

激光合成波长干涉仪零相位检测实验研究

张雪峰, 严利平, 刘燕娜, 陈本永

(浙江理工大学纳米测量技术实验室, 杭州 310018)

摘 要: 探讨激光合成波长干涉仪零相位检测方法, 构建基于 DSP 芯片 TMS320F28335 的零相位检测实验装置, 选用两个捕捉单元获取两单波长干涉信号的上升沿时刻差, 用线性回归拟合方法算出零相位点位置。在恒温恒湿实验室中, 分别以 7 000、10 000 和 13 000 个拟合点数进行实验, 实验结果显示, 参考镜过零点位置平均值分别为 283 388.8、285 830.9、286 533.2 μm , 标准偏差分别为 0.25、0.43、0.36 μm 。结果表明: 选取 7 000 个拟合点数进行计算时, 标准偏差最小, 计算得到的过零点位置最准确。

关键词: 合成波长; DSP; 零相位检测; 线性拟合; 标准偏差

中图分类号: TH741; TP274.2

文献标志码: A

0 引 言

自从 1986 年发明了扫描隧道显微镜 (STM), 以纳米技术为基础的制造技术向微型化方向快速发展, 生物技术向基因组分析方向快速发展, 微电子制造向超大规模集成电路方向快速发展, 这些领域的发展对精密测量过程提出了达到纳米级测量精度的要求^[1]。原子力显微镜、单频偏振干涉仪和激光外差干涉仪等成为国内外纳米测量技术研究的重要内容^[2-5], 其中各种激光干涉仪由于可实现溯源性, 被广泛应用于长度、角度、振动、直线度和表面微观形貌等测试计量技术领域^[6-7]。激光合成波长干涉技术采用合成波长对干涉信号进行细分来实现纳米级位移测量^[8], 其涉及的零相位检测的准确性是实现高精度纳米级位移、波长和折射率等测量的关键。因此, 本文针对激光合成波长干涉中的零相位检测方法进行研究, 对不同采集点数据量的零相位检测的准确性进行重复性实验, 以获得较为准确的零相位检测方法。

1 激光合成波长干涉仪的零相位检测

激光合成波长干涉仪的零相位检测如图 1 所示, 激光器发出一束波长为 λ_1 和 λ_2 的正交线偏振光, 射向由分光镜 BS、参考镜 M_1 、偏振分光镜 PBS_1 和测量镜 M_2 组成的合成波长干涉仪, 形成各自的干涉信号, 经偏振分光镜 PBS_2 反射和透射后, 分别由探测器 D_1 和探测器 D_2 检测。探测器探测的两路干涉信号经零相位检测, 可以获得两路干涉信号同时过零时参考镜 M_1 的位置。根据激光合成波长干涉测量原理^[8], 测量镜 M_2 的位移 Δl 和参考镜 M_1 的位移 ΔL 之间的关系可以表示为:

$$\Delta l = \frac{\lambda_2}{\lambda_s} \Delta L \quad (1)$$

式中, $\lambda_s = \lambda_1 \lambda_2 / |\lambda_1 - \lambda_2|$ 为合成波长。

据式 (1) 可知, 当测量镜 M_2 运动一纳米级被测位移时, 将引起波长 λ_2 的干涉信号相位发生变化, 此时需要移动参考镜 M_1 进行相位补偿, 通过软件进行方向判断, 寻找波长 λ_1 和 λ_2 的干涉信号同时过零点的位置, 即零相位检测。

收稿日期: 2013-02-27

基金项目: 国家自然科学基金项目 (51205365); 浙江省自然科学基金项目 (Y1110495); 浙江省教育厅科研项目 (Y201019094 和 ZD2007004)

作者简介: 张雪峰 (1988-), 女, 浙江宁波人, 硕士研究生, 主要从事激光干涉测量技术的研究。

通信作者: 严利平, 电子邮箱: yanliping@zstu.edu.cn

零相位的检测精度将直接影响被测位移的测量精度,因此,在波长 λ_1 和 λ_2 的干涉信号零相位附近,选取一个最优的采集点数,能够有效地提高过零相位检测精度。

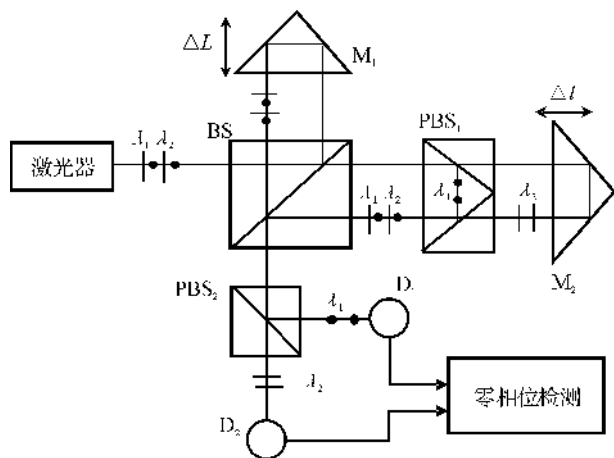


图1 激光合成波长干涉仪零相位检测

2 零相位检测信号处理方法

2.1 零相位检测方法

零相位检测的信号处理采用填脉冲计数的方法,检测 λ_1 和 λ_2 干涉信号的上升沿时刻差,向其填入高频脉冲 CLK,填入的脉冲个数为 N 。在参考镜 M_1 相位补偿过程中,从 λ_1 干涉信号的上升沿由滞后 λ_2 干涉信号的上升沿到与 λ_2 干涉信号同相位,再到超前 λ_2 的干涉信号上升沿的填脉冲数变化如图2所示。在参考镜 M_1 匀速移动过程中, N 的值应该是呈单调的线性变化,当填入的高频脉冲数 N 为零时, λ_1 和 λ_2 干涉信号之间的相位差即为零相位。

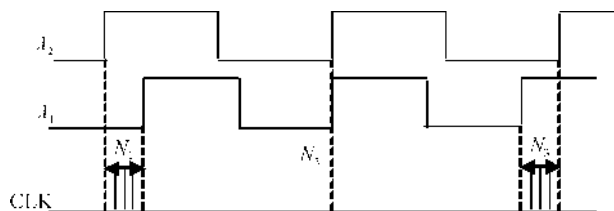


图2 零相位检测信号处理方法

2.2 零相位检测的过零点计算方法

实际情况中,由于参考镜 M_1 运动的速度会有微小的波动,将引起 λ_1 和 λ_2 两路干涉信号周期的变化,从而导致填入 λ_1 和 λ_2 干涉信号上升沿之间的填脉冲数会出现振荡,如图3所示。对应 λ_1 和 λ_2 干涉信号的上升沿时刻差的填脉冲数与参考镜位移的变化趋势呈线性关系,需要用函数逼近的方法将离散的数据规律化。因此,可采用线性回归拟合的

方法,求出对应填脉冲数为零时的参考镜位置 P ,称作参考镜过零点位置。

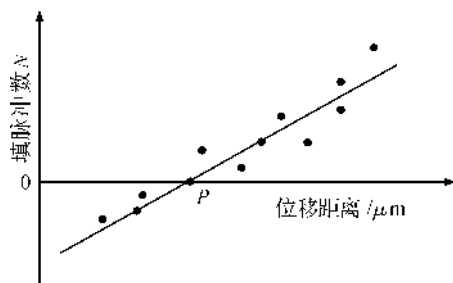


图3 填脉冲数的变化

根据线性回归拟合公式 $y = ax + b$,有:

$$a = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i y_i - n \bar{x} \bar{y}}{\sum_{i=1}^n x_i^2 - n \bar{x}^2} \quad (2)$$

$$b = \bar{y} - a \bar{x} \quad (3)$$

式中, n 为线性回归拟合点数,即零相位采集点数, x_i 为第 i 个采样点, y_i 为第 i 点的填脉冲数, \bar{x} 为 n 个采样点的平均值, \bar{y} 为 n 个填脉冲数的平均值。令 $y=0$ 时,可求出拟合采样点值 X_f 。

参考镜过零点位置计算方法如图4所示,当 λ_1 和 λ_2 干涉信号上升沿之间填入的脉冲数绝对值小于设定的阈值时,保存此时参考镜初始位置 P_1 ;当采集满 n 点时,零相位检测结束,保存此时参考镜结束位置 P_2 ,得到参考镜过零点位置 P :

$$P = P_1 + (P_2 - P_1) \times \frac{X_f}{n} \quad (4)$$

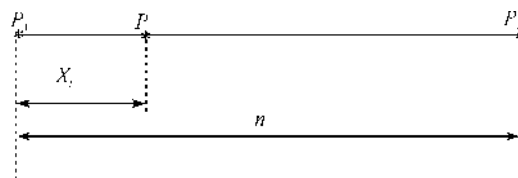


图4 过零点参考镜位置计算简图

3 实验及其结果分析

根据图1构建零相位检测实验装置。其中激光器采用英国 RENISHAW 公司的 XL-80 双频 He-Ne 激光器,参考镜 M_1 的运动位移由德国 PI 公司的 M-521. DD 直线位移工作台提供,零相位检测信号处理采用美国 TI 公司的 DSP 芯片 TMS320F28335, 30 MHz 的外部输入频率经锁相倍频后成为 150 MHz 的时钟频率(CLK)。

TMS320F28335 有 6 个增强型捕捉模块,分别是 ECAP1 到 ECAP6,这里选用其中的 ECAP1 和 ECAP3。设置波长 λ_1 和 λ_2 两路干涉信号的上升沿

为触发信号, ECAP1 和 ECAP3 捕捉单元计数器同时工作, 记录波长 λ_1 和 λ_2 两路干涉信号上升沿时刻差值为 API_Chan12_Diff (即两路干涉信号之间的填脉冲数)。当 API_Chan12_Diff 的绝对值小于设定的阈值 20 时, 则开始将该上升沿时刻差值 API_Chan12_Diff 存入寄存器数组 ECAP_BUF_SIZE 中, 并保存参考镜初始位置 P_1 , 当数组 ECAP_BUF_SIZE 中保存到预定的数据采集个数 n 时, 保存参考镜结束位置 P_2 。最后将得到的 n 个 API_Chan12_Diff 值做线性回归拟合, 根据公式(2)、公式(3)求出拟合直线表达式, 当 $y=0$ 时, 求出拟合过采样点值 X_f 。

图5是一组实测实验数据分布, 表示的是数组 ECAP_BUF_SIZE 中保存的 1 000 个 λ_1 和 λ_2 两路干涉信号上升沿之间的填脉冲数与数据采集个数之间的关系, 参考镜初始位置 $P_1=285\,513.5\,\mu\text{m}$, 结束位置 $P_2=285\,829.9\,\mu\text{m}$ 。从图5可以看出, 这 1 000 个填脉冲数的总体分布是从负到正的线性关系, 但是中间存在非常明显的振荡。采用上述的线性拟合方法, 可以算出 $a=0.163$, $b=-54.59$, 则 $y=0$ 时的拟合采样点值 $X_f=335$, 再根据公式(4), 算得该实验中 λ_1 和 λ_2 两路干涉信号同时过零时, 参考镜过零点位置 $P=285\,619.5\,\mu\text{m}$ 。

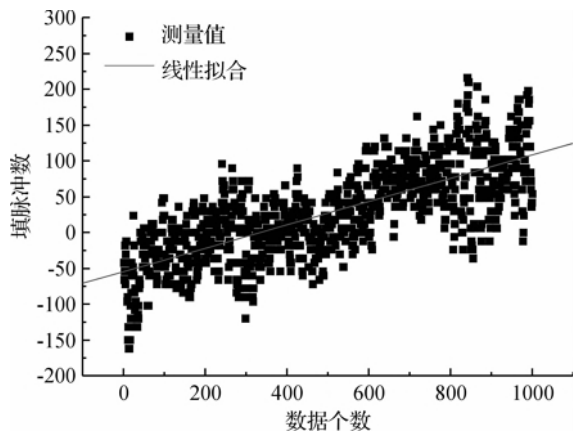


图5 拟合过零点计算结果

实验过程中, 由于两路干涉信号上升沿之间填脉冲数的振荡, 当拟合点数太少时, 可能找不到填脉冲数为 0 的拟合采样点值, 因此可以通过设置数组 ECAP_BUF_SIZE 的大小来控制拟合点数的多少, 从而达到不同的拟合精度。在能够找到拟合过零点的情况下, 分别设置数组 ECAP_BUF_SIZE 的大小为 7 000、10 000 和 13 000, 进行 55 组重复性实验, 拟合计算得到参考镜过零点位置如图 6、图 7、图 8 所示。参考镜过零点位置平均值分别为 283 388.8、

285 830.9、286 533.2 μm , 标准偏差分别为 0.25、0.43、0.36 μm 。实验结果表明, 选取 7 000 个填脉冲数用于拟合计算参考镜过零位置, 标准偏差最小, 此时计算得到的过零点位置最准确。

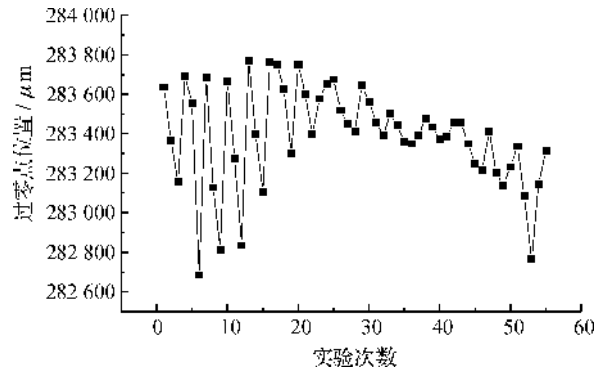


图6 拟合点数为 7 000 时过零点位置

注: 平均值 283 388.8 μm , 标准偏差 0.25 μm

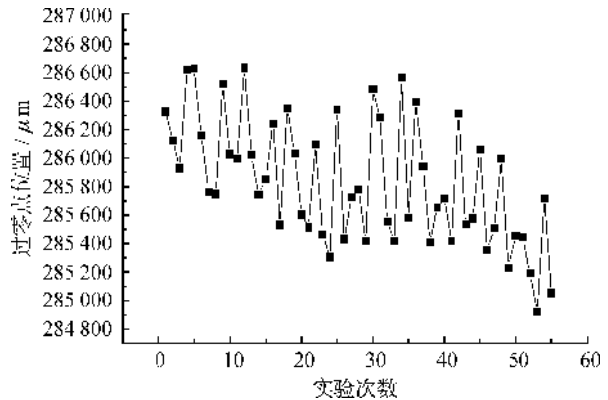


图7 拟合点数为 10 000 时过零点位置

注: 平均值 285 830.9 μm , 标准偏差 0.43 μm

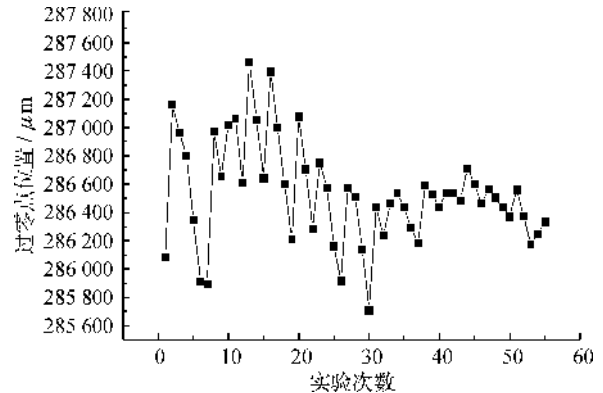


图8 拟合点数为 13 000 时过零点位置

注: 平均值 286 533.2 μm , 标准偏差 0.36 μm

4 结 论

探讨了激光合成波长干涉仪零相位检测信号处理方法及其在 DSP 上的实现, 开展了激光合成波长干涉仪零相位检测实验研究, 分别以 7 000、10 000 和 13 000 个拟合点数进行零相位检测实验测试, 其

中 7 000 个拟合点数的校准偏差最小,为 $0.25\ \mu\text{m}$,验证了所设计的研究方法的可行性。

参考文献:

- [1] 韦 丰. 激光合成波长干涉纳米测量系统及其信号处理方法研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2005: 5-7.
- [2] Dai G L, Pohlenz F, Danzebrink H U, et al. Metrological large range scanning probe microscope[J]. Rev Sci Instrum, 2004, 75(4): 962-969.
- [3] 陈本永, 穆瑞珍, 周砚江, 等. 激光合成波长纳米测量干涉仪的非线性误差分析[J]. 中国激光, 2008, 35(2): 241-244.
- [4] Lawall J, Kessler E. Michelson interferometry with 10pm accuracy[J]. Rev Sci Instrum, 2000, 71(7): 2669-2676.
- [5] Joo K N, Ellis J D, Buice E S, et al. High resolution heterodyne interferometer without detectable periodic nonlinearity[J]. Opt Express, 2010, 18(2): 1159-1165.
- [6] Kang S, La J, Yoon H, et al. A synthetic heterodyne interferometer for small amplitude of vibration measurement[J]. Rev Sci Instrum, 2008, 79(5): 053106.
- [7] 张华叶, 张恩政, 严利平, 等. 渥拉斯顿棱镜偏摆对激光外差干涉直线度测量的影响分析[J]. 浙江理工大学学报, 2012, 29(5): 672-676.
- [8] 张 萍, 严利平, 杨 涛, 等. 基于 CPLD 的激光合成波长干涉信号处理方法[J]. 浙江理工大学学报, 2010, 27(2): 239-243.

Experimental Study on Zero Phase Detection of Laser Synthetic Wavelength Interferometer

ZHANG Xue-feng, YAN Li-ping, LIU Yan-na, CHEN Ben-yong

(Nanometer Measurement Laboratory, Zhejiang Sci-Tech University, Hangzhou 310018, China)

Abstract: This paper discusses zero phase detection method of laser synthetic wavelength interferometer; establishes zero phase detection experimental apparatus based on DSP chip TMS320F28335; uses two capture units to obtain the rising edge time difference of two single wavelength interference signals and calculates the position of zero phase point with linear regression fitting method; conducts experiments respectively with 7 000, 10 000 and 13 000 fitting points in the laboratory with constant temperature and humidity. The experimental result shows that mean values of zero crossing point of reference mirror are respectively $283\ 388.8$, $285\ 830.9$ and $286\ 533.2\ \mu\text{m}$ and standard deviations are respectively 0.25 , 0.43 and $0.36\ \mu\text{m}$. The result shows that the standard deviation is the smallest and the zero crossing point obtained through calculation is the most accurate when 7 000 fitting points are used for calculation.

Key words: synthetic wavelength; DSP; zero phase detection; linear regression fitting; standard deviation

(责任编辑: 张祖尧)