

基于光程编码与相干合成的三维超分辨率*

商在明 丁志华[†] 王玲 刘勇

(浙江大学现代光学仪器国家重点实验室, 杭州 310027)

(2011年2月25日收到; 2011年7月5日收到修改稿)

光学相干层析成像的轴向分辨率和横向分辨率是互为独立的, 其轴向分辨率由系统光源带宽和探测光束的聚焦条件共同决定, 而横向分辨率由系统样品臂的聚焦条件决定. 提高光学相干层析成像的轴向分辨率的方法主要基于宽带光源技术以及变迹术与相干门相结合的方法, 而这些方法对于横向分辨率并没有提高. 提出了一种通过光程编码与相干合成的方法, 可以同时提高其轴向分辨率和横向分辨率. 通过在光学相干层析成像系统的样品臂中加入光程编码分束器形成多种对应不同光程延迟的有效响应函数, 基于光学相干层析成像术固有的光程分辨能力可以得到同一样品对应于不同有效响应函数的多幅图像. 通过数字控制不同有效响应函数的相对贡献对其进行相干合成, 可以同时实现轴向和横向的超分辨效果. 与以前的方法相比, 光程编码与相干合成方法简单易行, 成本低廉, 不仅可以避免系统复杂和价格昂贵等不足, 而且可以同时较大幅度地提高系统的轴向分辨率和横向分辨率.

关键词: 光学相干层析成像, 轴向超分辨, 横向超分辨, 光程编码

PACS: 42.30.Wb, 42.79.Ci, 87.63.lm, 87.64.-t

1. 引言

光学相干层析成像(OCT)技术是一种将低相干迈克尔逊干涉仪和共焦扫描显微术相结合的新型光学成像方法, 能实现对活体组织的非接触、无损伤的实时成像, 并且具备组织病理分析所需的高分辨率^[1-4]. 随着OCT技术的发展和临床应用的需要, 成像速度和分辨率等方面都需要进一步提高, 其中分辨率是衡量OCT性能和技术发展的重要指标. OCT的轴向分辨率由光源相干门和探测光束的聚焦条件共同决定, 横向分辨率是由探测光束的聚焦条件决定. 在探测光束弱聚焦条件下, OCT轴向响应主瓣宽度将远大于相干门宽度, 由于只有当两路光的光程差与光源相干长度相匹配时才会产生干涉, 所以此时轴向分辨率主要由相干门决定^[5]. 鉴于相干门宽度与光源带宽成正比, 与中心波长的平方成反比, 进一步提高轴向分辨率的主要途径是基于宽带光源技术, 如锁模钛蓝宝石激光器^[6,7]、飞秒激光器^[8,9]、光子晶体光纤^[10]、合成光源^[11,12]等技术, 但这些方法存在价格昂贵、系统复杂以及器

件选择困难等不足.

在探测器光束强聚焦条件下, OCT轴向响应函数主瓣宽度与相干门接近, 系统的轴向分辨率与光源带宽和轴向响应函数直接相关. 利用光瞳滤波器与OCT系统相干门相结合, 可以将轴向响应点扩散函数的主瓣压缩到相干门之内而旁瓣处于相干门之外^[13-15], 而OCT固有的共焦特性也会抑制超分辨引入的旁瓣强度^[16], 这些因素的共同作用使得变迹术可以提高OCT轴向分辨率. 然而变迹术也有其不足, 如主瓣强度会降低、各种振幅或相位透过率的光瞳滤波器的制作比较复杂, 另外, 轴向分辨率提高的同时一般会造成横向分辨率下降.

利用光自身的性质对光学系统响应特性的影响, 振幅、相位、偏振等参量被引入光学超分辨技术用于聚焦光场的控制, 达到不同程度和特性的超分辨效果, 光程参量的引入为超分辨增加了一个新的自由度. 在同样的探测器光束强聚焦条件下, 在OCT系统样品臂的准直镜和聚焦透镜之间插入光程编码分束器, 形成多个对应于不同光程延迟的有效响应函数. 基于OCT技术固有的光程分辨能力, 分别得到同一样品对应于不同有效响应函数的多

* 国家自然科学基金(批准号:60978037, 60878057)和浙江省自然科学基金(批准号:Y2091019)资助的课题.

[†] 通讯联系人. E-mail: zh_ding@zju.edu.cn

幅图像,对多个有效响应函数的相干合成可以重建出光学超分辨图像. 通过改变相干合成时的相对系数能数字控制各有效响应函数的相对贡献,从而与 OCT 系统相干门结合可以不同程度地同时实现轴向和横向的超分辨. 另外,这种方法具有简单易行、成本低廉、灵活性高及成像速度快等优势.

2. 理论分析

图 1 为基于光程编码与相干合成实现超分辨

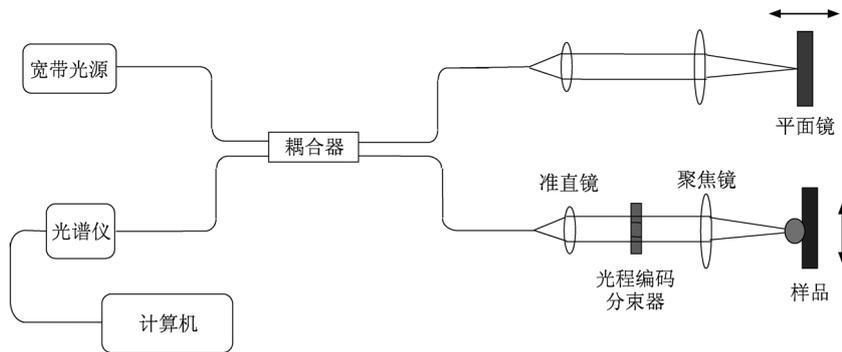


图 1 基于光程编码与相干合成实现三维超分辨的 OCT 系统原理示意图

图 2 为两步光程编码分束器结构示意图. 这是一个由外径等于样品臂准直光斑、内径小于准直光斑的同心圆环玻璃片构成,内径的归一化半径为 r (样品臂准直光斑的归一化半径值为 1),玻璃片厚度为 t .

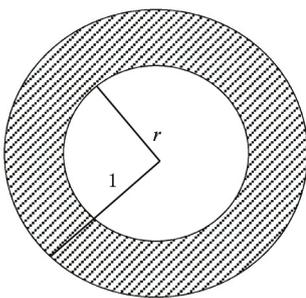


图 2 两步光程编码分束器结构示意图

光束两次经过两步光程编码分束器后形成相应三个子光束,分别对应于不同的光程延迟和有效响应函数. 两步光程编码分束器中,从中间空气部分入射并从空气部分返回的光束光程延迟为零;从中间空气部分入射并从玻璃部分返回的光束以及从玻璃部分入射并从空气部分返回的光束产生的

的 OCT 系统原理图. 从超辐射二极管光源发出的低相干光,经 2×2 光纤耦合器分光后,分别入射到样品臂和参考臂. 入射到样品臂的光束先经过准直镜准直,接着通过两步光程编码分束器,然后经过探测物镜聚焦到样品上,从样品散射回来的样品光经由探测光路在耦合器处与来自参考臂的参考光发生干涉. 样品经步进电机扫描,可以使对应于样品不同横向位置的干涉信号序列经探测器探测和后续处理后重建出样品的二维剖面图像.

光程差为 $\delta = (n - 1)t$;从玻璃部分入射并从玻璃部分返回的光束产生的光程延迟为 $2\delta = 2(n - 1)t$. 这里 n 为玻璃部分的折射率. 为了得到同一样品对应不同光程延迟的图像,样品的光学长度 l 必须满足 $\delta/2 > l$,即 $(n - 1)t/2 > l$. 通过对上述形成的三个有效响应函数进行相干合成,实现超分辨.

图 1 所示探测物镜焦平面附近三维点扩散函数复振幅分布为^[17]

$$h(v, u) = 2 \int_0^1 p(\rho) \exp(-i u \rho^2 / 2) J_0(v \rho) \rho d\rho, \quad (1)$$

式中 $J_0(v\rho)$ 为零阶第一类贝塞尔函数, v 和 u 分别为横向和轴向光学坐标.

$$v = \frac{2\pi}{\lambda} r \sin\alpha = k r \sin\alpha,$$

$$u = \frac{8\pi}{\lambda} z \sin^2\alpha = 4k z \sin^2\alpha,$$

其中 $k = 2\pi/\lambda$ 为光源中心波长对应的波数, r 和 z 分别为横向坐标和轴向坐标, $\sin\alpha$ 为探测物镜的数值孔径. 考虑到充分发挥相干门的层析作用和系统轴向分辨率和横向分辨率的匹配因素,我们选择

$\sin\alpha = 0.4$.

样品臂系统强度点扩散函数 H_w 是由照明点扩散函数 h_{in} 和接收点扩散函数 h_{out} 共同决定的,即

$$H_w = |h_{in} h_{out}|^2. \quad (2)$$

光学相干层析成像系统的横向分辨率由系统聚焦条件直接决定,横向分辨率 Δx 可以表示为

$$\Delta x = \frac{4\lambda}{\pi} \frac{f}{d}. \quad (3)$$

而考察轴向分辨能力需要对相干门宽度和轴向响应点扩散函数的主瓣宽度进行比较. 对于系统所用的高斯型光谱分布的光源,其自相关函数 $\gamma(z)$ 定义为

$$\gamma(z) = \exp\left[-\left(\frac{\Delta\lambda\pi z}{\lambda^2\sqrt{\ln 2}}\right)^2\right]. \quad (4)$$

这里 λ 为光源的中心波长, $\Delta\lambda$ 为光源带宽. 对应的相干门宽度为

$$\Delta z = \frac{2\ln 2}{\pi} \frac{\lambda^2}{\Delta\lambda}. \quad (5)$$

所以,系统有效轴向强度点扩散函数由轴向强度点扩散函数和相干门共同作用所决定,即

$$I_{\text{signal}} = H_w \gamma(u). \quad (6)$$

3. 两步光程编码与相干合成

3.1. 轴向响应相干合成

对于聚焦物镜焦平面附近轴向的点,根据公式(1),令横向光学坐标 $v = 0$,得轴向点扩散函数表达式

$$h(0, u) = 2 \int_0^1 p(\rho) \exp(-i u \rho^2 / 2) \rho d\rho. \quad (7)$$

两步光程编码分束器的空气部分对应的轴向点扩散函数 h_a 和玻璃部分对应的轴向点扩散函数 h_g 分别为

$$h_a = 2 \int_0^r p(\rho) \exp(-i u \rho^2 / 2) \rho d\rho,$$

$$h_g = 2 \int_r^1 p(\rho) \exp(-i u \rho^2 / 2) \rho d\rho.$$

根据上述理论分析, $h_{\text{eff}} = h_{in} h_{out}$, 分别得到对应于不同光程延迟的三个有效轴向响应函数,即光程延迟为 0 的子光束对应的有效轴向响应函数为 $h_a h_a$, 光程延迟为 δ 的子光束对应的有效轴向响应函数为 $h_a h_g + h_g h_a = 2h_a h_g$, 光程延迟为 2δ 的子光束

对应的有效轴向响应函数为 $h_g h_g$.

对于谱域 OCT 系统,光谱仪探测到的干涉光谱的傅里叶变换是与样品深度信息有关的复信号 $\Gamma(z)$, 对于探测透镜焦平面附近光轴上样品的情况,样品的结构信息为后向散射信号 $s(0, z)$. 探测信号是系统有效轴向响应函数与样品结构信息的卷积,有

$$\Gamma(z_0) = (h_a h_a) * s(0, z), \quad (8)$$

$$\Gamma(z_0 + \delta) = (2h_a h_g) * s(0, z), \quad (9)$$

$$\Gamma(z_0 + 2\delta) = (h_g h_g) * s(0, z). \quad (10)$$

对于公式(8)–(10)得到的探测信号分别乘以系数 $k_1^2, k_1 k_2, k_2^2$ 后进行不同权重的相干合成,得到的相干合成信号 Γ_{sum} 为

$$\begin{aligned} \Gamma_{\text{sum}} &= k_1^2 \Gamma(z_0) + a k_1 k_2 \Gamma(z_0 + \delta) + b k_2^2 \Gamma(z_0 + 2\delta) \\ &= k_1^2 (h_a h_a) * s(0, z) + a k_1 k_2 (2h_a h_g) * s(0, z) \\ &\quad + b k_2^2 (h_g h_g) * s(0, z) \\ &= h_{\text{eff}}^{*2} * s(0, z). \end{aligned} \quad (11)$$

因此,相干合成信号 Γ_{sum} 等效于有效轴向响应函数 h_{eff}^{*2} 与样品结构信息的卷积. 对相干合成公式中的 k_1 和 k_2 取不同的值,并且对 $k_1 k_2$ 和 k_2^2 项权重 a, b 分别取不同的值,可以不同程度地提高轴向分辨率. 当 $r = 0.92$ 时,取 $k_1 = -0.4, k_2 = 1$, 得到轴向超分辨因子 $G_a = 0.7$ (G_a 为相干合成前后系统有效轴向强度点扩散函数主瓣半极值全宽度之比),轴向分辨率得到了 30% 的提高.

图 3 所示为两步光程编码分束器相干合成不同有效轴向响应函数的归一化强度曲线 ($r = 0.92$), 所示的四幅图中三条曲线分别为聚焦物镜原轴向强度点扩散函数(不加分束器)、OCT 系统相干门、加分束器后对应的不同光程延迟的强度点扩散函数以及相干合成的强度点扩散函数. 图 3 中对应的各响应函数都是没有经过相干门作用的系统初始强度点扩散函数. 从图 3 可以看出:原轴向强度点扩散函数在相干门之内,经过分束器后,图 3(a), (b)对应的轴向分辨率有所下降,而图 3(c)对应的轴向分辨率下降非常严重. 图 3(d)对应的相干合成的轴向点扩散函数主瓣宽度有很大程度的缩小(缩小了 46%),然而旁瓣却有很大幅度的提高. OCT 固有的相干门可以很好抑制旁瓣对成像系统的影响,避免最终探测图像质量的下降. 这也是 OCT 相对于其他光学成像系统运用超分辨术提高轴向分辨率的主要优势.

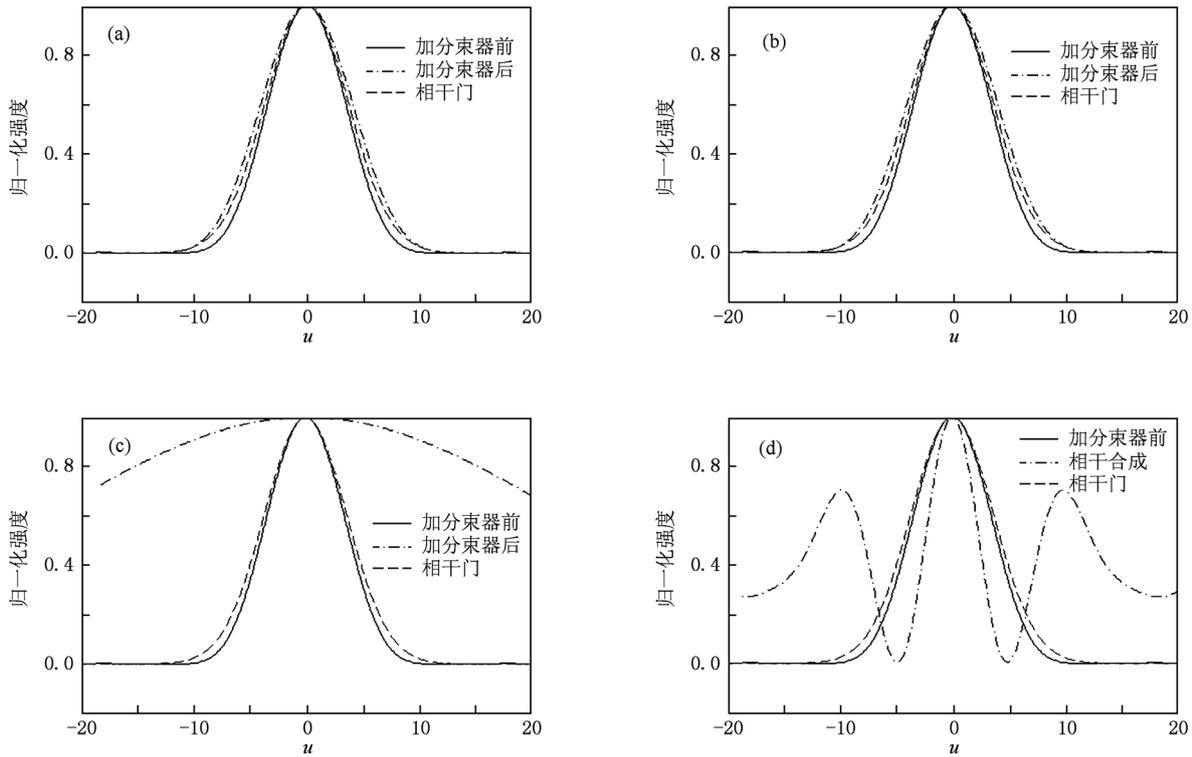


图3 两步光程编码分束器相干合成的轴向响应曲线 (a)加分束器前后轴向 $h_a h_a$, (b)加分束器前后轴向 $h_a h_g$, (c)加分束器前后轴向 $h_g h_g$, (d)相干合成结果

最终经相干门作用的有效响应函数如图4所示,图中星状虚线和点状虚线分别为不加分束器的强度点扩散函数和系统相干门,二者的共同作用为图中虚线所示的系统原有效响应曲线. 相干合成的强度点扩散函数为图中虚线所示,可以看出其主瓣变窄的同时旁瓣也很大,最终经相干门作用后的相干合成有效响应曲线为图4中实线所示. 将实验室

已有的谱域 OCT 系统的光源参量 ($\lambda = 835 \text{ nm}$, $\Delta\lambda = 45 \text{ nm}$) 代入(5)式可以得到相干门宽度为 $6.8 \mu\text{m}$, 经相干门作用得到的系统原轴向分辨率为 $5.5 \mu\text{m}$. 从图4可以看出,相干门已经基本消除了旁瓣的影响,并最终使轴向分辨率达到 $3.96 \mu\text{m}$, 有近30%的提高.

3.2. 横向响应相干合成

对于聚焦透镜焦平面上的点,其横向点扩散函数的表达式为

$$h(v, 0) = 2 \int_0^1 p(\rho) J_0(v\rho) \rho d\rho. \quad (12)$$

两步光程编码分束器的空气部分和玻璃部分对应的横向点扩散函数分别为

$$h_a = 2 \int_0^r p(\rho) J_0(v\rho) \rho d\rho,$$

$$h_g = 2 \int_r^1 p(\rho) J_0(v\rho) \rho d\rho.$$

与轴向响应的分析情况类似,最终得到系统有效横向响应函数与样品结构信息的卷积. 这里的样品结

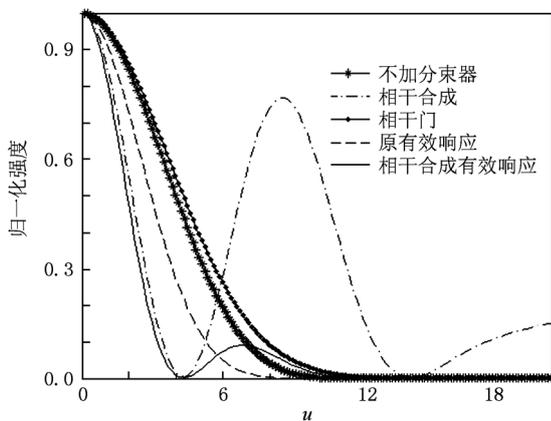


图4 两步光程编码分束器相干合成前后的轴向响应函数和有效响应函数

构信息是焦平面上样品的后向散射信号 $s(r, z_0)$, 有

$$\Gamma(z_0) = (h_a h_a) * s(r, z_0), \quad (13)$$

$$\Gamma(z_0 + \delta) = (2h_a h_g) * s(r, z_0), \quad (14)$$

$$\Gamma(z_0 + 2\delta) = (h_g h_g) * s(r, z_0). \quad (15)$$

因此相干合成信号为

$$\begin{aligned} \Gamma_{\text{sum}} &= k_1^2 \Gamma(z_0) + ak_1 k_2 \Gamma(z_0 + \delta) + bk_2^2 \Gamma(z_0 + 2\delta) \\ &= k_1^2 (h_a h_a) * s(r, z_0) + ak_1 k_2 (2h_a h_g) * s(r, z_0) \\ &\quad + bk_2^2 (h_g h_g) * s(r, z_0) \\ &= h_{\text{eff}}^{*2} * s(r, z_0). \end{aligned} \quad (16)$$

同样, 对相干合成公式中的系数取不同的值, 可以在不同程度上提高横向分辨率. 当与轴向相干合成信号中取相同的系数和权重时, 得到横向超分辨因子 $G_l = 0.71$ (G_l 为相干合成前后系统横向有效强度点扩散函数主瓣半极值全宽度之比), 即横向

分辨率有近 30% 的提高.

图 5 为在确定的分束器半径和系数下相干合成的横向响应函数, 实线为不加分束器之前的有效横向响应函数曲线, 虚线为加分束器之后对应不同光程延迟的有效横向响应函数曲线. 将实验室谱域相干层析成像系统光源参量及探测物镜数值孔径 ($\sin\alpha = 0.4$) 代入 (3) 式可以得到原有效横向分辨率为 $2.66 \mu\text{m}$. 图 5(a), (b), (c) 分别对应光程延迟为 $0, \delta$ 和 2δ 的有效横向响应函数, 可以看出图 5(a) 中的横向分辨率有所降低, 而图 5(b) 和 (c) 中的横向分辨率都得到了提高. 我们关心的是最终相干合成后的有效横向响应函数, 从图 5(d) 可以看出, 合成后横向分辨率达到 $1.89 \mu\text{m}$, 同时旁瓣的强度也在可以接受的范围之内.

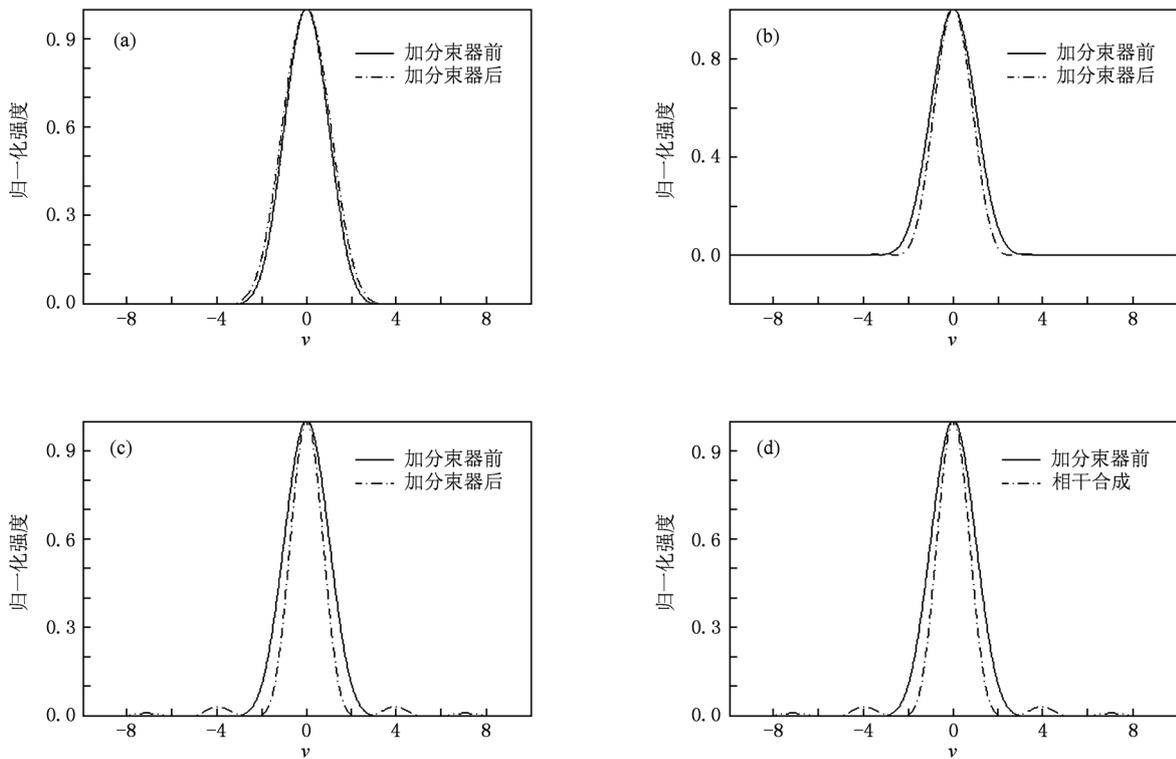


图 5 两步光程编码分束器相干合成的横向响应函数 (a)加分束器前后横向 $h_a h_a$, (b)加分束器前后横向 $h_a h_g$, (c)加分束器前后横向 $h_g h_g$, (d)相干合成结果

为了更直观地体现出光程编码与相干合成方法对于 OCT 成像的三维超分辨效果, 对 (1) 式描述的焦平面附近的三维点扩散函数对应的响应函数进行相干合成. 图 6 所示为合成前的有效响应和合成后的有效响应的效果对比, 其中 x 轴和 y 轴分别

表示点扩散函数的轴向和横向. 从图 6 可以看出, 相干合成的结果是轴向和横向的主瓣宽度明显缩小, 并且旁瓣对于实际的观察效果几乎可以忽略, 完全在可以接受的范围之内, 实现了三维超分辨的效果.

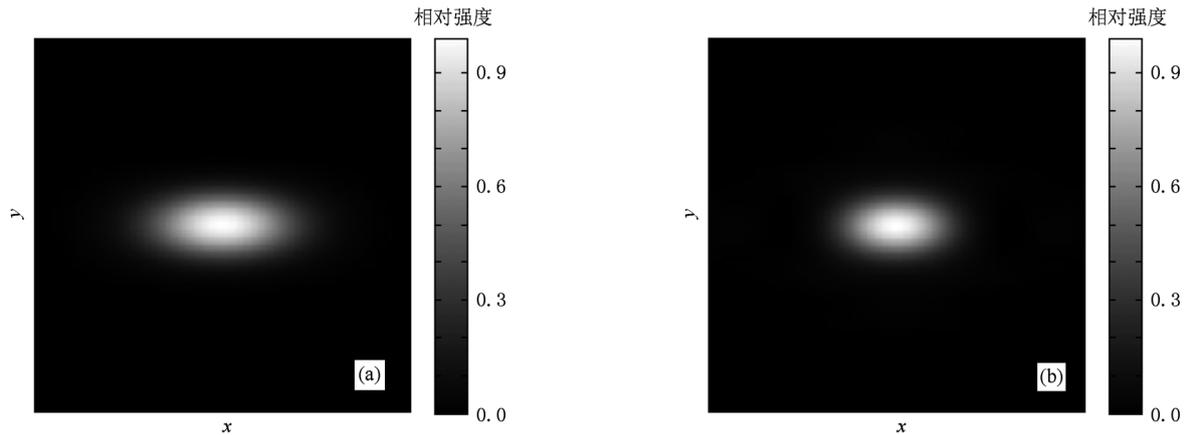


图6 光程编码与相干合成前后的有效强度 (a)合成前的有效强度,(b)合成后的有效强度

4. 结 论

基于光程编码与相干合成的三维超分辨术将光程参量引入聚焦光场的控制,为提高 OCT 技术的分辨率提供了又一可行途径. 根据 OCT 技术固有的光程分辨能力,利用光程编码分束器得到同一样品对应于不同光程有效响应函数的多个 OCT 复信号,对所得的多个复信号分别乘以不同的系数相干合成得到重建后的合信号. 本方案涉及光程编码技

术、光学超分辨技术和 OCT 技术. 理论分析表明,可以使系统的轴向分辨率和横向分辨率分别达到 3.96 和 1.89 μm , 都有近 30% 的提高,且归一化后的旁瓣强度都在 0.05 以下,得到了有效的抑制. 光程编码与相干合成方法具有成本低廉、简单易行、灵活性高、成像速度快等优势,同时还提供了点扩散函数的加减运算功能,结合共焦系统固有的乘法运算功能,点扩散函数工程的自由度大大提高,可以通过优化光程编码分束器的设计参数进一步提高系统分辨率.

- [1] 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]
- [2] Huang D, Swanson E A, Lin C P, Schuman J S, Stinson W G, Chang W, Hee M R 1991 *Science* **254** 1178
- [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] Zhou L, Ding Z H, Yu X F 2005 *Acta Opt. Sin.* **25** 1181 (in Chinese) [周琳、丁志华、俞晓峰 2005 光学学报 **25** 1181]
- [6] Morgner U, Kartner F X, Cho S H 1999 *Opt. Lett.* **24** 411
- [7] Sutter D, Steinmeyer G, Gallmann L, Matuschek N, Keller U 1999 *Opt. Lett.* **24** 631
- [8] Kray S, Spoler F, Forst M 2008 *Opt. Lett.* **33** 2092
- [9] Kowalevicz A M, Ko T, Hartl I 2002 *Opt. Express* **10** 349
- [10] Hartl I, Li X D, Chudoba C, Ghanta R K, Ko T H, Fujimoto J G, Ranka J K, Windeler R S 2001 *Opt. Lett.* **26** 608
- [11] Sathyam U S, Colston B W, Da Silva L B 1999 *Appl. Opt.* **38** 2097
- [12] Schmitt J M, Xiang S H, Yung K 1998 *J. Opt. Soc. Am. A* **15** 2288
- [13] Liu L, Deng X Q, Wang G Y 2001 *Acta Phys. Sin.* **50** 48 (in Chinese) [刘力、邓小强、王桂英 2001 物理学报 **50** 48]
- [14] Martinze-Corral M, Andres P, Ojeda-Castaneda J, Saavedra G 1995 *Opt. Commun.* **119** 491
- [15] Meng J, Zhou L, Ding Z H 2008 *Acta Photon. Sin.* **37** 533 (in Chinese) [孟婕、周琳、丁志华 2008 光子学报 **37** 533]
- [16] Sheppard C J R 1977 *Optik* **48** 329
- [17] Born M, Wolf E 1999 *Principle of Optics* (Beijing: Publishing House of Electronics Industry) pp401—411 (in Chinese) [波恩 M、沃耳夫 E 1999 光学原理 (第七版) (中译本) (北京: 电子工业出版社) 第 401—411 页]

Path length coded coherence combination for three-dimensional superresolution *

Shang Zai-Ming Ding Zhi-Hua[†] Wang Ling Liu Yong

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

(Received 25 February 2011; revised manuscript received 5 July 2011)

Abstract

Axial resolution and traverse resolution in optical coherence tomography (OCT) imaging are determined by different factors, while axial resolution is determined by both the coherence length of light source and the beam-focusing condition, and traverse resolution is determined by the beam-focusing condition of the sample arm. In the main approaches to axial resolution improvement in OCT, a light source with a broaden bandwidth is used and coherence gating is combined with apodization, which cannot improve the traverse resolution. A method is introduced to increase both the axial resolution and traverse resolution simultaneously in an OCT system by the path length code and coherent compounding method. Different effective functions are formed by adding a path length coding lens in to the proposed OCT system, which are corresponding to different path lengths. Owing to the intrinsic ability to differentiate path lengths, we can obtain several images of the same sample, corresponding to the different effective functions simultaneously. By adding these functions through numerically controlling their relative contributions, we can finally obtain a coherent compounding signal with three-dimensional superresolutions of axial resolution and traverse resolution. Compared with the previous approaches, the path length code and coherent compounding method is very easy to operate and its cost is very low, which can not only avoid the high cost and inconvenience in implantation, but also increase both axial and traverse resolutions simultaneously.

Keywords: optical coherence tomography, axial superresolution, traverse superresolution, path length coding

PACS: 42.30.Wb, 42.79.Ci, 87.63.lm, 87.64.-t

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 60978037, 60878057) and the Natural Science Foundation of Zhejiang Province, China (Grant No. Y2091019).

[†] Corresponding author. E-mail: zh_ding@zju.edu.cn