

文章编号: 0258-7025(2010)11-2725-05

基于近似波数域算法的干涉合成孔径显微技术

李 乔 陈晓冬* 雷 湧 汪 毅 郁道银

(天津大学光电信息技术科学教育部重点实验室, 天津 300072)

摘要 光谱光学相干层析(OCT)系统中,成像的横向分辨率和焦深之间的矛盾制约了其进一步应用。干涉合成孔径显微技术(ISAM)是一种图像三维重建算法,通过对光谱数据进行重新采样和计算达到不同深度位置处横向分辨率恒定的目的。通过分析 ISAM 重构过程和误差原理,建立多散射点的重构模型,并对比分析了光谱 OCT 和 ISAM 重构后的图像结果。为了缩短 ISAM 的重构时间,提出近似波数域方法来实现 ISAM,搭建了光谱 OCT 成像实验系统。实验结果表明,该方法极大地节省了重构时间,将一幅 $320 \text{ pixel} \times 265 \text{ pixel}$ 图像的重构时间缩短至 50 s,为光谱 OCT 图像的三维实时重构提供了理论基础。

关键词 光谱学;光学相干层析;干涉合成孔径显微技术;图像重构

中图分类号 TH744.3 **文献标识码** A **doi:** 10.3788/CJL20103711.2725

Approximate Wavenumber Domain Algorithm for Interferometric Synthetic Aperture Microscopy

Li Qiao Chen Xiaodong Lei Yong Wang Yi Yu Daoyin

(Key Laboratory of Opto-Electronics Information Technical Science, Ministry of Education, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract In the spectral optical coherence tomography(OCT) system, a high depth of field can be achieved at the expense of the poorer transverse resolution. Interferometric synthetic aperture microscopy (ISAM) is an optical computed-imaging technique, which can make transverse resolutions at the different depths identical by resampling the spectrum data. The procedure of ISAM and the principle of error were analyzed and a reconstruction model of multi-scatterers is established. The multiple scatterers simulation is implemented by use of ISAM compared with the standard OCT methods. The approximate wavenumber domain algorithm is applied in ISAM, which can save much rebuilding time without the Stolt interpolation and the spectral OCT experiment system was developed. The experimental results showed that it can greatly reduce computational complexity to enhance the performance of real-time, which costs 50 s to finish one $320 \text{ pixel} \times 265 \text{ pixel}$ image.

Key words spectroscopy; optical coherence tomography; interferometric synthetic aperture microscopy; image reconstruction

1 引 言

光学相干层析(OCT)是一种无损伤、非侵入、高分辨率生物医学成像技术^[1]。OCT 技术利用宽光谱光源可以得到较高的成像分辨率,传统的时域 OCT 技术中,为了得到被测对象的轴向深度图像,需不断地调整参考臂的光程^[2],限制了成像速度的

提高^[3]。光谱 OCT 技术则避免了参考臂的纵向扫描机构,通过计算干涉信号的光谱获得样品深度信息^[4]。

现有的光谱 OCT 技术面临着一个难题,即如何解决横向分辨率和焦深之间存在的矛盾:若为了提高横向分辨率而采用高数值孔径的物镜,那么清

收稿日期: 2009-11-13; 收到修改稿日期: 2010-04-28

基金项目: 国家自然科学基金(30800245)和教育部博士点基金(20060056046)资助课题。

作者简介: 李 乔(1983—),男,博士研究生,主要从事光学相干层析方面的研究。E-mail: liqiao@tju.edu.cn

导师简介: 郁道银(1945—),男,教授,博士生导师,主要从事医学成像技术方面的研究。E-mail: dyyu@tju.edu.cn

* 通信联系人。E-mail: xdchen@tju.edu.cn

晰成像的深度——焦深就会变短;反之,为了扩大焦深而采用低数值孔径的物镜则会使横向分辨率降低,因此,横向分辨率和焦深之间的矛盾成为制约光谱 OCT 成像进一步应用的瓶颈。干涉合成孔径显微技术(ISAM)是一种图像三维重构算法,通过对光谱数据进行重新采样和计算,使离焦成像面变得清楚,进而达到不同深度处横向分辨率恒定的目的,解决了横向分辨率和焦深之间的矛盾^[5~8]。

T. S. Ralston 等^[5]于 2007 年提出 ISAM 算法,文章表明 ISAM 的可实现性很高,具有很大的实用价值。本文在此基础上介绍了光散射方程,对 ISAM 重构过程和误差原理进行了分析,并展示了传统光谱 OCT 重构后和 ISAM 重构后的图像结果。为了缩短 ISAM 的重构时间,将近似波数域算法应用到 ISAM 图像重构的过程中。近似波数域算法作为波数域算法的一个延伸,已经应用在合成孔径雷达(SAR)成像中^[9,10],本文将其与 ISAM 算法结合,用于光谱 OCT 图像重构,获得了较好的结果。

2 图像重构原理

2.1 干涉合成孔径显微算法

在光谱 OCT 系统中,低相干光源发出的激光聚焦在被测样品上,用光谱探测仪测量后向散射光场。在光传输的标量模型中,任意频率都有 $\omega = kc/n_0$,其中 n_0 是样品的固定折射率, c 是光速,光场遵循衰减波方程^[5~8]

$$\nabla^2 U(\mathbf{r}) + k^2 U(\mathbf{r}) = -4\pi\eta(\mathbf{r})U(\mathbf{r}), \quad (1)$$

式中 \mathbf{r} 代表光波的位置矢量, U 代表光场, η 表示样品中某一位置的后向散射系数,折射率可以表示为 $n^2 = n_0^2(1 + 4\pi\eta/k^2)$ 。样品臂的聚焦光束从物镜射入样品内,在样品内散射后返回物镜,测量其与参考光束的干涉光谱。根据一级玻恩散射方程,干涉光谱是一个关于光束横向位置矢量 \mathbf{r}_0 及波数 k 的函数,表示为

$$S(\mathbf{r}_0, k) = A^2(k) \int_{\Sigma} d^2\mathbf{r}' \int_V d^3\mathbf{r} G(\mathbf{r}', \mathbf{r}, k) \times g(\mathbf{r}' - \mathbf{r}_0, k) \times \eta(\mathbf{r}') g(\mathbf{r} - \mathbf{r}_0, k), \quad (2)$$

式中 g 为高斯光束分布,表示为 $g(\mathbf{r}, k) = W^{-2}(k) \exp\{-\mathbf{r}^2/[2W^2(k)]\}/(2\pi)$ 。 $W(k) = \alpha/k$, $\alpha = \pi/NA$ (NA 为数值孔径), $A^2(k)$ 是光源功率大小, $G(\mathbf{r}', \mathbf{r}, k) = \exp(ik|\mathbf{r} - \mathbf{r}'|)/|\mathbf{r} - \mathbf{r}'|$ 表示格林函数。 $S(\mathbf{r}_0, k)$ 经二维傅里叶变换并近似后,可表示为

$$\tilde{S}(\mathbf{Q}_{||}, k) = A(k) \left[\frac{i2\pi^2}{k_z(\mathbf{Q}_{||}/2)} \frac{k^2}{\alpha^2} \exp\left(-\frac{\alpha^2 Q^2}{4k^2}\right) \right] \times \tilde{\eta}[\mathbf{Q}_{||}; -2k_z(\mathbf{Q}_{||}/2)], \quad (3)$$

式中 $\mathbf{Q}_{||}$ 表示横向空间频率。从(3)式可以知道,干涉光谱的二维傅里叶变换结果 $\tilde{S}(\mathbf{Q}_{||}, k)$ 和散射系数 η 的三维傅里叶变换呈线性关系,不随深度位置而改变,也不依赖于距离焦点的远近,从而解决了成像分辨率和焦深之间的矛盾。

根据上述理论分析,ISAM 图像重构算法的实现步骤为:首先对 $S(\mathbf{r}_0, k)$ 在 x, y 方向上进行二维傅里叶变换得到 $\tilde{S}(\mathbf{Q}_{||}, k)$, 它和散射系数的三维傅里叶变换 $\tilde{\eta}(\mathbf{Q}_{||}; k)$ 有(3)式的线性关系;对傅里叶变换后的光谱数据 $\tilde{S}(\mathbf{Q}_{||}, k)$ 进行线性滤波 $H(\mathbf{Q}_{||}, k)$ 。在信号空间中,由于 $\mathbf{Q}_{||}$ 与 k 二者之间不是正交的,需进行 Stolt 映射将坐标由 $\tilde{S}(\mathbf{Q}_{||}, k)$ 变换为 $\tilde{S}(\mathbf{Q}_{||}, k_z)$, 以满足 $\mathbf{Q}_{||}$ 和 k_z 的正交性,其 Stolt 映射关系为 $k_z = \frac{1}{2} \sqrt{4k^2 - \mathbf{Q}_{||}^2}$ 。由于 Stolt 映射后 k_z 呈现非均匀分布,需进行 Stolt 插值将 k_z 变为等间隔均匀分布从而消除误差,满足傅里叶逆变换的要求。对 $\tilde{S}(\mathbf{Q}_{||}, k_z)$ 进行三维傅里叶逆变换到空间坐标,从而得到散射系数 $\eta(\mathbf{r})$, 最后增益补偿远离焦平面的信号强度衰减。

和雷达、地震信号处理类似,在光谱 OCT 成像的横向扫描过程中存在纵向徙动现象,即由于回波信号的横向和纵向耦合造成误差,被测点形成抛物线型弥散斑的现象^[9,10]。上述过程是在波数域内完成的,波数域算法以空间变量对回波信号进行傅里叶变换,把信号变换到二维波数域内,在波数域中利用 Stolt 变换完成纵向徙动校正和横向聚焦压缩。在图像重构的时候,首先需经过一次线性滤波,使聚焦区域的成像点得到完全聚焦,但离焦区域的成像点仅得到部分聚焦,这个过程叫一致聚焦。一致聚焦对聚焦区域完全聚焦,聚焦区域外按照相应处理,将产生徙动校正误差、横纵向耦合误差和横向聚焦相位误差。此后的 Stolt 变换相当于补偿了这些剩余误差,波数域的插值操作实现离焦区域各点的聚焦,完成补充聚焦,使二维波数域上任一方向相位都是线性的。

2.2 近似波数域算法

在 2.1 节 ISAM 算法中,Stolt 插值是重构的重要一步,由于插值是在波数域中进行的,对插值的精度要求非常高,它也是 ISAM 算法中非常耗时的一步,采用三次 B 样条插值对一幅 100 个散射点的仿

真模拟大约需要 10 min (CPU E7300 2.60 GHz, 2 GB RAM)。为了避免 Stolt 插值, 对波数域算法进行了一些近似, 采用近似波数域算法极大地节省了重构时间, 使实现实时三维重构成为可能。

这种近似将 Stolt 映射简化为对应每一横向频率位置的沿纵向波数的常数频移, 使 Stolt 插值可以被纵向波数域的简单相位相乘替代。这种方法仅实现了补偿横向聚焦的相位误差, 而忽略了徙动校正误差和耦合误差, 在小角度测绘范围内 (距成像点 ± 3 mm 范围内), 这种近似方法是足够精确的。近似实现方法的过程是:

1) 首先与精确实现相同进行横向傅里叶变换和匹配滤波, 完成一致聚焦。

2) 通过深度方向逆傅里叶变换 (IFFT) 将信号变换到距离频域内。

3) 用一个沿纵向变化的方位匹配滤波器消除参考函数 $H_2(k_q, k_z)$ 相乘后的残余相位调制。

4) 最后通过横向 IFFT 将压缩后的数据变回时域 $S(\mathbf{r}_0, z)$ 并进行增益补偿。

在近似波数域算法中, 假设徙动校正误差和耦合误差随距离改变, 该方法此时只需补偿横向聚焦的相位误差, 而忽略其他误差。虽然重构后的成像质量有所下降, 但节省了插值处理所消耗的时间。

在近似波数域方法中, $H_2(k_q, k_z)$ 的表达式为

$$H_2(k_q, k_z) = \exp[jR \sqrt{(k + k_0)^2 - k_q^2}], \quad (4)$$

Stolt 映射为

$$k = \sqrt{(k_z + k_0)^2 + k_q^2} - k_0, \quad (5)$$

进一步变换为

$$k = (k_z + k_0) \sqrt{1 + \frac{k_q^2}{(k_z + k_0)^2}} - k_0 \approx k_z + \frac{1}{2} \cdot \frac{k_q^2}{k_z + k_0}. \quad (6)$$

当满足 $k_q \ll k_0$ 时, (6) 式进一步推导得到

$$k = k_z + \frac{1}{2} \cdot \frac{k_q^2}{k_0} \cdot \frac{1}{1 + \frac{k_z}{k_0}} \approx k_z + \frac{1}{2} \cdot \frac{k_q^2}{k_0} - \frac{k_q^2}{2k_0^2} \cdot k_z, \quad (7)$$

(7) 式最后一项实际上对应了与距离有关的徙动, 如果忽略, 则 Stolt 变换仅相当于做了一次由 k_z 至 $k_z + \frac{1}{2} \cdot \frac{k_q^2}{k_0}$ 的移频处理。

2.3 仿真模拟

为了验证前述近似波数域方法实现 ISAM 图像重构是否正确, 利用 Matlab 软件进行仿真模拟, 并与传统 OCT 重构结果进行对比, 假设样品由一个个散射体组成, 且不考虑多重散射以及相邻散射体散射光间的干涉。

采用中心波长 $\lambda_0 = 1310$ nm, 带宽 $\Delta\lambda = 80$ nm 的低相干光源, 即 $k_0 = 4.8 \mu\text{m}^{-1}$, $\Delta k = 0.8 \mu\text{m}^{-1}$, 仿真中, k 在 $4.4 \sim 5.2 \mu\text{m}^{-1}$ 之间均匀取 400 个值, 相当于对接收到的光谱数据采样。

光纤探头接收横向 $\pm 1000 \mu\text{m}$ 范围内的散射光信号, 仿真中 x 在 $-1000 \sim +1000 \mu\text{m}$ 之间均匀取 360 个值。

图 1 为随机生成的 100 个散射点在数值孔径 NA 为 0.6 时的图像重构, 图 1(a) 为传统光谱 OCT 重构结果, 图 1(b) 为 ISAM 重构结果, 聚焦面位于图像中央, 即黑色实线 A 所指。对于传统光谱 OCT, 当 NA 较大时, 图像的横向分辨率比较高, 离焦区域的点变得模糊, 分辨率降低, 图像重构结果不受离焦影响的深度范围较窄, 即焦深变小; 与此相比, 经 ISAM 算法重构后的结果, 其图像中离焦区域的点分辨率得到提高, 达到不同深度的点分辨率恒定的目的, 离焦影响得到增益补偿, 焦深与传统光

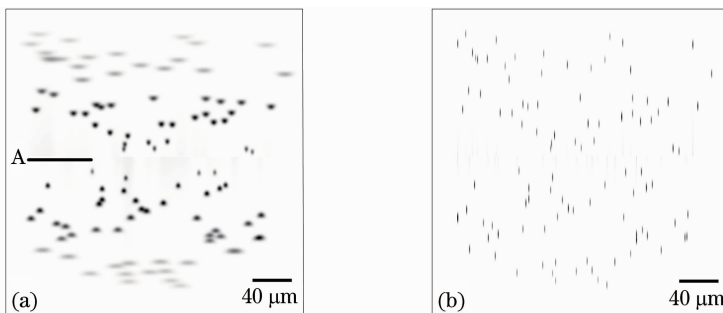


图 1 100 个散射点的模拟仿真。(a)传统光谱 OCT 重构结果, (b)ISAM 重构结果

Fig. 1 Reconstruction images of 100 scatterers on NA of 0.6. (a) Spectral OCT, (b) ISAM

谱 OCT 重构相比变大。由于纵向徙动误差的影响,被测点退化为抛物线型斑点,在测绘范围较窄时线形两端边缘的信号强度降低,此时近似波数域虽然忽略了徙动误差,但对重构后的结果影响不大,成像精度依然较高。而且,对于单个散射点,近似波数域方法的运算次数比精确方法大约少 $m \ln b m$ 次,这样对于随机生成的 100 个散射点,其运算次数少 $100 m \ln b m$ 次以上,大大减少了图像重构时间。

3 实验结果和讨论

在理论分析的基础上,搭建了光谱 OCT 系统用来实验验证近似波数域算法的可行性,如图 2 所示。光源为超辐射发光二极管(SLD),型号是 Nxtar SLD-2200,中心波长 $\lambda=830$ nm,3 dB 带宽为 $\Delta\lambda=20$ nm,输出功率为 5 mW。光谱仪(Ocean Optics, HR4000)的光谱范围为 728.69~911.16 nm,线阵电荷耦合元件(CCD)的像素单元数是 3648 个,光谱分辨率达 0.05 nm。可以计算得到光谱 OCT 系统的纵向分辨率为 $\Delta z=15.2$ μm ,最大测量深度为 3.4 mm。OCT 信号是经过相干条件提取的,只有与参考光的光程差在相干长度范围内的散射光才能形成 OCT 图像信号,但实际上,相干长度内不同深度截面上的散射光,因光程差引起的相位差已经形成了散斑生成条件,散斑的出现会使图像的一些像素随机变亮或变暗,降低图像的清晰度^[11~13]。样品臂的自聚焦透镜数值孔径 NA 为 0.56,高数值孔径的代价是聚焦深度范围的缩小,虽然最大探测深度不会改变,但是离焦区域将变得模糊。

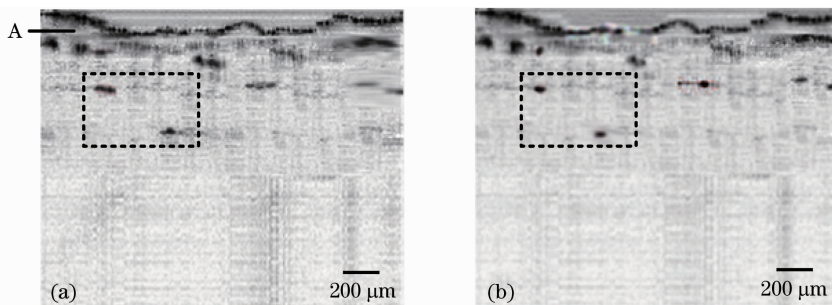


图 3 猪肝成像结果。(a)传统 OCT 重构结果,(b)ISAM 重构结果

Fig. 3 An image of a fresh pig liver. (a) spectral OCT, (b) ISAM

4 结 论

干涉合成孔径显微技术是一种图像三维重建算法,通过对光谱数据进行重新采样和计算,达到不同深度处横向分辨率恒定的目的,解决了横向分辨率

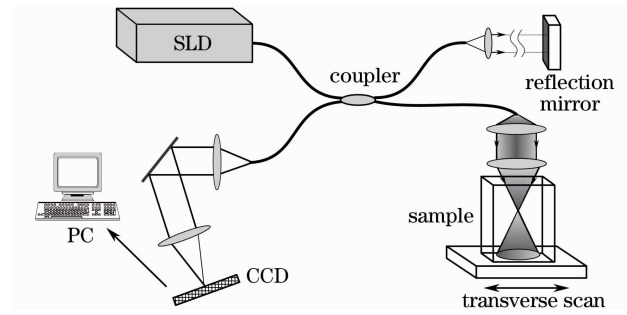


图 2 光谱 OCT 系统示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the spectral OCT system

和焦深之间的矛盾。对 ISAM 重构过程和误差原理进行了分析,并对比分析了传统 OCT 重构后和 ISAM 重构后的图像结果。为了缩短 ISAM 的重构时间,提出近似波数域方法来实现 ISAM 重构过

实验中采用新鲜的猪肝作为被测样品,如图 3 所示,成像范围为 1.94 mm \times 1.6 mm,对应图像大小 320 pixel \times 265 pixel。图 3(a)为传统 OCT 重构后的图像结果,图 3(b)为 ISAM 重构后的结果。自聚焦透镜将光波聚焦到样品顶端附近,即图中黑色实线 A 所指平面为聚焦面,因此靠近顶端的点分辨率变化不大,靠近图像下方的区域是离焦范围,在图 3(a)中,这部分区域散射点弥散现象较为明显,图 3(b)图中虚线区域的横向分辨率得到提高,使不同深度的分辨率趋于一致。基于近似波数域的 ISAM 重构一幅图像需要 50 s 时间,而利用精确方法需要大约 10 min 完成这样一幅图像。然而,由于近似波数域忽略了徙动校正误差和耦合误差,图 3(b)存在着附加噪声,使图像信噪比有所降低,其中猪肝图像的边界变化尤为明显。实验中高斯光束聚焦深度为 12 mm,光纤探头接受横向 ± 1000 μm 范围内的散射光信号,计算得到其测绘角度为 9.5° ,因此对于图像边界要求不是很高的情况,近似波数域的 ISAM 算法在 10° 范围内可以很好地实现图像重构。

程。实验结果表明,在小角度测绘范围内虽然忽略了徙动校正误差和耦合误差,近似波数域算法精度足够,而且极大地节省了重构时间,为三维实时重构提供了理论基础。

参 考 文 献

- 1 D. Huang, E. A. Swanson, C. P. Lin. Optical coherence tomography[J]. *Science*, 1991, **254**(5035): 1178~1181
- 2 J. G. Fujimoto. Optical coherence tomography[J]. *Cr Acad Sci. Iv-Phys.*, 2001, **2**(8): 1099~1111
- 3 Yang Yaliang, Ding Zhihua, Meng Jie *et al.*. Common path optical coherence tomographic system suitable for endoscopic imaging[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(5): 955~959
杨亚良, 丁志华, 孟 婕 等. 适合于内窥成像的共路型光学相干层析成像系统[J]. *光学学报*, 2008, **28**(5): 955~959
- 4 Duan Lian, He Yonghong, Zhu Rui *et al.*. Development of a spectrum domain 3D optical coherence tomography system[J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(10): 2528~2533
段 炼, 何永红, 朱 锐 等. 三维谱域光学相干层析成像系统的研制[J]. *中国激光*, 2009, **36**(10): 2528~2533
- 5 T. S. Ralston, D. L. Marks, P. S. Carney *et al.*. Interferometric synthetic aperture microscopy [J]. *Nature Physics*, 2007, **3**: 129~134
- 6 B. J. Davis, S. C. Schlachter, D. L. Marks *et al.*. Nonparaxial vector-field modeling of optical coherence tomography and interferometric synthetic aperture microscopy[J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 2007, **24**(9): 2527~2542
- 7 T. S. Ralston, D. L. Marks, S. A. Boppart *et al.*. Inverse scattering for high-resolution interferometric microscopy [J]. *Opt. Lett.*, 2006, **31**(24): 3585~3587
- 8 J. D. Brynmor, L. M. Daniel, S. R. Tyler *et al.*. Interferometric synthetic aperture microscopy: computed imaging for scanned coherent microscopy [J]. *Sensors*, 2008, **8**(6): 3903~3931
- 9 I. G. Cumming, F. H. Wong. Digital Processing of Synthetic Aperture Radar Data: Algorithms and Implementation [M]. Hong Wen, Hu Donghui *et al.*. Transl.. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2007. 233~236
卡 明, 黄熙炽. 合成孔径雷达成像: 算法与实现[M]. 洪 文, 胡东辉 等译. 北京: 电子工业出版社, 2007. 233~236
- 10 J. C. Curlander, R. N. McDonough. Synthetic Aperture Radar: Systems and Signal Processing [M]. Han Chuanzhao *et al.*. Transl.. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2006. 147~152
柯兰德, 麦克多诺. 合成孔径雷达: 系统与信号处理[M]. 韩传钊 等译. 北京: 电子工业出版社, 2006. 147~152
- 11 Shen Tingmei, Gu Ying, Wang Tianshi *et al.*. Speckle reduction in optical coherence tomography[J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(9): 1437~1440
沈婷梅, 顾 瑛, 王天时 等. 光学相干层析成像中散斑噪声减小算法[J]. *中国激光*, 2008, **35**(9): 1437~1440
- 12 Zhu Yi, He Yonghong, Li Peng *et al.*. Enhancement and quantitative measurement of layer structures in optical coherence tomographic images [J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(3): 515~520
朱 毅, 何永红, 李 鹏 等. 光学相干层析图像层状结构的增强与定量测量[J]. *光学学报*, 2007, **27**(3): 515~520
- 13 Deng Juxiang, Liang Yanmei. Noise reduction with wavelet transform in optical coherence tomographic images [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(8): 2138~2141
邓菊香, 梁艳梅. 光学相干层析图像的小波去噪方法研究[J]. *光学学报*, 2009, **29**(8): 2138~2141