

# 基于频域分析的光学相干显微镜中的色散补偿

董敬涛 卢荣胜

(合肥工业大学仪器科学与光电工程学院, 安徽 合肥 230009)

**摘要** 提出基于频域分析的色散补偿方法,对光学相干显微镜的干涉信号进行快速傅里叶变换,得到频率幅值极大值对应的平均波数,将提取的解包裹后的相位以平均波数为中心做多项式拟合,得到二阶色散系数。实验中,通过在参考臂中插入不同厚度的色散介质来引入两个干涉臂色散介质的光程差,并求得相应的二阶色散系数。通过最小二乘线性拟合,证实了二阶色散系数和色散介质的相对厚度具有很好的线性关系。根据该线性关系,可以在参考臂中插入适当厚度的色散介质来完全补偿干涉系统的二阶色散。

**关键词** 显微;光学相干显微镜;色散补偿;频域分析;快速傅里叶变换;二阶色散

**中图分类号** TN247 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201239.0116003

## Dispersion Compensation Based on Frequency Domain Analysis in Optical Coherence Microscopy

Dong Jingtao Lu Rongsheng

(School of Instrument Science and Opto-Electronics Engineering, Hefei University of Technology, Hefei, Anhui 230009, China)

**Abstract** The dispersion compensation method based on frequency domain analysis (FDA) is proposed. The interference signal acquired from the optical coherence microscopy (OCM) is Fourier transformed to the frequency domain and the mean wavenumber corresponding to the peak frequency amplitude is obtained. A polynomial is fit to the unwrapped phase centered on the mean wavenumber in order to estimate the coefficient of the second order dispersion. In the experiment, dispersive elements with different thicknesses are inserted into the reference arm to calculate the second order dispersion coefficients corresponding to the optical path differences (OPDs) of the dispersive elements of two interference arms. A linear least squares fit demonstrates the good linearity between the second order dispersion coefficient and the relative thickness of the dispersive elements. In accordance with this linearity, a dispersive element with the appropriate thickness inserted into the reference arm will compensate the second order dispersion of the interference system.

**Key words** microscopy; optical coherence microscopy; dispersion compensation; frequency domain analysis; fast Fourier transform; second order dispersion

**OCIS codes** 180.3170; 130.2035; 260.2030

### 1 引 言

光学相干显微镜(OCM)是一种具有高轴向分辨率、高信噪比的无损伤成像技术<sup>[1]</sup>。由于采用宽带光源(卤素灯、LED等),光线在参考臂和测量臂的光学元件中的光程差不等则会造成色散。色散对

于干涉信号有很大的影响,如展宽干涉信号的包络、降低干涉信号对比度、使得干涉信号不对称、改变干涉信号变化的周期以及降低干涉系统的轴向分辨率<sup>[2~6]</sup>。

干涉系统中的色散补偿方法通常分为软件补

收稿日期: 2011-07-04; 收到修改稿日期: 2011-10-19

基金项目: 国家 863 计划(2009AA04Z114)和国家自然科学基金(50875074)资助课题。

作者简介: 董敬涛(1986—),男,博士研究生,主要从事自动光学检测和光学系统设计等方面的研究。

E-mail: dongjingt@163.com

导师简介: 卢荣胜(1963—),男,教授,博士生导师,主要从事自动光学检测、机器视觉和图像处理等方面的研究。

E-mail: rslu@hfut.edu.cn(通信联系人)

偿<sup>[6~10]</sup>和硬件补偿<sup>[11~16]</sup>。在软件补偿方面, Fercher等<sup>[6]</sup>利用空间可变卷积核对深度扫描信号去卷积来补偿深度色散; Marks等<sup>[7,8]</sup>通过傅里叶变换去除色散失配的相位信息,然后重新采样到K-空间,最后通过反傅里叶变化来消除色散; Banaszek等<sup>[9]</sup>通过干涉图中的相位信息计算归一化自卷积函数来补偿色散; Wojtkowski等<sup>[10]</sup>通过构建复光谱干涉图修正相位信息来补偿色散。但是在参考臂中使用电光相位调制器或者声光频率调制器造成的大量色散会降低干涉信号的信噪比以及对比度,使得数字化后的干涉信号难以实施软件修正。硬件补偿则是在干涉信号采集前进行色散匹配,目前主要采用快速扫描延迟线<sup>[13~16]</sup>和在参考臂中插入补偿介质的方法<sup>[11,12]</sup>。快速扫描延迟线通过改变光栅或者振镜的离焦量来调整参考光路的色散参数,这种方法使得参考臂结构复杂,并且需要根据色散补偿量调整硬件结构,可能造成系统稳定性下降。在参考臂中插入补偿介质的方法则相对比较简单,不需改变任何硬件结构。

本文采用在参考臂中插入补偿介质的方法来研究干涉系统的色散补偿。通过理论分析和实验研究,证实了二阶色散系数和色散介质的相对厚度具有很好的线性关系。根据该线性关系,可以在参考臂中插入适当厚度的色散介质来完全补偿干涉系统的二阶色散。

## 2 理论分析

假设光源的频谱用高斯函数表示为

$$P(k) = \frac{P_0}{2\Delta k \sqrt{\pi}} \exp\left[-4\ln 2 \left(\frac{k-k_0}{\Delta k}\right)^2\right], \quad (1)$$

式中  $P$  为光源的功率谱,  $k = 2\pi/\lambda$  为真空中的波数,  $k_0$  为光源的中心波数,  $\Delta k$  为光源频谱半峰全宽(FWHM)。探测器接收到的信号  $I$  可以表示为参考臂和样品臂返回光的互相关函数<sup>[16]</sup>

$$I \propto \text{Re} \left\{ \frac{\sqrt{R_s R_r P_0}}{2\Delta k \sqrt{\pi}} \times \int \exp\left[-4\ln 2 \left(\frac{k-k_0}{\Delta k}\right)^2\right] \exp(j\phi) dk \right\}, \quad (2)$$

式中  $R_s, R_r$  分别是样品臂和参考臂的反射系数,  $\phi$  是样品臂和参考臂的相位差, 即  $\phi = \phi_s - \phi_r$ 。在色散介质中, 波数  $k$  是光频率  $\nu$  的函数, 将波数  $k$  以中心频率  $\nu_0$  进行泰勒展开

$$k(\nu) = k_0 +$$

$$\frac{dk}{d\nu} \Big|_{\nu_0} (\nu - \nu_0) + \frac{1}{2} \frac{d^2 k}{d\nu^2} \Big|_{\nu_0} (\nu - \nu_0)^2 + \dots, \quad (3)$$

则相位差  $\phi$  可以表示为

$$\phi = \Delta l_0 k(\nu) = 2\pi\nu_0 \Delta l_0 / c + 2\pi(\nu - \nu_0) \Delta l_g / c + \Delta D(\nu - \nu_0)^2 + \dots, \quad (4)$$

(4)式中第一项  $\Delta l_0 = l_s n|_{\lambda=2\pi/k_0} - l_r$  表示相速度光程差, 第二项  $\Delta l_g = l_s n_g|_{\lambda=2\pi/k_0} - l_r$  表示群速度光程差, 其中  $n$  为样品折射率,  $n_g = n - \lambda dn/d\lambda$  为样品群折射率,  $l_r$  为扫描过程中不断移动的参考臂反射镜的位置,  $l_s$  为样品臂反射面的位置, 在本实验中可以等效成插入玻璃片的相对厚度。前两项包含样品表面形貌的信息<sup>[17]</sup>。第三项以及高阶项由群速度色散引入, 通常会导致干涉包络展宽、干涉条纹对比度下降等<sup>[2]</sup>。在连续宽光谱光源情况下, 高阶色散相对于二阶色散  $\Delta D$  小很多, 所以这里只考虑二阶色散系数

$$\Delta D \approx \frac{4\pi^2 l_s}{k_0^3} \frac{d^2 n}{d\lambda^2} \Big|_{\lambda=2\pi/k_0}. \quad (5)$$

从(5)式看出, 二阶色散系数是样品玻璃片的折射率色散  $dn/d\lambda$  和厚度  $l_s$  的函数。对应于中心波数  $k_0$  的折射率色散  $(dn/d\lambda)|_{\lambda=2\pi/k_0}$ , 则二阶色散系数与  $l_s$  成线性关系。根据维纳-辛钦定理知, 光源的功率谱密度和其自相关函数是一傅里叶变换对。通过对探测到的干涉信号傅里叶变换到频率域, 得到相位和波数之间的关系, 对在中心波数  $k_0$  附近的相位做二阶多项式拟合, 得到的二阶项系数即二阶色散系数。

## 3 实验及讨论

如图1所示, OCM系统采用卤素灯光源(Moritex Inc. MHAA-100W), 其频谱近似呈高斯分布, 中心波长600 nm, 带宽175 nm。光束经过准直镜(Moritex Inc. MLS-60P)准直后经过分光棱镜分成相同的两束光, 分别进入样品臂和参考臂。两

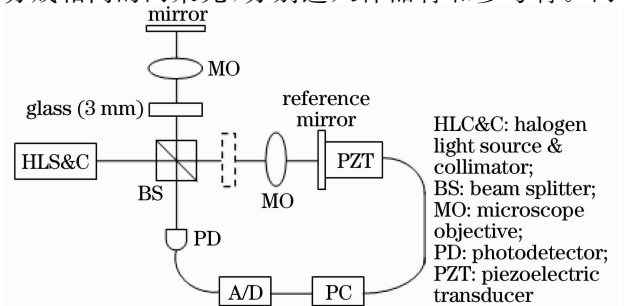


图1 光学相干显微镜系统结构

Fig.1 Schematic of OCM system

臂的反射光经过分光棱镜重合,产生干涉信号并被光电探测器接收,由模数转换(A/D)卡(NI PCI-6221)采样送入计算机进行处理。参考镜由压电陶瓷驱动器(PZT, PI P-725.4CD)驱动,通过计算机控制进行轴向扫描。控制、采集及数据处理的软件基于C#语言编写。为了尽量避免干涉条纹受到震动和环境气流的影响,系统搭建在光学隔震平台上,并在恒温、恒压、密闭安静的环境中进行实验。

在实验中,先在样品臂插入一个3 mm厚的BK7玻璃片来引入色散。然后在参考臂中,分别插入不同厚度的BK7玻璃片(0, 1.14, 2.28, 3.42, 4.56 mm)。参考臂中的玻璃片固定在精密旋转台上,通过改变玻璃片和光轴的夹角,可以微调玻璃片的有效厚度。PZT的扫描间距选择 $\lambda/8$ 波长,分别得到其干涉信号,如图2所示。可以看出,两干涉臂的玻璃厚度差值越大,则色散越大,即干涉信号对比度越小,且越不对称,干涉包络越宽(分别为23.7,

21.8, 7.3, 5.7, 20.9  $\mu\text{m}$ )。对干涉信号做快速傅里叶变换,得到频谱信号,大多数有用的频率信息都集中在频谱幅值最大值所对应的平均波数 $k_0$ 的附近<sup>[17]</sup>。以 $k_0$ 为中心,取其附近若干点求相位。由于相位值是通过反正切函数求得,所以必须对相位值解包裹来消除 $2\pi$ 不确定性。对解包裹后的相位值进行二阶多项式拟合,得到的二阶项系数即是二阶色散系数,如图3所示。根据(5)式二阶色散系数 $\Delta D$ 的表达式可以看出,当平均波数确定时, $\Delta D$ 和色散介质相对厚度 $l$ 成线性关系。图4为不同玻璃片厚度对应的二阶色散系数,做线性最小二乘拟合后,发现二阶色散系数和色散介质的相对厚度具有很好的线性关系,均方根误差(RMSE)只有 $3.3 \times 10^{-4}$ ,说明实验结果与理论分析相符合。注意到图4中拟合的直线,当色散介质相对厚度 $x$ 为零时,二阶色散系数 $y$ 会引入系统误差约0.002,这可能是由于OCM系统中的分光棱镜光程不等造成的。

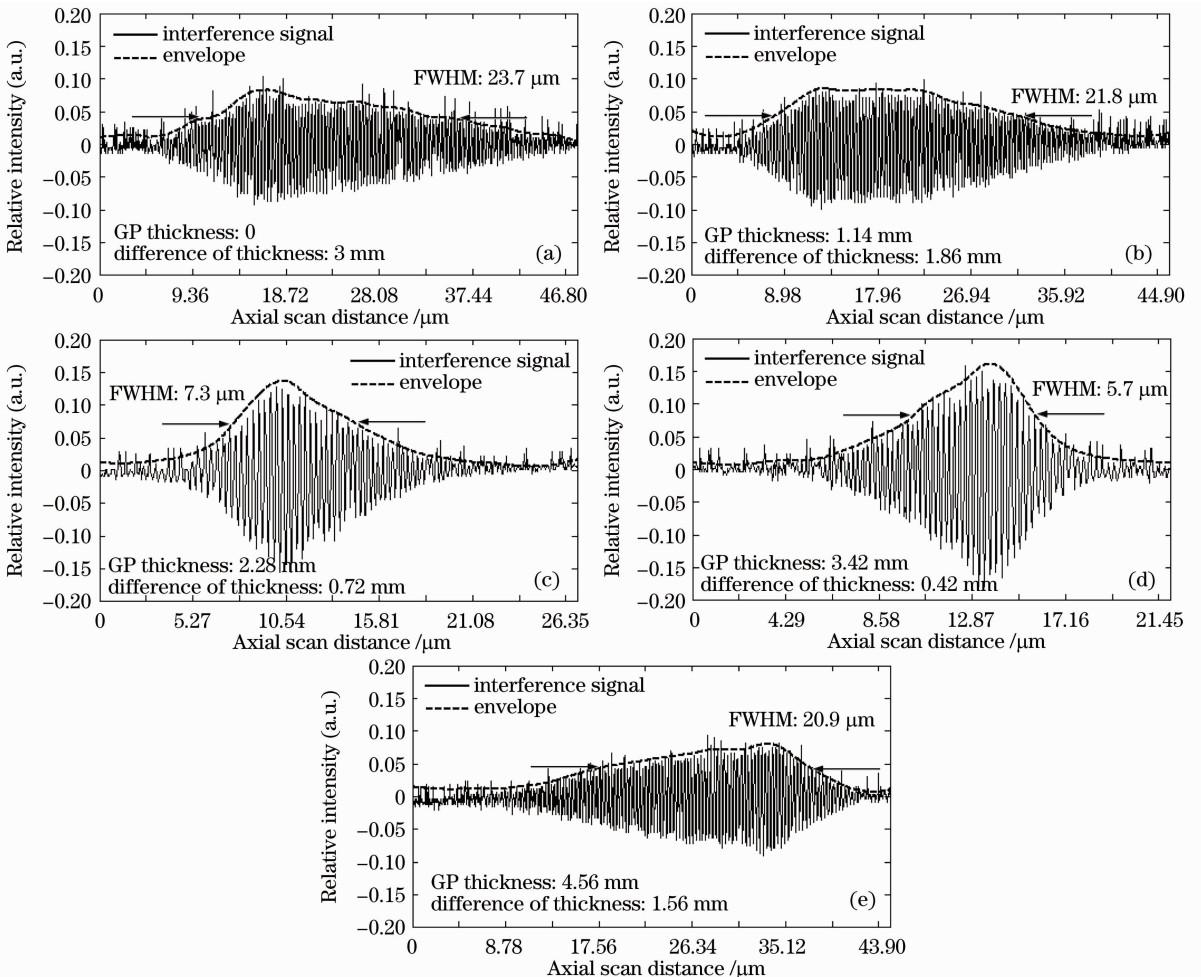


图2 不同厚度BK7玻璃片得到的干涉信号及其包络。GP:玻璃片

Fig. 2 Interference signals and their envelopes corresponding to BK7 glass plates with different thicknesses. GP: glass plate

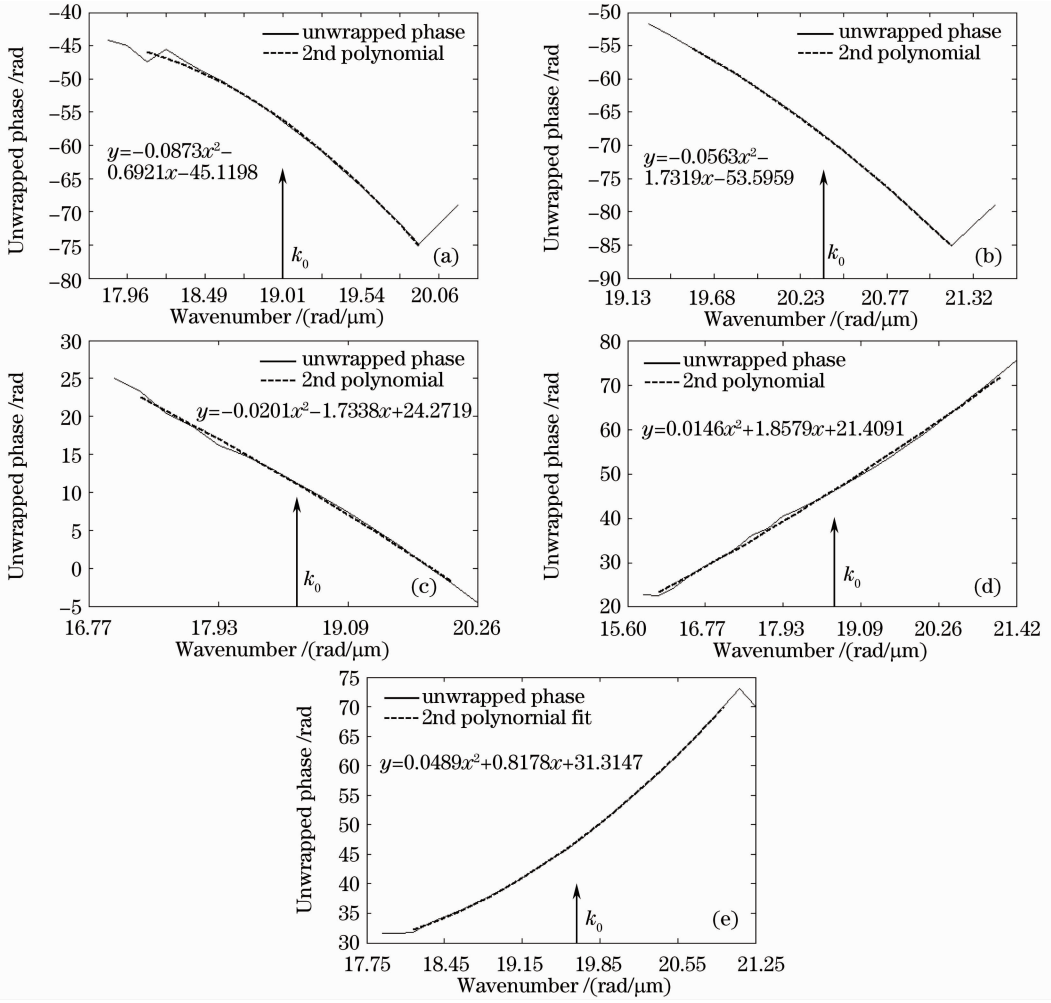


图 3 中心波数附近解包裹后的相位及其二阶多项式拟合

Fig. 3 Unwrapped phases centered on the mean wavenumber and the second order  $k_0$  polynomial fits

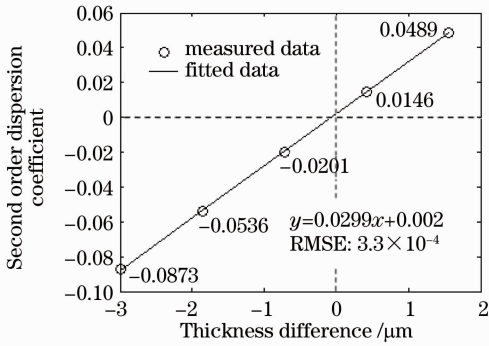


图 4 二阶色散系数和色散介质相对厚度的关系

Fig. 4 Second order dispersion coefficients versus thickness difference between glass plates of two interference arms

对于该线性关系的重复性验证,在同一环境中做了 5 次实验,时间间隔为 1 h,最后 5 条二阶色散系数和色散介质相对厚度的关系曲线如图 5 所示。5 次重复实验的均方根误差分别为  $3.3 \times 10^{-4}$ ,  $7.0 \times 10^{-4}$ ,  $6.2 \times 10^{-4}$ ,  $2.4 \times 10^{-4}$  和  $8.7 \times 10^{-4}$ ,说

明在该实验条件下,该线性关系具有较好的重复性和一致性。

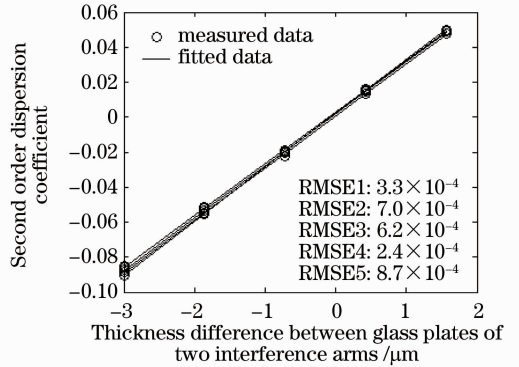


图 5 重复性实验

Fig. 5 Repeatability experiment results

根据图 4 的线性关系,在参考臂中插入 2.94 mm 的玻璃片(实验中通过旋转玻璃片与光轴的夹角来微调玻璃片的有效厚度),获得的干涉信号和相位拟合如图 6 所示。从图 6(a)可以看出,干涉信号的对比

度与图 2 相比更大,干涉包络的 FWHM 仅为  $2.7 \mu\text{m}$ 。而干涉信号比较对称,稍有不对称是因为实验使用的卤素灯光源的频谱只是近似于高斯分布。从图 6(b)看出中心波数附近的解包裹后的相位与波数之间有很好的线性关系,做二阶多项式拟合后,二阶系数仅为  $-8.89 \times 10^{-5}$ 。实验说明,根据研究得出的二阶色散系数和色散介质相对厚度的线性关系,可以通过在参考臂中插入适当厚度的色散介质有效地进行二阶色散补偿。

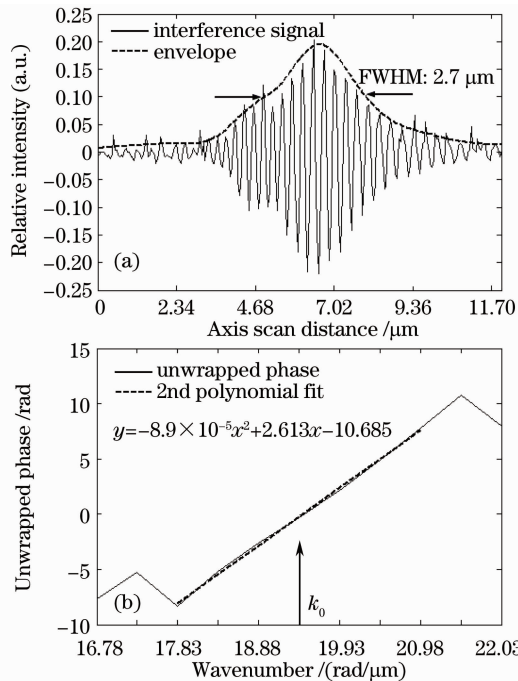


图 6 (a)色散补偿后的干涉信号及包络;(b)解包裹后的相位及其二阶多项式拟合

Fig. 6 (a) Interference signal and its envelope after dispersion compensation; (b) unwrapped phase and the second order polynomial fit

在利用快速扫描光学延迟线补偿二阶色散的方法中<sup>[16]</sup>,衍射光栅到傅里叶透镜的距离和傅里叶透镜的焦距之差  $L-f$  与干涉包络的 FWHM 几乎成线性关系,根据该关系调节  $L-f$  的大小,可以得到色散匹配良好时的 FWHM。而在插入色散介质补偿二阶色散的方法中,二阶色散系数和色散介质相对厚度成较好的线性关系,根据这一线性关系可以直接得到色散匹配良好时的色散介质相对厚度。本实验在干涉臂中通过色散介质补偿二阶色散后的干涉包络 FWHM 约为  $2.7 \mu\text{m}$ ,与同等实验条件下,两干涉臂中均未插入色散介质的等光程干涉实验<sup>[18]</sup>得到的干涉包络 FWHM 为  $2.6 \mu\text{m}$  相比,该补偿方法确实可以有效地进行二阶色散补偿。

## 4 结 论

研究了基于频域分析的光学相干显微镜的色散补偿方法,从理论上分析了二阶色散系数和色散介质相对厚度的关系。在实验中,通过在参考臂中插入不同厚度的色散介质来引入两个干涉臂的色散介质的光程差,求得了相应的二阶色散系数。通过最小二乘线性拟合,证实了二阶色散系数和色散介质的相对厚度具有极好的线性关系。根据该线性关系,可以在参考臂中插入适当厚度的色散介质来完全补偿干涉系统的二阶色散。与快速扫描延迟线补偿色散方法相比,该方法相对简单,不需改变任何硬件结构。

## 参 考 文 献

- 1 A. D. Aguirre, James G. Fujimoto. Optical Coherence Microscopy[M]. New York: Springer, 2008. 505
- 2 Pavla Pavlicek, Jan Soubusta. Measurement of the influence of dispersion on white-light interferometry[J]. *Appl. Opt.*, 2004, **43**(4): 766~770
- 3 William J. Tango. Dispersion in stellar interferometry[J]. *Appl. Opt.*, 1990, **29**(4): 516~521
- 4 Peter R. Lawson. Bandwidth limitations and dispersion in optical stellar interferometry [J]. *Appl. Opt.*, 1996, **35** (25): 5122~5124
- 5 Alexander Meadway, Seyed Hamid Hosseiny Darbrazi, George Dobre *et al.*. A rapid method of measuring dispersion in low coherence interferometry and optical coherence tomography systems[J]. *J. Opt.*, 2010, **12**(1): 1~6
- 6 A. F. Fercher, C. K. Hitzenberger, M. Sticker *et al.*. Numerical dispersion compensation for partial coherence interferometry and optical coherence tomography [J]. *Opt. Express*, 2001, **9**(12): 610~615
- 7 Daniel L. Marks, Amy L. Oldenburg, J. Joshua Reynolds *et al.*. Autofocus algorithm for dispersion correction in optical coherence tomography [J]. *Appl. Opt.*, 2003, **42** (16): 3038~3046
- 8 D. L. Marks, A. L. Oldenburg, J. J. Reynolds *et al.*. Digital algorithm for dispersion correction in optical coherence tomography for homogeneous and stratified media [J]. *Appl. Opt.*, 2003, **42**(2): 204~217
- 9 K. Banaszek, A. S. Radunsky, I. A. Walmsley. Blind dispersion compensation for optical coherence tomography [J]. *Opt. Commun.*, 2007, **269**(1): 152~155
- 10 M. Wojtkowski, V. J. Srinivasan, T. H. Ko *et al.*. Ultrahigh-resolution, high-speed, Fourier domain optical coherence tomography and methods for dispersion compensation [J]. *Opt. Express*, 2004, **12**(11): 2404~2422
- 11 K. J. Resch, P. Puvanathan, J. S. Lundeen *et al.*. Classical dispersion-cancellation interferometry [J]. *Opt. Express*, 2007, **15**(14): 8797~8804
- 12 P. R. Lawson, J. Davis. Dispersion compensation in stellar interferometry [J]. *Appl. Opt.*, 1996, **35**(4): 204~217
- 13 K. S. Lee, A. C. Akcay, T. Delemos *et al.*. Dispersion control with a Fourier-domain optical delay line in a fiber-optic imaging interferometer [J]. *Appl. Opt.*, 2005, **44**(19): 4009~4022
- 14 E. D. J. Smith, A. V. Zvyagin, D. D. Sampson. Real-time dispersion compensation in scanning interferometry [J]. *Opt. Lett.*, 2002, **27**(22): 1998~2000

- 15 Li Dong, Ding Zhihua, Meng Jie. Double-grating rapid scanning optical delay line for dispersion compensation[J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(3): 505~509  
李 栋, 丁志华, 孟 婕. 双光栅快速扫描光学延迟线的色散补偿[J]. *光学学报*, 2007, **27**(3): 505~509
- 16 Yang Yaliang, Ding Zhihua, Yu Xiaofeng *et al.*. Dispersion compensation in OCT system by rapid scanning optical delay line [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2008, **37**(1): 21~24  
杨亚良, 丁志华, 俞晓峰 等. OCT 系统中基于快速扫描光学延迟线的色散补偿[J]. *光子学报*, 2008, **37**(1): 21~24
- 17 P. Groot, X. C. Lega, J. Kramer *et al.*. Determination of fringe order in white-light interference microscopy[J]. *Appl. Opt.*, 2002, **41**(22): 4571~4578
- 18 Jingtao Dong, Rongsheng Lu, Yong Li *et al.*. Automated determination of best focus and minimization of optical path difference in Linnik white light interferometry[J]. *Appl. Opt.*, 2011, **50**(30): 5861~5871

栏目编辑:何卓铭