

doi: 10.3788/lop47.041201

一种基于电流调制和 DSP 解调的激光自混合干涉测振仪

夏 巍 张小元 岳邦强 戎 华 郭冬梅

(南京师范大学物理科学与技术学院江苏省光电技术重点实验室, 江苏 南京 210097)

摘要 研究了半导体激光自混合干涉测振仪的调制与解调技术。设计了基于电流调制和 DSP 解调的半导体激光自混合干涉测量系统, 实现对振动物体的非接触式测量。分析了激光自混合干涉测振仪的理论模型, 并用 Matlab 进行了仿真和误差分析。研究了系统的调制解调技术及基于 DSP 的数据采集与处理系统。该系统体积小、成本低、易于准直。提出的测振仪能够测量振动频率在 5 kHz 内的物体振动频率、振幅及振动波形, 振动幅度测量精度可达 0.325 μm 。

关键词 测量; 激光自混合干涉; 测振仪; DSP 技术

中图分类号 TN249 OCIS 120.3180 140.5960 文献标识码 A

Laser Self-Mixing Interference Vibrometer Based on Current Modulation and DSP Demodulation

Xia Wei Zhang Xiaoyuan Yue Bangqiang Rong Hua Guo Dongmei

(Jiangsu Provincial Key Laboratory on Opto-Electronic Technology, School of Physical Science and Technology Nanjing Normal University, Nanjing, Jiangsu 210097, China)

Abstract The modulation and demodulation technology of semiconductor laser self-mixing interference vibrometer is researched. With triangular wave modulation and DSP demodulation technology of self-mixing interference, a new type vibrometer is designed to achieve non-contact vibration measurement of a target. The theoretical model of the laser self-mixing interference vibrometer is analyzed and simulation and measurement error analysis are done using matlab. The modulation and demodulation technology of the vibrometer system and DSP-based data acquisition and processing system are researched. The vibrometer is small-sized, low-cost and easy to collimate, and can measure the object whose vibration frequency range arrives 5 kHz, and the vibration scope measuring accuracy may achieve 0.325 μm . The instrument can measure the vibration frequency and amplitude data of the vibration object and restore the vibration wave.

Key words measurement; laser self-mixing interference; vibrometer; DSP technology

1 引 言

激光自混合干涉(也称激光反馈干涉)技术^[1~3]是一种新型的干涉测量技术, 它利用部分出射激光束被外部物体反射或散射后重新耦合到激光腔内, 与激光器内发出的激光发生自混合干涉, 干涉信号携带被照射物体的运动信息, 可以用于振动、位移等参数的测量^[4~7]。激光自混合干涉技术在位移、速度、绝对距离、振动等测量方面得到了广泛的应用。

收稿日期: 2009-06-27; 收到修改稿日期: 2009-10-11

基金项目: 江苏省普通高校自然科学研究计划(08KJB510008)

作者简介: 夏 巍(1985—), 男, 硕士研究生, 主要从事光电传感与智能仪器等方面的研究。E-mail: marksman_sz@163.com

导师简介: 戎华(1965—), 男, 博士, 副教授, 主要从事微电子学及 MEMS 领域的研究。E-mail: ronghua_1965@263.net

传统测振仪一般由模/数(A/D)电路, 或与计算机机结合构成, 具有结构复杂、成本较高、不易携带、对测量环境要求高的特点。本文结合三角波电流调制型激光自混合干涉技术^[4], 设计了一种基于电流调制和 DSP 解调的半导体激光自混合干涉测振仪, 实现对振动的非接触测量^[8-10], 使测振仪的成本大为降低, 并且简化了结构, 便于携带。

2 测量原理

测振仪的结构如图 1 所示, 半导体激光器(LD)由三角波电流驱动, 输出激光光功率以及光频率均被调制, 干涉信号的强度由光电探测器(PD)检测得到。对 PD 检测得到的信号进行预处理后, 由 A/D 芯片采样, 采样得到的数据送入 DSP 处理得到振动信息。

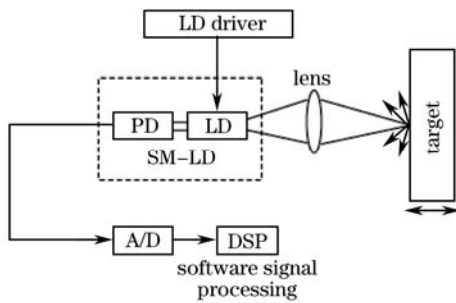


图1 测振仪系统结构

Fig.1 System structure of vibrometer

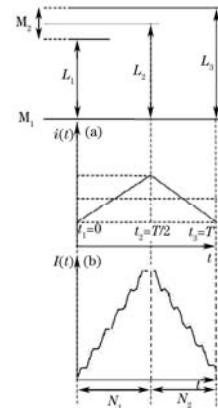


图2 测振仪测量原理图

Fig.2 Schematic graphic of vibrometer

利用 LD 在发射阈值以上的一段区域, 输出功率与输入电流呈线性关系, 通过调制输入电流直接调制 LD 的输出, 具有响应速度快, 调制频率高的特点, 测量原理图如图 2 所示。其中(a)为调制激光器的三角波电流, (b)为 PD 的输出信号。 M_1 为参考面, M_2 为振动表面, 当 M_1 , M_2 之间的距离 L 满足

$$L = n \times \frac{\lambda}{2} \quad (1)$$

时, 干涉光的强度最强。其中 λ 为激光波长, n 为整数。由此可见, 待测物体半波长的移动将会引起 PD 探测信号的一个模跳, 如图 2(b)所示, N_1 为干涉信号上升沿的模跳变数目, N_2 为干涉信号下降沿的模跳变数目。所以, 待测物体在一个三角波调制周期内的位移为

$$L_3 - L_1 = \frac{\lambda}{2} (N_2 - N_1) = \frac{\lambda}{2} \Delta N. \quad (2)$$

通过求出待测物体在每个三角波调制周期内的位移, 并把这些位移累加起来, 就可以恢复出物体的位移波形, 如

$$\Delta L = \frac{\lambda}{2} (\Delta N)_1 + \frac{\lambda}{2} (\Delta N)_2 + \dots + \frac{\lambda}{2} (\Delta N)_n = \frac{\lambda}{2} \sum_{i=1}^{i=n} (\Delta N)_i. \quad (3)$$

基于直流驱动的半导体激光器测振仪, 必须通过判断自混合信号的不对称性来确定物体的运动方向^[2]; 在电流调制型测量系统中, 物体运动方向的信息隐含在 $(N_2 - N_1)$ 中, 不必检测物体的换向标志, 为后续电路的处理带来了方便, 因为在环境噪声大、反馈光较弱的情况下, 换向标志是不容易测得的。

3 算法仿真与误差分析

仿真的具体参数为: 三角波的频率为 4 kHz, 峰一峰值为 2 mA, 直流分量为 50 mA; 待测物体的振动速度为: $V(t) = 3.1 \times 10^{-3} \cos(400\pi t)$; 外腔长为 12 cm, 仿真的时间为 40 ms。三角波的调制频率与物体的

振动频率为 20:1。根据测振原理，一个三角波周期内的自混合条纹数可以计算出待测物体在这个周期内的位移。最终算法恢复的物体振动波形在一个周期就有 20 个测量点。

图 3(a)为自混合干涉(SMI)信号，图 3(b)为待测物体的振动波形，图 3(c)为由算法重构出的物体振动波形。由提出的算法可以看出，算法中含有“累加”运算，模跳数的误差将会累加起来，所以重构出的波形存在累加误差，如图 3(c)所示。解决方法是采取表达式

$$Y(n) = y(n) - \sum_{i=n-N/2}^{i=n+N/2} y(i) \times (N+1)^{-1}, \quad (4)$$

去除累加误差。式中 $y(n)$ 为待测物体在时刻 n 的位移， N 一般取值为被测物体的振动周期， $Y(n)$ 为去除累积误差后的位移。

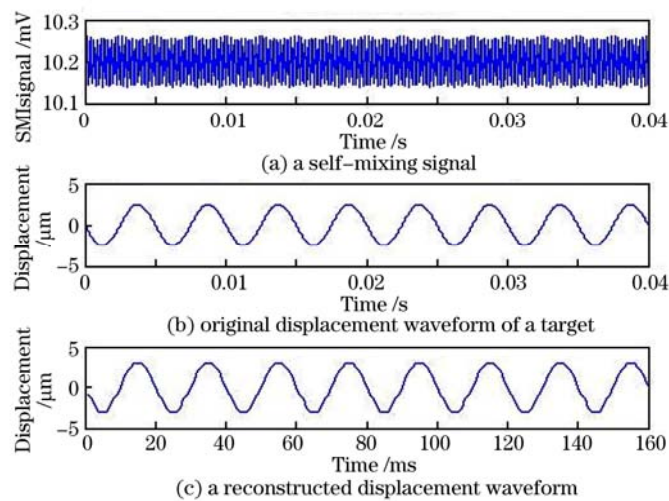


图 3 算法仿真(三角波调制频率与物体振动频率之比为 20:1)

Fig.3 Algorithm simulation (the frequency ratio of modulation triangular waveform and object vibration is 20:1)

由图 3 可以看出，本算法能够从被测物体的自混合信号中较好地重构出物体的振动波形。图 4(a)所示为测量点在原始振动波形上的分布，图 4(b)所示为测量误差。由于待测物体的振动和自混合信号都是周期性的，故误差也为周期性的。从图中可以看出，除了峰值点以外，测量误差还是比较小的。最大误差限制在 $0.3 \mu\text{m}$ ，与理论上的测量精度相吻合。

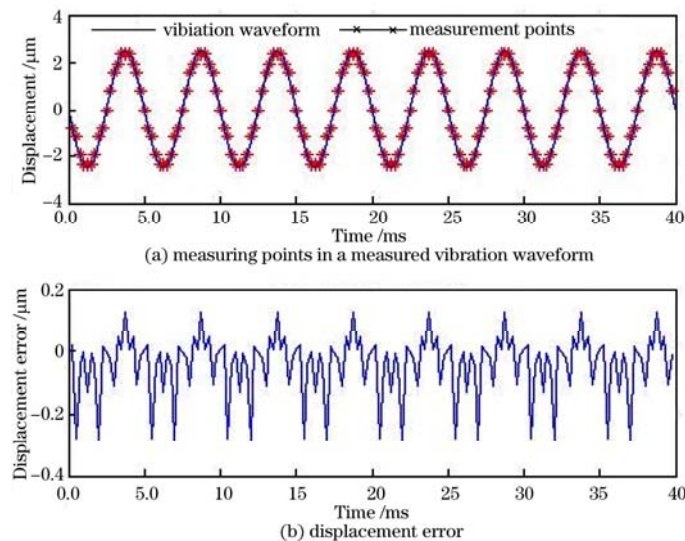


图 4 位移测量误差

Fig.4 Error in displacement measurement

测量误差主要是由三角波调制频率以及振动物体速度引起的^[5], 被测物体在一个三角波周期内的位移为 $\frac{\lambda}{2}\Delta N$, 所以在一个三角波周期内, 算法能测到的最小位移为 $\frac{\lambda}{2}$, 即最小的可测速度为 $V_s = \left(\frac{\lambda}{2}\right) \times T_s^{-1} = \frac{\lambda}{2} f_s$ 。当物体做正弦振动时, 最小可测速度出现的位置正好对应于物体位移波形上的波峰和波谷的位置。这解释了图 4 中误差为什么集中出现在波峰和波谷。

4 测量结果

测量结果是由硬件系统实时采集数据并交由 DSP 处理所得, 测量环境与软件仿真时一样。设计的算法程序在 CCS2000 2.2 版本下调试通过, 图 5 是在 CCS 开发环境下, 采用 DSP2407A 实时处理, 利用图形工具观察得到的。在实验中, 调制频率为 2 kHz, 振幅峰-峰值 60 mV, 扬声器靶面振动频率为 300 Hz, 驱动电压振幅峰-峰值分别为(a)300 mV, (b)400 mV, (c)500 mV 做正弦振动。

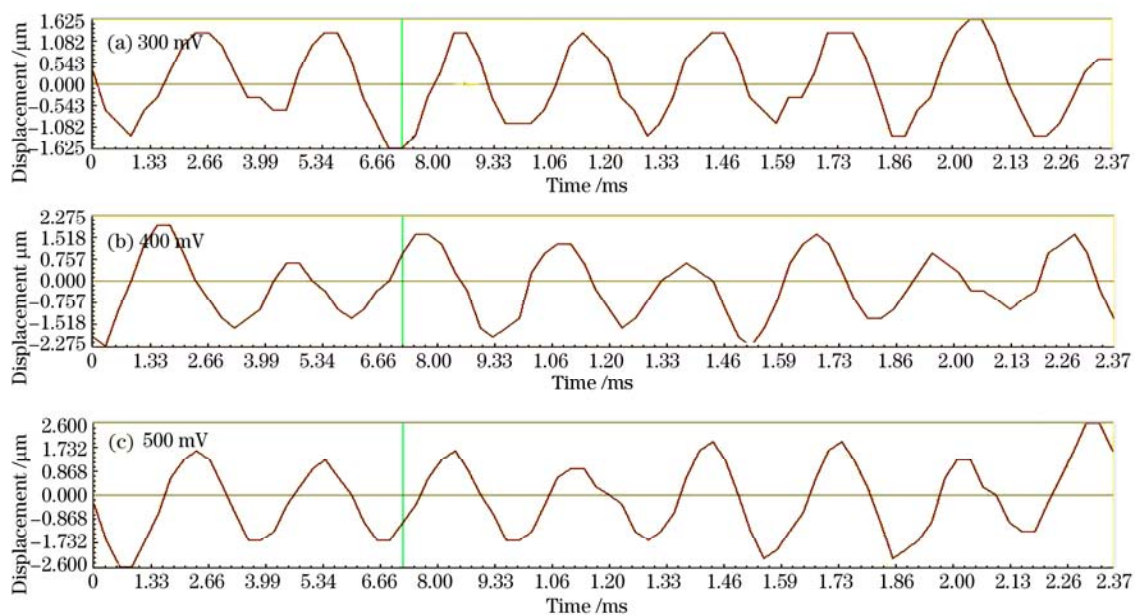


图 5 CCS 显示结果图
Fig.8 Measurement results displayed on CCS

5 结 论

设计了基于 DSP 的三角波电流调制型激光自混合干涉测振仪。通过检测自混合模跳数目, 可以得到在一个调制周期内物体的振动情况, 再通过多周期累加可以得到振动的完整信息。经实验证明, 其振幅测量精度可以达到 $0.325 \mu\text{m}$, 完全能够满足振动测量的实时性和高精度的要求, 为基于激光自混合干涉的测振仪向小型化、智能化、便携式提供了条件。

参 考 文 献

- 1 Wang Ming, Nie Shouping, Li Dacheng. Optical feedback interferometry of semiconductor laser for sensing application[J]. *Chinese J. Lasers*, 2002, **A29**(12): 1122~1126
王 鸣, 聂守平, 李达成. 半导体激光器的光学反馈干涉及传感应用[J]. *中国激光*, 2002, **A29**(12): 1122~1126
- 2 Yu Yanguang, Guo Changying, Ye Huiying. Vibration measurement based on moderate optical feedback self-mixing interference[J]. *Acta Optical Sinica*, 2007, **27**(8): 1430~1434

- 禹延光, 郭常盈, 叶会英. 基于适度光反馈自混合干涉技术的振动测量[J]. 光学学报, 2007, **27**(8): 1430~1434
- 3 Yu Yanguang, Yuan Xiujuan. Automatic measurement of the linewidth enhancement factor based on moderate optical feedback[J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(1): 91~101
- 禹延光, 袁秀娟. 适度光反馈下线宽展宽因数的自动测量[J]. 中国激光, 2008, **35**(1): 91~101
- 4 Katsuhiko Hara, Shigenobu Shinohara, Hiroaki Ikeda *et al.*. New digital vibrometer with high accuracy using self-mixing type LDV[C]. IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference Ottawa, Canada, 1997. 860~864
- 5 Qingguang Wu, Shigenobu Shinohara, Hiroaki Ikeda *et al.*. New vibrometer using self-mixing laser diode modulated with triangular current[C]. Lasers Electro-Optics, CLEO/Pacific Rim '97, 1997. 290~291
- 6 Qingguang Wu, Shigenobu Shinohara, Hiroaki Ikeda *et al.*. Application and accuracy improvement of vibrometer using frequency modulated self-mixing laser diode[C]. IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference, St. Paul, USA, 1998. 707~711
- 7 Hideaki Shiozawa, Yasuaki Abe, Masatsugu Niwayama *et al.*. Construction and estimation of new measurement system of range finding speedometer using self-mixing laser diode[C]. *SICE*, 2003. 801~806
- 8 Suzukit, Mutot, Sasakio *et al.*. Self-mixing type of phase-locked laser diode interferometer[J]. *Appl. Opt.*, 1999, **38**(3): 543~548
- 9 Liang Fang, Qiang Xifu, Sun Xiaoming. A simple and practical circuit for laser diode modulation[J]. *Opt. Precision Eng.*, 1999, **7**(1): 96~99
- 梁芳, 强锡富, 孙晓名. 一种简便实用的半导体激光器调制电路[J]. 光学精密工程, 1999, **7**(1): 96~99
- 10 Wang Tingting, Li Ming, Wang Ming *et al.*. The modulation and amplifying circuit design for laser diode self-mixing interference[J]. *J. Nanjing Normal University(Eng. Technol.)*, 2004, **4**(1): 64~66
- 王婷婷, 李明, 王鸣等. 半导体激光器自混合干涉的调制与放大电路[J]. 南京师范大学学报(工程技术), 2004, **4**(1): 64~66