

## 用稳光程干涉仪拍频检测小位移

汤俊雄 李爱国

(北京大学无线电系)

## Measurement of small displacement by an interferometer of stable optical path difference and heterodyne detection

Tang Junxiang, Li Aiguo

(Department of Radio and Electronics, Beijing University, Beijing)

**提要:** 本文报告了一个检测低频小位移的方案,以塞曼双频激光器为光源,用迈克尔逊干涉仪进行检测。为克服低频噪声影响,采用伺服环路锁定干涉仪光程差,且用拍频技术检测信号,对于3.3kHz的信号,检测最小位移达0.005nm。

**关键词:** 拍频, 稳光程

## 一、引言

检测微小振动位移一般采用光学零拍和光学拍频检测法。用迈克尔逊干涉仪实现零拍检测时,采用的是单频激光器,两臂光束具有相同频率。一面镜子被电信号驱动,其小位移信息通过检测干涉光强而获得,但低频噪声使低频小位移的检测较为困难。拍频检测法采用双频激光器,双频激光产生拍频信号,有意义的小位移信息被载(拍)频移到较高的频率范围内处理。这种拍频检测技术避开了某些低频噪声源的干扰,因而优于零拍检测法。文献[1]使用拍频检测技术,对频率为2kHz的正弦信号进行了小位移检测,其检测分辨率达到了0.12nm。

环境噪声是诸多噪声中的主要因素,实验中观测到,由于环境噪声的干扰,干涉仪程长的抖动达几nm,这无疑会妨碍微小位移信

号的检测。为此采用了伺服回路锁定干涉仪程长,大大提高了其稳定度,并能有效地选择工作点,从而使检测数据的准确度大为提高。本方案把稳光程技术和拍频检测结合起来,使检测分辨率得到较大提高。

## 二、实验原理与特点

## 2.1. 实验装置与工作原理

用纵向塞曼激光器作光源,其左、右旋圆偏振光通过偏振片后能方便地产生拍频信号。实验布局如图1所示。激光束到达分束器M时,光场具有下面的形式:

$$U(t) \propto (e^{j2\pi f_1 t} + e^{j2\pi f_2 t})$$

式中 $f_1$ 、 $f_2$ 分别为双频激光束的频率。经过M分束及 $M_1$ 、 $M_2$ 反射镜后, $U(t)$ 分解为 $U_1(t)$ 、 $U_2(t)$ 、 $U_1(t) = A_{10} e^{j\phi_1} U(t)$

收稿日期:1987年10月5日。

• 属国家自然科学基金资助项目。

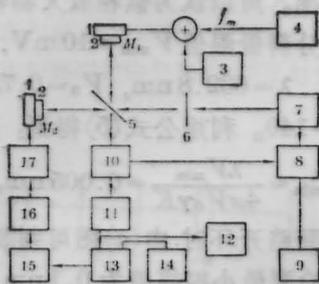


图1 小位移检测实验布局

- 1—压电陶瓷 2—镜片 3—高压源 4—信号发生器  
5—分束器 6—偏振片 7—塞曼激光器 8—锁相放大器  
9—示波器 10—光接收器 11—低通滤波器  
12—工作点监测 13—差分放大器 14—参考电平  
15—带阻滤波器 16—积分器 17—高压放大器

$$U_2(t) = A_{20} e^{i\phi_2} U(t).$$

$\phi_1, \phi_2$  分别是经过镜子反射后所引起的位相变化。双光束干涉, 探测器接收干涉光强  $I(t) \propto |U_1(t) + U_2(t)|^2$ 。有:

$$I(t) = I_0 [1 + \gamma \cos(\phi_1 - \phi_2)] + I_0 [1 + \gamma \cos(\phi_1 - \phi_2)] \cos 2\pi f_0 t \quad (1)$$

式中  $\gamma$  为相干迭加两光束振幅不等所引起的反衬度因子;  $f_0 = |f_1 - f_2|$ , 为双频激光束的差频, 即拍频频率。(1)式中第一项为零拍项, 等效于同频激光束的干涉项; 第二项是不同频率激光束的拍频项。可以看出, 拍频项的振幅和零拍项振幅相同。它与干涉仪两臂的相位差  $(\phi_1 - \phi_2)$  有关, 即包含着对镜子加调制后的小位移信息。利用它可得到小位移检测结果。为了避开低频噪声的影响, 在检测位移信息时不采用(1)式中的第一项, 而采用第二项。用锁相放大器振幅解调技术取出第二项的振幅值, 获得小位移信息, 这就是拍频检测法。另外, 为了稳定干涉仪程长, 我们从光强信号里用低通滤波器检测出(1)式第一项, 利用它锁定干涉仪程长。这样有利于抑制环境噪声、避开低频噪声源, 提高检测分辨率。

## 2.2 锁定干涉仪程长与选择工作点

和激光外腔稳频技术<sup>[2]</sup>不同, 我们把干涉光强-光程差曲线作为鉴别程长曲线, 把干

涉仪光程差锁在干涉曲线一侧之中点(工作点), 干涉仪光程差偏离锁定点会产生误差信号, 通过伺服环路中的压电陶瓷调节镜片位置, 使光程差值复原, 压电陶瓷镜片起调程长作用。

图2示出干涉光强随光程差的小振动而变化的情况, 图中Q为工作点。由于Q选在干涉强度曲线一侧之中点, 即斜率最大处, 变化光程差可得到最大的光强信号。

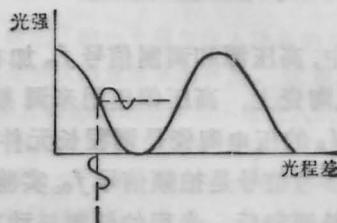


图2 干涉仪光程差在工作点Q的小振动

为保证干涉仪程差在Q点小振动完全由调制信号决定, 在伺服环路里设置了以调制信号频率  $f_m$  为中心带的阻滤波器, 使伺服环路在调制信号  $f_m$  处没有环路增益, 失去伺服作用, 而对其它频率则有负反馈抑制功能。

## 2.3 小位移(小振动振幅)定标

设  $\phi_1 - \phi_2 = \phi_0 + \phi_m$ , 式中  $\phi_0$  是两臂初始位相差,  $\phi_m$  是加调制信号所引起的相位差。且有

$$\phi_0 = 2n\pi \pm \frac{\pi}{2} \quad (n=0, \pm 1, \pm 2, \dots) \quad (2)$$

设镜子位移  $x(t) = x_0 \sin 2\pi f_m t$ , 这样

$$\phi_m = \frac{2\pi}{\lambda} 2x(t) = \frac{4\pi}{\lambda} x_0 \sin 2\pi f_m t, \quad (3)$$

将  $\phi_1 - \phi_2$  值代入光强公式(1), 并利用  $x_0 \ll \lambda$ , 得到了光电接收器之输出电压。

$$V(t) = V_0 \left[ 1 + \frac{4\pi}{\lambda} \gamma x_0 \sin 2\pi f_m t \right] + V_0 \left[ 1 + \frac{4\pi}{\lambda} \gamma x_0 \sin 2\pi f_m t \right] \times \cos 2\pi f_0 t \quad (4)$$

式中  $V_0$  为工作点直流电平, 其拍频项包含要检测的小位移信息。经锁相放大器振

幅解调后可得到以  $f_m$  为频率的正弦信号  $(K \cdot \frac{4\pi}{\lambda} V_0 \gamma x_0 \sin 2\pi f_m t)$ , 其中  $K$  是锁相放大器使用的增益。设上述信号的振幅  $(K \frac{4\pi}{\lambda} V_0 \gamma x_0)$  的可分辨极限值为  $V_{\min}$ , 则有

$$x_{0\min} = \frac{\lambda V_{\min}}{4\pi V_0 \gamma K} \quad (5)$$

由(5)即可标定小位移检测极限。

### 三、实验结果

图1中, 高压源和调制信号  $f_m$  加在镜片  $M_1$  的压电陶瓷上, 高压偏压用来调整工作点。镜片  $M_2$  的压电陶瓷是调程长元件。锁相放大器的参考信号是拍频信号  $f_0$ 。实验表明, 干涉仪程长锁定后, 光程的低频抖动减少了  $10^{-3}$  量级, 如无特大震动, 工作点可长期保持不变。

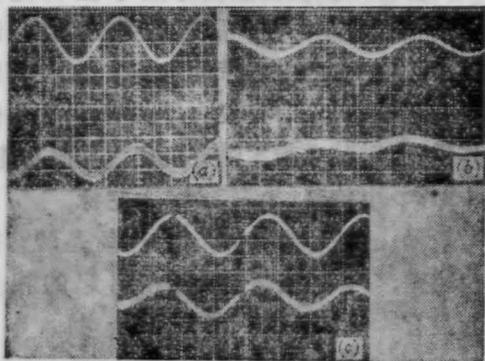


图3 示波器照片

上面的波形是加在检测镜  $M_1$  的驱动信号, 相应的下面波形是锁相放大器的输出信号(图(a) 500 mV/div, 图(b)、(c) 50 mV/div)

本实验所用调制信号  $f_m = 3.3$  kHz, 图3中(a)和(b)、(c)分别为伺服回路开环和闭环时的检测结果, 照片(c)为驱动信号较大时的情形, 照片(b)为电信号减小到一定程度时的情形。照片(b)中锁相放大器的输出波形曲线变粗, 说明其中已有明显的噪声成分。若再减小驱动信号, 可以看到锁相放大器输出信号中噪声成分显著增加, 波形畸变, 最后信号完全被噪声淹没。所以照片(b)是接近极限

检测的情况。可以认为锁相放大器输出波形的振幅可分辨极限值  $V_{\min} = 10$  mV, 其它实验数据为:  $\lambda = 632.8$  nm,  $V_0 = 0.75$  V,  $\gamma = 0.99$ ,  $K = 140$ 。利用公式(5)得到:

$$x_{0\min} = \frac{\lambda V_{\min}}{4\pi V_0 \gamma K} = 0.005 \text{ nm}$$

而在伺服回路开环时, 由(a)图可判断  $V_{\min}$  为 200 mV, 检测最小振幅值为 0.1 nm, 由此可见采取稳光程措施后明显地提高了检测分辨率。

### 四、讨论

#### 4.1 关于噪声抑制问题

小位移检测的分辨率取决于对噪声的抑制程度, 噪声中主要成分是环境噪声(空气流、声波、机械振动等引起光程差无规抖动), 除此之外, 尚有激光源的噪声(功率及频率的抖动)、光探测器电子线路的噪声及散粒噪声等。本实验使用的稳频激光器短期频率稳定度为  $10^{-11}$  量级, 对实验精度的影响可忽略, 且在目前检测精度下, 实验中未发现激光功率抖动的影晌。因此抑制噪声主要针对环境噪声及光探测器电路噪声。

有的文献认为, 采用拍频检测技术避开了低频噪声源(包括低频的  $1/f$  噪声和环境噪声)。实际上环境低频噪声源的干扰使干涉仪光程差无规抖动, 这种无规抖动和有规的调制信号作用一起都被拍频信号载上了, 因此要检测的低频信号和环境噪声混在一起, 所以拍频技术对噪声的隔离作用并非对所有的低频噪声源有效, 应该说主要是避开了光探测器的低频噪声。本实验的载频  $f_0 = 200$  kHz, 低频 kHz 的位移信号被载频移到较高频段处理, 对克服光探测器低频噪声无疑会有好处。因此为克服环境噪声, 本方案采用了稳定光程技术, 拍频检测和稳光程两者结合起来, 起到了更好的抑制噪声作用。

(下转第 169 页)

### 三、实验结果

我们采用一  $3 \times 3 \times 50 \text{ mm}^3$  的 CdTe 光电晶体在一放电长度为 60 cm 的外腔式  $\text{CO}_2$  激光器上进行了外腔耦合电光调制实验, 对以上分析进行了实验验证。实验装置如图 3 所示。分束片  $Z_1$ 、合束片  $Z_3$ , 及布氏窗片  $Z_2$  均为 ZnSe 片。  $R_1$  和  $R_2$  为镀金全反射平面镜。光电晶体驱动电源为一 2W 的高功率信号源, 有时也采用 50 Hz 市电低频交流信号。光电探测器为一响应频率  $> 200 \text{ MHz}$  的 HgCdTe 探测器, 解调信号经一带宽  $> 300 \text{ MHz}$  的低噪声放大器(增益约 50 dB) 放大后, 显示在一台 100 MHz 示波器上。为了实现外差探测, 从激光器输出的光束在  $Z_1$  被分为两束, 本振光经过一可移开的挡光板  $P_0$  后在  $Z_2$  与被调制信号光合为一束。经细致调整两束光的平行度并使之完全重叠入射到探测器上, 则可得外差探测。当挡光板挡住本振光而只有信号光入射到探测器上时, 则得到直接探测。对于比较加不同直流偏压时, 外差和直接探测的解调波形非常方便。

图 4 中给出了几张实验拍摄的外腔电光调制的典型解调波形。输入调制信号峰值 100 V。在零直

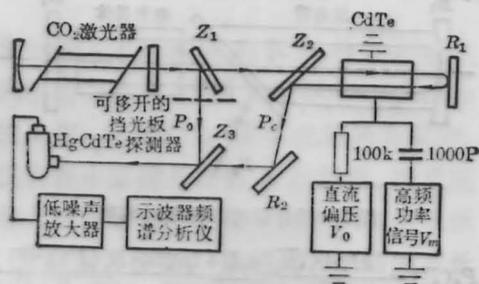


图 3 实验装置图

(上接第 158 页)

#### 4.2. 测量精度分析

由于激光束的反馈会使稳频塞曼激光器工作不正常, 甚至失锁。为避免发生这种情况, 在干涉仪光路调节时, 有意使入射激光束稍稍偏离正入射方向(相对反射镜片)  $\theta$  角度, 我们将讨论这种偏离带来的影响, 同时也讨论一下工作点抖动引起的误差。

设偏离正入射方向为  $\theta$  角, (3) 式应改为:

$$\phi_m = \frac{2\pi}{\lambda} 2 \cos \theta x(t).$$

若工作点抖动引起相位偏差为  $\Delta\phi$ , (2) 式应

流偏压点, 采用外差探测得到与输入信号频率一致的不失真解调, 而采用直接探测则只能得到两倍频率的失真解调(即上翻失真达到最大)。如果加大直流偏压, 则上翻失真减小, 继续加大偏压, 则可完全消除上翻失真, 得到不失真的解调。图 4(d) 中上翻成为下凹, 是由于 HgCdTe 探测器输入与输出反相的缘故。图 4 表明理论分析和实验现象吻合较好。在另一些直流偏压点, 我们也拍摄了类似的解调波形, 得到了与理论相一致的结果。

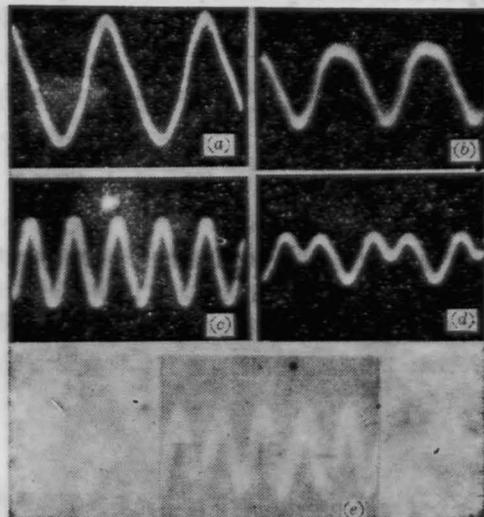


图 4 外腔电光调制分别采用外差探测和直接探测时的解调波形比较

(a) 调制输入信号,  $V_m = 100 \text{ V}$ ; (b) 外差探测信号  $V_0 = 0$ , 不失真; (c) 直接探测信号,  $V_0 = 0$ , 倍频失真; (d) 直接探测信号  $V_0 = 50 \text{ V}$ , 畸变; (e) 外差或直接探测信号  $V_0 = V_m/2 = 1600 \text{ V}$ , 倍频失真

(收稿日期: 1987 年 9 月 14 日)

改为  $\phi_0 = 2n\pi \pm \frac{\pi}{2} + \Delta\phi$ 。考虑上述修正后, (5) 式改为:

$$x_{0\min} = \frac{\lambda V_{\min}}{4\pi V_0 \gamma K \cos \Delta\phi \cos \theta} \quad (6)$$

实验中调节  $\theta \approx 0.5^\circ$ , 引起的偏差为  $4 \times 10^{-5}$ , 因此可以忽略。工作点锁定后, 相位偏离  $\Delta\phi$  约为  $1^\circ$ , 引起的误差为  $1.5 \times 10^{-4}$ , 也可忽略。而伺服环路开环时, 工作点抖动引起的  $\Delta\phi > 50^\circ$ , 误差大于 50%, 所以锁定干涉仪后, 测量准确度大大提高。

#### 参 考 文 献

- 1 Ohtsuka et al., Appl. Opt., 18(2), 219(1979)
- 2 汤俊雄 et al., 中国激光, 待发表