

文章编号 2095-1531(2016)05-0515-08

成像深度对光声层析成像的影响

谭毅^{1*}, 李长辉²

(1. 陕西理工大学 物理与电信工程学院, 陕西 汉中 723001;
2. 北京大学 工学院 生物医学工程系, 北京 100871)

摘要:为了研究不同成像深度对光声层析成像质量的影响,利用多元线性阵列探测器在有限方位进行探测成像。由仿真和实验结果表明,吸收体离探测器越近,其成像效果较好,当多元线性阵列探测器的尺寸与成像深度比小于1时,重建图像畸变明显。在这种情况下,采用旋转扫描探测,其成像效果明显提高。该研究结果对光声层析成像扫描轨迹的设计、成像效果评估具有较好的参考价值。

关键词:光声层析成像;成像深度;医用光学与生物技术

中图分类号:Q334 文献标识码:A doi:10.3788/CO.20160905.0515

Influence of imaging depth on photoacoustic tomography

TAN Yi^{1*}, LI Chang-hui²

(*School of Physics and Telecommunication Engineering,
Shaanxi SCI-TECH University, Hanzhong 723001, China;*

*2. Department of Biomedical Engineering, College of
Engineering, Peking University, Beijing 100871, China)*

** Corresponding author, E-mail: tanyi@snut.edu.cn*

Abstract: In order to research on the influence of imaging depth on photoacoustic tomography, the multiple linear array detectors is used for detection imaging at limited-view. Both simulation and experimental results show that the reconstructed image qualities are better as the absorber is closer to the detectors. Image distortion becomes obvious when the ratio of detectors size to the imaging depth is less than 1. We also demonstrated that the image distortion can be significantly reduced by rotating the multiple linear array detectors. This study helps the design of scanning strategy and the evaluation of reconstructed images.

Key words: photoacoustic tomography; imaging depth; medical optics and biotechnology

收稿日期:2016-04-20;修订日期:2016-05-15

基金项目:国家重大科学仪器专项资助项目(No. 2011YQ030114);国家重点基础研究发展计划(973计划)资助项目(No. 2011CB707502);国家自然科学基金资助项目(No. 11104058)

Supported by National Major Scientific Instrument Special Project of China(No. 2011YQ030114), National Program on Key Basic Research Projects of China(No. 2011CB707502), National Natural Science Foundation of China(No. 11104058)

1 引言

利用时变的光束照射吸收体时,吸收体因受热膨胀而产生声压,这种现象叫做光声效应。在各个方向探测从吸收体中传播出来的光声压,并通过相应的图像重建算法,就可以重建出吸收体的光吸收分布。这种成像方法集合了光学性质的高对比度的优点以及超声成像技术的高分辨率、高穿透深度的优点,所以可以得到高分辨率、高对比度的重建图像^[1-3]。

为了提高光声信号的采集效率,国内外很多研究小组都在发展各种多元阵列探测器在有限方位探测成像^[4-8]。为了进行更深层病变组织的光声成像,研究人员利用微波激发热声信号^[9-10],以及给病变组织加入特定波长吸收的造影剂^[11-18],使光声信号的强度增加,从而可以实现深层病变组织的快速光声成像。但是对于多元阵列探测器在有限方位对深层病变组织进行探测成像时,由于数值孔径的变小,导致图像质量变差。为了解决这个问题,研究人员提出利用1个或者2个声反射镜^[19-20],使探测的数值孔径变大,通过超声加热编码使探测的数值孔径变大^[21],或者通过旋转多元阵列探测器^[22]、旋转样品^[23]以及直接采用环形阵列探测器^[24],在360°范围内探测扫描成像,从而改善重建图像的质量。但基于成像深度变化引起探测器的数值孔径变化,从而引起重建图像有着不同的畸变,究竟在什么情况下需要通过旋转多元阵列探测器来改善其数值孔径,而且旋转的次数对图像质量究竟有多大的改变,目前还没有类似报道。

本文利用多元线性阵列探测器在有限方位对不同成像深度进行光声层析成像,由仿真和实验结果表明,吸收体离探测器越近,即探测器的数值孔径越大,其成像效果较好,当多元线性阵列探测器的尺寸与成像深度比小于1时,重建图像畸变明显,在这种情况下,采用旋转扫描探测,其成像效果明显提高。

2 理论分析

光声成像就是对光吸收空间分布的反演。在

忽略热传导的情况下,对于声速均匀的组织,探测器在空间某一位置接收到的光声信号 $p(r,t)$ 和光吸收系数分布 $A(r)$ 的关系可以表示为^[21]:

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

式中, β 为等压膨胀系数, c 为声速, C_p 为比热, I_0 为光强, τ 为脉冲激光的脉宽, r 表示光声信号场点的位置, r' 表示光声源的位置, t 表示光声信号从源点传播到场点所用的时间。

由于多元线性阵列探测器只在有限方位接收光声信号,假设不能扫描方位的数据为零,由式(1)可得二维断层反投影重建光吸收分布为^[25]:

$$A(r) = -\frac{C_p |r_0|^2}{2\pi\beta c_0^4} \int_{\theta_1}^{\theta_2} d\theta \frac{1}{t} \left. \frac{\partial p(r_0,t)}{\partial t} \right|_{t=|r-r_0|/c_0}, \quad (2)$$

式中, r_0 为多元线性阵列探测器的探测单元到成像区域(方形灰色部分)中心 O 的矢径, θ_1 、 θ_2 分别表示 x 轴正方向与多元线性阵列探测器两侧的夹角,即 Ox 分别与 OA 和 OB 的夹角, $\Delta\theta = |\theta_2 - \theta_1|$,如图1所示,假设多元线性阵列探测器的总宽度为 l ,多元线性阵列探测器的中心到成像区域中心 O 的距离为 f ,则探测的数值孔径, $NA = \sin(\frac{\Delta\theta}{2}) \approx \tan(\frac{\Delta\theta}{2}) = \frac{l}{2f}$,如果 f 越小, l 一定,则 $\Delta\theta$ 越大,相当于扫描的角度越多,探测的数值孔径越大,成像效果也就越好,反之成像效果将越差,如果将多元线性阵列探测器旋转扫描,则扫描

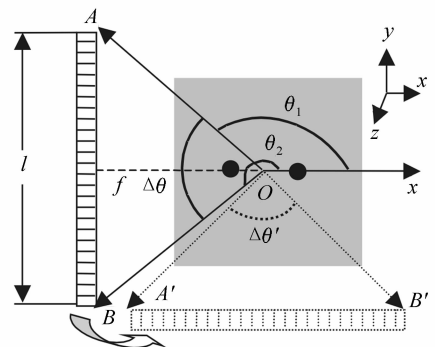


图1 多元线性阵列探测器与成像区域的相对位置
Fig. 1 Relative position of the multiple linear array detectors and the imaging area

的角度则变为 $|\Delta\theta + \Delta\theta'|$,所以成像效果也会得到提升。

3 仿真研究

图1中两个圆形的黑点为吸收体,设其直径均为2.0 mm,圆心距为8.0 mm,其光学吸收系数为1.0,背景的光学吸收系数为0.02,成像区域的像素点数为 201×201 个(尺寸为2.0 cm \times 2.0 cm),像素点之间的点距为0.1 mm/pixel,吸收体和背景之间没有声阻抗差别,脉冲激光沿着 $-z$ 轴方向均匀的照射在成像区域上。根据式(1)计算吸收体在不同位置处产生的光声压,将多元线性阵列探测器(共有128个探测单元,每个探

测单元都视为一个理想的点探测器,相邻探测单元之间的距离为0.31 mm,即整个多元线性阵列探测器的宽度约为4.0 cm)置于成像区域的左侧,选用多元线性阵列探测器正对两个圆形黑色吸收体的探测单元进行光声信号的探测,其结果如图2(a)~2(d)所示,探测单元到成像区域边缘的距离(即探测距离)分别为 $d = 0.0$ cm、 $d = 1.0$ cm、 $d = 3.0$ cm、 $d = 5.0$ cm,具体做法是将整个多元线性阵列探测器向左平移,从图2中可以看出,随着探测距离的增加,其信号强度和信噪比都在明显减弱,其原因由式(1)可知,光声信号从源点到场点的距离 ct 越大,光声信号 $p(r, t)$ 的值将越小。

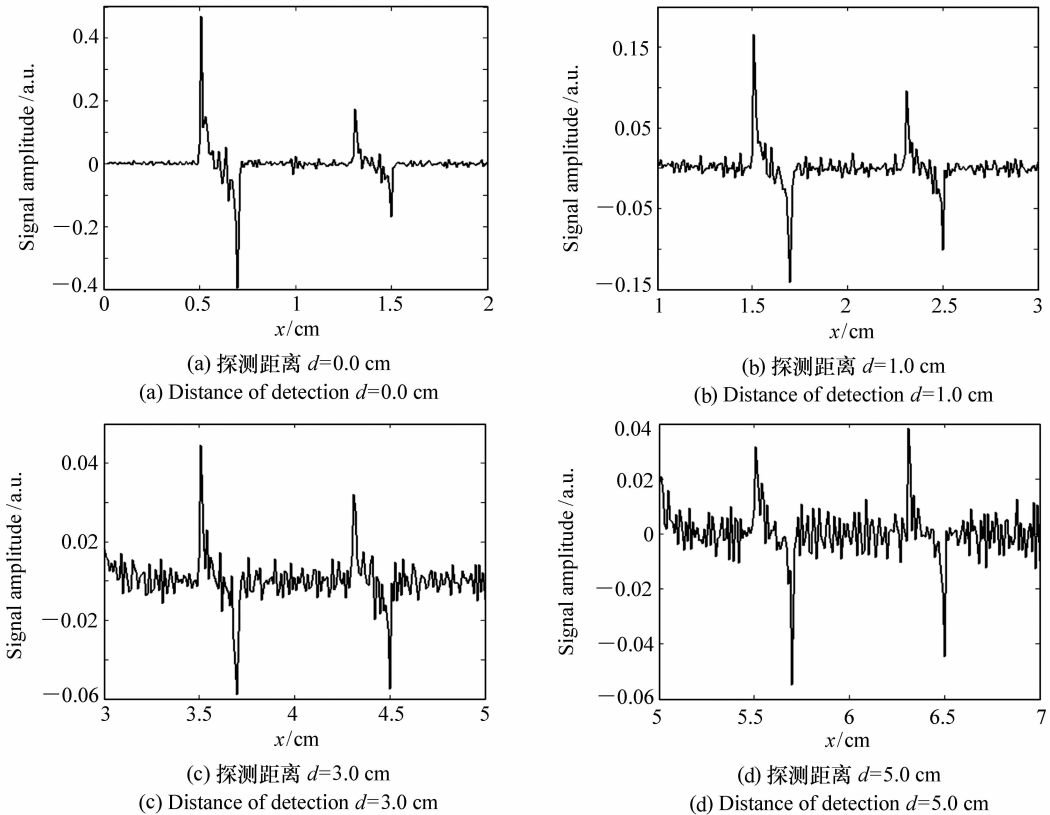


图2 光声信号随探测距离增大而衰减

Fig. 2 Attenuation of photoacoustic signal with the increase in detection distance

为了研究不同成像深度(多元线性阵列探测器到吸收体的距离,设为 s)对光声层析成像的影响,将多元线性阵列探测器置于成像区域的下方,如图1中虚线部分 $A'B'$ 所示,距离成像区域边缘

分别为 $d = 0.0$ cm、 $d = 1.0$ cm、 $d = 3.0$ cm、 $d = 5.0$ cm,具体做法是将整个多元线性阵列探测器向下平移,即多元线性阵列探测器在有限方位进行光声信号的探测,再利用滤波反投影算法对采

集的光声信号进行成像,其结果如图3(a)~3(d)所示,从重建图像上可以看出,随着成像深度的增加,即 $s = 1.0\text{ cm}$, $s = 2.0\text{ cm}$, $s = 4.0\text{ cm}$, $s = 6.0\text{ cm}$,两个圆形吸收体的畸变也越来越明

显,即在 x 方向被拉长了,即分辨率在下降,其原因这是由于探测的数值孔径在变小,并且由于成像深度的增加,光声信号衰减,其成像对比度也在下降。

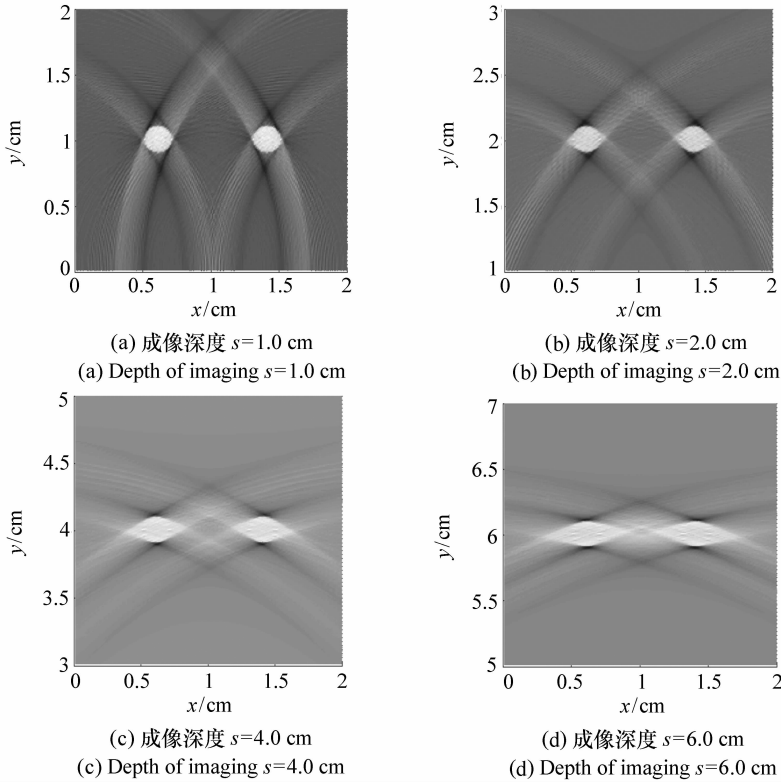


图3 不同成像深度对光声层析成像的影响

Fig. 3 Influence of imaging depth on image reconstruction

对于图3(c)~3(d),成像深度处于4 cm和6 cm,多元线性阵列探测器的尺寸为4 cm,即多元线性阵列探测器的尺寸与成像深度的比值 ≤ 1 ,

导致了成像质量下降明显。为了改善这一结果,分别将多元线性阵列探测器旋转1次和3次(扫描步长均为 90°),其结果如图4(a)~

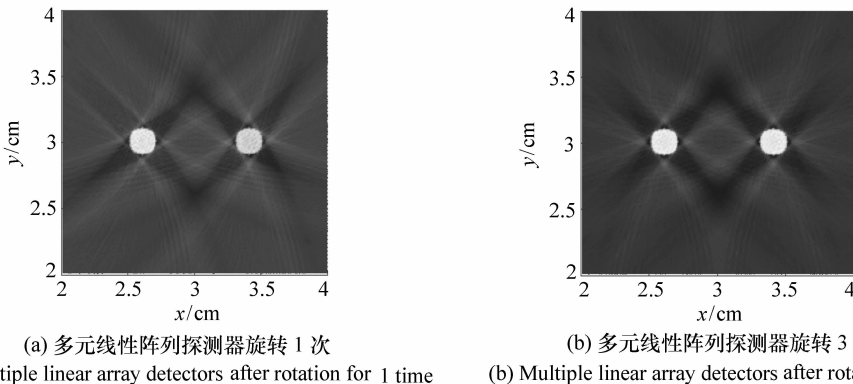


图4 多元线性阵列探测器旋转扫描层析成像

Fig. 4 Image reconstruction after rotating the multiple linear array detectors

4(b)所示。图4(a)是将多元线性阵列探测器置于成像区域的左侧和下方(即多元线性阵列探测器旋转了1次,探测距离 $d=2.0\text{ cm}$),从图中可以看出,其重建图像的质量得到了明显的提高;图4(b)是将多元线性阵列探测器置于成像区域的四周(即在全方位探测,多元线性阵列探测器旋转了3次,探测距离 $d=2.0\text{ cm}$),从图中可以看出,其重建图像的质量相对于图4(a)有所提高,但已经不明显。

为了进一步研究成像深度对光声层析成像的影响,模拟了26个字母作为吸收体,分别将多元线性阵列探测器旋转0次、1次和3次(扫描步长均为 90° ,探测距离 $d=2.0\text{ cm}$),其结果如图5中

(a)~(c)所示。图5(a)是将多元线性阵列探测器置于成像区域的上方,从重建图像上可以看出,离多元线性阵列探测器较近的第一排字母基本上还可以辨认出来,但离多元线性阵列探测器越远的则越不能分辨,其主要原因是探测器的数值孔径在变小;为了改善这一结果,将多元线性阵列探测器旋转1次,即把多元线性阵列探测器置于成像区域的上方和左侧,其成像质量得到明显的提高,如图5(b)所示,26个字母都可以很好的辨认;图5(c)是将多元线性阵列探测器置于成像区域的四周(即在全方位探测,多元线性阵列探测器旋转了3次),从图中可以看出,其重建图像的质量相对于图5(b)有所提高,但不明显。

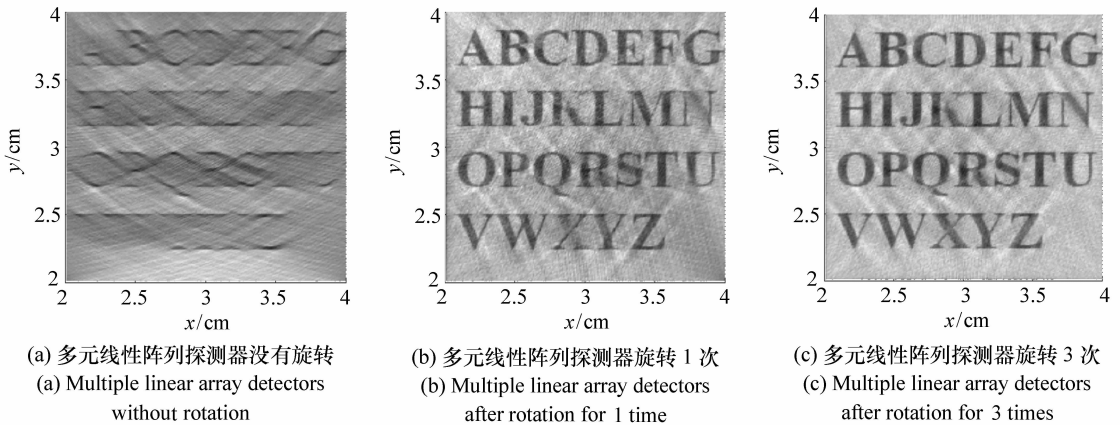


图5 深层复杂吸收体的光声层析成像

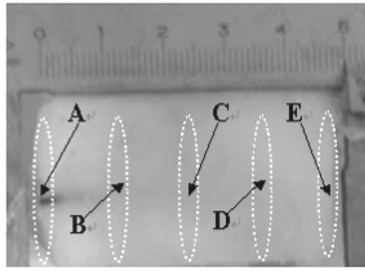
Fig. 5 Photoacoustic tomography of deep and complex absorbers

4 实验结果与讨论

为了进一步验证不同成像深度对光声层析成像的影响,在猪油中埋了一根长碳棒,碳棒长度为 5.2 cm ,直径为 0.7 mm ,碳棒在猪油中最浅端为 0.5 mm ,最深端为 20 mm ,碳棒与水平面的夹角约为 22.6° ,如图6(a)所示,实验装置与实验方法与参考文献[5]一致。

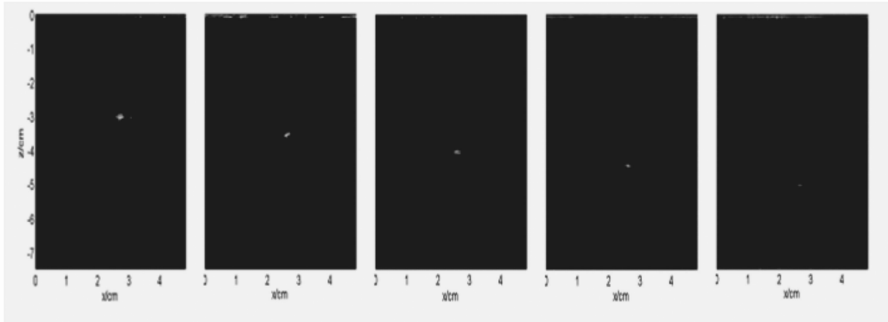
图6(b)为多元线性阵列探测器垂直于碳棒扫描的光声层析像,一共扫描了5个层析面(A、B、C、D、E),扫描的步长为 1.2 cm ,从重建图像中可以看出,各个断面都较好地反映了碳棒的位置

和形状,其主要原因是成像深度与多元线性阵列探测器的尺寸(大小为 49 mm)比没有超过1,但随着碳棒深度的增加,其层析像的强度在逐渐减小,主要原因是激光在组织中传播的衰减以及光声信号在组织中的衰减;当然,如果把重建图像放大进行观察,可以看到图像在 x 方向都被拉长了一些,其主要原因还是多元线性阵列探测器在有限角度探测光声信号,并且随着成像深度的增加,探测器的数值孔径变小,图像被拉长也相对明显一些,如果再把多元线性阵列探测器旋转扫描1次,其重建图像的质量将会得到一些改善,但不明显。



(a) 样品照片

(a) Photograph of the sample



(b) 与 A、B、C、D、E 对应的不同成像深度的光声层析成像

(b) Photoacoustic tomography of different imaging depth were obtained in five positions corresponding to areas A, B, C, D, and E

图6 不同深度组织的光声层析成像

Fig.6 Photoacoustic tomography of targets at different depths

5 结论

本文利用多元线性阵列探测器对不同成像深度进行光声层析成像,由仿真和实验结果表明,吸收体离探测器越近,其成像效果较好,当探测器的

尺寸与成像深度比小于1时,重建图像畸变明显;在这种情况下,采用旋转扫描探测,其成像效果明显提高。该研究结果对光声层析成像扫描轨迹的设计、成像效果评估具有较好的参考价值,特别是采用多元线性阵列探测器对深层病变组织进行光声成像,有着较好的借鉴意义。

参考文献:

- [1] WU N, YE SH Q, REN Q SH, *et al.*. High-resolution dual-modality photoacoustic ocular imaging[J]. *Optics Letters*, 2014, 39(8):2541-2454.
- [2] WANG Y, XING D, ZENG Y G, *et al.*. Photoacoustic imaging with deconvolution algorithm[J]. *Physics in Medicine and Biology*, 2004, 49(14):3117-3124.
- [3] 苗少峰, 杨虹, 黄远辉, 等. 光声成像研究进展[J]. *中国光学*, 2015, 8(5):699-713.
MIAO SH F, YANG H, HUANG Y H, *et al.*. Research progresses of photoacoustic imaging[J]. *Chinese Optics*, 2015, 8(5):699-713. (in Chinese)
- [4] YANG D W, XING D, ZHAO X H, *et al.*. A combined reconstruction algorithm for limited-view multi-element photoacoustic imaging[J]. *Chinese Optics Letters*, 2010, 27(5):0543011-4.
- [5] 谭毅, 何军锋. 基于多元相控技术的一体化光声快速成像系统[J]. *光子学报*, 2007, 36(9):1726-1729.
TAN Y, HE J F. Integrative fast photoacoustic imaging system based on multi-element phase-controlled technique[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2007, 36(9):1726-1729. (in Chinese)
- [6] KIM C H, ERPLDING T N, JANKOVIC L, *et al.*. Deeply penetrating in vivo photoacoustic imaging using a clinical ultrasound array system[J]. *Biomedical Optics Express*, 2010, 1(1):278-284.

- [7] YUAN Y, YAGN S H, XING D. Three-dimensional endoscopic photoacoustic imaging based on multielement linear transducer array[J]. *J. Applied. Physics*, 2011, 110:0547011-5.
- [8] 吴泳波, 唐志列. 基于声透镜的三维同时光声层析成像技术[J]. 科学通报, 2011, 56(23):1887-1890.
WU Y B, TANG ZH L. The three-dimensional simultaneous photoacoustic tomography imaging technique based on acoustic lens[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2011, 56(23):1887-1890. (in Chinese)
- [9] 杜劲松, 高扬, 毕欣, 等. S波段微波热致超声成像系统研究[J]. 物理学报, 2015, 64(3):0343011-6.
DU J S, GAO Y, BI X, et al. S-band microwave-induced thermo-acoustic tomography system[J]. *Acta Physica Sinica*, 2015, 64(3):0343011-6. (in Chinese)
- [10] LOU C G, YANG S H, JI ZH, et al. Ultrashort microwave-induced thermoacoustic imaging; a breakthrough in excitation efficiency and spatial resolution[J]. *Physics Review Letters*, 2012, 109(21):2181011-5.
- [11] 骆三, 查正宝, 李妍妍, 等. 光声成像造影剂的研究进展[J]. 现代生物医学进展, 2014, 14(25):4974-4977.
LUO S, ZHA ZH B, LI Y Y, et al. The research progress of photoacoustic imaging contrast agents[J]. *Progress in Modern Biomedicine*, 2014, 14(25):4974-4977. (in Chinese)
- [12] 孙正, 韩朵朵, 王健健. 血管内光声成像图像重建的研究现状[J]. 光电工程, 2015, 42(3):20-27.
SUN ZH, HAN D D, WANG J J. Review of image reconstruction for intravascular photoacoustic imaging[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2015, 42(3):20-27. (in Chinese)
- [13] 殷杰, 陶超, 刘晓峻. 多参量光声成像及其在生物医学领域的应用[J]. 物理学报, 2015, 64(9):0891021-10.
YIN J, TAO CH, LIU X J. Multi-parameter photoacoustic imaging and its application in biomedicine[J]. *Acta Physica Sinica*, 2015, 64(9):0891021-10. (in Chinese)
- [14] ZHOU Y, LI G, ZHU L R, et al. Handheld photoacoustic probe to detect both melanoma depth and volume at high speed in vivo[J]. *J. Biophotonics*, 2015, 8(11):961-967.
- [15] LI W W, CHEN X Y. Gold nanoparticles for photoacoustic imaging[J]. *Nanomedicine*, 2015, 10(2):299-320.
- [16] XIE W M, LIU Y B, LI ZH F, et al. Reconstruction of 3D light distribution produced by cylindrical diffuser in deep tissues based on photoacoustic imaging[J]. *Chinese Optics Letters*, 2014, 12(5):0517021-4.
- [17] JATHOUL A P, LAUFER J, OGUNLADE O, et al. Deep in vivo photoacoustic imaging of mammalian tissues using a tyrosinase-based genetic reporter[J]. *Nature Photonics*, 2015, 9:239-246.
- [18] ZHONG J P, YAGN S H. Contrast-enhanced photoacoustic imaging using indocyanine green-containing nanoparticles[J]. *J. Innovative Optical Health Sciences*, 2014, 7(1):13502291-7.
- [19] HUANG B, XIA J, MASLOV K, et al. Improving limited-view photoacoustic tomography with an acoustic reflector[J]. *J. Biomedical Optics*, 2013, 18(11):1105051-3.
- [20] LI G, XIA J, WANG K, et al. Tripling the detection view of high-frequency linear-array-based photoacoustic computed tomography by using two planar acoustic reflectors[J]. *Quantitative Imaging in Medicine and Surgery*, 2014, 5(1):57-62.
- [21] WANG L D, LI G, XIA J, et al. Ultrasonic-heating-encoded photoacoustic tomography with virtually augmented detection view[J]. *Optica*, 2015, 2(4):307-312.
- [22] YANG D W, XING D, YANG S H, et al. Fast full-view photoacoustic imaging by combined scanning with a linear transducer array[J]. *Optics Express*, 2007, 15(23):15566-15575.
- [23] LI G, LI L, ZHU L R, et al. Multiview Hilbert transformation for full-view photoacoustic computed tomography using a linear array[J]. *J. Biomedical Optics*, 2015, 20(6):0660101-6.
- [24] 杨迪武, 黄仲, 曾吕明, 等. 基于环形阵列探测器的快速光声成像[J]. 激光生物学报, 2015, 24(5):423-427.
YANG D W, HUANG ZH, ZENG L M, et al. Fast photoacoustic imaging based on an annular transducer array[J]. *Acta Laser Biology Sinica*, 2015, 24(5):423-427. (in Chinese)
- [25] 吴丹, 陶超, 刘晓峻. 有限方位扫描的光声断层成像分辨率研究[J]. 物理学报, 2010, 59(8):5846-5851.
WU D, TAO CH, LIU X J. Study of the resolution of limited-view photoacoustic tomography[J]. *Acta Physica Sinica*, 2010, 59(8):5846-5851. (in Chinese)

作者简介:



谭毅(1975—),男,湖南衡阳人,硕士,副教授,主要从事光声成像与应用光学仿真方面的研究。E-mail:tanyi@snut.edu.cn



李长辉(1974—),男,山东德州人,博士,教授,博士生导师,主要从事光声成像、活体荧光分子成像以及多模态分子医学影像方面的研究。E-mail:chli@pku.edu.cn

《中国光学》征稿启事

《中国光学》为双月刊,A4开本;刊号:ISSN 2095-1531/CN 22-1400/04;国内外公开发行人,邮发代号:国内12-140,国外BM6782。

- | | |
|-----------------|----------------|
| ★ 荷兰 Scopus 数据库 | ★ 中国精品科技期刊 |
| ★ 美国《乌利希国际期刊指南》 | ★ 中国科技核心期刊 |
| ★ 美国《化学文献》 | ★ 中国光学学会会刊 |
| ★ 波兰《哥白尼索引》 | ★ 中国科技论文与引文数据库 |
| ★ 俄罗斯《文摘杂志》 | ★ 中国期刊全文数据库 |
| | ★ 万方数字化期刊全文数据库 |
| | ★ 中国科技期刊数据库 |
| | ★ 中国光学期刊网数据库 |

主要栏目:微纳光学、信息光学、集成光电子、光谱学和光谱仪器、激光技术与应用、光学功能材料、光学设计与工艺、大气与空间光学、光学仪器与测试、综述、前沿动态、产业资讯、科普教学、实验室介绍、自然科学基金项目进展、前沿热点访谈、热点论文等。

发稿类型:学术价值显著、实验数据完整的原创性论文;研究前景广阔,具有实用、推广价值的技术报告;有创新意识,能够反映当前先进水平的阶段性研究简报;对当前学科领域的研究热点和前沿问题的专题报告;以及综合评述国内外光学技术研究现状、发展动态和未来发展趋势的综述性论文。

欢迎投稿、荐稿。

主管单位:中国科学院

主办单位:中国科学院长春光学精密机械与物理研究所

协办单位:激光与物质相互作用国家重点实验室

编辑出版:《中国光学》编辑部

投稿网址:<http://chineseoptics.net.cn>

邮件地址:chineseoptics@ciomp.ac.cn; zgxcn@126.com

联系电话:0431-86176852; 0431-84627061 传 真:0431-84627061

编辑部地址:长春市东南湖大路3888号(130033)