

文章编号:1001-5078(2016)10-1216-04

· 激光应用技术 ·

He-Ne 激光回馈纳米条纹宽度标定方法研究

邓 勇,汪晨旭,宋健军

(南通大学机械工程学院,江苏 南通 226019)

摘 要:科技发展需要对各种纳米测量仪器的“纳米”确定性进行检定。介绍了一种基于 MSP430F149 单片机的 Fabry-Parot 腔双频高阶弱回馈位移测量系统条纹宽度标定方法,通过计算出测量靶镜运动同一位移时高阶回馈纳米条纹与传统弱回馈半波长条纹的频率之比,精确地标定出激光高阶弱回馈纳米位移测量系统的光学分辨率。测量结果表明系统可溯源的光学分辨率为 10.37 nm,加入 20 倍电细分后系统最终的分辨率为 0.53 nm。

关键词:激光回馈;纳米条纹;单片机;溯源性;宽度标定

中图分类号:TN249 **文献标识码:**A **DOI:**10.3969/j.issn.1001-5078.2016.10.009

He-Ne laser feedback nano stripe width calibration method research

DENG Yong, WANG Chen-xu, SONG Jian-jun

(School of Mechanical Engineering, Nantong University, Nantong 226019, China)

Abstract: The development of science and technology need to calibrate the certainty of nanometer measurement instruments. A method is proposed to calibrate the nano fringe width of the dual frequency high-order weak feedback displacement measuring system based on Fabry-Parot cavity. By using the microcontroller MSP430F149, which can measure the ratio of frequency between high-order feedback nano fringe and the traditional weak feedback half wavelength fringe when adding a same displacement on the two target mirrors. As a result, the optical resolution of nanometer displacement measuring system can be calibrated accurately. The measurement results show that optical resolution of the system can be 10.37 nm, which is traceable to light wavelength. By adding 20 times electrical subdivision, the final resolution of this system is about 0.53 nm.

Key words: laser feedback; nano fringe; microcontroller; in situ; width calibration

1 引 言

激光回馈干涉仪是利用外部回馈镜反射激光器输出光并耦合进激光腔会引起激光器输出光强呈现规律性波动,即:反射镜每移动半个波长的位移,激光器的输出光强产生一个近似正弦波动的条纹^[1]。目前回馈干涉仪广泛用于位移、速度测量、成像等领域^[2]。随着科学技术的发展,人们对测量精度的要求越来越高,提高激光回馈干涉仪的测量分辨率成为必要。在激光回馈位移测量系统中,当外部反射

镜反射率越高,回馈程度越高,位移测量系统的测量分辨率和灵敏度也会得到提高,并且可以根据锯齿波的倾斜方向来判定所测量目标的位移方向^[3]。但是基于激光强回馈的位移测量系统受到外界振动、温度、湿度变化影响较为严重,而且由于具有不同回馈阶次的回馈光相互叠加,造成激光器输出光强调制曲线幅值不均匀,系统的分辨率需要其他仪器校准或通过计算机软件进行光线追迹后才能确定,这将会给系统在实际生活中的应用带来困难。

基金项目:国家自然科学基金重点项目(No. 61475082);研究生创新项目(No. KYLX16_0968)资助。

作者简介:邓 勇(1965-),男,副教授,主要从事测试技术及仪器方向的研究工作。E-mail: dengy@ntu.edu.cn

收稿日期:2015-11-04; **修订日期:**2015-11-16

为了建立高分辨率和高稳定性的位移测量系统,清华大学曾召利设计了基于 F-P 腔的单重高阶回馈位移测量系统,目前,该系统具有亚纳米级别的分辨率(其中光学分辨率为 10.9 nm),同时具有以激光器波长为基准的溯源性^[4]。但是由于在 F-P 腔多次反射的过程中,反射光线与激光器光轴有一定的夹角,使得系统在实际测量时靶镜的位移和 F-P 腔中光程的变化呈现比例系数不为 1 的线性关系,使系统以波长为基准的溯源性无法确保。因此,就需要对该位移测量系统的分辨率进行标定,解决测量结果中引入的余弦误差。

基于这一思路,搭建了自标定双频高阶弱回馈纳米位移测量系统^[5],实现传统弱回馈半波长条纹与 F-P 腔双频高阶回馈条纹之间的互相标定,通过用 MSP430F149 单片机电路计算出传统半波长条纹一个周期内高阶回馈纳米条纹个数 N (精确到小数个),就可以精确地标定出激光高阶弱回馈位移测量系统的光学分辨率为 $632.8/(2 \times N)$,标定后的位移测量系统才可以用来作为纳米位移测量标准或者用来标定其他位移传感器。

2 实验

2.1 实验原理

本文采用 MSP430F149 单片机电路测量同一位移时传统弱回馈半波长条纹与高阶回馈纳米条纹的频率之比^[6],常见的测量频率的方法有测频法和测周法,测频法适合于较高频率的测量,测周法适合于较低频率的测量^[7]。由于实验产生的两路信号频率相对较低,故选择测周法测量两被测信号的频率比 N 。测周法原理如图 1 所示,用已知频率的高频标准时基信号 f 填充低频的被测脉冲信号 f_x ,填充的时基信号个数为 n ,被测信号的频率 $f = n \times f_x$ 。基于测周法原理,对 MSP430F149 单片机编写相应的程序。

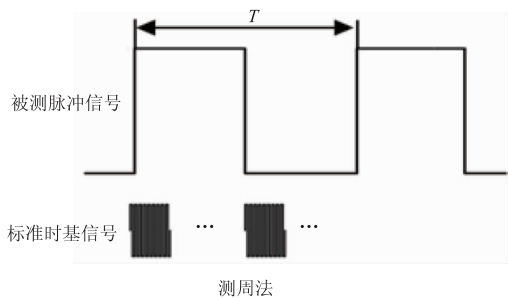


图 1 测周法原理图

Fig. 1 Schematic diagram of the measurement cycle method

程序流程图如图 2 所示,首先关闭看门狗,初始化时钟,设置时钟频率为 1 MHz,用时钟信号填充被测的低频信号,初始化捕获比较器 A,利用 MSP430149 单片机的捕获比较寄存器对输入脉冲的上升沿进行捕获^[8],检测到第一个上升沿时开始计数,检测到第二个上升沿时停止计数,比较器 A 捕获传统弱回馈纳米条纹,保存捕获器 A 两次捕获的计数差 m_1 ,关闭捕获比较器 A,初始化捕获比较器 B,比较器 B 捕获高阶回馈纳米条纹,保存捕获器 B 两次捕获的计数差 m_2 ,计算出两信号的频率比 $N = m_1/m_2$,精确到小数点后一位,调用显示程序,将测量结果显示在数码管上,得出的频率比 N (精确到小数点后一位)为一个周期半波长条纹内高阶回馈纳米条纹个数,即可以得到基于 F-P 腔的高阶回馈纳米测量系统的光学分辨率为 $\lambda/2N$ 。

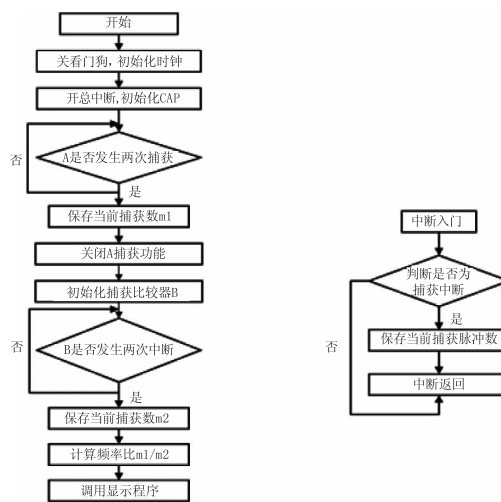


图 2 程序流程图

Fig. 2 Program flow chart

2.2 实验装置

实验装置如图 3 所示,图中两台激光器均采用半外腔 He-Ne 激光器, M_1 、 M_2 构成一个激光谐振腔, M_3 和 M_4 构成另一个激光谐振腔,其中 M_1 和 M_4 为曲率半径 500 mm 的凹面反射镜,反射率 $r_1 = r_4 = 0.996$; M_2 和 M_3 为平面反射镜,反射率 $r_2 = r_3 = 0.996$ 。两台激光器的出光波长均为 632.8 nm,其中充入 He : Ne = 7 : 1,同位素 $^{20}\text{Ne} : ^{22}\text{Ne} = 1 : 1$ 的混合气体,这样能较好地抑制兰姆凹陷,激光器毛细管直径为 0.9 mm,工作电流为 3.9 mA,工作电压 2000 V,两台激光器的腔长均为 170 mm,其中右侧的激光器输出基横模线偏振光;左侧的激光器由于在内腔中加入了石英双折射晶体 Q 并调整到特定

角度,使得激光器输出的一个模式中的两个正交偏振的本征态(即 o 光和 e 光)具有 90° 相位差,振幅和频率均相同,ATT 为衰减片,用于调节系统的回馈水平,使外腔回馈保持在较弱回馈水平,输出光强调制曲线为类余弦条纹^[9]。由于高阶回馈系统光强条纹密度为几千赫兹,探测器需要的响应速度快,光电池无法满足要求,所以左侧系统使用 PIN 探测器。光电池的响应速度能满足传统弱回馈系统半波长条纹的探测要求,所以右侧使用光电池。F-P 回馈外腔由反射镜 M_L 和 M_R 组成。为了保证入射到 F-P 腔的激光光束能够沿原路返回到激光谐振腔中, M_L 的左侧端面由三个斜面组成,其中最上方的端面 EF 与右侧平面的夹角为 4° (角度加工误差 $\pm 1''$),该角度也等于激光进入 F-P 腔的入射角; M_L 左侧中间的端面 FG 与其右侧端面平行; M_L 左侧最下方的端面 GH 与其右侧端面的夹角为 2.64° (角度加工误差 $\pm 1''$),且镀 99.5% 高反射膜。此时有 $n = \sin\alpha/\sin\beta$, n 为 K4 玻璃的折射率 ($n = 1.52$),从而保证入射到 F-P 腔的光束能够沿原路返回。 M_R 为平面镜,其整个左侧端面镀反射膜,反射率大于 95%。同时, M_R 被安装在高精度 PI 位移台上,它既是 F-P 回馈腔的组成部分,也是测量系统的目标靶镜。 M_L 是反射率为 0.996 的平面镜,被安装在 PI 位移台上。两个系统的外腔回馈镜被固定在同一个 PI 位移台上,调节位移台移动的方向和两台激光器光轴位置,确保三者保持较高的平行度。当 PI 位移台发生移动时,两个系统同时测量一个位移量,从而可以根据一个周期的传统回馈强度调制波形条纹对应的高阶回馈条纹数,对高阶回馈纳条纹的宽度进行标定,准确标定出高阶回馈系统的分辨率。

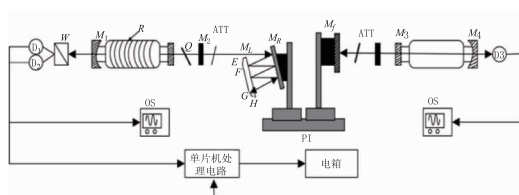


图 3 双频高阶弱回馈纳米位移测量系统
Fig. 3 Dual-frequency higher-order weak feedback nanometer displacement measurement system

2.3 测量过程

实验中,调节 M_L 上的光点数为 15 个, M_R 和 M_L 与 PI 位移台同时移动,速度为 $10 \mu\text{m/s}$ 。PI 位移台是 PI 公司生产的 P-621.1 CD 型高精度位移平台,

位移台由闭环控制器 E-753.1 CD 控制,行程 $100 \mu\text{m}$,分辨率为 0.4 nm ,重复性 2 nm 。实验的测量系统框图如图 4 所示,PI 位移台移动时,左右两侧位移测量系统产生的光信号经过光电探测器转化为电信号,通过高通滤波电路,滤除直流信号,经过电压比较器将正弦信号转化为方波信号,分别输出到 MSP430F149 单片机的测频模块上,测量出两输入信号的频率比。

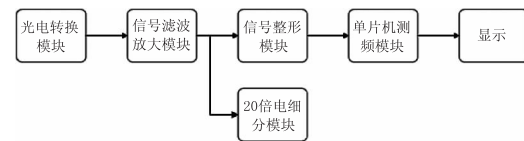


图 4 系统框图

Fig. 4 Systemblock diagram

3 实验结果

实验通过基于 MSP430F149 的单片机电路对 F-P 腔双频高阶弱回馈位移测量系统条纹宽度进行标定。实验结果如表 1 所示。

表 1 实验结果

Tab. 1 experimental results

实验次数	第一次	第二次	第三次	第四次	平均值
频率比 N	30.4	30.5	30.6	30.5	30.5

实验结果为传统半波长条纹一个周期内对应的高阶回馈条纹的个数,通过单片机计算的半波长条纹一个周期内高阶回馈条纹的个数可以准确地计算出基于 F-P 腔的高阶回馈位移测量系统的分辨率,取实验结果的平均值 30.5,计算出位移测量系统的分辨率为 $632.8/2 \times 30.5 = 10.37 \text{ nm}$ 。后续的电学处理中还加入了电阻链五细分和逻辑四细分,将系统分辨率通过电细分的手段提高了 20 倍,系统最终的分辨率为 0.53 nm 。光强调谐曲线如图 5 所示。

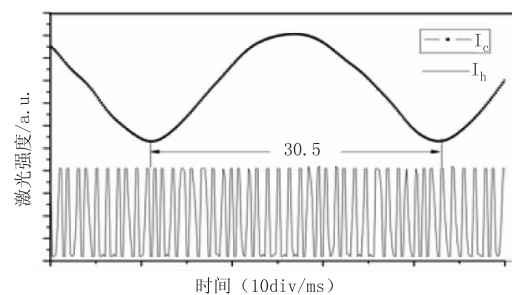


图 5 光强调谐曲线

Fig. 5 Laser intensity tuning curve

图5中, I_c 、 I_h 分别为传统弱回馈光强调谐曲线和基于 F-P 的高阶回馈光强调谐曲线^[10], 由激光强度曲线可以看出, 一个传统弱回馈条纹中有 30.5 个高阶回馈条纹, 验证了实验的正确性。用基于 MSP430F149 单片机的电路测量传统半波长条纹一个周期内对应的高阶回馈纳米条纹的周期数, 从而准确标定出高阶回馈条纹的回馈阶次, 使系统的分辨率有了一个准确的比对标准, 确保系统的溯源性。

4 结论

实验中利用基于 MSP430F149 单片机电路对激光回馈纳米位移测量条纹宽度进行了标定。不进行电细分的情况下, 分辨率可以达到 10.37 nm。信号送入电箱中, 对它进行 20 倍的电细分最终的分辨率为 0.53 nm。基于 F-P 腔的高阶回馈位移测量系统的分辨率可以通过数半波长条纹一个周期内高阶回馈条纹的个数来确定, 这种标定方法能够减小系统的余弦误差, 从而使整个系统的溯源性得到保证。因此这个自标定位移测量系统可以用来标定其他的位移传感器, 并且有被用来作为位移测量标准的潜力。

参考文献:

- [1] ZENG Zhaoli, ZHANG Shulian, TAN Yidong. Nanometrology system based on laser feedback effect[J]. Journal of Optoelectronics · Laser, 2014, (3): 508 - 513. (in Chinese)
曾召利, 张书练, 谈宜东. 基于激光回馈效应的纳米计量系统[J]. 光电子·激光, 2014, (3): 508 - 513.
- [2] ZENG Zhaoli, ZHANG Shulian. Nanometrology technology in precision measurement[J]. Applied Optics, 2012, 33: 846 - 854. (in Chinese)
曾召利, 张书练. 精密测量中的纳米计量技术[J]. 应用光学, 2012, 33: 846 - 854.
- [3] L Fei, S Zhang. The discovery of nanometer fringes in laser self-mixing interference[J]. Optics Communications, 2007, 273: 226 - 230.
- [4] ZENG Zhaoli, ZHANG Shulian. Dynamic modulation frequency stabilization technology in laser strong optical feedback system [J]. Infrared and Laser Engineering, 2015, 44(5): 1402 - 1407. (in Chinese)
曾召利, 张书练. 激光强回馈系统的动态调制稳频技术[J]. 红外与激光工程, 2015, 44(5): 1402 - 1407.
- [5] MAO Wei, ZHANG Shulian, ZHANG Lianqing, et al. Study on displacement measurement with optical feedback of dual frequency laser[J]. Acta Physica Sinica, 2006, 55(9): 4704 - 4708. (in Chinese)
毛威, 张书练, 张连清, 等. 双频激光回馈位移测量研究[J]. 物理学报, 2006, 55(9): 4704 - 4708.
- [6] ZHANG Jin, LIU Haiyan, LI Zeguanguang. Identical precision frequency measurement system based on MCU and CPLD [J]. Electronic Measurement Technology, 2009, (8): 88 - 91. (in Chinese)
张瑾, 刘海燕, 李泽光. 基于单片机和 CPLD 的等精度测频系统[J]. 电子测量技术, 2009, (8): 88 - 91.
- [7] YANG Yong, ZHANG Gang. Measurement of signal frequency in multi-band with MCU [J]. Modern Electronic Technique, 2003, (5): 72 - 73. (in Chinese)
杨勇, 张钢. 用单片机实现分频段测量信号频率[J]. 现代电子技术, 2003, (5): 72 - 73.
- [8] QIU Yinan, ZHOU Yongmei, PENG Sancheng, et al. An example of application based on MSP430F149 Single Chip microcomputer [J]. 株洲工学院学报, 2004, 18(5): 31 - 33. (in Chinese)
邱银安, 周咏梅, 彭三城, 等. MSP430F149 单片机及其应用研究[J]. 株洲工学院学报, 2004, 18(5): 31 - 33.
- [9] ZENG Zhaoli, QU Xueming, WEN Jun, et al. Design and error analysis of microdisplacement measurement system based on laser high-order feedback effect [J]. Laser & Infrared, 2015, 45(5): 487 - 491. (in Chinese)
曾召利, 屈学民, 文峻, 等. 激光高阶回馈微位移测量系统设计与误差分析[J]. 激光与红外, 2015, 45(5): 487 - 491.
- [10] Tan Y, Zeng Z L, Zhang S L, et al. Method for in situ calibration of multiple feedback interferometers [J]. Chinese Optics Letters, 2013, 11(10): 102601.