

基于脉冲计数的零相位差跳变补偿外差干涉信号处理方法

张恩政^{1,2} 郝 群¹ 杨 晔² 周砚江²

¹北京理工大学光电学院, 北京 100081

²浙江理工大学纳米测量技术实验室, 浙江 杭州 310018

摘要 在基于脉冲计数的外差干涉信号处理中,提出了一种零相位差跳变补偿的大小数相位结合处理方法,可实现外差干涉信号处理中大小数的准确结合。大数测量采用对两路干涉信号进行脉冲计数同步对减的方法实现,小数测量采用混频降频方法来提高测量分辨率,并采用锁相环对拍频信号跟踪产生用于混频降频的动态基准信号,解决外差信号拍频变化的问题,以提高小数测量分辨率的稳定性。基于信号发生器对实现的外差干涉信号处理方法进行了验证,包括测量精度、大数计数、小数相位测量。构建了双通外差干涉位移测量光路,通过对精密导轨位移的测量来验证大小数结合处理方法的有效性和信号处理方法在外差干涉位移测量应用中的可行性。

关键词 测量; 信号处理; 大小数结合; 脉冲计数; 外差干涉; 分辨率

中图分类号 TH711 文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201535.0512004

Laser Heterodyne Interferometric Signal Processing Method with Compensation at Unstable Zero Phase Difference Based on Pulse Counting

Zhang Enzheng^{1,2} Hao Qun¹ Yang Ye² Zhou Yanjiang²

¹School of Optoelectronics, Beijing Institute of Technology, Beijing, 100081, China

²Laboratory of Nanometer Measurement, Zhejiang Sci-Tech University, Hangzhou, Zhejiang 310018, China

Abstract A zero phase difference jumping compensation processing method for heterodyne interferometric signal processing based on pulse counting is proposed, which can guarantee the correction integration of measured integer and fraction phase. The integer phase measurement is realized by counting pulse numbers of two interference signals and synchronously subtracting. The fraction phase measurement is realized by frequency mixing and frequency reduction to improve the measurement resolution. A dynamic base signal is generated by tracking the reference interference signal with phase-locked loop and the signal is used for frequency mixing to solve the problem of frequency changing of heterodyne interference signals. This method can improve the resolution stability of fraction phase measurement. The verification experiments are done with a function generator, including phase measurement precision, integer counting and fraction phase measurement. A two-pass heterodyne interferometric optical layout is constructed for displacement measurement experiments, the displacements of precision stages are measured to verify the effectiveness of the proposed compensation method for integration of integer and fraction and the feasibility of the implemented signal processing method in actual heterodyne interferometric displacement measurement.

Key words measurement; signal processing; combination of integer and fraction phase; pulse counting;

收稿日期: 2014-11-28; 收到修改稿日期: 2014-12-29

基金项目: 国家自然科学基金(51327005)和教育部创新团队基金(IRT13097)

作者简介: 张恩政(1983—),男,博士研究生,主要从事激光干涉测量方面的研究。E-mail: zhangez@126.com

导师简介: 郝 群(1968—),女,教授,博士生导师,主要从事光电信息技术及精密光学测量等方面的研究。

E-mail: qhao@bit.edu.cn

1 引 言

激光外差干涉测量技术具有长度基准溯源性、响应速度快、测量范围大、信噪比高、能够克服方向模糊且不易受光强变化的影响等优点,被广泛用于几何量的精密测量,精密仪器的检测与校准,精密加工等领域中^[1-7]。在外差干涉测量系统中,干涉信号的信号处理方法与实现是影响测量系统性能和精度的关键,国内外科研人员对激光外差干涉信号处理方法及测量提高等方面也进行了大量的研究工作^[8-16],促进了外差干涉测量技术的发展。这些信号处理方法中多采用反正切相位解包裹的方法实现相位测量,反正切实现相位测量可采用模拟或数字方式来实现。当采用模拟方式实现时,干涉信号的相位差被转换为与信号强度成对应关系的直流量,通过探测信号强度实现相位测量,这种方法的缺点是电路低频误差会影响相位测量的精度。数字式的实现方法采用模数(AD)转换器件将干涉信号转变为数字量,再采用现场可编程门阵列(FPGA)或数字信号处理(DSP)数字芯片实现相位测量,这种方法要求高性能的AD转换芯片,解相实现中涉及复杂的信号滤波算法,并且用相位解包裹算法来实现高精度的相位测量,一般成本较高。另外一种简单实用的相位测量方法是基于时间间隔测量技术实现的方法^[17-24],它通过简单的外部整形电路将正弦干涉信号转换为只有高低电平的矩形波信号,类似数字信号的1和0状态,采用这种矩形波信号不需要AD转换即可实现相位测量。脉冲计数法是时间间隔测量技术中最基本的方法,基于脉冲计数技术可方便地实现大数计数和小数相位测量,对于硬件电路的设计要求低,不需要复杂的相位解包裹算法,易于实现。FPGA可编程逻辑器件的出现为脉冲计数测量技术提供了有力的硬件支持,不同容量大小的计数器可根据需要进行方便地配置,并可实现准确计数。脉冲计数相位测量方法存在的不足是信号的上升沿质量和信号的抖动会引起过零点触发不稳定,这会导致大数跳变和小数零相位跳变时刻不一致,产生大数误差,直接影响到测量结果的准确性。为此,本文提出一种零相位差跳变补偿大小数结合处理方法,用小数相位对大数跳变进行补偿来实现大小数相位的准确结合。

在外差干涉信号处理中,对干涉信号进行降频是提高相位测量分辨率的重要方法,但由于常用的双频激光器输出的拍频信号频率是随时间变化的,波动范围从几十千赫兹到上百千赫兹,采用固定混频基准信号实现混频降频的方法,会导致降频后的信号频率波动范围大,进而导致相位测量分辨率不稳定。Wang等^[22]应用了3个锁相环(PLL)实现小数相位测量解决频差波动的问题,具有有益的参考价值。本文对本课题组先前研究的信号处理方法^[25]进行改进提高,应用了一个锁相环对参考信号进行跟踪产生动态混频基准信号,再将其用于混频降频实现相位测量,这样可减小降频后干涉信号的频率波动,提高测量分辨率,并且可增加对不同输出频差稳定性激光器的兼容性。

2 信号处理方法

基于脉冲计数的零相位差跳变补偿外差干涉信号处理方法,以FPGA为核心实现设计,信号处理方法原理框图如图1所示。由光电探测器探测到的参考和测量干涉信号到达信号处理板,此处参考信号为双频激光器输出的两个频率的拍频信号,测量干涉信号因携带被测量的信息而产生频率(或相位)变化,每一路信号又分为两部分,分别到达大数和小数测量电路。一部分信号经电压比较器转换为方波信号进入FPGA大数测量模块实现大数测量,另一部分到达参考信号动态跟踪混频降频电路实现混频降频,降频后的干涉信号进入FPGA小数测量模块实现小数测量。大小数测量数据经串行传输传至上位机,通过对大小数相位数据的分析处理实现大小数结合,并将最终相位(或位移)测量结果予以显示。为了实现大数和小数相位的准确测量并保证大小数的准确结合,本文采用零相位差跳变补偿方法实现大小数相位的结合。

2.1 大数测量

大数测量采用直接对参考和测量脉冲干涉信号进行计数并对减的方法实现测量。外差干涉信号处理中,大数计数即对干涉信号周期脉冲变化量的计数,决定了相位测量的大范围。在外差干涉测量系统中,探测到的干涉信号为交流量,即使被测对象处于静止状态,干涉信号也一直存在,是一个稳定的周期信号。实

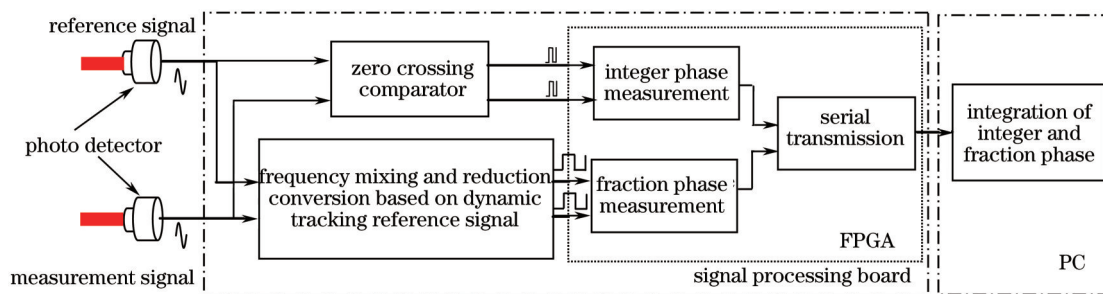


图1 信号处理方法原理框图

Fig.1 Schematic diagram of signal processing method

现大数的测量就要分别对参考信号和测量信号脉冲进行计数,采用大容量计数器和多级计数器级联的方案,可使计数器在长时间内不会溢出,从而可保证大数测量的有效进行,其原理如图2所示。

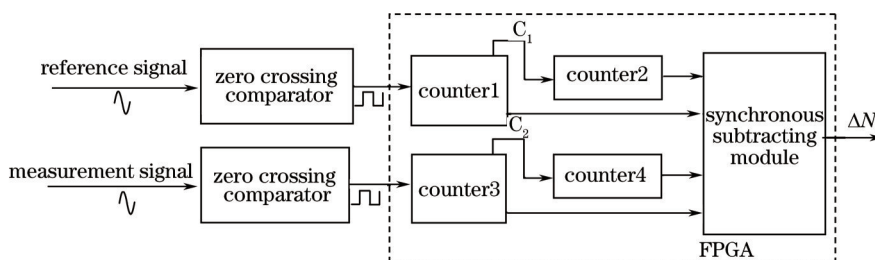


图2 大数测量原理图

Fig.2 Schematic of integer measurement

从图2中可以看出,大数测量是基于FPGA实现测量的。光电探测器探测到的参考和测量正弦干涉信号经外部整形电路转换为矩形波脉冲信号,进入FPGA,FPGA内部的计数器分别对两路矩形脉冲进行计数,每一路计数采用了两级级联的方式实现更大容量的计数,计数结果经对减模块对减得到两路计数差值,即为被测大数值 ΔN , C_1 和 C_2 为前级溢出脉冲。高性能FPGA芯片的出现不但可实现对脉冲信号的准确计数,而且可方便地改变计数器的容量从而满足不同测量范围的需求。

2.2 小数测量

为了提高小数相位测量的分辨率,采用对干涉信号进行混频降频的方法实现小数相位测量。不同于先前采用固定频率的混频基准信号进行混频降频方案^[25],这里采用锁相环对参考信号进行跟踪产生动态混频基准信号用于实现混频降频,小数相位测量原理如图3所示。

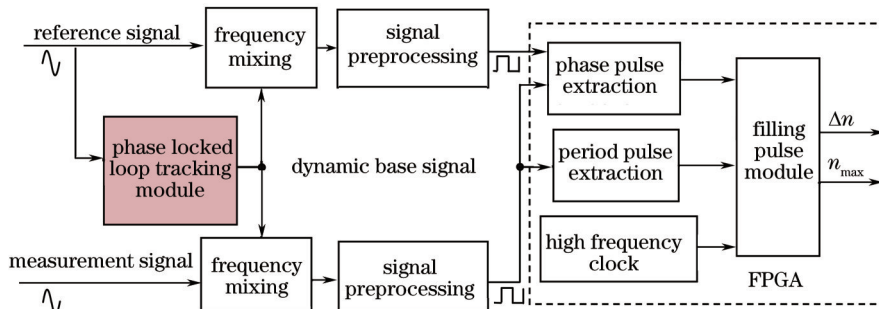


图3 小数测量原理图

Fig.3 Schematic of fraction measurement

图3中,锁相环动态跟踪模块对到达信号处理板的参考信号进行跟踪产生动态的混频基准信号,该基准信号分别与测量信号和参考信号进行混频,混频后的信号经信号预处理电路包括信号的滤波、放大和整形处理后,高频干涉信号被降频为低频矩形波干涉信号,两低频干涉信号进入FPGA进行小数相位测量。在FPGA内部,相位脉冲提取模块实现对相邻参考信号到测量信号上升沿间相位脉冲的提取,周期脉冲提取模块实现对测量信号单个周期脉冲信号的提取。两脉冲信号经相位填脉冲模块分别在脉冲区间内填入高频

时钟脉冲,相位填脉冲量计数值和周期填脉冲量计数值分别为 Δn 和 n_{\max} ,则相位测量公式可表示为

$$\phi = \frac{\Delta n}{n_{\max}} \times 360. \quad (1)$$

在 FPGA 内部通过改变高频填脉冲时钟的频率可方便地调整相位细分的大小,即可改变相位测量的分辨率。图 3 中采用锁相环动态跟踪模块对参考信号进行跟踪产生动态混频基准信号再进行混频降频的方法可有效地提高测量的分辨率和分辨率的稳定性。通常,在干涉测量中应用的双频激光器输出的差频频率是随着时间变化的,其频率的变化范围从几十千赫兹到上百千赫兹,当采用固定频率的混频基准信号时,经混频降频后的干涉信号也会有相同的频率波动范围。采用脉冲计数法实现相位测量时,干涉信号一个周期内填入高频时钟脉冲数的最大值决定了最大测量分辨率。所以当降频后的干涉信号的频率波动范围大时,干涉信号周期填脉冲值也会有很大变化,这会导致测量分辨率和分辨率的稳定性降低。另外,降频后频率的大范围波动,会使得降频后有效干涉信号频率带宽超过预处理电路的低通滤波器的截止频率,故会对混频降频后有效干涉信号的准确提取产生影响。而当采用锁相环对参考信号进行跟踪产生动态混频基准信号的方法来进行混频降频可极大地减小混频降频后干涉信号频率波动范围,可从上百千赫兹的变化减小到几千赫兹的变化。锁相环跟踪模块参数设置如图 4 所示。

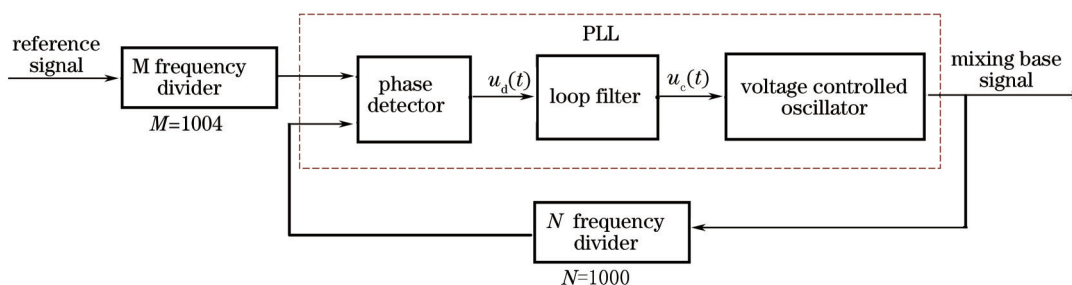


图 4 锁相环跟踪模块

Fig.4 Phase locked loop tracking module

本文采用到的 Agilent 5517B 系激光器的总的频差范围在 1.9~2.4 MHz 之间,即频率变化为 500 kHz,当采用固定混频基准信号进行混频时,降频后的信号频率波动范围也为 500 kHz。当采用锁相环对参考信号进行跟踪产生混频基准信号时,参考信号经锁相环跟踪后产生的混频基准信号频率为 1.9/1.004~2.4/1.004,不同频率的信号经锁相跟踪混频降频后的信号频率如表 1 所示。

表 1 动态跟踪混频降频频率变化

Table 1 Frequency change after dynamic tracking frequency mixing and reduction conversion

干涉信号频率 /MHz	1.9	2.0	2.1	2.2	2.3	2.4
混频降频后频率 /kHz	7.57	7.96	8.36	8.76	9.16	9.562

由表 1 可见,混频降频后的低频干涉信号的频率为 7.57~9.562 kHz,此时降频后的信号频率变化范围仅为 1.992 kHz。可见采用锁相环对参考信号进行动态跟踪产生混频基准信号进行混频降频的方法,极大地减小了混频降频后干涉信号的频率波动范围,从而可提高相位测量分辨率及稳定性。

2.3 零相位差跳变补偿大小数结合

大数测量和小数测量分别决定了相位测量的范围和测量的分辨率,实现大数和小数相位测量结果的准确结合才可保证大范围高分辨率的相位测量。基于脉冲计数的相位测量方法,信号的上升沿的陡度是影响测量精度的关键。这种影响对大数测量而言直接决定了大数计数的准确度。大数测量值的跳变主要发生在两路信号相位差为 0° 左右的时候,此时干涉信号的上升沿噪声或被测对象的抖动等因素都会引起大数测量值的不稳定跳变。对于小数的影响是被测相位在 0° 或 360° 左右跳变。如果大数和小数的不稳定跳变不一致,即朝着不同的相位变化方向跳变,大小数相位直接相加进行的大小数结合则会导致大数误差。为此,本文提出采用零相位差跳变补偿的方法实现大小数结合来解决零相位差处大小数跳变难以有效结合的问题,在干涉测量中,当测量镜运动时,测量信号相对于参考信号会朝着固定方向运动,当测量镜运动方向改

变时,信号的相对运动方向也会相应改变,大小数结合原理图如图5所示。

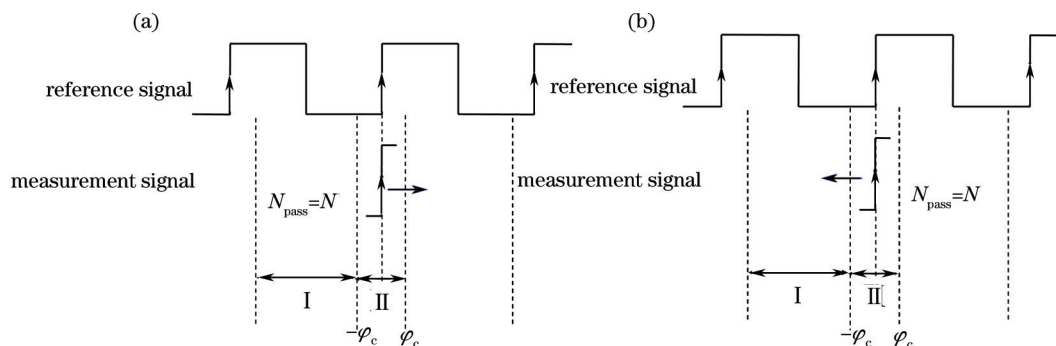


图5 零相位差跳变补偿大小数结合原理图。(a) 正向; (b) 反向

Fig.5 Principle diagram of integration of integer and fraction based on zero phase difference jump compensation.

(a) Forward direction; (b) backward direction

零相位差跳变补偿方法是用测得的小数相位来对大数实现补偿,具体是将相位测量的整个区间分为稳定区间I和不稳定区间II,不稳定区间为 0° 相位差处 $\pm\varphi_c$ 的相位区间。在稳定区间I中大数值是稳定不变的,而在区间II中大数值是不稳定跳变的,为了实现对大数的准确测量,在I稳定区间预存大数测量值为 $N_{\text{pass}} = N$,在不稳定区间II通过测得的小数相位值和预存的大数值来判定有效的大数值。图5(a)为当测量信号相对于参考信号正向运动时采用零相位差跳变补偿实现大小数结合的原理示意图,通过实测的小数相位测量值所在区间来判定大数值并实现大小数结合,大小数结合相位 φ 测量公式可表示为

$$\varphi = \begin{cases} N \times 360 + \varphi_m, & \varphi_c < \varphi_m < 360 - \varphi_c \\ N_{\text{pass}} \times 360 + \varphi_m, & 360 - \varphi_c < \varphi_m < 360 \\ (N_{\text{pass}} + 1) \times 360 + \varphi_m, & 0 < \varphi_m < \varphi_c \end{cases}, \quad (3)$$

式中 N 为实测大数值, φ_c 为不稳定区间端点的小数相位值, φ_m 为小数相位测量值。

当测量信号相对于参考信号反向运动时其原理图如图5(b)所示,对应的相位测量公式为

$$\varphi = \begin{cases} N \times 360 + \varphi_m, & \varphi_c - \varphi_m < 360 - \varphi_c \\ N_{\text{pass}} \times 360 + \varphi_m, & 0 < \varphi_m < \varphi_c \\ (N_{\text{pass}} - 1) \times 360 + \varphi_m, & 360 - \varphi_c < \varphi_m < 360 \end{cases}. \quad (4)$$

对于方向的判别,当大数值相同时,可以通过小数相位值来判断,即在大数稳定区间连续测量两次小数相位值,通过相位差值的正负判断测量的运动方向。当大数值不同时,通过判别连续两次测量的大数差值的正负来判别测量方向。

3 验证实验

为了验证基于脉冲计数的零相位差跳变补偿外差干涉信号处理方法相位测量的可行性,基于Altera公司可编程逻辑器件EP2C20Q240C8芯片为核心研制了外差干涉信号采集处理板,并采用双通道任意函数信号发生器(AFG3120, Tektronix, USA)进行了对信号相位差测量的验证实验,信号发生器输出正弦波的分辨率为 0.01° ,输出方波的分辨率为 0.1° 。实验方案是信号发生器输出两路正弦波,频率为2.26 MHz,模拟实际Agilent 5517B激光器实现的干涉测量系统中的干涉信号,FPGA信号采集板对两路信号的相位差进行测量。具体实验包括相位测量精度实验、大数计数和小数相位测量实验。

3.1 相位测量精度实验

填脉冲计数相位测量法理论上可实现很高的相位测量分辨率,而在实际应用中,信号采集板的相位测量精度不仅取决于干涉信号的周期填脉冲数,还会受到信号处理电路性能及实验环境等因素的影响。该部分实验包括直接的和间接的相位测量精度实验。直接的相位测量精度实验具体是信号发生器输出两路频率为9 kHz的矩形波信号模拟混频降频后的干涉信号,并将信号直接引入到FPGA的输入输出(IO)引脚,FPGA内部小数相位测量模块实现对相位的测量,并将相位测量结果经串行通信传输至上位机。直接定

相位差测量实验结果如图 6(a)所示。间接的相位测量精度实验具体是信号发生器输出两路 2.26 MHz 的正弦信号,经信号传输和信号预处理电路后到达 FPGA 进行相位测量,其中信号经过了对参考信号动态跟踪实现的锁相混频降频、信号预处理等电路。间接定点相位差测量实验结果如图 6(b)所示。

填脉冲计数小数相位测量在 FPGA 内部实现,采用的高频填脉冲时钟为 400 MHz 时,2.26 MHz 信号经混频降频后信号频率为 9 kHz,故相位测量分辨率理论上可达 0.008° 。由图 6 所示实验结果显示,定点直接相位差测量的最大波动范围为 0.024° ,比理论的测量分辨率低,这是由于在填脉冲计数相位测量中,信号的上升沿的陡度不高和信号不稳定性导致周期填脉冲值和相位填脉冲值的变化,导致精度的下降。间接相位差测量的相位差波动范围达到了 0.156° ,相位测量精度进一步降低,除了填脉冲信号上升沿的原因,更多的是受到了硬件传输和处理电路的影响。对应于传统双通干涉仪光路,相位测量分辨率可达到 0.073° ,位移分辨率优于 0.2 nm。在实际相位测量中,采用多次测量,脉冲计数差值滤波和求平均的方法可用来提高相位测量的精度。

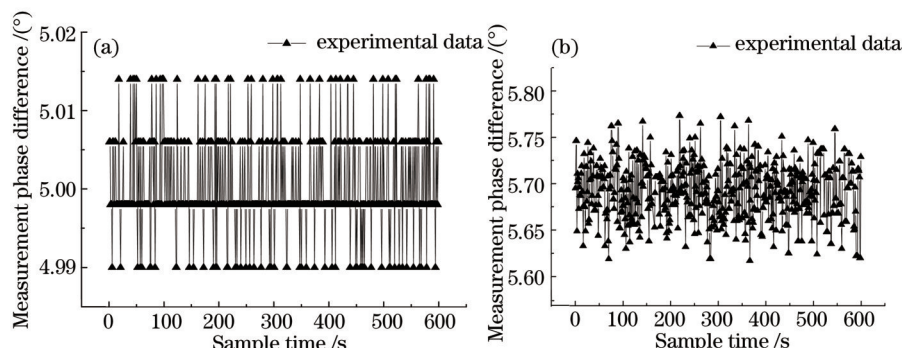


图 6 相位测量精度实验结果。(a)直接测量;(b)间接测量

Fig.6 Results of phase measurement resolution experiments. (a) Direct measurement; (b) indirect measurement

3.2 大小数测量实验

本实验通过对信号发生器输出的两路信号相位差的测量,进行大数计数和小数相位测量的验证实验。让信号发生器输出两路频率为 2.26 MHz 的正弦信号,一路为参考信号,一路为测量信号,然后调节测量信号的频率与参考信号存在一个频差,模拟干涉光路中被测对象的运动,信号采集板对两路信号的相位差进行实时测量并将测量数据传至上位机,上位机采集软件对收到的实验数据进行处理并每隔 1 s 保存一个数据。图 7(a)为大数测量值,图 7(b)为小数相位测量值,实验结果显示大数测量值出现了稳定的阶梯式跳变,对应的小数相位测量值也实现了稳定的周期变化,表明给出的外差干涉信号处理方法在大数测量和小数测量中具有可行性。

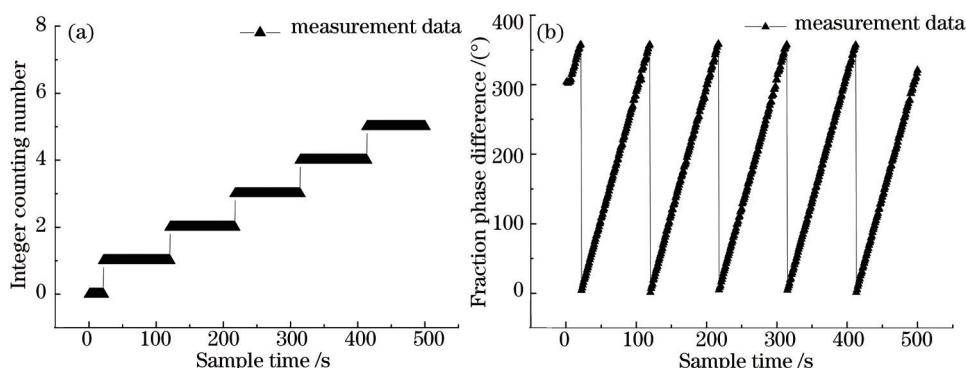


图 7 大小数测量实验结果。(a)大数测量;(b)小数测量

Fig.7 Results of integer and fraction measurement experiments. (a) Integer measurement; (b) fraction measurement

4 应用实验

为了验证基于脉冲计数的零相位差跳变补偿外差干涉信号处理方法在外差干涉测量应用中的可行性,

构建了外差干涉位移测量实验装置,进行了位移测量实验,实验装置如图8所示。激光器采用美国 Agilent 公司出品的 5517 B 激光器构建双通外差干涉仪光路,激光器的波长为 632.991372 nm,频差为 1.9~2.4 MHz。采用普瑞科创的 PT-1303C 光电探测器对干涉信号进行探测,探测器的最大工作频率为 10 MHz。基于 FPGA 研制的信号采集处理板对干涉信号进行采集处理,并将采集到的数据传输至上位机数据处理软件并将最终位移测量结果予以显示。采集板采用 Altera 公司生产的 FPGA 芯片 EP2C20Q240C8 为核心实现设计。小数相位测量中用于混频降频的混频芯片采用 NE602 实现,用于产生动态混频基准信号的锁相环跟踪模块采用锁相环芯片 74HC4046 和两个计数器芯片 74HC4040 实现电路设计,两计数器芯片分别用于实现 1000 和 1004 的分频电路设计。另外信号预处理电路包括滤波、放大、整形采用传统功放及电阻电容实现设计。基于搭建的实验装置,对德国 PI 公司的 15 μm (Physik Instrument Co., Germany, P-752.11C) 导轨和 200 mm 导轨 (Physik Instrumente Co., Germany, M-521.DD stage) 进行位移测量实验,两个导轨的分辨率分别为 0.1 nm 和 0.1 μm , P-752.11C 导轨被置于 M-521.DD 导轨的运动底盘上,分别进行了纳米级步进和毫米级步进位移测量实验。

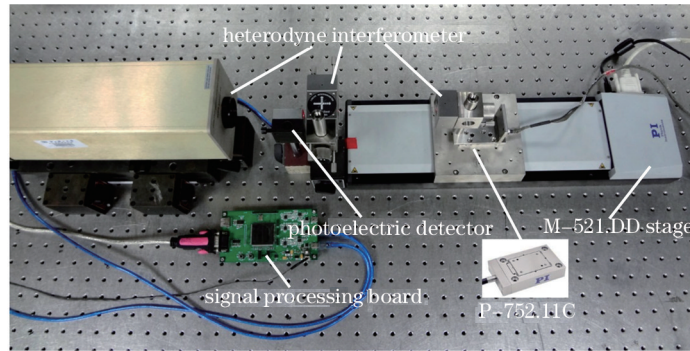


图 8 外差干涉位移测量实验装置

Fig.8 Heterodyne interferometric displacement measurement experimental setup

纳米级步进测量实验中,将 M-521.DD 导轨运动底盘移动至导轨左端,使得 15 μm 导轨尽量靠近激光器,减少空气中的光程,控制 15 μm 导轨以步进间隔为 10 nm 进行步进,同时对外差干涉测得的位移数据进行保存。当没有采用零相位差跳变补偿大小数结合,直接大小数相位相加得到的位移测量数据如图 9 所示。实验数据显示测量结果出现了大数误差,相应地存在大数误差的实验数据如表 2 所示,其中灰色背景的数据为出现错误的的数据。

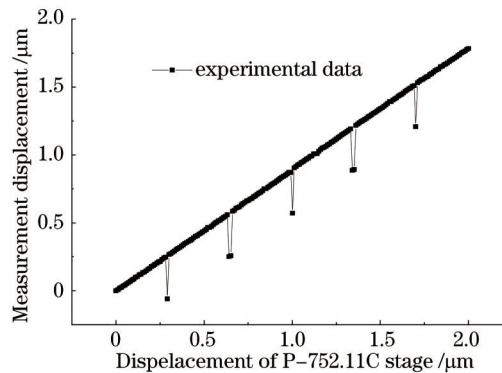


图 9 10 nm 步进未补偿大小数结合数据

Fig.9 Integration of integer and fraction with the step increment of 10 nm without compensation

由图 9 和表 2 可以看到,当没有采用补偿方法实现大小数结合时,出现了大数跳变误差,从出现误差的数据可以看出当小数已经过了 360° 相位跳变时大数值还没有完成加 1 计数,从而导致出现错误的大小数结合。根据实验数据选择不稳定区间小数相位值 $\varphi_c = 15^\circ$ 。图 10 为零相位差跳变补偿大小数结合实现的步进位移测量实验结果,步进间隔为 10 nm。位移测量结果显示,与导轨读取位移数据比对,位移误差的平均值为 -0.72 nm,标准偏差为 1.43 nm,最大波动为 7.12 nm,可见位移误差波动没有超过一个波长,这说明位移测量中没有出现大数跳变误差,表明了大小数测量相位实现了准确的结合。

表2 未补偿大小数结合时的错误数据

Table 2 Error data of integration of integer and fraction phase without compensation

Number	Integer number	Fraction phase	Integration phase
28	0	349.923	174.961
29	0	357.41	178.704
30	0	7.917	3.958
31	1	20.079	190.039
32	1	27.072	193.536
63	1	339.272	349.636
64	1	352.376	356.188
65	1	2.17	181.085
66	1	9.613	184.806
67	2	21.611	370.805
68	2	29.969	374.984
99	2	347.558	533.779
100	2	346.164	533.082
101	2	5.558	362.778
102	3	23.941	551.970
103	3	36.012	558.005
133	3	339.939	709.969
134	3	351.104	715.551
135	3	3.726	541.862
136	3	10.935	545.467
137	4	21.136	730.567
138	4	31.244	735.621
169	4	346.767	893.383
170	4	353.841	896.920
171	4	10.291	725.145
172	5	16.575	908.287
173	5	27.812	913.906

毫米级测量实验具体是控制 200 mm 导轨以步进间隔为 1 mm 进行步进,每步进一次,信号采集板对干涉信号进行相位测量,上位机测量软件对导轨位移和测得的位移进行实时保存。1 mm 步进位移测量实验结果如图 11 所示。实验结果显示,位移误差的平均值为 0.01 μm ,标准偏差为 0.74 μm ,最大偏差为 3.44 μm 。

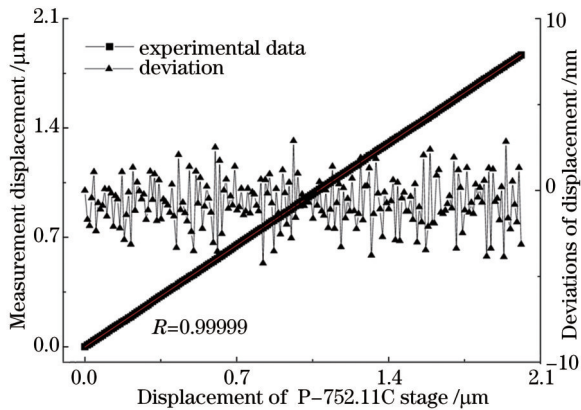


图 10 10 nm 步进位移测量实验结果

Fig.10 Results of displacement measurement experiment with the step increment of 10 nm

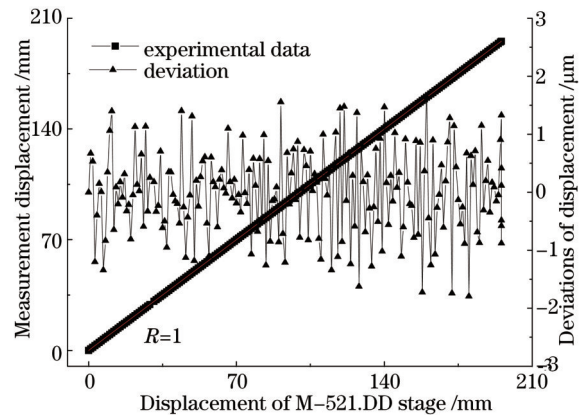


图 11 1 mm 步进位移测量实验

Fig.11 Displacement measurement experiment with the step increment of 1 mm

综上外差干涉位移测量实验,纳米级位移测量实验验证了零相位差跳变补偿大小数结合可以实现大小数准确结合同时可实现纳米级的位移测量,毫米级位移测量实验验证了本文给出的信号处理方法可实现大范围的位移测量。

5 结 论

采用零相位差跳变补偿的方法实现了大小数测量相位的准确结合,应用FPGA研制了信号采集处理板,基于高精度双通道任意函数信号发生器构建了验证实验装置,分别进行了相位测量精度实验、大数计数和小数相位测量实验。搭建了外差干涉位移测量光路,分别进行了纳米级步进和毫米级步进位移测量实验,验证了零相位差跳变补偿实现大小数相位准确结合的有效性。实验结果表明,基于脉冲计数的零相位差跳变补偿外差干涉信号处理方法可用于外差干涉测量仪器或其他精密测量仪器中,实现大范围纳米级精度的位移测量。

参 考 文 献

- 1 Thilo Schuldt, Martin Gohlke, Dennis Weise, *et al.*. A high-precision dilatometer based on sub-nm heterodyne interferometry[C]. 2009 International Symposium on Optomechatronic Technologies, 2009.
- 2 Chen Kunhuang, Chang Weiyao, Chen Jingheng. Measurement of the pretilt angle and the cell gap of nematic liquid crystal cells by heterodyne interferometry[J]. Optics Express, 2009, 17(16): 14143-14149.
- 3 Stefan Jacob, Cecilia Johansson, Mats Ulfendahl, *et al.*. A digital heterodyne laser interferometer for studying cochlear mechanics[J]. Journal of Neuroscience Methods, 2009, 179(2): 271-277.
- 4 Glenn de Vine, David S Rabeling, Bram J J Slagmolen, *et al.*. Picometer level displacement metrology with digitally enhanced heterodyne interferometry[J]. Optics Express, 2009, 17(2): 828-837.
- 5 Wang Shinn Fwu, Lai Wesley, Chiu Jyh Shyan, *et al.*. Method for measuring the twist angle of an optically compensation bend by using the heterodyne interferometry[C]. IEEE, Instrumentation and Measurement Technology Conference, 2010: 296-299.
- 6 Zhang Enzheng, Hao Qun, Chen Benyong, *et al.*. Laser heterodyne interferometer for simultaneous measuring displacement and angle based on the Faraday effect[J]. Optics Express, 2014, 22(21): 25587-25598.
- 7 Chen Qianghua, Luo Huifu, Wang Sumei, *et al.*. Measurement of air refractive index based on surface plasmon resonance and phase detection by dual-frequency laser interferometry[J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(1): 0108001.
陈强华, 罗会甫, 王素梅, 等. 基于表面等离子体共振和双频激光干涉相位测量的空气折射率测量[J]. 中国激光, 2013, 40(1): 0108001.
- 8 Noh Bin Yim, Cheon Il Eom, Seung Woo Kim. Dual mode phase measurement for optical heterodyne interferometry[J]. Measurement Science and Technology, 2000, 11(8): 1131-1137.
- 9 P Köchert, J Flügge, Ch Weichert, *et al.*. Phase measurement of various commercial heterodyne He-Ne-laser interferometers with stability in the picometer regime[J]. Measurement Science and Technology, 2012, 23(7): 74005.
- 10 Choi Hyun Seung, La Jong Pil, Park Kyi Hwan. Novel displacement measurement technique of the heterodyne laser interferometer for nano positioning[C]. 2005 IEEE/ASME, 2005: 78-81.
- 11 Zhang Zhiping, Cheng Zhaogu, Qin Zhaoyu, *et al.*. A novel optical subdivision method for dual-frequency interferometer[J]. Optik, 2007, 119(16): 772-776.
- 12 Tae Bong Eom, Jong Ahn Kim, Chu Shik Kang, *et al.*. A simple phase-encoding electronics for reducing the nonlinearity error of a heterodyne interferometer[J]. Measurement Science and Technology, 2008, 19(7): 75302.
- 13 Min Seok Kim, Seung Woo Kim. Two-Longitudinal-Mode He-Ne Laser for Heterodyne Interferometers to Measure Displacement[J]. Applied Optics, 2002, 41(28): 5938-5942.
- 14 Liu Dandan, Zhao Weiqian, Yue Hua. Laser heterodyne interferometry signal processing method based on integer-fraction combined phase counting[J]. Transducer and Microsystem Technologies, 2008, 27(1): 19-21.
刘丹丹, 赵维谦, 岳 华. 一种整小数结合式激光外差信号处理方法[J]. 传感器与微系统, 2008, 27(1): 19-21.
- 15 Deng Yuanlong, Li Xuejin, Geng Youfu, *et al.*. Influence of nonpolarizing beam splitters on nonlinear error in heterodyne interferometers[J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(11): 1112008.
邓元龙, 李学金, 耿优福, 等. 非偏振分光镜对外差干涉仪非线性误差的影响[J]. 光学学报, 2012, 32(11): 1112008.
- 16 Chi Feng, Zhu Yu, Zhang Zhiping, *et al.*. Environment compensation technologies in dual-frequency laser interferometer measurement system[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(4): 0408004.

- 池 峰, 朱 煜, 张志平, 等. 双频激光干涉测量中的环境补偿技术[J]. 中国激光, 2014, 41(4): 0408004.
- 17 Zhao Yang, Li Dacheng. A new signal processing method for heterodyne interferometer-measuring phase and integer periodic phase [J]. Acta Metrologica Sinica, 1995, 16(1): 31-36.
- 赵 洋, 李达成. 一种新的外差干涉信号处理方法—相位及相位整数测量法[J]. 计量学报, 1995, 16(1): 31-36.
- 18 Jiang Hong. The Study on Heterodyne Interferometric System Based on Phase Measurement and Its Applications[D]. Beijing: Tsinghua University, 1999: 89-113.
- 蒋 弘. 基于相位测量的外差干涉系统及其应用研究[D]. 北京:清华大学, 1999: 89-113.
- 19 Min Seok Kim, Seung Woo Kim. Two-way frequency-conversion phase measurement for high-speed and high-resolution heterodyne interferometry[J]. Measurement Science and Technology, 2004, 15(11): 2341-2348.
- 20 Zhang Guizhen. Research on Laser Heterodyne Interferometry for Nano Measurement Based on PLL Frequency-Mixing[D]. Hangzhou: Zhejiang Sci-Tech University, 2005: 26-53.
- 张贵珍. 基于锁相混频原理的激光外差干涉纳米测量方法研究[D]. 杭州: 浙江理工大学, 2005: 26-53.
- 21 Qiu Xiaoqian, Le Yanfen, Wang Jing. Interpolation of heterodyne interferometric signals based on FPGA[J]. Laser Technology, 2011, 35(2): 199-201.
- 邱小倩, 乐燕芬, 王 静. 基于FPGA的插频式外差干涉信号处理方法[J]. 激光技术, 2011, 35(2): 199-201.
- 22 Wang Guochao, Yan Shuhua, Zhou Weihong, *et al.*. Dynamic tracking down-conversion signal processing method based on reference signal for grating heterodyne interferometer[J]. Optical Engineering, 2012, 51(8): 81511-81512.
- 23 Chen Ruiqiang, Jiang Yuesong. Method of measurement on time-interval in pulsed laser ranging[J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(2): 0212004.
- 陈瑞强, 江月松. 脉冲激光测距的时间间隔测量方法[J]. 光学学报, 2013, 33(2): 0212004.
- 24 Yang Tao, Yan Liping, Chen Benyong, *et al.*. Signal processing method of phase correction for laser heterodyne interferometry[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2014, 57: 93-100.
- 25 Zhang Enzheng, Chen Benyong, Yan Liping *et al.*. Laser heterodyne interferometric signal processing method based on rising edge locking with high frequency clock signal[J]. Optics Express, 2013, 21(4): 4638-4652.

栏目编辑: 张 雁