

文章编号 1004-924X(2007)05-0753-08

在 CSOCT 系统中抑制线性相移误差的校正算法

郑 羽^{1,2}, 李 刚¹, 刘晶晶¹, 张泰石¹, 林 凌¹

(1. 天津大学 精密仪器与光电子工程学院, 天津 300072; 2. 天津工业大学 信息与通信工程学院, 天津 300160)

摘要:从理论上详细分析了经典相移算法对线性相移误差的敏感度,用频域和空域两种分析方法对定步长算法抑制线性相移误差的能力进行了分析。建立了含有线性相移误差复频域 OCT 空域分析法的仿真模型,并对测试样品进行了实验。实验结果表明,五帧相移算法对真实层析结构影响小,对镜像尾迹有完全的抑制作用,能够真正地实现 100% 的全量程的有效探测。

关键词:线性相移误差;空域分析;相位提取算法;复频域 OCT

中图分类号:R814.42;TP391 **文献标识码:**A

Correction algorithm of restriction of linear phase-shift error in complex spectral OCT system

ZHENG Yu^{1,2}, LI Gang¹, LIU Jing-jing¹, ZHANG Tai-shi¹, LIN Ling¹

(1. School of Precision Instruments and Opto-electronic Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China; 2. School of Information and Communication Engineering, Tianjin Polytechnic University, Tianjin 300160, China)

Abstract: The conventional phase-shift methods in acquiring initial phase under the impact of linear-shift error are analyzed, and the ability of a fixed step algorithm to restrict the linear phase-shift error is researched by frequency domain and spatial domain analysis methods. The emulation model of a Complex Spectral Optical Coherence Tomography(CSOCT) spatial analysis for linear phase-shift is established, and the results are given in accordance with emulation in spatial domain and experiment. The analysis indicates that five frame phase-shift method impacts real structures of the sample in a least degree, restricts mirror image best and obtains images of the sample in 100% range.

Key words: linear phase-shift error; spatial analysis; phase-shift algorithm; complex spectral OCT (CSOCT)

1 引 言

光学层析成像(Optical Coherence Tomo-

graphy, OCT)技术在 20 世纪的最后 10 年得到了发展并且成为医学中重要的诊断技术^[1-3]。在眼科学中的应用是它最重要的表现^[4]。较早出现的 OCT 是时域光学相干层析成像技术,它在相

收稿日期:2006-12-10;修订日期:2007-02-18.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 60174032)

干长度的范围内是逐点进行数据采集的,为了得到样品一个轴向的深度信息,参考臂必需进行深度位置扫描,这样就大大限制了它的扫描速度。在很短的采集时间内,排除测量法中轴向的机械移动部分,直接获取谱信息,从而提高成像速度,是频域 OCT 技术相对于时域 OCT 的优势^[5-7]。但是要提高图像的分辨率,实现全量程探测,目前最常用的方法就是复频域 OCT^[8,9]。

相移干涉术已经在光学相干技术中得到了广泛的应用,它能够提取隐含在干涉条纹中的相位信息。通过连续改变光程差得到的多帧干涉图,可采用相位提取算法得到相位信息。光程差的改变通常是由压电陶瓷(PZT)相移器来实现的。相移干涉术中的时间相移法是目前应用最普遍的方法之一^[10],它包括定步长相移算法和任意步距相移算法。在理想的情况下,各种相位提取算法均应给出一致的结果,但是在实际应用中,其准确性受到诸多误差因素的影响,由于各种相位提取算法对误差敏感程度的不同,导致了不同的算法在同一测量点处给出不一致相位值的情形。对于任意步距算法,尽管从原理上消除了对相移步距 Δ 的确定性限制,但它对误差的免疫能力却是用牺牲计算量和复杂程度换来的^[11],不利于 OCT 系统快速实现成像的要求。虽然相移步距有很大的任意性,但并非任何相位值都可计算出来,还要根据系统误差特性来选择合适的相移步长^[12]。对于定步长算法,通常对相移器进行的相移标定,可使相位求解算式简单,提高运算速度,非常适用复频域 OCT 系统的快速成像。尽管三帧、四帧算法已经能够计算出相位分布,但这种求解过程对于各种系统误差及随机误差比较敏感^[13-16]。在此基础上运用扩展平均技术^[17]得到的改进算法大大提高了它们对各种误差的抑制能力,其中要求相移步距为 $\pi/2$ 五帧算法因为计算简洁,对各种误差具有显著的抑制,所以在当前的 OCT 系统中得到广泛应用。此外,相移步距为 $\pi/2$ 时,Stoiliv 算法演变为五帧算法,Stoiliv 算法在相移步距为 $\pi/2$ 时对相移器误差有很好的抑制能力,而且对光强误差最不敏感^[12,18]。

相移干涉法测量相位的准确性受到诸多误差因素的影响,如相移器相移误差、光强信号非正弦性误差、探测器的非线性响应、信号的量化误差、频率混叠、被测面无规则的发射率、参考面平板质

量、光学系统象差、空气扰动、振动等。其中,空气扰动及振动为动态变量,为减小它们的影响,可将干涉测量系统置于隔振台上,并尽量缩短数据采集时间。解决其它各项误差的方法是:采用合理的仪器结构,引入恰当帧数的相移,系统误差存储后相减。然而,在实验中对相移器很难做到精确的标定,因此线性相移误差就成为无法抑制的主要系统误差。

本文用频域和空域两种分析方法对定步长算法抑制线性相移误差的能力进行了分析,建立了含有线性相移误差复频域 OCT 空域分析法的仿真模型,并对测试样品进行了实验。

2 理 论

2.1 复谱频域 OCT 的基本原理

频域 OCT 技术基于光谱干涉原理,即宽频光源的干涉信号被光谱仪接收。OCT 系统的核心部件是迈克尔逊干涉仪。光源发出的光被分成部分相干的两个光束,一束为参考光,另一束为样品光。参考光经镜面反射后返回,可以表示为 $E_R \exp(i2kr)$,其中: E_R 为参考光的幅值, $k=2\pi/\lambda$ 为波数, $2r$ 为参考镜的光程长。样品光穿透样品,在样品的不同深度处都存在后向散射,不同深度处的后向散射光按照原光路返回,故可以表示为 $\int_{-\infty}^{\infty} a(z) \exp(i2k(r+nz)) dz$,其中: $a(z)$ 为样品深度处的背向散射系数, n 为样品折射率, $2(r+nz)$ 为样品深度 z 处对应的光程长。干涉信号用光谱仪接收,干涉光谱 $I(k)$ 可以表示为:

$$I(k) = S(k) \{ E_R^2 + E_R \left[\int_{-\infty}^{\infty} a(z) \exp(-i2knz) + \int_{-\infty}^{\infty} a^*(z) \exp(i2knz) \right] + \sum_i \sum_j R_i R_j \cos(2kD_{ij}) + \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} a(z) a(z^*) \exp(i2k(nz - nz^*)) dz dz^* \} \quad (1)$$

其中 $S(k)$ 为光源的功率谱, R_i 和 R_j 是样品轴向上不同位置的反射率, D_{ij} 为样品中不同反射面的光程差。它由四项组成,第一项为固定值即光源光谱,第二项是样品光和参考光互相关的实部,它反映了在轴向上深度上有关样品的信息,余弦函数的总和,每个余弦函数的幅度与相应深度上

样品的背向散射系数 $a(z)$ 成正比,第三项和第四项为样品中不同位置的互相关与自相关。在输出光场中,第一项、第三项和第四项为直流项和寄生项,不能定位物体的层析结构,所以将它们都归结为图像的背景噪声 $E^*(k)$,此外规定 $E_R(k) = S(k)E_R$ 。这样公式(1)可以重新写为:

$$I_1(k) = E^*(k) + E_R(k) \left(\int_{-\infty}^{\infty} a(z) \exp(-i2knz) dz + \int_{-\infty}^{\infty} a^*(-z) \exp(i2knz) dz \right) = E^*(k) + E(k) \cos(\phi(k)), \quad (2)$$

如果能够正确获得互相关项的幅度 $E(k)$ 和相位 $\phi(k)$,就可以求得样品的真实层析结构如下:

$$FT^{-1}(E(k) \exp(-\phi(k))) = a(z), \quad (3)$$

驱动相移器使参考镜产生不同的相移步距,可以得到多帧干涉图。然后采用相位提取算法,获得干涉图的幅度和相位,利用它们合成复函数,对其作傅里叶逆变换,就可以得到物体的真实层析结构,避免谱频域 OCT 中寄生项和镜像的影响。

2.2 在频域上定步长相移算法对相移器的线性误差抑制的理论分析

如果相移器有一个固定的误差,则实际相移为: $\delta^* = \delta + \epsilon$ 其中 δ 为理想相移, ϵ 为误差因子。

对相移步长为 $\frac{\pi}{2}$ 三帧相移算法,设 $\alpha = 90^\circ + \epsilon$, ϕ 为 $\epsilon = 0$ 时的理想相位值, ϕ^* 为测量值,则可以得到:

$$\tan \phi^* = \frac{2I_2(k) - I_1(k) - I_3(k)}{I_1(k) - I_3(k)}, \quad (4)$$

$$E(k) = \frac{\sqrt{(I_1(k) - I_3(k))^2 + (2I_2(k) - I_1(k) - I_3(k))^2}}{2}, \quad (5)$$

$$\tan \phi^* = \frac{1}{\tan(45^\circ + \frac{\epsilon}{2})} \tan \phi, \quad (6)$$

其中, $I_1(k)$ 、 $I_2(k)$ 和 $I_3(k)$ 分别表示连续相移等间隔为 α 的 3 幅干涉谱,可以表示如下:

$$I_1(k) = E^*(k) + E(k) \cos(\phi(k)), \quad (7)$$

$$I_2(k) = E^*(k) + E(k) \cos(\phi(k) + \alpha), \quad (8)$$

$$I_3(k) = E^*(k) + E(k) \cos(\phi(k) + 2\alpha). \quad (9)$$

由公式(4)和(6)解得相位差为:

$$\Delta\phi = \phi^* - \phi \approx \frac{\epsilon \sin(2\phi)}{2 + \epsilon \cos(2\phi)}, \quad (10)$$

同样的方法应用于四帧算法,可以得到如上一样的结果。类似地,对五帧算法,推导得到相位差为:

$$\Delta\phi = \frac{\sin^2\left(\frac{\epsilon}{2}\right) \sin(2\phi)}{\cos(\epsilon) \cos^2(\phi) + \sin^2(\phi)} \approx \frac{\epsilon^2}{4} \sin(2\phi), \quad (11)$$

由式(10)和(11)可以画出三帧、四帧和五帧算法对线性相移误差的敏感度分析表,从图(1)可以清楚地看到五帧相移算法对线性相移误差的敏感度小于三帧、四帧相移算法。

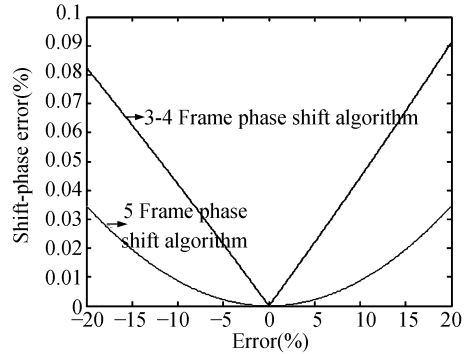


图 1 三种相移算法对线性相移误差的敏感度
Fig. 1 Sensitivity of three phase-shift algorithms to linear phase shift error

2.3 在空域上定步长相移算法对相移器的线性误差抑制的理论分析

相移步长为 $\frac{\pi}{2}$ 的三帧相移算法也可以用公式(12)来表示:

$$I(k) = (I_1(k) - I_3(k)) + i(2I_2(k) - I_1(k) - I_3(k)), \quad (12)$$

由于傅里叶逆变换是线性的,因此在理想情况下对式(11)进行傅里叶逆变换就可以直接得到样品的真实层析结构 $a(z)$,在空域图像重建后对线性相移误差的分析将更加直观,其它相移算法原理与三帧算法相同。

在引入线性相移误差的情况下,对连续三帧图像进行傅里叶逆变换得到:

$$I_1(z) = E^*(z) + E_R(z)(a(z) + a^*(-z)), \quad (13)$$

$$I_2(z) = E^*(z) + E_R(z)(a(z) \exp(-i\phi_2) + a^*(-z) \exp(i\phi_2)), \quad (14)$$

$$I_3(z) = E^*(z) + E_R(z)(a(z) \exp(-i\phi_3) + a^*(-z) \exp(i\phi_3)). \quad (15)$$

其中: $\phi_2 = \frac{\pi}{2} + \epsilon$, $\phi_3 = \pi + 2\epsilon$, ϵ 为相移器引入的线

性相移误差。由于本文主要讨论的是线性相移误差,在这里可以忽略 3 幅图像的背景噪声的差异,所以将 $E^*(z)$ 和 $E_R(z)$ 看成常数。将以上 3 式带入 $I(z) = (I_1(z) - I_3(z)) + i(2I_2(z) - I_1(z) - I_3(z))$ 可以得到:

$$I(z) = a(z)[2\exp(-i\epsilon) + 1 + \exp(-i2\epsilon)] + a^*(-z)(1 + \exp(i2\epsilon) - 2\exp(i\epsilon)) + ia(z)(\exp(-i\epsilon) - 1) + ia^*(-z)(\exp(i2\epsilon) - 1), \quad (16)$$

同理将引入线性相移误差的相移干涉式用四帧、五帧和六帧相移算法计算,分别得到公式(17)、(18)和(19):

$$I(z) = a(z)(-\exp(-i3\epsilon) - \exp(-i\epsilon) - 1 - \exp(-i2\epsilon)) + a^*(-z)(\exp(i3\epsilon) + \exp(i\epsilon) - 1 - \exp(i2\epsilon)), \quad (17)$$

$$I(z) = a(z)(2\exp(-i2\epsilon) + \exp(-i4\epsilon) + 1 + 2\exp(-i\epsilon) + 2\exp(-i3\epsilon)) + a^*(-z)(2\exp(i2\epsilon) + \exp(i4\epsilon) + 1 - 2\exp(i\epsilon) - 2\exp(i3\epsilon)), \quad (18)$$

$$I(z) = a(z)(1 + 4\exp(-i2\epsilon) + 3\exp(-i4\epsilon) + 3\exp(-i\epsilon) + 4\exp(-i3\epsilon) + \exp(-i5\epsilon)) + a^*(-z)(1 + 4\exp(i2\epsilon) + 3\exp(i4\epsilon) - 3\exp(i\epsilon) - 4\exp(i3\epsilon) - \exp(i5\epsilon)). \quad (19)$$

从以上理论分析得出,线性误差影响了物体的真实结构 $a(z)$,并引入了图像噪声真实像的镜像 $a^*(-z)$ 。

3 空域仿真模型

本文对单层反射镜建立了空域仿真模型,并且引入了相对于理想相移量在 ± 0.2 范围内的线性相移误差,分别采用三、四、五、六帧相移算法来重建图像,从图 2 可以看到,三帧相移算法有明显的镜像尾迹,并且当线性相移误差发生变化时,对真实层析结构影响较大。四帧相移算法有明显的镜像尾迹,当线性相移误差发生变化时,对真实层析结构影响较小。五、六帧相移算法基本消除了由于线性相移误差带来的镜像尾迹,对真实层析结构的影响较小。

为了更清楚地表达不同相移算法对线性相移误差的抑制,笔者提取相移误差为相移量 20% 的一个断面,如图 3 所示。图 4 表示对图 3 中真实层析结构的放大图,其中(b)曲线代表没有相移

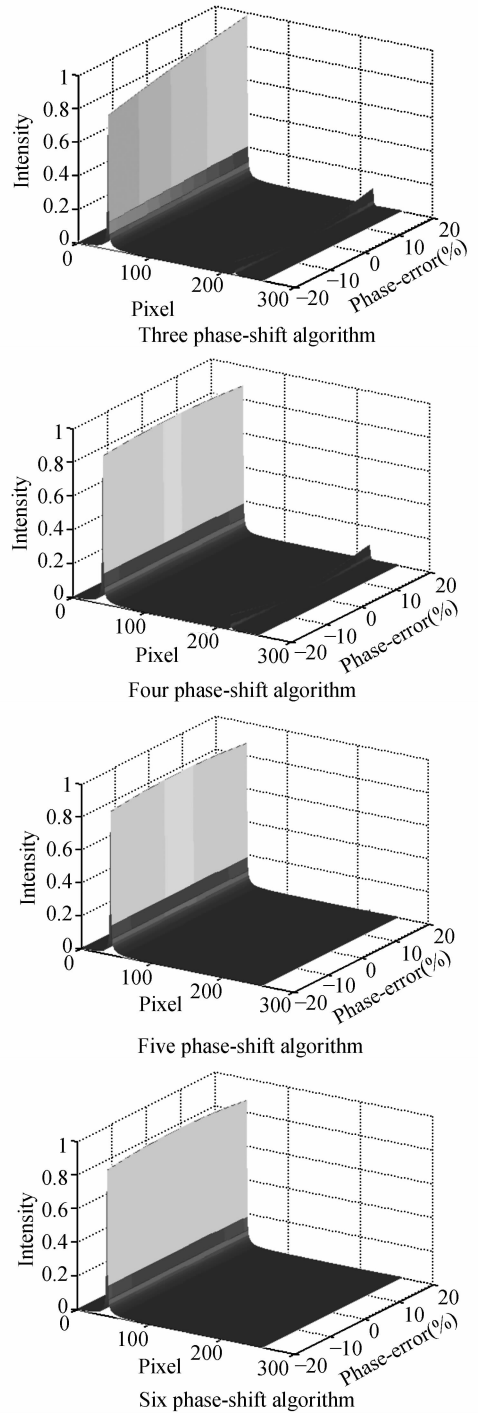


图 2 样品为单层反射镜的空域定步长三维仿真模型
Fig. 2 3-D emulation model of a reflecting mirror with one layer

误差的图像,而(a)、(c)、(d)和(e)依次代表三帧、四帧、五帧、六帧相移算法的图像。可以明显看到,对于真实的层析结构,三帧相移算法对图像的影响最大,而用四帧、五帧和六帧算法重建图像的幅度依次减小,并且图像的幅度变化不大。图 5

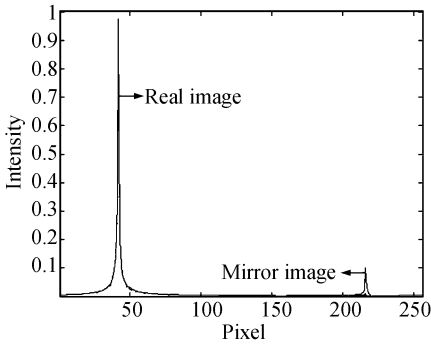


图 3 样品为单层反射镜的定步长二维仿真模型

Fig. 3 2-D emulation model of a reflecting mirror with one layer

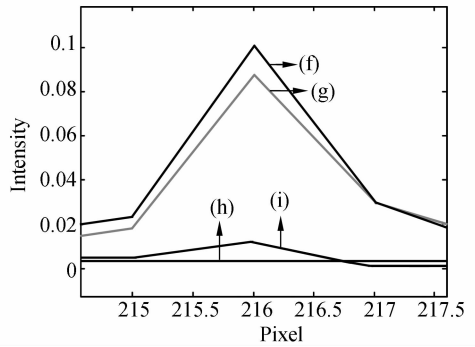


图 5 图 3 中镜像的放大图

Fig. 5 Zoomed out mirror image in Fig. 3

表示相移算法未消除的镜像尾迹, (f)、(g)、(i)、(h)代表由三帧、四帧、五帧、六帧算法(没有相移误差的图像基本同六帧曲线重合)的镜像尾迹,从图中可以清楚地看到三帧相移算法所未消除的镜像尾迹是最大的,而四帧相移算法略小于三帧相移算法,但是也有很明显的镜像的尾迹,而五帧和六帧相移算法对镜像的尾迹抑制得较好。

是50 : 50;干涉光通过一个光栅(1 200 l/mm),在观察平面上形成一个频域傅里叶平面,观察平面上放置了一个 CCD 相机(8 位、256 pixel × 256 pixel,帧速率为 955 帧/s);微位移平台移动方向的扫描范围为 50 mm。微调的范围是 2.5 μm,最高精度范围是 0.01 μm,可以实现横向高精度扫描;相移器采用音圈驱动器。

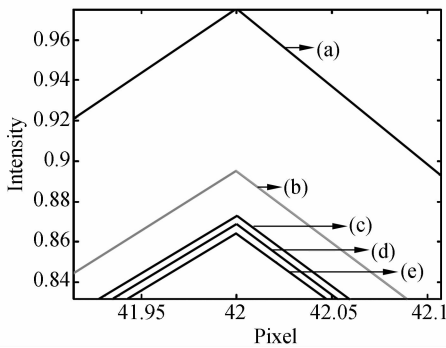


图 4 图 3 中真实相的放大图

Fig. 4 Zoomed out real image in Fig. 3

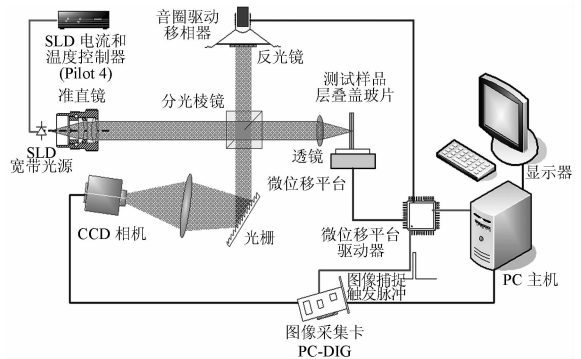


图 6 实验系统的总体结构

Fig. 6 Schematic of the complex spectral OCT device

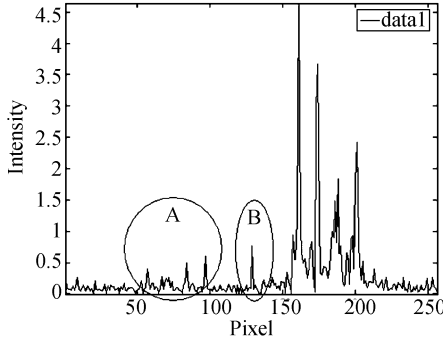
4 实验设备

复谱频域 OCT 实验装置的核心是迈克尔逊干涉仪(如图 6 所示),宽频光源选用一个超发光二极管(SLD, 370-HP),SLD 电流控制器和温度控制器为 PILOT-4,最大的输出功率为 10 mW,光源中心波长是 841.3 nm,光源的带宽是 50.2 nm(实际上在 CCD 探测器所接收到的是分光后的干涉谱,分光后准单色光的带宽就变得很小,所以很容易得到干涉条纹);入射光通过分光器被分为参考光和信号光线,分束棱镜的分束比

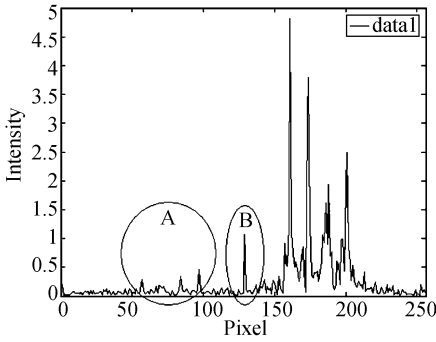
5 实验结果和分析

本文构建的复谱频域 OCT 系统用 3 片叠放的盖波片作为样品,每片盖波片的厚度为 100 μm。为了获取真实的层析结构和实现全程的有效探测,首先获得了相移步长为 π/2 连续相移干涉图,采用定步长算法进行图像的重建。图 7 为重建图像的一个横向位置的幅度谱,图 7 (a)为采用三帧定步长相移算法后的结果,可以清楚地看到由于相移器的线性误差导致镜像尾迹的存在(如图中标 A 的区域),而图 7(b)为采用四帧定步长相移算法后的结果,也可以清楚地看到由

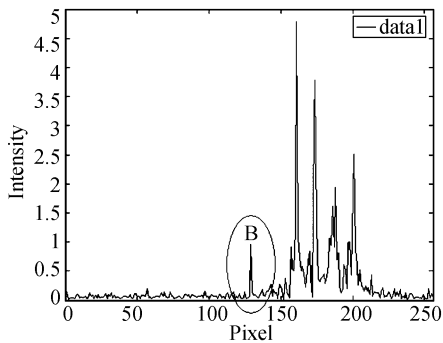
于相移器的线性误差导致镜像尾迹的存在(如图中标 A 的区域),而图 7(c)为采用五帧定步长相移算法后的结果,可以看到镜像尾迹被很好的抑制。采用六帧定步长相移算法同五帧结果类似,由于六帧算法得到的干涉图数量多,相位解调运算量大,所以本文推荐采用五帧算法。由于在采集连续相移干涉图的过程中直流背景噪声不相



(a) 三帧相移算法
(a) Three phase-shift algorithm



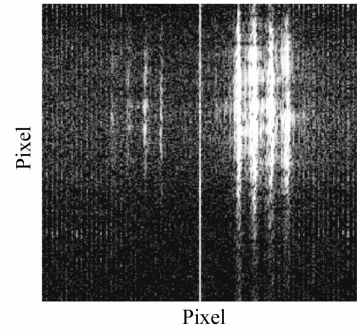
(b) 四帧相移算法
(b) Four phase-shift algorithm



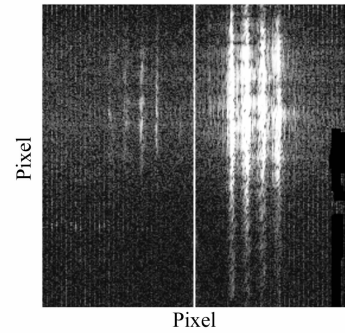
(c) 五帧相移算法
(c) Five phase-shift algorithm

图 7 复频谱 OCT 的幅度谱

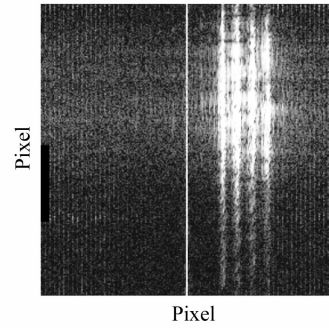
Fig. 7 Amplitude spectra obtained by complex spectral OCT



(a) 三帧相移算法
(a) Three phase-shift algorithm



(b) 四帧相移算法
(b) Four phase-shift algorithm



(c) 五帧相移算法
(c) Five phase-shift algorithm

图 8 复频谱 OCT 的层析图像

Fig. 8 Tomographic image obtained by complex spectral OCT

同,导致在运算的过程中背景噪声没有完全消除掉(如图 7 中标 B 的区域)。图 8 为重建层析图像,所得到的层析图中包含有 30 条水平线,是经过 30 次横向扫描后的结果。从图中可以清楚地看到五帧相移算法对镜像有很好的抑制作用,能

够真正地实现全量程的有效探测。

6 结 论

本文用频域和空域两种分析方法对利于OCT成像的定步长算法进行了分析,结果证明两

种分析方法得出的结论一致:相移步距为 $\pi/2$ 的五帧算法性能最优,从空域分析方法能更直观地看出:五帧相移算法对真实层析结构影响较小,对镜像尾迹有很好的抑制作用,能够真正地实现全量程的有效探测。

参考文献:

- [1] 郑羽,李刚,张泰石,等.采用特殊镀膜分数器的OCT系统性能分析[J].光学精密工程,2006,14(6):1082-1088.
ZHENG Y,LI G,ZHANG T SH, *et al.*. Performance analysis of an optical coherence tomography system with special coating beam splitter[J]. *Opt. precision Eng.*, 2006,14(6):1082-1088. (in Chinese)
- [2] 胡海峰,姚建铨.利用 Monte Carlo 模拟技术研究 OCT 图像对比度[J].光学精密工程,2004,12(1):94-99.
HU H F, YAO J Q. Application of Monte Carlo simulation technology in OCT imaging contrast [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2004, 12(1):94-99. (in Chinese)
- [3] 张泰石,李刚,郑羽,等.用线性补偿法和 CCD 响应补偿法来提高频谱 OCT 图像质量[J].光学精密工程,2006,14(5):929-933.
ZHENG T SH,LI G,ZHENG Y, *et al.*. Improvement of spectral domain OCT image quality by linear interpolation and CCD response compensation[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2006,14(5):929-933. (in Chinese)
- [4] 薛玲玲,张春平,王新宇,等.OCT 技术在生物组织中的应用[J].激光杂志,2000,21(1):6-9.
XUE L L,ZHANG CH P,WANG X Y, *et al.*. Application of OCT technique in bio-tissue[J]. *Laser J.*, 2000,21(1):6-9. (in Chinese)
- [5] LEITGEB R, HITZENBERGER C K, FERCHER A F. Performance of Fourier domain vs. time domain optical coherence tomography[J]. *J. Opt. Exp.*, 2003,11(8):889-894.
- [6] NASSIF N A, GENSE B. In vivo high-resolution video-rate spectral-domain optical coherence tomography of the human retina and optic nerve[J]. *J. Opt. Exp.*, 2004,12(3):367-376.
- [7] TOMLING P, WANG R K. Theory developments and applications of optical coherence tomography[J]. *Appl. Phys.*, 2005,38(8):2519-2535.
- [8] FERCHER A F, LEITGEB R. Complex spectral interferometry OCT[J]. *SPIE*, 1998,3564:173-178.
- [9] WOJTKOWSKI M, KOWALCZYK A. Full range complex spectral optical coherence tomography technique in eye imaging [J]. *J. Opt. Lett.*, 2002,27(8): 1415-1417.
- [10] ABHIJIT P, RAJESH L, PRAMOD R, *et al.*. An integral approach to phase shifting interferometry using a super-resolution frequency estimation method[J]. *Appl. Opt.*, 2004,12(4):4681-4697.
- [11] 侯立周,强锡富.几种任意步距步进相移算法的误差分析与对比[J].光学技术,1999,25(5):7-10.
HOU L ZH,QIANG X F. Analysis and comparison of errors in several phase-stepping algorithm with an arbitrary step[J]. *Opt. Tech.*, 1999,25(5):7-10. (in Chinese)
- [12] 钱克茅.光学干涉计量的位相测量方法的研究[D].中国科学技术大学,2000.
QIAN K M. Investigation of phase measurement methods in optical interferometry[D]. *University of Science Technology of China*, 2000. (in Chinese)
- [13] SCHWIDER J, BUROW R, ELSSNER K E, *et al.*. Digital wave-front-measuring interferometry: some systematic error sources[J]. *Appl. Opt.*, 1983,22:3421-3432.
- [14] WINGERDEN J V, FRANKENA H J, SMORENBURG C. Linear approximation for measurement errors in phase shifting interferometry[J]. *Appl. Opt.*, 1991,30:2718-2729.
- [15] SURREL Y. Design of algorithms for phase measurements by the use of phase stepping[J]. *Appl. Opt.*, 1996,35: 51-60.
- [16] SCHWIDER J, FALKENSTORFER O, SCHREIBER H, *et al.*. New compensating four-phase algorithm for

phase-shift interferometry[J]. *Opt. Eng.*, 1993, 32: 1883-1885.

- [17] SCHMIT J, CREATH K. Extended averaging technique for derivation of error-compensating algorithms in phase-shifting interferometry[J]. *Appl. Opt.*, 1995, 34: 3610-3619.
- [18] STOILOV G, DRAGOSTINOV T. Phase-stepping interferometry: five-frame algorithm with an arbitrary step[J]. *Opt. Lasers Eng.*, 1997, 28: 61-69.

作者简介:郑 羽(1974—),男,天津人,博士研究生,研究方向为生物信息检测。E-mail:kpa_zy@163.com

李 刚(1959—),博士,教授,主要从事信号检测与处理、生物医学工程方面的研究。E-mail:ligang59@tju.edu.cn