

文章编号 1004-924X(2008)01-0114-08

频域 OCT 的光学相移器的标定

李 刚¹, 张泰石^{1,2}, 郑 羽¹, 林 凌¹, 任 钊¹

(1. 天津大学 精密测试技术及仪器国家重点实验室, 天津 300072; 2. 金日成综合大学 物理学院, 朝鲜)

摘要:提出了一种对频域光学相干层析(OCT)系统中压电陶瓷相移器进行标定的方法。该标定法是在用干涉条纹跟踪法初步标定的基础上,用差分光谱法进行精确标定来实现的,可将标定精度提高约 6%。在差分频域 OCT 系统中进行了实验验证,表明该方法能够将频域 OCT 图像的信噪比提高约 10%。

关键词:光学相干层析术;频域 OCT;差分频域 OCT;压电陶瓷;相移器;滤波器

中图分类号:TP391;TH703 **文献标识码:**A

Calibration of phase shifter in spectral domain OCT system

LI Gang¹, ZHANG Tae-sok^{1,2}, ZHENG Yu¹, LIN Ling¹, REN Zhao¹

(1. *State Key Laboratory of Precision Measurement Technology and Instruments, Tianjin University, Tianjin 300072, China;*
2. *School of Physics, KIM IL SUNG University, D. P. R. Korea*)

Abstract: A calibration method for Piezoelectric Transducer(PZT) phase shifter used in Spectral Domain Optical Coherence Tomography (SDOCT) is presented. Two steps are included in the calibration process: the first step is the rough calibration by the method of detecting and tracking the fringe patterns; the second one is fine calibration by a differential spectrum method, which can increase the precision by 6%. The experimental results in the real differential SDOCT system show that the Signal-to-Noise Ratio (SNR) is increased by 10% with the method mentioned above.

Key words: Optical Coherence Tomography (OCT); Spectral Domain OCT (SDOCT); differential SDOCT; piezoelectric transducer; phase shifter; filter

1 引 言

光学相干层析成像技术(Optical Coherence Tomography, OCT)是一种新型的非接触及无创成像技术,能够对微米级生物组织成像^[1-3]。它主要分为时域 OCT (Time-Domain OCT, TDOCT)

和频域 OCT (Spectral-Domain OCT, SDOCT)。

SDOCT 无须对样品进行轴向扫描就可以直接得到所有轴向深度的图像信息,实现高速实时成像,但是图像信息中除了有用的图像信息以外,还包含了寄生图像信息(直流项,自相关项与其镜像,真实图像的镜像)^[1],为了消除这些寄生图像信息,一般采用的方法为相移算法^[2-3]。

尽管相移算法在提高测量精度和消除寄生图像信息等方面扮演着重要角色,但是最关键的部分是相移器的设计,它的相位移精度、良好的重复性以及稳定性都直接影响 SDOCT 图像的质量。

SDOCT 系统通常使用压电陶瓷 (Piezoelectric Transducer, PZT) 来驱动参考臂平面反射镜的平移来实现“相移”^[4-5],它具有结构简单、操作方便、响应速度快和性能稳定等优点。

PZT 相移器能否满足频域 OCT 相移算法的关键是精确标定给 PZT 相移器施加的电压(驱动电压)与相位移之间的关系。

标定相移器多采用干涉条纹跟踪法^[6-8]。干涉条纹跟踪法是将干涉条纹相邻的极大值和极小值位置的相位差规定为 π ,再用补偿方法算出干涉条纹的极大值和极小值之间其它位置相位的一种间接相位测量法,故标定精度不高。因而本文提出了一种直接相位测量法——差分光谱法。

2 测量原理

2.1 干涉条纹跟踪法

利用干涉条纹跟踪法 PZT 相移器标定光路如图 1 所示,它的核心也是迈克尔逊干涉仪,干涉仪参考臂的光学调节架上安装了 PZT 相移器,样品臂的光学调节架上安装了平面反射镜。He-Ne 激光器发出的光束扩束后被分束器按振幅分束,由反射镜和相移器分别反射后,又重新在分束器上相遇,因参考光波与样品光波之间存在光程差而发生的干涉用高速图像采集系统进行采集。

调节好测量光路后,采集到的干涉图像中出现至少几个周期的干涉条纹,且指向一个方向。先要对干涉图进行滤波、增强来消除收集到的干涉图中的高低频噪声。为了找出干涉条纹的极小值或者极大值的位置,对干涉条纹图像进行二值化(图像的边缘检测):当 $\Delta f = f(i, j+1) - f(i, j) > 0$ 时, $f(i, j) = 1$ 。当 $\Delta f = f(i, j+1) - f(i, j) < 0$ 时, $f(i, j) = -1$ 。其中 $f(i, j)$ 为平滑滤波后的图像。

二值中“1”对应的位置代表干涉条纹的极小值的位置,“-1”对应的位置代表干涉条纹的极大值的位置,它们之间相位差为 π ,相邻“-1”之间相位差为 2π 。

若驱动电压为 U_1 时,相邻“-1”之间间隔为 l ,从 U_1 增加到 U_2 时,“-1”的位置变化量为 Δl ,则相移器的相位移 $\Delta\alpha$ 为:

$$\Delta\alpha = \frac{2\pi\Delta l}{l}. \quad (1)$$

对迈克尔逊干涉仪而言,相位移 2π 对应的微位移为 $\lambda/2$,那么相位移 $\Delta\alpha$ 对应的相移器的微位移 Δd 为:

$$\Delta d = \frac{\Delta\alpha}{2\pi} \times \frac{\lambda}{2} = \frac{\lambda\Delta l}{2l}, \quad (2)$$

其中 λ 为 He-Ne 激光的波长,其波长为 652.8 nm。

每伏驱动电压对应的微位移 Δd_U 为

$$\Delta d_U = \frac{\Delta d}{U_2 - U_1}. \quad (3)$$

在频域 OCT 中,为了消除寄生图像信息,采用较常用的 5 帧算法^[9],其相移器的相位移为 $n\pi/2$,其中 $n=0, 1, 2, 3, 4$, $\pi/2$ 的相位移需要的微位移为 $\lambda_0/8$ 。从而 $n\pi/2$ 的相位移需要的驱动电压间隔 $\Delta U_{n\pi}$ 为

$$\Delta U_{n\pi} = \frac{n\lambda_0}{8\Delta d_U}, \quad n=0, 1, 2, 3, 4, \quad (4)$$

其中 λ_0 为频域 OCT 系统所用的宽带光源 (SLD) 的中心波长。

2.2 差分光谱法

在干涉仪输出处,从参考臂的 PZT 相移器反射的平面光波和从样品臂的平面反射镜反射的平面光波之间发生干涉,干涉光谱如式(5)^[10]:

$$S_1(\omega) = |E_1(\omega)|^2 + |E_2(\omega)|^2 + E_1(\omega)E_2(\omega)\cos[\phi_1(\omega) - \phi_2(\omega) - \omega\tau], \quad (5)$$

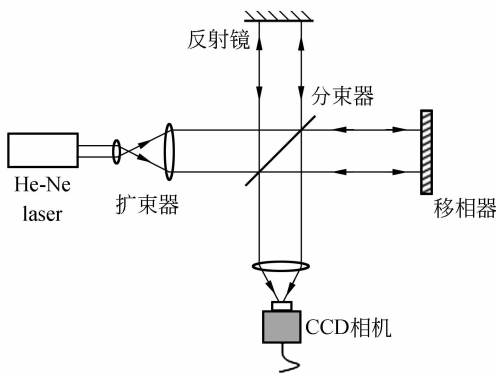


图 1 移相器标定实验光路

Fig. 1 Experimental optical path for phase shifter calibration

其中 ω 为角频率, $E_1(\omega)$ 和 $E_2(\omega)$ 分别为参考臂和样品臂的电场振幅, $\phi_1(\omega)$ 和 $\phi_2(\omega)$ 分别为它们的相位, τ 为干涉仪的两个臂之间的光学延时。

如果给相移器施加适当的驱动电压, 导致干涉仪的两个臂之间补充光学延时 $\Delta\tau$ (相位移 $\omega\Delta\tau$), 那么干涉光谱为:

$$S_2(\omega) = |E_1(\omega)|^2 + |E_2(\omega)|^2 + E_1(\omega)E_2(\omega)\cos[\phi_1(\omega) - \phi_2(\omega) - \omega(\tau + \Delta\tau)] = |E_1(\omega)|^2 + |E_2(\omega)|^2 + E_1(\omega)E_2(\omega)\{\cos[\phi_1(\omega) - \phi_2(\omega) - \omega\tau]\cos(\omega\Delta\tau) + \sin[\phi_1(\omega) - \phi_2(\omega) - \omega\tau]\sin(\omega\Delta\tau)\} \quad (6)$$

由式(5)和式(6)可得两个光谱的差(差分光谱)为:

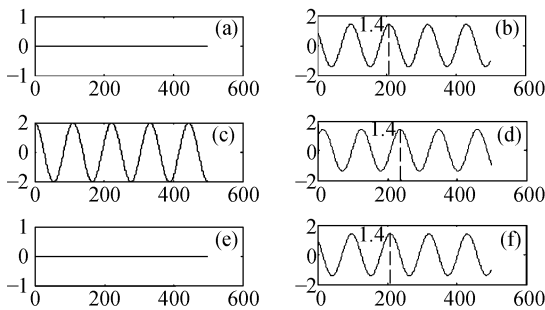
$$S_{\text{dif}}(\omega) = S_1 - S_2 = E_1(\omega)E_2(\omega)\{\cos[\phi_1(\omega) - \phi_2(\omega) - \omega\tau] - \cos[\phi_1(\omega) - \phi_2(\omega) - \omega\tau]\cos(\omega\Delta\tau) - \sin[\phi_1(\omega) - \phi_2(\omega) - \omega\tau]\sin(\omega\Delta\tau)\} \quad (7)$$

如果 $\omega\Delta\tau \approx \pi$, 那么

$$S_{\text{dif}}(\omega) = S_1 - S_2 = 2E_1(\omega)E_2(\omega)\cos[\phi_1(\omega) - \phi_2(\omega) - \omega\tau] \quad (8)$$

式(7)的模拟结果如图 2 和图 3 所示, 为解释方便, 令干涉光谱中明条纹数量为 4 个, $E_1(\omega)$ 和 $E_2(\omega)$ 为 1。

从图 3 可知相移器的相位移明显地影响差分光谱中干涉条纹的极大值的幅度, 相位移为 π 时差分光谱中干涉条纹的极大值的幅度最大, 相位移为 2π 时干涉条纹的极大值的幅度最小, 从而能分别精确地找出相位移为 π 和 2π 时对应的驱动电压, 将该方法称为差分光谱法。



相移移 $\omega\Delta\tau$ 为: (a)0 (b) $\pi/2$ (c) π (d) $3\pi/2$ (e) 2π (f) $5\pi/2$
Phase shift $\omega\Delta\tau$: (a)0 (b) $\pi/2$ (c) π (d) $3\pi/2$ (e) 2π (f) $5\pi/2$

图 2 相移器的相位移与差分光谱之间关系

Fig. 2 Relation between phase shift and differential spectra

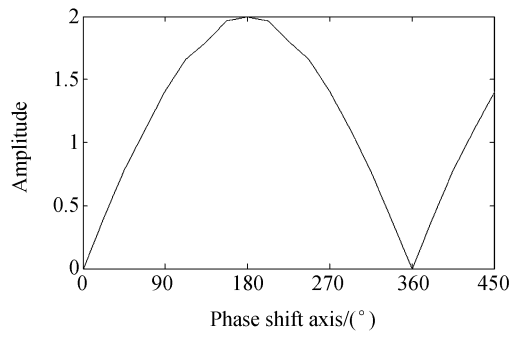
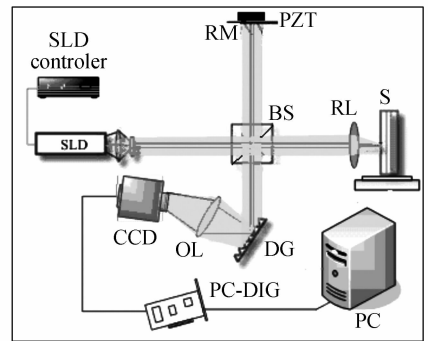


图 3 相移器的相位移与差分光谱中干涉条纹极大值幅度之间的关系

Fig. 3 Relation between the phase shift and the maximum amplitude of the interference fringe in differential spectrum

3 实验设备

实验装置如图 4 所示。光源为超亮发光二极管(SLD), 型号为 SLD-370-HP-TOW2-PD, SLD 电流控制器和温度控制器为 PILOT-4, 最大的输出功率为 10 mW。光源中心波长 λ_0 为 830 nm, 功率半峰带宽 $\Delta\lambda_{\text{FWHM}}$ 为 40 nm, 相干长度 l_c 为 15.2 μm 。分束棱镜的分束比为 50 : 50, 光栅线数为 1 200 line/mm。高速图像采集系统由 CCD 相机 CA-D6-0256W(8 bit, 256 pixel \times 256 pixel, 帧速率为 955 frame/s)和低功耗数字图像采集卡 PC-DIG 构成, 并使用了微位移平台来完成横向



注: SLD: 超亮发光二极管; BS: 分束棱镜; RM: 参考镜; RL: 物镜; S: 样品(平面反射镜); DG: 衍射光栅; OL: 聚焦镜; PZT: 压电陶瓷驱动器

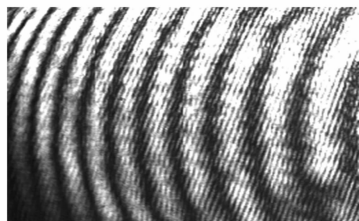
图 4 SDOCT 试验装置框图

Fig. 4 Experimental setup of SDOCT system

扫描,它的扫描范围为 50 mm,微调范围为 $2.5\ \mu\text{m}$,最高精度范围为 $0.1\ \mu\text{m}$ 。相移器由压电陶瓷驱动器与平面反射镜组成。

4 实验结果与讨论

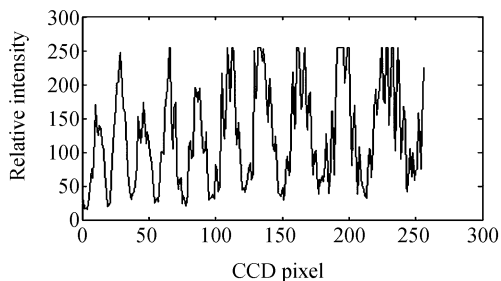
为了利用干涉条纹跟踪法初步标定 PZT 相



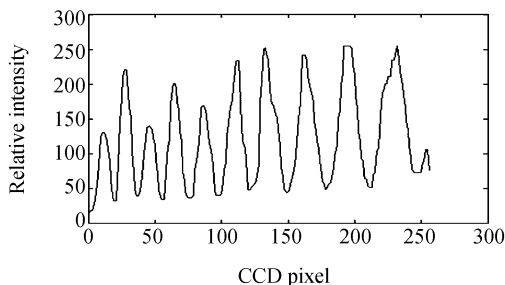
(a)干涉图像
(a)Fringe pattern

移器,图 4 的实验装置中用 He-Ne 激光代替了 SLD,用平面反射镜替换了光栅。

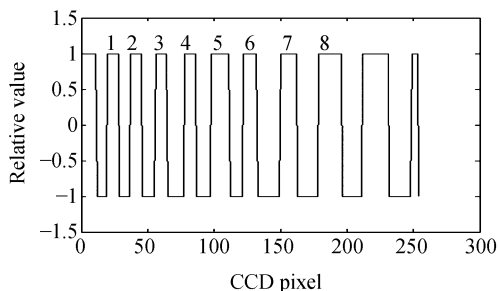
实验中,调节好光学系统,使观察屏上产生指向一个方向的清晰干涉条纹,用高速图像采集系统进行采集,如图 5(a)所示,其中第 125 行的数据如图 5(b)所示。



(b)第 125 行的数据
(b) Intensity distribution of a fringe pattern in the cross section of line 125



(c)平滑滤波后
(c)Smooth-filtered intensity distribution



(d)二值化后
(d) Binarized intensity distribution

图 5 干涉图像的二值化步骤

Fig. 5 Steps of binarizing fringe pattern

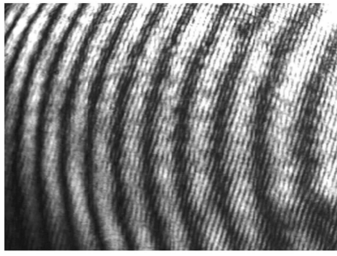
使用了 Matlab 软件数据库的中值滤波函数 `medfilt2` 和平均滤波函数 `filter2` 进行平滑滤波。中值滤波窗口设定过大会引起数据变化(干涉条纹由余弦变成方形)而平均滤波窗口设定过大会降低干涉条纹的对比度,造成明(暗)条纹的位置变化,所以要设定适当的滤波窗口。

比较合理的滤波顺序为先进进行中值滤波消除低频噪声,然后使用平均滤波器消除高频噪声,这样才能保证干涉条纹的固有特性。

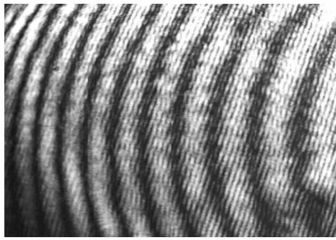
本实验首先进行了 3 次中值滤波,滤波窗口

设定为 5,然后进行了 2 次平均滤波,滤波窗口设定为 3,滤波后的结果如图 5(c)所示,对其第 125 行的数据进行的二值化结果如图 5(d)所示。

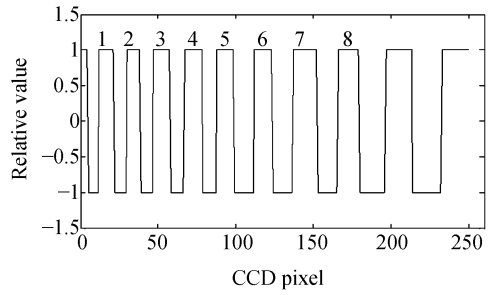
驱动电压(DV)范围为 5~55 V,电压间隔为 5 V,其中 $DV = 20\ \text{V}, 25\ \text{V}$ 时,干涉图分别如图 6(a),6(c)所示。对其第 125 行的数据进行的二值化结果分别如图 6(b),6(d)所示,随着驱动电压的增加,干涉条纹极大值的幅度保持不变,但干涉条纹极大值(或者极小值)的位置向左移动。



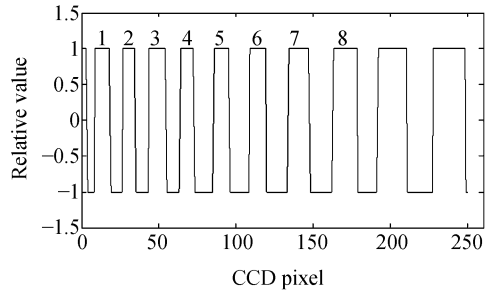
(a) DV=20 V



(c) DV=25 V



(b) DV=20 V



(d) DV=25 V

图 6 干涉图像与其第 125 行的二值化数据

Fig. 6 Fringe patterns and binarized intensity distributions in the cross section of line 125

为了提高测量精度,选择了 8 个测量点,如图 6(b)所示。通过式(2)可求出驱动电压对应的相移器的微位移 Δd ,见表 1,驱动电压与微位移间的关系如图 7 所示。每伏驱动电压对应的微位移 Δd_U 为:

$$\Delta d_U = 10.6 \pm 0.37 \text{ nm/V} \quad (9)$$

对中心波长 $\lambda_0 = 830 \text{ nm}$ 的 SLD 而言, $n\pi/2$ 的相位移需要的驱动电压间隔 $\Delta U_{n\pi/2}$ 为

$$\Delta U_{n\pi/2} = 9.8 n \text{ V}, n=0,1,2,3,4 \quad (10)$$

利用差分光谱法,精确标定实验装置如图 4 所示。

表 1 驱动电压与相移器的微位移之间关系

Tab. 1 Relation of driving voltage and micro displacement of the phase shifter

驱动电压 U/V	平均微位移 $\Delta d/\text{nm}$	误差 $/\text{nm}$
5	0	0
10	52.1	± 6.73
15	107.7	± 11.1
20	158.8	± 11.3
25	212.8	± 13.5
30	267.3	± 15.1
35	319.9	± 17.2
40	373.2	± 18.1
45	424.8	± 15.3
50	480.3	± 15.1
55	533.8	± 17.4

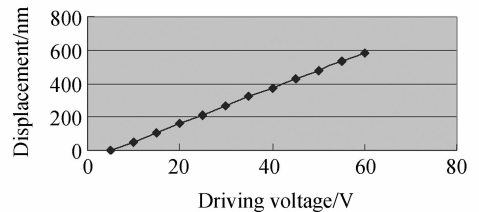


图 7 驱动电压与微位移之间关系

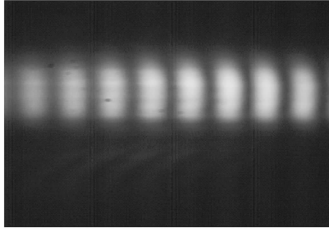
Fig. 7 Relation between driving voltage and micro displacement

SLD 发出的低相干光经分束棱镜分束,其中一条光束进入参考臂,被 PZT 相移器反射,另外一条光束进入样品臂,被平面反射镜反射,又重新在分束器上相遇。因参考光波与样品光波之间的光程差而发生干涉,干涉光束由光栅按波长分开,

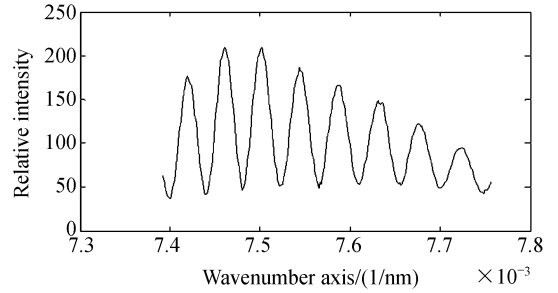
聚焦镜 OL 的焦点上出现被干涉条纹调制的光源的功率谱(干涉光谱),用高速图像采集系统进行采集。先给 PZT 相移器施加 5 V(零相位)电压,采集的干涉光谱,如图 8(a)所示。

CCD 每个像素对不同波长的信号具有不同

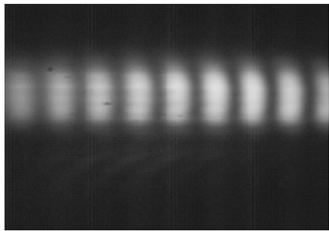
的响应,需要进行响应度补偿,而为了图像重建进行的傅里叶逆变换是对以波数为变量的数据进行的,由于波长和波数之间存在非线性关系,需要对以波长为变量的数据做线性补偿^[11]。补偿后其第 110 行的数据如图 8(b)所示。



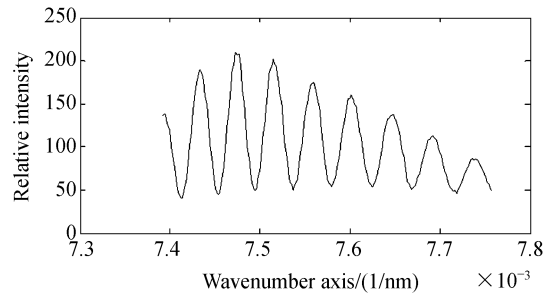
(a)DV=5 V



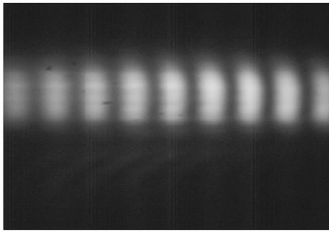
(b)DV=5 V



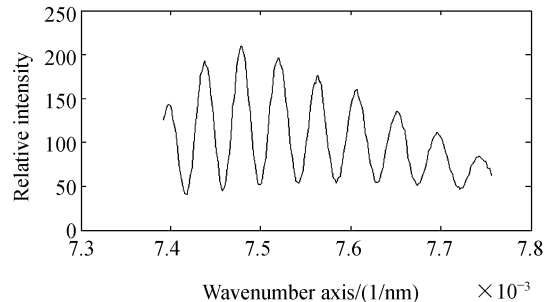
(c)DV=24.6 V



(d)DV=24.6 V



(e)DV=26.2 V



(f)DV=26.2 V

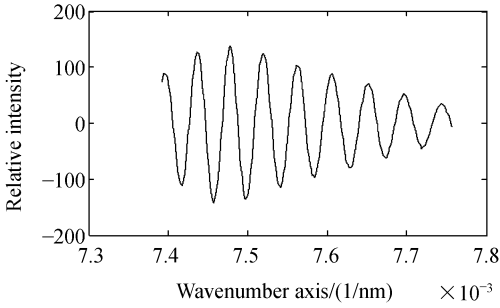
图 8 干涉光谱及补偿后其第 110 行数据

Fig. 8 Interference spectra and compensated intensity distributions in the cross section of line 110

从式(10)可以看出,相位移 π 需要的驱动电压间隔为 19.6 V(驱动电压为 24.6 V),驱动电压为 24.6 V 时干涉光谱如图 8(c)所示,补偿后其第 110 行的数据如图 8(d)所示,它与驱动电压为 5 V(零相位)时干涉光谱之间的差分光谱如图 9(a)

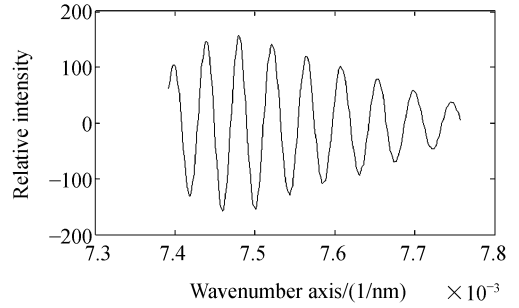
所示。

为了得到 π 相位移需要的精确驱动电压间隔,在驱动电压为 (24.6 ± 0.2) V 时,分别采集了 30 幅干涉光谱。



(a)图 8(b)与图 8(d)之间差分光谱

(a)Differential spectrum between Fig. 8(b) and Fig. 8(d)



(b)图 8(b)与图 8(f)之间差分光谱

(b)Differential spectrum between Fig. 8(b) and Fig. 8(f)

图 9 干涉光谱间的差分光谱

Fig. 9 Differential spectra between interference spectra

驱动电压为 5 V(零相位)对应的干涉光谱(图 8(a))与驱动电压在 24.6 V 附近变化时采集到的 30 幅干涉光谱之间分别相减得到 30 幅差分光谱,找出了干涉条纹极大值的幅度最大的差分光谱,如图 9(b)所示,其对应的驱动电压为 26.2 V,所以相位移 π 需要的精确驱动电压间隔为 $\Delta U_{\pi} = 21.2$ V。

驱动电压为 26.2 V 对应的干涉光谱如图 8(e)所示,补偿后其第 110 行的数据如图 8(f)所示。

用同样的方法,找出相位移为 2π 时需要的准确驱动电压间隔为 $\Delta U_{2\pi} = 42.2$ V。

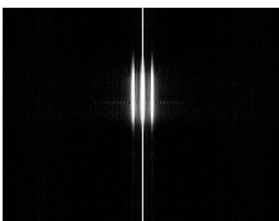
由于本系统所用的 PZT 相移器在驱动电压 5~55 V 范围内,驱动电压与微位移之间呈近似线性关系(见图 7),因而能求出 $\pi/2$ 的相位移需要的驱动电压间隔 $\Delta U_{\pi/2}$ 和 $3\pi/2$ 的相位移需要的驱动电压间隔 $\Delta U_{3\pi/2}$,如表 2 所示。由表 2 可知,每伏电压对应的相位移为 $\pi/21(8.5^{\circ})$,在相位移为 π 和 2π 时,用差分光谱法标定的精度比用干涉条纹跟踪法分别高 5%和 6.4%。

表 2 相移器的相位移与驱动电压之间关系

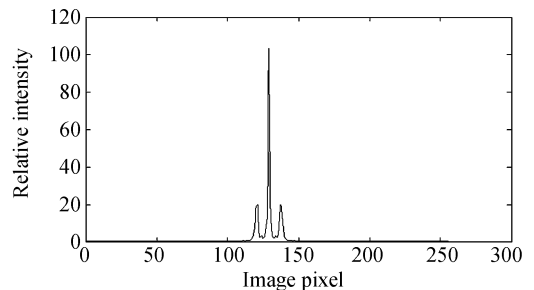
Tab. 2 Relation between phase shift and driving voltage

标定方法	相位移/rad	0	$\pi/2$	π	$3\pi/2$	2π
干涉条纹跟踪法	驱动电压 U/V	5.00	14.80	24.60	34.40	44.20
差分光谱法	驱动电压 U/V	5.00	15.60	26.20	36.70	47.20
	驱动电压间隔 $\Delta U/V$	0	10.60	21.20	31.70	42.20

为了得到频域 OCT 图像,对驱动电压为 5 V(零相位)的干涉光谱(图 8(a))进行了傅里叶逆变换,其模如图 10(a)所示,其第 110 行的数据如图 10(b)所示,图像中包含了较大的直流项与镜像。



(a)

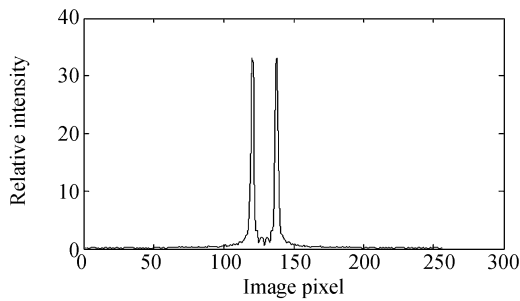


(b)

图 10 对图 8(a)进行傅里叶逆变换的模及其第 110 行的数据

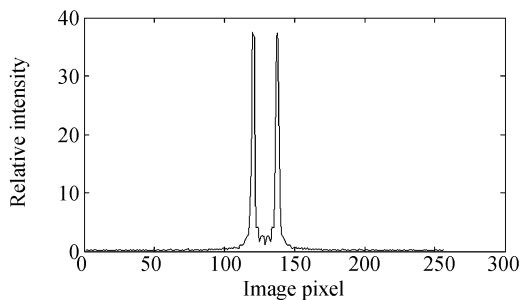
Fig. 10 Inverse Fourier transform module of Fig. 8 (a) and intensity distribution in the cross section of line 110

为了消除直流项,使用了差分 SDOCT 技术^[10],该技术要求差分光谱的相位差为 π 。



(a)对应图 9(a)

(A)For Fig. 9(a)



(b)对应图 9(b)

(b)For Fig. 9(b)

图 11 对图 9 进行傅里叶逆变换的模

Fig. 11 Module of inverse Fourier transform for Fig. 9

对图 9(a)(相位差约为 π 的差分光谱)进行的傅里叶逆变换的模如图 11(a)所示,对图 9(b)(相位差为 π 的差分光谱)进行的傅里叶逆变换的模如图 11(b)所示。从图 11 可知,用差分光谱法精确标定相移器,SDOCT 图像的信噪比约提高了 10%。

5 结 论

本文提出了对 PZT 相移器进行标定的一种方法。标定分两步进行,首先利用干涉条纹跟踪法初步标定,然后利用差分光谱法精确标定。

本文提出的差分光谱法是根据相移器的相位移为 π 时差分光谱中干涉条纹的极大值幅度最大,相位移为 2π 时差分光谱中干涉条纹的极大值幅度最小,来精确找出相移器的相位移分别为 π 和 2π 时需要的驱动电压,从而利用驱动电压与相位移之间的线性关系,求出其它相位移需要的驱动电压。

这是一种直接相位测量法,该方法将标定精度提高了约 6%。经过在差分 SDOCT 系统中的实验验证,表明该方法能够将 SDOCT 图像的信噪比(SNR)提高约 10%。

参考文献:

- [1] GÖTZINGER E,PIRCHER M. High speed full range complex spectral domain optical coherence tomography [J]. *Opt. Express*, 2005,13(2):583-594.
- [2] WOJTKOWSKI M,LEITGEB R. In vivo human retinal imaging by Fourier domain optical coherence tomography [J]. *J. Biomed. Opt.*, 2002, 7:457-463.
- [3] TARGOWSKI P,WOJTKOWSKI M. Complex spectral OCT in human eye imaging in vivo [J]. *SPIE*, 2003, 5140:28-32.
- [4] CHENG Y Y,WYANT J C. Phase shifter calibration in phase-shifting interferometry [J]. *Appl. Opt.*, 1985, 24(18):3049-3052.
- [5] SURREL Y. Phase stepping: a new self-calibrating algorithm[J]. *Appl. Opt.*, 1993,32(19):3598-3599.
- [6] YU Q,ANDRESEN K. Fringe-orientation maps and fringe skeleton extraction by the two-dimensional derivative-sign binary-fringe method [J]. *Appl. Opt.*, 1994, 33(10):6873-6877.
- [7] YU Q,LIU X,ANDRESEN K. New spin filters for interferometric fringe patterns and grating patterns [J]. *Appl. Opt.*, 1994, 33:3705-3709.
- [8] CANABAL H,QUIROGA A,BERNABEU E. Automatic processing in moire deflectometry by local fringe direction calculation [J]. *Appl. Opt.*, 1998,37(10):5894-5901.
- [9] WOJTKOWSKI M,KOWALCZYK A. Autocorrelation free spectral OCT techniques in eye imaging [J]. *SPIE*, 2001, 4431:46-51.
- [10] VAKHTIN A B, PETERSON K A. Differential spatial interferometer: an imaging technique for biomedical applications [J]. *Optics Letters*, 2003, 28(15):1332-1334.
- [11] 张泰石,李刚.用线性补偿算法和 CCD 响应补偿来提高频谱 OCT 图像质量 [J]. *光学精密工程*, 2006, 14(5): 929-933.
ZHANG T SH,LI G. Improvement of spectral domain OCT image quality by linear interpolation and CCD response compensation[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2006,14(5):929-933. (in Chinese)

作者简介:李 刚(1959—),江西人,博士,教授,主要研究方向为精密机械与测量技术,智能仪器仪表,生物医学信号检测与处理。E-mail:ligang59@tju.edu.cn