

文章编号: 1673-3851 (2011) 02-0217-04

基于 DSP 的激光外差干涉信号处理方法

赵思维, 严利平, 杨 涛, 周砚江, 陈本永

(浙江理工大学纳米测量技术实验室, 杭州 310018)

摘 要: 描述激光外差干涉测量的原理,设计基于 DSP 的激光外差干涉信号处理方法,用 DSP 的捕捉单元获取参考信号和测量信号的上升沿时间差,在捕捉单元中断中计算测量信号周期,由 DSP 将时间差转化为相位差并得出被测位移。采用信号发生器模拟两路输入信号,在 $0\sim 360^\circ$ 范围内进行相位差测量实验,测量结果表明标准偏差为 0.041° 、线性拟合相关系数为 0.999 89。以 20 nm 为步长在 $0\sim 320$ nm 范围内进行位移测量实验,实验结果表明标准偏差为 2.46 nm、线性拟合相关系数为 0.999 71,验证了所设计的信号处理方法的可行性和实用性。

关键词: 纳米测量; 激光外差干涉; 信号处理; DSP; 捕捉单元

中图分类号: TH741 **文献标识码:** A

0 引 言

激光外差干涉仪由于其测量范围大、精度高和可溯源性等优点,已经广泛地运用于位移、振动、速度和转角等各种精密测量中^[1-2]。激光外差干涉测量是将被测量的物理量转化为调频或调相信号,经解调后再进行进一步的处理。目前对于外差信号的处理大致可以分为两类^[3-5]:一类是基于频率脉冲相减的方法,另一类是相位测量法。频率脉冲相减的方法采用锁相环进行电子倍频细分来提高测量分辨率。由于锁相环的频率捕捉范围有限,限制锁相倍频计数法测量精度的进一步提高,因此锁相倍频方法仅适用于一般精度的动态测量^[6]。相位测量法则可以实现高精度的动态测量,其测量精度取决于相位差的检测精度。目前对相位差的处理可采用现场可编程门阵列(field-programmable gate array, FPGA)^[7]或复杂可编程逻辑器件(complex programmable logic device, CPLD)^[8],虽然其响应处理速度很快,但是对于需要大量运算的处理则显得力不从心。数字信号处理器(digital signal processor, DSP)的处理速度可达 ns 级,低功耗,高精度,编程方便^[9],特定的捕捉单元对于检测相位差具有独特优势,丰富的片内资源可以大幅地简化测量系统的整体结构,在保证精度的同时能够进行快速实时测量^[10]。而且 DSP 的量化功能^[11]能够提高信号的稳定性,降低采集信号时出错的概率,同时它强大的运算能力也为需要复杂运算的处理提供保证。基于此,本文提出采用 DSP 技术实现激光外差干涉信号处理的方法,并进行了仿真和实际测试实验。

1 激光外差干涉测量原理

激光外差干涉测量的原理如图 1 所示。从双频激光器发射出一束频率为 f_1 和 f_2 的正交线偏振光,经分束镜分为两路,一路被反射到检偏器上(检偏器的透光轴与纸面成 45°),拍

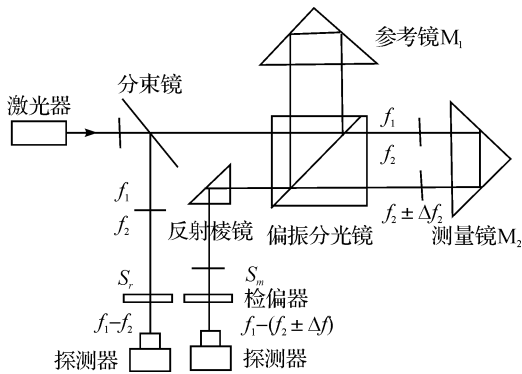


图 1 激光外差干涉测量原理

收稿日期: 2010-09-15

基金项目: 国家自然科学基金项目(90923026)

作者简介: 赵思维(1985-),女,黑龙江齐齐哈尔人,硕士研究生,研究方向为激光干涉测量技术。

频后经光电探测器检测形成参考信号 S_r , 其信号频率为 $f_1 - f_2$ 。另一路经过偏振分光镜后, 频率为 f_1 的线偏振光被反射至参考镜 M_1 (通常固定), 频率为 f_2 线偏振光透过偏振分光镜, 入射至测量镜 M_2 , 这两束光分别经 M_1 、 M_2 反射后汇合于偏振分光镜并沿入射的平行方向返回, 返回光束经反射棱镜及检偏器拍频后形成测量信号 S_m 。当测量镜 M_2 移动时, 测量信号 S_m 的频率为 $f_1 - (f_2 \pm \Delta f)$, 其中 $\Delta f = \frac{2v(t)}{\lambda}$ 是由测量镜运动引起的多普勒频移。参考信号 S_r 和测量信号 S_m 相减后只剩下 Δf 频移, 它和测量镜位移的关系是:

$$L = \int_0^t v(t) dt = \frac{\lambda}{2} \int_0^t \Delta f \cdot dt$$

(1)

则测量镜位移与测量信号和参考信号相位差关系为:

$$\varphi(t) = \frac{4\pi L}{\lambda}$$

(2)

式(2)中, $\varphi(t)$ 是参考信号与测量信号之间的相位差; L 是测量镜运动位移; λ 为反射光波长。

2 信号处理方法设计

2.1 外差信号处理方法

激光外差干涉信号处理原理如图 2 所示。信号处理采用填脉冲计数的方法。检测参考信号 S_r 和测量信号 S_m 正向过零点的时间差信号, 向其中填入高速脉冲, 得到两信号时间差的高速脉冲个数计数值 n 。检测测量信号 S_m 两个相邻正向过零点的时间差 (即信号周期) 信号, 向其中填入高速脉冲得到测量信号周期的高速脉冲个数计数值 N 。由图 2 可知:

$$\Delta\varphi = \frac{\Delta t}{T} \times 360^\circ = \frac{n}{N} \times 360^\circ$$

(3)

式(3)中, $\Delta\varphi$ 表示测量的相位差; Δt 表示参考信号 S_r 与测量信号 S_m 正向过零点的时间差; T 表示信号周期; n 表示 Δt 时间内高速脉冲个数; N 表示周期 T 内高速脉冲个数。

由信号处理原理可知, $\Delta\varphi$ 的测量精度取决于信号频率和所填高频脉冲的频率, 信号频率越低, 高频脉冲频率越高, 测量精度就越高。

2.2 信号处理的 DSP 实现

DSP 的信号处理框图如图 3 所示。由光电探测器接收到的参考信号 S_r 与测量信号 S_m 分别送入混频、整形、滤波电路进行信号的预处理。光电探测器接收到两信号的频率均为 1.91 MHz。经过混频整形后, 可得到两路频率为 14.5 kHz 的方波, 将所得方波信号采集入 DSP 后进行相应的运算处理, 处理完成的数据通过 RS232 通讯, 送入上位机显示。

DSP 处理芯片选用 TI 公司的 TMS320F28335 (以下简称 28335)。采用 28335 的增强捕捉单元模块 (enhance capture module, eCAP) 进行信号采集。28335 设有 6 个 eCAP 模块, 每个 eCAP 模块都可以通过设置, 独立捕捉输入信号的上升或下降沿, 每个 eCAP 模块设有独立的计数器, 在发生捕捉时能够保存捕捉时刻计数器的计数值。每个 eCAP 模块设有 4 个深度的循环缓冲, 用以实现连续事件的捕捉操作, 其中任何一个捕捉事件都可以触发产生中断。

选用 30M 晶振为 28335 提供时基, 经锁相倍频后实现时钟频率为 150 MHz。选用 28335 的 eCAP₁ 和 eCAP₃ 两个捕捉单元, 设置其捕捉信号上升沿, 两捕捉模块计数器同步工作, 捕捉四次后产生中断。DSP 详细处理原理如图 4 所示。1, 2, 3, 4 为 eCAP₁ 捕捉到参考信号上升沿时刻计数器的计数值; 1', 2', 3', 4' 为 eCAP₃ 捕捉到测量信号上升沿时刻计数器的计数值。完成捕捉后, 计算出测量信号上升沿与参考信号上升

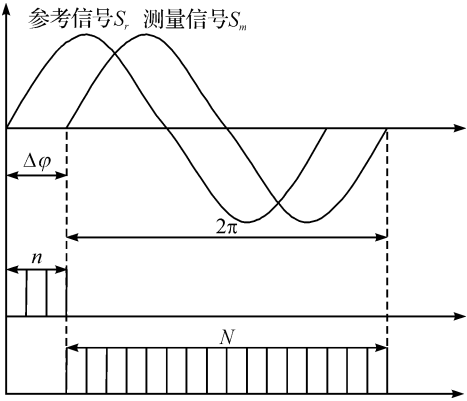


图 2 填脉冲式相位测量法原理

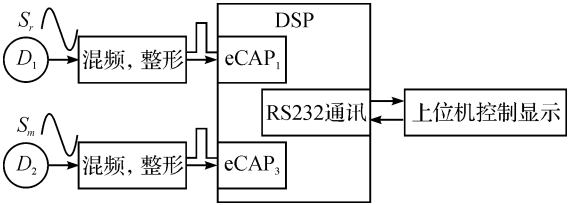


图 3 信号处理框图

沿计数器的差值,即 $(1'-1)$, $(2'-2)$, $(3'-3)$,得到两信号上升沿的时间差计数值 n_1, n_2, n_3 。再计算测量信号两相邻上升沿计数器计数值之差,即 $(2'-1')$, $(3'-2')$, $(4'-3')$,得到周期计数值 N_1, N_2, N_3 。其中 n_1 为对应于周期 N_1 的上升沿时间差, n_2 为对应于周期 N_2 的上升沿时间差, n_3 为对应于周期 N_3 的上升沿时间差。将上述所得值代入式(3),计算可得 $\Delta\varphi_1, \Delta\varphi_2, \Delta\varphi_3$,为保证数据的准确性,取其平均值得到 $\Delta\varphi$,
$$\Delta\varphi = \frac{\Delta\varphi_1 + \Delta\varphi_2 + \Delta\varphi_3}{3}$$
。再根据外差测量原理,通过式(2)就可以计算出位移。

软件实现方法为:在捕捉单元中断服务子程序中计算信号周期 N_1, N_2, N_3 ,在主程序中进行 $n_1, n_2, n_3, \Delta\varphi, L$ 等数据的计算,处理完成后送入上位机显示。程序流程见图 5(a)主程序流程图和图 5(b)中断服务子程序流程图。

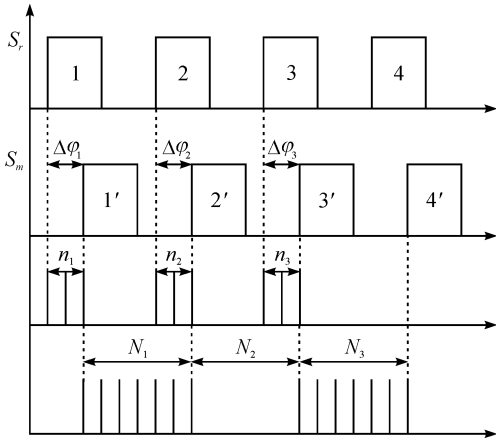


图 4 DSP 信号处理原理

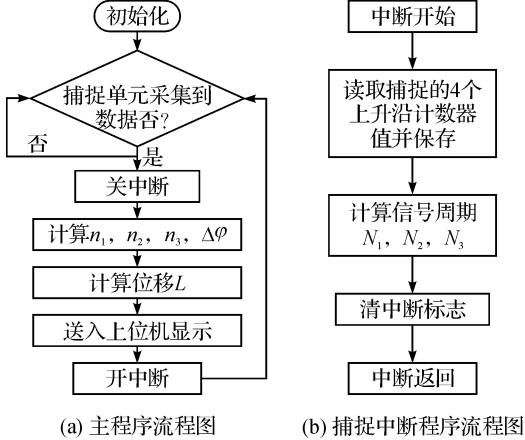


图 5 激光外差干涉信号处理程序流程

3 实验及结果分析

为验证所设计方法的可行性,首先进行了相位差测量实验。采用 TEKTRONIX 公司的 AFG320 型信号发生器产生两路方波分别作为参考和测量信号送入 DSP,信号频率均为 14.5 kHz,幅值为 3.3 V,测量系统的理论分辨率 0.0348° 。实验时使两信号相位差在 $0\sim 360^\circ$ 范围内以 5° 为间隔递增,记录每次递增后的相位差值,实验结果及误差如图 6 所示。图 6(a)为相位差测量实验结果,图 6(b)为对应实验结果的测量误差。相位差测量实验的线性拟合相关系数为 0.999 89,实验误差的范围在 $0.5\sim 0.7^\circ$ 之间,误差最大值为 0.68° ,最小值为 0.51° ,平均值为 0.58° ,标准偏差为 0.041° 。可以看出,所设计信号处理方法实现了较高准确度的相位差测量。

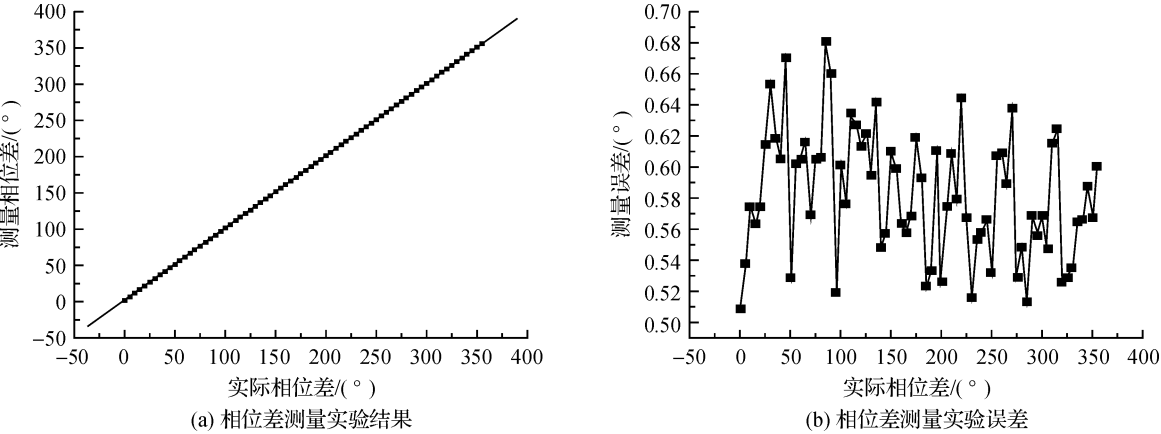


图 6 相位差测量实验结果及误差

在完成相位差测量实验的基础上,进行了测量范围在 320 nm 内,步进距离为 20 nm 的位移测量实验。实验采用北京普瑞公司生产的双纵模 He-Ne 激光器 PT-1150B,该激光器射出中心波长为 632.990 76 nm、

频差为 1.91 MHz 的正交线偏振光。测量镜位移由德国 PI 公司生产的压电陶瓷驱动的微动平台 P-517.3 CD 提供,该平台运动位移范围是 15 μm ,分辨率为 0.1 nm。

实验过程为:首先由上位机设定微动平台的步进距离为 20 nm,在初始位置(即位移为 0 时)测量初始相位差。再使微动平台步进 20 nm 距离,待平台稳定后测量此时相位差,而后通过 DSP 计算因平台步进产生的相位差,再通过相关公式计算出与相位差对应的位移,最后送入上位机显示。位移测量实验结果及误差如图 7 所示。图 7(a)为位移测量实验的实验结果,图 7(b)为对应于位移测量实验的测量误差,系统的理论分辨率为 0.031 nm。对实验结果进行线性拟合,线性拟合相关系数为 0.999 71,误差范围在 -5~4 nm 之间,其中误差最大值为 4.53 nm,最小值为 0.12 nm,平均值为 -0.553 nm,标准偏差为 2.46 nm。

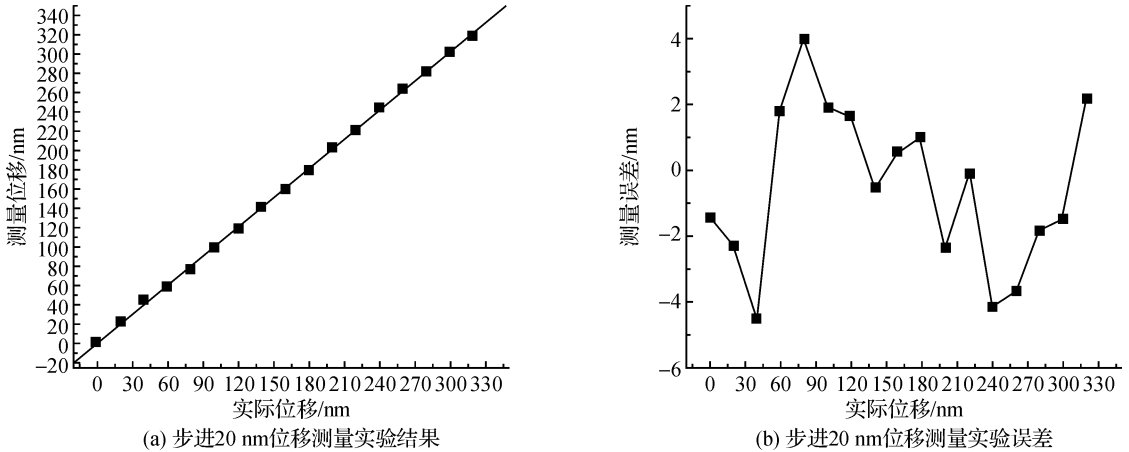


图7 位移测量实验结果及误差

4 结 论

设计了基于 DSP 的激光外差干涉信号处理方法,描述了 DSP 处理外差信号的原理及其实现,通过相位差测量实验和位移测量实验,验证了所设计的信号处理方法的可行性和实用性。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] Kim Min-Seok, Kim Seung-Woo. Two-way frequency-conversion phase measurement for high-speed and high-resolution heterodyne interferometry[J]. Meas. Sci. Technol, 2004, 15(11): 2341-2348.
- [3] 戴高良,殷纯永. 用于纳米测量的混合型外差干涉信号处理方法[J]. 光学技术, 1999, 25(1): 21-23, 27.
- [4] 赵 洋,李达成. 一种新的外差干涉信号处理方法—相位及相位整数测量法[J]. 计量学报, 1995, 16(1): 31-36.
- [5] 章恩耀,王 佳. 激光外差干涉仪中的鉴频和鉴相方法[J]. 航空计测技术, 1993, 13(1): 7-11, 22.
- [6] 张贵珍,陈本永,周砚江. 基于锁相混频原理的高精度激光外差干涉信号的处理方法研究[J]. 传感技术学报, 2005, 18(3): 547-550.
- [7] 赵威威,廖京川,余先伦,等. 基于 FPGA 平均值原理相位差计的设计[J]. 现代电子技术, 2009, 32(6): 18-20.
- [8] 缪晓中. 基于 MCU+CPLD 的相位差和频率的测量方法研究及实现[J]. 国外电子元器件, 2008(7): 10-12.
- [9] 林健新. 浅谈 DSP 数字信号处理器的特性及应用[J]. 科技风, 2010(5): 228.
- [10] 应仲阳,马修水,李 光. 基于 DSP 信号处理的光栅传感器位移测量及应用[J]. 安徽电子信息职业技术学院学报, 2007, 6(4): 87-88.
- [11] 苏奎峰. TMS320x28xxx 原理与开发[M]. 北京: 电子工业出版社, 2009: 298.

(下转第 229 页)

Research on Laterally Walking Gait of Hexapod Robot

LIU Lian-rui, ZHANG Ze, GAO Jian-hua

(School of Machinery and Automation, Zhejiang Sci-Tech University, Hangzhou 310018, China)

Abstract: The laterally walking gait of hexapod walking robot has been researched based on a new type of multi-DOF hexapod robot mechanism. The planning of a laterally walking tripod gait and foot trajectory, the analysis of stability are all completed. The kinematical simulation and analysis of the hexapod robot model have been done by using Pro/E and ADAMS at the end. The laterally walking gait proved feasible by the simulation results. This can provide foundation for the experiment of physical prototype.

Key words: hexapod walking robot; laterally walking tripod gait; stability; virtual prototype; gait planning

(责任编辑: 杨元兆)

(上接第 220 页)

Signal Processing Method of the Laser Heterodyne Interferometry Based on DSP

ZHAO Si-wei, YAN Li-ping, YANG Tao, ZHOU Yan-jiang, CHEN Ben-yong

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

Abstract: The principle of laser heterodyne interferometry is introduced. The signal processing method of the heterodyne interferometer is designed based on digital signal processor (DSP). Time difference between the rising edges of reference signal and measurement signal is obtained by the enhanced capture module (ECAP) of DSP. The period of measurement signal is calculated in the interrupt service routine of ECAP. Then the phase difference is calculated according to the time difference and period of measurement signal. Thus, the measured displacement can be obtained. The phase difference measuring experiment is carried out in the range of $0\sim360^\circ$ by using a two channels function generator which outputs two square signals. The experimental result shows that standard deviation is 0.041° and the linearity coefficient is 0.99989. The displacement measurement experiment is carried out with step increment 20 nm in the range of 320 nm. The experimental result shows that the standard deviation is 2.46 nm and the linearity coefficient is 0.99971. These results show that the proposed signal processing method is reasonable and feasible.

Key words: nanometer measurement; laser heterodyne interferometer; signal processing; DSP; capture unit

(责任编辑: 杨元兆)