

半导体激光自混合干涉测量技术中正弦相位调制参数的优化分析

郭冬梅

(南京师范大学物理科学与技术学院, 江苏 南京 210046)

[摘要] 为了提高自混合干涉技术测量位移的精度, 将正弦相位调制技术引入自混合干涉信号的分析中, 相位调制由置于外腔中的电光调制器 (EOM) 实现, 相位解调由 FFT 分析的方法得到. 针对正弦相位调制自混合干涉测量技术用于位移测量时, 电光调制器调制参数对相位解调的影响, 分析了调制参数的优化选择依据. 模拟分析及实验结果表明: 正弦相位调制自混合干涉仪用于位移测量时, 正确解调相位所需的最小调制频率和待测射靶面的振动频率和幅度的乘积成正比. 调制幅度取 1.23rad 时, 可以减少激光束偏振态损失带来的测量误差.

[关键词] 测量, 自混合干涉, 正弦相位调制, 调制参数

[中图分类号] TN 249 [文献标识码] A [文章编号] 1001-4616(2010)04-0053-05

Optimization Analysis of Modulation Parameters in Laser Diode Self-mixing Interferometry Based on Sinusoidal Phase Modulation

Guo Dongmei

(School of Physics and Technology, Nanjing Normal University, Nanjing 210046, China)

Abstract In order to improve the displacement measurement accuracy of the self-mixing interferometer, sinusoidal phase modulating technique is introduced to the analysis of self-mixing interference signal. Phase modulation is obtained by an electro-optic modulator (EOM) in the external cavity and phase demodulation is achieved by FFT analysis method. The effect of modulation parameter on phase demodulation is analyzed in sinusoidal phase modulating self-mixing interferometer for displacement measurement. A rule for selecting the modulation parameter is presented. The results of simulation and experiments show that the minimum modulation frequency needed to demodulate the phase is directly proportional to the product of the amplitude and the frequency of the external target. When the modulation amplitude is 1.23rad , the measurement error caused by the loss of polarization is minimum.

Key words measurement, self-mixing interferometry, sinusoidal phase modulation, modulation parameter

激光自混合干涉 (SM I) 是指激光应用系统中, 激光器输出的光被外部物体反射或散射后, 其中一部分光反馈回激光器的谐振腔, 反馈光携带外部物体的信息, 与腔内光混合后, 调制激光器的输出功率, 其信号特点与传统干涉信号类似. 半导体激光自混合干涉技术引起关注, 主要是由于系统仅有一个干涉通道, 结构简单、紧凑、鲁棒且系统易准直. 近年来, 激光 SM I 理论的研究已经趋于成熟^[1]. 在自混合干涉信号中, 相位和振幅的变化与外腔的光程及外部反射表面有关, 这个性质被用于各种传感应用, 如测量位移、速度和面形^[2-4]. 自混合干涉信号常用条纹计数法分析, 但是位移测量精度仅能达到半个波长. 为了提高测量精度, 一些信号的调制解调方法被引入自混合干涉信号的分析中. 基于对激光束在外腔中相位的正弦调制, 文献 [5] 首次提出了一种新型的正弦相位调制自混合干涉位移测量技术^[5]: 相位调制由置于自混合干涉仪外腔中的电光调制器实现, 相位解调过程为: FFT 变换 \rightarrow 频域滤波 \rightarrow FFT 反变换 \rightarrow 相位计算. 在测量过程中, 由于没有确切的调制参数依据, 尽可能选择较大的调制频率, 以保证相位解调的正确. 但是受电子测量系统, 尤其是数据采集系统带宽的限制, 选择过大的调制频率必然会增加整个系统的复杂程度和成本.

收稿日期: 2010-05-04

基金项目: 江苏省普通高校自然科学研究计划项目 (08KJB510008).

通讯联系人: 郭冬梅, 讲师, 研究方向: 激光精密测量方面的研究. E-mail: guodongmei@njjnu.edu.cn

因此在保证信号处理需要和测量精度的前提下,对相位调制参数的优化选择是正弦相位调制自混合干涉测量技术用于较大位移测量时必须解决的问题.

本文简要阐述了正弦相位调制自混合干涉技术测量位移的原理,重点分析了用正弦相位调制法测量位移时,调制参数的优化选择.鉴于半导体激光(LD)自混合干涉仪具有体积小、重量轻、结构简单并且无需外置光电探测器(PD)等特点,在本文的工作中,使用LD作为光源,虽然LD输出光稳定性远不如He-Ne激光,但在相位解调过程中,通过频域的滤波处理,滤掉高频电子噪声、低频环境变化及LD输出光强波动对测量结果的影响,实现了纳米级的位移测量精度.

1 测量原理

图1为用来测量微位移的LD正弦相位调制激光自混合干涉仪,包括半导体激光器LD-PD(ELD63NT15,635 nm,5 mW,内封光电二级管PD),1个非球面的准直透镜,电光调制器(New Focus 4002),以及待测靶镜(PZT驱动的硅片).测量前调节激光二极管的偏振方向、电光调制器的主轴方向一致,光路校准后电光调制器可以以极低的插入损耗和幅度调制来对外腔中的光进行纯相位调制.干涉信号由置于激光器后端面的光电探测器接受,经电流电压转换并放大,由数据采集卡(National Instrument 6024E)采集后送入PC机,由专用的数据分析软件进行分析处理(National Instrument Labview).测量时由置于外腔中的电光调制器对激光束进行正弦调制,调制函数为: $\phi(t) = a \sin(2\pi f_m t + \beta)$,其中 a 为调制幅度, f_m 为调制频率, β 为调制的初始相位.考虑到光在外腔中2次经过电光调制器,所以由电光调制器调制引起的相位变化为 $2\phi(t)$,经过调制后的干涉光强可以表示为:

$$I(t) = I_0 \{ 1 + m \cos[\phi(t) + 2a \sin(2\pi f_m t + \beta)] \}, \tag{1}$$

展开上式有:

$$\begin{aligned} I(t) &= I_0 \{ 1 + m \cos[\phi(t) + 2a \sin(2\pi f_m t + \beta)] \} = I_0 + m I_0 \cos\phi(t) J_0(2a) + \\ &\quad m I_0 \cos\phi(t) \left[2 \sum_{n=1}^{\infty} J_{2n}(2a) \cos(2n)(2\pi f_m t + \beta) \right] - \\ &\quad m I_0 \sin\phi(t) \left[2 \sum_{n=0}^{\infty} J_{(2n+1)}(2a) \sin(2n+1)(2\pi f_m t + \beta) \right]. \end{aligned} \tag{2}$$

其中 $J_n(2a)$ 为 n 阶的贝塞尔函数.从方程(2)中可以看出,受调制的干涉光强可以展开成 n 次谐波的形式,一次谐波和二次谐波的振幅 $A_1(t)$ 、 $A_2(t)$ 分别为

$$A_1(t) = 2n I_0 \sin\phi(t) J_1(2a), \tag{3}$$

$$A_2(t) = 2n I_0 \cos\phi(t) J_2(2a). \tag{4}$$

将上述两式相除,可以从 $A_1(t)$ 和 $A_2(t)$ 中解调出相位 $\phi(t)$,继而得到外反射靶面的位移信息

$$\tan(\phi(t)) = \frac{A_1(t)}{A_2(t)} \cdot \frac{J_2(2a)}{J_1(2a)}, \tag{5}$$

其中确定 $A_1(t)$ 和 $A_2(t)$ 的步骤如下: (1) 对得到的干涉信号进行傅里叶变换; (2) 用 2 个窗: $f_m/2 < f < 3f_m/2$ 和 $3f_m/2 < f < 5f_m/2$ 从得到的频谱中分别滤出一次谐波 $I(f_m)$ 和二次谐波 $I(2f_m)$; (3) 对滤出的一次谐波和二次谐波分别进行傅里叶逆变换,分别用 $I_{f_m}(t)$ 、 $I_{2f_m}(t)$ 表示; (4) 由下列关系得到 $A_1(t)$ 和 $A_2(t)$:

$$A_1(t) = \text{Im}[I_{f_m}(t) / e^{j2\pi f_m t + \beta}], \tag{6}$$

$$A_2(t) = \text{Re}[I_{2f_m}(t) / e^{j4\pi f_m t + 2\beta}]. \tag{7}$$

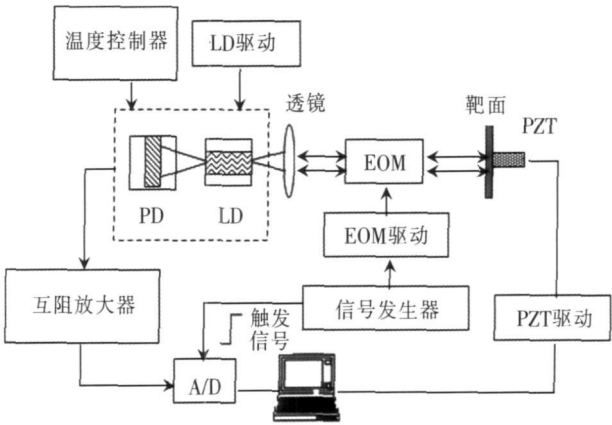


图1 实验装置
Fig.1 Experimental setup

虽然 LD 输出光稳定性较差, 其内置 PD 的光电转换噪声较大. 但通过上述信号处理过程中步骤 (2) 的频域滤波处理, 可以滤掉高频电子噪声、低频环境变化, 及 LD 输出光强波动对测量结果的影响, 从而得到高精度的测量结果. 用上述方法得到的相位 ϕ 被包裹于 $-\pi$ 和 π 之间, 为了得到真正的相位值, 必须对 ϕ 进行去包裹处理. 再依据相位 ϕ 和自混合干涉仪外腔长度之间的关系, 就可以得到外反射靶的位移情况.

2 调制参数优化选择分析

2.1 调制幅度优化

利用 FFT 分析的方法解调相位, 对于调制幅度 a , 首先要考虑的是贝塞尔函数的零点问题, 当 $J_1(2a)$ 或者 $J_2(2a)$ 为零的时候, 不能用方程 (5) 来解调相位 $\phi(t)$. 图 2 为 $J_1(2a)$ 、 $J_2(2a)$ 随着 a 的变化关系, 可以看出随着 a 的增长, 存在这一阶贝塞尔函数和二阶贝塞尔函数的一系列零点 (表 1), 在选择电光调制器的调制幅度时, 要避免这些值.

表 1 $J_1(2a)$ 和 $J_2(2a)$ 的零点 (用 X 表示)

Table 1 Values of a with null $J_1(2a)$ and $J_2(2a)$ (represented by X)

a (rad)	1. 91	2. 56	3. 50	4. 20	5. 04	5. 81	6. 66	7. 42	8. 24
$J_1(2a) = 0$	X		X		X		X		X
$J_2(2a) = 0$		X		X		X		X	

另外, 由于电光调制器对入射光的偏振态很敏感, 只有当入射偏振光的振动方向和电光调制器主轴方向严格一致时, 才能对激光束产生纯相位调制. 测量时, 调整 LD 输出光振动方向和电光调制器主轴方向一致, 但由于外部反射靶面并非完全光滑, 使得反射光的偏振态有损失, 从而带来测量误差. 偏振态的损失使得自混合干涉信号的波动深度 m 和相位调制幅度 a 发生变化. 从方程 (5) 中可以看出, 波动深度 m 的变化对相位解调的结果没有影响. 令 $A = A_1/A_2$, $J = J_2/J_1$, 方程 (5) 可以表示为:

$$\phi = \arctan[A \cdot J]. \tag{8}$$

将 (8) 式对调制幅度 a 求导得到:

$$\delta\phi/\delta a = \frac{A}{(1 + A^2 J^2)} \delta J/\delta a. \tag{9}$$

为了使调制幅度 a 变化对相位解调结果的影响最小, $\delta\phi/\delta a$ 必须最小. 图 3 模拟了 $a < 1.91$ (一阶和二阶贝塞尔函数的第一个零点) 范围内 $\delta\phi/\delta a$ 和 a 之间的关系, 模拟的结果显示当 $a = 1.23$ 时, 满足 $\delta\phi/\delta a$ 最小. 因此通过适当的选取电光调制器的调制幅度, 可以减少激光束偏振态损失带来的测量误差.

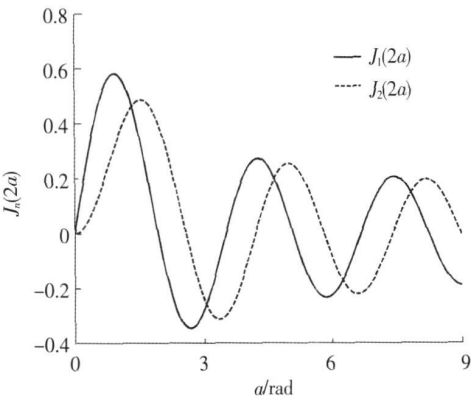


图 2 $J_1(2a)$ 和 $J_2(2a)$ 随着 a 的变化关系
Fig.2 Plots of the Bessel functions $J_1(2a)$ and $J_2(2a)$ with respect to a

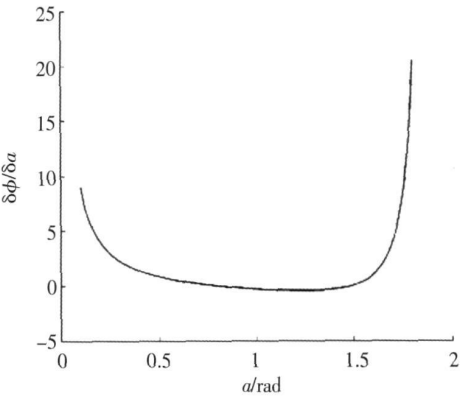


图 3 $\delta\phi/\delta a$ 和 a 之间的关系
Fig.3 The relationship between $\delta\phi/\delta a$ and a

2.2 调制频率优化

在选择电光调制器的调制频率 f_m 时, 要避免自混合干涉信号频域空间中的频谱重叠, 以保证滤波的正确性. 由方程 (3) 和方程 (4) 可见, $A_1(t)$ 和 $A_2(t)$ 存在一个瞬间频率 $F = \frac{1}{2\pi} \cdot \frac{d\phi}{dt}$, 它和外反射靶的运动速度有关. 一次谐波和二次谐波的频谱在频域中分别以 f_m 和 $2f_m$ 为中心, 频谱宽度和外反射靶的最大运动

速度有关. 为了避免频域中的频谱重叠, $\Phi(t)$ 所含的频谱成份 F 必须满足:

$$F \leqslant f_m / 2.$$

(10)

假设外反射靶面做正弦运动, 位移 $d = d_0 \sin(2\pi f_0 t)$, 则

$$\phi(t) = \phi_0 + 4\pi d_0 \sin(2\pi f_0 t) / \lambda.$$

(11)

$A_1(t)$ 和 $A_2(t)$ 的瞬间频率 F 可以写为:

$$F = \frac{1}{2\pi} \cdot \frac{d\phi(t)}{dt} = 4\pi f_0 d_0 \cos(2\pi f_0 t) / \lambda,$$

(12)

将式 (12) 带入方程 (10), 有:

$$F = \frac{1}{2\pi} \cdot \frac{d\phi(t)}{dt} = \frac{4\pi}{\lambda} f_0 d_0 \cos(2\pi f_0 t) \leqslant f_m / 2,$$

(13)

为了使 (13) 式恒成立, 应满足下列条件:

$$F_{\max} = 4\pi f_0 d_0 / \lambda \leqslant f_m / 2,$$

(14)

所以调制频率和外反射靶的运动幅度和运动频率之间的关系可以表示为:

$$f_m \geqslant 8\pi f_0 d_0 / \lambda.$$

(15)

从 (15) 式可以看出, 正弦相位调制自混合干涉仪及 FFT 分析信号处理方法用于位移测量时, 所需的最小调制频率和外反射靶的运动频率和运动幅度的乘积成正比.

图 4 模拟了被测位移频率分别为 50 Hz、100 Hz、200 Hz 时, 最大可测幅度随调制频率的变化. 从图中可以看出, 对于某一频率的被测位移, 最大可测位移与调制频率成正比, 调制频率越大, 最大可测位移就越大. 当调制频率为 100 kHz 时, 最大可测的幅度分别为: 50.357 μm、25.178 μm、12.598 μm. 图 5 则模拟了调制频率为 10 kHz 时, 最大可测幅度与被测位移频率之间的关系. 所以如果电光调制器的调制频率足够高, 测量系统电路部分的带宽足够大, 以及数据采集卡的采样频率可以满足信号调制后干涉信号的采样需求, 理论上该正弦相位调制自混合干涉位移测量系统的测量范围是没有限制的.

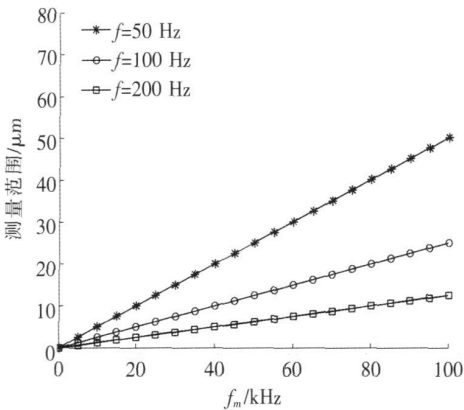


图 4 最大可测靶面振动幅度和调制频率之间关系

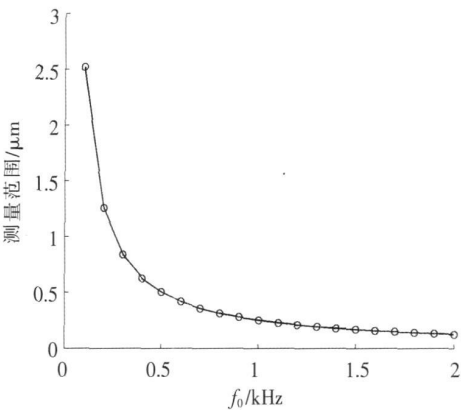


图 5 最大可测靶面振动幅度和靶面振动频率关系 ($f_m=10\text{ kHz}$)

Fig.4 The relationship between the maximum measurable vibration amplitude and the modulation frequency

Fig.5 The relationship between the maximum measurable vibration amplitude and the vibration frequency ($f_m=10\text{ kHz}$)

3 实验

实验中用 PI 公司生产的高精度的 PZT 来评价正弦相位调制自混合干涉仪. 该 PZT 内部有一个传感元件, 闭环控制时 PZT 位移的分辨率为 0.15 nm. 为了能对靶镜的运动情况进行实时监测, 用 LABVIEW 程序编写了数据采集及自混合干涉信号的解调程序, 设计了虚拟仪器面板, 在采集信号的同时, 实时恢复靶镜微位移的情况. 将解调出 PZT 位移结果和 PZT 控制器实时输出的位移结果进行对比, 得到测量误差.

实验做了 2 组测量, 根据前文对 EOM 调制参数优化分析的结果, EOM 的调制幅度 a 取 1.23 rad 调制频率根据式 (15) 选择. 由于测量过程中环境干扰及电子噪声对干涉信号频谱的影响, 实际测量时, 所选取的调制频率比式 (15) 计算结果略大一些, 即可以达到满意的测量效果.

第一组, 用控制器控制 PZT 做频率 10 Hz 峰峰值为 600 nm、2 000 nm、4 000 nm、8 000 nm、10 000 nm 正弦振动, EOM 调制频率及测量结果如表 2 所示. 第二组, 控制 PZT 做峰峰值 6 000 nm, 频率为 10 Hz、20 Hz

40 Hz正弦运动, EOM 调制频率及测量结果如表 3 所示. 实验结果显示了, 根据理论分析的结果优化选择 EOM 的调制参数, 可以实现对相位的正确解调, 获得纳米级的位移测量精度. 在待测靶面的振幅较大或者运动频率较高时, 优化选择 EOM 的调制参数, 显得尤为重要.

表 2 PZT 频率为 10 Hz 正弦运动测量结果

Table 2 Measurement results of the PZT with vibration frequency 10 Hz

PZT 位移 /nm (峰峰值)	EOM 调制频率 /kHz	测量结果 /nm	测量误差 /nm
600	0.12	600.9	0.9
2 000	0.4	2001.3	1.3
4 000	0.8	3994.1	5.9
8 000	1.6	8008.7	8.7
10 000	2	10 006	6

表 3 PZT 峰峰值 6 000 nm 正弦运动测量结果

Table 3 Measurement results of the PZT with vibration amplitude 6000 nm

PZT 位移 /nm (峰峰值)	EOM 调制频率 /kHz	测量结果 /nm	测量误差 /nm
10	1.2	6003.8	3.8
20	2.4	6001.6	1.6
40	4.8	6006.3	6.3

4 结论

分析了正弦相位调制干涉测量技术用于较大位移测量时, 相位调制参数对干涉信号解调的影响. 给出了调制参数的优化选择依据, 保证了信号处理需要和测量精度的前提下, 该选择依据可以比较准确地确定正弦相位调制自混合干涉位移测量技术中调制幅度和调制频率的大小. 出于对整个测量系统小型化的考虑, 光源部分采用半导体激光器, 虽然 LD 输出光稳定性远不如 HeNe 激光, 但在相位解调过程中, 通过频域的滤波处理, 削弱了高频电子噪声、低频环境变化及 LD 输出光强波动对测量结果的影响, 达到纳米级的位移测量精度.

[参考文献]

[1] Wang W M, Boyle W J O, Gattan K T V. Self mixing interference in a diode laser experimental observations and theoretical analysis[J]. Applied Optics, 1993, 32(9): 1 551-1 558

[2] Wang Ming Lai Guang n. A self mixing interferometer using an external dual cavity[J]. Measurement Science and Technology, 2003, 14: 1 025-1 031.

[3] Wang Ming Lu M in, Hao Hui et al. Statistics of the self mixing speckle interference in a laser diode and its application to the measurement of flow velocity[J]. Optics Communications, 2006, 260(1): 242-247.

[4] Ovrn B, Andrews J H. Measurement of changes in optical path length and reflectivity with phase-shifting laser feedback interferometry[J]. Applied Optics, 1999, 38(10): 1 959-1 967.

[5] Guo Dongmei, Wang Ming Tan Suqing. Self mixing interferometer based on sinusoidal phase modulating technique[J]. Optics Express, 2005, 13(5): 1 537-1 543

[责任编辑: 顾晓天]