

研究简报

用激光的强度比较式 F-P 空腔 锁定技术进行微振动的测量

李永贵 庄杰佳

中国科学院高能物理研究所

冀玉领

山西师范大学

1987年12月19日收到

本文描述了一种微振动的激光测量方法。该方法利用 F-P 标准具的光学共振特性,借助于激光强度比较式 F-P 空腔锁定技术,在一般实验室条件下,实现了最小被测振幅可达 10^{-12}cm 数量级的微振动测量。

一、引言

在近代的科学测量中,利用激光的相干特性进行高精度的位移测量,具有用其它方法不可比拟的优越性。传统的迈克尔逊干涉法能使位移测量的精度达到几十分之一光波长的数量级。多次反射迈克尔逊干涉法^[1-3]和双标准具法^[4,5]应用到引力波探测中能使最小的可探测振动振幅达到 10^{-11}cm 左右。激光双频锁定法^[6]采用频率细分方法,利用简单的设备,也能使最小测量振幅达 10^{-14}cm 数量级。

本文报道另一种利用激光强度比较式空腔锁定技术,借助于 F-P 标准具的光谱高分辨率特性,实现振幅在 10^{-12} — 10^{-7}cm 范围内的高精度测量。该法与双频锁定法比较,由于不受空腔峰值锁定时调制频率的限制,因而具有更低的被测频率下限。另外,由于测量装置上的不同和锁定方法上的区别,使设备更加简单。

二、原理与装置

设图1所示曲线为激光照明 F-P 标准具时,标准具某一共振峰附近的光学行为(反射式应用),如果控制照明用激光的频率,使标准具的反射光强对应于共振曲线的半强度点或者最大斜率处,如A点(静态系统工作点),在此状态下,当标准具的光程发生微小变化时,或者标准具两反射镜沿轴向作微小振动时,标准具的反射光强将发生相应的变化。这种变化类似于三极管的放大特性。对于高精细度的 F-P 标准具,由于在共振峰附近,即使很小的光程变化也对应着很大的光强改变。因而,可以用该原理通过对反射光强变化的量度而高精度地测量 F-P 标准具极微小的光程变化。

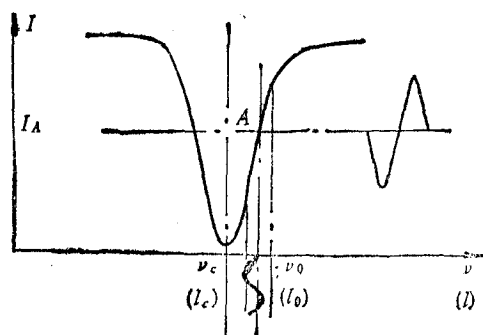


图1 在 F-P 标准具的共振峰附近有类似于三极管放大的腔长-光强转换特性

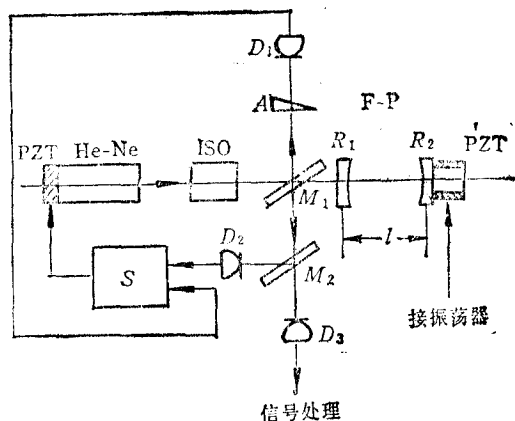


图2 实验装置

图2表示根据上述原理,利用激光的强度比较式空腔锁定技术建立的一台实验装置。图中A为光学衰减器。反射镜 R_1 和 R_2 组成腔长为 l 的F-P标准具。 R_2 与压电陶瓷PZT固结在一起。单模He-Ne激光器发出的光束通过光学隔离器ISO,在 M_1 处,一部分反射后经衰减器进入PIN光电二极管 D_1 ,另一部分透射进入F-P标准具。被标准具反射的光束,经 M_1, M_2 分别由PIN光电二极管 D_2 和 D_3 接收。 D_1, D_2 输出的电信号进入一个强度比较式锁定器S,该锁定器由电压比较器、高压放大器和积分电路组成。 D_1, D_2 的光电参数应对称(相同),特别是量子效率, D_3 要求低噪声,好的线性度。 D_1, D_2, D_3 用光电二极管最好。锁定器的输出加在He-Ne激光器的压电陶瓷PZT上,形成伺服控制回路,控制激光器的光振荡频率。

当F-P标准具的光程没有发生变化时(静态时),人为的调节衰减器(控制比较器的比较门限电平),用强度比较式锁定器,借助于 D_1, D_2 输出电平的比较,将光频率锁定在所选定的某一静态工作点上(如图1中的A点)。当F-P标准具受到外界某些慢变化因素的影响而使光程发生变化时,标准具反射光强受到相应变化,此时锁定器借助于 D_1, D_2 输入光强的比较产生误差信号去控制激光器的频率,使系统的静态工作点仍保持在原来的位置上(如A点)。但当F-P标准具的光程发生快速振荡式的变化,而变化的频率大于强度比较式锁定器的频率带宽时,锁定器对此振荡信号将不反应,因而激光频率保持不变,系统静态工作点亦不改变。然而此时标准具变化的相应信息可从光电探测器 D_3 的输出中得到。实验上,提供这种快速光程振荡式变化的一种最简单方式是靠反射镜 R_2 受PZT驱动产生微振动。这就是本测量方法的基本原理。

三、测量结果

对 D_3 的输出信号既可采用直接检测法,也可采用同步检测法。直接检测是用放大器对 D_3 输出信号直接放大后,得到反映 R_2 位移量的输出信号。同步检测是采用类似锁相放大的方法对 D_3 输出信号进行处理。

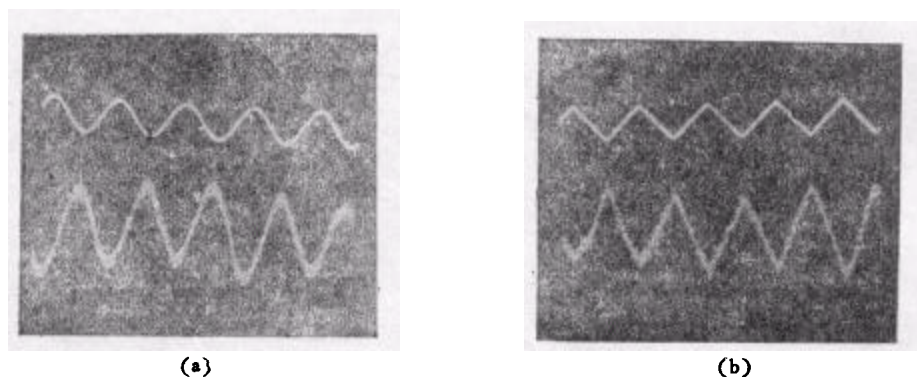


图3 上线为 PZT 上所加振荡电压波形；下线为 D_3 上输出的相应波形

图3为当 F-P 标准具的 PZT 上分别加上幅值为 6 mV (相应于 R_2 的轴向振动振幅 $0.25 \text{ \AA}$) 的不同振荡电压波形信号时,由 D_3 直接测得的相应光强输出。 R_2 轴向振动频率为 120 Hz。(拍摄照片时,为了使波形同步,各照片的显示比例略有差异。)图3所示波形是用直接检测法得到的实验结果。由于采用直接检测法时接收系统是在一个很宽的频率范围内接收和处理信号,因而接收信号的信噪比远低于同样条件下的同步检测法。在这里,影响测量精度的主要因素除了一般高精度光电测量中所共有的电子学噪声和机械振动噪声外,还有激光器的强度波动和频率波动噪声。激光器的强度波动主要来源于激光管的放电过程以及电流波动,在低频附近有比较强的峰值,其分布随所使用激光器的不同而不同。在用直接测量时,激光器强度波动功率谱密度在该频率范围内的积分,构成影响测量精度的一个因素。激光频率波动噪声对测量精度的影响与激光频率锁定系统中的伺服回路的开环增益谱分布和单位增益带宽(对 He-Ne 激光器为几千赫兹)有关。在单位增益带宽之内,适当设计的反馈回路增益分布,可使该波动得到有效的抑制。在单位增益带宽之外,如同激光强度波动一样,其频率波动功率谱密度的频率积分,构成影响测量精度的另一个因素(一般说来,对小功率 He-Ne 激光器,不管是强度波动,还是频率波动噪声,主要集中在 1 kHz 之内)。这是在用直接测量法时应当注意的问题。

但是应当指出,尽管考虑到激光器的强度波动和频率波动噪声,由于强度比较法利用了 F-P 标准具的光谱高分辨率特性,同一般的光电测量方法相比,该方法仍然具有较高的测量精度。

图3下线所示波形上迭加的噪声和寄生振荡,主要来源于接收系统(光电倍增管)及其放大器在 1 kHz 附近的电学振荡,它影响了灵敏度的提高。测量时所用激光波长为 $6328 \text{ \AA}$,功率输出为 0.5 mW, F-P 标准具腔长为 180 mm,标准具细度 $F = 120$ 。锁定器电学带宽为 50 Hz,即所用积分放大器积分时间常数的倒数为 50 Hz,系统静态工作点选择在共振峰的半强度点处。

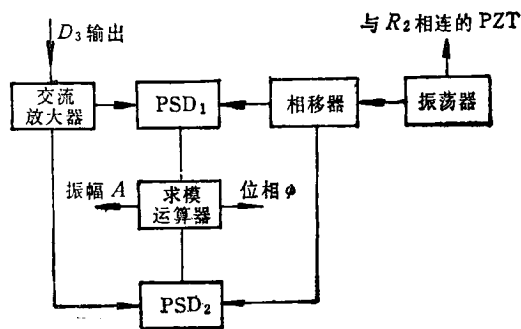


图4 同步检测方框图

除了直接检测外,我们还采用图 4 所示的同步检测技术. 图 4 中 PSD_1 和 PSD_2 为两个相敏检波器. 由振荡器输出的正弦信号一路加在 F-P 标准具的 PZT 上,模拟振动信号,另一路通过相移器产生位相差为 90° 的两部分正弦或方波信号,分别加在两个 PSD 上作参考信号. 由 D_3 得到的输出信号经放大器进入两个 PSD 后,其输出再通过求模运算器得到所测 R_2 振动信号的振幅和相位.

图 5 表示用图 2 和图 4 所示装置得到的同步检测实验结果. 测量时的 R_2 振动频率为 10 kHz. 可以看出,整个测量系统在振幅 10^{-7} — 10^{-12} cm 的振动范围内有良好的线性度. 其最小能测量的振动振幅约为

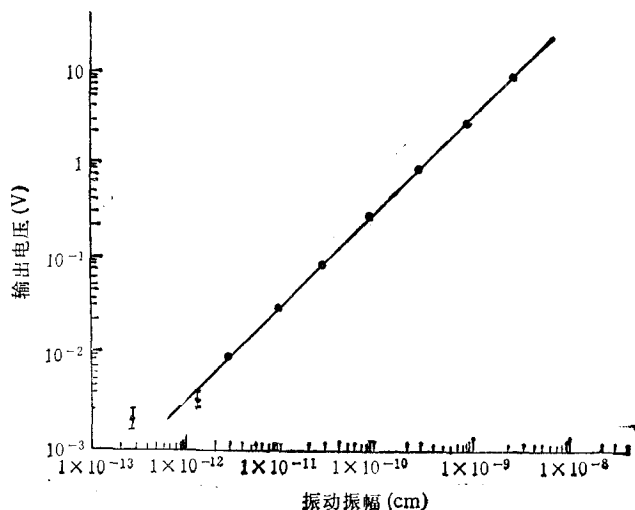


图 5 同步检测输出实验结果

2×10^{-12} cm. 按照理论计算^[6],用该方法能达到的最小可测量振幅可表示为

$$\Delta l_{\min} = \frac{4\lambda}{3\sqrt{3}\pi} \sqrt{\frac{h\nu\Delta f}{P_0\eta F}}.$$

式中 λ , ν 分别为激光的波长和频率, P_0 为入射于标准具的激光功率, η 为光电探测器 D_3 的量子效率, Δf 为同步检测系统的接收带宽, F 为标准具的细度. 按照实验中所用数据: $\lambda = 6328 \text{ \AA}$, $\Delta f = 0.1 \text{ Hz}$, $\eta = 0.1$, $F = 120$, $P_0 = 0.1 \text{ mW}$, $h\nu = 3.1 \times 10^{-19} \text{ J/photon}$, 则由上式求得 $\Delta l_{\min}$ 为 $7.8 \times 10^{-14} \text{ cm}$. 这说明实验值同理论值相比还差一个数量级.

系统的精度定标,用与 R_2 相连的 PZT 的半波电压换算. 该半波电压可以很容易地通过对 F-P 标准具自由光谱范围的测量而确定.

四、结 论

我们利用激光的强度比较式空腔锁定技术,将激光的工作频率锁定在对应于 F-P 标准具共振峰的半强度点或最大斜率处. 当 F-P 标准具的光程发生周期性的变化,或者组成标准具的反射镜发生周期性的轴向微振动,而振动的振幅又不是过大而破坏正常的空腔锁定时,若振动的频率大于锁定器的频率带宽,则在 F-P 标准具的共振峰处具有类似三极管放大性质的腔长-光强转换特性. 利用该特性,我们成功地进行了幅值在埃以下数量级的非正弦振动(直接检测)和幅值范围在 10^{-12} — 10^{-7} cm, 最小可测量振幅达 2×10^{-12} cm 的正弦振动(同步检测)测量. 实验结果表明,在我们的实验条件下,用同步检测时在 2×10^{-12} — 10^{-7} cm 量程范围内,系统都具有很好的测量线性度.

由于测量系统的 $1/f$ 噪声, 用强度比较式空腔锁定方式的稳定性不如用双频锁定法时的稳定性好, 但是由于该方式不象双频锁定时被测振动频率受调制频率的限制, 因而具有更低的被测频率下限, 同时测量装置也比双频锁定时简单。

- [1] R. L. Forward, *Phys. Rev.*, 17(1978), 379.
- [2] R. Weiss, *Progress Report*, 105, Res. Lab. Elect., M. I. T., (1972), p. 57.
- [3] H. Billing *et al.*, *J. Phys. E*, 12(1979), 1043.
- [4] R. W. P. Drever *et al.*, 9th International Conference on General Relativity and Gravitation. GR9. Jena (1980).
- [5] S. E. Whitcomb, *et al.*, For Proceedings of MGS, Shanghai, (1982).
- [6] 李永贵, 振幅为毫埃量级微振动的激光双频锁定测量法, 中国科学院高能物理研究所博士论文, (1986).

A METHOD FOR MEASURING THE MICRO-VIBRATION AMPLITUDE BY USING INTENSITY-COMPARISON LOCK-IN TECHNIQUE OF LASER

LI YONG-GUI ZHUANG JIE-JIA

Institute of High Energy Physics, Academia Sinica

JI YU-LING

Shanxi Normal University, Taiyuan

(Received 19 December 1987)

ABSTRACT

A method of measuring micro-vibration amplitude with laser is presented. By using the optical resonant characteristic of Fabry-Perot etalon and intensity-comparison lock-in technique of laser, we have completed a measurement with the minimum amplitude of vibration at the order of 10^{-12} cm under the condition of an ordinary laboratory.