

电流调制激光自混合光栅干涉位移测量研究

蔡文魁, 沈锺杰, 赵慧敏, 郭冬梅

(南京师范大学物理科学与技术学院, 江苏 南京 210023)

[摘要] 本文提出了一种激光自混合光栅干涉仪. 通过利特罗结构设计, 光栅衍射光沿入射方向原路返回激光器, 和腔内光混合产生激光自混合干涉效应. 由于光栅多普勒效应导致干涉相位随光栅沿光栅矢量方向上的位移而改变. 为了提高测量的精度, 通过正弦调制半导体激光器的驱动电流, 调制激光自混合干涉信号的相位, 并引入了傅里叶分析的方法解调相位, 最终实现了光栅位移的重构. 激光自混合干涉的机制和利特罗结构设计保证了整个光学系统的紧凑性和自准直性. 实验结果表明, 测量系统的位移噪声水平在 50 nm 以内.

[关键词] 激光自混合干涉, 光栅干涉仪, 位移测量, 正弦电流调制, 利特罗结构

[中图分类号] TN249 [文献标志码] A [文章编号] 1001-4616(2020)03-0034-06

Research on Displacement Measurement of Current Modulated Laser Self-mixing Grating Interference

Cai Wenkui, Shen Zhongjie, Zhao Huimin, Guo Dongmei

(School of Physics and Technology, Nanjing Normal University, Nanjing 210023, China)

Abstract: A self-mixing grating interferometry with current modulation is proposed to measure one-dimensional displacement in this paper. Through the design of the Littrow configuration, the grating diffracted light returns to the laser in the original direction along the incident direction, and laser self-mixing interference effect occurs when the reflected light mixes with the light inside the cavity. The interference phase changes with the grating's movement in the grating vector direction because of grating Doppler effect. To improve measurement accuracy, through sinusoidally modulating driving current of a semiconductor laser, the output wavelength is also changed sinusoidally. The phase of the interference signal is also modulated, then Fourier analysis method is introduced to demodulate the phase and finally achieve the restoration of diffraction displacement. The mechanism of laser self-mixing interference and the design of Littrow configuration ensure the compactness and autocollimation of the entire optical system. The experimental results show that the displacement noise level of the measurement system is within 50 nm.

Key words: laser self-mixing interferometer, grating interferometer, displacement measurement, sinusoidal current modulation, Littrow configuration

如今, 精密加工^[1]、生物医学^[2-6]等行业发展迅速, 这就对精密定位和测量提出了高要求. 纳米科技的兴起更是带动了对测量技术的深入研究, 因此针对工业需求, 人们开发了适合不同场合的精密位移测量技术. 自激光器问世以来, 诺贝尔奖得主 Lamb 和 Spencer 研究了激光自耦合^[7]和互耦合^[8]现象, 当一台激光器发出的激光被耦合回原激光器时, 其输出特性会随耦合光的相位变化发生周期性改变, 这种现象被后人称为激光自混合干涉(SMI). King 和 Steward 在 1963 年首次利用激光自混合干涉效应进行位移传感实验^[9], 实验展示了激光自混合干涉在测量影响光程的物理量^[10-14]上的潜力. 与传统的双光路干涉测量技术相比, 激光自混合干涉测量系统的体积小, 光路简洁.

虽然激光自混合干涉技术现在已被广泛地应用于微位移测量中, 但由于这种测量方法是以激光的波长为测量基准的, 而在现场测量中, 波长会受到空气成分、压强、湿度等方面的影响, 变得不稳定, 导致测量

收稿日期: 2020-04-13.

基金项目: 江苏省高等学校自然科学研究重大项目(17KJA510002).

通讯作者: 郭冬梅, 教授, 博士生导师, 研究方向: 光电传感技术. E-mail: guodongmei@njnu.edu.cn

误差增加. 面对环境因素的影响,通常可以采用环境探测器或双色法等方法对环境影响进行补偿,补偿过程本身会增加系统的复杂度,还会提高信号处理的计算量,不利于仪器的小型化.

光栅干涉仪是以光栅栅距为测量的基准,对光源的稳定性要求低,一定程度上减小了环境因素对测量精度的影响. 将光栅干涉引入到 SMI 中^[15-16],使入射至光栅上的衍射光回馈激光器(利特罗结构/自准直结构). 当光栅沿光栅矢量方向运动时,由于多普勒效应反馈的衍射光附加相位发生变化,这种结合衍射光栅的激光自混合(SMI)干涉仪称之为激光自混合光栅(SMGI)干涉仪. 利特罗结构保证了自混合干涉系统结构的简单紧凑. 在不加调制的情况下激光自混合光栅干涉测量系统的位移分辨率为一个光栅栅距 d .

本文将正弦电流调制技术引入半导体激光自混合光栅干涉系统中,通过调制半导体激光器的驱动电流^[17-18],使得半导体激光器发射的波长和输出功率也受到正弦调制,当半导体激光自混合光栅干涉外腔长度一定时,给干涉信号的相位也引入了一个正弦调制. 经频域滤波和正交解调技术,实现了对光栅一维位移的重构. 实验结果表明,该方法提高了位移测量精度.

1 原理

1.1 激光自混合光栅干涉原理

如图 1 所示,半导体激光器发射的激光入射到一维反射式全息光栅上,当入射方向满足利特罗结构时,相应的衍射光将沿入射光方向返回激光腔内,产生自混合干涉效应,光栅在 X 方向(光栅矢量方向)运动时,由光栅公式和光栅多普勒频移可得:

$$2d \sin \theta = h\lambda, \quad (1)$$

$$f_d = \frac{v}{\lambda} \times 2 \sin \theta, \quad (2)$$

式中, d 是光栅的栅距, θ 是激光的入射角, λ 是半导体激光器出射光的波长, h 是衍射光的级数, v 是光栅沿 X 方向运动的速度,联立式(1)、(2)可得多普勒频移 f_d 为:

$$f_d = \frac{hv}{d}. \quad (3)$$

由此可得光栅运动在光轴方向上引起的相位改变为(衍射级数为+1):

$$\Delta\varphi = \frac{2\pi\Delta x}{d}. \quad (4)$$

当衍射光反馈回激光腔内时,激光的输出特性将会改变,由于光栅的衍射效率不高,在弱反馈条件下,频率变化可以忽略不计,因此,它在光反馈条件下的满足的输入光功率满足:

$$P = P_0 [1 + m \cos(\omega\tau)], \quad (5)$$

式中, P_0 为无反馈时的光强, m 为干涉条纹, τ 为光束在外腔往返的时间, ω 为有反馈时的激光腔角频率. 系统处于弱反馈条件下有:

$$P(t) = P_0(t) [1 + m \cos(\Phi(t))] = P_0(t) \left[1 + m \cos\left(\frac{4\pi fL}{c}\right) \right] = P_0(t) \left[1 + m \cos\left(\frac{4\pi L}{\lambda}\right) \right], \quad (6)$$

式中, f 是激光器的频率大小, L 是激光端面反射镜到光栅的距离.

1.2 正弦电流调制解调原理

为了提高测量精度,测量过程中引入正弦电流调制技术. 当半导体激光器的注入电流大于本身阈值的情况下,将调制幅度、频率控制在不发生模跳的某个线性区域内. 假设半导体激光器的驱动电流为一个直流分量和一个正弦变化的交流分量 $a \sin(\omega_a t + \theta)$ 的叠加^[19],其中 a 为电流调制的幅度, ω_a 为电流调制的频率, θ 为电流调制的初始相位. 则半导体激光器的输出功率为:

$$P_0(t) = P_0 + \Delta P(t) = P_0 + g \cdot a \sin(\omega_a t + \theta), \quad (7)$$

式中, P_0 为半导体激光器的初始输出功率, g 为注入电流变化和半导体激光器的输出功率变化之间的系

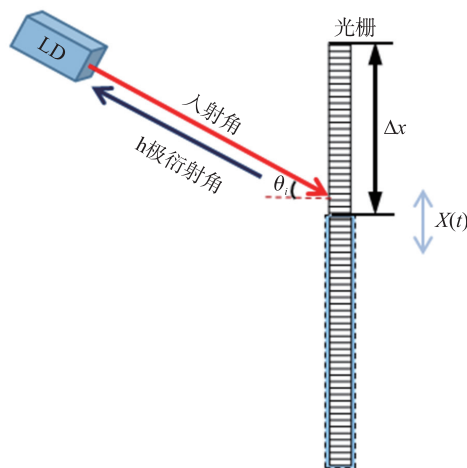


图 1 激光自混合光栅干涉原理图

Fig. 1 Schematic diagram of a SMGI

数. 通过正弦调制半导体激光器的注入电流实现对激光器发射激光波长的正弦调制, 波长可表示为:

$$\lambda(t) = \lambda_0 + \Delta\lambda(t) = \lambda_0 + k \cdot a \sin(\omega_a t + \theta), \quad (8)$$

式中, λ_0 为半导体激光器的初始波长, k 为半导体激光器发射的激光波长大小与注入电流之间变化的正比系数. 结合由光栅多普勒效应引起的相位变化以及自混合干涉的功率方程, 可得:

$$\begin{aligned} P(t) &= [P_0 + \Delta P(t)] \left[1 + m \cos \left(\frac{4\pi L}{\lambda_0 + \Delta\lambda(t)} + \frac{2\pi \Delta x}{d} \right) \right] \approx \\ &[P_0 + \Delta P(t)] \left[1 + m \cos \left(\frac{4\pi L}{\lambda_0} - \frac{\Delta\lambda(t) 4\pi L}{\lambda_0^2} + \frac{2\pi \Delta x}{d} \right) \right] = \\ &[P_0 + \Delta P(t)] [1 + m \cos(\varphi_0 - T \sin(\omega_a t + \theta) + \Delta\varphi)], \end{aligned} \quad (9)$$

式中, 系数 $T = 4\pi k L a / \lambda_0^2$.

对上式进行贝塞尔函数展开可得:

$$\begin{aligned} P(t) &= P_0 + \Delta P(t) + m(P_0 + \Delta P(t)) \cos(\varphi_0 + \varphi_x) J_0(T) + \\ &m(P_0 + \Delta P(t)) \cos(\varphi_0 + \varphi_x) \left\{ 2 \sum_{n=0}^{\infty} J_{(2n)}(T) \cos[(2n)(\omega_a + \theta)] \right\} - \\ &m(P_0 + \Delta P(t)) \sin(\varphi_0 + \varphi_x) \left\{ 2 \sum_{n=0}^{\infty} J_{(2n+1)}(T) \sin[(2n+1)(\omega_a + \theta)] \right\}. \end{aligned} \quad (10)$$

通过带通滤波器提取以 f_m 为中心频率的一次谐波和 $2f_m$ 为中心频率的二次谐波, 由此可得信号的一次谐波和二次谐波的幅度分别为:

$$A_1(t) = 2m(P_0 + \Delta P(t)) \sin(\varphi_0 + \varphi_x) J_1(T), \quad (11)$$

$$A_2(t) = 2m(P_0 + \Delta P(t)) \cos(\varphi_0 + \varphi_x) J_2(T). \quad (12)$$

由式(11)、式(12)可得光栅相位引起的变化为:

$$\varphi_x = \arctan \left[\frac{A_1(t) J_2(T)}{A_2(t) J_1(T)} \right] - \varphi_0. \quad (13)$$

由于反正切得到的相位范围在 $[-\pi, \pi]$ 之间, 所以还需要对得到的相位进行解包裹运算, 最后可得到重构的位移为:

$$\Delta x = \frac{\varphi_x d}{2\pi}. \quad (14)$$

2 实验结果与讨论

图 2 为电流调制激光自混合光栅干涉测量系统的装置图. 包括有半导体激光器(LD) (HL6312G, $\lambda = 635$ nm) 及其驱动电流源和温度控制装置, 一维全息式反射光栅, 固定在二维纳米移动平台 (PI, P621.2CD) 上. 调节激光器的驱动电流, 将其调制幅度控制在不发生模跳的线性区域内. 通过信号发生器 (Tektronix, AFG 3021) 往 LD 驱动电流源内加入一个正弦变化的外部电压, 电流源便产生一个低幅度的正弦交流输出. 激光器发射的光以 +1 级利特罗角入射至一维全息式反射光栅上, 衍射光原路返回激光器内, 形成自混合干涉效应. 干涉信号由半导体激光器后端集成的光电探测器接收, 经低噪声前置放大器 (STANFORD, SR560) 进行电流电压转换并放大, 通过数据采集卡 (NI6361, NI) 采集并送入计算机, 由专用的数据分析软件进行分析处理.

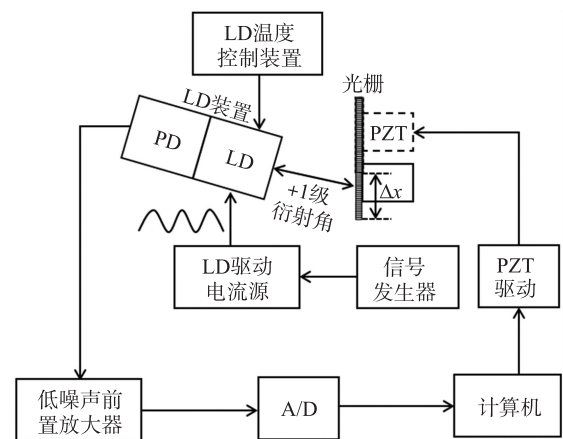


图 2 电流调制 SMGI 一维位移测量系统

Fig. 2 1D SMGI displacement measuring system modulated by current

2.1 半导体激光器调制参数 k 的确定

由式(9)可知,电流调制的调制函数为 $T=4\pi kLa/\lambda_0^2$, k 为电流和激光波长线性关系的系数, a 为正弦调制电流幅度, L 为激光器激光反射端面 and 光栅之间的距离, λ_0 为激光的初始波长. 为了得到 T 值的大小,必须测量调制系数 k 的值,我们通过实验的方法来测量 k .

图3为LD调制系数测量装置图. 将LD和激光准直器固定在实验台面上,然后将光谱分析仪(yokogawa Ando, AQ6370)的接收口与准直器的后端通过光纤相连,使激光尽可能完整地射入准直器内,加入一个衰减片起到减弱光强从而保护光谱仪的目的. 通过光谱分析仪测量当处于不同驱动电流下半导体激光器的峰值波长大小,根据波长变化情况从而确定调制频率、幅度不发生模跳的线性区域,并不停地有规律地改变驱动电流,能得到一系列LD的波长大小. 如表1所示.

表1 调制电流大小与所对应的激光波长

测量序号	LD 驱动电流/mA	10 次扫描 LD 峰值波长均值/nm
1	32.25	635.926
2	32.35	635.929
3	32.45	635.932
4	32.55	635.935
5	32.65	635.938
6	32.75	635.941
7	32.85	635.944
8	32.95	635.947



图3 LD调制系数测量装置图

Fig. 3 LD modulation coefficient measurement device diagram

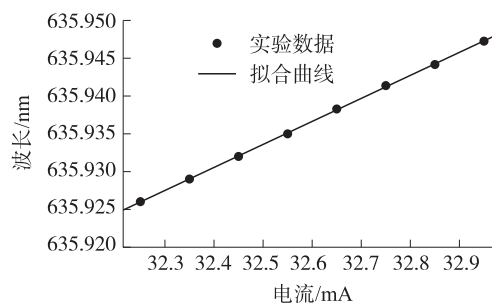


图4 对表1数据线性拟合的结果

Fig. 4 Results of linear fitting of the data in Table 1

拟合的结果为: $\lambda(\text{nm}) = 635 \text{ nm} + 0.029 \text{ 23} \times I(\text{mA})$

则实验中采用的激光器的电流调制系数为 0.029 23 nm/mA .

2.2 实验结果

控制二维移动平台做 X 方向频率为 10 Hz , 峰峰值为 6 000 nm 、 8 000 nm 、 10 000 nm 的运动, 采样点数为 200 000 , 采样频率为 200 000 Hz . 实验得到的重构位移的波形分别如图5、图6、图7所示.

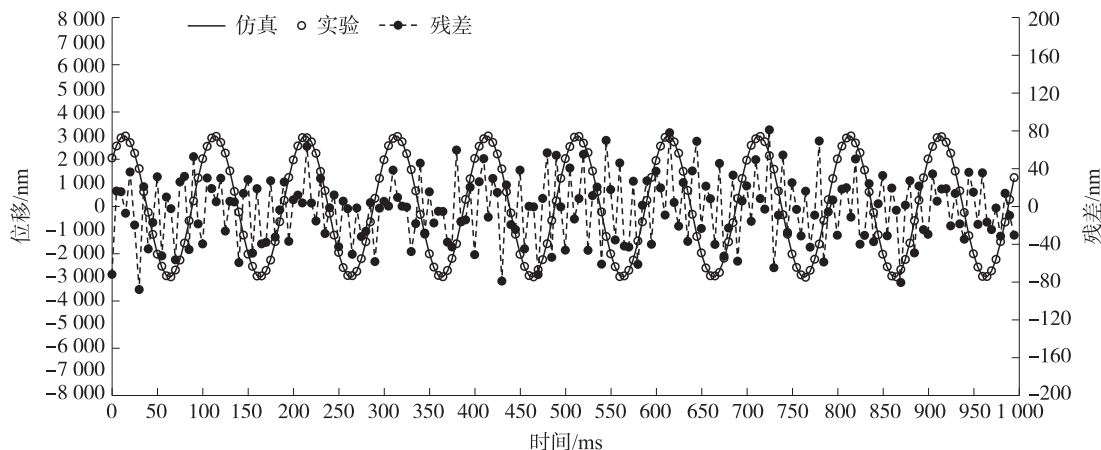


图5 光栅在 X 方向做频率为 10 Hz 峰峰值为 6 000 nm 正弦运动的测量结果

Fig. 5 Measurement results of the sine motion of the grating in the X direction at a frequency of 10 Hz and a peak-to-peak value of 6 000 nm

2.3 测量结果分析

2.3.1 测量灵敏度以及理论误差

$$S_x = \frac{d\varphi_g}{dx} = \frac{2\pi}{d}. \quad (15)$$

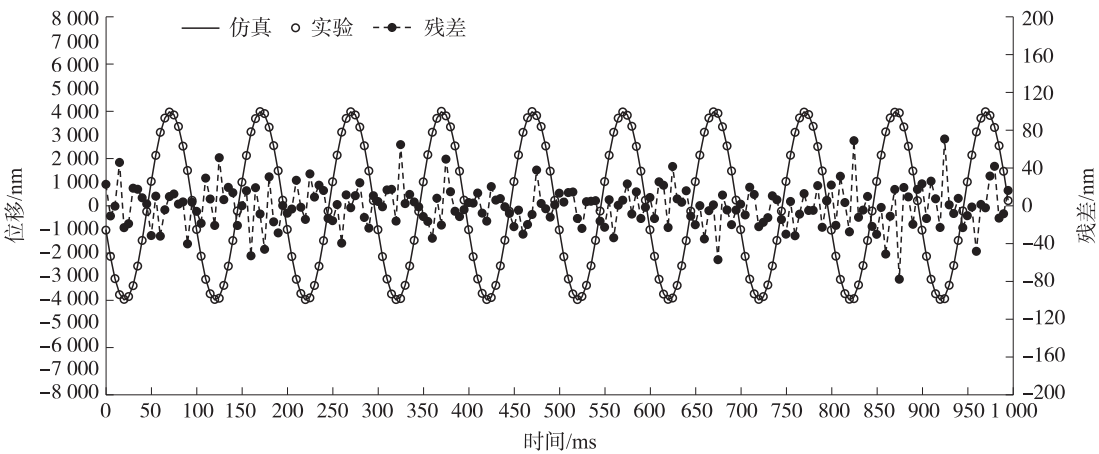


图 6 光栅在 X 方向做频率为 10 Hz 峰峰值为 8 000 nm 正弦运动的测量结果

Fig. 6 Measurement results of the sine motion of the grating in the X direction at a frequency of 10 Hz and a peak-to-peak value of 8 000 nm

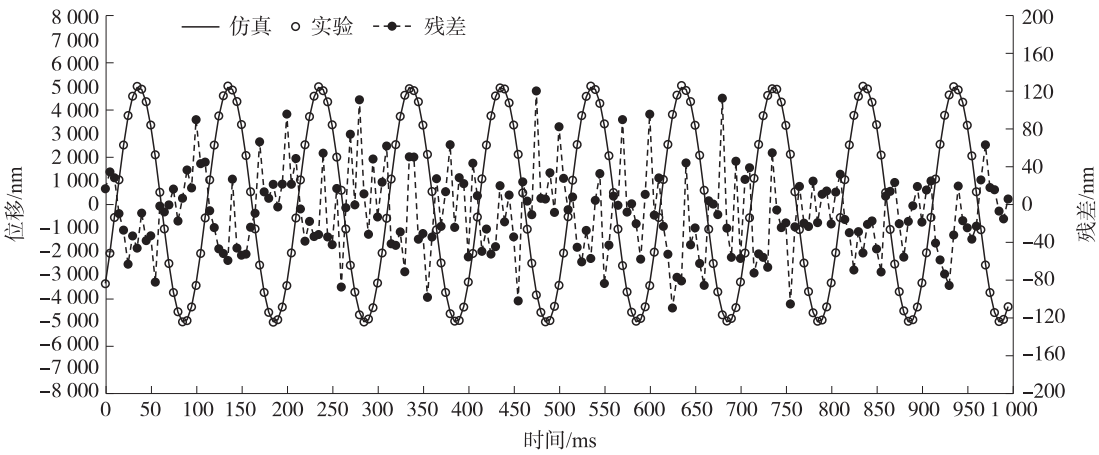


图 7 光栅在 X 方向做频率为 10 Hz 峰峰值为 10 000 nm 正弦运动的测量结果

Fig. 7 Measurement results of the sine motion of the grating in the X direction at a frequency of 10 Hz and a peak-to-peak value of 10 000 nm

由式(15)可知,一维位移的测量灵敏度取决于光栅栅距 d ,而实验中光栅栅距 $d=\frac{1}{2\,400}$ mm,所以系统的测量灵敏度 $S_x=0.86\text{ }^{\circ}/\text{nm}$.

从式(4)可以看出,光栅栅距 $|\Delta d|$ 、相位解调 $|\Delta\varphi_g|$ 的不确定度将影响系统一维位移的测量精度.它们的关系可以表示为:

$$|\Delta x|=\frac{d}{2\pi}|\Delta\varphi_g|+\frac{\varphi_g}{2\pi}|\Delta d|. \tag{16}$$

因此,当光栅沿 X 方向每运动 1 μm 时,系统理论测量误差如表 2 所示^[20].

由表 2 可知,当光栅栅距不确定度 $|\Delta d|$ 低于 1 nm,相位不确定度 $|\Delta\varphi_g|$ 低于 10°时,平面内位移测量的理论误差 $|\Delta x|$ 优于 14 nm.

2.3.2 系统的噪声误差

为了评估测量系统的噪声水平,当光栅保持静止,解调 X 方向的干涉信号,解调平台的一维位移.实验结果如图 8,该一维测量系统在 0.1 s 内的噪声水平优于 50 nm.

表 2 不同影响因素导致的系统测量理论误差

Table 2 Theoretical measurement error of the system caused by different factors

误差因素	参数误差	$ \Delta x $
$ \Delta d $	1 nm	2.4 nm
$ \Delta\varphi_g $	10°	11.6 nm
总误差	—	14 nm

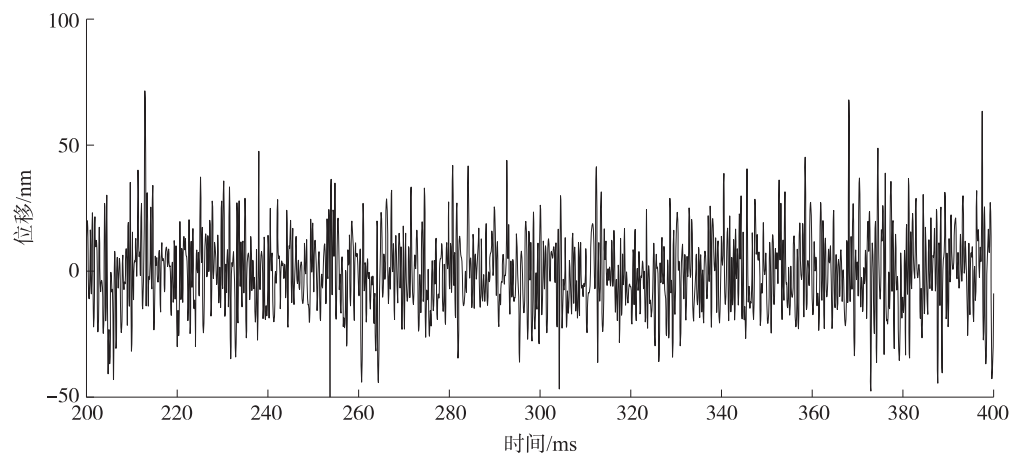


图8 在X方向上的系统噪声

Fig. 8 System noise in the X direction

3 结论

本文提出了一种基于激光自混合光栅干涉的新型位移测量方法. 系统采用利特罗结构光路,通过使用正弦电流对自混合干涉信号进行调制,相比传统的使用声光调制或电光调制的方法更加简单,有效地节约了成本,也降低了系统的调试难度. 在不加调制的情况下,激光自混合光栅干涉系统的分辨率为 d ,而加入电流调制后,分辨率大大被提高,实验结果表明,该系统的分辨率可达到 50 nm.

[参考文献]

- [1] IWAMOTO A, KAKIUCHI Y, SHINOHARA S, et al. Compact and fast vibrational displacement sensor with real-time analog electrical output using self-mixing laser diode [C]//Proc SICE'98, 37th SICE Annual Conference, 1998, 22: 899-902.
- [2] MEIGAS K, HINRIKUS H, LESS J, et al. Pulse profile registration using self-mixing in a diode laser [C]//Proc IEEE/EMBS, Engineering in Medicine and Biology Society, 1998, 4: 1875-1878.
- [3] MEIGAS K, HINRIKUS H, KATTAI R, et al. Simple coherence method for blood flow detection [C]//Proc of SPLE, Coherence Domain Optical Methods in Biomedical Science and Clinical Applications. 2000, 3915: 112-120.
- [4] SEROV A N, OOSTERBAAN S, NIELAND J, et al. Multiple, and chip for laser Doppler tissue perfusion monitoring [C]//Proc of SPLE, Advanced Biosensors and Biochips in Medicine. 2001, 4254: 119-127.
- [5] OZDEMIR S K, ITO S, SHINOHARA S, et al. Self-mixing laser speckle velocimeter for blood flow measurement [J]. IEEE transactions on instrumentation and measurement, 2000, 49(5): 1029-1035.
- [6] SEKINE A, NAGAHAMA H, TOJO T, et al. Mask blank particle inspection in vacuum environments [C]//Proc of SPLE, Optomechatronic System 2002, 4902: 624-631.
- [7] SPENCER M B, LAMB W E. Laser with a transmitting window [J]. Physical review A, 1972, 5(2): 884-892.
- [8] SPENCER M B, LAMB W E. Laser with external injection [J]. Physical review A, 1972, A5: 891-897.
- [9] KING P G R, STEWARD G J. Metrology with an optical maser [J]. New science, 1963, 17: 180-180.
- [10] CHEN J, ZHU H, XIA W. Synthetic-wavelength self-mixing interferometry for displacement [J]. Optics communications, 2016, 368: 73-80.
- [11] NORGIA M, MAGNANI A, NASTASI E. A compact rangefinder based on self-mixing interferometry [C]//Proceedings of SPIE, United Kingdom. Electro-optical Remote Sensing, Photonic Technologies and Applications Vi, 2012, 8542V.
- [12] MAGNANI A, MELCHIONNI D, PESATORI A. Self-mixing digital closed-loop vibrometer for high accuracy vibration measurements [J]. Optics communications, 2006, 365: 133-139.
- [13] CHENG C, LIN L, LIN F. Self-mixing dual-frequency laser Doppler velocimeter [J]. Optics express, 2014, 22(3): 3600-3610.
- [14] ALEXANDROVA A, WELSH C P. Laser diode self-mixing technique for liquid velocimetry [J]. Nuclear instruments and methods in physics research A, 2016, 830(11): 497-503.

(下转第 148 页)

-
- [15] 罗国锋. 高校研究生多维度混合式信息素养教育模式研究[J]. 现代情报, 2016(9):55-60.
- [16] 张芳, 阎亚矢. 教师教育信息化和高等师范院校信息素养教育——基于20所高等师范院校图书馆的调查[J]. 现代情报, 2011(4):128-132.
- [17] 黄旭伟, 胡敏. 《悉尼协议》框架下高职院校图书馆信息素养教育模式构建研究[J]. 图书馆理论与实践, 2017(9):30-33.
- [18] 张必兰. 信息素养教育的嵌入式教学研究[J]. 现代情报, 2015(10):147-150.
- [19] 刘庆庆, 何燕君, 杨新涯, 等. 高校图书馆嵌入式信息素养教育模式研究——以重庆大学图书馆为例[J]. 图书情报工作, 2018(16):47-54.
- [20] 卢懿. 媒介及信息素养教育在青少年成长中的作用[J]. 中国广播电视学报, 2013(3):58-60.
- [21] 韩丽风, 王茜, 李津, 等. 大学图书馆学报[J]. 大学图书馆学报, 2015(6):118-126.
- [22] 邓胜利, 付少雄. 素养教育的新拓展:从信息素养到多元素养[J]. 图书馆杂志, 2018(5):21-30.

[责任编辑:陆炳新]

(上接第39页)

- [15] GUO D, WANG M. Note: Design of a laser feedback interferometer with double diffraction system[J]. Review of scientific instruments, 2015, 86(9):096111.
- [16] GUO D, WANG M, HAO H. Displacement measurement using a laser feedback grating interferometer[J]. Applied optics, 2015, 54(31):9320-9325.
- [17] KATO J, YAMATO J. Non-contact optical probing sensor applying optical feedback effects in laser diodes[J]. Measurement science and technology, 1991, 3(4):146-153.
- [18] TAO Y, WANG M, GUO D. Self-mixing vibration measurement using emission frequency sinusoidal modulation[J]. Optics communications, 2014, 340:141-150.
- [19] GUO D, WANG M. Self-mixing interferometry based on a double-modulation technique for absolute distance measurement[J]. Applied optics, 2007, 46(9):1486-1491.
- [20] HSIEH H L, WEI C. Heterodyne Wollaston laser encoder for measurement of in-plane displacement[J]. Optical society of America, 2016, 24(8):8693-8707.

[责任编辑:顾晓天]