

基于单管法探测相位的自适应抗振干涉技术*

何 勇,姬会东,徐永祥,吴子明

(南京理工大学 电子工程与光电技术学院,江苏 南京 210094)

摘 要:主动抗振技术是目前抗振干涉仪中研究的难点,其代价小、易于实现的方案是机电反馈式。在这种技术中振动信号的探测很关键,基于文中提出的采用单个光电二极管探测相位的抗振技术,获取的相位量数字化后由数字信号处理器分析得到应该补偿的振动量,送压电陶瓷(PZT)进行补偿。论述了系统各部分的工作原理和电路设计,并给出了实验结果。实验表明,本方案对于小于 $100 \text{ wave} \cdot \text{Hz}$ 的振动具有较好的效果。

关键词: 自适应抗振; 相位探测; 干涉仪

中图分类号: TH744.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1007-2276(2004)04-0409-05

Adaptive vibration-resistant techniques in interferometry based on single photodiode phase detecting*

HE Yong, JI Hui-dong, XU Yong-xiang, WU Zi-ming

(Institute of Electronic Engineering & Photo-electric Technology, Nanjing University of Science & Technology, Nanjing 210094, China)

Abstract: Active vibration-resistant techniques in interferometer are applied to eliminate the effects of environmental disturb, the mechano-electronic feedback method is one of the low-cost way to fulfill these techniques. The detection of vibrational signal is the key part of this method, in this case, a single photodiode is used to detect optical phase of the interference fields in order to obtain the vibrational signal. The optoelectronic signal concerning with the vibration is digitalized and analyzed by DSP, then a feedback voltage is produced to PZT phase shifter which can compensate the change of optical path difference due to vibration. The principles of each part of this vibration-resistant system are described including the circuit design. Experimental results indicate that this method is an effective way to control the vibration with amplitude-frequency product less than $100 \text{ wave} \cdot \text{Hz}$.

Key words: Adaptive vibration-resistant; Phase detecting; Interferometer

0 引 言

移相干涉测量技术以其精度高、自动化程度高而

得到广泛地应用。但其对测量环境的要求很高,特别是环境的振动和气流的流动对测量的影响很大。为了解决这个问题,近 20 年来,人们做了大量的工作,采用的方法可归为两类:一类包括抗振算法^[1]、快速

收稿日期:2003-09-02; 修订日期:2003-10-28

* 基金项目:国防科工委国防军工计量“十五”计划重点项目(60803134)

作者简介:何勇(1966-)男,江苏扬州人,副教授,博士,硕士生导师,主要从事光干涉计量等方面的研究,已发表文章 20 余篇。

单帧干涉图采样法、快速移相法、同步移相等,但这些方法都是开环工作,其干涉条纹仍然在不停地抖动和漂移中;另一类是自适应抗振方法,能使干涉条纹保持稳定,真正起防振的作用。自适应干涉仪通过用光源光波长补偿光程差的相应变化,或直接补偿干涉仪一个臂的光程,将干涉条纹锁定在设定的位相上。其中包括:机电反馈式、半导体激光器光反馈法、声光电调制反馈控制等。目前代价小、易于实现的方案是机电反馈式主动抗振。在这种技术中,由 PZT 移相器进行机械式高频光学相位调制^[2],用光电传感器测出振动所引起的光波波前相位的变化,再由 PZT 移相器对光波波前进行实时校正,从而得到稳定的干涉图样,在振动补偿的同时,系统还能进行移相测量。由此提出了基于单管法探测相位的主动抗振技术。

1 原 理

在干涉场中放置一个光电二极管,将采样的光强值转变为数字量,经数字信号处理器(DSP)处理后可得到干涉条纹的相位值,当振动引起条纹相位 θ 变化时,控制 PZT 移相器向相反方向移相,从而锁定干涉条纹相位,稳定干涉图。锁定干涉条纹相位于不同值,即可实现移相。实验装置如图 1 所示。在干涉场中放入单个光电二极管,其输出的电压信号可写为:

$$V = a + b\sin\theta \quad (1)$$

式中 a 、 b 分别为信号的直流分量和交流分量; θ 为干涉条纹的相位,即要测量的量; V 为光电二极管输出的电压信号。图 1 中 DC-Level 模块用于给 PZT 加直流偏置电压。

在振动的情况下振动信号引起相位 θ 的变化,测出 θ 的值就能探测振动信号。为了能计算 θ ,给 PZT 加电压,改变两束光程差,使之连续变化一个波长以上,这样光电二极管输出电压必然经过最大值和最小值: $V_{\max} = a + b$, $V_{\min} = a - b$ 。预先测得 V_{\min} 、 V_{\max} 值后,即可根据当前电压值计算相位:

$$\theta = \arcsin\{[V - (V_{\min} + V_{\max})/2]/[(V_{\max} - V_{\min})/2]\} \quad (2)$$

四步移相算法^[3]需采集四幅干涉图,每幅移相 90° 。通常选取 0° 、 90° 、 180° 、 270° 四个值。角度值是

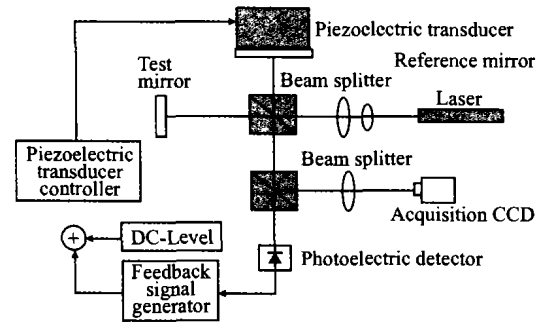


图 1 抗振干涉仪实验装置

Fig. 1 Experimental setup of vibration-resistant interferometer

经反正弦运算得到的。若光强采样值 V 的误差为 $(V_{\max} - V_{\min})/2$ 的 $1/100$ 时:

$$\Delta\theta = \arcsin \frac{V + \Delta V/2 - (V_{\max} + V_{\min})/2}{(V_{\max} - V_{\min})/2} - \arcsin \frac{V - \Delta V/2 - (V_{\max} + V_{\min})/2}{(V_{\max} - V_{\min})/2}$$

由于 $\sin\theta = \frac{V - (V_{\max} + V_{\min})/2}{(V_{\max} - V_{\min})/2}$,有:

$$\Delta\theta = \arcsin(\sin\theta + 0.005) - \arcsin(\sin\theta - 0.005) \quad (3)$$

$\Delta\theta$ 在 $\theta = 90^\circ$ 和 270° 时是最大值,绝对值为 11.46° 。在 $\theta = 0^\circ$ 和 180° 时是最小值,误差的绝对值为 0.57° ,在 45° 、 135° 、 225° 、 315° 时误差的绝对值为 0.81° 。由以上分析可看出选取 $\theta = 45^\circ$ 、 135° 、 225° 、 315° 的干涉图,综合误差较小。由公式(2)计算出的 θ 值实际范围是 $-90^\circ \sim 90^\circ$ 。在 45° 和 135° 时,光电管输出的电压相等,计算出的 θ 值都为 45° ,同样在 225° 、 315° 时计算出的 θ 值都为 -45° 。解决这个问题的方法是:当 $\theta = 45^\circ$ 时, V 随 θ 增加而增加,当 $\theta = 135^\circ$ 时, V 随 θ 增加而减小。因此,要锁定 $\theta = 45^\circ$ 时,可通过补偿算法解决,当采得的光强信号 V 偏大时(比 45° 对应的 V 值大),通过 PZT 移相器使 θ 减小, V 偏小时,使 θ 增大,当条纹稳定下来时,必然锁定在 45° 。反之 135° 、 225° 和 315° 时的锁定可通过同样方法解决。

光电管探测出振动引起的相位变化量,由此计算得出应加在 PZT 所补偿的量值。锁定四个位置时 PZT 上所加的电压为:

$$V(\theta) = V_0 + k \frac{\partial\theta}{\partial t} \quad (4)$$

式中 V_0 为 PZT 所加的直流偏置电压; $k \frac{\partial \theta}{\partial t}$ 为补偿所加的电压, 其中 k 为变化的系数。采用我们开发的 PSI 软件包并配合相应硬件可以校正 PZT 的电压位移曲线, 使其具有线性关系。

2 振动信号的获取和处理

图 2 是系统的电路原理框图。由光电二极管及

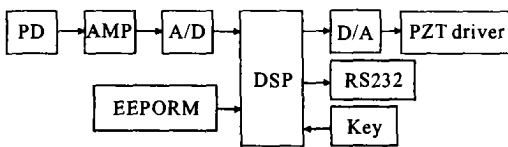


图 2 电路原理框图

Fig. 2 Schematic of circuit

前置放大电路组成探头, 探测光强信号, 放大后由 A/D 转换为数字信号; 在 DSP 内计算干涉图相位, 最终换算成补偿 PZT 所需的数字量, 再由 D/A 转变成模拟量, 经 PZT 驱动电源驱动 PZT 进行补偿。电路还包括相关的辅助部分: 电源、EEPROM、RS232 串口、按键等。EEPROM 用来固化程序, 在上电时 DSP 从 EEPROM 中加载程序到 DSP 内 RAM。RS232 串口用于和计算机通信, 用于移相的控制及其他控制信号的传输。探测器采用光电二极管 2CU2, 响应速度 t_{on}/t_{off} 分别为 5/10 ns, 已满足本方案要求。由于抗振、初始化速度及采集光强的静态值的需要, 放大电路要求从直流到 100 kHz 交流都能很好的线性放大。要选用具有高速度、高精度、线性好, 低温漂、低噪音的电路^[4]。

图 3 是本文所采用的光强探测电路。A/D 转换芯片选用 MAX125, 它有四路同步采样保持电路, 可以在同一时刻采集四路信号, 分辨率为 14 位, 即 1/16000, 在应用中, 输入信号的幅度应小于允许的幅度, 以免饱和。如输入信号的变化量为 5 V, 则分辨率为 1/8000。采样速度在两路输入的情况下最高可达 250 KSPS, 在六路输入的情况下也可达到 100 KSPS。

处理器选用了 TMS320VC5402 定点 DSP 芯片^[5], 单指令周期最高可达 10 ns。根据抗振程序的要求, 16 K 的片内 RAM 已够用。只需扩充 ROM 用

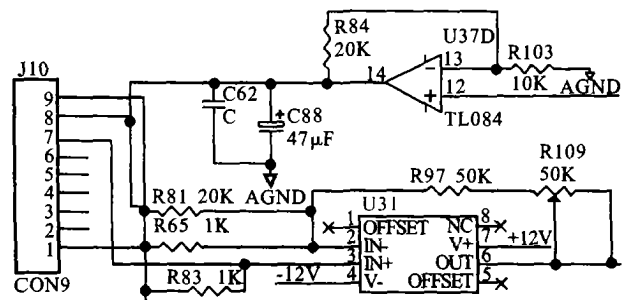


图 3 光强探测电路

Fig. 3 Light intensity detecting circuit

于存放程序, 这里选用 EEPROM 的型号为 39VF400, 为小型 SMD (Surface Mount Device) 封装, 在 3.3 V 工作电压下就能对芯片进行擦除和编程。EEPROM 设计为通过 DSP 仿真器由 JTAG 口在线编程, 无需专用的编程器来编程。这种方法为电路的小型化及在线升级提供极大的方便。

PZT 电压范围应为 2~200 V, 对应干涉图移动约 8 个条纹。用 12 位 D/A 芯片, 分辨率已超过 1/400 个条纹, 远小于相位计算的误差, 因此, 选用 12 位 D/A 芯片是合适的。D/A 转换电路输出电压为 0~5 V, 由 PZT 电源放大 20 倍驱动 PZT。

3 软件的编制

程序的开发平台采用 TI 公司的集成开发环境 Code Composer Studio, 简称 CCS。文中 DSP 软件包括主程序和 BOOT 引导程序两部分。BOOT 引导程序的作用是将系统软件从外部低速 EEPROM 搬移至 DSP 内部高速 RAM 中。主程序实现移相和抗振的功能, 如图 4 所示。初始化模块进行系统的初始化, 包括对 DSP、A/D、D/A 芯片的初始化。标定模块首先根据采样的值求出 V_{min} 、 V_{max} 值。相位计算模块根据公式(2)实时求出相位。

PID 调节的实质就是根据输入的偏差值, 按比例、积分、微分的函数关系进行运算, 其运算结果用以输出控制。对于离散数字系统, 积分变为累加, 微分则变为差分运算。为实现 PID 算法, 在 DSP 的 DARAM 中设置 128 字的区域, 存放 128 个相位偏差值, 此段数据初始值为零。为实现循环寻址用软件的方法, 用一指针指示最新数据, 每插入一个新数据指

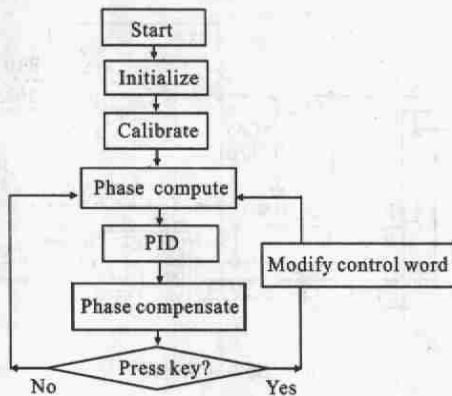


图 4 程序流程图

Fig. 4 Program flowchart

针循环移一位,并用新数据替换最旧的数据。根据最新数据乘以比例系数可得比例因子,128个数据累加乘以积分系数可得积分因子,取最新的10个数据,前5个数据的平均值减去后5个数据的平均值乘以微分系数可得微分因子,将比例因子、积分因子和微分因子相加即为PZT应补偿的量。

电路中设有按键用来决定是否进行移相,通过设置控制字在软件中实现。限于篇幅本文不介绍BOOT引导程序和串口通信模块。

4 实验数据分析

干涉仪的抗振系统由三部分组成:(1)实时采集振动引起的干涉条纹的相位变化;(2)对采集的信号进行处理;(3)推动执行机构进行补偿。实验系统光路如图1所示。这是一个泰曼—格林干涉仪,CCD将视频信号经图像采集卡输入计算机,可以实时显示干涉图,也可用软件测量面形;光电二极管PD接收的光信号变电信号放大后由A/D芯片转换成数字量,经数字信号处理计算干涉图的瞬态相位,并计算出需要由PZT补偿的电压量,由PZT电源驱动PZT进行补偿,实现抗振和移相。

图5是振动条件下用本文方法采集的依次相差 $\pi/2$ 的11幅干涉图^[6],可以看出运用单管法可以准确地锁定相位,在抗振的同时实现移相。在100 Hz,1wave振动条件下,抗振系统工作和不工作时的对比如图6所示。无抗振系统时干涉条纹模糊不清(见图6(a)),抗振系统工作时条纹清晰稳定(见图6(b))。

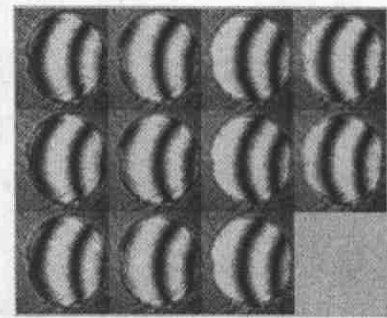
图 5 采集的依次相差 $\pi/2$ 的 11 幅干涉图

Fig. 5 Eleven frame interferograms of phase shifting

无抗振和抗振系统工作时测量的波峰波谷PV和均方根RMS的10次试验如图7所示。试验数据表明本系统测量重复性好、精度高,具有较好的稳定度。

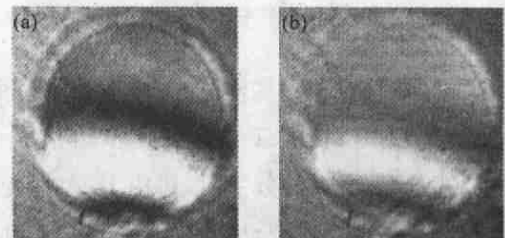


图 6 有抗振(a)和无抗振(b)的干涉图的对比

Fig. 6 Comparison of vibration-resistant system working on (a) and off (b)

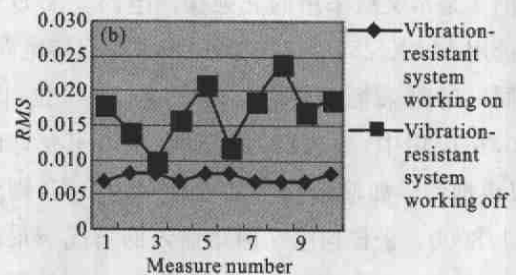
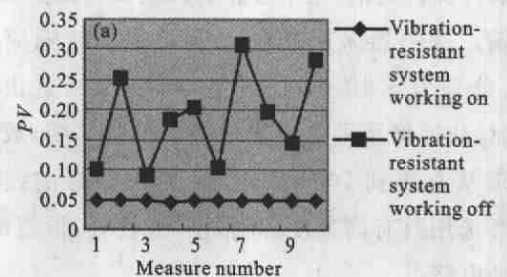


图 7 系统在使用抗振前后 PV(a)和 RMS(b)

Fig. 7 PV (a) and RMS (b) when vibration-resistant system working on and off

实验表明:本系统对干涉条纹形状没有特殊要求,在 $100\text{wave} \cdot \text{Hz}$ 以下振动环境中,可正常进行移相测量,测量误差不明显。在工厂和科研院所的实验中,干涉仪能正常进行采样、补偿、计算,取得了较满意的结果。但是由于系统是用光强计算相位的,因而对激光光源和环境光强的变化比较敏感,有待进一步研究。

参考文献:

[1] Winzinowich P. Phase shifting interferometry in the presence of

vibration: a new algorithm and system[J]. Appl Opt, 1990, 29 (22):3271-3279.

[2] 吴新民,陈进榜. 用干涉法测量压电陶瓷(PZT)的动态频率响应特性[J]. 红外与激光工程, 2002, 31(3):203-206.

[3] 朱日宏,陈进榜,王青,等. 移相干涉术的一种新算法:重叠平均法[J]. 光学学报, 1994, 14(2):1288-1293.

[4] 张国雄,沈生培. 精密仪器电路[M]. 北京:机械工业出版社, 1988.

[5] 张雄伟. DSP 芯片原理与开发应用[M]. 北京:电子工业出版社, 2000.

[6] 何勇,王青,朱日宏,等. Windows 环境下干涉图像采集和处理[J]. 红外与激光工程, 2003, 32(2):203-206.

(上接第 387 页)



图5 武汉市局部图(参考)

Fig. 5 Partial image of Wuhan

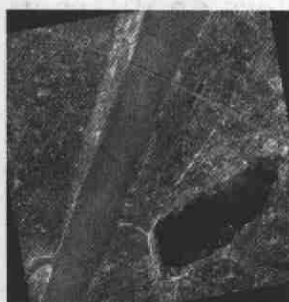


图6 按指定值变换后图

Fig. 6 Transformed image with designate value



图7 配准后的图

Fig. 7 Registered image



图8 叠加结果图

Fig. 8 Combined images

相位平移理论进行扩展用于求取图像间的旋转角、比例变换及偏移量,避免了寻找控制点对带来的烦琐与误差。尤其是遥感图像,背景复杂、轮廓不明显、特征提取困难,利用傅里叶变换可解决以上问题。通过两组实验验证了该方法的可行性和有效性。

参考文献:

[1] 朱述龙,张战睦. 遥感图像获取与分析[M]. 北京:科学出版社, 2000.

[2] Harold S Stone, Michael T Orchard, Ee-Chien Chang, et al. A fast direct Fourier-based algorithm for subpixel registration of images [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2001, 39(10): 2235-2243.

[3] Srinivasa Reddy B, Chatterji B N. An FFT-based technique for translation, rotation, and scale-invariant image registration [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 1996, 5(8): 1266-1271.

[4] Harold S Stone, Robert Wolpov. Blind cross-spectral image registration using prefiltering and Fourier-based translation detection [J]. IEEE Transactions on Geosciences and Remote Sensing, 2002, 40(3): 637-650.

3 结论

提出了一种基于傅里叶变换的图像配准方法,将