版权所有 © 《激光技术》编辑部
http://www.jgjs.net.cn

第 40 卷 第 3 期
2016 年 5 月

激 光 技 术
LASER TECHNOLOGY

Vol. 40, No. 3
May, 2016

文章编号：1001-3806(2016)03-0315-05

双路信号相位同步测量系统设计与实现

杜志广，颜树华*，林存宝，王国超，魏春华
（国防科学技术大学 机电工程与自动化学院 仪器科学与技术系，长沙 410073）

摘要：为了实现 2 维外差干涉位移测量中信号相位的精确同步探测，采用整周期计数与脉冲填充相结合的方法，利用同一时钟基准，对双路信号进行同步检测与并行处理，设计并实现了一种基于现场可编程门阵列的双路外差干涉信号相位同步测量系统。该系统在 100kHz 载波频率下测量分辨率可以达到 0.18°，双路信号下的相位同步测量误差同样为 0.18°。结果表明，该系统实现了整小数相位的精确测量，确保了双路信号相位的实时同步探测，能够满足各种 2 维外差干涉位移测量系统对相位同步测量的需求。

关键词：测量与计量；相位测量；双路同步；脉冲填充；外差干涉
中图分类号：TH744.3　　**文献标志码**：A　　**doi**：10.7510/jgjs.issn.1001-3806.2016.03.003

Design and implement of a synchronous phase measurement system for dual-channel signals

DU Zhiguang, YAN Shuhua, LIN Cunbao, WANG Guochao, WEI Chunhua
(Department of Instrument Science and Technology, College of Mechatronic Engineering and Automation, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: In order to realize precise synchronization detection of signal phase for 2-D heterodyne interference displacement measurement, based on the combination of the whole cycle counting and the pulse stuffing methods, a dual-channel synchronous heterodyne signal phase measurement system based on field programmable gate array was designed and implemented by utilizing the same clock reference to detect synchronously and process the dual-channel signals parallelly. The results demonstrate that the resolution of 0.18° is realized with carrier frequency of 100kHz, and the phase synchronization measurement error of 0.18° is achieved for dual-channel signal detection. Accurate measurement of integral and fractional phases was realized by the system. Meanwhile, the real-time synchronous measurement of dual-channel signal phase was then guaranteed. It indicates that the developed system can fulfill the requirement of various 2-D heterodyne interference displacement measurement applications.

Key words: measurement and metrology; phase measurement; dual-channel synchronization; pulse stuffing; heterodyne interference

引 言

干涉信号相位检测作为影响光学位移测量系统整体性能的关键因素，在光电探测领域占有举足轻重的地位。为了进一步提高干涉信号相位检测的分辨率和重复性，不同形式的载波信号被引入到光学位移测量系统中，如双频激光干涉仪[1]、外差光栅编码器[2]、多波长合成干涉仪[3]、飞秒光梳绝对测距系统[4]等。载波信号的引入有效提高了测量系统的稳定性，与此同时对高精度外差信号相位测量方法的需求也随之增强。此外，随着测量技术的不断发展，光学位移测量系统的维度也逐渐由 1 维向多维拓展[5-6]。为了同时获得被测目标各个维度的位移信息从而确定其空间位置，信号相位多路实时同步测量成为多维度位移测量必须要解决的一项关键技术。

传统多维度位移测量系统通常采用多个单路相位测量模块来实现多路测量[7]。该方法将多路测量简化为多个单路测量，便于系统的分析与实现。为了保证系统的精度和实时性，通常要求所用的各路测量模块具有较好的一致性，且各路测量数据与主程序之间具有同等的通信延时，这在一定程度上增加了系统的成本和复杂性。参考文献[8]中利用多通道数据采集卡对干涉信号采样后通过软件算法对其进行相位解算。虽然该方法通常可以获得更高的测量精度，但由于各通道间需要保证同步的数据采集和模数转换，这

基金项目：国家自然科学基金资助项目(51275523)
作者简介：杜志广(1991-)，男，硕士研究生，主要从事光学精密测量与信号处理方面的研究。
*通讯联系人。E-mail：yanshuhua996@163.com
收稿日期：2015-04-23；收到修改稿日期：2015-05-13

激光技术 jgjs@sina.com

版权所有 © 《激光技术》编辑部
http://www.jgjs.net.cn

对硬件实现的布局布线和时钟控制提出了较高要求。参考文献[9]中以主从单片机多机通信的方式来实现多路相位测量。该方法原理简单、成本低廉,但由于主单片机是以顺序通信的方式来依次获取各路的相位信息,因此该系统依旧无法满足多路相位同步测量的要求。由此可见,研制高精度多路同步外差干涉信号相位测量系统具有重要的实际应用意义。

本文中针对 2 维外差干涉位移测量中信号相位同步探测这一问题,设计了基于现场可编程门阵列(field-programmable gate array,FPGA)的双路信号相位同步测量系统。该系统通过整周期计数与脉冲填充相结合的方式实现对信号相位的高精度测量,利用同一时钟基准对双路信号进行同步检测与并行处理,从而保证系统各维度测量的同步性。本文中给出了所设计系统的测量原理与实现方法,并对所研制的系统进行了性能测试,测试结果表明,本系统具有较高的测量分辨率和较好的测量同步性。

1 测量原理与系统设计

在外差干涉位移测量系统中,探测信号通常包含参考信号和测量信号,其中参考信号是纯净的载波信号,测量信号则是包含有位移信息的信号。对于 2 维位移测量系统,通常包含一路参考信号和两路测量信号。以本课题组所研究的 2 维外差平面编码器为例[10],测量系统的探测信号可以表示为如下一般形式:

$$\begin{cases} I_{\mathrm{r}} = I_0\cos[2\pi f_{\mathrm{c}}t + \phi_0] \\ I_{\mathrm{m},x} = I_0\cos[2\pi f_{\mathrm{c}}t + \phi_x + \phi_0] \\ I_{\mathrm{m},y} = I_0\cos[2\pi f_{\mathrm{c}}t + \phi_y + \phi_0] \end{cases} \tag{1}$$

式中,I_{r} 表示参考信号,$I_{\mathrm{m},x}$ 和 $I_{\mathrm{m},y}$ 分别表示 x 和 y 方向的测量信号,I_0 表示信号强度,f_{c} 表示载波频率,ϕ_0 表示初始相位,ϕ_x 和 ϕ_y 分别表示由 x 和 y 方向的位移所引起的相位变化。为方便起见,所有信号的强度和初始相位都设置为相同值。在本课题组所搭建的 2 维平面编码器系统中,x 和 y 方向的位移与相位变化具有如下关系:

$$\begin{cases} s_x = \dfrac{d}{16\pi}\phi_x \\ s_y = \dfrac{d}{16\pi}\phi_y \end{cases} \tag{2}$$

式中,s_x 和 s_y 分别表示 x 和 y 方向的位移,d 表示两个方向上相等的光栅常数,16π 对应 8 倍的光学细分。当光栅常数为定值时,相位测量的分辨率则直接决定了系统的位移测量分辨率。此外,当 x 和 y 方向同时存在位移时,如果系统无法在同一时刻准确测得两个方向的位移值,则会导致对被测目标出现定位误差,影响其空间位置测量的准确性。由此可见,对系统 2 维位移的测量转化为对双路相位变化的高精度同步测量上来。

1.1 整小数结合相位测量方法

外差干涉位移测量系统测量范围通常为毫米量级到米量级,由此对应的相位变化包含众多信号周期。为方便信号相位的测量,可以将(1)式中的相位变化分解为整周期计数和小数计数两部分,即表示为如下形式:

$$\phi_u = K_u 2\pi + k_u 2\pi \tag{3}$$

式中,$u = x$ 或 y,K_u 为整周期计数因子,k_u 为小数计数因子。由此对信号相位的测量即转化为对整周期计数因子和小数计数因子的测量。

为了获得最佳的相位测量实时性,所设计的干涉信号相位测量系统以每一个参考信号周期为测量单元,通过测量位移在每一个参考信号周期内所引起的整小数相位变化,利用累加的方式来获得位移所引起的全部相位变化。其测量原理如图 1 所示,在第 i 个参考信号周期内,参考信号的上升沿计数 $K_{\mathrm{r},i}$ 恒为 1,测量信号的上升沿计数 $K_{\mathrm{m},u,i}$ 则为非负整数,第 i 个参考信号周期内待测位移所引起的整周期计数因子即为:

$$K_{u,i} = K_{\mathrm{m},u,i} - K_{\mathrm{r},i} \tag{4}$$

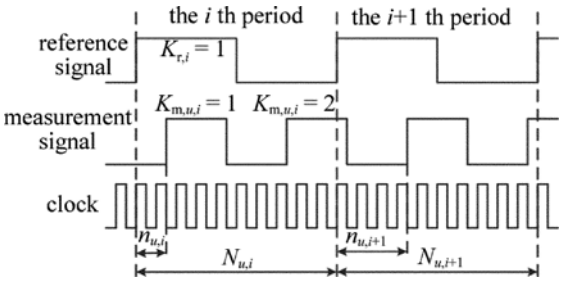

Fig. 1 Scheme of integer-fraction combined phase measurement principle

对于小数相位的测量,则可以通过相邻的两个周期来共同获得。在第 i 个参考信号周期起始阶段,第 1 个测量信号上升沿相对于参考信号的相位延迟可以表示为 $n_{u,i}/N_{u,i}$,其中 $n_{u,i}$ 和 $N_{u,i}$ 分别为延迟相位和第 i 个参考信号整周期所允许插入的高频脉冲个数。与此类似,在第 $i+1$ 个参考信号周期起始阶段,第 1 个测量信号上升沿相对于参考信号的相位延迟可以表示为 $n_{u,i+1}/N_{u,i+1}$,其中 $n_{u,i+1}$ 和 $N_{u,i+1}$ 分别为延迟相位和第 $i+1$ 个参考信号整周期所允许插入的高频脉冲个数。由此得到第 i 个参考信号周期内待测位移所引起的小数计数因子为:

$$k_{u,i} = \frac{n_{u,i+1}}{N_{u,i+1}} - \frac{n_{u,i}}{N_{u,i}} \tag{5}$$

由于在每一个参考信号周期内测量信号总是定义

激光技术 jgjs@sina.com

版权所有 © 《激光技术》编辑部
http://www.jgjs.net.cn

为延迟于参考信号,因此延迟相位的符号定义为负。通过将第 i 个参考信号周期内待测位移所引起的整周期和小数相位相加,得到待测位移在第 i 个参考信号周期内所引起的总相位变化为:

$$\phi_{u,i} = K_{u,i}2\pi + k_{u,i}2\pi \tag{6}$$

当待测位移在测量系统中引起 q 个参考信号周期内相位发生变化时,总的相位变化则可以由这 q 个参考信号周期内的相位变化累加得到,即为如下形式:

$$\phi_u = \sum_{i=1}^{q}\phi_{u,i} = \sum_{i=1}^{q}K_{u,i}2\pi + \left(\frac{n_{u,q+1}}{N_{u,q+1}} - \frac{n_{u,1}}{N_{u,1}}\right)2\pi \tag{7}$$

式中,第 1 项为待测位移在 j 个参考信号周期内所引起的整周期相位变化,第 2 项则为在 j 个参考信号周期内所引起的小数相位变化,即为终止时刻与起始时刻的小数相位差值。此外,也可以根据需求自主设置所测量的参考信号周期个数,或是根据需求设置所需的测量时间。

1.2　双路同步相位测量方法

在 2 维外差干涉位移测量系统中,为了实现空间定位的准确性,必须对各个维度进行实时同步测量。从上面的分析可知,信号相位的测量主要以参考信号周期为测量单元,如果能够保证每一个参考信号周期内各路干涉信号相位测量的同步性,就可以确保系统在整个测量过程中的相位测量同步性。

为了实现每一个参考信号周期内相位测量的同步性,本文中采用了如下的测量方法,其原理如图 2 所示。同样以本课题组所研究的 2 维外差光学编码器为例,此时的探测信号包含 x 和 y 两个方向的测量信号。在每一个参考信号周期内,实际所测的测量信号相位值包含本周期内的整数计数和初始时刻的小数相位延迟。选取同一个信号作为两路测量信号的参考信号,在该参考信号周期内,参考信号的整数计数 $K_{r,i}$ 恒为 1,两路测量信号的整数计数分别为 $K_{m,x,i}$ 和 $K_{m,y,i}$,通过作差即可求得两路测量信号的整数相位值。对于小数相位测量,通过采用同一个外部时钟,利用 FPGA 自带的数字锁相环模块对其进行倍频,倍频后对两路测量信号的相位延迟同时进行脉冲插值, 之后再对该参

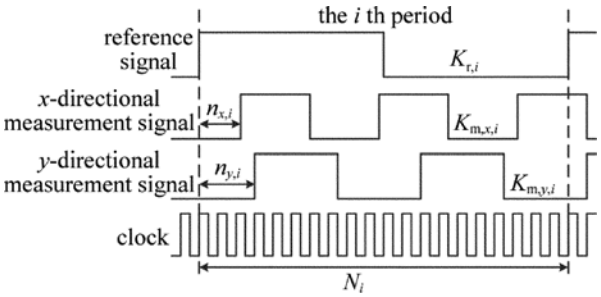

Fig. 2　Scheme of dual-channel synchronous phase measurement principle

考信号周期进行脉冲插值测量。由于使用的是同一个高频时钟,且两路测量信号使用的是同一个参考信号,从而保证了小数相位测量的同步性。测量完毕该参考信号周期内两路信号的整小数相位后,在下一参考信号周期的上升沿到来时,将本周期的整小数相位测量结果保存到各自的寄存器中,进而保证了两路测量信号以参考信号为时钟的时间同步性。由于在每一个参考信号周期内都能够有效保证两路信号相位测量的同步性,进而测量系统在整个测量过程中的都能够实现双路相位测量的实时同步性。

此外,在对双路测量信号进行整小数相位测量时,由于各路测量信号的相位测量方法完全相同,因此在编程实现时可以对各路信号采用相同的程序进行处理。通过采用相同的测量程序,可以保证生成的FPGA内部连线和逻辑单元具有相同的时间延迟,从而进一步保证其时间同步性。

1.3　系统总体设计

基于以上测量方法,本文中所研制的双路同步外差干涉信号相位测量系统总体设计如图 3 所示。以 2 维测量为例,光电探测器探测到的参考信号和两路测量信号首先经过高速迟滞比较器转化为 FPGA 可以识别的方波信号,然后将转换后的方波信号输入到FPGA端口,利用双路同步相位测量方法分别计算两路测量信号的整小数相位变化,之后利用整小数结合方法得到全部相位值,通过待测位移与相位变化的函数关系将其转化为位移值,利用串口通信将测量数据传输到个人计算机(personal computer,PC)或液晶显示(liquid crystal display,LCD)模块,最终完成 2 维位移测量系统的实时同步测量和显示。

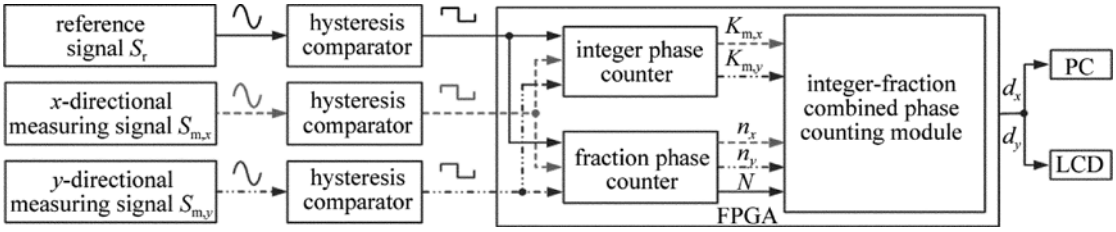

Fig. 3　Overall design of a dual-channel synchronous phase measurement system

激光技术 jgjs@sina.com

版权所有 © 《激光技术》编辑部
http://www.jgjs.net.cn

2 实验结果

根据双路同步外差干涉信号相位测量系统的总体设计,课题组从测量精度和制作成本两个角度考虑,对其进行了硬件实现。系统所采用的高速迟滞比较器为 Analog Devices 公司生产的 AD8561,FPGA 芯片采用的是 Altera 公司生产的 Cyclone Ⅱ 系列 EP2C8Q208C8 芯片,外部时钟采用的是 20MHz 晶振时钟,利用 FPGA 对其倍频到 200MHz 进行脉冲填充相位测量[11-12]。由(2)式可知,相位测量系统的分辨率和同步性对 2 维位移测量具有重要影响[13-14],因此,实验验证中主要对所研制系统的这两个性能参量进行测试。

2.1 分辨率测试实验

为了验证所研制系统的相位测量分辨率,采用 Agilent 公司生产的 33522A 型双通道函数和任意波形发生器来分别对 x 和 y 路进行分辨率测试。测试过程中令 33522A 双通道同时输出频率为 100kHz 的方波信号,通过对两路信号相对相位在 0°到 360°范围内以 9°间隔进行步进,从而验证其分辨率。由于 33522A 的相位分辨率只有 0.1°,无法作为可靠参考值与系统测量结果进行比对,因此测量过程中采用 Sanford Research Systems 公司生产的 SR830 锁定放大器测量结果作为参考相位。SR830 的相位测量分辨率为 0.01°,能够为系统测量结果提供可靠参考。图 4 所示是以 SR830 测量结果为横坐标,以 x 和 y 路测量相位为纵坐标所绘制的结果。为了测试其分辨率,将系统所测相位与 SR830 所测相位的差值也同样绘制在图 4 中。

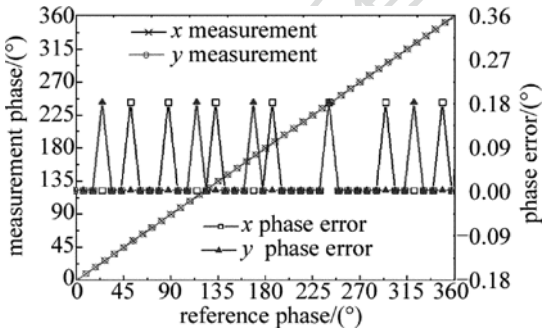

Fig. 4 Results of resolution testing of the designed system

从图 4 中可以看出,系统可以同时实现 x 和 y 路相位的准确测量,且两路相位测量结果与 SR830 测量数据的最大差值为 0.18°,即相位测量分辨率为 0.18°。由于被测信号频率为 100kHz,高频填充脉冲频率为 200MHz,其理论相位分辨率即为二者的比值,即 0.18°,实验结果恰好与理论结果完全一致,从而证明了所设计系统的正确性。而测量结果中所出现的 0.18°相位波动,则主要是由小数相位测量中的 ±1 计数误差引起[15]。在所研制系统 0.18°的相位测量分辨率下,如果课题组所采用的 2 维光栅栅距为 1μm[10],则对应的位移分辨率为 62.5pm,完全达到了系统所设计的纳米级位移测量要求。

2.2 同步性测试实验

为有效验证所研制系统的双路测量同步性,设计了以下两组实验:第 1 组实验中令两路测量信号频率相同,但二者初始相位不同,在整个测量过程中两路信号的相对相位保持恒定;第 2 组实验中令两路测量信号的初始相位相同,但二者频率不同,在整个测量过程中两路信号的相对相位随时间线性变化。此外,为了更好地体现实验设计的一般性,令两组测量信号的频率始终与参考信号不同。由于 33522A 信号发生器只能够输出两路信号,为了实现载波频率相同的 3 路信号输出,实验过程中将 33522A 信号发生器与 Tektronix 公司生产的 AFG3021B 单通道函数和任意波形发生器结合起来使用,通过将 33522A 内部时钟作为参考时钟基准,把 33522A 的内置参考输出端连接到 AFG3021B 的外部参考输入端,从而实现两台仪器的时钟同步。测量过程中令 AFG3021B 的单路输出信号作为参考信号,33522A 的两路输出信号作为测量信号,从而满足系统同步性实验的测试要求。

在第 1 组测试实验中,参考信号的频率被设置为 100kHz,而两路测量信号的频率和初始相位差则被分别设置为 99.9999kHz 和 90°。由于两路测量信号的频率相同且初始相位差恒定,因此在整个测量过程中两路信号的相位都应当随时间线性变化,且二者的相对相位应当时刻保持为 90°。利用所研制的相位测量系统对两路信号以 0.5s 为时间间隔进行相位测量,测试结果如图 5 所示。从图中可以看出,两路信号的相位都在 20s 内以线性的方式变化了 720°,且二者的相位差时刻保持在 90°,与理论很好的一致,从而验证了系统在双路信号恒定相位差下的相位测量同步性。测量结果中所出现的 0.18°相位波动,同样是由于小数相位测量中的 ±1 计数误差引起。

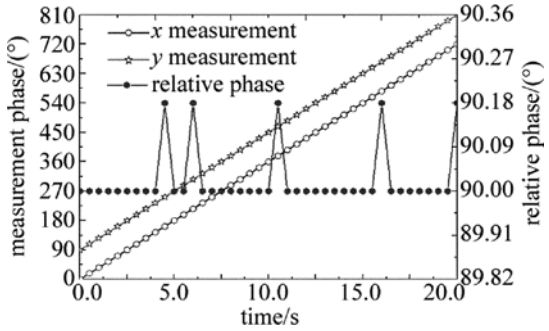

Fig. 5 Synchronization testing results for the dual-channel signals with different initial phases

激光技术 jgjs@sina.com

版权所有 © 《激光技术》编辑部
http://www.jgjs.net.cn

在第 2 组测试实验中,参考信号的频率被设置为 100kHz,两路测量信号的初始相位被设置为相同值,而频率则分别被设置为 99.9998kHz 和 99.9999kHz。由于两路测量信号的初始相位恒定而频率不同,因此在整个测量过程中两路信号的相位都应当随时间线性变化。利用所研制的相位测量系统对两路信号以 0.5s 为时间间隔进行相位测量,测试结果及与理论值的差值同时被绘制在图 6 中。从图中可以看出,两路信号的相位都以线性的方式随时间递增,且与理论值的偏差都在 0.18°范围内,即在 ±1 计数误差引起相位测量误差范围内,从而验证了系统在双路信号相对相位变化下测量的同步性。综上所述,所研制的系统可以有效测得每一时刻各路信号相位变化的准确值,即每一时刻被测目标的各维度准确位置,从而满足各种 2 维外差干涉探测系统的应用需求。

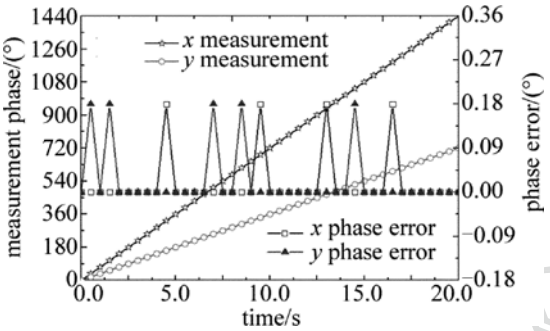

Fig. 6　Synchronization testing results for dual-channel signals with different measuring frequencies

3　结　论

针对 2 维外差干涉位移测量系统对双路信号相位同步探测的要求,通过采用整小数结合和双路同步相位测量方法,设计并实现了一种基于 FPGA 的双路外差干涉信号相位同步测量系统。实验结果表明,该系统在 100kHz 载波频率下测量分辨率为 0.18°,双路信号下的相位同步测量误差同样为 0.18°,有效实现了 2 维外差干涉探测下的高精度相位同步测量。通过对该系统稍作改动并与光电探测器等模块相结合,即可应用在各种外差干涉探测场合。下一阶段的主要工作是进一步提高所研制系统的分辨率,以满足有更高相位测量分辨率要求的场合。

参　考　文　献

[1] ZHANG E Z, HAO Q, CHEN B Y, *et al*. Laser heterodyne interferometer for simultaneous measuring displacement and angle based on the Faraday effect [J]. Optics Express, 2014, 22(21): 25587-25598.

[2] WU C C, HSU C C, LEE J Y, *et al*. Heterodyne common-path grating interferometer with Littrow configuration [J]. Optics Express, 2013, 21(11): 13322-13332.

[3] CHEN B Y, YAN L P, YANG T, *et al*. Development of a laser synthetic wavelength interferometer for large displacement measurement with nanometer accuracy [J]. Optics Express, 2010, 18(3): 3000-3010.

[4] JIAN P, PINEL O, FABRE C, *et al*. Real-time displacement measurement immune from atmospheric parameters using optical frequency combs [J]. Optics Express, 2012, 20(24): 27133-27146.

[5] HORESTANI A K, NAQUI J, SHATERIAN Z, *et al*. Two-dimensional alignment and displacement sensor based on movable broadside-coupled split ring resonators [J]. Sensors and Actuators, 2014, A210(1): 18-24.

[6] HSIEH H L, PAN S W. Three-degree-of-freedom displacement measurement using grating-based heterodyne interferometry [J]. Applied Optics, 2013, 52(27): 6840-6848.

[7] HSIEH H L, CHEN J C, LERONDEL D. Two-dimensional displacement measurement by quasi-common-optical-path heterodyne grating interferometer [J]. Optics Express, 2011, 19(10): 9770-9782.

[8] HSU C C, WU C C, LEE J Y, *et al*. Reflection type heterodyne grating interferometry for in-plane displacement measurement [J]. Optics Communications, 2008, 281(1): 2582-2589.

[9] LI S D, ZHANG X L, TAO H, *et al*. Hardware design and realization of 3D grating displacement measurement system [J]. Transducer and Microsystem Technologies, 2013, 32(5): 124-127 (in Chinese).

[10] LIN C B, YAN S H, DU Zh G, *et al*. High-efficiency gold-coated cross-grating for heterodyne grating interferometer with improved signal contrast and optical subdivision [J]. Optics Communications, 2015, 339(15): 86-93.

[11] SHI Y, JU A S, LE Y F. Heterodyne interference signal processing method based on FPGA [J]. Laser Technology, 2012, 36(2): 225-227 (in Chinese).

[12] QIU X Q, LE Y F, WANG J. Interpolation of heterodyne interferometric signals based on FPGA [J]. Laser Technology, 2011, 35(2): 199-205 (in Chinese).

[13] LE Y F, LI X X, JU A S. Design of phase comparator in a laser heterodyne interferometer [J]. Laser Technology, 2014, 38(1): 119-123 (in Chinese).

[14] YANG D X, YAN S H, DU L B, *et al*. Design of a miniature single-grating displacement measuring system with nanometer resolution [J]. Infrared and Laser Engineering, 2013, 42(4): 1020-1025 (in Chinese).

[15] WANG H, ZHOU W, LI Z Q. Frequency measurement method based on delay chain [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2008, 29(3): 320-323 (in Chinese).

激光技术 jgjs@sina.com