际测试中, 将带有误差的两路干涉信号表示为:

$$\begin{cases} I_x = p + a \cos \Phi \\ I_y = q + b \sin (\Phi + \alpha) \end{cases} \quad (2)$$

式中: p 、 q 分别为直流偏置误差, a 和 b 为两路信号的幅值, α 为两路信号之间的非正交误差。通过算法提取出特征参数 p 、 q 、 a 、 b 和 α 后, 对采样信号进行修正得到两路正交信号 I'_x 、 I'_y 表示为:

$$\begin{cases} I'_x = I_x - p \\ I'_y = \sec \alpha [(I_x - p) \sin \alpha + \frac{a}{b}(I_y - q)] \end{cases} \quad (3)$$

2.2 硬件设计

非线性误差修正模块的整体工作流程如图 2 所示。两路光干涉信号经过 AD 采样进入到信号处理电路, 在处理电路中, A/D 控制器对光干涉数字信号的处理分两种情形, 一种是直接输出到信号修正模块, 作为信号修正模块的待修正输入信号; 另一种是传输至 DDR3 存储器中, 在 DDR 控制器的控制下, 由 ARM 执行椭圆拟合算法对数据进行处理, 按照修正原理部分所述计算出特征参数, 再将特征参数传入信号修正模块, 由信号修正模块实现误差的修正。

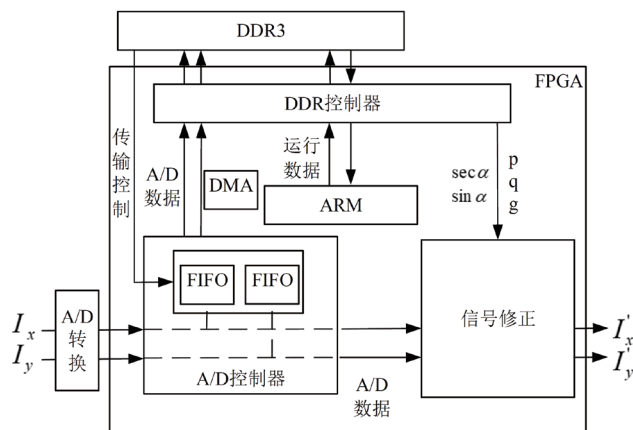


图 2 误差修正过程

在运行时, 系统通过 ARM 对数据传输数量进行配置并控制两路 FIFO 同时开启数据缓存, 实现对两路干涉信号的同步提取。为减少系统资源的损耗, 使用 DMA (直接内存存取) 控制器对光干涉数字信号传入 DDR3 的过程进行管控。数据通过 DMA 控制传入 DDR 的时钟频率与采样频率并不相同, 所以加入先进先出 (FIFO) 寄存器用以实现跨时钟域的数据传输, 解决 AD 控制器与 Ax14 总线时钟频率不一致的问题^[12-13]。当采样数据达到设定值后由 FPGA 配置参数关闭 FIFO 数据缓存。ARM 通过采样数据计算出特征参数后, 再将这些参数传入信号修正模块对干涉信号进行实时修正。这就是特征参数提取的流程, 当数据处

理结束之后开始进行下一次特征参数的提取,实现特征参数的周期性提取。

在参数处理时,为了简便运算,由 ARM 对两路信号进行处理得到幅值之比 a/b ,将此值设定为一个特征参数 g ,并且在得出非正交误差 α 后,由 ARM 计算出 $\sec\alpha$ 和 $\sin\alpha$ 值加上直流偏移 p 、 q 作为新的五个特征参数输出到信号修正模块执行修正操作,修正后得到的两路信号在直流偏置、幅值和相位差等方面近似为标准的正交信号。

3 相位细分计数

修正后,由于两路信号的相位和相对模值大小相互对应,所以可通过 LUT 表对相位进行解调^[14]。这种方法需计算出所有可能的组合,提前将这些组合存储起来,使用时只需要根据输入条件进行对比,查找到符合条件的结果后直接输出。此法的特点是速度快、算法简单、容易实现,但是往往会耗占比较多的资源。为提高资源利用率,先对正交信号进行初步细分,利用正弦信号的符号、余弦信号的符号和正弦信号绝对值与余弦信号绝对值的相对大小这三个值作为判断条件,将一个干涉信号的周期分为 8 个 45° 的区间段,如表 1 所示。然后通过初步细分的相位状态,结合 45° 范围内的查表值,就能解算出整个周期的相位值。

表 1 干涉信号 8 区间表

区间段	I_y 符号	I_x 符号	比较	状态码
1	+	+	$ I_x > I_y $	000
2	+	+	$ I_y \geq I_x $	001
3	+	-	$ I_x > I_y $	010
4	+	-	$ I_y \geq I_x $	011
5	-	-	$ I_x > I_y $	110
6	-	-	$ I_y \geq I_x $	111
7	-	+	$ I_x > I_y $	100
8	-	+	$ I_y \geq I_x $	101

在求解相位时,首先比较正弦信号和余弦信号绝对值的大小,当 I_x 的绝对值大于 I_y 的绝对值时,正切值为正弦值比上余弦值;当 I_y 的绝对值大于或等于 I_x 的绝对值时,正切值为正弦和余弦之差比上正弦和余弦之和,以此来求出正切值。然后,通过正切值查表,结合区间划分状态,第一个区域相位值不变,之后每往前一个区间,相位值为计算值加 45° 。以此得到干涉信号的相位值,达到细分目的。

当相位变化大于一个周期时,整周期计数加一或减一,整周期计数与细分分数通过网口传输至上位机解算位移。

4 实验验证

为验证信号处理系统的可靠性,通过信号发生器产生两路带有误差的正交信号,其非正交误差 α 设定为 20° ,直流漂移误差 p 设为 2、 q 设为 1,交流幅值比 g 设为 1.3。将这两路信号送入处理系统。对修正前后的信号分别采样 300 个点进行显示,如图 3(a)所示,可以看到带有误差信号的李萨如图呈现椭圆形状,如图 3(b)所示,经过修正后信号的李萨如图接近一个正圆,其畸变量相较于修正前大大降低,图形中心基本回到坐标系原点,信号质量得到明显改善。

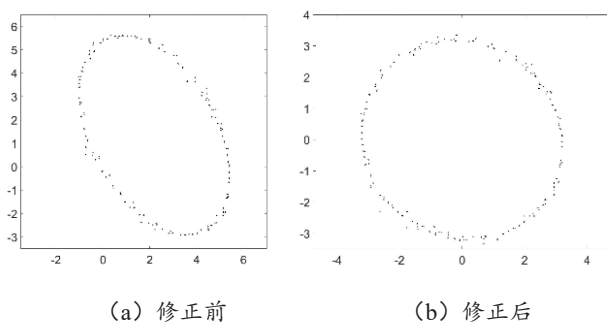


图 3 信号修正前后的散点图对比

对修正前后的信号分别进行拟合,如图 4 所示,修正前后的信号拟合图形区别显著。

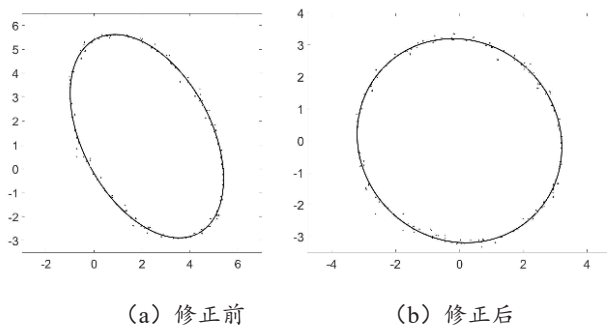


图 4 信号修正前后拟合李萨如图

根据二维空间中点 (x, y) 到原点的欧氏距离计算公式,即公式(4),可得到修正前后拟合椭圆的圆心信息,如表 2 所示。

$$|X| = \sqrt{x^2 + y^2} \quad (4)$$

表 2 修正前后拟合椭圆圆心信息表

	修正前	修正后
椭圆圆心	(2.209 310 0, 1.371 420 0)	(-0.000 054 5, -0.000 215 5)
圆心与原点的欧氏距离	2.600 354 5	0.000 215 5

对比表 2 中数据可知,修正后的圆心偏差为修正前的万

分之一,椭圆经过修正已经非常接近规则圆形,修正成功。

信号的发生频率为 500 kHz,信号处理电路的工作时钟为 50 MHz。对修正后的信号进行相位细分,图 5 为 ILA 抓取的波形数据,图中 pha 信号为系统处理后的相位输出,cos 和 sin 信号为输入的误差正交信号,可见相位波形线性度好,抑制了输入信号的畸变。

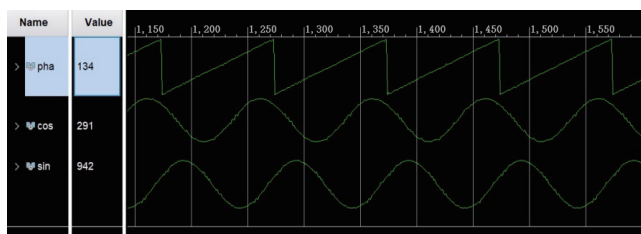


图 5 实验结果波形图

相位数据通过网口传输至上位机,以激光半波长作为单个周期内物体位移距离,可以由采样数据计算出物体的速度。

$$v = \frac{\lambda}{2} \times f \quad (5)$$

以图 6 位移测量曲线为例,因氦氖激光器的典型激光波长为 632.8 nm,500 kHz 的信号发生频率所对应的物体运动速度为 0.158 2 m/s,在系统处理之后,采集 1000 个点计算其速度,计算得出斜率为 3.162 7,采样点之间时间间隔为 20 ns,其速度为 0.158 1 m/s,误差小于 0.000 1 m/s,与理论值相符,测量精度满足实际要求。

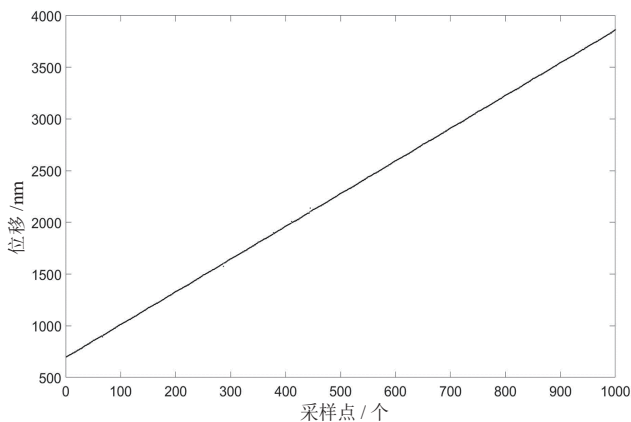


图 6 位移测量曲线

5 总结

针对零差激光干涉仪在测量过程中产生的非线性误差,设计了一套信号处理系统。该系统在基于最小二乘法的椭圆拟合算法的基础上,对特征参数进行周期性提取,通过特征参数对干涉信号进行修正。在用 FPGA 流水线的形式对修正后的两路正交信号进行角度计数并用查表法加速相位解调后,通过网口直接传输相位数据至上位机,减少数据运算的时钟周期,提高了灵敏度。使用 ZYNQ 芯片满足了高精度测量中大量采样数据的传输计算需求,缩短了特征参数提取与

信号修正需要的计算周期。实验结果表明,此信号处理系统在计算物体运动速度时,误差小于 0.000 1 m/s,测量精确度满足实际需求。

参考文献:

- [1] 祝宏彬.激光干涉位移及速度测量中的关键技术研究[D].南京:南京师范大学,2017.
- [2] HAUSOTTE T. Interferometric measuring systems of nanopositioning and nanomeasuring machines[C]//SPIE Photonics Europe Conference. Bellingham:Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers, 2018:801-809.
- [3] 胡红波,于梅.零差激光干涉仪正交相位误差的分析[J].光电工程,2012,39(12):55-62.
- [4] 李正轩,费树岷.基于 Zynq-7000 FPGA 的高速信号采集处理平台[J].单片机与嵌入式系统应用,2016,16(2):44-47.
- [5] 王世臣,张代省,范兴民.基于 Zynq7020 的组合导航处理平台软硬件系统的设计与实现[J].数字通信世界,2020(4):9-10.
- [6] 麦超云,刘子明,黄传好.基于 ZYNQ 的八通道数据采集控制系统设计与实现[J].现代电子技术,2022,45(10):36-39.
- [7] Xilinx 公司.xapp1017-lvds-ddr-deserial[Z].2016.
- [8] 卢鹏,刘殊,刘洋,等.基于 USB 接口的单频激光干涉仪计数卡设计[J].工具技术,2017,51(12):134-136.
- [9] 李冒金.Zynq 的高速声信号采集处理系统设计[J].单片机与嵌入式系统应用,2022,22(1):67-70.
- [10] HEYDEMANN P L M.Determination and correction of quadrature fringe measurement errors in interferometers[J].Applied optics, 1981,20:3382-3384.
- [11] 夏豪杰,胡梦雯,张欣.单频激光干涉仪正交信号的高精度处理[J].光学精密工程,2017,25(9):2309-2316.
- [12] 董晓璇.基于 FPGA 的表面等离子体光刻装备间隙测量系统研究与实现[D].北京:中国科学院大学(中国科学院光电技术研究所),2020.
- [13] 曹尚斌,韩建宁,马瑜涓,等.基于 Zynq 的 16 通道高精度数据采集系统[J].机械与电子,2022,40(7):13-16+21.
- [14] 刘礼刚,曾延安,常大定.基于 FPGA 的反正切函数的优化算法[J].微计算机信息,2007(17):203-204+289.

【作者简介】

陈玉超(1994—),男,河南新乡人,硕士研究生,研究方向:图像处理、软件开发。

常胜利(1969—),男,河南许昌人,教授,博士生导师,研究方向:光谱技术、微纳光子学。

(收稿日期:2023-09-26)