

文章编号 1004-924X(2006)06-0965-04

# 群相可控光学延迟线色散特性分析

邵永红,何永红,王淑霞,马辉

(清华大学深圳研究生院,广东深圳518055)

**摘要:**分析了光学相干层析(OCT)成像系统的色散特性。分析表明,系统色散与振镜离焦量成正比关系,且在一倍焦距以内为负色散,在一倍焦距以外为正色散。设计了纵向分辨率为 $8\mu\text{m}$ 的OCT系统,测得振镜位于傅里叶透镜焦点外 $0.5\text{mm}$ 处时,系统产生的色散值约为 $77\text{fs}^2$ ,实验结果与理论相符合。

**关键词:**光学相干层析;色散;干涉;光学延迟线

**中图分类号:**TH703 **文献标识码:**A

## Analysis on dispersion characteristics of group-phase-controllable optical delay line

SHAO Yong-hong, HE Yong-hong, WANG Shu-xia, MA Hui

(Graduate School at Shenzhen, Tsinghua University, Shenzhen 518055, China)

**Abstract:** The dispersion characteristics of optical coherence tomography (OCT) system were particularly analyzed. It is found that the dispersion is proportion to the defocus distance of a galvanometer, with negative in the focus length, dispersion, and with possive dispersion out the focus length. A OCT with spatial resolution of  $8\mu\text{m}$  is designed. The dispersion of  $77\text{fs}^2$  is measured in this OCT system when the galvanometer is  $0.5\text{mm}$  far away from the focal length of Fourier lens. The relation between dispersion and the distance away from focus is experimentally validated, and the experimental results are agreed with theory well.

**Key words:** Optical Coherence Tomography(OCT); dispersion; coherence; optical delay line

## 1 引言

光学相干层析成像技术(OCT)是近年来新兴的无损检测技术,其非接触无损伤成像分辨率达到微米量级,且在高散射介质中成像深度达到 $1\sim 3\text{mm}$ ,目前已被广泛应用于生物组织检测、材料检测等领域<sup>[1-4]</sup>。光学相干层析成像技术要求

光学延迟线具有线性扫描、扫描光程达到毫米量级、扫描速度达到 $\text{m/s}$ 、图像获得速度能够达到视频速度等特点<sup>[5]</sup>。目前,最具优势的光学延迟线是由光栅、透镜和振镜构成的傅里叶域光学延迟线。J. G. Fujimoto等<sup>[6]</sup>首先报道了该延迟线的延迟特性,分析了延迟线的线性延迟特点,实现了扫描光程 $3\text{mm}$ 、线性扫描速度 $6\text{m/s}$ 和重复频率 $2\text{kHz}$ 的延迟特点。Joseph A. Izatt等<sup>[7]</sup>详细报

收稿日期:2006-04-12;修订日期:2006-10-08.

基金项目:国家自然科学基金(No. 60578003)

道了傅里叶域光学延迟线的群延迟和位相延迟理论公式,并设计了扫描光程 3 mm、线性扫描速度 40 m/s 和重复频率 4 kHz 的光学延迟线。

在光学相干层析成像系统中,为了获得系统尽可能高的成像分辨率,系统色散均衡是非常重要的,因此,必须对延迟线的色散特性进行研究。Andrei V. Zvyagin 等<sup>[8]</sup>分析了位相延迟和群延迟的定量变化关系以及群延迟色散特性,但仅考虑了由光栅引入的群延迟色散,而忽略了振镜引入的延迟线色散特性,而实际上,由振镜引入的色散特性同样重要。

本文推导了由振镜引入傅里叶域光学延迟线的色散关系式,分析了色散特性。设计了空气中扫描光程 3 mm、线性扫描速度 5.6 m/s 和重复频率 60 Hz 的光学延迟线,验证了振镜引入的色散。

## 2 理论分析

傅里叶域光学延迟线结构如图 1 所示,一束宽带光以  $\theta_i$  角度入射到位于透镜焦点的光栅 G 上,其中心波长  $\lambda_0$  一级衍射沿光轴方向,经透镜

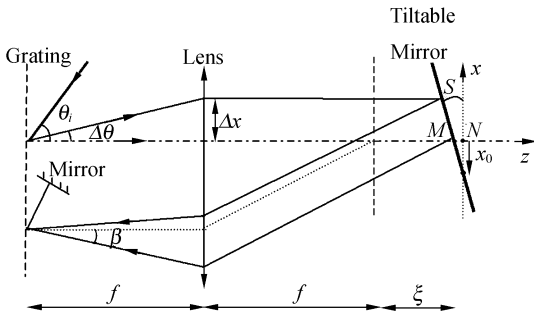


图 1 傅里叶域光学延迟线结构示意图

Fig. 1 Schematic of optical delay line in Fourier-domain

后以平行光束入射到振镜上,经振镜反射沿偏离入射光路返回,在经光栅衍射垂直入射到平面镜使光线沿原路返回,实现延迟量加倍,且中心波长  $\lambda_0$  以入射角度  $\beta$  入射到光栅,衍射光斑半径为  $\Delta x$ ,振镜最大摆角为  $s$ ,振镜振动支点距光轴垂直距离为  $x_0$ ,振镜偏离透镜焦距为  $\xi$ ,其光栅方程<sup>[9]</sup>:

$$p[\sin(\theta_i + \beta) + \sin(\theta_0 + \beta)] = m\lambda, \quad (1)$$

$$p[\sin(\theta_i + \beta) + \sin \beta] = \lambda_0, \quad (2)$$

其中,  $p$  为光栅周期,  $\theta_0$  为衍射角。

对式(1)微分得

$$\Delta\theta = \Delta\lambda / [p \cos(\theta_0 + \beta)]$$

延迟线产生的相移函数:

$$\Phi = \frac{8\pi}{\lambda}(x_0 + \Delta x)s = \frac{4x_0 s \omega}{c} - \frac{8\pi f s}{p \cos(\theta_0 + \beta)} \cdot \frac{\omega - \omega_0}{\omega_0} \quad (3)$$

其中,  $\omega$  为角频率,  $c$  为真空中光速,  $\Delta x = f \cdot \Delta\theta$

对式(3)微分得

$$\Phi'(\omega_0) = \frac{4x_0 s}{c} - \frac{8\pi f s}{p \omega_0 \cos \beta}, \quad (4)$$

$$\Phi''(\omega_0) = -\frac{32\pi^2 f s c \sin \beta}{p^2 \omega_0^3 \cos^3 \beta}. \quad (5)$$

由于  $\tan \beta = 2s\xi/f$ ,  $\cos^2 \beta = f^2 / (4s^2 \xi^2 + f^2)$ , 所以

$$\Phi'(\omega_0) = \frac{4x_0 s}{c} - \frac{8\pi f s}{p \omega_0} [f^2 / (4s^2 \xi^2 + f^2)]^{-\frac{1}{2}}, \quad (6)$$

$$\Phi''(\omega_0) = \frac{64\pi^2 c s}{p^2 \omega_0^3} \left( \frac{4s^2 \xi^2}{f^2} + 1 \right) \xi, \quad (7)$$

$$\Delta\omega = -\frac{2\pi c}{\lambda_0^2} \Delta\lambda. \quad (8)$$

图 2 为振镜离焦量与延迟线群时延及色散关系模拟曲线,从图中可以看出:群延迟量与振镜离焦量呈抛物线变化关系,时间延迟变化量在飞秒量级,且相对透镜焦点两侧对称分布,特别是在焦点处,群时延为零;色散量随振镜离焦距离呈线性变化,在透镜焦点处,延迟线色散为零,在一倍焦距以外,色散为正值,在一倍焦距以内,色散为负值。

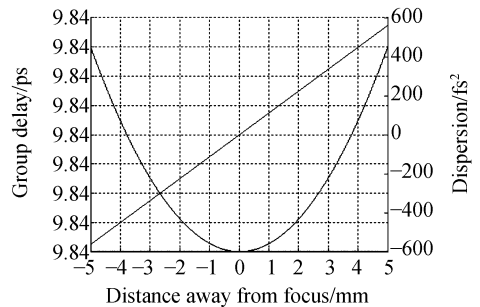


图 2 群延迟、色散及振镜离焦量关系,曲线为群延迟与离焦量关系,直线为色散与离焦量关系

Fig. 2 Relations of group delay and dispersion with distance away from focus (group delay vs distance away from focus (line), dispersion vs distance away from focus (curve))

### 3 实验部分

系统如图 3 所示。实验采用 Q-photic 公司的 SLD 宽带光源,中心波长为 845 nm,谱宽 45 nm,在空气介质中对应理论纵向分辨率约为  $7 \mu\text{m}$ 。扫描振镜频率为 60 次/s,扫描光程为 3 mm,对应扫描速率为 160 mm/s。实验系统的

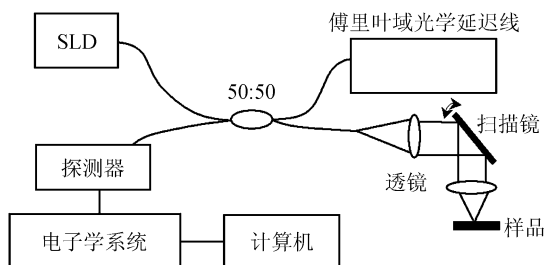


图 3 OCT 系统示意图

Fig. 3 Schematic of OCT system

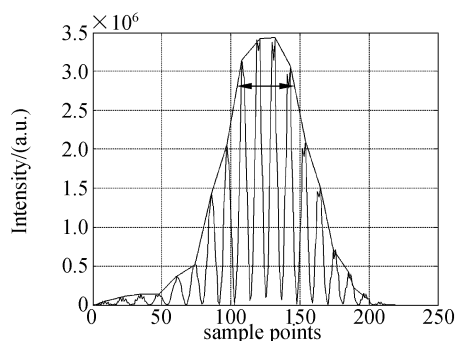


图 4 在镜面处探测强度与采样点关系曲线

Fig. 4 Curve of intensity changing with sample points at mirror

纵向分辨率的测试是将  $150 \mu\text{m}$  厚的盖波片作为样品,获得盖波片上表面任意一次 A-扫描能量数据如图 4,图中每采样点代表深度延迟  $0.2 \mu\text{m}$ ,并根据瑞利判据计算出系统实际深度分辨率为  $8 \mu\text{m}$ ,接近于理论分辨率。

实验分别测得振镜位于焦点处和离焦  $0.5 \text{ mm}$  处的镜面干涉信号,如图 5 所示,焦点处镜面宽度为  $22 \mu\text{m}$ , $0.5 \text{ mm}$  处为  $25 \mu\text{m}$ ,对应色散值约为  $77 \text{ fs}^2$ ,与理论基本相符。

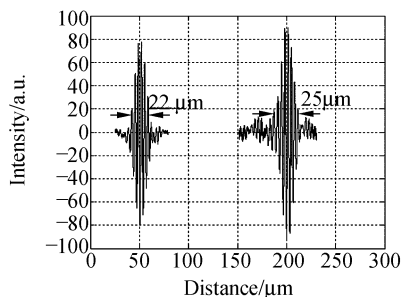


图 5 不同振镜位置处干涉信号图

Fig. 5 Interferogram at different positions

### 4 结论

本文从理论上分析了振镜对光学相干层析系统色散特性的影响,设计了深度分辨率为  $8 \mu\text{m}$  的光学相干层析系统,实验结果与理论分析一致。根据系统的色散特性分析可知,调整振镜位置能够改变系统色散,其改变量大小与离焦距离有关。因此该技术对 OCT 系统色散进行实时补偿以及测量材料的色散性质具有重要意义。

### 参考文献:

- [1] ROLLINS A M, YAZDANFAR S, BARTON J K, *et al.* Real-time in vivo color Doppler optical coherence tomography[J]. *J. Biomed. Opt.*, 2002, 7(1):123-129.
- [2] WIESAUER K, PIRCHER M, GOTZINGER E, *et al.* En-face scanning optical coherence tomography with ultra-high resolution for material investigation[J]. *Opt. Express*, 2005, 13(3):1015-1024.
- [3] SCHMITT J M, KNUTTEL A, BONNER R F. Measurement of optical properties of biological tissues by low-coherence reflectometry[J]. *Appl. Opt.*, 1993, 32(30):6032-6041.
- [4] 崔荣亮, 刘伟奇, 孟庆华, 等. 光学相控阵技术[J]. *光学精密工程*, 2001, 9(2):123-126.  
CUI R L, LIU W Q, MENG Q H, *et al.* Optical phased array[J]. *Opt. Precis. Eng.*, 2001, 9(2):123-126. (in Chinese)
- [5] FELDCHTEIN F I, GELIKONOV G V, GELIKONOV V M, *et al.* In vivo OCT imaging of hard and soft tissue of

the oral cavity[J]. *Opt. Express*, 1998, 3(6):239-250.

- [6] SCHUMAN E A, PULIAFITO C A, FUJIMOTO J G. In vivo retinal imaging by optical coherence tomography[J]. *Opt. Lett.*, 1993, 18(4):1864-1866.
- [7] ROLLINS A M, KULKARNI M D, YAZDANFAR S, *et al.* In vivo video rate optical coherence tomography[J]. *Opt. Express*, 1998, 3(6):219-229.
- [8] SMITH E D J, ZVYAGIN A V, SAMPSON D D. Real-time dispersion compensation in scanning interferometry[J]. *Opt. Lett.*, 2002, 27(22):1998-2000.
- [9] ZVYAGIN A V, SMITH E D J, SAMPSON D D. Delay and dispersion characteristics of a frequency-domain optical delay line for scanning interferometry[J]. *J. Opt. Soc. Am. A.*, 2003, 20(2):333-341.

**作者简介:**邵永红(1972—),男,博士,副教授,清华大学深圳研究生院博士后,主要从事生物光学学科中光学检测技术研究。E-mail:heyh@sz.tsinghua.edu.cn

## 第五届全国信息获取与处理学术会议征文通知

由中国仪器仪表学会主办,沈阳市仪器仪表与自动化学会与高等学校联合承办的全国信息获取与处理学术年会,第五届全国信息获取与处理学术会议由沈阳市仪器仪表与自动化学会与燕山大学联合承办,将于2007年8月6日至9日在避暑胜地北戴河举行。

**征文范围:**(1)各种电量和非电量的测量、计量、测试、检测方法(如医学量、机械量、热工量、物性和化学成分量、状态量等,以下统称测量)

(2)各种测量装置(如传感器、敏感元件、敏感材料、测量电路、处理电路、显示电路等)

(3)测量信号的传输(如现场总线、遥感遥测、无线传输等)

(4)模式识别(如机器视觉,图像、语音、生物特征识别等)

(5)测量信号处理

(6)故障诊断

(7)过程控制方法与装置

(8)其它

**重要日期:**提交论文截止日期:2007年3月15日 录用通知截止日期:2007年4月1日

**重要信息:**本次会议一律网上投稿,具体要求请登陆会议网址([www.meeting.org.cn](http://www.meeting.org.cn))

**联系方式:**会议网址:[www.meeting.org.cn](http://www.meeting.org.cn) 或 [www.syias.org.cn](http://www.syias.org.cn)(论文投稿)

**联系电话:**024-25691417(传真)

**联系人:**黄 静

**通信地址:**沈阳市铁西区兴华南街58号663信箱110023 沈阳市仪器仪表与自动化学会

**电子信箱:**[syias@126.com](mailto:syias@126.com)(有关会议论文投稿等信息的咨询)

**意见反馈:**[feedback@126.com](mailto:feedback@126.com)(对于会议的意见、建议等)

中国仪器仪表学会  
2006年11月15日