

# 一种提高扫频光学相干层析成像分辨率的延时自动校正算法

陈效杰<sup>1</sup> 白宝平<sup>2</sup> 陈晓冬<sup>1\*</sup> 汪毅<sup>1</sup> 郁道银<sup>1</sup>

<sup>1</sup>天津大学教育部光电信息与技术重点实验室, 天津 300072

<sup>2</sup>北京华科创智健康科技股份有限公司, 北京 100195

**摘要** 在扫频光学相干层析(SS-OCT)仪器中,由于光谱标定信号k-clock与OCT信号之间存在不确定的延时,导致光谱标定结果不准确,成像分辨率降低。延时自动校正算法能够准确地自动校正k-clock信号与OCT信号之间的延时。该算法基于提出的平均峰值法和平均半峰全宽(FWHM)法,对OCT信号进行处理分析,分粗调、微调 and 精确三步对延时点进行自动查找,根据查找结果完成对延时的校正。延时校正后,通过光谱标定得到波数( $k$ )空间均匀分布的OCT信号,可以实现高分辨率图像的重建。实验结果显示,经过自动延时校正,成像分辨率可提高60%,证实了该算法的有效性。

**关键词** 相干光学; 扫频光学相干层析; 延时自动校正; 平均峰值法; 平均半峰全宽法

中图分类号 TH744

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201542.1204001

## An Automatic Delay Correction Algorithm for Improving Imaging Resolution of Swept Source Optical Coherence Tomography System

Chen Xiaojie<sup>1</sup> Bai Baoping<sup>2</sup> Chen Xiaodong<sup>1</sup> Wang Yi<sup>1</sup> Yu Daoyin<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Key Laboratory of Opto-Electronics Information and Technical Science, Ministry of Education, Tianjin University, Tianjin 300072, China

<sup>2</sup>Beijing Huaco Healthcare Technologies Incorporated Company, Beijing 100195, China

**Abstract** In the swept source optical coherence tomography (SS-OCT) instruments, an unfixed delay between the spectral calibration signal k-clock and the OCT signal makes the result of spectral calibration incorrectly, which reduces the imaging resolution. An automatic delay correction algorithm is proposed to automatically correct the delay between k-clock signal and OCT signal accurately. The algorithm based on the proposed average peak method and average full width at half maximum (FWHM) method, through processing and analyzing the OCT signal, divides into coarse adjustment, fine adjustment and accurate adjustment to search for delay point automatically. According to the search result, the delay time is corrected. After delay correction, high resolution reconstructed image is realized through spectral calibration of OCT signal evenly distributes in the wave-number ( $k$ ) space. Experimental results show that, the imaging resolution improves 60% by correcting the delay automatically, which proves the effectiveness of the proposed algorithm.

**Key words** coherence optics; swept source optical coherence tomography; automatic delay correction; average peak method; average full width at half maximum method

**OCIS codes** 030.1640; 100.3010; 070.2025; 110.4500

## 1 引言

扫频光学相干层析<sup>[1]</sup>(SS-OCT)是一种非侵入式光学成像技术,它利用扫频光干涉技术以及迈克耳孙干

收稿日期: 2015-05-22; 收到修改稿日期: 2015-06-27

基金项目: 国家“十二五”科技支撑计划项目(2012BAI19B02)

作者简介: 陈效杰(1989—),男,硕士研究生,主要从事光学相干层析方面的研究。E-mail: zerochenxiao@126.com

导师简介: 郁道银(1945—),男,教授,博士生导师,主要从事医学成像技术方面的研究。E-mail: dyyu@tju.edu.cn

\*通信联系人。E-mail: xdchen@tju.edu.cn

涉原理,能够实现被探测物体的高分辨率成像。SS-OCT较传统时域OCT在成像分辨率以及图像重建速度上有了很大提高,为实时OCT系统的实现提供了可能。在SS-OCT图像重建中,光谱标定是至关重要的一环,其目的是得到 $k$ 域均匀的OCT干涉信号,从而得到高分辨率重建图像。

目前,已有较成熟的光谱标定算法,如峰值点零点标定和相位解调标定等。这些算法实现的前提都是 $k$ -clock信号和OCT干涉信号在输出时间上匹配。如果 $k$ -clock信号和OCT干涉信号不匹配,采用这些光谱标定算法,无法得到最佳分辨率的图像。虽然某些商用光源(如Santec扫频光源)自带延时校正功能,但往往只考虑了光纤长度以及电缆长度对延时的影响,而对于高精度的SS-OCT仪器设备,外部器件以及外界工作环境温度、环境震动等干扰,所产生的延时也不容忽视。本文提出的延时自动校正算法,可以将各种因素引入的延时统一校正,快速地实现 $k$ -clock信号与OCT干涉信号的匹配,从而提高SS-OCT系统的成像分辨率。

## 2 SS-OCT系统及原理介绍

SS-OCT系统装置<sup>[1-2]</sup>如图1所示。迈克耳孙干涉仪两反射端分别是:1)由可调空间光路和反射镜组成的参考臂;2)放置待测样品的样品臂。扫频光经分束器分光后,95%进入样品臂,5%进入参考臂;样品臂及参考臂返回光经环形器进入2×2光纤耦合器,干涉光平均分为两束;干涉光分别进入平衡探测器的正负端;数据采集卡分别对OCT信号和 $k$ -clock信号进行高速采样;随后将数据上传到计算机(PC),在PC端完成图像重建。实线表示光信号,虚线表示电信号。

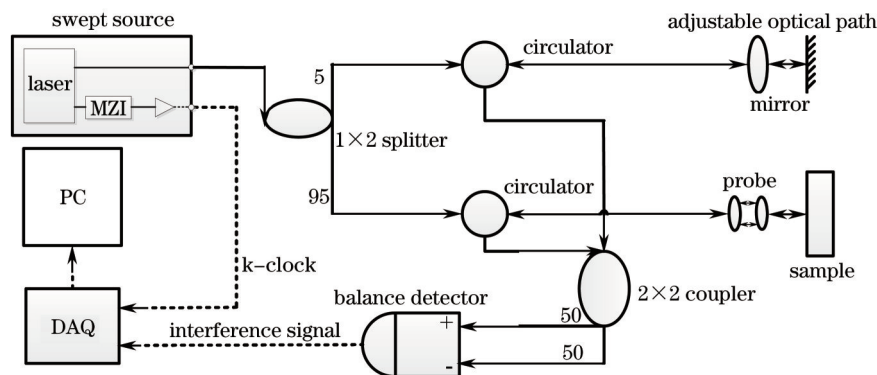


图1 SS-OCT系统示意图

Fig.1 Schematic diagram of SS-OCT system

SS-OCT成像的纵向分辨率主要由光源决定<sup>[3-4]</sup>,

$$\sigma_{\text{Gauss}} = \frac{2 \ln 2}{\pi} \cdot \frac{\lambda_0^2}{\lambda_{\text{fwhm}}}, \quad \sigma_{\text{Rect}} = \frac{\lambda_0^2}{\Delta\lambda}, \quad (1)$$

式中 $\sigma_{\text{Gauss}}$ 为高斯光谱光源的纵向分辨率, $\sigma_{\text{Rect}}$ 为矩形光谱光源的纵向分辨率, $\lambda_0$ 为扫频光源中心波长, $\lambda_{\text{fwhm}}$ 为扫频光谱的半峰全宽(FWHM), $\Delta\lambda$ 为扫频带宽。

根据OCT的基本原理,光谱域波数 $k(k=2\pi/\lambda)$ 与空间域 $\Delta z$ (样品的深度)互为傅里叶变换对。扫频光源在扫描时,其波长 $\lambda$ 随扫频时间线性变化,所以采样的数据为等 $\Delta\lambda$ 分布,而非等 $\Delta k$ 分布。对 $k$ 域非均匀的OCT信号直接进行反傅里叶变换(IFFT),将引入展宽因子 $\exp[-i\Phi_z(t)]$ <sup>[5]</sup>,降低成像分辨率。为提高成像分辨率,需要对OCT信号进行 $k$ 域均匀重采样,即光谱标定或者对OCT信号直接进行非均匀傅里叶变换<sup>[6]</sup>。但由于非均匀傅里叶变换运算量巨大,难以在实时系统中实现;当前大部分商业扫频光源设备都自带用于光谱标定的 $k$ -clock信号。然而, $k$ -clock信号与OCT信号之间存在不定量延时,会导致光谱标定结果不准确,降低成像分辨率。现有的SS-OCT图像重建算法流程如图2所示。

根据图2的算法流程,对采样数据进行图像重建,得到如图3所示的IFFT后的空间域图。图中空间域信号由三部分组成:噪声信号、样品与参考臂干涉信号(称为干涉信号)以及样品各层间干涉信号(称为自相干信号)。其中,被测样品的内部信息包含在干涉信号中。

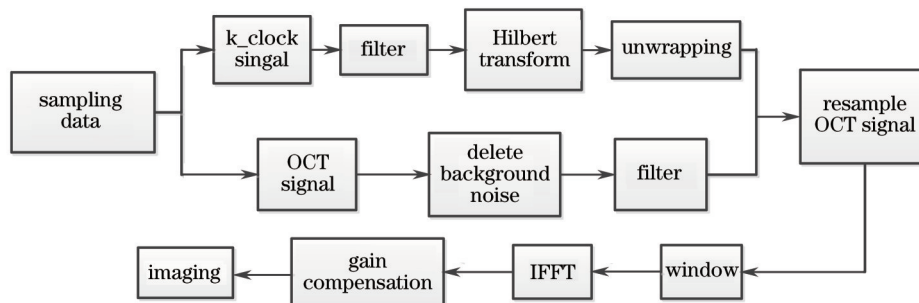


图2 SS-OCT图像重建算法流程图

Fig.2 Flow chart of SS-OCT image reconstruction algorithm

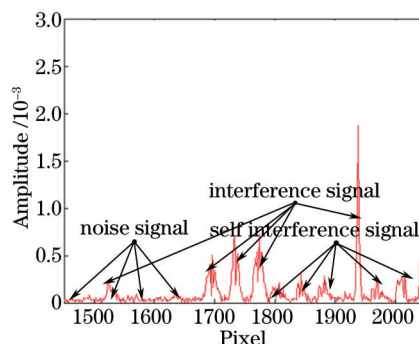


图3 OCT空间域信号

Fig.3 OCT signal in space domain

### 3 k-clock 信号与 OCT 干涉信号时序关系

图4为扫频光源的扫频触发信号 Trigger、k-clock 信号以及 OCT 信号三者之间的时序关系图，k-clock 信号滞后 Trigger 信号的时间为  $t_k$ ，OCT 信号滞后 Trigger 信号的时间为  $t_s$ ，k-clock 信号与 OCT 信号之间的延时为  $t_d$ 。 $t_k$  主要由光源内部光在马赫曾德尔干涉仪(MZI)中的传输时间、光电转换时间和光源与数据采集卡之间电信号的传输时间组成； $t_s$  主要由光在光源内部传输的时间、光在迈克耳孙干涉仪中传输的时间、平衡探测器光电转换的时间以及平衡探测器到数据采集卡之间电信号传输的时间组成。由于所经路径的不同和元器件转换延时的不同，导致  $t_k$  与  $t_s$  难以确定，图4(a)是 k-clock 信号超前的时序图，图4(b)是 OCT 信号超前的时序图。系统中光纤的曲直、连接部件的松紧、所处环境温度等都会对延时  $t_k$  和  $t_s$  产生影响。

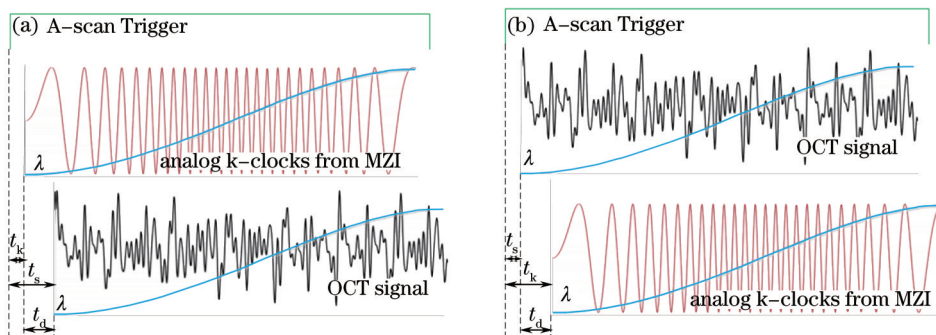


图4 Trigger 信号、k-clock 信号和 OCT 信号的时序图。(a) k-clock 信号超前图；(b) OCT 信号超前图  
Fig.4 Sequence diagram of Trigger signal, k-clock signal and OCT signal. (a) Figure of k-clock in advance; (b) figure of OCT signal in advance

### 4 延时自动校正算法

为了得到高分辨率的重建图像，需要校正  $t_d$ 。采用平均峰值法和平均半峰全宽法，分三步完成延时自动校正，图5为校正流程图。

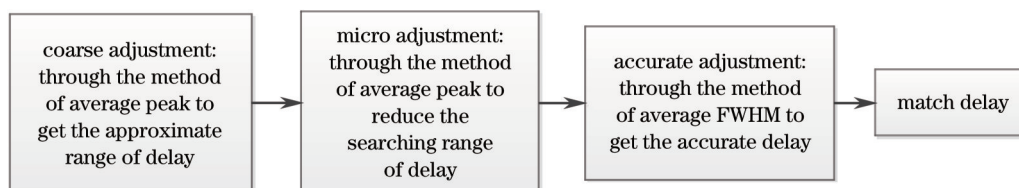


图5 延时自动校正算法流程图

Fig.5 Flow chart of delay automatic correction algorithm

#### 4.1 延时自动校正的核心算法

##### 4.1.1 平均峰值法

在 OCT 空间域信号中,干涉信号的波峰可以反映样品的内部信息,平均峰值不仅可以体现主瓣能量的集中情况,还可以反映旁瓣的抑制程度。由图 3 可知,干涉信号对应波峰和自相干信号都会产生波峰。平均峰值法将自相干信号和噪声信号对应的波峰滤除,计算干涉信号波峰的平均值。数据采集卡在一个扫频周期内采集 4500 个数据、重采样后每条 A-scan 包含 4096 个数据。采集到的 OCT 信号表示为  $O_i$ , k-clock 信号表示为  $K_i$ , OCT 空间域信号表示为  $S_i$ 。平均峰值法具体步骤如图 6 所示。

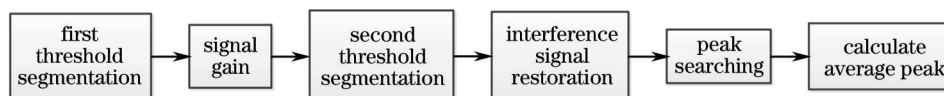


图6 平均峰值法流程图

Fig.6 Flow chart of average peak method

1) 阈值分割:滤掉空间域中的噪声信号。阈值  $\beta_0$  取值为 1.5 倍的噪声幅值,阈值分割后得到信号  $S_{th_0}$ 。

2) 信号增益:增强远零光程端信号幅值。如图 3 所示,为滤除自相干信号,需要对远零光程端干涉信号进行增益补偿。假设样品内部衰减系数恒定不变,根据(3)式对  $S_{th_0}$  增益,得到  $S_{gain_i}$ , 衰减系数  $\alpha$  的取值可由空间域干涉信号的近零光程端与远零光程端波峰幅值的关系决定,

$$S_{gain_i} = S_{th_0_i} \times \exp(\alpha|i - 2048|), \quad i = 1, 2, 3, \dots, 2046, 2047, 2048. \quad (2)$$

3) 二次阈值分割:滤掉空间域中的自相干信号。阈值  $\beta_1$  取值为信号增益前最大自相干信号幅值的 1.5 倍,阈值分割后得到信号  $S_{th_1}$ 。

4) 干涉信号复原:得到原始干涉信号的波峰幅值。平均峰值和平均半峰全宽只与原始干涉信号的波峰信息有关,所以需要复原干涉信号幅值。可得到原始的干涉信号波峰幅值  $S_{rec_i}$ ,

$$S_{rec_i} = S_{th_1_i} \times \exp(\alpha|i - 2048|), \quad (i = 1, 2, 3, \dots, 2046, 2047, 2048). \quad (3)$$

5) 波峰查找:查找干涉信号的峰值。记录峰值坐标点  $(i_{peak}, S_{rec_{i_{peak}}})$ 。

计算平均峰值:获取干涉信号的平均峰值。波峰数量用  $m$  表示,得到平均峰值  $P_{Peak-ave}$ ,

$$P_{Peak-ave} = \frac{\sum S_{rec_{i_{peak}}}}{m}. \quad (4)$$

空间域干涉信号的波峰幅值之和越大,表示波峰能量越高;波峰数量越少反映出旁瓣抑制效果越好;平均峰值越大反映出重建图像中能量越集中,旁瓣抑制效果越好。

##### 4.1.2 平均半峰全宽法

波峰的半峰全宽是衡量成像分辨率的基本标准,空间域干涉信号的平均半峰全宽可以反映整体的成像分辨率。平均半峰全宽法与平均峰值法基本类似,前 5 步相同,此处不再赘述。后续步骤如下:

6) 计算半峰全宽:插值计算原始干涉信号波峰的半峰全宽。根据 5) 峰值查找中记录的  $i_{peak}$  值,在空间域信号  $S_i$  中查找到相应的峰值点坐标  $(i_{peak}, S_{i_{peak}})$  及其左侧两点  $(i_{peak} - 1, S_{i_{peak} - 1})$  和  $(i_{peak} - 2, S_{i_{peak} - 2})$ , 进行线性插值,

得到  $\frac{S_{i_{peak}}}{2}$  对应的  $i_{peak/2}$ ; 查找  $(i_{peak}, S_{i_{peak}})$  及其右侧两点  $(i_{peak} + 1, S_{i_{peak} + 1})$ 、 $(i_{peak} + 2, S_{i_{peak} + 2})$ , 进行线性插值,得到  $\frac{S_{i_{peak}}}{2}$

对应的  $i_{\text{peak},r/2}$ 。计算波峰的半峰全宽,并记录相应数据  $(i_{\text{peak}}, F_{\text{fwhm}_{i_{\text{peak}}}})$ ,

$$F_{\text{fwhm}_{i_{\text{peak}}}} = i_{\text{peak},r/2} - i_{\frac{\text{peak}_l}{2}}. \quad (5)$$

7) 计算平均半峰全宽,计算原始干涉信号的平均半峰全宽。记峰值个数为  $m$ ,根据 (6) 式得到平均半峰全宽  $F_{\text{fwhm}_{\text{ave}}}$ ,

$$F_{\text{fwhm}_{\text{ave}}} = \frac{\sum F_{\text{fwhm}_{i_{\text{peak}}}}}{m}. \quad (6)$$

干涉信号的平均半峰全宽越小表示重建图像的分辨率越高。

#### 4.2 延时的自动校正

对于上述两种算法,平均半峰全宽虽然能够更加准确地反映重建图像的分辨率,但是相对于平均峰值法,其耗时更久。因此,延时自动校正算法的思路是:用耗时较短的平均峰值法缩小查找范围,再用平均半峰全宽法进行精确定位,最后进行校正。具体分为粗调、微调、精调和校正四步进行。

1) 粗调:确定延时的大概位置。依照图 2 的图像重建流程,  $K_i$  经滤波、Hilbert 变换及 CORDIC 变换等处理后得到 k-clock 的相位信号  $P_i (i = 1, 2, 3, \dots, 4500)$ 。用卷积实现滤波及 Hilbert 时,计算结果由暂态成分和稳态成分组成,为不影响成像效果,截取中间的稳态成分。从  $P_i$  中间截取 4096 点,截取后数据为  $P_{\text{cut}_i}$ 。

$$P_{\text{cut}_i} = P_{i_c}, \quad [i = 1, 2, 3, \dots, 4094, 4095, 4096;$$

$$i_c = n_0, (n_0 + 1), (n_0 + 2), \dots, (n_0 + 4094), (n_0 + 4095)], \quad (7)$$

为了能够在大范围内查找延时,同时兼顾  $i_c$  小于 4500,设置  $150 < n_0 < 202$ 。对  $P_{\text{cut}_i}$  解卷绕<sup>[7]</sup>得到最大相位

$p_{\text{max}}$ , 以 0 为起点,  $p_{\text{max}}$  为终点, 得到等相位信息  $A_i \left[ A_1 = 0, A_2 = \frac{p_{\text{max}}}{4095}, \dots, \right.$

$A_i = \frac{(i-1) \times p_{\text{max}}}{4095}, \dots, A_{4094} = \frac{4093 \times p_{\text{max}}}{4095}, A_{4095} = \frac{4094 \times p_{\text{max}}}{4095}, A_{4096} = p_{\text{max}}; i = 1, 2, 3, \dots, 4095, 4096 \left. \right]$ 。OCT 信号经

过滤波处理后,从 OCT 信号的  $j_0$  点开始截取 4096 点,记为  $O_{\text{cut}_i}$ ,

$$O_{\text{cut}_i} = O_{i_c}, \quad [i = 1, 2, 3, \dots, 4094, 4095, 4096; i_c = j_0, (j_0 + 1),$$

$$(j_0 + 2), \dots, (j_0 + 4094), (j_0 + 4095); j_0 = n_0 + D_0], \quad (8)$$

式中  $D_0$  依次取  $-150, -145, -140, \dots, -1, 0, 5, \dots, 140, 145, 150$ , 即延时范围设置为左右各 150 点,分别按照图 2 中算法进行图像重建,得到空间域数据  $S_i (i = 1, 2, 3, \dots, 2046, 2047, 2048)$ 。运用平均峰值法,计算并记录不同  $D_0$  下干涉信号的平均峰值  $P_{\text{Peak}_{\text{ave}_{D_0}}}$ ,查找  $P_{\text{Peak}_{\text{ave}_{D_0}}}$  最大时对应的延时点  $d_0$ ,  $d_0$  为延时校正的大概位置。

2) 微调:缩小延时的查找范围。以大概延时  $d_0$  为基准点,从 OCT 信号的  $j_1$  点开始截取 4096 点,记为  $O_{\text{cut}_i}$ ,

$$O_{\text{cut}_i} = O_{i_c}, \quad [i = 1, 2, 3, \dots, 4094, 4095, 4096; i_c = j_1, (j_1 + 1),$$

$$(j_1 + 2), \dots, (j_1 + 4094), (j_1 + 4095); j_1 = n_0 + D_1], \quad (9)$$

式中  $D_1$  依次取  $(d_0 - 20), (d_0 - 19), (d_0 - 18), \dots, (d_0 - 1), d_0, (d_0 + 1), \dots, (d_0 + 18), (d_0 + 19), (d_0 + 20)$ , 用粗调中的方法查找平均峰值最大时对应的延时点  $d_1$ ,  $d_1$  为延时点的较精确位置的中心点,同时记录各延时点对应空间域信号  $S_i$  和各延时点下干涉信号的波峰点信息。

3) 精调:确定延时的精确位置。以  $d_1$  为基准点,运用半峰全宽法,对延时点进行精确查找。为减少计算量,空间域信号  $S_i$  和干涉信号的波峰点信息可直接运用微调中记录的数据。从 OCT 信号  $O_{i_c}$  的  $j_2$  点开始截取 4096 点,记为  $O_{\text{cut}_i}$ ,

$$O_{\text{cut}_i} = O_{i_c}, \quad [i = 1, 2, 3, \dots, 4094, 4095, 4096; i_c = j_2, (j_2 + 1),$$

$$(j_2 + 2), \dots, (j_2 + 4094), (j_2 + 4095); j_2 = n_0 + D_2], \quad (10)$$

式中  $D_2$  依次取  $(d_1 - 10), (d_1 - 9), (d_1 - 8), \dots, (d_1 - 1), d_1, (d_1 + 1), \dots, (d_1 + 8), (d_1 + 9), (d_1 + 10)$ 。运用平均半峰全宽

法,依次得到各延时点  $D_2$  对应的平均半峰全宽  $F_{fwhm\_ave, n_2}$ , 查找平均半峰全宽最小时对应的延时点  $d_2$ ,  $d_2$  对应的延时就是需要校正的时间差。

4) 延时校正:匹配 k-clock 信号和 OCT 信号。在数据采集时, OCT 信号起始采样点滞后 k-clock 信号起始采样点  $d_2$  点, 将采样后的数据进行成像操作, 即可得到最佳分辨率重建图像。

## 5 实验结果和讨论

SS-OCT 设备中, 光源的扫频频率为 20 kHz, 其中心波长为 1310 nm、扫频带宽为 110 nm、光谱为矩形; 数据采集卡的采样速率为 200 MS/s, 采样精度为 14 bit, 带宽为 300 MHz。校正样品由厚度依次为 1.04、0.22、0.22、1.03 mm 的玻璃片叠加而成。算法利用 Matlabr 软件实现。实验所用计算机配置如下: Intel Celeron G550@2.60 GHz 处理器, 3.39GB 内存, Intel HD Graphics 1000(GT1) (1.00 GB) 显卡。

根据图 3 中的噪声信号幅值强度和自相干信号幅值强度, 可确定  $\beta_0$  和  $\beta_1$ ; 根据干涉信号近零光程端和远零光程端的波峰幅值, 可以确定  $\alpha$ 。

粗调时, 对 k-clock 信号进行滤波、Hilbert 变换以及 CORDIC 变换等算法处理。根据  $n_0$  的取值范围以及示波器观察到的延时情况,  $n_0 = 201$ 。对不同  $D_0$  ( $D_0 = -150, -145, -140, \dots, -1, 0, 1, \dots, 140, 145, 150$ ) 下载取的 OCT 数据  $O_{cut}$  进行处理, 得到空间域干涉信号波峰的平均峰值随延时点  $D_0$  变化的曲线如图 7(a) 所示。当延迟点  $D_0$  值为 70, 即  $d_0 = 70$  时, 空间域干涉信号波峰的平均峰值最高, 对应的空间域图如图 7(b) 所示。

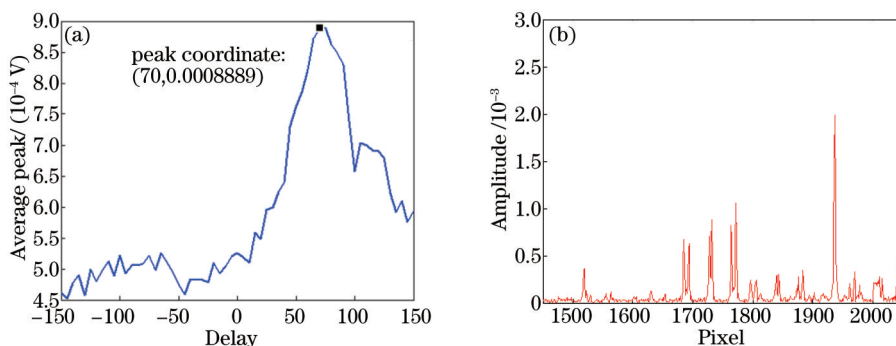


图 7 粗调。(a) 平均峰值曲线; (b) 粗调最佳图

Fig.7 Coarse adjustment.(a) Curve of average peak; (b) best graph after coarse adjustment

微调时, 对不同延时  $D_1$  ( $D_1 = 50, 51, 52, \dots, 88, 89, 90$ ) 下载取的 OCT 数据  $O_{cut}$  进行处理, 得到空间域干涉信号波峰的平均峰值随延时点  $D_1$  变化的曲线如图 8(a) 所示。当延迟点  $D_1$  为 72, 即  $d_1 = 72$  时, 空间域干涉信号波峰的平均峰值最高, 对应的空间域图如 8(b) 所示。

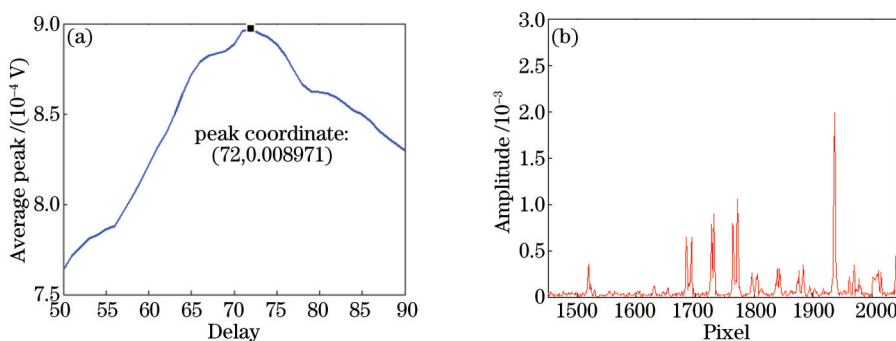


图 8 微调图。(a) 平均峰值曲线; (b) 微调最佳图

Fig.8 Fine adjustment. (a) Curve of average peak; (b) best graph after fine adjustment

精调时, 对不同延时  $D_2$  ( $D_2 = 62, 63, 64, \dots, 80, 81, 82$ ) 下载取的 OCT 数据  $O_{cut}$  进行处理, 得到的空间域干涉信号波峰的平均半峰全宽随延时点  $D_2$  变化的曲线如图 9(a) 所示。当延迟点  $D_2$  为 71, 即  $d_2 = 71$  时, 空间域干涉信号波峰的平均半峰全宽最小, 对应的空间域图如 9(b) 所示。

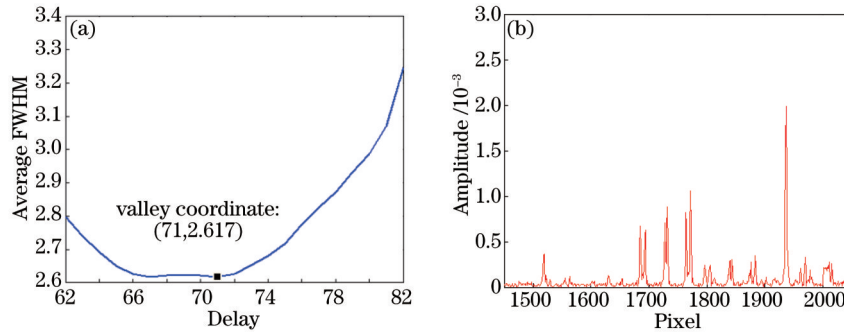


图9 精调图。(a) 平均半峰全宽曲线; (b) 精调最佳图

Fig.9 Accurate adjustment. (a) Curve of average FWHM; (b) best graph after accurate adjustment

表1记录了延时校正后校正样品对应干涉信号波峰坐标。假设玻璃的折射率为1.5,根据表中像素点距离信息,可计算出重建图像中相邻像素代表的空气中距离:  $(6.265 + 6.242) \times 1.5/2 = 9.38 \mu\text{m}$ ,  $(6.286 + 6.471) \times 1.5/2 = 9.57 \mu\text{m}$ 。

图3是未进行延时校正的空间域图,其成像分辨率大概为  $70 \mu\text{m}$ 。由图9(a)可知,延时校正是否准确对分辨率会有很大影响,延时校正后的最佳成像分辨率为  $25 \mu\text{m}$ ,分辨率可提高60%以上。由(1)式可计算SS-OCT系统的纵向分辨率为  $15.6 \mu\text{m}$ ,实际分辨率与理论分辨率大体一致。二者之间的偏差是由矩形光谱的特性<sup>[8-9]</sup>以及光谱整形<sup>[10]</sup>引起,不可避免。通过多次测试,整个算法的运行时间在5s以内,不会给SS-OCT系统带来太多的时间消耗。

表1 延时校正后空间域波峰点信息

Table 1 Peak information in space domain after delay correction

Sample	Peak coordinate	Pixel distance / ( $\mu\text{m}/\text{pixel}$ )
1.04 mm slide glass	$(1519, 3.648 \times 10^{-4})$	1.04/166=6.265
	$(1685, 6.722 \times 10^{-4})$	
0.22 mm cover glass	$(1694, 6.237 \times 10^{-4})$	0.22/34=6.286
	$(1728, 7.103 \times 10^{-4})$	
0.22 mm cover glass	$(1732, 8.850 \times 10^{-4})$	0.22/32=6.471
	$(1764, 8.167 \times 10^{-4})$	
1.03 mm slide glass	$(1772, 1.054 \times 10^{-3})$	1.03/165=6.242
	$(1937, 1.985 \times 10^{-3})$	

## 6 结 论

针对SS-OCT系统中OCT信号与k-clock信号不同步造成SS-OCT重建图像分辨率低的问题,根据高分辨率的标准,即主瓣幅值高、旁瓣抑制效果好、半峰全宽小,提出了一种基于平均峰值法和平均半峰全宽法的自动延时校正算法。经过实验验证,该算法可使成像分辨率提高60%以上。

在医用内窥SS-OCT<sup>[11]</sup>仪器设备中,探头的插拔和医疗环境的其他干扰会导致OCT信号与k-clock信号之间的相对延时发生变化。为保证高质量成像,每次使用前需要对系统进行延迟校正,从而可以确保SS-OCT系统每次都处于高分辨率成像状态。

## 参 考 文 献

- 1 S Yun, G Tearney, Jde Boer, *et al.*. High-speed optical frequency-domain imaging[J]. Opt Express, 2003, 11(22): 2953-2963.
- 2 R Huber, M Wojtkowski, K Taira, *et al.*. Amplified, frequency swept lasers for frequency domain reflectometry and OCT imaging: Design and scaling principles[J]. Opt Express, 2005, 13(9): 3513-3828.
- 3 C A Michael, S V Marinko, Y Changhuei, *et al.*. Sensitivity advantage of swept source and Fourier domain optical coherence tomography [J]. Opt Express, 2003, 11(18): 2183-2189.
- 4 C A Michael, H Kevin, I A Joseph, *et al.*. Swept source optical coherence tomography using an all-fiber 1300 nm ring laser source

- [J]. *J Biomed Opt*, 2005, 10(4): 044009.
- 5 R Huber, M Wojtkowski, J G Fujimoto, *et al.*. Three-dimensional and C-mode OCT imaging with a compact frequency swept laser source at 1300 nm[J]. *Opt Express*, 2005, 13(26): 10523-10538.
- 6 Tong Wu, Youwen Liu. Optimal non-uniform fast Fourier transform for high-speed swept source optical coherence tomography[J]. *Chin Opt Lett*, 2013, 11(2): 021702.
- 7 J M Tribolet. A new phase unwrapping algorithm[J]. *IEEE Transactions on Acoustics Speech and Signal Processing*, 1977, 25(2): 170-177.
- 8 G F James, R H Michael, E B Brett, *et al.*. *Handbook of Optical Coherence Tomography*[M]. New York: New Marcel Dekker, 2002: 66-99.
- 9 L Markus, D Mathieu, K Boris. Video-rate three-dimensional optical coherence tomography[J]. *Opt Express*, 2002, 10(9): 429-435.
- 10 Wu Tong, Ding Zhihua. Development of 20 kHz swept optical coherence tomography system[J]. *Chinese J Lasers*, 2009, 36(2): 503-508.  
吴彤, 丁志华. 20 kHz扫频光学相干层析系统[J]. *中国激光*, 2009, 36(2): 503-508.
- 11 T H Tsai, B Potsaid, Y K Tao, *et al.*. Ultrahigh speed endoscopic optical coherence tomography using micromotor imaging catheter and VCSEL technology[J]. *Biomedical Optics Express*, 2013, 4(7): 1119-1132.

栏目编辑: 苏 岑