

文章编号:1002-2082(2015)04-0543-07

基于平稳小波变换的时域光学相干层析系统

罗曼婷¹, 游腾飞¹, 张秋坤¹, 钟剑锋¹, 钟舜聪^{1,2}

(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)

摘要:以平衡检测原理为基础, 利用中心波长为 700 nm 的宽带低相干白光光源, 在自由空间中搭建了分辨率为 0.93 μm 的基于平稳小波变换(SWT)的时域光学相干层析(TDOCT)系统, 并将其应用于塑料薄片与透明胶纸多层薄膜结构的无损评价。针对现有算法重构效果不够理想的问题, 通过对 OCT 成像过程中的图像增强手段的对比, 提出利用 SWT 分解算法处理多层薄膜结构的光学相干层析二维图像。由薄膜检测的实验结果可知, 从 SWT 细节系数中可以提取更显著的多层薄膜界面干涉信号, 从而提高多层薄膜界面的增强效果。

关键词:时域光学相干层析; 平稳小波变换; 平衡检测; 薄膜检测; 图像增强

中图分类号: TN209; TP23

文献标志码: A

doi: 10.5768/JAO201536.0402002

Time-domain optical coherence tomography system based on stationary wavelet transform

Luo Manting¹, You Tengfei, Zhang Qiukun, Zhong Jianfeng, Zhong Shuncong^{1,2}

(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 350108, China)

Abstract: Based on the balanced detection and stationary wavelet transform (SWT) algorithm, a broadband low coherent white light source with center wavelength of 700 nm was employed to set up a time-domain optical coherence tomography (TDOCT) system in free space. The resolution of the developed OCT system was down to 0.93 μm and it was applied to nondestructive evaluation of plastic sheets and transparent-tape multi-layered thin-film structures. The imaging enhancement methods in the process of OCT images were compared. To resolve the problem of unsatisfactory reconstruction results using current algorithms, the SWT decomposition algorithm was introduced to deal with the OCT images of the multi-layered structures. The experimental results show that this SWT-based method could extract more distinct interface interference signal from the SWT detail coefficients and therefore the interface imaging quality of multi-layered structures could be enhanced.

Key words: TDOCT; SWT; balanced detection; thin film detection; image enhancement

收稿日期: 2014-11-24; **修回日期:** 2015-06-02

基金项目: 福建省杰出青年基金滚动项目(2014J07007); 国家自然科学基金资助项目(51005077); 教育部高校博士学科点科研基金(博导类, 20133514110008); 国家卫生和计划生育委员会科研基金(WKJ-FJ-27); 福建省质量技术监督局科技项目(FJQI2013095, FJQI2012024); 福建省高等学校学科带头人培养计划(闽教人[2013]71号)和国家质检总局科技计划项目(2011QK216)。

作者简介: 罗曼婷(1991—), 女, 福建莆田人, 硕士研究生, 主要从事无损检测及仪器方面的研究。

E-mail: 289251753@qq.com

通信作者: 钟舜聪(1976—), 男, 研究员, 博士生导师。E-mail: zhongshuncong@hotmail.com

引言

光学相干层析术(optical coherence tomography, OCT)是上世纪 90 年代逐步发展而成的一种新型成像技术,可检测样品不同深度位置的背向散射光强,由此获得组织浅表层成像。由于其具有出色的光学无损切片能力及高分辨率^[1],已被广泛应用于人眼结构成像、牙科检测等生物医学领域。近年来,其出色的探测能力更将其功能拓展到了玉石结构分析,薄膜分层,材料缺陷分析等工业用途^[2-3]。

基于平衡检测的时域光学相干层析系统,克服频域自相干噪声和复共轭镜像的影响,有较高的信噪比和探测深度。但是,在成像过程中,由于光源噪声、光电探测器噪声、扫描模块噪声及样品反射的非相干光的拍频噪声等成分的存在^[4],OCT 输出图像中会存在散斑,所以,各种基于 OCT 系统的图像处理方法也应运而生。时域光学相干层析系统通常采用短时傅里叶变换(STFT)来完成图像重构。短时傅里叶变换算法简单,但是其时间-频率分辨率对于任何频率都是固定不变的,在干涉信号解调时难以获得好的去噪效果^[5]。小波分析继承和发展了短时傅里叶变换局部化的思想,已逐渐成长为机械结构健康检测领域一个非常有用的工具,被人们形象地称为“数学显微镜”。小波变换在时频域都具有多分辨率的特性,可同时对时频域进行局部分析和灵活地对信号局部奇异性特征进行提取^[6]。利用小波变换,可以方便地进行数据压缩、数据融合、图像增强以及去噪^[7]。

平稳小波变换(stationary wavelet transform, SWT)是在正交小波变换基础上发展起来的一种新的小波变换,它不存在正交小波变换下抽样过程中重构信号产生 Gibbs 震荡的问题^[8]。本文将平稳小波变换应用于时域光学相干层析成像系统,对微米量级的多层薄膜介质样品进行检测,检测多层样品的各个界面信息。系统采集到的信号包含了样品介质信息及界面处的干涉信息,采集数据经过平稳小波变换后被分解为近似系数和细节系数,相对于样品介质来说,界面处的干涉信号是类似于奇异值的存在,所以我们可在分解后的

细节系数中更为清楚地寻获得样品界面^[9]。搭建的基于平稳小波变换的时域光学相干层析系统成像效果优良,后续可以扩展到更多无损检测的领域中去,具有重要的意义。

1 实验原理与系统

1.1 平衡检测时域光学相干层析原理

系统的核心是一个迈克尔逊干涉仪^[10-11]。光源发出的光经过 50×50 的分光镜分为两束光,分别进入带有反射镜的参考臂和放有被测样品的样品臂。检测过程中,参考臂需要进行纵向扫描,即 A-Scan;为了获得二维图像,样品臂同时需要横向扫描,即 B-Scan。光电探测器探测到以上两束光干涉的光强信号并转化为电信号,信号处理系统将二维扫描信息转化为二维图像信息。

如图 1 所示,当参考臂和样品臂等光程时,探测器探测到样品某一深度的最大干涉信号。通过参考臂的扫描,参考镜的反射光与待测物体不同匹配深度的后向散射光发生干涉,得到物体一个纵线上的不同深度信息。由于在结构界面处物体折射率发生变化,所以光强在薄膜界面处改变显著。

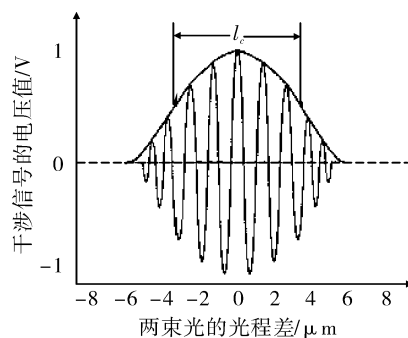


图 1 低相干光源干涉图样

Fig. 1 Low coherence interference pattern

本文采用平衡检测原理来搭建光学相干层析系统,OCT 系统通过相干获取纵向分辨信息。光电探测器的光信号遵循典型的双光束干涉规律^[12]:

$$I_P(\Delta l) = I_S + I_R + 2 \sqrt{I_S I_R} |\tau_{SR}(\Delta l)| \cdot \cos(k_0 \Delta l + \alpha_{SR}) \quad (1)$$

式中 Δl 是信号光与参考光之间的光程差, I_S, I_R 分别为两束光的光强, $\tau_{SR}(\Delta l)$ 是参考光和信号光的

归一化复相关函数, k_0 是光源的传播常量, α_{SR} 是样品光波相对于参考光波的初相位。最简单的非平衡检测迈克尔逊干涉仪中, 系统探测获得的不仅是干涉信号, 而且还包含了直流信号及噪声。这些直流信号和噪声会影响整个系统的性能。在平衡外差探测中, 到达探测器的两路光的平均功率相等且干涉信号项有 π 的相位差, 因此在差分放大器中, 背景直流信号相消, (1) 式中前两项被消除, 干涉信号被增强。

1.2 平稳小波变换原理

小波变换类似于傅里叶变换, 将一般的信号表示为小波基的线性叠加, 从而将对原来函数的分析转换为对叠加权系数, 即小波变换的分析。连续小波变换定义为

$$WT_f(ab) = (f, \psi_{a,b}) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(\lambda) \frac{1}{\sqrt{a}} \psi^* \left(\frac{\lambda-b}{a} \right) d\lambda \quad (2)$$

其中 $\psi_{a,b} = \frac{1}{\sqrt{a}} \psi \left(\frac{\lambda-b}{a} \right)$ 是小波基, 它由某一小波函数 $\psi(\lambda)$ 通过平移 ($\lambda \rightarrow \lambda-b$) 和伸缩 ($\lambda \rightarrow \lambda/a$) 获得。

通常取 $a=2, b=1$, 即常见的正交小波变换。正交小波变换具有分解无冗余优点, 被广泛地应用到数据压缩以及传输等领域。但是由于正交小波变换分解的每一个尺度都要进行采样操作, 不满足平移不变性, 使其在信号消噪领域受到限制。

平稳小波变换是一种非正交小波变换。SWT 在每次分解后不进行下抽样, 而是分别在低通、高通滤波器的每 2 个系数之间插入 2^{j-1} 个零来实现滤波器的扩展, 如下^[13]:

$$h_k^{[j]} = \begin{cases} h_{k/2^j} & k = 2^j m \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (3)$$

$$g_k^{[j]} = \begin{cases} g_{k/2^j} & k = 2^j m \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (4)$$

其中 $m \in \mathbb{Z}$ 。

在平稳小波变换域中, 信号被分解为近似分量和细节分量。图像低频信息集中在绝对值较大的近似系数中, 高频信息集中在绝对值较小的细节系数中。变换后的近似系数和细节系数与原信号长度相等, 具有时移不变性, 避免了时移信息的丢失。此外, 由于没有下采样处理, 所以系数中的信息是冗余的, 部分小波系数的扰动不会带来信

号的严重失真, 从而减小了信号对单个小波系数的依赖。

2 时域光学相干层析实验系统

图 2 是光学相干层析系统原理图, 光源采用 12 V 功率为 50 W 的钨丝卤素灯(光源的中心波长 λ_0 为 700 nm, 光源谱宽 $\Delta\lambda$ 为 236 nm)^[14]。由于热光源光谱强度和时间相干性主要由普朗克定律决定, 也就是在很大度上由其热温度决定, 所以在较高温度下, 它可以同时满足相干长度短、输出功率强的要求, 特别适合做快速成像系统的光源。系统中, 光束先经过一个斜放置的塑料薄片, 塑料薄片的特性是具有强透射性, 95% 的光继续沿直线传播用于参考臂和样品臂的干涉, 干涉光强由光电探测器 D2 探测得到; 5% 的光经塑料薄片反射后被引出到光电探测器 D1, 用于平衡背景直流噪声(设置一个可调光孔来调整 D1 光强, 使之与 D2 的光强平衡)。2 个探测器组成平衡模块, 其差分信号经过放大后输入采集卡, 最终送入计算机中处理成像。扫描平台采用 Thorlabs MTS25-Z8 25mm 电动移动平台。平台最小增量可达到 0.05 μm , 这样就可保持扫描过程中的高稳定性。平衡探测是利用 Thorlabs 的 PDB 210A/M 模块, 该模块具有 2 个大面积硅传感器, 探测光范围为 320 nm ~ 1 060 nm。采集卡使用 NI USB-6009, 具有 14 位差分 AI 分辨率, 最大采样率为 48 kS/s。

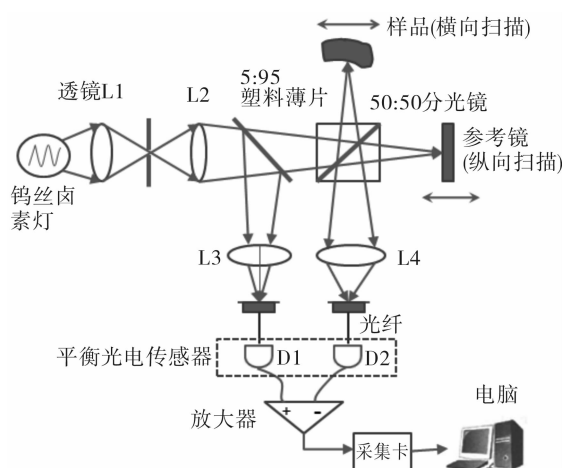


图 2 时域光学相干层析系统原理图

Fig. 2 Diagram of TDOCT system

系统采用自由空间式, 由于光纤型 OCT 的快速延迟线一般是非光纤型的, 导致参考臂与样品

臂的色散产生差别,造成相应系统的干涉信号不对称,需要加入相位调制器。本系统中的自由空间 OCT 只要两臂中的光学元件相同,基本不影响干涉质量。但是自由空间中光束传播随意性强,在搭建过程中必须仔细调整光束传播角度,通过观察光斑大小及检测光强的均匀性等,保证光路的垂直性。

该光学相干层析系统特点如下:(1) 参考镜的匀速运动使干涉信号的中心频率被调制为多普勒频移频率,大小为: $f_0 = 2V_R/\lambda_0 = 3 \text{ kHz}$; (2) 采用短波长高强度的钨丝卤素灯光源,具有更高的成像分辨率,理论分辨率为 $(2\ln 2)/\pi\lambda_0^2/\Delta\lambda = 0.9 \mu\text{m}$ ^[15], 计算实际系统干涉信号的半峰全宽(FWHM),可得系统实际分辨率为 $0.93 \mu\text{m}$; (3) 系统探测深度 $1 \text{ mm} \sim 3 \text{ mm}$,可对多层透明薄膜介质进行检测; (4) 开发易于操作的软件控制测量界面,使得成像系统方便友好。

3 实验结果与讨论

3.1 样品一维成像

以下将 TDOCT 系统用于塑料薄片与透明胶纸的多层样品结构检测。实验中,样品臂保持静止,对参考臂进行纵向扫描(A-scan)。图 3(a)是单层塑料薄片的一维时域干涉图。光从样品的最里层向外层匀速扫描,在塑料薄片最里层折射率首先发生突变,光强出现一个干涉峰;当扫描到塑料薄片外层时,空气与塑料薄片的折射率差异再次使干涉信号显著增强,表现为图上的第 2 个峰。由于第 2 个峰是薄片最外层与空气的界面,光强没有经过薄片内部的衰减,故干涉值比第 1 个峰大。计算两界面之间的厚度时,取光在塑料薄片中的折射率近似为 1.5 ^[16],故两界面间厚度值为 $\Delta d = (d_2 - d_1)/1.5 = 321 \mu\text{m}$ 。图 3(b)是一层塑料薄片上粘贴一层透明胶带的时域干涉图。第 1 个干涉峰和第 2 个峰之间是塑料片的上下界面,第 2 个峰和第 3 个峰之间的厚度是透明胶带的胶水,换算得 $\Delta d = 23.7 \mu\text{m}$,第 3 峰和第 4 峰之间是透明胶带的胶纸, $\Delta d = 28.3 \mu\text{m}$ 。图 3(c)是一层塑料薄片上粘贴两层透明胶带的时域干涉图。同理,第 1 个峰和第 2 个峰之间是塑料片的上下界面。第 2

和第 3 峰之间及第 4 和第 5 峰之间分别为两层透明胶带的胶水,第 3 和第 4 峰层之间及第 5 和第 6 峰之间分别为两层透明胶带的胶纸。图 3(d)为图 3(c)图的细节放大图,可以较清晰的看见每层胶纸和胶水的干涉峰。综上所述,系统对于薄膜结构分层及厚度测量是可行并准确的。

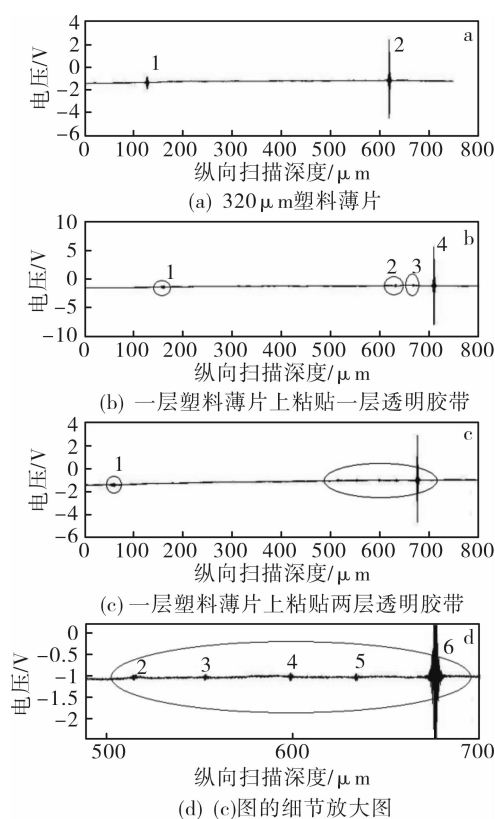


图 3 多种样品的一维时域干涉图;

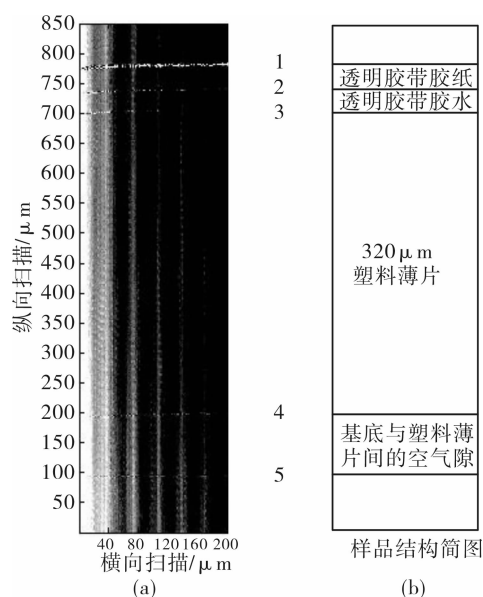
Fig. 3 1D time-domain interferogram of multiple samples

3.2 基于平稳小波变换的样品二维成像

在参考臂纵向扫描的基础上增加样品臂的横向扫描,将系统二维扫描后采集得到多列数据组成一个二维矩阵,对此矩阵进行处理成像,即可得到样品的二维内部信息。

系统在获取图像的过程中往往会发生图像失真,使图像和原始图像有某种程度的差异。OCT 图像中,像素灰度与光电流成比例,散斑的出现会使图像的一些像素随机变量变暗,会产生许多噪声^[17],使得无法看清图像的细节,降低图像的清晰度。一般地,可以采用增强对比度的方法来提高图像清晰度,对数变换是其中的一种方法,它可以扩展低值灰度,压缩高值灰度,使得低值灰度的图

像细节更容易被看清。其具体步骤是对信息矩阵元素取对数,令矩阵元素 $A_{ij} = 20 \times \log_{10} (abs(A_{ij}))$,再将变换后的矩阵进行成像,图像可分辨率变高了一些。图4为原始矩阵进行对数变换后的成像结果,图中横轴方向上的白色亮线是界面分层,折射率发生变化,光强也在此处发生变化。图4中样品的一二两个界面之间是透明胶的胶纸,二三两个界面之间是透明胶的胶水,三四两个界面之间是 $320 \mu\text{m}$ 的透明塑料薄片,经过厚度变换 $\Delta d = (d_2 - d_1) / 1.5$,计算结果与一维扫描结果一致,与待测样品结构吻合。图5~图7样品均为一层塑料薄片粘贴两层透明胶样品,不再复述。但是,由于在扫描过程中线性平台横向移动不够稳定,所以图中存在竖直方向上白线(图像噪声)。



(a)对采集到的数据矩阵取对数后的重构图像;(b)样品模型

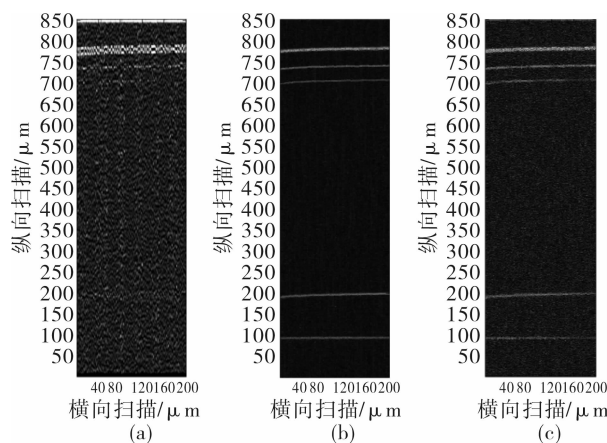
图4 原始矩阵进行对数变换后的成像结果

Fig. 4 Image of collected data matrix with logarithmic scale

利用对数变换重构的图像中存在较多噪声,这样就掩盖了有用的多层结构的界面信息,所以本文提出对采集到的数据进行 SWT 分解来提取更显著的界面分层。对信号的小波分解可以等效为信号通过了一个滤波器组,其中一个为低通滤波器,一个为高通滤波器。纵向扫描时,光大部分时间在样品介质中传播,这个过程被分解在了小波的近似系数中(可以理解为信号的基础部分,为一条光滑的曲线),是低频分量;而干涉信号只发生在样品的界面处,分解为小波分析的细节系数

(可以理解为奇异值部分,为干涉峰),是高频分量。在对信号进行平稳小波变换后的细节信号中,可以得到更敏感的干涉信号。这里需要指出的是,这样的处理方法与传统小波图像降噪处理不同,图像降噪处理是抛弃细节系数,而这里是利用细节系数来增强图像效果。

本文同时研究了 SWT 分解的层数对 OCT 图像增强效果的影响。首先对 OCT 图像执行 5 层 SWT 平稳小波变换,图 5(a)取 5 层平稳小波变换的第 5 层细节系数进行成像。由图 5(a)可知,小波变换后边缘效应较严重,且图中分层的界面并不是很清晰,因此 5 层 SWT 分解不适合多层结构 OCT 图像增强。图 5(b)是利用 3 层 SWT 分解的第 2 层细节系数进行成像。由图 5(b)可见 5 个清晰的界面。图 5(c)是进行 3 层小波变换后取第 3 层的细节系数进行成像。对比图 5(b)和 5(c),可以看出取第 3 层的细节系数的图像增强效果并没有比第 2 层好。图 5(c)中每个界面处的不连续点变多,界面信息变得模糊。



(a)5 层 SWT 第 5 层系数重构图;

(b)3 层 SWT 第 2 层系数重构图;

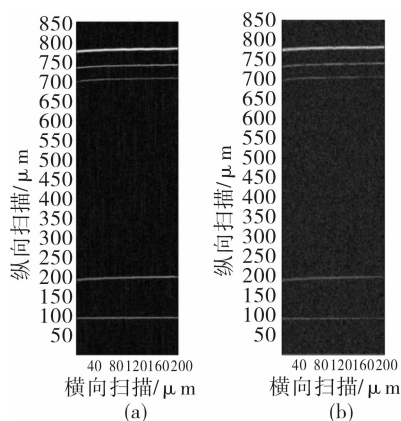
(c)3 层 SWT 第 3 层系数重构图

图5 系数重构图

Fig. 5 Coefficients reconstruction image

为了进一步得到更优的成像效果,本文结合 SWT 分解和对数变换结合,对采集到的信息矩阵执行小波变换取细节系数,然后再进行对数显示。几种成像效果对比如下,图 6(a)是执行 3 层小波变换后取第 2 层细节系数,然后进行对数显示的图像。相比图 5(b),图 6(a)中的各层界面明显变得更加完整,成像效果优良。图 6(b)是执行 3 层小

波变换后取第3层系数再进行对数变换的成像结果,界面开始变得有些模糊,噪点增多,成像效果不如图6(a),但其效果依旧比图5(c)要好很多。



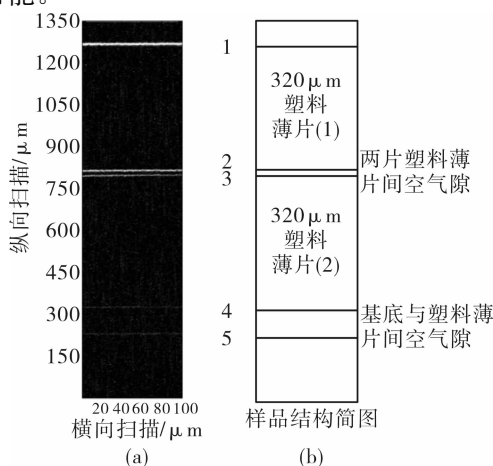
(a) 3层 SWT 取第2层系数进行对数显示;

(b) 3层 SWT 取第3层系数进行对数显示

图6 对数变换成像效果

Fig. 6 Coefficients reconstruction image of three-layer SWT

另外,为了验证 TDOCT 系统的探测深度,选取2个320 μm 的塑料薄片叠加在一起作为样品,利用该 TDOCT 系统对其进行二维图成像。图7是得到的 OCT 图像。由图7可知,此样品的扫描深度已经达到1350 μm ,在这样的探测深度下 TDOCT 系统依旧可以分辨样品的界面。理论上,若 TDOCT 系统使用更大功率的光源,就可以达到更深的探测深度,这为测量其他复杂结构提供了可能。



(a) 2个320塑料薄片叠加样品 OCT 图像;

(b) 样品结构图

图7 OCT 图像

Fig. 7 OCT images

通过以上成像质量对比,发现将 TDOCT 图像进行平稳小波变换可以明显提高图像界面的可分辨程度,结合对数显示可以达到更好的实验效果。对于多层薄膜结构,3层 SWT 分解后提取第2层细节系数再进行对数显示时,成像效果最好。在小波变换的过程中,需注意其存在的边缘效应,边缘效应的严重性随分解阶次的增大而增大。成像过程中,要选取合适的小波分层参数,综合考虑边缘效应与小波分解效果,才能得到最佳质量的图像。

4 结论

搭建了时域光学相干层析系统,实现薄膜和多层结构厚度的非接触式无损测量。OCT 系统的纵向分辨率为0.93 μm ,与理论分辨率0.9 μm 吻合度很高,是分辨率较高的系统之一,性能优良,深度分辨率受到样品散射的影响较小^[18]。此外,提出了利用平稳小波变换后的细节系数来提取界面分层特征,结合图像的对数显示,达到了很好的成像效果。搭建好的系统后续还可以运用到复合材料及其他纤维材质的无损检测等工业领域,具有良好的发展前景。目前存在的难点包括:1)系统扫描时间较长,需要进行进一步的改进以提高成像速度;2)对光吸收比较严重的样品的成像仍然存在问题,需要利用其他分辨手段来提取更精确的结构细节信号。总之,OCT 在工业上的应用仍然还需投入大量的精力来进行,这将作为我们后续研究的重点。

参考文献:

- [1] Shi Guohua, Ding Zhihua, Dai Yun, et al. Ophthalmic imaging by optical coherence tomography[J]. Chinese Journal Of Lasers, 2008, 35(9): 1429-1431. 史国华, 丁志华, 戴云, 等. 光纤型光学相干层析技术的眼科成像[J]. 中国激光, 2008, 35(9): 1429-1431.
- [2] Zeng Nan, He Yonghong, Ma Hui. Imaging and analyzing subsurface morphologies of jade objects with optical coherence tomography[J]. Optics and Precision Engineering, 2008, 16(7): 1335-1342. 曾楠, 何永红, 马辉. 用于玉石结构分析的光学相干层析术[J]. 光学·精密工程, 2008, 16(7):

- 1335-1342.
- [3] Wang Zhibin, Shi Guohua, He Yi, et al. Application of optical coherence tomography to distance measurement of optical surface[J]. Optics and Precision Engineering, 2012, 20(7): 1469-1474.
王志斌, 史国华, 何益, 等. 光学相干层析技术在光学表面间距测量中的应用[J]. 光学·精密工程, 2012, 20(7): 1469-1474.
- [4] Zhu Xiaonong, Mao YouXin, Liang Yanmei, et al. Noise analyses of optical coherence tomography systems (I)——Theories and calculations [J]. Acta Photonica Sinica, 2007, 36(3): 452-456.
朱晓农, 毛幼馨, 梁艳梅, 等. 光学相干层析系统噪声分析(I)——理论与计算[J]. 光子学报, 2007, 36(3): 452-456.
- [5] Zhang Yudong, Dai Yun, Shi Guo hua, et al. Application of one-dimensional wavelet transformation in time domain optical coherence tomography imaging [J]. Chinese Journal of Lasers, 2008, 35 (7): 1013-1016.
张雨东, 戴云, 史国华, 等. 一维小波变换在时域光学相干层析成像中的应用[J]. 中国激光, 2008, 35(7): 1013-1016.
- [6] Wu Qiang, Wang Xinsai, He Ming, et al. Infrared image enhancement based on wavelet analysis and histogram[J]. Journal of Applied Optics, 2011, 32(3): 464-467.
吴强, 王新赛, 贺明, 等. 一种结合小波分析与直方图的红外图像增强方法[J]. 应用光学, 2011, 32(3): 464-467.
- [7] Cai De, Yan Yingbai, Jin Guofan. Research on optical wavelet packet transform and its filter for iris recognition [J]. Acta Photonica Sinica, 2006, 35 (7): 1076-1079.
才德, 严瑛白, 金国藩. 光学小波包变换及其滤波器的研究[J]. 光子学报, 2006, 35(7): 1076-1079.
- [8] Zhan Bichao, Wu Yiquan, Ji shouxin. Infrared image enhancement method based on stationary wavelet transformation and retinex[J]. Acta Optica Sinica, 2010, 30(10): 2788-2793.
占必超, 吴一全, 纪守新. 基于平稳小波变换和 Retinex 的红外图像增强方法[J]. 光学学报, 2010, 30(10): 2788-2793.
- [9] Kuang Haipeng, Wang Dejiang, Zhang Jingguo, et al. Aerial image wavelet transformation denoising based on medium pre-filtering[J]. Journal of Applied Optics, 2010, 31(2): 221-224.
匡海鹏, 王德江, 张景国, 等. 基于中值预滤波的航空图像小波去噪算法研究[J]. 应用光学, 2010, 31(2): 221-224.
- [10] Chen Yuping. Research of spectral-domain optical coherence tomography under white light irradiation [J]. Laser Technology, 2014, 38(3): 372-374.
陈玉平. 白光照明谱域光学相干层析成像研究[J]. 激光技术, 2014, 38(3): 372-374.
- [11] Fercher A F. Optical coherence tomography-development, principles, applications [J]. Science Direct, 2009. 11(02)1-27.
- [12] Qin Yuwei. Film thickness measurement based on optical coherence tomography[J]. Laser Technology, 2012, 36(5): 662-664.
秦玉伟. 基于光学相干层析成像技术的薄膜厚度测量[J]. 激光技术, 2012, 36(5): 662-664.
- [13] Li Zheng-xin, Zhang Feng-ming, Zhang Xiao-feng, et al. Flight data denoising method based on stationary wavelet transform[J]. Journal of Computer Applications, 2011, 31(10): 2790-2810.
李正欣, 张凤鸣, 张晓丰, 等. 基于平稳小波变换的飞行数据去噪方法[J]. 计算机应用, 2011, 31(10): 2790-2810.
- [14] Zhong Shuncong, Shen Yaochun. Real-time monitoring of structural vibration using spectral-domain optical coherence tomography[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2011, 49: 127-131.
- [15] Zhong Shuncong, Shen Yaochun, Ho L, et al. Non-destructive quantification of pharmaceutical tablet coatings using terahertz pulsed imaging and optical coherence tomography[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2011, 49: 361-365.
- [16] Li Chen, Zeitler J A, Dong Yue, et al. Non-destructive evaluation of polymer coating structures on pharmaceutical pellets using full-field optical coherence tomography[J]. Journal of Pharmaceutical Sciences, 2014, 103(1): 161-166.
- [17] Liu Xinwen, Wang Huinan, Qian Zhiyu. Denoising process of OCT image based on wavelet transform [J]. Acta Optica Sinica, 2006, 35(6): 935-939.
刘新文, 王惠南, 钱志余. 小波变换对 OCT 图像的降噪处理[J]. 光子学报, 2006, 35(6): 935-939.
- [18] Guo Xin, Wang Xiangzhao, Bu Peng, et al. Effects of scattering on spectral shape and depth resolution in Fourier domain optical coherence tomography[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(1): 0117001.
郭昕, 王向朝, 步鹏, 等. 样品散射对频域光学相干层析成像光谱形状和深度分辨率的影响[J]. 光学学报, 2014, 34(1): 0117001.