

基于波数分辨的低相干干涉台阶高度测量系统的研究

赵可强 谢芳 马森 王韵致 陈亮

北京交通大学理学院物理系, 北京 100044

摘要 提出一种基于波数分辨的低相干干涉台阶高度测量系统。由宽带光源发出的光通过光纤迈克尔逊干涉仪获取被测量信息,色散光栅将宽谱干涉光束色散成波长在空间连续分布的光片,由线阵 CCD 探测。将线阵 CCD 的各个像元探测到的各个波长干涉信号转换成对应的波数干涉信号。对于波数干涉信号,相邻两个干涉信号峰值之间的波数变化量与干涉仪光程差的绝对值成正比。因此,利用此测量系统可实现对台阶高度等物理量的绝对测量。利用缩短测量系统中光纤迈克尔逊干涉仪的两个干涉臂的长度减小环境干扰对测量系统的影响,获得高测量精度。本测量系统的测量分辨率为 6.03 nm。对一个高度为 50 μm 的台阶重复 10 次测量,测量结果的标准差为 6.8 nm。

关键词 测量;低相干干涉测量;波数分辨;台阶高度测量;光学色散

中图分类号 TP212.1 文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201535.1112006

Research on a Wavenumber Resolved Low Coherence Interferometry for Step Height Measurement

Zhao Keqiang Xie Fang Ma Sen Wang Yunzhi Chen Liang

Department of Physics, School of Science, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China

Abstract A high precision step height measurement system, which is based on wavenumber resolved low coherence interferometry, is presented. The information of the measurand is obtained with a fiber Michelson interferometer which is sourced by a broadband light source. The broadband spectrum interferometric beam is dispersed with a bulk dispersing grating to be an optical plate in which the wavelengths are continuously distributed. The optical plate is detected with a linear array charge coupled device (CCD). By transforming the wavelength spectrum of the interferometric signal into wavenumber spectrum, absolute optical path difference of the interferometer can be measured precisely by measuring the wavenumber difference between two neighboring peaks of the wavenumber spectrum. By shorting the length of the interferometric arms in the optical fiber Michelson interferometer, the environmental disturbances are depressed and high measurement precision is obtained. The measurement resolution is as high as 6.03 nm. A step height with the calibrated value of 50 μm that is configured with two gauge blocks is measured by the system. The standard deviation of 10 times measurement results is 6.8 nm.

Key words measurement; low coherence interferometry; wavenumber resolved; step height measurement; optical dispersion

OCIS codes 120.3180; 060.2370

1 引言

随着微电子、微机电系统(MEMS)、微型光学等领域的快速发展,出现了很多台阶高度需要高精度测量。光学干涉测量技术由于具有高测量精度、高分辨率、非接触式测量等优点在精密测量领域被广泛应用,可对位移^[1-2]、距离^[3-4]、表面形貌^[5-9]、温度^[4,10]、压力^[11]、振动^[12]、折射率^[13]等物理量进行测量。相对于单波长干涉测量技术的干涉信号存在相位模糊的问题,不能对高度大于半波长的台阶进行测量的不足,低相干干涉测量技

收稿日期: 2015-05-04; 收到修改稿日期: 2015-06-09

基金项目: 国家自然科学基金(50975022)、北京市自然科学基金(3132033)

作者简介: 赵可强(1991—),男,硕士研究生,主要从事光电检测方面的研究。E-mail: kqzhao33@126.com

导师简介: 谢芳(1966—),女,教授,博士生导师,主要从事光电检测方面的研究。E-mail: fxie@bjtu.edu.cn(通信联系人)

术的测量量程不受波长的限制^[14-15],能够对静态及准静态的物理量进行绝对测量,能够对高度大于半波长的台阶进行绝对测量。

所见报道的低相干干涉测量技术在对物理量进行测量时,需要对干涉仪的光程进行线性扫描,这不仅需要专用扫描机构,使测量系统复杂,成本增加,而且在扫描光程的过程中测量系统很容易受环境干扰的影响,从而使测量精度降低。Wang等^[16-17]提出波长扫描及波数分辨的方法实现低相干干涉绝对测量,该测量技术利用对光源波长的扫描获得不同波长的干涉信号,无需对干涉仪的光程进行扫描。

本文提出一种无需扫描光程的低相干干涉测量台阶高度的方法,利用低相干干涉的波数分辨实现台阶高度的测量,构建了实验系统,测量分辨率达6.03 nm。并对一个公称高度为50 μm的台阶进行测量,10次测量结果的标准差为6.8 nm。

2 测量系统的原理

基于波数分辨的低相干干涉台阶高度测量系统的原理如图1所示。一个中心波长为852 nm,发光功率为22 mW,发光光谱的半峰全宽(FWHM)为44.16 nm的超辐射发光二极管(SLD)作为测量系统的工作光源。光源的发光光谱如图2所示。

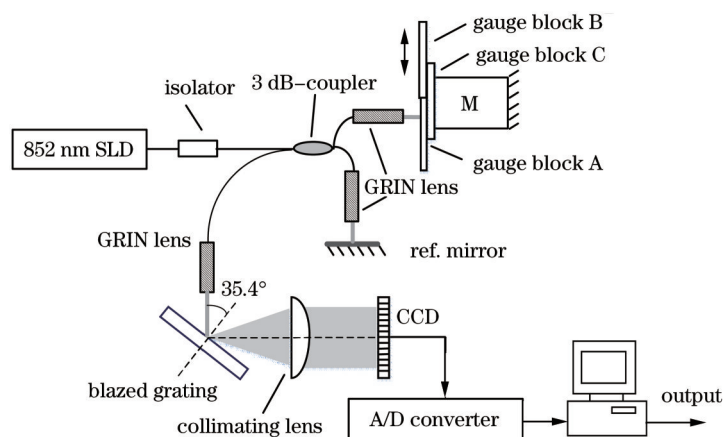


图1 测量系统原理图

Fig.1 Scheme of the principle of the measurement system

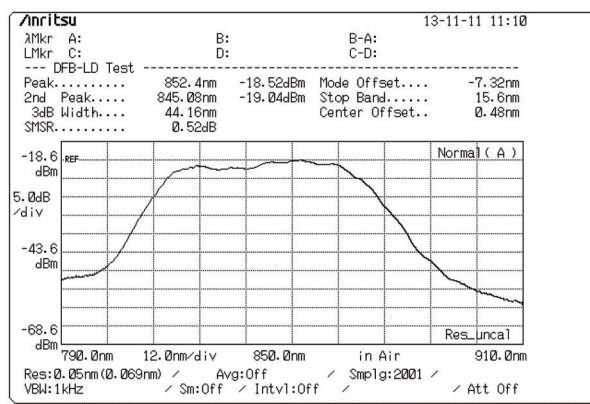
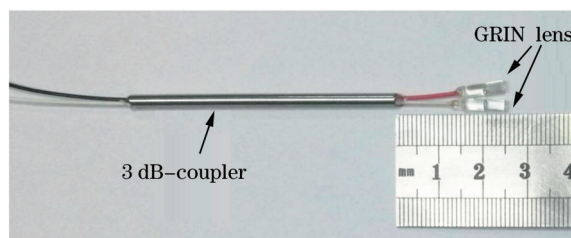


图2 光源的发光光谱图

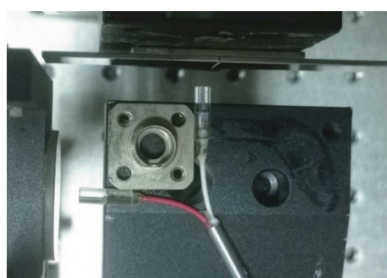
Fig.2 Spectrum of the light source

光源发出的光经过光隔离器和3 dB耦合器后被分成两束,这两束光分别被光纤自准直镜准直后,分别垂直入射到参考镜和被测表面上,又分别被参考镜和被测表面反射回系统。这两束光在3 dB耦合器再次相遇,两束光的合光是各个波长的干涉信号的简单叠加。由于光隔离器的作用,从3 dB耦合器的一个端口输出的合光不会到达光源,因此,不会对光源产生影响;由3 dB耦合器的另一个端口输出的合光,经过光纤自准直透镜准直成平行光束,以35.4°的入射角入射到一个1800 line/mm的闪耀光栅上,经过闪耀光栅色散成

波长在空间连续分布的扇形光片,此扇形光片再经过焦距为 50 mm 的平柱透镜准直成波长在空间连续分布的平行光片,由线阵 CCD 探测,线阵 CCD 的各个像元探测到不同波长的干涉信号。线阵 CCD 探测到的干涉信号经过模/数(A/D)转换卡转换成数字信号,输入计算机,经过程序处理,解调出测量结果。



(a)



(b)

图 3 (a) 短臂光纤迈克耳孙干涉仪; (b) 光纤迈克耳孙干涉仪构成的测量系统

Fig.3 (a) Optical fiber Michelson interferometer with short interfering arms; (b) measurement system configured with the optical fiber Michelson interferometer

由于干涉仪对于环境干扰十分敏感,为了减小环境干扰对测量系统的影响,该测量系统利用缩短光纤迈克耳孙干涉仪的干涉臂来减小环境干扰对干涉仪的影响,提高测量精度。两干涉臂的光纤长度约为 11 mm,如图 3(a)为利用一个 3 dB 耦合器和自准直镜构成的光纤迈克耳孙干涉仪的两个干涉臂,图 3(b)是利用此光纤迈克耳孙干涉仪构成的测量系统。

线阵 CCD 的第 i 个像元探测到的波长为 λ_i 的干涉信号如 (1) 式^[18]所示:

$$I_i = A_{i0} + A_i \cos\left(\frac{\Delta}{\lambda_i} \times 2\pi\right), \quad (1)$$

式中 A_{i0} 是干涉信号的直流分量, A_i 是干涉信号的可见度, Δ 为干涉仪的光程差, λ_i 为波长。将 (1) 式改写为 (2) 式:

$$I_i = A_{i0} + A_i \cos(k_i \Delta), \quad (2)$$

式中 $k_i = \frac{2\pi}{\lambda_i}$ 为波长 λ_i 对应的波数。

由 (2) 式可知,当 $k_i \Delta = 2n\pi$ (n 为整数)时,干涉信号 I_i 取得最大值:

$$I_i = I_{\max} = A_{i0} + A_i. \quad (3)$$

对于 $k_i \Delta = 2n\pi$ 式两边求微分,有

$$\Delta k_i \times \Delta = 2\pi \times \Delta n. \quad (4)$$

取 $\Delta n = 1$, Δk_i 即为干涉曲线相邻两个峰值之间的波数。则干涉仪的光程差 Δ 可由 (5) 式求出:

$$\Delta = \frac{2\pi}{\Delta k_i}. \quad (5)$$

根据 (5) 式,本测量系统即可对干涉仪的光程差进行绝对测量,从而可以利用此测量系统对台阶高度等物理量进行绝对测量。

根据上述测量原理可知,光源的谱宽至少应满足系统在测量干涉仪的光程差时,探测器 CCD 探测到两个波峰,即光源中最短波长与最长波长产生的干涉信号之间的相位差 $\Delta\varphi$ 应不小于 4π 。

相位差 φ 可由 (6) 式^[18]表示:

$$\varphi = \frac{2\pi}{\lambda} \times \Delta. \quad (6)$$

对(6)式两边求微分,有

$$d\varphi = \frac{2\pi}{\lambda^2} \times \Delta \times d\lambda. \quad (7)$$

因为

$$\Delta\varphi = d\varphi \geq 4\pi, \quad (8)$$

所以光源的谱宽 $\Delta\lambda$ 可由 (9) 式表示:

$$\Delta\lambda = \frac{\lambda^2}{2\pi\Delta} \times \Delta\varphi \geq \frac{2\lambda^2}{\Delta}. \quad (9)$$

可以看出,光源的最小谱宽由光源的中心波长和干涉仪的光程差决定。

本实验中,光源的中心波长为 850 nm,需测量的台阶高度差为 50 μm ,由 (9) 式可得

$$\Delta\lambda \geq \frac{2 \times (850)^2}{50 \times 10^3} = 28.90 \text{ nm}, \quad (10)$$

即本实验中光源的最小谱宽为 28.90 nm。

3 实验及其分析

3.1 测量系统的稳定性实验

首先,实验了在实验室制作的光纤迈克耳孙干涉仪的稳定性,光纤迈克耳孙干涉仪由两支光纤自准直镜熔接在一个 3 dB 耦合器的两端口构成。由于熔接时需要自准直镜的尾纤和 3 dB 耦合器的尾纤都必须留有 80 mm 的余长,熔接好以后的两干涉臂的光纤长度约为 156 mm,如图 4 所示。用此光纤迈克耳孙干涉仪替换图 3 中专门制作的短臂光纤迈克耳孙干涉仪进行稳定性实验。实验过程中,被测物体和参考镜均处于静止状态,线阵 CCD 在 1 s 以内连续采集 500 帧干涉信号,间隔 60 s 以后,线阵 CCD 又连续采集 500 帧干涉信号,如此重复,使线阵 CCD 采集 4 组干涉信号,每组为 500 帧。所用的线阵 CCD 芯片为 TCD1254GFG,2500 个像元。图 5(a)为 CCD 的第 2400 个像元在上述实验过程中探测到的干涉信号强度,可以看出,在实验进行的 4 min 内,此光纤迈克耳孙干涉仪形成的干涉信号一直在波动,这是由于两干涉臂的光纤长度 156 mm,温度漂移和振动等环境干扰引起两干涉臂的长度变化,从而引起干涉仪的光程差变化所致。

为了提高测量系统的抗干扰性,减小环境干扰对测量系统的影响,本测量系统利用缩短光纤迈克耳孙干涉仪两干涉臂的方法,通过特殊熔接方式使两干涉臂的光纤长度缩短为 11 mm 左右,如图 3(a)所示。再利用此干涉仪重复稳定性实验,线阵 CCD 的第 2400 个像元探测到的干涉信号如图 4(b)所示。在实验进行的 4 min 内,短臂光纤迈克耳孙干涉仪的干涉信号稳定在 $189.11 \times 10^{-2} \sim 189.65 \times 10^{-2} \text{ V}$,说明该测量系统有很好的稳定性。4 min 的时间间隔对于该测量系统进行测量已经足够,所以,利用研制的短臂光纤迈克耳孙干涉仪可以有效地抑制环境干扰对测量系统的影响。

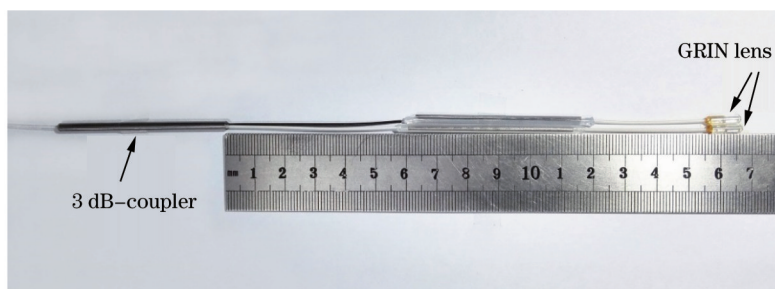


图 4 普通干涉臂的光纤迈克耳孙干涉仪

Fig.4 Optical fiber Michelson interferometer with normal interfering arms

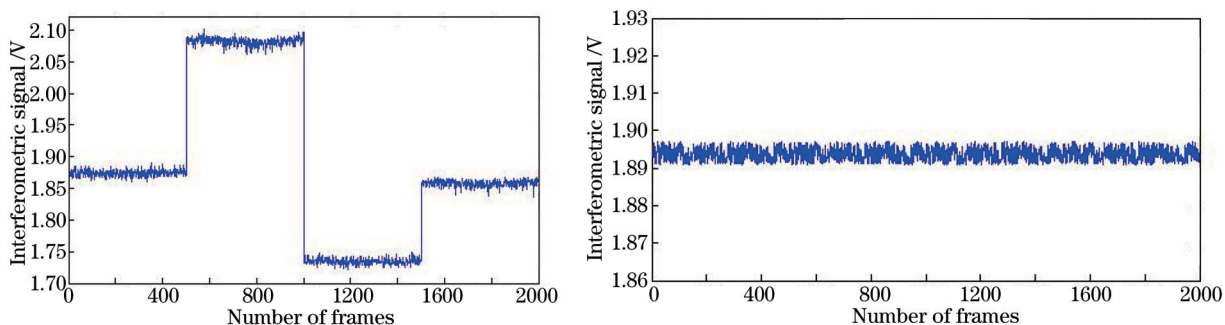


图5 CCD的第2400个像元探测到的2000个干涉信号。(a)通过长臂光纤迈克尔逊干涉仪测得的干涉信号；
(b)通过短臂光纤迈克尔逊干涉仪测得的干涉信号

Fig.5 2000 interferometric signals detected by the 2400th pixel of CCD. (a) Detected signal of the optical fiber Michelson interferometer with normal interfering arms; (b) detected signal of the optical fiber Michelson interferometer with short interfering arms

3.2 对量块构成的台阶高度的测量

为了进行测量,首先需要对接线阵 CCD 的每个像元探测到的光波波长进行标定。实验中,利用一个线性度为 0.02% 的一维平移台(P-625.1CD)带动参考镜线性移动,实现对干涉仪的光程差线性调制,调制范围为 80 μm 。图 6 是 CCD 的第 i 个像元在光程差调制期间探测到的干涉信号,此干涉信号满足(11)式^[18]:

$$\frac{2\pi \times \delta\Delta}{\lambda_i} = \Delta\varphi, \quad (11)$$

式中 λ_i 为第 i 个像元探测的光波波长, $\delta\Delta$ 为在光程差调制范围, $\Delta\varphi$ 为在光程差调制范围干涉信号的相位变化。

由 (11) 式,有 $\frac{2\pi \times 80 \times 10^3}{\lambda_i} = \Delta\varphi$, 其中 $\Delta\varphi$ 从探测到的干涉信号得出。利用(11)式即可标定出该像元探测到的干涉信号的波长 λ_i 。利用同样的方法可以对线阵 CCD 的其他像元探测的干涉信号的波长进行标定。各个像元探测到的光波波长如图 7 所示。

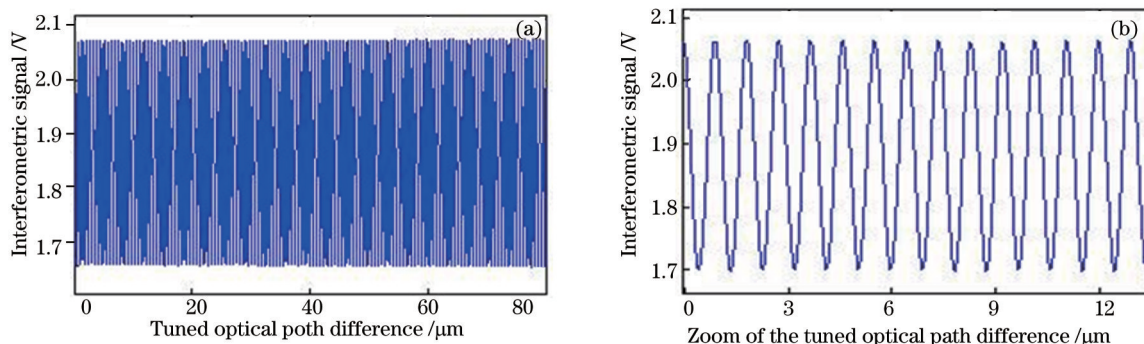


图6 在调制光程差过程中 CCD 的一个像元检测的干涉信号。(a) 探测到的总的干涉信号;(b) 探测到的干涉信号的局部放大图
Fig.6 Interferometric signal detected by a pixel of CCD during the OPD-tuning period. (a) Integral interferometric signal;
(b) zoom of interferometric signal

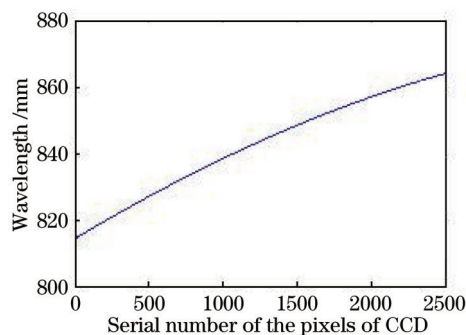


图7 CCD 各像元检测的信号波长

Fig.7 Wavelength of the signal detected by each pixel of CCD

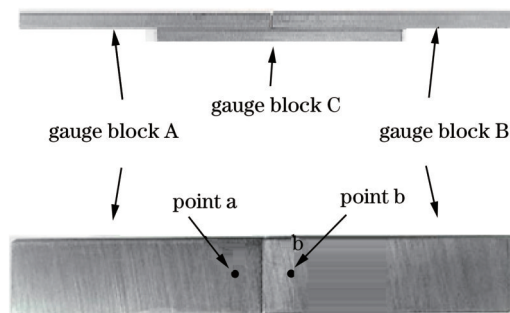


图8 三个量块组成的台阶

Fig.8 Stepped surface configured with three gauge blocks

利用该测量系统对一个公称尺寸为 $50\ \mu\text{m}$ 的台阶高度进行测量。如图 8 所示,利用一个公称尺寸为 $1\ \text{mm}$ 的量块 A 和一个公称尺寸为 $1.05\ \text{mm}$ 的量块 B 与另一个量块 C 粘合在一起,构成一个公称尺寸为 $50\ \mu\text{m}$ 高度的台阶,此台阶作为测量对象进行测量实验。

首先,经自准直透镜准直后的测量光束垂直入射到量块 A 表面的 a 点,线阵 CCD 探测到的干涉信号如图 9(a)所示,其中, x 轴为 CCD 像元序数, y 轴为各个像元探测到的干涉信号强度。利用图 7 所示的每个像元探测到的光波波长,将图 9(a)所示的沿像元序数分布的干涉信号转化为沿波长分布,如图 9(b)所示。再利用波长与波数的关系式 $k_i = \frac{2\pi}{\lambda_i}$, 得到沿波数分布的干涉信号,如图 9(c)所示。求出图 9(c)所示相邻两个波峰之间的波数变化 Δk_i , 根据 (5) 式即可得此时干涉仪的光程差 Δ_1 。然后,通过一个一维位移平台水平移动量块,使测量光束垂直入射到量块 B 的 b 点,线阵 CCD 探测到的干涉信号如图 10(a)所示。再经过与图 9(a)相同的方法对图 10(a)进行处理,得到图 10(b)和图 10(c),以及此时干涉仪的光程差 Δ_2 。这样,台阶高度可通过(12)式计算出来:

$$\Delta h = |\Delta_2 - \Delta_1|. \quad (12)$$

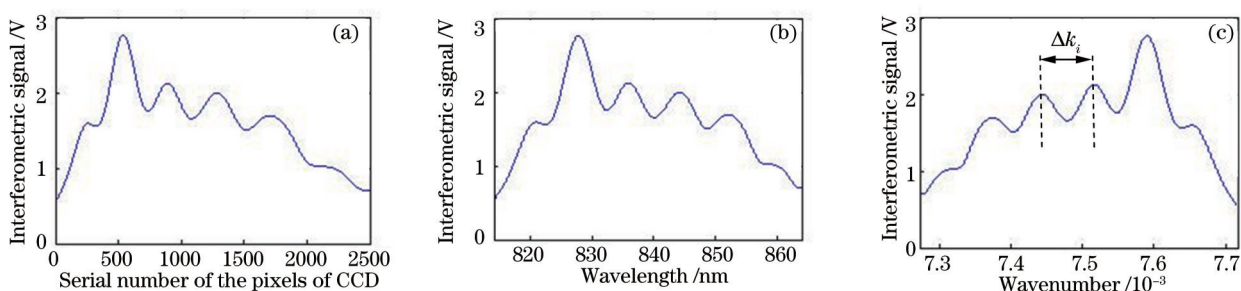


图 9 测量光束入射到 a 点时的干涉信号。(a) CCD 各个像元探测到的干涉信号;(b) 波长分布的干涉信号;(c) 波数分布的干涉信号

Fig.9 Interferometric signal when the measurement beam incident on point a . (a) Interferometric signal detected by CCD; (b) interferometric signal distributed with wavelength; (c) interferometric signal distributed with wavenumber

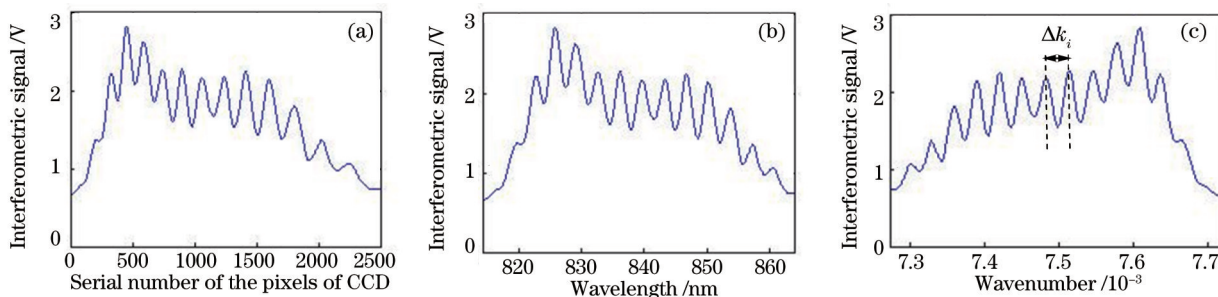


图 10 测量光束入射到 b 点时的干涉信号。(a) CCD 各个像元探测到的干涉信号;(b) 波长分布的色散信号;(c) 波数分布的色散信号

Fig.10 Interferometric signal when the measurement beam incident on point b . (a) Interferometric signal detected by CCD; (b) interferometric signal distributed with wavelength; (c) interferometric signal distributed with wavenumber

测量过程中,对干涉信号波峰位置的准确确定直接影响测量结果的精度。由于干涉信号的波峰位置信号强度变化平坦,如图 11 所示,导致波峰位置很难准确确定。由于在波峰附近曲线是对称的,在实验过程中,在波峰附近作一条水平线,如图 11 所示,通过计算出水平线与信号曲线的两个交点 a 点和 b 点两点之间的中点确定波峰的位置,该过程由计算机程序完成。

由(5)式和 $k_i = \frac{2\pi}{\lambda_i}$ 可知,测量分辨率可由 (13) 式计算得到:

$$\delta\Delta = \frac{2\pi}{(\Delta k_i)^2} \times \delta(\Delta k_i) = \frac{2\pi}{(\Delta k_i)^2} \times \left(-\frac{2\pi}{\lambda_i^2} \times \delta\lambda_i \right). \quad (13)$$

因为光源的光谱宽为 $44.16\ \text{nm}$, CCD 的像元总数为 2500, 所以有 $\delta\lambda_i = \frac{44.16\ \text{nm}}{2500} = 0.017664\ \text{nm}$ 。由图 9(c) 可知,波数带宽为 $\Delta k_i = 0.4 \times 10^{-3}$, 并且 $\lambda_i = \bar{\lambda} = 850\ \text{nm}$, 所以测量分辨率为

$$\delta\Delta = \frac{2\pi}{(0.4 \times 10^{-3})^2} \times \left(\frac{2\pi}{850^2} \times 0.017664 \right) = 6.03 \text{ nm} . \quad (14)$$

实验中对 50 μm 的台阶重复测量 10 次, 测量数据如表 1 所示, 测量的平均值为 50.004 μm, 每次测量值与平均值的偏差如图 12 所示, 10 次测量结果的标准差为 6.8 nm。测量结果的误差主要是由于测量过程中温度漂移和振动等环境干扰、确定波峰位置的误差、波长标定误差, 以及移动量块的一维平台的运动误差引起。

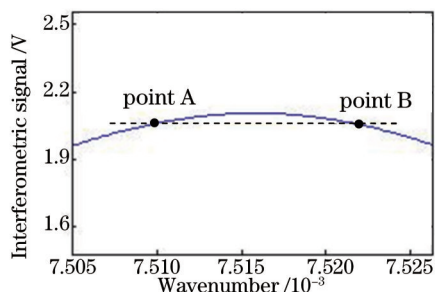


图 11 一个干涉条纹的峰值处的放大图

Fig.11 Zoom of top area of one interferometric fringe

表 1 实验测量结果

Table 1 Experimental results

Times	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Results /μm	50.0037	49.9911	49.9945	50.0075	50.0058	49.9980	50.0087	49.9940	49.9920	50.0047

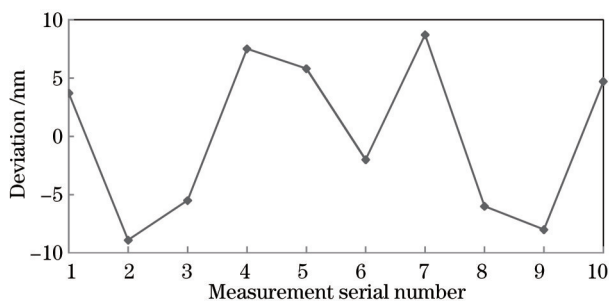


图 12 每次的测量结果与平均值的偏差

Fig.12 Deviation of each measurement result relative to average value

4 结 论

本文研究了一种基于波数分辨的低相干干涉台阶高度测量系统。将线阵 CCD 探测到的干涉信号转化成波数分布的干涉信号, 测量出干涉信号相邻两个波峰之间的波数变化量实现对台阶高度的绝对测量。该测量系统不仅具有一般的低相干干涉测量系统能够进行绝对测量以及量程不受波长限制的优点, 而且不需对光程进行扫描, 既简化了测量系统, 又提高了测量速度, 极大地抑制了环境噪声对测量系统的影响。测量分辨率为 6.03 nm, 对一个高度为 50 μm 的台阶重复 10 次测量, 测量结果的标准差为 6.8 nm。

参 考 文 献

- 1 Mingzheng Jiang, Edmund Gerhard. Simple strain sensor using a thin film as a low-finesse fiber-optic Fabry-Perot interferometer[J]. Sens Actuators, 2001, 88(1): 41-46.
- 2 Fang Xie, Min Li, Ding Song, *et al.*. Large range and high resolution on-line displacement measurement system by combing double-interferometries[J]. Opt Express, 2010, 18(24): 24961-24968.
- 3 R Dandliker, K Hug, J Politch, *et al.*. High accuracy distance measurement with multiple wavelength interferometry[J]. Opt Eng, 1985, 34(8): 2407-2412.
- 4 Hu Jun, Yang Yuanhong, Liu Xuejing. Gap fiber Bragg grating based micro-gap and temperature[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(11): 1108003.

- 胡 军, 杨远洪, 刘学静. 基于间隙光纤光栅的微间隙与温度同时测量技术[J]. 中国激光, 2014, 41(11): 1108003.
- 5 D P Hand, T A Carolan, J S Barton, *et al.*. Profile measurement of optically rough surfaces by fiber-optic interferometry[J]. Opt Lett, 1993, 18(16): 1361-1363.
- 6 Yeou-Yen Cheng, James C Wyant. Two-wavelength phase shifting interferometry[J]. Appl Opt, 1984, 24(24): 4539-4543.
- 7 Yeou-Yen Cheng, James C Wyant. Multiple-wavelength phase shifting interferometry[J]. Appl Opt, 1985, 24(6): 804-807.
- 8 Sangwon Hyun, Minah Choi, Byung Jae Chun, *et al.*. Frequency-comb-referenced multi wavelength profilometry for largely stepped surfaces[J]. Opt Express, 2013, 21(8): 9780-9791.
- 9 Zhu Ronggang, Zhu Rihong, Song Qian, *et al.*. Applied research on fiber-optic interferometer projection of Fourier transform profilometry [J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(7): 0708003.
朱荣刚, 朱日宏, 宋 倩, 等. 基于光纤干涉投影的傅里叶变换轮廓术应用研究[J]. 中国激光, 2013, 40(7): 0708003.
- 10 Linh Viet Nguyen, Dusan Hwang, Supei Moon, *et al.*. High temperature fiber sensor with high sensitivity based on core diameter mismatch [J]. Opt Express, 2008, 16(15): 11369-11375.
- 11 Wenhui Wang, Nan Wu, Ye Tian, *et al.*. Miniature all-silica optical fiber pressure sensor with an ultrathin uniform diaphragm[J]. Opt Express, 2010, 18(9): 9006-9014.
- 12 Lazo M. Manojlovic. A novel common path interferometric technique for vibration measurement based on two-fiber-optic couplers[J]. IEEE Sensors Journal, 2011, 11(7): 1541-1547.
- 13 Chen Chaoliang, Gao Wanrong. Method of measuring dispersion and refractive index of transparent object based on spectral fiber low coherence interferometry[J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(10): 1008005.
陈朝良, 高万荣. 基于光谱光纤低相干的透射样品色散和折射率测量方法[J]. 中国激光, 2013, 40(10): 1008005.
- 14 Yun-Jiang Rao, David A Jackson. Recent progress in fibre optic low-coherent interferometry[J]. Meas Sci & Technol, 1996, 7(7): 981-999.
- 15 Rao Y J, Ning Y N, Jackson D A. Synthesized source for white-light sensing systems[J]. Opt Lett, 1993, 18(6): 462-464.
- 16 Wang Zhen, Jiang Yi. Wave number scanning-based Fourier transform white-light interferometry[J]. Appl Opt, 2012, 51(22): 5512.
- 17 Wang Zhen, Jiang Yi, Ding Wenhui, *et al.*. Fourier transform white-light interferometry based on nonlinear wave sampling[J]. Opt Eng, 2013, 52(10): 104102.
- 18 Yu Daoyin, Tan Hengying. Engineering Optics[M]. Beijing: China Machine Press, 1998.
郁道银, 谈恒英. 工程光学[M]. 北京: 机械工业出版社, 1998.

栏目编辑: 何卓铭