

相关多普勒光学层析成像*

黄良敏 丁志华[†] 洪威 王川

(浙江大学现代光学仪器国家重点实验室, 杭州 310027)

(2011 年 1 月 21 日收到; 2011 年 4 月 28 日收到修改稿)

提出了基于互相关的多普勒 OCT(correlated Doppler optical coherence tomography, CD-OCT) 方法, 能够有效的抑制噪声, 实现低信噪比条件下的流速探测. 对 CD-OCT 算法进行了详细的推导, 分析了噪声的相关性对该算法结果的影响, 最后基于谱域和时域联合探测方法 (joint spectral and time domain optical coherence tomography, STD-OCT) 以及 CD-OCT 算法的对比实验证明了该算法能够进一步实现信噪比的提高, 使测量的结果更为稳定.

关键词: 谱域多普勒相关层析成像, 互相关, 信噪比

PACS: 34.80.Pa, 42.30.Wb, 87.63.dk

1 引言

光学相干层析成像 (optical coherence tomography, OCT)^[1-4] 是由上世纪 90 年代提出的一种生物医学成像技术, 它通过收集组织的背向散射光来得到高分辨的组织内部结构图像. OCT 系统可以分为时域 OCT 和谱域 OCT 两类, 谱域 OCT(spectral domain OCT, SD-OCT) 通过测量干涉光谱来探测样品的深度信息, 不需要深度扫描, 因此大大提高了成像速度和系统灵敏度^[5-7].

为了获得组织中一些携带特异性信息的参数, 许多功能型 OCT 也相继得到发展^[8-10]. 其中多普勒 OCT^[8] 能够实现无损伤的在体血流速度的探测, 在医学研究和临床诊断上都有重要意义. 许多小组都做了多普勒流速测量方面的研究^[11-13], 这些研究都是基于相位分辨的方法来得到多普勒流速, 它是通过计算同一个横向位置上的相邻轴向扫描信号之间的相位变化来得到多普勒频移. 相位分辨方法虽然解决了功率谱分析中^[8] 速度分辨率和空间分辨率相互制约的矛盾, 但是它无法在低信噪比下使用, 并且对环境扰动非常敏感, 因此在进行在体血流速度测量的时候会引入较大的误差^[14].

最近报道了一种谱域与时域联合探测方法^[15](joint spectral and time domain optical coherence tomography, STD-OCT), 利用多次行扫描信号傅里叶变换后的频率而非相邻行的位相变化量来确定多普勒频移, 显著提高了速度信息获取的信噪比, 但是该算法在信噪比处于 0dB 左右的强噪声环境中就不太适用了.

为了能够在强噪声中提取信息, 相关的方法已经在许多研究领域被使用^[16-23], 这些研究成果都证明了互相关能够有效的抑制噪声并提高信噪比. 通信及测距等领域中使用的伪随机 (pseudo-noise, PN) 编码也是利用互相关的抑噪特性来提高系统的信噪比和测量准确度^[24]. 本文提出了一种基于互相关的多普勒 OCT(correlated Doppler optical coherence tomography, CD-OCT) 算法, 该算法利用互相关来抑制噪声, 能够实现超低信噪比情况下的流速探测, 同时该算法与 STD-OCT 一样不需要任何硬件上的改进.

2 理论

在谱域 OCT 中, 光谱仪在一个积分时间内获

* 国家自然科学基金 (批准号: 60978037, 60878057) 资助的课题.

[†] E-mail: zh_ding@zju.edu.cn

得一组光谱信号 (A-line), 对其进行逆傅里叶变换得到深度信息, 当样品中包含流速信息时, 大部分的多普勒 OCT 算法都需要两组或多组 A-line 信号来求出多普勒频移. CD-OCT 的处理流程如图 1 所

示, 光谱仪所获得的一系列光谱信号 (图 1(a)), 略去直流项和自相关项, 可以表示为

$$I(k, t) = 2S(k) \int_0^\infty a(z) \times \cos(2kn(z + v(z, t)t)) dz, \quad (1)$$

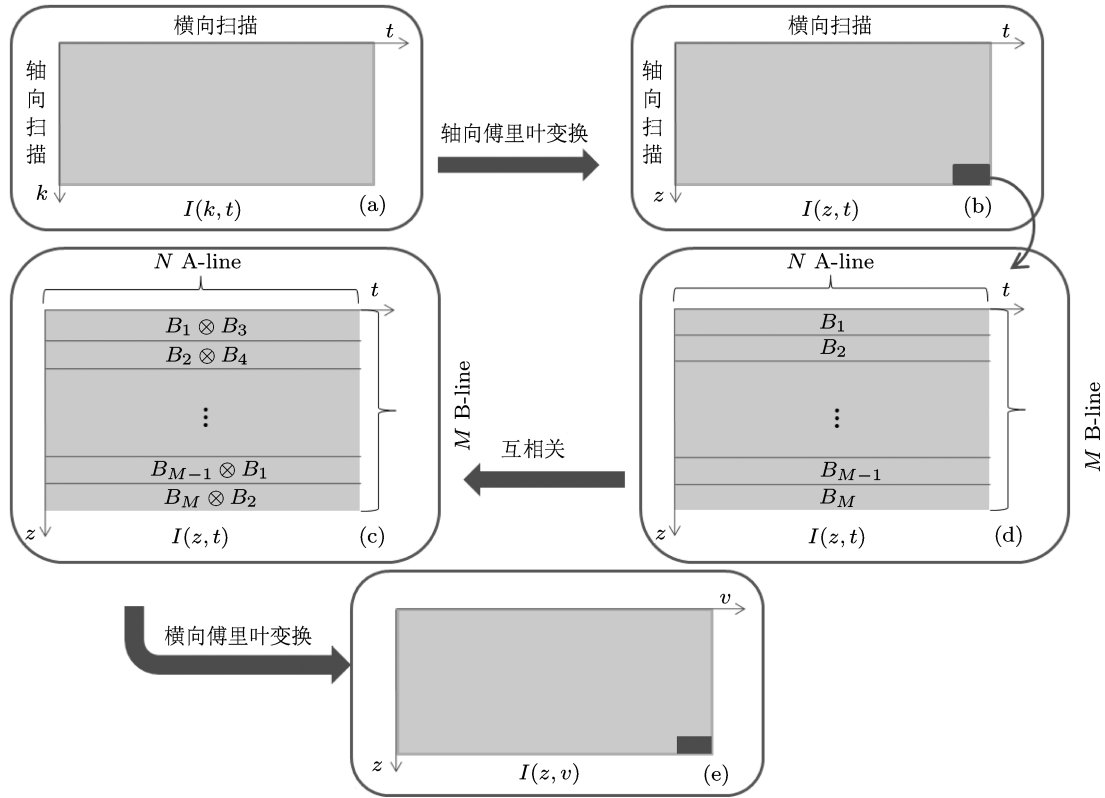


图 1 CD-OCT 算法处理流程 (a) 由 A-scan 和 B-scan 构成的二维干涉信号; (b) 经过一维傅里叶变换的 OCT 结构图; (c) 某一分辨单元内的结构数据, 由 N 列 A-line 和 M 行 B-line 构成; (d) 将相邻 B-line 互相关后的数据; (e) 对应于不同深度的流速分布图

其中 k 为波数, t 表示不同 A-line 的时间, $a(z)$ 为样品不同深度的后向散射系数, $v(z, t)$ 表示样品中不同位置的平行于光束入射方向的流速大小. 对 (1) 式进行轴向傅里叶变换并略去复共轭项得到

$$I(z, t) = F^{-1}[I(k, t)] = 2F^{-1}[S(k)] \otimes [a(z, t)] \exp(i2nkv(z, t)t). \quad (2)$$

此为 OCT 所获得的结构信息 (图 1(b)), 对于同一深度 z_0 位置的某一分辨单元内 (图 1(b) 中的黑色方块), 现对其进行 N 次重复扫描, 则这个分辨单元数据为一个 $M \times N$ 的矩阵 (图 1(c)), 现假设这个分辨内的 $a(z_0, t)$ 和 $v(z_0, t)$ 均为一定值, 则一组 B-line 信号可表示为

$$B(z_0, t) = R \cos(2nkv_0 t), \quad (3)$$

其中 $R = 2F^{-1}[S(k)] \otimes [a(z_0, t)]$, v_0 为这个分辨单元内平行于入射光的流速分量信息, 对应的多普勒频移为

$$f_d = \frac{2nv_0}{\lambda}. \quad (4)$$

则能分辨的最大流速为

$$v_{\pm \max} = \pm \frac{\lambda}{4n dt}, \quad (5)$$

其中 λ 为中心波长, dt 为相邻 A-line 的时间间隔.

能分辨的最小流速为

$$v_{\pm \min} = \pm \frac{\lambda}{4n \pi dt \sqrt{\text{SNR}}}, \quad (6)$$

SNR(signal-to-noise ratio) 为系统的信噪比, 现假设系统位于一个相对稳定的环境中, 则近似认为系统中的噪声为高斯白噪声, 于是一组 B-line 信号可表

示为

$$B_1(z_0, t) = R \cos(2nk v_0 t + \varphi_1) + w n_1(z_0, t, \text{SNR}), \quad (7)$$

其中 φ_1 为每组 B-line 不同的初始相位, 当信噪比降低时, 该值也显著增大, 由于该值的存在, 每组 B-line 信号仅在频率部分一致的, 这将使得利用算术平均来提高信噪比变得不可行. 对于这样两组相同频率的余弦信号, 对其进行互相关之后的结果仍然为余弦信号, 且频率不变^[15], 现对同一分辨单元中的两组 B-line 做互相关 (图 1(d)), 由于这两个深度仍然位于一个分辨单元内, 因此近似认为信号部分频率不变, 并假设噪声不相关, 于是可得

$$\begin{aligned} R(\tau) &= \frac{1}{2T} \int_{-T}^T B_1(z_0, t) B_2(z_0, t + \tau) dt \\ &= \frac{R^2}{2} \sqrt{(A + \cos \varphi)^2 + \sin^2 \varphi} \\ &\quad \times \cos(2nk v_0 \tau + \theta), \end{aligned} \quad (8)$$

其中

$$\begin{aligned} A &= \frac{\sin(4nk v_0 T)}{4nk v_0 T}, \\ \varphi &= \varphi_2 - \varphi_1, \\ \theta &= \arctan\left(\frac{\sin \varphi}{A + \cos \varphi}\right). \end{aligned} \quad (9)$$

(8) 式的其他项由于其噪声与信号以及不同噪声间的无关性略去了, 由其结果可知依然准确的保留了流速的信息, 再对其进行横向傅里叶变换即可

得到所需要的流速信息 (图 1(e)).

相关之后信噪比的变化可表示为^[17-19]

$$\left(\frac{S}{N}\right)_{\text{after}} = \frac{N_{\text{corr}} \left(\frac{S}{N}\right)_{\text{before}}^2}{1 + 2 \left(\frac{S}{N}\right)_{\text{before}}}, \quad (10)$$

其中 N_{corr} 为进行相关的数据点的个数, S 为信号的强度, N 为噪声的强度. 由公式易知, 当 $(N_{\text{corr}} - 2) \left(\frac{S}{N}\right)_{\text{before}} > 1$ 时, 信噪比将得到提高.

3 实验

3.1 噪声的相关性

从之前的理论推导可知, 噪声的无关性是得出相关抑噪结论的基本假设, 因此首先需要考察不同 B-line 之间噪声的相关性.

利用压电陶瓷 (piezoelectric ceramic, PZT) 驱动平面镜以 0.04 mm/s 的速度运动, 计算多普勒频移 $f_d = 95.8$ Hz, 便于区别周期信号以及噪声, 对镜面的同一位置进行 300 次重复扫描. 由于相邻行 B-line 信号在某些深度表现出一定的相关性, 故取其中镜面所在深度位置的两组相隔一行的 B-line 信号做互相关, 其互相关以及对其中一组 B-line 信号进行自相关的结果如图 2(I) 所示, 同时基于相同多普勒频移的软件模拟结果如图 2(II) 所示.

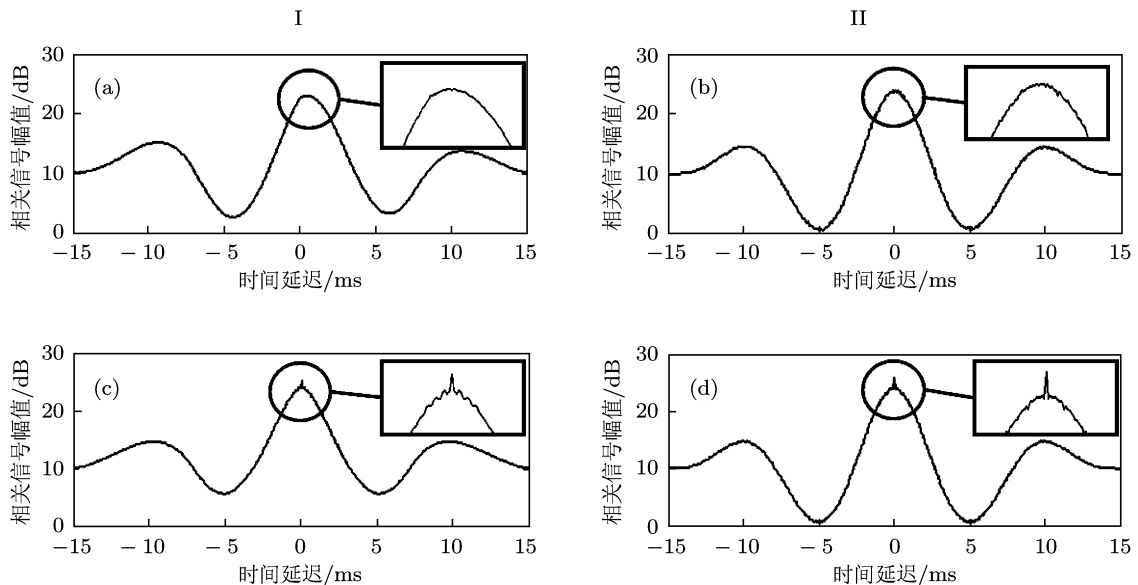


图2 两组 B-line 信号相关结果 I, II 分别为模拟和实验结果 (a), (b) 和 (c), (d) 分别为 B-line 信号互相关和自相关后的结果

图中可以看出, 模拟结果和实验结果得到了很好地符合, 当噪声具有很强的相关性的时候 (自相关), 在相关函数的零延迟位置会出现一个尖峰 (图 2(c), (d)), 这是由高斯白噪声的二电平特性导致的, 而两组数据互相关结果则没有这个尖峰 (图 2(a), (b)), 因此认为其噪声是不相关的. 自相关和互相关的区别仅在零延迟位置有无尖峰, 而整体的变化规律则是相同的, 这和之前的理论分析相符, 因为整体的变化规律对应于流速信息, 而对于相邻两行数据来说, 它们在空间上的距离非常的小, 近似认为是同一个点, 因此其对应的多普勒频移也

是一致的.

3.2 多普勒流速测量实验

实验中所用的 SD-OCT 系统如图 3 所示, 中心波长为 835 nm, 带宽 40 nm 的宽带光源发出的低相干光源经过一个 50/50 的光纤耦合器分成两路光分别进入样品臂和参考臂, 在探测臂利用光谱仪采集两臂返回的光, 最后对得到的数据应用相应的算法恢复出所要的流速信息.

为了验证相关 ODT 算法, 在进行实验时, 选择了两种样品: 平面镜和毛细管.

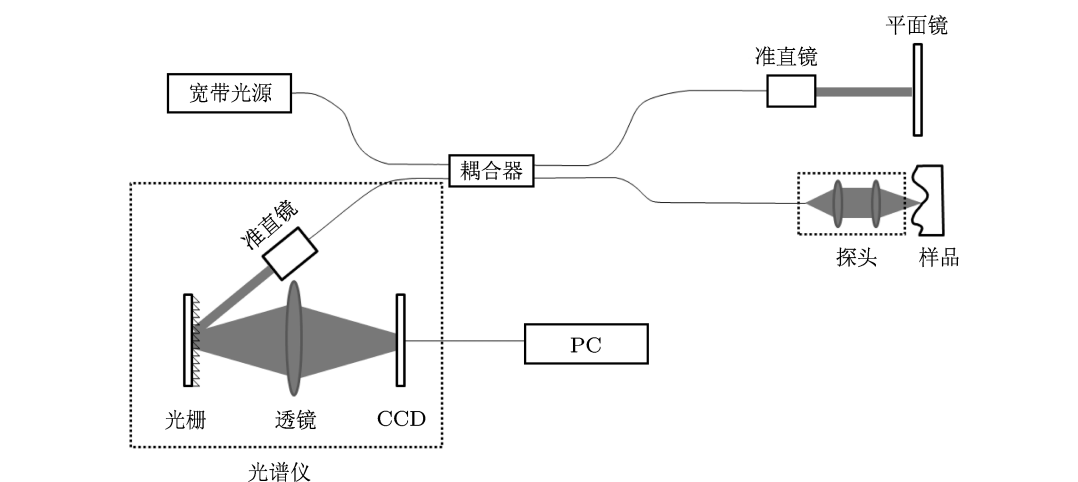


图3 SD-OCT 系统图

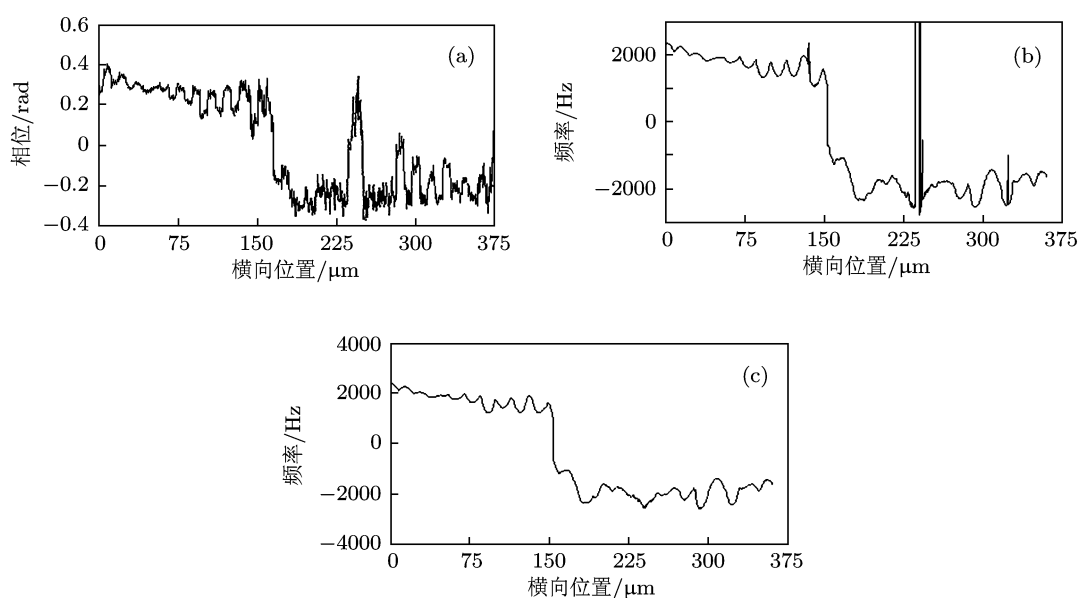


图4 平面镜的多普勒频移图 (a) 相位分辨方法; (b) STD-OCT 算法; (c) CD-OCT 算法

3.2.1 平面镜

在焦平面附近放置一块平面镜, 将其黏在能够实现纳米量级微位移移动的 PZT 上, 通过函数发生器控制 PZT 按特定的速度移动, 从而达到引入特定多普勒频移的目的.

实验中以频率为 10 Hz 的三角波驱动 PZT 运动, 其斜率即为平面镜的运动速度, 则在一个周期内, PZT 存在正负相反, 且绝对值近似相等的两种速度, 对这个周期内采集到的数据恢复出的多普勒频移如图 4 所示. 由于信噪比较低, 通过相位分辨方法获得的速度偏离真实值较大, 而 STD-OCT 方法则有了很大的提高, 但是在某些位置上, STD-

OCT 受高频噪声的影响得出的速度为一个高频值, 而 CD-OCT 则基本消除了这些误判的点, 测量的速度较为准确.

3.2.2 毛细管

将毛细管以与探测光束成 76° 的角度放置, 通过控制注射泵来控制管中聚苯乙烯小球溶液的流速. 现控制该溶液以平均速度 4 mm/s 的速度通过毛细管, 调整毛细管与零光程位置的距离来调整信噪比. 对 SD-OCT 采集的数据分别应用 CD-OCT 和 STD-OCT 的算法来计算多普勒流速, 其结果如图 5 所示.

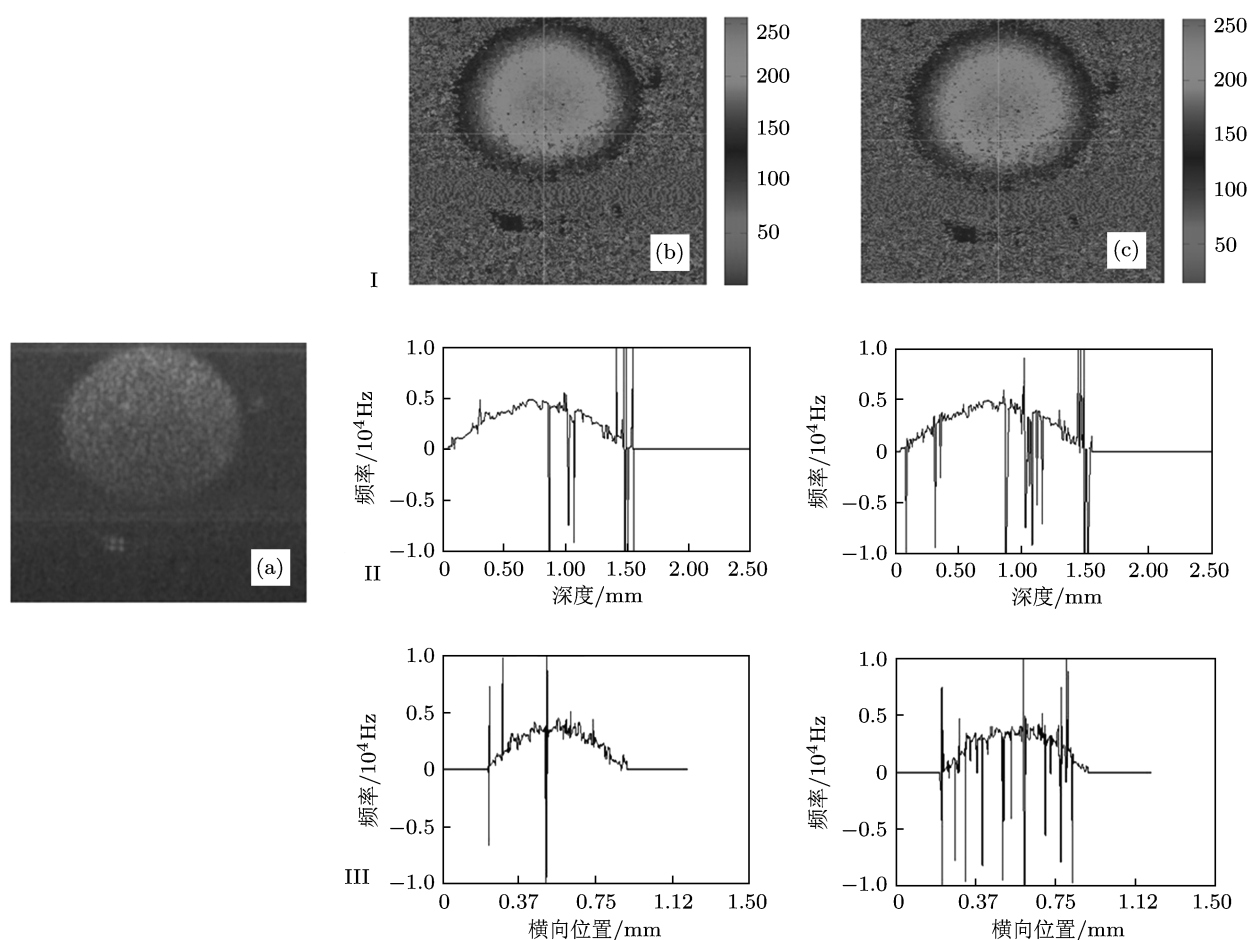


图 5 毛细管多普勒流速图 (a) 毛细管结构图; (b) CD-OCT 结果图; (c) STD-OCT 结果图 (I. 二维多普勒流速图; II. 轴向 (白线处) 流速分布; III. 横向 (白线处) 流速分布)

实验中我们选取了信噪比较低时的毛细管数据进行分析. 图 5(a) 为毛细管的结构图, 由于信噪比较低, 其图像整体较暗, 图 5(b) 和 (c) 分别为 CD-OCT 以及 STD-OCT 算法得到的结果, 观察可以

发现在 STD-OCT 算法得到的结果中由于信噪比较低, 图像中存在很多由于噪声而导致的高频噪点, 而经过相关之后, 其噪声得到抑制, 噪点也大为减少. 单独对图像中的一个横向 (图 5(II)) 和轴

向(图 5(III))位置进行观察(白线位置),这种噪声抑制效果更为明显,噪点的数量大大减少,提高了测量的准确度.

4 结 论

提出了一种基于互相关的多普勒 OCT 算法,能够在低信噪比的情况下有效的抑制噪声,提高多普勒流速测量的稳定性,对该算法进行了详尽的理论推导,并分析了相关前后信噪比的变化,受重复

扫描次数的影响,当系统信噪比为 $-10-0$ dB 时,相关后可以提高 $5-10$ dB,基于实验数据的噪声相关性分析与软件模拟结果完美地符合,不仅证明了理论推导的正确性,也验证了该算法的可行性.

之后利用 OCT 系统对匀速运动的平面镜以及通有聚苯乙烯小球溶液的毛细管进行了实验,对比了基于 STD-OCT 算法和 CD-OCT 算法获得的结果,证明了 CD-OCT 算法具有更佳的噪声抑制能力,能够在低信噪比环境中获得更为稳定准确的结果.

-
- [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] Liang Y M, Zhou D C, Meng F Y, Wang M W 2007 *Acta Phys. Sin.* **56** 3246 (in Chinese) [梁艳梅, 周大川, 孟凡勇, 王明伟 2007 物理学报 **56** 3246]
 - [3] Jia Y Q, Liang Y M, Zhu X N 2007 *Acta Phys. Sin.* **56** 3861 (in Chinese) [贾亚青, 梁艳梅, 朱晓农 2007 物理学报 **56** 3861]
 - [4] Yang Y L, Ding Z H, Wang K, Wu L, Wu L 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 1773 (in Chinese) [杨亚良, 丁志华, 王凯, 吴凌, 吴兰 2009 物理学报 **58** 1773]
 - [5] Leitgeb R, Hitzenberger C, Fercher A 2003 *Opt. Express*. **11** 889
 - [6] de Boer J F, Cense B, Park B H 2003 *Opt. Lett.* **28** 2067
 - [7] Choma M, Sarunic M, Yang C 2003 *Opt. Express*. **11** 2183
 - [8] Chen Z, Zhao Y, Srinivas S 1999 *IEEE J. Sel. Topics Quant. Electron.* **5** 1134
 - [9] Saxer C E, de Boer J L, Part B H 2000 *Opt. Lett.* **25** 1355
 - [10] Xu C, Ye J, Marks D L 2004 *Opt. Lett.* **29** 1647
 - [11] Leitgeb R A, Schmetterer L, Drexler W, Fercher A F, Zawadzki R J, Bajraszewski T 2003 *Opt. Express*. **11** 3116
 - [12] White B R, Pierce M C, Nassif N, Cense B, Park B H, Tearney G J, Bouma B E, Chen T C, de Boer J F 2003 *Opt. Express*. **11** 3490
 - [13] Makita S, Hong Y, Yamanari M, Yatagai T, Yasuno Y 2006 *Opt. Express*. **14** 7821
 - [14] Anna Szkulmowska, Maciej Szkulmowski, Andrzej Kowalczyk, Maciej Wojtkowski 2008 *Opt. Lett.* **33** 1425
 - [15] Maciej Szkulmowski, Anna Szkulmowska, Tomasz Bajraszewski, Andrzej Kowalczyk, Maciej Wojtkowski 2008 *Opt. Express*. **16** 6008
 - [16] Westphal V, Yazdanfar S, Rollins A M, Izatt J A 2002 *Opt. Lett.* **27** 34
 - [17] Fano R M 1951 *Technical Report of Massachusetts Institute of Technology* 186
 - [18] Jerome Wenger, Davy Gerard, Heykel Aouani, Herve Rigneault 2009 *Anal. Chem.* **81** 834
 - [19] Yukio Kobayashi 1982 *IEEE* **30** 1117
 - [20] Houghton A W, Reeve C D 1995 *IEE proc. Radar. Sonar and Navigation* **142** 286
 - [21] Houghton A W, Reeve C D 1995 *Sixth International Conference on Radio Receivers and Associated Systems* 42
 - [22] Riccardo Ardoino, Andrea Megna 2009 *Proceedings of the 6th European Radar Conference* 113
 - [23] Zhang S Y 1976 *Acta Phys. Sin.* **25** 235 (in Chinese) [张叔英 1976 物理学报 **25** 235]
 - [24] Yunrui Gong, Anthony D Stokes David Thorncraft 1996 *Meas. Sci. Technol* 170

Correlated Doppler optical coherence tomography*

Huang Liang-Min Ding Zhi-Hua[†] Hong Wei Wang Chuan

(State Key Laboratory of Modern Optical Instrumentation, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

(Received 21 January 2011; revised manuscript received 28 April 2011)

Abstract

A new method based cross-correlation technique (CD-OCT) is proposed to acquire and analyse the information about flow velocity with low signal-to-noise ratio(SNR) in spectral-domain optical coherence tomography(SD-OCT). We theoretically study the procedure of this method, and analyse the correlation between the noises by computer simulation and experiment. The Doppler flow images reconstructed by CD-OCT are compared with those reconstructed by Joint spectral and time-domain optical coherence tomography (STD-OCT). The results demonstrate that CD-OCT can significantly improve the SNR, thus rendering it suitable for the flow measurement in low SNR.

Keywords: spectral domain optical Doppler tomography, cross-correlation, signal-to-noise ratio

PACS: 34.80.Pa, 42.30.Wb, 87.63.dk

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 60978037, 60878057).

[†] E-mail: zh_ding@zju.edu.cn