

光拍窄带检测小位移*

万 炼 汤俊雄 吴义芳 施 清 郑乐民

(北京大学无线电电子学系, 100871)

提要: 本文给出两种检测小振动位移的方法, 其中光拍振幅窄带检测小位移灵敏度达 5.2×10^{-4} nm (振动频率 2 kHz), 且从噪声谱测试角度比较了振幅检测法与相位检测法。

关键词: 光拍振幅检测, 光拍相位检测, 窄带检测

Small displacement measurement by optical heterodyne narrow band detection

Wan Lian, Tang Junxiong, Wu Yifang, Shi Qing, Zheng Lemin

(Department of Radio-Electronics, Peking University, Beijing)

Abstract: Two methods for measuring small vibration displacement are reported. The sensitivity of small displacement of optical heterodyne amplitude narrow band detection reaches 5.2×10^{-4} nm (2 kHz signal). The amplitude detection method is compared with the phase detection method by measuring noise spectrum.

Key words: optical heterodyne amplitude detection, optical heterodyne phase detection, narrow band detection

一、前 言

小位移检测有许多应用, 例如为检测固体材料性质, 可取材料样品作为干涉仪一面镜子, 由于被光源辐射加热而产生热位移^[1], 此外也可做超声位移^[2, 3]。由于这种位移往往十分微小 (如 $10^{-2} \sim 10^{-5}$ nm), 这就要求较高的检测灵敏度。文献[3]报道了用光拍相位检测法测量小位移, 灵敏度达 3×10^{-5} nm (振动频率 160 kHz)。由于低频噪声源的影响, 振动频率越低, 灵敏度的提高越困难, 我们曾用光拍振幅检测法^[4]得到小位移 (谐振动振幅) 检测灵敏度 5×10^{-3} nm (振动频率 2 kHz)。本文给出光拍相位窄带检测和光拍振幅窄带检测两种方案, 由于都采用了窄带滤波措施, 对光源及环境噪声都有很强抑制作用, 后者检测灵敏度较文献[4]有明显进展, 达 5.2×10^{-4} nm (振动频率 2 kHz)。本文这两种方案各具特点, 光拍相位窄带检测对光源功率噪声不敏感, 而光拍振幅窄带检测对光源相位噪声不敏感, 两种检测法灵敏度相差较大, 本文从噪声谱测试角度分析了振幅检测法较相位检测法更具优点。

收稿日期: 1988年12月26日。

* 本项目为国家自然科学基金资助项目。

二、实验原理

2.1. 光拍相位窄带检测

纵向塞曼激光器双频光束的左、右圆偏振光经 $\lambda/4$ 片变成相互垂直线偏振光, 经迈克尔逊干涉仪偏振棱镜分束, 两不同频率 (ω_1, ω_2) 光波分别分到干涉仪的两臂, 反射镜 (M_1, M_2) 前 $\lambda/4$ 片使光波偏振方向改变 90° , 以避免光返回激光器, 光检测器 D 获得的拍频信号为:

$$V = V_0 \cos(\omega_0 t + 2\pi/\lambda \cdot 2x_0 \sin \omega_m t + \phi_0) \quad (1)$$

式中 V_0 为与光强有关的直流电平, $\omega_0 = \omega_1 - \omega_2$ ($f_0 = 200 \text{ kHz}$), 镜片 M_1 与压电陶瓷 (PZT) 相连, 在驱动信号 f_m 作用下做微小振动, 光拍信号的相位部分包含了待测小位移 x_0 的信息。此光拍信号输入到锁相放大器 I , 其参考信号 (R) 为稳频激光器拍信号, 经锁相放大器相位解调后得到:

$$V = K_1 V_0 [(2\pi/\lambda) 2x_0 \sin \omega_m t + \Delta\phi + \Delta\phi'] \quad (2)$$

式中 K_1 为锁相放大器 I 的增益, $\Delta\phi'$ 为光源相位噪声, $\Delta\phi$ 为干涉仪光程抖动 (气流、振动等环境所致) 带来的相位噪声。由于锁相放大器低通滤波器带宽不可能取得很窄 (否则有用信号会失真), 因此, 再加了一个锁相放大器 II , 其参考频率为驱动频率 f_m , 仪器滤波器带宽取为 1 Hz 以进行窄带检测。由于未对干涉仪配备稳定光程的伺服回路, 为减少环境噪声影响, 尽量紧凑安排干涉仪光路, 且采取声屏蔽措施, 尽管如此, 由于环境噪声等原因, 仍会使第二级锁相放大器过载, 因此加了一级滤波器。最后输出的直流电平为: $A = K_1 K_2 K_3 (4\pi/\lambda) V_0 x_0$, 由此得到小位移检测极限公式:

$$x_{c \min} = \frac{A_{\min} \lambda}{4\pi V_0 K_1 K_2 K_3} \quad (3)$$

(3) 式中 K_2 为所加滤波器传递函数, K_3 为锁相放大器 II 增益, A_{\min} 为检测极限时锁相放大器 II 输出之直流电平。

2.2 光拍振幅窄带检测

光拍振幅检测与上述方案不同处在于待测小位移信息是加在拍频振幅之上的, 而锁相放大器则以振幅解调方式工作。为此迈克尔逊干涉仪分束器采用功率分束器, 纵向塞曼激光器双频光束同时射入两臂, 自干涉仪出射光束既有零拍干涉项又有拍频项, 电路 II 用低通滤波器取出零拍干涉项伺服锁定干涉仪, 使干涉仪光程差锁在干涉曲线斜率、最大值 (工作点) 处, 电路 I 用高通滤波

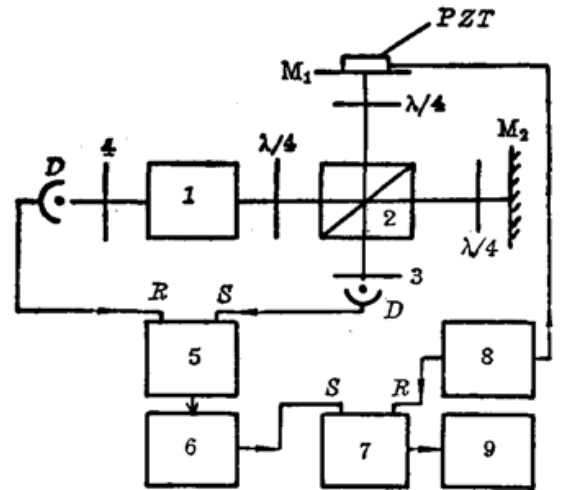


图1 光拍相位窄带检测示意图

1—激光器; 2—偏振分束器; 3、4—偏振片;
5、7—锁相放大器 I, II ; 6—滤波器; 8—信号发生器; 9—示波器

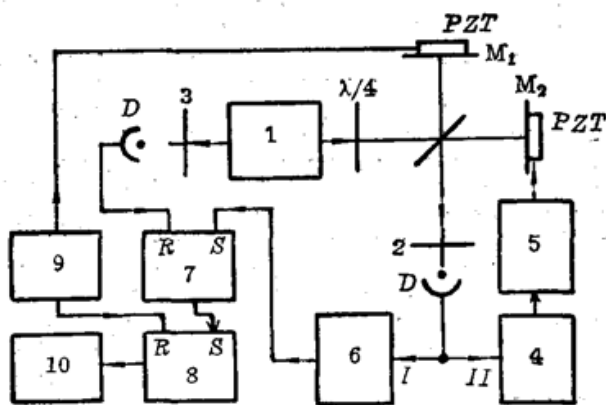


图2 光拍振幅窄带检测示意图

1—激光器; 2、3—偏振器; 4—低通滤波器;
5—稳光程伺服回路; 6—高通滤波器;
7、8—锁相放大器 I, II ; 9—信号发生器;
10—示波器

器取出之拍频项(检测项)为^[4]:

$$U = U_0 [1 + (4\pi/\lambda)\gamma x_0 \sin \omega_m t] \cos \omega_0 t \quad (4)$$

经锁相放大器振幅解调后得到小位移检测公式^[4]:

$$x_{0\min} = \frac{\lambda U_{\min}}{4\pi U_0 \gamma K \dot{v}} \quad (5)$$

为了窄带滤波,也加第 II 级锁相放大器,参考频率也取驱动频率 f_m , 这样最终小位移检测公式改为:

$$x_{0\min} = \frac{\lambda A_{\min}}{4\pi U_0 \gamma K'_1 K'_2} \quad (6)$$

(6)式中 A_{\min} 含意同(3)式, U_0 为工作点对应的直流电平^[4], γ 为干涉仪两臂光强不等所产生的反衬度因子, K'_1 、 K'_2 分别为两级锁相放大器增益。

本检测方案与文献[4]相比,有些明显好处:(1)由于实行了窄带滤波,检测电路带宽以 f_m 为中心限制在 1 Hz 内,这一措施对光源噪声有很强抑制作用。(2)环境噪声会使干涉仪光程差无规抖动,这会造成工作点不稳而带来测量误差^[4],而且会影响检测灵敏度。由于采取了窄带滤波措施,对环境噪声有很强抑制作用,环境噪声对检测灵敏度影响已大大下降,因此伺服回路主要目的就是稳定工作点。因而我们压缩了伺服回路带宽,其好处是避免了干涉仪镜架的机械共振(由于镜架装有弹簧,形成一个振子,伺服回路内的误差信号极易诱发机械共振,几百 Hz~几 kHz 的共振使小位移定标复杂化,往往要采取机械及线路措施来克服);且由于稳光程伺服回路带宽不包含检测频率 f_m ,文献[4]的带阻滤波器不再设置,这样可以在伺服回路带宽以外随意改变驱动频率。

三、实验结果

3.1. 光拍相位窄带检测

取驱动信号 $f_m = 2\text{kHz}$, 减小信号幅值,直到锁相放大器 II 输出直流电平和噪声电平相等时,相当于信噪比为 1,这样可得检测极限电平 A_{\min} 。把实验数据: $A_{\min} = 0.26\text{mV}$, $K_1 = 50$, $K_2 = 1.18$, $K_3 = 0.28$, $V_0 = 0.18\text{V}$, $\lambda = 632.8\text{nm}$ 代入式(3),得到小位移极限值:

$$x_{0\min} = 4.4 \times 10^{-8}\text{nm}$$

3.2 光拍振幅窄带检测

同上方法得到极限电平值 $A_{\min} = 2.62\mu\text{V}$, 再把其它数据: $U_0 = 0.55\text{V}$, $\gamma = 0.99$, $K'_1 = 140$, $K'_2 = 1/300$ 一起代入(5)式,得到小位移极限值:

$$x_{0\min} = 5.2 \times 10^{-4}\text{nm}$$

我们进行了小位移检测灵敏度($x_{0\min}$)随驱动频率 f_m 变化的实验,其结果如图 3 所示。由图可见,当检测频率增到 10 kHz 时,小位移检测灵敏度达 $2.2 \times 10^{-4}\text{nm}$,而在 1 kHz 以下频段,由于低频噪声源的影响,检测灵敏度明显下降。

驱动信号 f_m 仍取 2 kHz,但改变电压值,测量相应的压电陶瓷片振动振幅,位移-电压的线性关系很好,如图 4 所示。由实验数据得到压电陶瓷片的电调率(位移/电压)为 0.3nm/V ,此参数即陶瓷片的压电常数 d_{33} ,由电声学方法测值为 0.289nm/V ^[5],两者测试条件相同

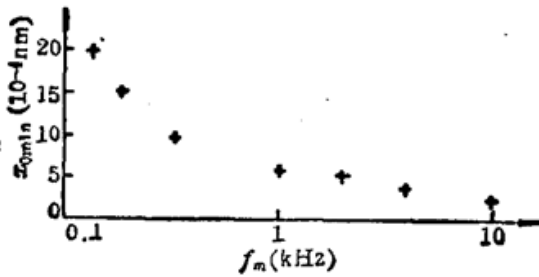


图3 小位移检测灵敏度随频率的变化关系

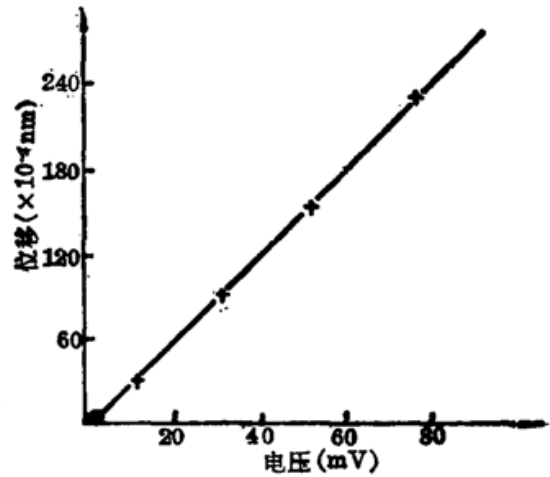


图4 位移与驱动信号电压的关系
+—不同电压的位移；●—小位移极限值

(都是远低于共振基频), 而陶瓷片的不一致性在 10% 左右, 可知两者相符较好。

四、两种检测方案比较

本文中光拍振幅检测与光拍相位检测都采用了窄带滤波技术, 但所得到的检测灵敏度几乎差了一个量级。小位移检测灵敏度与信号噪声有关, 还与信号处理技术手段有关。噪声主要来自三方面: ① 光源, ② 环境, ③ 电子线路。为克服电子线路噪声可使用低噪声器件并采用拍频检测法避开光接收器噪声, 这样前两方面噪声的影响就成为主要的了。下面分别对两种检测方案中起主要作用的噪声作一分析。

为讨论相位检测法噪声影响, 把(2)式略作改动:

$$V = K(I_0 + \Delta I) \left(\frac{4\pi}{\lambda} x_0 \sin \omega_m t + \Delta\phi + \Delta\phi' \right)$$

$$V \approx [KI_0 \Delta\phi + KI_0 \Delta\phi'] + K(I_0 + \Delta I) \frac{4\pi}{\lambda} x_0 \sin \omega_m t \quad (7)$$

(7)式中第二项为信号项, 中括号内与之并列的为噪声项, 由式可知影响检测灵敏度的噪声主要是光源相位噪声 $\Delta\phi'$ 和环境噪声 $\Delta\phi$, 分析表明相位检测法对光源功率噪声不敏感, 但功率噪声 ΔI 会改变小位移定标比值, 带来相对误差。

为探讨振幅检测法噪声影响, 写出与(4)式略有差异的光拍表达式:

$$V \propto (I_0 + \Delta I) \left[1 + \Delta\phi + \frac{4\pi}{\lambda} x_0 \sin \omega_m t \right] \cos(\omega_0 t + \phi')$$

锁相放大器振幅解调后得到:

$$V = K(I_0 + \Delta I) \left[1 + \Delta\phi + \frac{4\pi}{\lambda} x_0 \sin \omega_m t \right]$$

$$= KI_0 + (K\Delta I + KI_0 \Delta\phi + K\Delta I \Delta\phi) + \frac{4\pi}{\lambda} x_0 \sin \omega_m t \quad (8)$$

(8)式中与信号项(第三项)并列的第二项是噪声项, 可知影响检测灵敏度的主要是光源功率噪声 ΔI 和环境噪声 $\Delta\phi$, 分析表明振幅检测法对光源相位噪声不敏感。

为从实验上说明各种噪声影响, 我们用图5实验测试了噪声谱, 测试时令驱动信号 $f_m = 0$ 。

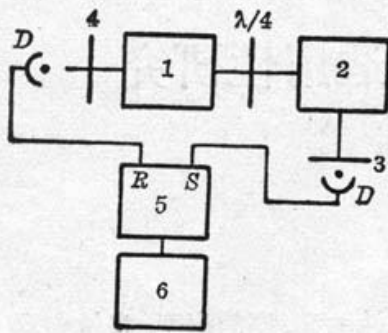


图5 噪声谱测试布局

1—激光器；2—迈克尔逊干涉仪；
3、4—偏振片；5—锁相放大器；
6—频谱仪

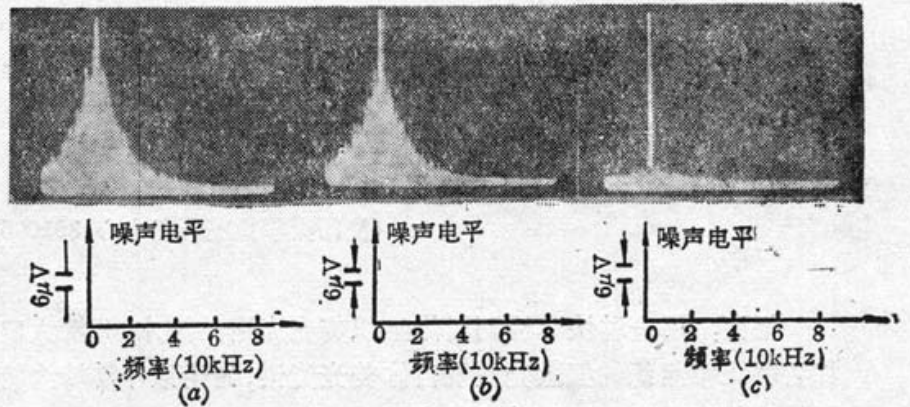


图6 噪声谱照片

为对噪声电平进行比较,几种情况下皆保持拍信号幅度及其它实验条件相同,测试结果由图6所示,分析几张噪声谱照片,可得出以下结论:

(1) 拍摄图(a)和图(b)时,锁相放大器以相位解调方式工作,图(a)和(b)的区别在于前者光束过干涉仪而后者不过。因此图(a)包含环境噪声 $\Delta\phi$ 和光源相位噪声 $\Delta\phi'$ (式(7)),而对图(b),双频光束未分束,环境噪声不再考虑,因此基本上反映的是光源相位噪声。两图相比,图(a)噪声电平有些增加,但并不特别显著,主要原因是环境噪声着重于低频和超低频段,在照片所显示的 kHz 频段,其影响已大大下降。

(2) 图(c)的拍摄条件是光束不经过干涉仪,锁相放大器以振幅解调方式工作。由于图(c)和(b)两情况光束皆未经干涉仪,环境噪声都不是主要的,图(b)主要是光源相位噪声,而图(c)主要是光源功率噪声(见式(8)),照片显示两者噪声电平在 kHz 频段相差较大。

(3) 由于实行了窄带滤波,对小位移检测灵敏度有影响的仅是 2kHz 频段 1Hz 带宽内的噪声,而此频段环境噪声影响不是主要的,影响两种方案检测灵敏度应是光源噪声,相位检测法对光源功率噪声不敏感,振幅检测法对光源相位噪声不敏感,而在 2kHz 频段相位噪声电平明显大于功率噪声电平,这就是振幅检测法灵敏度优于相位检测法的主要原因。

本文曾得到王永达、栾桂冬同志帮助,特此致谢。

参 考 文 献

- 1 M. A. Olmstead *et al.*, *Appl. Phys.*, **A32**, 141(1983)
- 2 C. Birnbaum, G. S. White, in *Research Techniques in Nondesruptive Testing*, ed. by R. S. Sharp (Academic, New York, 1984), Vol. 7, see p. 266 and 322 and references thereof
- 3 D. Royer *et al.*, *Appl. Phys. Lett.*, **49**(17), 1056(1986)
- 4 汤俊雄 *et al.*, *中国激光*, **16**(3), 156~158(1989)
- 5 W. P. Mason, *Physical Acoustics Principles and Methods* (Academic Press, New York and London, 1984), 202