

干涉仪环境振动的外差检测与自适应控制*

吴 栋^{1,2} 朱日宏¹ 陈 磊¹ 何 勇¹ 姬会东¹

(1 南京理工大学电光学院, 南京 210094)

(2 解放军镇江船艇学院教研部, 镇江 212003)

摘 要 测试环境的微振动干扰会引起干涉图的抖动, 影响移相干涉仪的测量准确. 设计了一种内嵌于移相干涉仪的外差测振光路, 对干涉仪所受环境微振动进行实时检测; 采用单片 RF/IF 集成芯片对两路 40 MHz 的模拟外差信号直接进行比相, 简化了通常使用的数字测相方法. 在测得环境振动信息后, 运用 DSP 技术和自适应信号处理的方法, 实现了基于 PZT 移相器的自适应振动控制, 实验结果表明干涉仪对幅频积不大于 100 waves · Hz 的环境振动的抑制能力达 -39 dB.

关键词 移相干涉仪; 环境振动; 外差测振; 相位检测; 自适应振动控制

中图分类号 TH744.3 **文献标识码** A

0 引言

移相干涉术是一种时域测量方法, 对外界环境的干扰十分敏感, 微弱的环境振动会导致干涉图样的抖动、模糊, 使得 CCD 在采集干涉图样过程中引入随机相位误差, 难以保证移相干涉测量的准确. 随着干涉测量应用场合的拓展, 尤其是对那些非光学防震平台上或用于车间现场精密测试的干涉仪, 除了必要的隔振措施外, 应该采取特殊的主动抗振技术^[1,2]. 在这类技术中, 首先应该测出振动的相位和幅度, 移相功能和振动的补偿可以由 PZT 光学移相器完成. 在微小振动的测量技术中, 激光外差干涉测振通常是最灵敏的方法, 为了便于对外差信号进行处理, 可以采用双频激光器或用两只声光调制器来获得频差较小的相干光源^[3,4], 为了简化设计也可以采用一只声光调制(移频)器来获得两种不同频率的相干光. 声光移频大多在 40 MHz 以上, 这时一般需要对外差信号再进行电子外差预处理并采用较为复杂的数字式相位测量技术^[5,6]. 本文将激光外差干涉测振光路嵌入平面移相干涉仪中, 采用新型单片 RF/IF 集成芯片 AD8302 直接对两路高频模拟外差电信号(40 MHz)进行比相, 无须进行电子外差预处理和数字相位测量, 在进行平面干涉测量的同时也得到了干涉仪所受环境振动信息. 在测得环境振动信息后, 运用 DSP 技术和自适应信号处理的方法, 实现了基于 PZT 移相器的自适应振动控制.

1 实验装置

具有环境振动测量功能的移相式平面干涉仪实

验装置如图 1 所示. 它的主体是泰曼-格林(Twyman-Green)型平面干涉仪, 由图中 He-Ne 激光器、扩束器、分光镜(BS1、BS7)、标准参考镜(附在 PZT 移相器前面)、被测件、成像物镜、光阑、CCD 等器件组成. 通常, 被测件与干涉仪主机放置于不同的平台上, 这样环境振动将导致参考波前与测试波前之间光程差发生变化. 为了实现测出这种光程差的变化, 在激光输出的初始路径上放入声光调制器并调整好方位, 使入射光通过声光调制器后产生 Bragg 衍射, 调节声功率, 使得出射的一阶衍射光占总的光功率的 5% 左右, 大约占总的光功率 75% 的零阶光通过中央有小孔的反射镜, 经扩束准直后作为干涉仪的工作光源. 一阶衍射光经反射、分光(BS4)后分别作为两只光电雪崩管(APD1、APD2)的外差本振光. 接着在干涉仪的参考臂和测试臂中分别插入两只分光镜(BS2、BS3), 这样从标准参考镜返回的参考光有一部分被分光镜(BS2、BS5)反射后作为 APD1 的外差信号光; 同样, 从被测件返回的测试光有一部分经分光镜(BS3、BS6)反射后作为 APD2 的外差信号光. APD1、APD2 输出的两路外差电信号馈入相位比较芯片 AD8302, 两路外差信号之间相位的变化正是

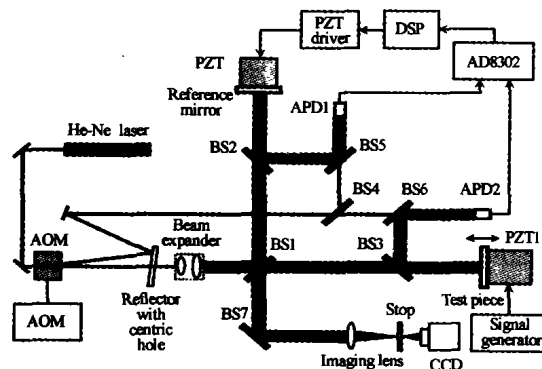


图 1 移相干涉仪环境振动的外差检测与控制系统的原理图
Fig. 1 Heterodyne vibration measurement and control system for phase shifting interferometer

* 国防军工计量“十五”重点项目资助(项目编号:60803134)
Tel:025-84315427 Email:wudong1000@yahoo.com.cn
收稿日期:2003-10-29

由环境振动引起的,由此就得到了关于环境振动的信息. 声光调制器用作光学移频器,移频频率为 40 MHz,这样外差电信号的频率亦为 40 MHz. 将振动信息馈给 DSP 设备,DSP 采用自适应 LMS 算法对振动信号进行处理后输出反馈信号,反馈信号经 PZT 驱动器作用到 PZT 移相器上,推动参考镜以补偿环境振动所引起的光程差变化,从而可得到稳定的干涉条纹图.

2 外差信号的处理

实验装置中,光电探测模块由光电雪崩管(APD)、前置放大器、温度补偿电路组成. 外差本振光和信号光在 APD 的光敏面上进行光学混频,输出外差信号

$$I_1 = a_1 \cos(\omega t + \varphi_{s1} - \varphi_{o1}) = a_1 \cos(\omega t + \Phi_1) \quad (1)$$

$$I_2 = a_2 \cos(\omega t + \varphi_{s2} - \varphi_{o2}) = a_2 \cos(\omega t + \Phi_2) \quad (2)$$

式中, ω 是照射在 APD 光敏面两相干光的光频差(40 MHz). φ_s 、 φ_o 分别是到达 APD 的信号光和本振光的相位. 实验中,一级衍射光到达两只 APD 的光程不变化,因此 φ_{o1} 、 φ_{o2} 同步变化,即 $\varphi_c = \varphi_{o2} - \varphi_{o1} = \text{常量}$. 所以,两外差信号之间的相位差可以表示为

$$\Delta\varphi = \Phi_1 - \Phi_2 = \varphi_{s1} - \varphi_{s2} + \varphi_c = \frac{2\pi L_1}{\lambda} - \frac{2\pi L_2}{\lambda} + \varphi_c = \frac{2\pi x}{\lambda} + \text{常量} \quad (3)$$

式中 L_1 、 L_2 分别是到达 APD1 的参考光和到达 APD2 的测试光的光程, x 是这两者的光程差, x 是时域函数,当存在振动时 x 随时间变化. 由式(3)可知,只要测出两路外差信号之间的相位差 $\Delta\varphi$,就可以得到振动所引起的光程差的变化. 因此,实验系统的一个要点是对两路外差信号进行比相,以期得到振动的信息.

实验中选取集成电路 AD8302 作为两路外差信号相位比较的核心元件^[7]. AD8302 是 ADI 公司近年推出的用于 RF/IF 幅度和相位测量的单片集成电路. 它由精密匹配的两个宽带对数检波输入放大器、一个乘法式鉴相器、输出放大器组、一个偏置单元和一个输出参考电压缓冲器等组成,能测量从低频到 2.7 GHz 频率范围内的两路输入模拟信号之间的幅度比和相位差. 该器件将精密匹配的两个对数放大检波器集成在一块芯片上,因而可将误差源及相关温度漂移减小到最低限度,幅度测量的动态范围扩展到 60 dB,而相位测量范围可达 180 度. 这里只利用它的相位测量功能.

在 AD8302 内部中,两外差信号由对数放大器放大,其结果送入乘法器,乘法器的输出经积分后得

到与两路外差信号相位差有关的信号,此信号以电压形式输出

$$V_{\text{PHS}} = -R_f I_\phi (|\Phi_1 - \Phi_2| - 90^\circ) + V_{\text{CP}} \quad (4)$$

式中, V_{PHS} 为相位电压,其范围为 0 ~ 1.8 V; $R_f I_\phi$ 代表相位比较输出斜率,大小为 10 mV/度;中心点 V_{CP} (0.9 V) 对应 90 度,0 ~ 180 度的输入相位范围对应于 1.8 ~ 0 V 的输出电压范围. 由于 AD8302 输出带宽高达 30 MHz,因此可以对环境振动引起的波前相位变化进行实时检测. AD8302 输出的相位电压信号可在数字示波器上显示,也可由 A/D 转换器转换为数字信号送入 DSP 设备进行处理.

3 振动的测量

调整光路,使到达 APD 的本振光和信号光共轴,以满足激光外差干涉的空间条件. 在被测件的光轴方向加上人工振源,振源由压电陶瓷致动器(PZT1)及其驱动信号发生器组成. 当给 PZT1 加上三角波电压信号(图 2 中第一通道)时,被测件作往复运动,引起测试臂光程的周期性变化(变化范围设定在 1.5λ 左右). 启动外差测振系统,两只 APD 均输出 40 MHz 的高频模拟外差信号,将两路外差信号馈给 AD8302 进行相位比较,比较的结果如图 2 第二通道所示. 由图 2 可知,系统能够进行正确的振动相位测量.

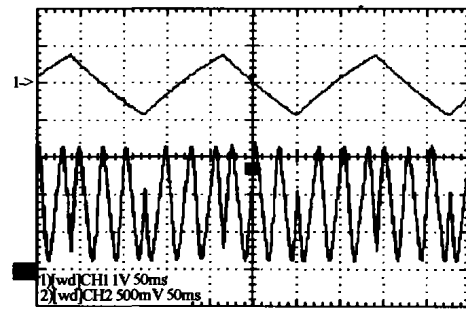


图 2 测试镜作三角波振动时波前相位的变化(示波器图形)
Fig. 2 Phase detecting of trigonal wave vibration from test mirror mounted on a PZT actuator (CH1-X:50ms/div, Y:1V/div. CH2-X:50ms/div, Y:500mV/div)

4 振动的自适应控制

将反映振动信息的相位电压信号经 A/D 转换后输入高速 DSP 设备. 在 DSP 内部,运用自适应处理的办法对振动进行实时分析、预测,同时输出反馈信号,此信号经 D/A 转换后馈给 PZT 驱动器控制 PZT 光学移相器对光程差的变化进行补偿,使波前相位稳定在预设值上,从而得到稳定的条纹干涉图.

在自适应信号处理中运用了典型的 LMS 滤波算法^[8],其数学过程如下

$$y(t) = W^T(t)X(t) \quad (5)$$

$$e(t) = s(t) - X^T(t)W(t) \quad (6)$$

$$\mathbf{W}(t+1) = \mathbf{W}(t) + 2ue(t)\mathbf{X}(t) \quad (7)$$

式中, $\mathbf{X}(t)$: 相位电压输入向量, $\mathbf{X}(t) = [x(t), x(t-1), \dots, x(t-N+1)]^T$; $\mathbf{W}(t)$: 自适应滤波器权系数向量, $\mathbf{W}(t) = [w_0(t), w_1(t), \dots, w_{N-1}(t)]^T$, 初始值任意; $y(t)$: 自适应数字滤波器的输出信号; $s(t)$: 预期信号, 这里指预设相位; $e(t)$: 误差信号, $e(t) = s(t) - y(t)$; u : 自适应步长或收敛因子, 实验中取 $u = 0.01$; N : 自适应数字滤波器的阶数(长度), 取 $N = 128$.

在 PZT1 上加上正弦信号, 被测件产生振动, 参考臂和测试臂之间的光程差随之变化, 启动自适应振动控制系统, 用示波器观察相位电压的变化情况. 实验中自适应振动控制过程如图3所示, 图中左半

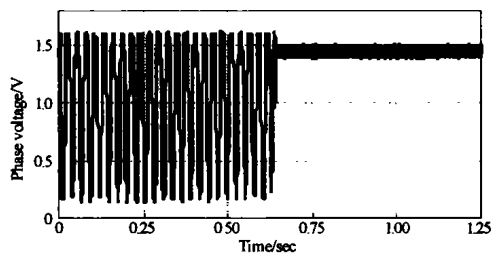


图3 自适应振动控制过程

Fig. 3 The process of adaptive vibration controlling

部分表示相位电压存在波动(振动未受控), 右半部分表示相位电压稳定在预设值上(振动受控). 可用分贝数来衡量这种自适应干涉系统的振动抑制比 ρ

$$\rho = 10 \log_{10} \frac{P_2}{P_1} = 10 \log_{10} \frac{0.0055}{41} \approx -39 \text{ dB} \quad (8)$$

式中 P_1 表示振动受控前相位电压的最大功率谱密度, P_2 表示振动受控后相位电压的最大功率谱密度. 从式(8)可知通过自适应振动控制, 环境振动对干涉仪的影响衰减了约 39 dB. 改变加在 PZT1 上正弦信号的频率和幅度, 观察系统对振动的抑制能力, 实验结果表明: 对于幅频积不大于 100 waves · Hz 的环境振动, 所建立自适应干涉系统的振动抑制能力在 -39 dB 左右; 对于强度更大的振动, 由于受到 PZT 移相器机械响应速度和 DSP 运算速度的限制, 系统的振动抑制能力有所降低.

5 结束语

本文利用移相干涉仪光学系统本身并增加少量

的分光元件, 将激光外差测振系统嵌入移相式平面干涉仪中, 同时采用新型单片集成电路直接对两路 40 MHz 的高频模拟外差信号进行相位比较, 无须进行电子外差预处理和数字式相位测量, 在进行平面干涉测量的同时也得到了干涉仪所受环境微扰的振动量. 在得到振动信息后, 借助 DSP 技术运用自适应处理的方法对振动信息进行分析、预测, 输出反馈控制信号, 驱动 PZT 光学移相器对光程差的变化进行补偿, 使波前相位稳定在预设值上. 如果改变相位预设值的大小就可以实现干涉仪的移相功能.

参考文献

- 1 吴栋, 陈磊, 陈进榜, 等. 干涉仪自适应抗振的空间移相术. 光子学报, 2003, 32(8): 969 ~ 972
Wu D, Chen L, Chen J B, et al. *Acta Photonica Sinica*, 2003, 32(8): 969 ~ 972
- 2 Cole G C, Burge J H, Dettmann L R. Vibration stabilization of a phase shifting interferometer for large optics. *SPIE*, 1997, 3134: 438 ~ 446
- 3 Ngoi B K A, Venkatakrishnan K. An acousto-optic vibrometer for measurement of vibration in ultra-precision machine tools. *Int J Adv Manuf Technol*, 2000, 16(4): 830 ~ 834
- 4 赵洋, 周挺, 李达成. 双波长绝对距离外差干涉仪的研究. 光学学报, 1999, 19(9): 1274 ~ 1278
Zhao Y, Zhou T, Li D C. *Acta Optical Sinica*, 1999, 19(9): 1274 ~ 1278
- 5 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. 计量学报, 1996, 16(1): 31 ~ 36
Zhao Y, Li D C. *Acta Metrologica Sinica*, 1996, 16(1): 31 ~ 36
- 6 戴高良, 殷纯永. 用于纳米测量的混合型外差干涉信号处理方法. 光学技术, 1999, 25(1): 21 ~ 27
Dai G L, Ying C Y. *Optical Technology*, 1999, 25(1): 21 ~ 27
- 7 Analog Devices, Inc. AD8302: LF-2. 7GHz RF/IF Gain and Phase Detector Data sheet. 2002
- 8 沈福民. 自适应信号处理. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2001. 48 ~ 50
Shen F M. *Adaptive Signal Processing*. Xi'an: Xidian University Press, 2001. 48 ~ 50

Heterodyne Measurement and Adaptive Control for Environmental Micro-vibration in Phase-shifting Interferometer

Wu Dong^{1,2}, Zhu Rihong¹, Chen Lei¹, He Yong¹, Ji Huidong¹

¹ School of Electronic Engineering and Photoelectric Technology, Nanjing University of Science & Technology, Nanjing 210094

² Zhenjiang Watercraft College of PLA, Zhenjiang 212003

Received date: 2003-10-29

Abstract In temporal phase-shifting interferometer, the environmental micro-vibration can lead to wobble of fringe pattern that usually results in erroneous surface measurements. In order to actively compensate the external vibration, a heterodyne vibration measurement system is embedded into the interferometer firstly. The real-time phase variation, owing to the relative vibration between reference and test wave-front, of two analog heterodyne signals up to 40 MHz is directly measured by a one-chip RF/IF phase detector that simplified the commonly used digital phase detecting method. With a DSP device and adaptive signal processing technique, the external vibration is compensated by a PZT phase-shifter. Test results show this adaptive interferometer works well in the process of external vibration no more than 100 waves · Hz, the vibration suppression factor is up to -39 dB.

Keywords Phase-shifting interferometer; Environmental vibration; Heterodyne vibration measurement; Phase detecting; Adaptive vibration control



Wu Dong received M. S. degree in physical electronics from Nanjing Normal University, Nanjing, China, in 2001. He joined Zhenjiang Watercraft College, Zhenjiang, China, as an assistant professor in 1994, now he is a lecturer. He is pursuing Ph. D. degree in optical engineering at Nanjing University of Science and Technology, Nanjing, China. His research interests include optical testing and laser applications.