

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2017.08.008

基于干涉条纹的光谱仪光谱标定方法研究*

童俊海¹, 钟舜聪^{1,2,*}, 张秋坤¹, 林杰文¹, 伏喜斌³

(1. 福州大学 机械工程及自动化学院光学/太赫兹及无损检测实验室, 福建 福州 350108;

2. 福建省医疗器械和生物技术重点实验室, 福建 福州 350000; 3. 厦门市特种设备检验检测院, 福建 厦门 361000)

摘要:为了在光学相干层析(optical coherence tomography, OCT)系统中实现快速精准标定光谱仪的光谱带宽和确定光谱横坐标的变化规律,提出了用干涉条纹标定光谱带宽和确定波长非线性分布规律,从而实现了光谱仪光谱标定。先用单频激光确定了某一特定波长在 CCD 中像素点位置,然后根据光程差与干涉光谱周期数之间的关系确定了光谱仪的光谱带宽范围;再运用多项式函数拟合干涉光谱,将光谱强度平滑处理并对干涉条纹的峰值间距做了插值处理。根据峰值间距与波数的比例关系,确定了波长在横坐标的分布规律。两个对照实验结果表明,运用该方法标定的光谱带宽误差在 ± 0.15 nm 以内,标定误差优于传统汞灯等标定方法。研究表明:光谱横坐标校正后明显提高了系统分辨率和信噪比,因此验证该标定方法是可行的。

关键词:光谱仪;干涉条纹;非线性;光谱标定;单频激光

中图分类号:TH74

文献标志码:A

文章编号:1001-4551(2017)08-0856-05

Spectral calibration of spectrometer based on interference fringes

TONG Jun-hai¹, ZHONG Shun-chong^{1,2}, ZHANG Qiu-kun¹, LIN Jie-wen¹, FU Xi-bin³

(1. Laboratory of Optics, Terahertz and Non-destructive Testing & Evaluation, School of Mechanical Engineering and Automation, Fuzhou University, Fuzhou 350108, China;

2. Fujian Key Laboratory of Medical Instrument and Pharmaceutical Technology, Fuzhou 350000, China;

3. Xiamen Special Equipment Inspection Institute, Xiamen 361000, China)

Abstract: In order to get fast and accurate calibration of spectrometer spectral bandwidth and to determine its spectral abscissa, in optical coherence tomography (OCT) system, a method for calibrating spectral bandwidth and determining the nonlinear distribution law of the wavelength by interference fringes, was proposed. A single-frequency laser was employed to determine the CCD pixel position of the specific wavelength. Subsequently, according to the relationship between optical path differences and the number of interference fringe cycles, the bandwidth of a spectrometer was determined. Polynomial function was used to fit the interference fringes. After that, spectral intensity was smoothed and peak pitches were interpolated. Distribution disciplines of the wavelength in the abscissa was determined according to the relationship between the peak pitches and the wavenumber. Two comparative tests show that the spectral bandwidth calibration error is about ± 0.15 nm. The calibration error is better than the traditional calibration method using mercury lamp. The results indicate that the resolution and the signal-to-noise ratio of the OCT system could be greatly improved after the wavelength calibration. Hence, the feasibility of this proposed method for spectral calibration is verified.

Key words: spectrometer; nonlinear; interference fringes; spectral calibration; single-frequency laser

收稿日期:2016-12-08

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51675103);国家卫生和计划生育委员会科研基金资助项目(WKJ-FJ-27);福建省省杰出青年基金资助项目(2014J07007);教育部高等学校博士学科点基金(博导类,20133514110008);福建省质量技术监督局科技计划资助项目(FJQI2014008, FJQI2013024);福建省自然科学基金资助项目(2015J01234)

作者简介:童俊海(1990-),男,福建泉州人,硕士研究生,主要从事无损检测及仪器方面的研究。E-mail:511069090@qq.com

通信联系人:钟舜聪,男,研究员,博士生导师。E-mail:zhongshuncong@hotmail.com

0 引言

光谱仪是对光进行高分辨分析和选择的一种光学器件,是在光学和光电子研究领域的基础仪器^[1]。光谱仪在光学相干层析(OCT)系统^[2-3]中有着重要地位。

光谱仪标定精确度会直接影响光学系统检测结果的准确性和可靠性。光谱标定是要得到成像光谱仪波段对应的光谱响应曲线^[4]。传统的光谱标定方法主要有两种:

(1)利用汞灯等具有特征谱线的光源及多项式曲线拟合对光谱仪进行标定^[5-7]。这种方法只能测量少数几个特征光谱,而且对光谱横坐标的非线性问题拟合不精确,因此无法给出更准确的标定光谱;

(2)利用连续光谱与刻度盘相结合得到多组刻度盘度数与峰值波长对应数据进行多项式函数拟合^[8-10]。这种方法峰值波长难准确读取,得到的拟合点数也相对较少,同样存在对光谱横坐标的非线性问题拟合不精确的问题。

本研究采用基于干涉条纹的光谱标定方法,搭建了二维 OCT 标定系统^[11],光谱仪多次采集干涉信号用于标定,光谱带宽确定后对光谱横坐标进行校正。

1 波长带宽标定原理

1.1 OCT 系统光路

本研究搭建了二维频域 OCT 系统和光栅光谱仪,作为光谱标定系统,其结构如图 1 所示。

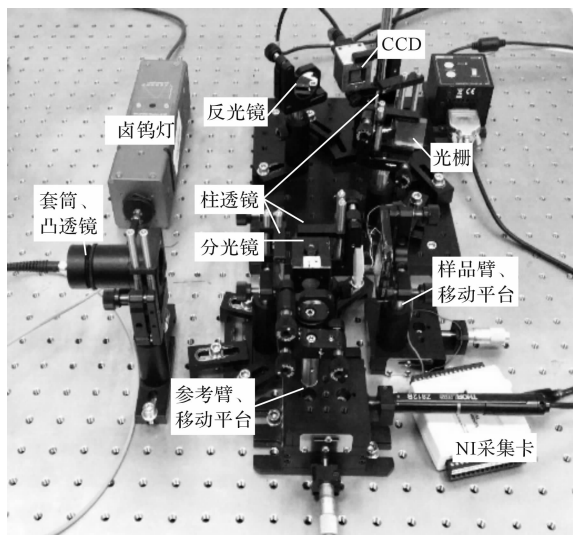


图 1 光谱标定系统图

柱透镜后经 50:50 的分光镜分别到达参考臂和样品臂。当参考臂和样品臂光程差在相干长度范围内时他们反射回来的光将在分光镜处形成干涉光。该干涉光经柱透镜被再次准直为平行光。经光栅将干涉的光谱信号按波长分开,再用柱透镜聚焦到 CCD 相机进行光谱采集并传输到计算机中对光谱信号进行处理。

光谱标定系统元件相关参数如表 1 所示。

表 1 光谱标定系统元件相关参数

参数	参数值
光源型号	SLS201/M-光纤耦合卤钨灯
单频激光型号	C160602-335/C160506-208
透镜焦距/mm	25
柱透镜焦距/mm	50
光栅型号	1 800 线/mm
CCD 型号	MV-EM510/C(2456 × 2058)

1.2 光谱波长的确定

本研究用已知波长的单频激光做光源,确定 CCD 上对应该单频激光的波长 λ_0 (781.3 μm) 所在像素点位置。以单频激光为 OCT 系统光源,得到波长为 781.3 μm 的光谱峰值在 CCD 第 1 333 个像素点。

确定光谱仪光谱带宽范围的原理如下所述:

假设第一像素点位置波长为 λ_1 , 最后一个像素点波长为 λ_2 ($\lambda_1 \leq \lambda_0 \leq \lambda_2$)。通过微调参考臂上的移动平台改变光程差从而改变干涉条纹的周期数。设微调前第一像素点和最后像素点到 λ_0 所在像素点干涉条纹周期数分别是 T_1 和 T_2 。微调后第一像素点和最后像素点到 λ_0 所在像素点干涉条纹周期数分别是 T'_1 和 T'_2 。微调前后参考臂上刻度分别为 d_1 和 d_2 。

则有如下公式:

$$\frac{d_1}{\lambda_1} - \frac{d_1}{\lambda_0} = T_1 \quad (1)$$

$$\frac{d_2}{\lambda_1} - \frac{d_2}{\lambda_0} = T'_1 \quad (2)$$

由式(1,2)可得:

$$\lambda_1 = \frac{\lambda_0 |d_1 - d_2|}{|d_1 - d_2| + \lambda_0 |T_1 - T'_1|} \quad (3)$$

由式(3)可得光谱仪中带宽波长的最小值,同理可得:

$$\lambda_2 = \frac{\lambda_0 |d_1 - d_2|}{|d_1 - d_2| - \lambda_0 |T_2 - T'_2|} \quad (4)$$

由公式(4)可得光谱仪中带宽波长的最小值。至此,确定了光谱仪光谱带宽值 λ_1 到 λ_2 。表 2 为光谱标定实验中测得的 6 组 λ_1 和 λ_2 计算所需相关参

光源经过透镜后准直成平行光。该平行光通过

数及得到的 λ_1 和 λ_2 大小。从表中可知, 每组数据得到的波长值基本一致, 本研究取 6 组数据的平均值 660.5 nm 和 871.8 nm 作为光谱仪光谱带宽标定的波长值。

表 2 光谱标定实验及计算结果相关数据

No	$ d_1 - d_2 / \mu\text{m}$	$ T_1 - T_1' $	$ T_2 - T_2' $	λ_1/nm	λ_2/nm
1	413.5	71.693 7	40.520 3	660.29	871.58
2	561.1	96.779 2	54.927 6	660.45	871.84
3	620.6	106.975 7	60.746 3	660.49	871.85
4	706.4	121.994 4	69.296 0	660.52	871.85
5	768.6	132.469 2	75.213 2	660.59	871.75
6	911.1	157.226 6	89.268 6	660.60	871.73

2 横坐标的确定

本研究用多项式对干涉的光谱信号进行拟合, 将所得拟合曲线与原始信号相比得到光谱强度曲线相对均匀的光谱信号, 以提高对干涉光谱中波峰和波谷像素点位置的准确性。用 Matlab 编程得到光谱强度均匀处理后信号波峰和波谷分别对应的像素点位置坐标, 即矩阵 A_1, A_2 , 并求得 A_1 和 A_2 相邻元素间的差值, 并进行二次函数拟合, 得到各自差值矩阵 B_1, B_2 。取矩阵 B_1, B_2 平均值 B 为干涉条纹周期间像素点差值矩阵, 对矩阵 B 进行 CCD 像素点数差值。用各波长的波数与其干涉光谱周期对应的像素点数等比例关系确定干涉光谱横坐标的非线性问题。其中:

$$B_i = A_i(2:(T_1 + T_2)) - A_i(1:(T_1 + T_2 - 1)) \quad i = 1, 2.$$

对 B 进行像素点数插值得到 B' 相邻波长间像素点的占据比值。其倒数 $1/B'$ 为相邻像素点间的波长间距比值。光谱带宽 λ_1 和 λ_2 已确定。按照得到的 $1/B'$ 像素点间波长间距比得到下式:

$$\frac{1}{B(i)'} = \frac{1}{\Delta\lambda_i} \quad (5)$$

$$\sum \frac{1}{B(i)'} = \frac{1}{\lambda_1} - \frac{1}{\lambda_2}$$

$$i = 1, 2, \dots, n-1$$

式中: $\Delta\lambda_i$ —第 $i+1$ 个像素点与第 i 个像素点对应波长差; n —CCD 相机有效像素点数, 取 2 377。

因此每个像素点上对应的波长 λ_i 公式如下:

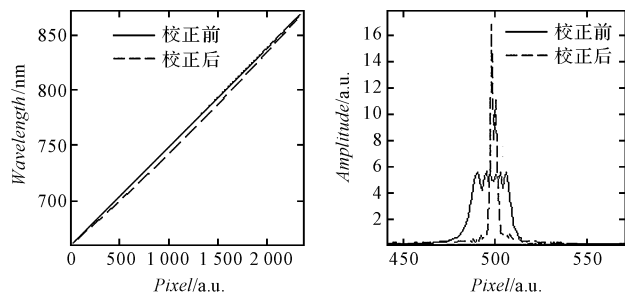
$$\lambda_{i+1} = \frac{1}{\frac{1}{\lambda_i} - \frac{1/B(i)'}{\sum 1/B(i)'}} \times \left(\frac{1}{\lambda_1} - \frac{1}{\lambda_2} \right) \quad (6)$$

$$i = 1, 2, \dots, n-1$$

本研究利用以上方法对光谱仪带宽校正得到对应光谱横坐标。然后分别用经以上方法校正前和校正后

的波长分布规律为系统光谱横坐标对系统采集到的干涉信号进行傅里叶变换比较其分辨率和信噪比的高低。

光谱横坐标校正前后关于 CCD 相机像素点分布比较图和光谱横坐标校正前后干涉光谱傅里叶变换结果比较图如图 2 所示。



(a) 关于 CCD 相机像素点分布比较图 (b) 干涉光谱傅里叶变换结果比较图

图 2 光谱横坐标校正前后比较图

从图 2(a) 中可以明显看出: 校正后的波长横坐标与像素点数之间不是线性分布关系, 而是随着像素点数增大波长变化越快, 这和光程差与波数比例规律一致, 因此预计校正后波长分布规律作为二维 OCT 系统横坐标可以提高系统分辨率和信噪比。从图 2(b) 中可明显比较得到经以上方法校正后波长分布规律为 OCT 系统横坐标大大提高了 OCT 系统的分辨率和信噪比。综合图 2(a) 和图 2(b) 结果可得, 波长分布的变化规律和应用效果与理论推理一致, 证明此横坐标校正方法可行。

3 标定结果精度验证

为能验证该标定结果的准确性, 本研究分别用海洋光学公司的 HR2000 + 商业光谱仪采集到的干涉光谱和 THORLABS 公司的 C160506-208 型单频激光与图 1 中的光谱标定系统采集到光谱进行比较, 继而验证该标定方法的准确度。

3.1 商业光谱仪验证流程

本研究用图 1 所示的光谱仪系统采集干涉光谱数据 C , 在不移动参考臂和样品臂的同时利用 HR2000 + 再次采集系统的干涉光谱数据 D 。笔者选取 D 中波长为 660.5 nm ~ 871.8 nm 对应的光谱数据进行 CCD 的像素点数差值得到 D' 。本研究对 C 和 D' 进行频谱校正, 得到其干涉周期数分别为 118.02 和 118.01。再用 Matlab 确定两组干涉光谱信号中各个峰值分别对应的波长值。将两组峰值对应的波长相减, 得到两组光谱信号中各个峰值对应的波长差, 其光谱波长差值曲线如图 3 所示。从图 3 中可以看出每组峰值波

长差都在 ± 0.15 nm内,因此可看出此标定结果误差小于 ± 0.15 nm。

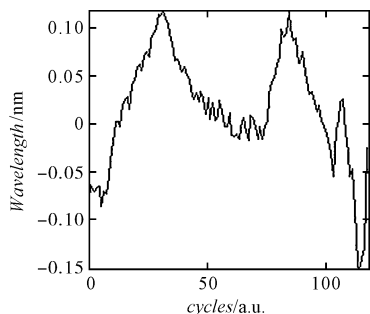


图3 波长差值曲线图

3.2 单频激光验证流程

已知单频激光 C160506-208 的光谱波长为 844.3 nm。本研究以 C160506-208 型单频激光作为光源,用图 1 所示的 OCT 系统进行光谱采集。得到的光谱图如图 4 所示。

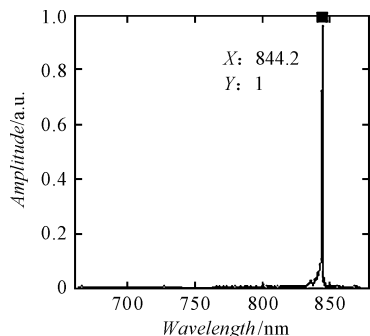


图4 单频激光光谱图

得到单频激光波长为 844.2nm。与单频激光的实际波长相比误差为 0.1nm。

4 实验与结果分析

本研究用图 1 中所示的二维 OCT 系统,对 11 层透明胶带进行测量。每层胶带分为薄膜层和胶水层。预测对该样品单次测量,并用 PZT 移相法去除直流信号,其傅里叶变换结果图单边应有 23 条明暗相间的直线。对系统测得的同一光谱数据用光谱校正前后的横坐标分别进行图像 FFT 变换处理。数据处理后得到的 11 层胶带结构信息图如图 5 所示。

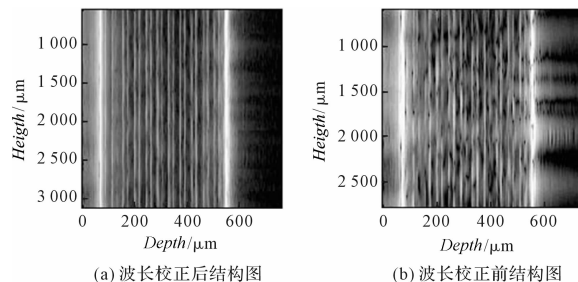


图5 11层胶带结构信息图

从图 5(a) 中可清晰看到:23 条明暗相间的胶带结构分界线,而图 5(b) 中的条纹则比较模糊且不均匀。图 5 纵坐标为系统单次扫描的样品宽度,CCD 相机的像素点大小为 $3.45 \mu\text{m} \times 3.45 \mu\text{m}$,宽度上有效像素点数为 900,所以得到单次样品扫描宽度为 $3.45 \mu\text{m} \times 900$,即 $3105 \mu\text{m}$,横坐标为探测的样品深度坐标,从图 5 得 11 层胶带的起止横坐标分别为 63 和 557,每层胶带平均厚度为横坐标差值与胶带层数的比值,计算得胶带平均厚度为 $44.91 \mu\text{m}$ 。

比较图 5(a) 和图 5(b) 可明显看出,波长校正后系统分辨率和信噪比都得到明显提高,验证了该标定方法是有效的。

为增加结果的可靠性,本研究将实验所测样品用 Phenom G2 Pro 型台式扫描电镜测量与图 5 中结构信息比较,台式扫描电镜测量结果信息如图 6 所示。

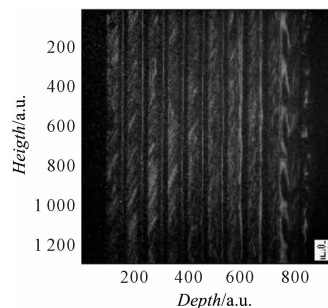


图6 台式扫描电镜下胶带结果信息图

该样品在 Phenom G2 Pro 型台式扫描电镜得到的结构信息中单层胶带亦可看出有薄膜层和胶水层,与笔者二维 OCT 系统测得结构一致。扫描电镜测量的单层胶带平均厚度约为 $45.1 \mu\text{m}$ 与之前系统测得的 $44.91 \mu\text{m}$ 基本一致,两者误差为 0.42%,亦可说明测量结果精确,可信。

(下转第 905 页)

本文引用格式:

童俊海,钟舜聪,张秋坤,等. 基于干涉条纹的光谱仪光谱标定方法研究[J]. 机电工程,2017,34(8):856-859,905.

TONG Jun-hai, ZHONG Shun-chong, ZHANG Qiu-kun, et al. Spectral calibration of spectrometer based on interference fringes[J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2017,34(8):856-859,905.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>