

扫频光学相干层析成像系统的波数校正与相位测量研究

上官紫微 沈毅 李鹏 丁志华

Wavenumber calibration and phase measurement in swept source optical coherence tomography

Shangguan Zi-Wei Shen Yi Li Peng Ding Zhi-Hua

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 65, 034201 (2016) DOI: 10.7498/aps.65.034201

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.034201>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2016/V65/I3>

---

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于模型选择的模式波前重构算法研究

Zernike modal wavefront reconstruction algorithm based on model selection

物理学报.2015, 64(14): 144201 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.144201>

相干场成像四光束相位闭合算法研究

Four-phase closure algorithm for coherent field imaging

物理学报.2015, 64(5): 054204 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.054204>

基于经验模态分解的自混合干涉相位提取方法研究

Study on the phase-extracting method of self-mixing signal based on empirical mode decomposition

物理学报.2015, 64(5): 054203 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.054203>

基于旋转相位编码与照明光束匹配的叠层衍射成像算法研究

Ptychographical imaging algorithm based on illuminating beam matched with rotational phase encoding

物理学报.2014, 63(16): 164204 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.164204>

多种图像采集策略下X射线折射信息的提取研究

Simulation of X-ray refraction information extraction using multiple image-collecting strategies

物理学报.2014, 63(10): 104206 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.104206>

# 扫频光学相干层析成像系统的波数校正与相位测量研究\*

上官紫微 沈毅 李鹏 丁志华†

(浙江大学, 现代光学仪器国家重点实验室, 光电科学与工程学院, 激光生物医学研究所, 杭州 310027)

(2015年7月24日收到; 2015年10月23日收到修改稿)

相位敏感光学相干层析成像(OCT)系统可以用于高灵敏度的相位探测,在细胞分析、材料检测等方面具有重要应用,但扫频光源的不稳定性会影响扫频OCT系统的相位测量精度.本文提出了一种基于马赫-曾德尔干涉仪(MZI)时域相位信息的波数校正方法.利用MZI时域包裹相位的互相关运算确定各采集波数序列的相对偏移量,鉴于时域包裹相位的非严格周期特征,可确定偏移量的大小不受限制.依据相对偏移量对各序列信号进行时域同步,并基于同步后的MZI时域解包裹相位实施待测干涉信号在位相域的等间隔重采样.基于所提出的波数校正方法,实施了各扫频序列波数偏移量的校正,开展了基于位相信息的光程重复性测量实验.结果表明,即使在不稳定扫频光源的前提下,也能获得高精度的相位测量结果.

**关键词:** 扫频光源, 波数校正, 互相关, 相位测量

**PACS:** 42.30.Rx, 42.60.Lh, 87.64.M-

**DOI:** 10.7498/aps.65.034201

## 1 引言

光学相干层析成像(OCT)技术是一种非侵入、非接触、高分辨率的生物医学光学成像方法<sup>[1]</sup>.结合相位探测方法,发展了相位敏感的OCT技术,可以实现高灵敏度相位探测,在细胞分析、材料检测、血流成像等方面具有重要应用<sup>[2-5]</sup>.基于扫频光源的扫频OCT是目前典型的傅里叶域OCT技术,但扫频光源的不稳定性严重影响相位探测灵敏度.目前,主要有两种途径来提升扫频OCT系统的相位探测灵敏度.其一是提高扫频光源的稳定性,Adler等<sup>[6]</sup>研制了基于傅里叶锁模技术的高稳定性扫频光源;其二是采样同步技术,运用高精度的触发同步硬件,使得每次扫频触发对应的初始波数一致.Vakoc等<sup>[7]</sup>采用光纤型布拉格光栅产生触发信号来同步信号采集;Kuranov等<sup>[8]</sup>利用HF吸收峰作

为触发信号来同步信号采集.需要指出,上述方法所能提升的相位探测灵敏度很大程度上取决于扫频激光光源的稳定性或者是触发同步硬件的精度.为避免高质量扫频光源或高精度同步器件的运用,快速准确地同步光源输出光谱,提高相位探测的稳定性,提出了一系列数字校正方法. Braaf等<sup>[9]</sup>提出了一种基于波数域干涉信号的数字校正方法,但该方法不仅需要复杂的波数重采样过程,而且波数校正范围有限.2015年, Liu等<sup>[10]</sup>提出了基于寄生干涉信号的数字校正方法,该方法的优点是避免了马赫-曾德尔干涉仪(MZI)的使用,但缺点是寄生干涉信号的信噪比往往不高.

本文提出了一种基于时域相位信息的波数校正方法,利用高信噪比的MZI时域包裹相位的相关运算,直接确定各采集波数序列的相对偏移量.相对于基于波数域干涉信号的数字校正方法,该方法避免了从时域到波数域的重采样过程,不仅节省了

\* 国家自然科学基金(批准号: 61335003, 61275196, 61327007, 11404285, 61475143)、国家高技术研究发展计划(批准号: 2015AA020515)、浙江省自然科学基金(批准号: LY14F050007)、中央高校基本科研业务费专项资金(批准号: 2014QNA5017)和教育部留学回国人员科研启动基金.

† 通信作者. E-mail: zh\_ding@zju.edu.cn

运算量,同时避免了重采样导致的误差.相对于基于寄生干涉信号的数字校正方法,不需要复杂的搜索算法,信噪比较高,校正结果相对准确.而且,鉴于扫频光源输出波数与时间的非线性关系,MZI时域包裹相位具有非严格的周期特征,该方法所能确定的相对偏移量的大小因而不受限制,可以对扫频光源进行大偏移量校正.依据相对偏移量对各序列信号进行时域同步,并基于同步后的MZI时域解包裹相位实施待测干涉信号在位相域的等间隔重采样.基于所提出的波数校正方法,实施了各扫频序列波数偏移量的校正,开展了基于位相信息的光程重复性测量实验.结果表明,即使在不稳定扫频光源的前提下,也能获得高精度的相位测量结果.

## 2 方 法

各扫频序列的波数偏移将在深度域引入不同的位相量,从而导致位相探测的不一致.假设在扫频光源输出的全波段范围内,输出波数与时间之间遵循非线性关系  $k(t) = a + bt + ct^2 + dt^3 + et^4 + ft^5 + gt^6 + \dots$ ,需要对各扫频序列的波数偏移量进行实时校正.这里我们采样MZI对扫频光源进行标定,第  $j$  次扫频序列对应的MZI干涉信号可表示为

$$I_j(k_j(t)) \propto s(k_j(t)) \cos(k_j(t)d), \quad (1)$$

式中,  $s(k(t))$  代表扫频光源在时域的光谱密度分布,  $d$  为MZI的光程差.

对(1)式进行希尔伯特变换,得到包裹相位<sup>[11]</sup>:

$$\bar{\phi}_j = (k_j(t)) = k_j(t)d - 2\pi \text{floor} \left( \frac{k_j(t)d + \pi}{2\pi} \right). \quad (2)$$

鉴于扫频光源输出波数与时间的非线性关系,由(2)式表达的时域包裹相位具有非严格周期特征,基于非严格周期信号的互相关所能确定的相对偏移量不受限制.具体的校正过程如下:以第  $r$  次扫频序列的MZI时域包裹相位作为相关模板,将第  $j$  次扫频序列MZI时域包裹相位与模板进行互相关运算,得到归一化互相关函数为

$$\rho_j = \left( \int \varphi_r(k_j(t)) \cdot \varphi_j(k_j(t + \tau)) dt \right) \times \left( \sqrt{\int \varphi_r(k_j(t)) \cdot \varphi_r(k_j(t + \tau)) dt} \right)^{-1} \quad (3)$$

由(3)式可确定峰值点对应的时域延迟量  $\tau_j$ .需要指出,由于时域采样的离散性,  $\tau_j$  只代表两扫频序列之间像素级的相对偏移量.根据时域延迟量  $\tau_j$ ,将各序列信号(包括MZI关联的信号与待测干涉信号)实施时域同步,此时(2)式变为

$$\bar{\phi}_j = (k_j(t)) = k_j(t - \tau_j)d - 2\pi \text{floor} \left( \frac{k_j(t - \tau_j)d + \pi}{2\pi} \right). \quad (4)$$

对(4)式进行解包裹操作,可得同步后的MZI时域解包裹相位.其中,初始位相的不同则代表各扫频序列待测干涉信号之间的亚像素级的偏移量.

根据各序列MZI时域解包裹相位的分布,划定解包裹相位的上下界  $\varphi_{\max}$  和  $\varphi_{\min}$ .由此可确定均匀重采样点位相:

$$\varphi_i = i \cdot \frac{\varphi_{\max} - \varphi_{\min}}{N}, \quad (5)$$

式中,  $N$  和  $i$  分别表示总采样点数和采样序数.依据重采样点位相和MZI时域解包裹相位,便可实施待测干涉信号在位相空间的等间隔插值,获得波数空间同步采样且等间隔分布的干涉光谱<sup>[12]</sup>.各扫频序列待测干涉信号之间亚像素级的相对漂移则在位相域等间隔重采样过程中自然校正.

本文提出的基于时域相位信息的波数校正方法,相比于以往的基于波数域干涉信号的数字校正方法<sup>[9]</sup>具有明显优势.图1展示的是两种不同方法的仿真结果比较.该仿真所依据的干涉信号由(1)式给出,同时设置了加性噪声,对应的信噪比为60 dB;光源光谱  $(k(t))$  则根据实际光源按6阶非线性拟合得到 ( $a = 1.003 \times 10^{-1}$ ,  $b = 6.428 \times 10^6$ ,  $c = 6.297 \times 10^{10}$ ,  $d = 9.080 \times 10^{14}$ ,  $e = -7.217 \times 10^{19}$ ,  $f = 1.426 \times 10^{24}$ ,  $g = -1.038 \times 10^{28}$ );MZI光程差  $d = 3$  mm.图1(a)为时域包裹相位归一化相关函数,图1(b)为波数域干涉信号归一化相关函数,利用相关函数的最大值可以确定两次光源输出波数的相对偏移量.由图1(a)和图1(b)的比较不难看出:时域包裹相位归一化相关函数的最大值明显大于附近的极值点,因而容易判定;而波数域干涉信号归一化相关函数则呈现周期性特征(极值点幅值的变化比较缓慢),其最大值的判定易受到噪声及重采样误差的影响.两种不同方法所确定的偏移量与其理论值的偏差由图1(c)给出.显然,本文

方法可以准确地确定相对偏移量, 而基于波数域干涉信号的数字校正方法则容易受噪声影响, 误差较大. 此外, 两种方法确定偏移量所需的运算量不同. 基于波数域干涉信号的数字校正方法, 首先需要实施从时域到波数域的重采样过程, 然后在波数域实施相关运算; 而本文的方法直接在时域实施相关运算, 因而所需的运算量大为缩短. 利用本文方法和基于波数域干涉信号的相关方法确定偏移量(电脑 Intel(R) Core(TM) 2CPU 6600@2.4 GHz, 内存 4 G)所需时间分别为 0.005 s 和 0.642 s.

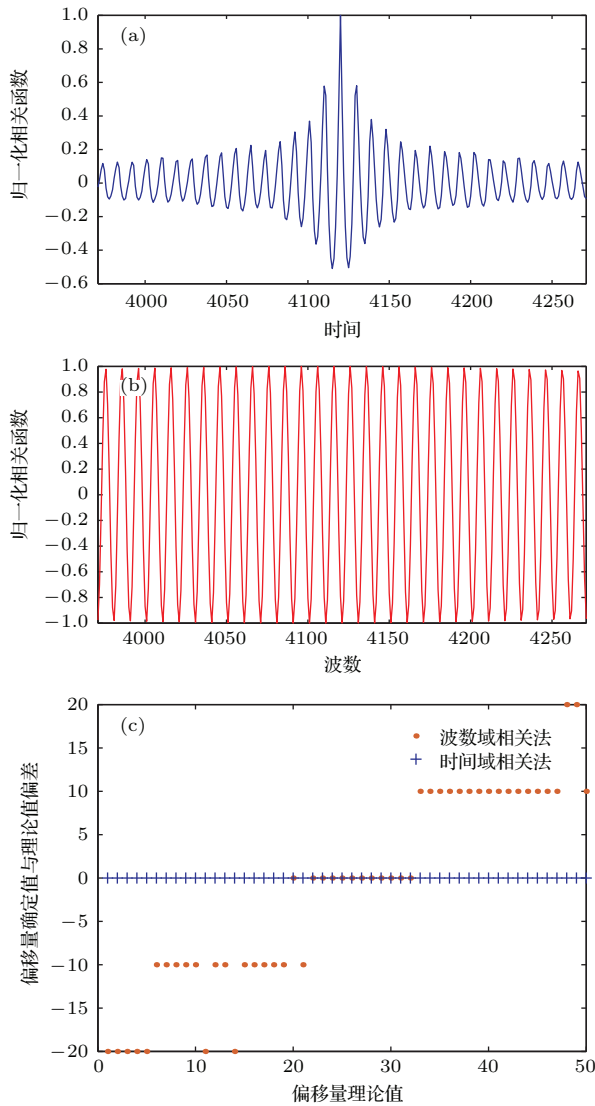


图1 (网刊彩色) (a) 时域包裹相位归一化相关函数; (b) 波数域干涉信号归一化相关函数; (c) 两种相关法确定的偏移量与理论值偏差的比较

Fig. 1. (color online) (a) Normalized cross-correlation function of wrapped phase in time domain; (b) normalized cross-correlation function of wrapped phase in spectrum domain; (c) comparison of the determined shifts and theoretical shifts by the two cross-correlation methods.

### 3 实验

图2所示为基于扫频光源的共路OCT系统示意图. 扫频光源(HSL-2000, 20 kHz)扫频范围  $1320 \text{ nm} \pm 59 \text{ nm}$ , 半峰全宽(FWHM) 100 nm. 由扫频光源发出的扫频光, 经由耦合器1分别进入共路干涉仪和MZI. 为避免环境干扰, 研究中的光程重复性测量采用了共路布局, 来自盖玻片(标称厚度 0.13—0.17 mm)前后表面的返回光形成共路干涉. 虚线框部分即为封装好的MZI单元, 它由双耦合器(2, 3)与光程适配(约6 mm)双光纤臂构成. MZI干涉光及共路干涉光经探测器探测后, 干涉信号由双通道采集卡(ATS9350, 12 bit, 500 M)同步采集. 采集卡的采集速率为100 M, 其触发信号由扫频光源提供.

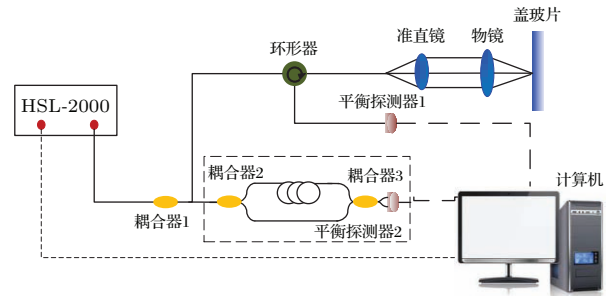


图2 (网刊彩色) 基于扫频光源的共路OCT系统

Fig. 2. (color online) Common path sweep source OCT system.

图3所示为扫频序列( $r = 1, j = 27$ )相应的MZI时域包裹相位与时域互相关校正结果. 两次扫频相应的时域包裹相位局部分布如图2(a)所示, 包裹相位基本呈现重复性特征(鉴于扫频非线性较小, 其时域非周期性在局域范围内不明显), 重复周期对应的波数范围约为11个采样间隔. 对图2(a)中两包裹位相进行时域互相关, 得到的互相关结果如图3(b)所示. 从互相关信号可以确定的相对偏移量为65个时域采样点间隔, 对应的相对波数偏移量为  $6188 \text{ m}^{-1}$  (约为 10.6 nm). 二者之间显然已经历了6个周期的大偏移. 用基于波数域的相关法进行偏移量校正时相关函数峰值点不能有效确定出偏移周期. 将序列27相对于序列1整体向右平移65个采样间隔后, 得到像素级同步后的两包裹相位如图3(c)所示, 相应的解包裹相位分布如图3(d)所示. 从图3(c)和图3(d)可以看出, 像素级同步后二者已整体上重合, 但由于实际测量时两次扫频非线性不可能完全一致, 因此二者并不完全重合. 亚像素的波动可由图3(d)中的局域放大图中看出,



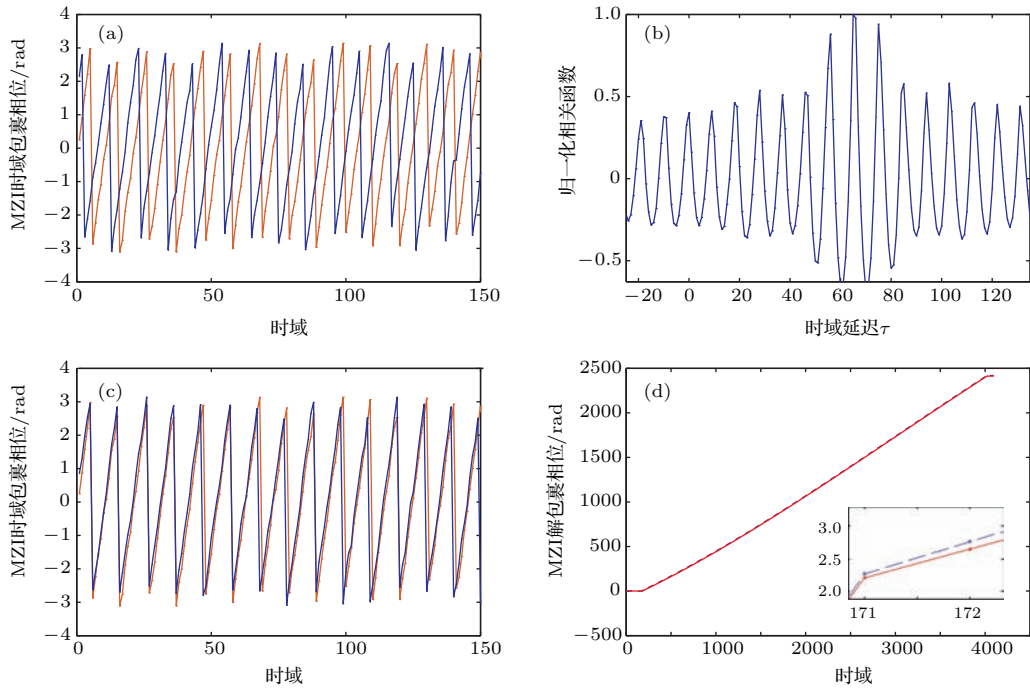


图3 (网刊彩色) 两典型扫频序列 ( $r = 1, j = 27$ ) MZI 时域包裹相位及时域互相关校正结果 (a) 时域包裹相位 (局部分布图); (b) 互相关信号; (c) 互相关校正后的包裹相位 (局部分布图); (d) 互相关校正后的时域解包裹相位, 右下角为虚线框中初始相位的放大图

Fig. 3. (color online) MZI wrapped phase in time domain and cross-correlation results of two typical frequency sweep sequence ( $r = 1, j = 27$ ): (a) Wrapped phase in time domain (local); (b) cross-correlation signal; (c) wrapped phase after cross-correlation correction (local); (d) the amplification of the initial phase unwrapped phase after correction in time domain is showed in the down-right.

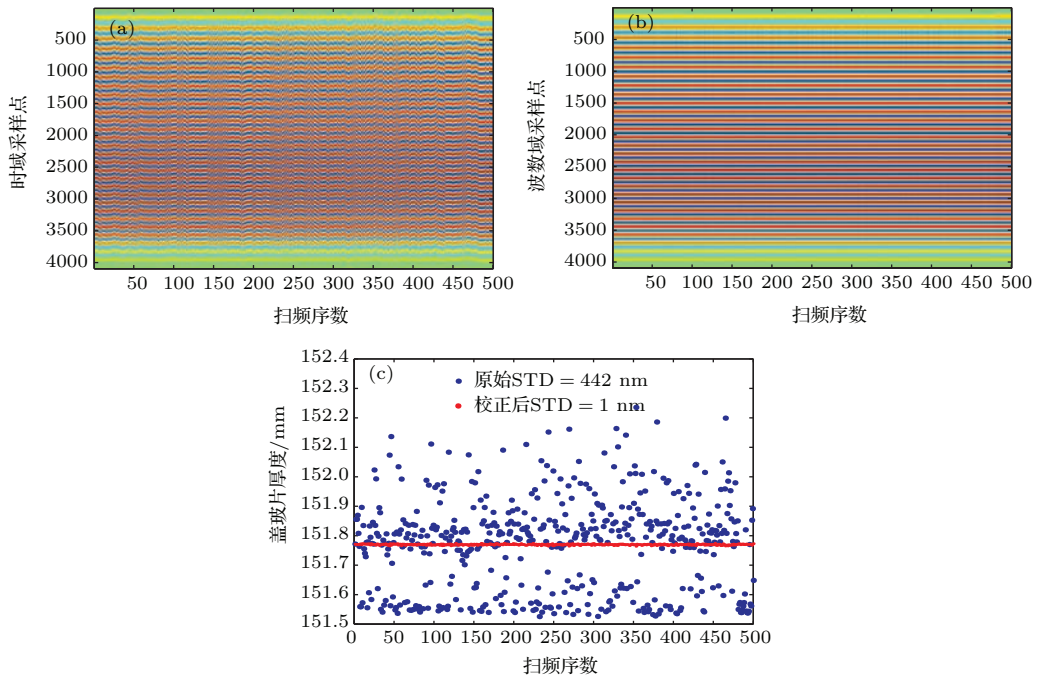


图4 (网刊彩色) 盖玻片重复性测量结果 (a) 校正前干涉光谱; (b) 校正后干涉光谱; (c) 校正前后盖玻片测量厚度及其标准偏差

Fig. 4. (color online) Results of repetitive measurements of the optical path-length of a coverslip: (a) Spectrum before correcting interference; (b) spectrum after correcting interference; (c) thickness and standard deviation before and after correction.

其初始位相差为0.058 rad, 对应的亚像素的波数波动为  $4.8 \text{ m}^{-1}$  (约0.08 nm).

对来自盖玻片共路干涉信号进行500次重复性测量, 结果如图4所示. 图4(a)为原始采集的各序列时域干涉光谱, 扫频序列间存在明显的光谱错移. 图4(b)为同步后的波数域干涉光谱, 各扫频序列波数已严格同步, 因而呈现出平行等间隔分布. 对图4(b)信号实施希尔伯特变换并进行解包裹操作, 可得波数域解包裹位相. 对波数域解包裹位相分布进行最小二乘线性拟合, 拟合线的斜率即为盖玻片的光学厚度. 假定盖玻片折射率为1.5, 则可得盖玻片厚度的重复性测量结果如图4(c)所示. 校正前测量结果为  $151.79 \text{ mm} \pm 0.442 \text{ }\mu\text{m}$ , 校正后为  $151.79 \text{ mm} \pm 0.001 \text{ }\mu\text{m}$ , 可见测量重复性已达到nm量级.

## 4 结 论

本文提出了一种基于MZI时域位相信息的干涉信号波数同步与均匀采样方法. 鉴于扫频光源输出波数与时间的非线性关系, MZI时域包裹相位具有非严格周期特征, 该方法所能确定的相对偏移量因而不受限制, 可以对扫频光源进行大偏移量的检测与校正. 各扫频序列之间亚像素级的相对偏移, 则在位相域等间隔重采样过程中自然校正. 基于所发展的波数同步与均匀采样方法, 利用扫频OCT

系统对盖玻片样品实施了光程重复性测量实验, 获得了纳米级的重复性测量结果.

## 参考文献

- [1] Huang D, Swanson E A, Lin C P, Schuman J S, Stinson W G, Chang W, Hee M R, Flotte T, Gregory K, Puliafito C A, Fujimoto J G 1991 *Science* **254** 1178
- [2] Wang R K, Nuttall A L 2010 *J. Biomed. Opt.* **15** 56005
- [3] Manapuram R K, Manne V G R, Larin K V 2009 *J. Appl. Phys.* **105** 102040
- [4] Moore E D, Mcleod R R 2011 *Opt. Express* **19** 8117
- [5] Yan Y Z, Ding Z H, Wang L, Shen Y 2013 *Acta Phys. Sin.* **62** 164204 (in Chinese) [颜扬治, 丁志华, 王玲, 沈毅 2013 物理学报 **62** 164204]
- [6] Adler D C, Huber R, Fujimoto J G 2007 *Opt. Lett.* **32** 626
- [7] Vakoc B, Yun S, de Boer J, Tearney G, Bouma B 2005 *Opt. Express* **13** 5483
- [8] Kuranov R V, Mcelroy A B, Kemp N, Baranov S, Taber J, Feldman M D, Milner T E 2010 *IEEE Photonic. Tech. L.* **22** 1524
- [9] Braaf B, Vermeer K A, Sicam V A D P, van Zeeburg E, van Meurs J C, de Boer J F 2011 *Opt. Express* **19** 20886
- [10] Liu G, Tan O, Gao S S, Pechauer A D, Lee B, Lu C D, Fujimoto J G, Huang D 2015 *Opt. Express* **23** 9824
- [11] Bao W, Ding Z H, Wang C, Mei S T 2013 *Acta Phys. Sin.* **62** 114202 (in Chinese) [鲍文, 丁志华, 王川, 梅胜涛 2013 物理学报 **62** 114202]
- [12] Wu T, Ding Z H, Wang L, Chen M H 2011 *Opt. Express* **19** 18430

# Wavenumber calibration and phase measurement in swept source optical coherence tomography\*

Shangguan Zi-Wei Shen Yi Li Peng Ding Zhi-Hua<sup>†</sup>

(*State Key Laboratory of Modern Optical Instrumentation, College of Optical Science and Engineering, Institute of Laser Biomedicine, Hangzhou 310027, China*)

( Received 24 July 2015; revised manuscript received 23 October 2015 )

## Abstract

Based on the phase information in time domain of a Mach-Zehnder interferometer (MZI), a method of calibrating the wavenumber of the source is proposed. Cross-correlation of wrapped phase in time-domain of the MZI is adopted to determine drifts among axial-lines. Owing to non-strictly periodic characteristics of wrapped phase in time-domain of the MZI, the determinable range of shift is unlimited. Synchronization of signals in time domain is then performed to correct their corresponding shifts. The obtained results demonstrate that it is feasible to realize phase measurement with high precision even under unstable swept source for the optical coherence tomography system.

**Keywords:** swept source, wavenumber calibration, cross-correlation, phase measurement

**PACS:** 42.30.Rx, 42.60.Lh, 87.64.M-

**DOI:** [10.7498/aps.65.034201](https://doi.org/10.7498/aps.65.034201)

---

\* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 61335003, 61275196, 61327007, 11404285, 61475143), the National High-Technology Research and Development Program of China (Grant No. 2015AA020515), Zhejiang Provincial Natural Science Foundation of China (Grant No. LY14F050007), Fundamental Research Funds for the Central Universities (Grant No. 2014QNA5017), Scientific Research Foundation for Returned Scholars, Ministry of Education of China.

<sup>†</sup> Corresponding author. E-mail: [zh\\_ding@zju.edu.cn](mailto:zh_ding@zju.edu.cn)