

基于声透镜的三维光声成像技术

张宇 唐志列 吴泳波 束刚

Three-dimensional photoacoustic imaging technique based on acoustic lens

Zhang Yu Tang Zhi-Lie Wu Yong-Bo Shu Gang

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 64, 240701 (2015) DOI: 10.7498/aps.64.240701

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.240701>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2015/V64/I24>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于随机聚类的复杂背景建模与前景检测算法

Complex background model and foreground detection based on random aggregation

物理学报.2015, 64(15): 150701 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.150701>

基于复振幅场信息复用和 RSA 算法的非对称多幅图像认证方法

Asymmetric multiple-image authentication based on complex amplitude information multiplexing and RSA algorithm

物理学报.2015, 64(11): 110701 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.110701>

基于照射_反射模型和有界运算的多谱段图像增强

Multispectral image enhancement based on irradiation-reflection model and bounded operation

物理学报.2015, 64(10): 100701 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.100701>

一种基于抖动和混沌技术的数字图像篡改检测及修复算法

A novel image authentication and recovery algorithm based on dither and chaos

物理学报.2014, 63(21): 210701 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.210701>

一种基于混沌和汉明码的数字图像篡改检测及修复算法

A novel image authentication and recovery algorithm based on chaos and Hamming code

物理学报.2014, 63(2): 020701 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.020701>

基于声透镜的三维光声成像技术*

张宇¹⁾²⁾ 唐志列^{1)†} 吴泳波¹⁾ 束刚³⁾

1)(华南师范大学物理与电信工程学院, 广州 510006)

2)(华南农业大学电子工程学院, 广州 510642)

3)(华南农业大学动物科学学院, 广州 510642)

(2015年5月6日收到; 2015年7月27日收到修改稿)

基于声透镜的光声成像系统中, 由样品的光声压分布等效样品的吸收分布, 进行光声像重建, 但之前的这种等效是一种近似, 理论上并不准确. 本文阐述了声透镜三维光声成像的基本原理, 揭示了声透镜像面上光声压信号的时间分布与样品轴向吸收分布之间的关系; 提出用积分法和希尔伯特变换提取光声信号瞬时值法, 解调样品吸收系数分布并重建光声像; 实验上, 对不同样品分别用积分法和希尔伯特变换法获取样品的吸收系数, 重建光声像的横向和轴向分辨率均约为 1 mm, 实现了真正的三维快速光声成像.

关键词: 声透镜, 光声成像, 积分法, 希尔伯特变换

PACS: 07.05.Pj, 87.85.Pq, 87.57.-s

DOI: 10.7498/aps.64.240701

1 引言

光声成像技术结合了光学成像的高分辨率和超声成像的成像深度, 对生物组织能够深层无损和高分辨成像; 它的另一个较大优势在于其可延展性, 从单个细胞到整个器官, 再到小动物的整个身体都可以实施光声成像^[1-5].

现有的光声成像系统中, 大体可分为扫描光声成像系统^[6]、多元阵列相控聚焦光声成像系统^[7]、声透镜光声成像系统^[8-10]等. 其中扫描和相控聚焦光声成像系统要通过复杂的设备和精确的扫描才能使光声信号相位匹配, 需要进行数据的叠加和反投影运算.

基于声透镜的光声成像系统, 光声信号通过声透镜直接聚焦成像, 实现精确相位匹配, 避开了扫描和相控聚焦光声成像系统中所需的复杂设备安排和大量的数据记录、叠加及反投影过程, 成像系统简单、成本低.

目前基于声透镜的光声成像技术研究的报道

并不多, 研究主要聚焦于样品光声像的重建方法. 伯尔尼大学的研究小组^[8]将 4f 声透镜光声成像系统与光学暗场法结合起来, 对样品光声信号直接成像. 该方法可以实时成像, 但信噪比低, 成像对比度差. 我们研究小组用凹声透镜光声成像系统实现了横向(垂直于透镜轴线方向)分辨率约为 4—5 mm 的光声成像; 声透镜轴向上, 利用时间分辨技术和峰值保持器^[9], 实现了轴向层距 1.5 mm 的光声层析成像.

用声透镜光声成像系统进行成像时的问题在于: 1) 用样品的光声压分布等效其吸收分布并直接投影成像, 这种等效只是一种近似, 理论上并不准确; 2) 点源样品被照射后产生的光声信号, 在轴向上并非一个冲激, 而是有一定时间宽度的脉冲. 如果轴向分布样品前后两点相邻很近时, 它们的光声信号必然会在轴向上相遇, 并在同一时刻到达像面上同一位置, 此时探测器记录的光声信号是前后两点光声信号的叠加.

针对重建时用光声压粗略近似的现状, 以及声透镜轴向上信号的叠加干扰问题, 本文研究了声透

* 国家自然科学基金(批准号: 61178086)和广东省自然科学基金(批准号: S2013020012810)资助的课题.

† 通信作者. E-mail: tangzhl@scau.edu.cn

镜像面上光声压信号的时间分布与样品轴向系数之间的关系, 并提出了用积分法和瞬时值提取法进行光声像的重建.

2 声透镜光声成像基本原理

2.1 样品光声信号的产生

用脉宽 τ 的短脉冲激光照射均匀吸收性样品时, 样品产生光声信号. 设样品在源点 \mathbf{r}' 处的吸收系数为 $A(\mathbf{r}')$, 在空间 \mathbf{r} 处的光声压为 $p(\mathbf{r}, t)$ 、光吸收投影为 $S(\mathbf{r}, t)$, 则它们之间的关系如下^[6]:

$$p(\mathbf{r}, t) \approx \frac{\beta I_0 c t}{4\pi C_p} \tau \frac{d}{dt} \oint_{|\mathbf{r}-\mathbf{r}'|=ct} A(\mathbf{r}') \frac{d\mathbf{r}'}{ct}, \quad (1)$$

$$\begin{aligned} S(\mathbf{r}, t) &= \frac{4\pi C_p t}{\beta I_0 c \tau} \int_0^t p(\mathbf{r}, t') dt' \\ &= \oint_{|\mathbf{r}-\mathbf{r}'|} A(\mathbf{r}') d\mathbf{r}', \end{aligned} \quad (2)$$

其中 β 是等压膨胀系数, c 是光声信号速度, C_p 为比热, I_0 为照射光强度. (2) 式表明样品的光声压信号与吸收系数的导数成正比, 因此对样品的光声压信号 $p(\mathbf{r}, t)$ 对时间积分, 可得到样品的吸收投影 $S(\mathbf{r}, t)$.

在样品光声信号刚刚产生而未经传输的那一刻, $|\mathbf{r} - \mathbf{r}'| = 0$, 此时由 (2) 式可得

$$S(\mathbf{r}', 0) = A(\mathbf{r}'), \quad (3)$$

即在样品点位置, 样品的光吸收分布 $S(\mathbf{r}', 0)$ 等于样品在该处的吸收系数 $A(\mathbf{r}')$, 因此可以用吸收系数即光声压信号的积分来进行投影成像.

2.2 声透镜光声成像系统

声透镜横向上(平行于镜面的 xoy 平面)与光学透镜相似; 轴向(平行于声透镜轴线的 z 向)上成像特性如图 1 所示, 在景深范围内的光声信号都可以在同一像面上聚焦成像; 且超声速度远远小于光速, 利用时间分辨技术可实现声透镜的轴向成像.

图 1 中, 设点样品 A_1, A_2, \dots, A_n 在声透镜的景深范围内, 用脉冲光照射时, 它们的光声信号依次在同一像面上聚焦成像, 它们到达像面的时间与样品的空间 z 坐标一一对应. 设样品 A_1 左边任一点为 z 坐标的原点, 原点产生的光声信号到达像面的时间为 t , 光声信号从原点传输到 A_1, A_2, \dots, A_n 所需的时间分别为

t_1, t_2, \dots, t_n , 若 $A_1(t_1), A_2(t_2), \dots, A_n(t_n)$ 记为 A_1, A_2, \dots, A_n 的吸收系数, $h(t)$ 为声透镜的时间点扩散函数, 则光声探测器记录的光声信号 $P(t)$ 为

$$\begin{aligned} p(t)|_{t=t_1-t_n} &= A_1(t_1)h(t-t_1) + A_2(t_2)h(t-t_2) \\ &\quad + \dots + A_n(t_n)h(t-t_n) \\ &= A(t) \otimes h(t). \end{aligned} \quad (4)$$

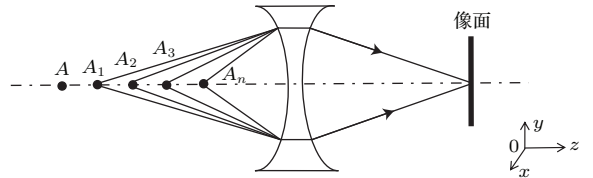


图 1 轴向上不同点的光声信号

Fig. 1. PA signals imaging of different points along axial direction of acoustic lens.

2.3 光声像重建理论

不考虑声透镜像差等因素, 利用时间分辨技术, 声透镜的轴向分辨率为

$$AR \approx \tau v, \quad (5)$$

其中 τ 为声透镜时间点扩散函数 $h(t)$ 的脉宽, v 为光声信号的传播速度. 因此, 声透镜光声成像系统的轴向分辨率取决于点源光声信号的时间脉宽.

当轴向两点距离小于 AR 时, 根据 (4) 式, 可用测得的光声压 $P(t)$ 与点源光声信号 $h(t)$ 做逆卷积运算, 求解样品吸收系数, 但逆卷积对采集数据的精确度要求比较高, 数据处理时误差较大.

结合 (2) 和 (3) 式, 对声透镜像面上光声压信号积分, 也可以获得样品的轴向吸收分布, 但积分法会对信号起到平滑作用, 因此对高频信息的衰减更大.

当样品均匀时, (4) 式中的 $h(t-t_n)$, 对不同 n 值大小和波形完全相同, 差别仅仅是横轴上时移 t_n 不同, 因此每一个求和项 $A_n(t_n)h(t-t_n)$ 的峰值均正比于 $A_n(t_n)$, 因此只要求出 $p(t)$ 的瞬时峰值, 就可以得到样品上各点吸收系数 $A_1(t_1), A_2(t_2), \dots, A_n(t_n)$ 的曲线.

基于上述情况, 除了积分法, 本文同时选择了类似于 OCT 中的信号提取方法, 用希尔伯特变换构造解析函数求光声压信号 $p(t)$ 的瞬时包络, 从而得到各点样品的吸收系数 $A_1(t_1), A_2(t_2), \dots, A_n(t_n)$, 重建样品光声像.

希尔伯特变换法适用于窄带信号瞬时值的提取, 当采用的超声探测器带宽较窄时, 可以把记录的光声信号近似看成窄带信号.

3 声透镜光声成像的实验研究

3.1 基于声透镜的光声成像实验系统

声透镜光声成像实验系统如图2所示, 照射光为YAG激光器产生的脉冲激光, 发射波长1064 nm, 倍频后变为532 nm, 脉宽7 ns; 声透镜由有机玻璃制成, 直径40 mm, 焦距100 mm; 样品由黑胶带制作; 探测器为压电陶瓷材料制成的1×128线阵排列超声探头(面积0.3 mm×5 mm, 探元间距0.3 mm, 中心频率7.5 M); 步进电机实现y向扫描, 扫描步长0.3 mm; 自制模拟电子开关实现光声信号的串行采集; 为了保持同步采集, 模拟电子开关由激光器触发信号同步触发; 数据采集卡的采集频率为20 M.

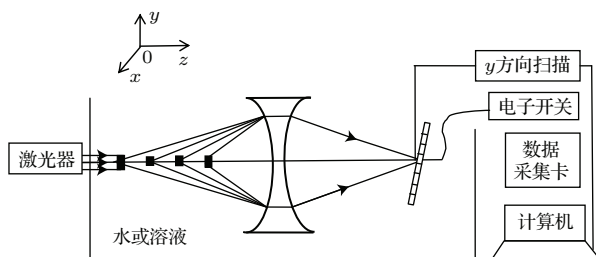


图2 基于声透镜的光声成像实验系统

Fig. 2. The photoacoustic imaging system based on acoustic lens.

用脉冲激光照射样品, 激发样品产生光声信号, 在水或溶液耦合中传输, 经声透镜聚焦成像后, 由置于声透镜像面上的线阵超声探测器沿y方向扫描记录, 并转换为电信号, 通过模拟电子开关和数据采集卡传输给计算机.

线阵探测器的采集时间周期为0.133 μs, 即为实验系统的最小时间分辨率, 耦合液用牛奶溶液, 声速约为1.5 mm/μs, 根据(5)式, 声透镜光声成像系统能够分辨的理论最小层距约为0.2 mm.

线阵探测器沿x方向的像素数与探元个数相同, 为128, 相邻像素距离取决于探元间距; 在y方向上, 从上到下依次扫描60次, 故像素坐标为60个, 扫描步长设为0.3 mm; 在每一个扫描位置上, 每个探元按时间依次记录256个数据, 所以z轴为256像素, 数据卡的采集频率为20 M, 故z向相邻

两点采集的时间间隔为0.05 μs, 对应空间距离为τ乘以耦合液中的超声速度.

综上所述, 基于图2的系统, 记录可得样品128×60×256像素的三维光声信号.

3.2 横向单层薄样品的光声成像

用黑色胶带做两个间距为点1 mm的点, 贴在透明有机玻璃上, 制成单层薄样品. 样品置于声透镜的景深范围内, 与镜面平行放置, 即两点在声透镜同一物面.

当激光照射时, 样品的光声信号在声透镜的像面上聚焦成像, 用探测器在像面上记录, 得到光声信号的时间分布和重建光声像分别如图3(a)和图3(b)所示.

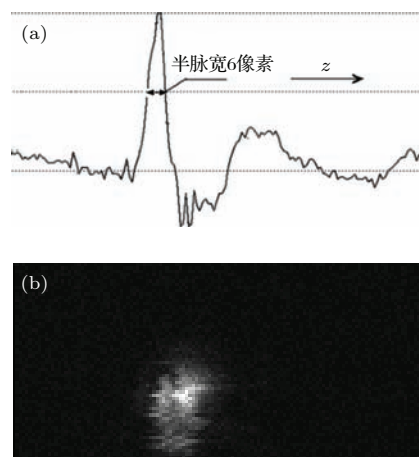


图3 横向单层薄样品(间距为1 mm的两个点)的光声信号及重建像 (a) 样品归一化光声信号沿z向分布; (b) 横向光声重建像

Fig. 3. PA signals and reconstruction image of sample (two points with 2 cm apart) on lateral of acoustic lens: (a) The normalized PA signals along z-axis; (b) the lateral reconstructed PA image.

图3(a)为单层薄样品的光声信号沿声透镜轴向的时间分布, 其半高宽约为6像素, 根据采样频率20 M, 可算出时间脉宽0.3 μs, 大于理论值0.133 μs. 图3(b)为样品的横向重建像, 可以看出两点能够勉强分辨, 因为声透镜的像差较大, 导致横向分辨率低, 成像质量较差.

3.3 轴向两层样品的三维光声成像

用黑色胶带制作轴向两层样品, 层间距为1 mm, 一层为直径为10 mm的圆环, 另一层为横向间距5 mm的两个点吸收样品, 两点与圆环的中心在同一水平面上, 如图4(a)所示.

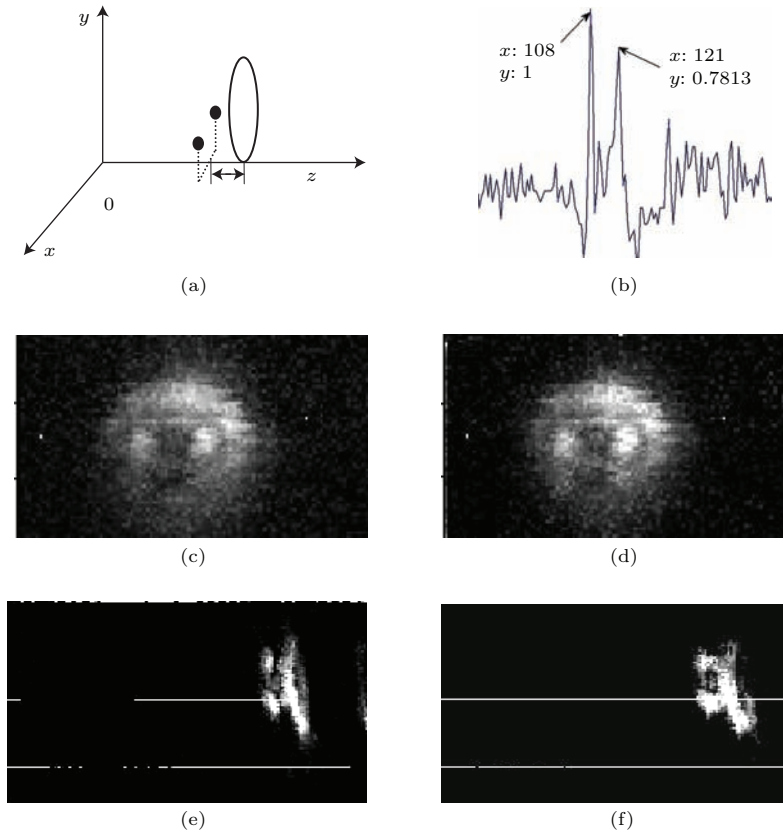


图4 轴向两层(圆环、两点)样品的三维光声图像重建 (a) 样品的放置示意图; (b) 某一探元记录的样品的光声信号; (c) 用积分法重建的横向光声像; (d) 用希尔伯特变换法重建的横向光声像; (e) 用积分法重建的俯视轴向光声像; (f) 用希尔伯特变换法重建的俯视轴向光声像

Fig. 4. 3-D PA image reconstruction of two layers sample (one layer is circular ring, another layer is two points): (a) The placement of the samples; (b) PA signals recorded by a certain detector; (c) lateral PA image reconstructed by integration directly; (d) lateral PA image reconstructed by instantaneous value from HT; (e) top view image along axial by integration directly; (f) top view image along axial by instantaneous value from HT.

由于轴向两层样品距离为 1 mm, 根据采集频率和声速, 两层样品的光声信号之间的像素距离应为 13 个, 对于图 4(b) 中实际记录的光声信号峰值之间的距离可看出, 实际情况与理论值比较吻合. 图 4(c) 和图 4(d) 为用积分法和希尔伯特变换法分别重建的样品横向光声像, 即平行于声透镜的光声投影像, 可以看出基本上反映了样品的实际情况. 两幅重建像的下面部分圆环缺失, 可能是照射光不均匀导致下部的的光声信号较弱引起的. 从图 4(a) 样品可以看出, 俯视时, 看到样品形态应该为相距 1 mm 的两层样品, 其中两个点不变, 而圆环俯视时应为一条直线, 因此此时的像为两个点和一条直线. 图 4(e) 和图 4(f) 分别为积分法和希尔伯特变换法重建的俯视光声像沿轴向的分布, 分别展示了样品在该向的实际分布情况.

综合而言, 实验重建结果表明, 积分法和希尔伯特变换法都能够实现声透镜轴向的光声像重建

和系统中样品的三维光声像重建.

4 总结

在之前的声透镜光声成像研究中, 轴向重建是用光声压信号粗略近似样品的吸收系数进行光声像的重建. 本文提出用积分法和希尔伯特变换法精确重建样品沿轴向的光声像; 理论上, 阐述了声透镜像面上光声压信号的时间分布与景深范围内样品轴向吸收之间的关系; 实验上, 分别用积分法和希尔伯特变换法对样品实现了轴向的光声像重建, 获得了样品的三维光声像; 重建像沿声透镜横向和轴向的实际分辨率均为 1 mm.

另外, 影响成像分辨率的因素还包括系统硬件, 譬如声透镜的像差, 这是声透镜比光学透镜相比最主要的缺陷, 有待于进一步用软件补偿方法或者设计加工工艺进行改进.

参考文献

- [1] Wang L H, Hu S 2012 *Science* **335** 1458
 [2] Xing W X, Wang L D, Maslov K, Wang L H 2013 *Opt. Lett.* **38** 52
 [3] Wang Y, Li C, Wang R K 2011 *Opt. Lett.* **36** 3975
 [4] Xu X H, Li H 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 4628 (in Chinese) [徐晓辉, 李晖 2008 物理学报 **57** 4628]
 [5] Yu X G, Tang Z L, Chen G S, Liu J L 2002 *Physics* **31** 98 (in Chinese) [余晓光, 唐志列, 陈更生, 刘金龙 2002 物理 **31** 98]
 [6] Kruger R A, Liu P, Fang R, Appledorn C 1995 *Med. Phys.* **22** 1605
 [7] Zhou Q, Ji X, Xing D 2011 *Med. Phys.* **38** 1561
 [8] Niederhauser J J, Jaeger M, Frenz M 2004 *Appl. Phys. Lett.* **85** 846
 [9] Chen Z X, Tang Z L, Wan W, He Y H 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 4365 (in Chinese) [陈湛旭, 唐志列, 万巍, 何永恒 2006 物理学报 **55** 4365]
 [10] Heijblom M, Piras D, Xia W, Hespén J C G, Engh F M, Klaase J M, Leeuwen T G, Steenbergen W, Manohar S 2012 *Proc. SPIE* California, USA February 9, 2012 p116

Three-dimensional photoacoustic imaging technique based on acoustic lens*

Zhang Yu¹⁾²⁾ Tang Zhi-Lie^{1)†} Wu Yong-Bo¹⁾ Shu Gang³⁾

1) (School of Physics and Telecommunication Engineering, South China Normal University, Guangzhou 510006, China)

2) (School of Electronic Engineering, South China Agriculture University, Guangzhou 510642, China)

3) (School of Animal Science, South China Agriculture University, Guangzhou 510642, China)

(Received 6 May 2015; revised manuscript received 27 July 2015)

Abstract

Reconstruction of a sample photoacoustic (PA) image is the research focus in PA imaging system that is based on acoustic lens. Among all existing reconstruction methods, the reconstructing PA image is usually obtained by the projection of the absorption distribution which is regarded as PA signal of a sample. However, this equivalent relationship is just approximate and not accurate in theory. In this paper, the accurate relationship between the absorption coefficients of the sample placed on the object plane and its PA pressure signals focused on the image plane is successfully demonstrated. Both the integral and the extraction envelope methods are firstly proposed to reconstruct the axial PA image of an absorbent sample. The resolution of the reconstructed PA image obtained by Hilbert transform is theoretically higher than that by integral method, and the reason is explained. Different samples are chosen to experiment on the acoustic lens PA imaging system. A three-dimensional fast PA imaging of the absorbent sample is realized by combining its axial imaging capability with its lateral imaging capability of acoustic lens. The reconstruction result shows that both the lateral and the axial resolutions of the reconstruction image are both about 1 mm. The quality of a sample PA image obtained by Hilbert transform is better than that by integral method.

Keywords: acoustic lens, photoacoustic imaging, integral method, Hilbert transform

PACS: 07.05.Pj, 87.85.Pq, 87.57.-s

DOI: 10.7498/aps.64.240701

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 61178086) and the Natural Science Foundation of Guangdong, China (Grant No. S2013020012810).

† Corresponding author. E-mail: tangzhl@scnu.edu.cn