

文章编号:1002-2082(2014)05-0858-04

基于外差干涉的微振动测量技术研究

刘丹¹, 郑宾^{1,2}, 郭华玲^{1,2}, 刘辉¹, 刘乃强¹

(1. 中北大学 信息与通信工程学院, 山西 太原 030051;

2. 中北大学 电子测试技术重点实验室, 山西 太原 030051)

摘要:针对外差干涉的微振动测量存在稳定性低、严重受环境噪声影响等缺点,提出了对光路的改进方案。根据差分原理将其改为双光路,消除环境噪声的干扰;通过偏振分光棱镜(PBS)将椭圆偏振光变为线偏光,提高干涉信号幅值;改进频移装置(AOM),抑制频率漂移;增加光阑,滤除杂散光,提高系统信噪比。通过探测5 kHz压电陶瓷振动信号,以及2.5 MHz高频激光超声信号进行实验验证,结果表明:信号稳定且无纹波,系统分辨率为2.3 nm,信噪比提高16.7倍。两路干涉信号幅值分别为552 mV和736 mV,较传统外差干涉信号幅值提高近10倍,有利于纳米量级微振动信号的检测。

关键词:微振动测量;外差干涉;激光超声;线偏振光

中图分类号:TN247

文献标志码:A

doi:10.5768/JAO201435.0503006

Micro-vibration measuring technology based on heterodyne interference

Liu Dan¹, Zheng Bin^{1,2}, Guo Hualing^{1,2}, Liu Hui¹, Liu Naiqiang¹

(1. School of Information and Communication Engineering, North University of China,

Taiyuan 030051, China; 2. National Key Laboratory for Electronic Measurement Technology,

North University of China, Taiyuan 030051, China)

Abstract: Aiming at the problem that the micro-vibration based on heterodyne interference has low stability and is easily impacted by environmental noise, the ideas of optical path improvement were given. According to the difference principle, the single optical path was converted to a double optical path, in which the environmental noise was eliminated; The elliptically polarized light was changed into linearly polarized light to improve the interference signal amplitude by the polarization splitting prism (PBS); The acousto-optic modulator(AOM) was improved to inhibit frequency drift; The stray light was suppressed by using diaphragm filters so as to improve the system signal-noise ratio (SNR). The verification experiments were conducted through detecting 5 kHz piezoelectric vibration signal and 2.5 MHz laser ultrasonic signal . Experimental results indicate that signal is stable and has no ripple, the resolution is 2.3 nm and the SNR has improved by 16.7 times. The amplitudes of double-channel heterodyne interferometer signal is 552 mV and 736 mV, respectively, which are larger than traditional one nearly 10 times, it is advantageous to measure nanometer micro-vibration signals.

Key words: measurement for micro-vibration; heterodyne interference; laser ultrasonic; linearly polarized light

收稿日期:2014-05-23; 修回日期:2014-07-08

作者简介:刘丹(1989—),女,辽宁阜新人,硕士研究生,主要从事激光超声无损检测技术研究工作。

E-mail:liudanzhuimeng@sina.com.

引言

激光外差干涉技术因具有测量速度快、非接触、测量精度高等优点,广泛用于微弱振动信号的检测。目前美国 ZYGO 公司研制的激光干涉仪采用传统 Michelson 干涉仪原理,在单光路中利用声光调制法获得双频,分辨率可达 0.31 nm^[1]。随着超精密检测技术的发展,对激光外差干涉仪的测量精度提出了更高的要求^[2]。大量实验研究表明外差系统的实用性主要受其稳定性和环境噪声的影响。此外,频移装置的频率漂移将引起干涉信号的不稳定^[3],杂散光会导致光路噪声大,降低系统的信噪比,影响干涉效率^[4]。本文旨在对传统外差干涉微振动测量光路进行改进,提高系统的测量精度。

1 外差干涉原理

传统外差干涉光路如图 1 所示,激光器发出激光进入声光调制器 AOM 产生移频,从 AOM 出射的光被分成了两束^[5],一束为参考光,其频率为

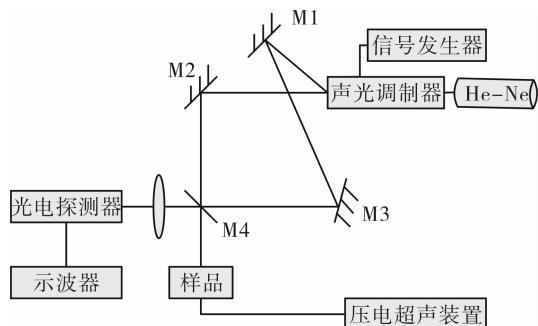


图 1 外差干涉光路示意图

Fig. 1 Scheme of heterodyne interferometer

ω_l ,经 M1 和 M3 反射,进入分束器 M4。另一束光经 M2 反射,经过分束器 M4 入射到贴有反射镜的样品上,作为信号光,其频率为 ω_s ,信号光反射回 M4,最终与参考光同时进入光电探测器产生干涉信号^[6]。光电探测器输出含有相位调制的电流信号,其表达式为^[7]

$$\begin{aligned} i_p = & \alpha [E_l(t) + E_s(t)]^2 = \alpha \{ A_l^2 \cos^2(\omega t + \phi_l) + \\ & A_s^2 \cos^2[\omega t + \phi_s - \frac{4\pi}{\lambda} u(t)] + \\ & A_l A_s \cos[2\omega t + \phi_l + \phi_s - \frac{4\pi}{\lambda} u(t)] + \\ & A_l A_s \cos[\phi_l - \phi_s + \frac{4\pi}{\lambda} u(t)] \} \end{aligned} \quad (1)$$

式中:第 1 项和第 2 项的平均值为 $(A_l^2 + A_s^2)/2$,相

当于直流分量;第 3 项为和频项,可以用低通滤波器滤去; α 为光电转换系数,为简化令 $\alpha=1$,所以光电流为

$$i_p = \frac{A_l^2 + A_s^2}{2} + A_l A_s \cos[\phi_l - \phi_s + \frac{4\pi}{\lambda} u(t)] \quad (2)$$

由(2)式可以看出,光电探测器的输出电流由 3 部分组成,包括直流成分和相位调制的交流成分,其中直流项可以从测量中去除,而相位调制信号可经过调相解调后得到 $u(t)$ ^[8]。

2 外差干涉光路的改进

针对传统外差干涉光路存在稳定性低、严重受环境噪声影响等缺点,对其进行改进。

首先,改为双光路,外差干涉检测技术对外界环境的干扰十分敏感,环境振动会导致采集干涉信号过程中引入随机相位误差,而且以传统方法利用声光调制器的驱动电信号作为参考信号,难以保证预期测量精度^[9]。利用差分原理改进后的双光路可以解决上述问题。

其次,利用偏振分光棱镜 PBS 代替波片改变激光偏振态,增强干涉信号。使用波片时需要对准光轴,调试过程复杂,使用 PBS 操作简单易行,还避免了波片引入非线性误差^[10]。

第三,声光调制器的不稳定会导致衍射光级次混叠,带来新的误差。因此,使用高精度声光调制器 TSGMN-5,驱动信号由高功率信号发生器提供。

第四,在声光调制器后加入精密光阑,只允许衍射光中 0 级光和 +1 级光进入光路,消除干涉信号中杂散光的干扰,有效抑制了光学噪声。改进的光路如图 2 所示。

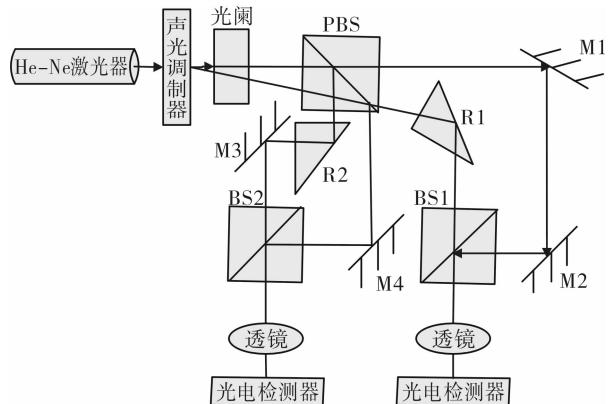


图 2 改进后外差光路示意图

Fig. 2 Scheme of improved heterodyne interferometer

3 实验结果与分析

为了检验改进光路的效果,首先对模拟微振动信号进行检测。实验过程中采用压电陶瓷提供模拟振动信号,通过外差干涉光路进行采集,送入示波器,可以观察到双光路的干涉信号如图3所示。改进的两路干涉信号幅值分别为552 mV和736 mV,相同条件下传统外差干涉信号的幅值为66 mV,信号幅值提高近10倍,对微弱超声信号的检测过程不再需要额外的放大电路,降低了实验的复杂性和成本。两路信号幅值接近而且频率稳定,它的频率为79.37 MHz,与理想的80 MHz的频率相对误差只有0.7%,降低了频率不稳定对解调的影响,有利于下一步的信号处理。



图3 改进外差干涉光路信号

Fig. 3 Signal of improved heterodyne interferometer

用matlab解调出振动信号,选取2组典型的信号来对比,分别是幅值为100 mV频率为5 kHz的信号解调处理波形,如图4、图5所示。

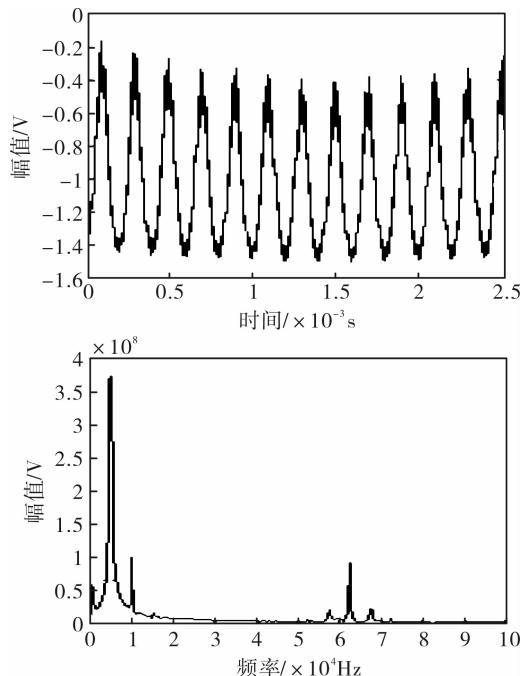


图4 原始光路采集振动信号图

Fig. 4 Vibration signals detected by traditional heterodyne interferometer

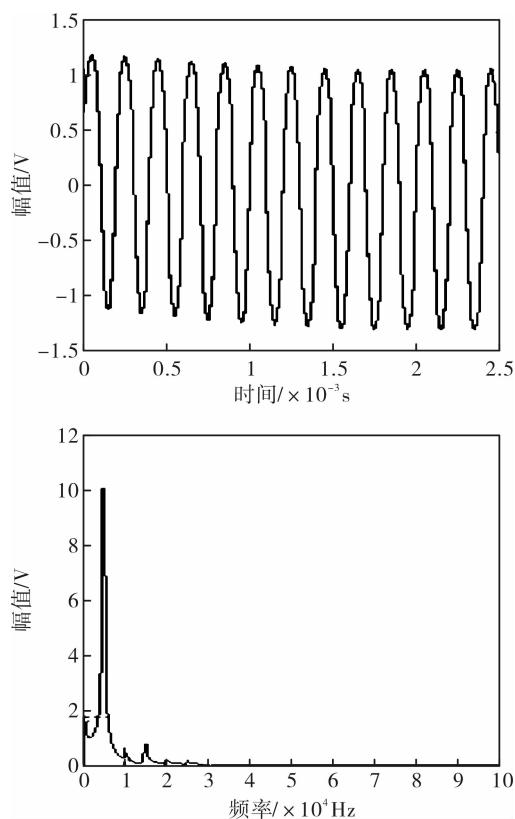


图5 改进光路采集振动信号图

Fig. 5 Vibration signals detected by improved heterodyne interferometer

实验结果表明,传统光路得到的振动信号纹波严重,低频漂移导致幅值抖动高达0.2 mV,严重影响对微弱振动信号强度的提取和分析。改进后光路得到的振动信号时域波形无纹波,不存在低频漂移趋势。传统光路探测的频域波形中除5 kHz频率成分外,还有噪声频谱成分。而改进后光路探测信号的主频为5 kHz,虽然也存在其他频率成分,但是旁瓣的幅值与主频相差10倍,极大地降低了噪声干扰。通过压电陶瓷的标准振动位移与实验测量位移的对比,得到系统分辨率为2.3 nm。

对高频激光超声信号进行探测,实验中采用Nd:YAG脉冲激光器作为激励源,波长1064 nm,脉宽7 ns,能量150 mJ,激励被测样品产生超声信号。用改进前后外差光路对超声波进行探测,对比结果如图6、图7所示。

超声信号频率高达2.57 MHz,传统光路探测结果噪声信号幅度在0.2 V左右,信噪比为7.5,由环境振动引起的震荡时间长达10 μs,而新型双光路探测结果中噪声幅度小于0.04 V,信噪比125,干扰震荡时间仅2 μs。实验结果表明新型双光路外差干涉检测系统的信噪比提高了16.7倍。

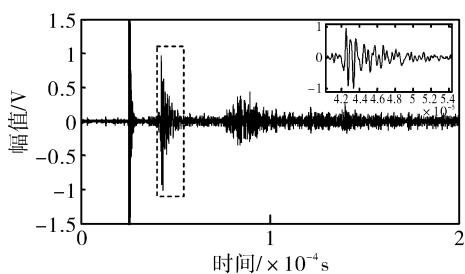


图 6 传统外差干涉光路对超声信号探测结果图

Fig. 6 Ultrasonic signals detected by traditional heterodyne interferometer

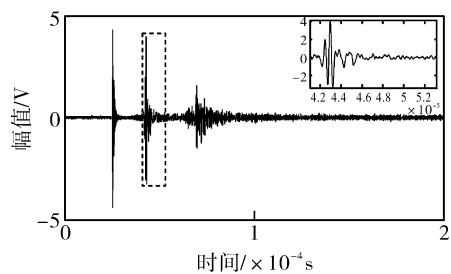


图 7 改进外差干涉光路对超声信号探测结果图

Fig. 7 Ultrasonic signals detected by improved heterodyne interferometer

4 结论

新型双光路激光外差干涉微振动检测系统消除了环境振动对外差干涉信号的影响,利用 PBS 改变偏振态,提高干涉信号幅值,操作简单易行。增加光阑避免了杂散光的干扰,干涉信号更纯净,使得滤波处理得以简化。实验结果表明新型双光路外差干涉系统可提高检测的精度及信噪比,有利于纳米量级微振动信号检测。

参考文献:

- [1] Frank C D. High-resolution, high-speed, low data age uncertainty, heterodyne displacement measuring interferometer [J]. Electronics, 1998, 25 (11): 1527-1531.
- [2] Zhong Zhi, Tan Jiubin. Study on residual cumulative error in fast ultra-precision measurement by laser interference[J]. Journal of Optoelectronics Laser, 2005, 16(3):328-331.
- 钟志, 谭久彬. 激光干涉快速超精密测量残余累计误差研究[J]. 光电子激光, 2005, 16(3):328-331.
- [3] Huo Lei, Zeng Xiaodong, Feng Zhejun. Non-reciprocal characteristics of acousto-optic devices in laser heterodyne interferometer[J]. Journal of Optoelectronics Laser, 2011, 12:1765-1768.
- 霍雷, 曾晓东, 冯喆君, 等. 激光外差干涉中声光器件非互易特性研究 [J]. 光电子激光, 2011, 12: 1765-1768.
- [4] Suat T. Heterodyne interferometric technique for displacement control at the nanometrescale[J]. Review of Scientific Instruments, 2003, 74(11): 4876-4880.
- [5] Gong Yuliang, Li Hongwei, Bai Shiwu. Principle, method and experiment of ultrasonic displacement measurement by laser heterodyne interferometer[J]. Acta Acustica, 1996, 21(3):259-264.
- 龚育良, 李红卫, 白世武. 激光外差探测超声位移的原理、方法和实验 [J]. 声学学报 1996, 21 (3): 259-264.
- [6] Monchalin J P. Heterodyne interferometer laser probe to measure continuous ultrasonic displacement[J]. Rev. Sci. Instrum. ,1985,56(4):543-546.
- [7] Chen Hongfang, Ding Xuemei, Zhong Zhi, et al. High acceleration ultra-precision measurement model in laser heterodyne interferometer[J]. Opto Electronic Engineering, 2007,34(8):72-75.
- 陈洪芳, 丁雪梅, 钟志, 等. 高加速度超精密激光外差干涉测量模型[J]. 光电工程, 2007,34(8):72-75.
- [8] Xu Su'an, Chen Le, Sun Jian, et al. Polarimetric interferometer for measuring nonlinearity error of heterodyne interferometric displacement system[J]. Chinese Optics Letters, 2013, 11(6): 197-201.
- [9] Hou Wenmei, Wang Jun. Subdivision and elimination of nonlinearity in heterodyne interferometers[J]. Acta Metrologica Sinica, 2007, 28(3):210-215.
- 侯文政, 王俊. 外差激光干涉仪非线性的细分和消除 [J]. 计量学报, 2007, 28(3):210-215.
- [10] Zhou Xiaoshan, Li Yan. Absolute distance measurement by combining phase distance meter and heterodyne interferometer[J]. Journal of Applied Optics, 2010,31(6):1013-1017.
- 周小珊, 李岩. 相位激光测距与外差干涉相结合的绝对距离测量研究 [J]. 应用光学, 2010, 31 (6): 1013-1017.