

# 激光圆偏振干涉纳米位移测量信号处理方法

章淼凌, 严利平, 楼盈天, 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:** 介绍激光圆偏振干涉纳米位移测量系统的光路结构, 针对 A/D 误差和直流噪声引入的位移误差, 提出了基于正余弦信号切换的干涉条纹处理方法, 以提高测量精度。设计基于 FPGA 和 DSP 架构的激光圆偏振干涉纳米位移测量系统, 其中 FPGA 主要用于信号的采集、大数计数及与上位机通讯, DSP 主要用于小数计算。位移实验结果表明: 在  $0\sim 7\ \mu\text{m}$  范围内, 步长为  $100\ \text{nm}$  的测量结果其线性拟合相关系数为  $0.983\ 6$ , 标准差为  $1.88\ \text{nm}$ ; 在  $0\sim 15\ \mu\text{m}$  范围内步长为  $1\ \mu\text{m}$  的测量结果其线性拟合相关系数为  $0.999\ 2$ , 标准差为  $2.96\ \text{nm}$ 。验证了所提出的干涉条纹处理方法和信号处理系统能够实现纳米级位移测量精度的要求。

**关键词:** 激光圆偏振干涉; 纳米位移测量; 信号处理; FPGA 和 DSP

**中图分类号:** TH741

**文献标志码:** A

## 0 引 言

激光干涉仪具有测量范围大、精度高的优点, 已被广泛应用于位移、速度、角度和直线度等方面的测量<sup>[1-3]</sup>。目前对激光干涉信号主要采用现场可编程门阵列(FPGA)或数字信号处理器(DSP)进行信号处理<sup>[4-6]</sup>。在信号处理中, 由于存在 A/D 误差和直流信号噪声, 使得信号在变化率较小处引入的误差较大, 现在所采用的方式一般都是通过正余弦信号求比值消除信号的幅值系数, 并对形成的正切或余切函数进行相位计算<sup>[7]</sup>; 或对正余弦函数进行构建, 形成一个线性函数再进行相位计算, 以降低信号处理的复杂度, 但它会引入最大可达 3% 的非线性误差<sup>[8]</sup>。大数计数采用可逆计数的大数计算方法, 可以防止信号抖动引入的大数误差<sup>[9-11]</sup>。

本文综合 FPGA 可控制高速 A/D 进行信号采集和 DSP 易实现复杂运算的优势, 设计 FPGA + DSP 架构的激光圆偏振干涉纳米位移测量信号处理系统, 采用正余弦切换的信号处理方法, 以减小

A/D 和直流信号噪声产生的误差, 提高测量精度。

## 1 激光圆偏振干涉纳米位移测量系统光路结构

激光圆偏振干涉纳米位移测量系统光路结构如图 1 所示, 激光器输出单频线偏振光, 经过长轴与该线偏振光偏振方向成  $45^\circ$  角的  $1/4$  波片  $Q_1$ , 变成圆偏振光后射向偏振分光镜  $PBS_1$ , 被分成光强相同的两路, 反射分量射向参考镜  $R_1$  后返回, 透射分量射向测量镜  $R_2$  返回, 两者在  $PBS_1$  处汇合后仍保持各自的偏振态。合成光经高反镜  $M_1$  反射, 并通过长轴与该线偏振光偏振方向成  $45^\circ$  角的  $1/4$  波片  $Q_2$  后成为两个圆偏振光, 这束光经过两个普通分光镜后分成三束光, 分别经过  $P_1$ 、 $P_2$ 、 $P_3$  三个检偏器后由  $D_1$ 、 $D_2$ 、 $D_3$  三个光电探测器接收; 检偏器  $P_1$  的通光方向与水平方向成平行, 检偏器  $P_2$  的通光方向与水平方向成  $45^\circ$ , 检偏器  $P_3$  的通光方向与水平方向成  $90^\circ$ 。三个光电探测器接收到的信号分别为:

收稿日期: 2013-03-21

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: 章淼凌(1986-), 男, 浙江杭州人, 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

$$\begin{aligned} D_1 &: a_1 + b_1 \cos(\theta - \pi/4) \\ D_2 &: a_2 + b_2 \cos(\theta + \pi/4) \\ D_3 &: a_3 + b_3 \cos(\theta + 3\pi/4) \end{aligned} \quad (1)$$

式中:  $\theta = 4\pi/\lambda x$ ,  $x$  表示位移量。

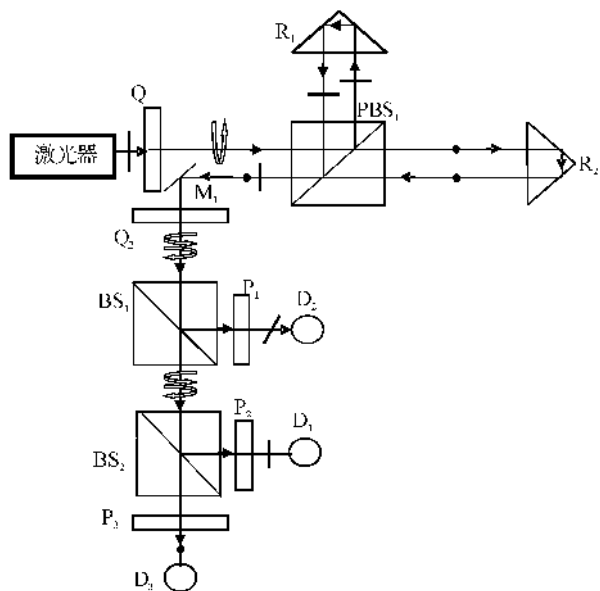


图1 激光圆偏振干涉纳米位移测量系统的光路结构

## 2 干涉信号处理方法

三路信号先经过比例运算电路,使得交流分量的幅值  $b_1 = b_2 = b_3 = b$ , 令输出的信号分别为  $D_{11}$ 、 $D_{21}$ 、 $D_{31}$ 。  $D_{11}$ 、 $D_{21}$  和一直流量经过加减运算电路,  $D_{21}$ 、 $D_{31}$  和另一个直流量经过加减运算电路,使得输出的信号中消去直流分量,令输出信号分别为  $S_1$  和  $S_2$ , 那么:

$$\begin{aligned} S_1 &= b \cos(\theta - \pi/4) - b \cos(\theta + \pi/4) + (a_4 - a_5 + c_1) = A \sin \theta \\ S_2 &= b \cos(\theta + 3\pi/4) - b \cos(\theta + \pi/4) + (a_6 - a_5 + c_2) = -A \cos \theta \end{aligned} \quad (2)$$

式中:  $A = b\sqrt{2}$ 。

对于小于  $2\pi$  的  $\theta$  值,由于通过求  $S_1$  的反正弦得到的  $\theta$  值范围为  $-\pi/2 \sim \pi/2$ , 为将  $\theta$  的范围转换到  $0 \sim 2\pi$ , 需要采用信号  $S_2$  的极性进行辅助判断, 同理由于通过求  $S_2$  的反余弦求出的  $\theta$  值范围为  $0 \sim \pi$ , 为将  $\theta$  的范围转换到  $0 \sim 2\pi$ , 需要采用信号  $S_1$  的极性进行辅助判断。

由式(2)计算可得: 当  $\theta$  从  $0$  变到  $10^\circ$ ,  $S_1$  变化量为  $0.174 A$ , 当  $\theta$  从  $80^\circ$  变到  $90^\circ$ ,  $S_1$  变化量为  $0.015 A$ ,

所以正弦的信号在峰谷值附近变化率最小。由于存在 A/D 误差和直流信号噪声引入的误差, 假设引入的误差为  $0.01 A$ , 峰谷处引入的误差引起的相位误差最大可达  $10^\circ$ , 即引起的位移量误差最大可达  $9 \text{ nm}$ , 在过零位置附近处引入的误差引起的相位误差最大为  $0.5^\circ$ , 即引起的位移误差最大为  $0.5 \text{ nm}$ , 所以可知在峰谷处引入的误差较大。从图 2 可以发现, 当信号  $S_1$  处于变化率最小的峰谷处时, 信号  $S_2$  处于变化率最大的过零位置附近, 所以此处可采用信号  $S_2$  来进行小数计算, 从而减小 A/D 和直流信号噪声等引入的误差, 提高测量精度。在一个周期内, 信号  $S_1$  和信号  $S_2$  的切换点设置在  $\pi/4$ 、 $3\pi/4$ 、 $5\pi/4$ 、 $7\pi/4$  处, 其中  $\pi/4$ 、 $3\pi/4$  所对应的  $S_1$  的值为  $\sqrt{2} A/2$ ,  $5\pi/4$ 、 $7\pi/4$  所对应的值为  $-\sqrt{2} A/2$ , 如图 2 中  $V_A$ 、 $V_B$  所示处。用信号  $S_1$  作为判断函数, 那么当  $S_1$  的值大于  $\sqrt{2} A/2$  或者小于  $-\sqrt{2} A/2$  时切换成信号  $S_2$  进行计算, 当  $S_1$  小于  $\sqrt{2} A/2$  并大于  $-\sqrt{2} A/2$  时切换回  $S_1$  进行计算, 所以可将一个周期中按照信号  $S_1$ 、 $S_2$  的极性和大小分成如图 2 所示的 8 个卦限, 每个卦限为  $\pi/4$ 。由上述分析可得, 在 1、4、5、8 卦限内用信号  $S_1$  计算, 在 2、3、6、7 卦限内用信号  $S_2$  计算。设置一个计数器来进行大数计数, 当卦限从 1—2—3—4—5—6—7—8—1 规律每跳变一次, 计数器的值加 1, 从 1—8—7—6—5—4—3—2—1 规律每跳变 1 次, 计数器的值减 1。

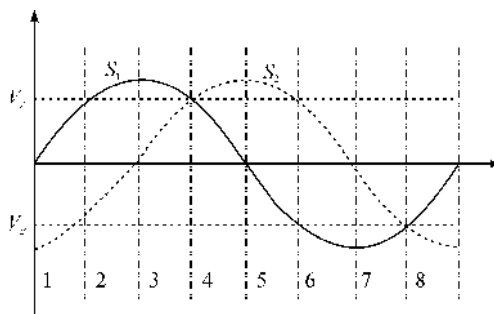


图2 干涉条纹处理方法示意图

因为相位每变化  $\pi/4$  时计数器  $n$  的值变化 1, 为求出总的相位变化量还需要得到不满一个计数周期  $\pi/4$  的相位部分。为了配合计数器, 将一个整周期  $0 \sim 2\pi$  内的  $\theta$  都转换到  $0 \sim \pi/4$  区间进行计算。

由式(2)可知, 在一个周期  $2\pi$  内:  $\theta = \arcsin(S_1/A)$  或  $\theta = \arccos(-S_2/A)$ , 那么一个周期内正余弦信号切换及区间修正如表 1 所示。

表 1 正余弦信号切换及区间修正表

卦限	$\arcsin S_1/A$ 求得的相位范围	$\arccos(-S_2/A)$ 求得的相位范围	修正后的 $\theta$	修正后范围
1	$0 \sim \pi/4$	—	$\arcsin(S_1/A)$	$0 \sim \pi/4$
2	—	$\pi/4 \sim \pi/2$	$\arccos(-S_2/A) - \pi/4$	$0 \sim \pi/4$
3	—	$\pi/2 \sim 3\pi/4$	$\arccos(-S_2/A) - \pi/2$	$0 \sim \pi/4$
4	$\pi/4 \sim 0$	—	$\pi/4 - \arcsin S_1/A$	$0 \sim \pi/4$
5	$0 \sim -\pi/4$	—	$-\arcsin S_1/A$	$0 \sim \pi/4$
6	—	$3\pi/4 \sim \pi/2$	$3\pi/4 - \arccos(-S_2/A)$	$0 \sim \pi/4$
7	—	$\pi/2 \sim \pi/4$	$\pi/2 - \arccos(-S_2/A)$	$0 \sim \pi/4$
8	$-\pi/4 \sim 0$	—	$\pi/4 + \arcsin S_1/A$	$0 \sim \pi/4$

总的相位变化量为  $\pi/4$  乘上计数器的值  $n$ , 再加上不满一个计数周期  $\pi/4$  的相位  $\theta$ , 其中不满一个计数周期的相位  $\theta$  采用表 1 中修正后的  $\theta$  公式进行计算, 那么总的位移量  $x$  的表达式为:

$$x = \frac{\lambda}{16} \cdot n + \frac{\lambda}{4\pi} \cdot \theta \quad (3)$$

3 信号处理方法实现

信号处理系统主要采用 FPGA+DSP 架构的

信号采集板(如图 3 中点画线构成的框内部分)。信号采集板中的 A/D 转换采用最高采样频率可达 125 M、分辨率为 14 位的 AD9246。FPGA 芯片采用 ALTERA 公司的 StratixII EP2S60F1020I4 芯片; DSP 采用 TI 公司的主频达 300 MHz、数据线位数为 32 位、地址线位数为 20 位的 TMS320C6713B 芯片。在激光圆偏振干涉信号处理中, 需要高速 A/D 采集以及反正弦等复杂运算, 所以采用 FPGA+DSP 架构的信号处理系统。

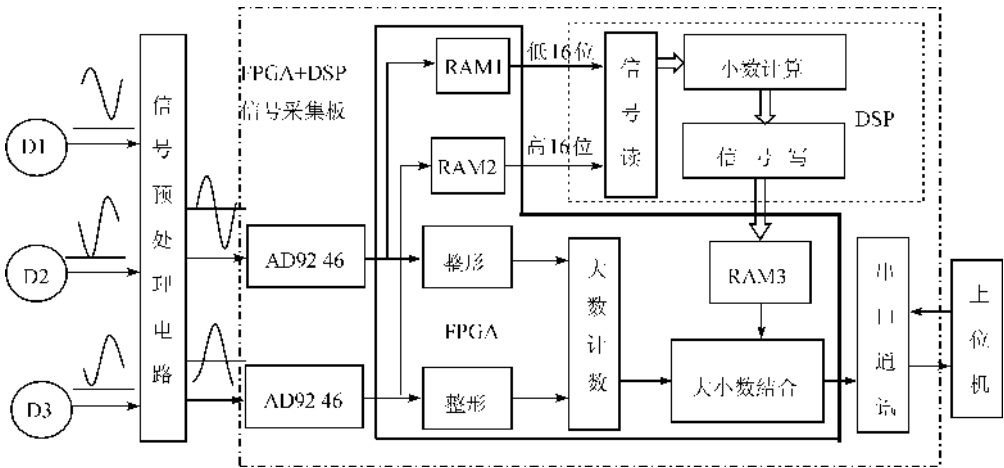


图 3 信号处理系统

图 3 为激光圆偏振干涉纳米位移测量系统总框图。经过预处理电路输出的两路信号  $S_1$  和  $S_2$  由 A/D 转换后输入 FPGA 芯片中, FPGA 将得到的两路信号  $S_1$ 、 $S_2$  分别分成并行的两路, 一路经过整形模块后进行大数计数; 另一路先将 14 位的信号的最高位前补上两位 0, 转换成 16 位的信号, 再分别存入 FPGA 中设置的 16 位数据位宽和 6 位的地址位宽的 RAM 模块中, 作为信号的读模块。其中 RAM1 的数据输出端接 DSP 芯片中数据线的低 16 位, RAM2 的数据输出端接 DSP 芯片中数据线的高 16 位, 再在 DSP 芯片中将信号分成信号  $S_1$  和信号  $S_2$ 。这种方式可以实现信号  $S_1$  和信号  $S_2$  同步传输以及提高 FPGA 和 DSP 之间的数据传输速度。根

据 DSP 芯片得到的两路信号, 依据表 1 中的公式进行小数计算, 并将计算结果进行写操作, 传输给 FPGA 中的 RAM3 模块, RAM3 模块也为 16 位数据位宽和 6 位的地址位宽, 数据输入端接 DSP 芯片中数据线的低 16 位。将大数计数模块中的结果和 RAM3 模块得到的小数计算结果进行大小数整合, 得到位移量  $x$ , 并通过串口通讯方式传输给上位机进行显示。图 3 中实线框图为 FPGA 芯片内完成的部分, 虚线框图为 DSP 芯片内完成的部分。

4 实验结果及分析

采用 Agilent 公司的 5517A 型 He-Ne 激光器, 安装测量镜的运动平台采用德国 PI 公司生产的高精度位移运动平台 P-752.1CD, 该平台具有位移显

示功能,其运动范围为  $15\ \mu\text{m}$ ,分辨率可达  $0.1\ \text{nm}$ 。以  $100\ \text{nm}$  步长的测量结果如图 4 所示,其测量结果的线性拟合相关系数为  $0.983\ 6$ ,标准差为  $1.88\ \text{nm}$ ;以  $1\ \mu\text{m}$  步长的测量结果如图 5 所示,其测量结果的线性拟合相关系数为  $0.999\ 2$ ,标准差为  $2.96\ \text{nm}$ 。实验结果表明,所设计的信号处理系统和干涉信号处理方法对纳米位移测量具有较高的线性度和较小的标准偏差,表明系统方案是可行的。

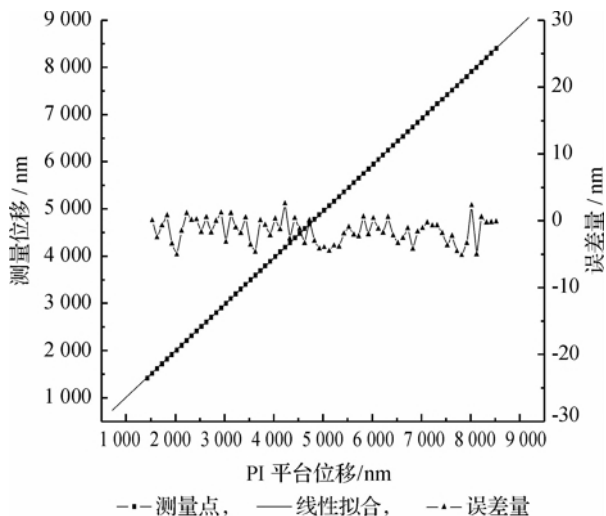


图 4  $100\ \text{nm}$  为步长的测量结果

注:线性拟合相关系数为  $0.983\ 6$

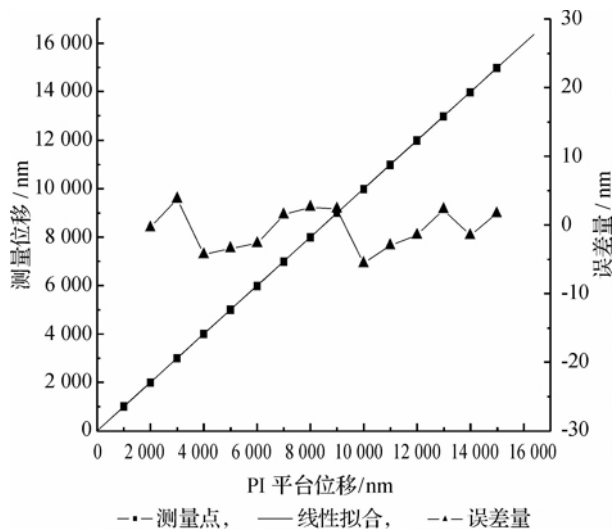


图 5  $1\ \mu\text{m}$  为步长的测量结果

注:线性拟合相关系数为  $0.999\ 2$

## 5 结 论

设计了基于 FPGA+DSP 架构的激光圆偏振干涉纳米位移测量信号的处理系统,并提出了正余弦切换的干涉信号处理方法来减小 A/D 误差和直流噪声引入的位移误差。通过  $100\ \text{nm}$  和  $1\ \mu\text{m}$  为步长的位移测量实验,验证了所设计的系统的可行性以及干涉信号处理方法的有效性。

## 参考文献:

- [1] 郭新军,王 霁,严家骅,等. 一种纳米精度偏振干涉仪光学系统的研究[J]. 红外与激光工程, 2004, 33(1): 21-24.
- [2] Joo K N, Ellis J D, Buice E S, et al. High resolution heterodyne interferometer without detectable periodic nonlinearity[J]. Optics Express, 2010, 18(2): 1159-1165.
- [3] 殷纯永. 现代干涉测量技术[M]. 天津: 天津大学出版社, 1999: 231-233.
- [4] 闫冠屹, 谌雅琴, 孙利群, 等. 基于 FPGA 的单频激光干涉仪高速相位检测器设计与实现[J]. 光电子技术, 2012, 32(1): 11-14.
- [5] 赵思维, 严利平, 杨 涛, 等. 基于 DSP 的激光外差干涉信号处理方法[J]. 浙江理工大学学报, 2011, 28(2): 217-220.
- [6] 王丽华, 曲兴华. 基于 DSP 的高精度激光干涉仪的研制[J]. 自动化仪表, 2009, 30(10): 69-75.
- [7] 张国雄, 金篆芷. 测控电路[M]. 北京: 机械工业出版社, 2000: 204-205.
- [8] 李怀琼, 陈 钱, 王 钰. 新型光栅信号数字细分技术及其误差分析[J]. 计量学报, 2001, 22(4): 281-283.
- [9] Chen Benyong, Luo Jianbo, Li Dacheng. Code counting of optical fringes: methodology and realization[J]. Applied Optics, 2005, 2(44): 217-223.
- [10] Yan Liping, Chen Benyong, Li Dacheng, et al. Signal processing method of a laser synthetic wavelength interferometer[J]. Measurement Science and Technology, 2010, 21(1): 1-8.
- [11] 穆瑞珍, 杨万福, 陈本永. 干涉条纹大数计数软件新方法及其实现[J]. 光学技术, 2008, 34(5): 687-692.

(下转第 712 页)

## Application of Five-Point Central Wavelength Algorithm in FBG Temperature Measurement System

XUE Jing-zhen<sup>1</sup>, YUAN Yan-hong<sup>1</sup>, YUAN Hai-jun<sup>2</sup>

- (1. Modern Textile Equipment and Technology Engineering Research Center, Ministry of Education, Zhejiang Sci-Tech University, Hangzhou 310018, China;  
2. 3S Hi-Technologies Co., Ltd., Shanghai 201203, China)

**Abstract:** This paper introduces the fundamental principles of five-point central wavelength algorithm, applies it in fiber bragg grating(FBG) temperature measurement system based on Labview virtual instrument development platform in combination with the characteristic of programmable control of TLS tuned laser, and compares and analyzes test results obtained by five-point central wavelength algorithm and Gaussian fitting algorithm. The result shows that, with the appropriate step scanning method, five-point central wavelength algorithm and Gaussian fitting algorithm have a high temperature resolution, but the former has faster computation speed and can better ensure the response speed of FBG temperature measurement system.

**Key words:** fiber bragg grating(FBG); five-point central wavelength algorithm; Labview; temperature measurement

(责任编辑: 张祖尧)

---

(上接第 692 页)

## Signal Processing Method of Laser Circular Polarization Interference Nanometer Displacement Measurement

ZHANG Miao-ling, YAN Li-ping, LOU Ying-tian, LIU Yan-na, CHEN Ben-yong

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

**Abstract:** This paper introduces the light path structure of laser circular polarization interference nanometer displacement measuring system of; puts forward interference fringe processing method based on sine and cosine signal switching in allusion to A/D error and displacement error introduced by dc noise so as to improve the measuring accuracy; designs laser circular polarization interference nanometer displacement measuring system based on FPGA and DSP architecture. FPGA is mainly used for signal acquisition, large number counting and communication with upper computer. DSP is mainly used for small number calculation. The result of displacement experiment shows that, when the step length is 100 nm, within the scope of 0~7  $\mu\text{m}$ , the correlation coefficient of linear fitting of the measuring result is 0.983 6 and standard deviation is 1.88 nm; when the step length is 1  $\mu\text{m}$ , within the scope of 0~15  $\mu\text{m}$ , the correlation coefficient of linear fitting of the measuring result is 0.999 2 and standard deviation is 2.96 nm. It verifies that interference fringe processing method proposed and signal processing system can achieve the requirement of nanoscale displacement measuring accuracy.

**Key words:** laser circular polarization interferometer; nanometer displacement measurement; signal processing; FPGA and DSP

(责任编辑: 张祖尧)