

# 位移场修正法抑制弹性成像幅度调制噪声

崔少国<sup>1</sup>, 彭彩碧<sup>2</sup>, 杨宏雨<sup>1</sup>

(1. 重庆理工大学计算机科学与工程学院 重庆 巴南区 400054; 2. 重庆市第三人民医院 重庆 渝中区 400014)

**【摘要】**结合位移位置估计提出位移场修正方法来抑制弹性成像幅度调制噪声。先用位移位置估计算法估计出位移位置,然后利用位置值使用线性插值法将位移修正到估计窗中心点,再使用梯度操作进行应变估计产生最终的弹性图像。基于位置估计的位移场修正法产生的弹性图像信噪比有显著的提高,在不同窗长和应变成像情况下,均优于幅度log压缩算法和幅度调制修正AMC算法。该方法更能有效地抑制弹性成像幅度调制噪声。

**关键词** 幅度调制噪声; 位移场修正; 位移位置估计; 弹性成像; 超声

中图分类号 TP399

文献标志码 A

doi:10.3969/j.issn.1001-0548.2014.02.029

## Suppressing Amplitude Modulation Noise by Using Displacement Field Correction based on Displacement Location Estimation

CUI Shao-guo<sup>1</sup>, PENG Cai-bi<sup>2</sup>, and YANG Hong-yu<sup>1</sup>

(1. School of Computer Science and Engineering, Chongqing University of Technology Banan Chongqing 400054;

2. Chongqing the Third Hospital Yuzhong Chongqing 400014)

**Abstract** Elastography based on pre- and post-compression signal window matching will generate amplitude modulation (AM) noise because of signal amplitude random fluctuation. On the basis of displacement location estimation, this paper proposes a displacement field correction (DFC) method to suppress AM noise. Firstly, the displacement locations are estimated by using the displacement location estimation algorithm. Then the displacement estimates are corrected by using the linear interpolation on the basis of displacement location estimates. Finally, the strains are estimated by using gradient operation and mapped into a grayscale image. Elastogram using the displacement field correction method has less AM noise significantly. The proposed method has the highest performance than signal amplitude log-compression (ALC) and amplitude modulation correction (AMC) at various strains or window-lengths. The DFC based on displacement location estimation can efficiently suppress AM noise.

**Key words** amplitude modulation noise; displacement field correction; displacement location estimation; elastography; ultrasound

超声弹性成像利用超声探测组织的相对硬度变化,为多种疾病的检测和临床诊断提供重要依据。该成像方法自提出以来,国内外许多专家学者在成像方法与成像品质提高方面进行了诸多的研究<sup>[1-5]</sup>。准静态徒手压缩法是超声弹性成像常用的方法,对压缩前后的信号使用窗匹配进行运动追踪,然后进行位移估计和应变估计。早期的研究发现,如果窗内信号有压缩且信号幅度有波动,在运动追踪时压缩前后信号窗的完美匹配是不可能的<sup>[6]</sup>。按照相关系数最大化准则匹配成功时,信号对齐较好的区域偏向于信号幅度较强的一端。不同的估计窗在匹配成功时,匹配较好区域可能在信号窗前端,也可能

在中间或后端。因此,估计窗内信号幅度的不同波动模式将引起位移估计误差的变动,反映在最后的弹性图像上就是噪声。该噪声由于受信号幅度波动的影响,称为幅度调制噪声(amplitude modulation noise, AM)<sup>[7]</sup>,其形成的主要原因是匹配窗间信号的压缩和信号幅度的随机波动,使经典算法估计的位移通常不是估计窗中心点的位移。

文献[6]提出了信号幅度压缩(amplitude log-compression, ALC)算法来对幅度调制噪声进行抑制。信号的压缩减小了信号波动幅度,因此使匹配成功时信号对齐较好区域向窗的中心移动,实验结果表明,它是一种较有效的幅度调制噪声抑制方

收稿日期: 2012-06-27; 修回日期: 2012-12-28

基金项目: 国家自然科学基金(61202348); 重庆市科委自然科学基金(cstc2012jjA40030); 重庆市教委科学技术研究项目(KJ130826)

作者简介: 崔少国(1974-),男,博士,副教授,主要从事医学图像处理、医学成像与智能计算方面的研究。

法。文献[8]提出了幅度调制修正(amplitude modulation correction, AMC)算法, 通过信号幅度波动进行位移位置估计, 然后在新的位置上进行梯度操作做应变估计, 从而产生弹性图像。实验证明当信号幅度波动较大时, 该方法能显著增强弹性图像的性能。然而, 该算法所求的应变不是规则估计位置(即估计窗中心点)的应变值, 因此常引起应变图像外观扭曲和纹理波动。

本文在以上研究的基础上提出了一种基于位移位置估计的位移场修正(displacement field correction, DFC)方法, 该方法使用位移位置估计将初始位移估计值修正到估计窗中心位置上, 然后进行应变估计和成像。通过仿真和弹性体模实验证实, 与ALC和AMC方法相比, 该方法能更有效地抑制幅度调制噪声。

## 1 方法

### 1.1 幅度调制噪声

设 $\varepsilon$ 为应变, 则一般来说 $\varepsilon$ 是连续两个轴向估计窗的位移之差除以它们之间的跨度:

$$\varepsilon = \frac{u_2 - u_1}{\Delta L} \quad (1)$$

由于幅度调制, 连续两个轴向位移估计值之间的跨度并不是常数 $\Delta L$ , 因此 $\varepsilon$ 表示为:

$$\varepsilon = \frac{u_2 - u_1}{L_2 - L_1} \quad (2)$$

式中,  $u_1$ 和 $u_2$ 分别表示两个连续估计窗的位移;  $L_1$ 和 $L_2$ 是两位移对应的位置, 定义 $U$ 和 $L$ 分别为:

$$U = u_2 - u_1 \quad (3a)$$

$$L = \frac{1}{L_2 - L_1} \quad (3b)$$

则有:

$$\varepsilon = UL \quad (3c)$$

假设 $U$ 和 $L$ 是不相关的两个随机变量, 因此应变估计方差可表示为<sup>[7]</sup>:

$$\sigma_\varepsilon^2 = \sigma_U^2 \sigma_L^2 + \mu_L^2 \sigma_U^2 + \mu_U^2 \sigma_L^2 \quad (4)$$

式中,  $\mu$ 表示数学期望;  $\sigma^2$ 表示方差;  $\sigma_U^2$ 表示位移估计产生的方差;  $\sigma_L^2$ 表示位置错误引起的方差。假定下面3个近似:  $\mu_\varepsilon = \varepsilon$ ,  $\mu_L = 1/\Delta y$ ,  $\mu_U = \varepsilon \Delta y$ ,  $\Delta y$ 表示相邻估计窗之间轴向跨度; 则有:

$$\sigma_\varepsilon^2 = \sigma_U^2 \sigma_L^2 + \frac{\sigma_U^2}{\Delta y^2} + \varepsilon^2 \Delta y^2 \sigma_L^2 \quad (5)$$

在均匀弹性组织中, 信噪比 $\text{SNR}_\varepsilon$ 定义为<sup>[9]</sup>:

$$\text{SNR}_\varepsilon = \frac{\mu_\varepsilon}{\sigma_\varepsilon} \quad (6)$$

式中,  $\mu_\varepsilon$ 为平均应变;  $\sigma_\varepsilon$ 为应变估计的标准方差。从式(5)和式(6)可以得到<sup>[7]</sup>:

$$\text{SNR}_\varepsilon = \frac{\varepsilon}{\sqrt{\sigma_U^2 \sigma_L^2 + \frac{\sigma_U^2}{\Delta y^2} + \varepsilon^2 \Delta y^2 \sigma_L^2}} \quad (7)$$

式(7)表明当在高应变和长窗时, 幅度调制噪声将成为弹性成像的主要噪声源。

### 1.2 位移估计

位移估计采用相位根搜索(phase root seeking, PRS)牛顿迭代法<sup>[2]</sup>, 使用以下公式迭代产生:

$$\tau_{0,0} = 0, \tau_{k,0} = \tau_{k-1,N}$$

$$\tau_{k,n} = \tau_{k,n-1} + \frac{1}{\omega_0} \arg[e^{-j\omega_0 \tau_{k,n-1}} \times$$

$$\int_{kT_s - \frac{T_w}{2}}^{kT_s + \frac{T_w}{2}} y_{1b}^*(t + \tau_{k,n-1}/2) y_{2b}(t - \tau_{k,n-1}/2) dt] \quad (8)$$

式中,  $\tau_{k,n}$ 是轴向第 $k$ 个估计位置第 $n$ 次迭代的位移估计;  $y_{1b}$ 和 $y_{2b}$ 分别是压缩前、后基带回波信号;  $N$ 是迭代次数;  $T_s$ 是采样周期;  $T_w$ 是窗长; \*表示共轭。

信号幅度log压缩基本思想是位移估计时, 先将信号的幅度采用对数法进行非线性压缩, 减少幅度随机波动对位移估计的影响。对于基带复信号 $y_b(t)$ , 则它对应的压缩信号 $y_{b,\log}(t)$ 为:

$$y_{b,\log}(t) = \log(1 + c |y_b(t)|) e^{j \arg y_b(t)} \quad (9)$$

式中,  $c$ 是压缩因子,  $c$ 越大保留的幅度信息量越小。

### 1.3 位移位置估计

位移的位置估计采用文献[8]提出的位移位置估计算法, 位移的轴向位置估计由如下公式确定:

$$L_k = \frac{\sum_{t=kT_s}^{kT_s+T_w} W(t, \tau_{k,N}) t}{\sum_{t=kT_s}^{kT_s+T_w} W(t, \tau_{k,N})} \quad (10)$$

式中,  $L_k$ 是第 $k$ 个分析窗的位移位置;  $T_s$ 是采样周期;  $T_w$ 是窗长;  $\tau_{k,N}$ 是分析窗的轴向估计位移;  $W(t, \tau_{k,N})$ 是权值。文献[8]已证明实现位移位置估计的一种可行的加权策略如下:

$$W(t, \tau_{k,N}) = |y_{1b}(t)| |y_{2b}(t + \tau_{k,N})| \quad (11)$$

式中,  $|y_{1b}(t)|$ 和 $|y_{2b}(t + \tau_{k,N})|$ 分别表示求压缩前、后分析窗的信号包络。

### 1.4 位移场修正

位移场修正就是利用所求得的位移位置(通常不是规则窗中心点位置), 将不规则位置上的位移通

过一定的方法, 将其转换成规则位置(窗的中心点)上的位移。由于使用一维估计窗, 仅需考虑轴向位移, 采用 $y$ 方向(轴向)上的线性插值来对已估计的所有位移进行修正。

如果想求取第 $n$ 条线(A-lines)规则位置(即压缩前被估计窗的中心点) $P(x_n, y)$ 上的位移, 假设已知第 $n$ 条A-lines上的两点位移 $z_{n1}=(x_n, y_1)$ 和 $z_{n2}=(x_n, y_2)$ , 那么采用 $y$ 方向上的线性插值来获取估计窗中心点 $P(x_n, y)$ 的位移, 插值公式如下:

$$\tau(x_n, y) = \tau(x_n, y_1) + \frac{\tau(x_n, y_2) - \tau(x_n, y_1)}{y_2 - y_1} (y - y_1) \quad (12)$$

### 1.5 应变估计

应变估计使用梯度操作进行计算, 计算公式为:

$$S(n) = \frac{\tau(n+1) - \tau(n-1)}{y(n+1) - y(n-1)} \quad (13)$$

式中,  $\tau$ 代表位移估计值;  $y$ 代表位移估计值 $\tau$ 对应的轴向位置;  $n$ 代表轴向第 $n$ 个应变估计位置。AMC算法中,  $y$ 取位移位置值 $L$ , 其他算法中取估计窗中心点。

## 2 实验

### 2.1 仿真

使用Field II声场模拟程序和有限元分析(FEA)软件, 仿真一均匀弹性组织, 散射子浓度设为45(个散射子/脉冲宽度), 散射子的位置服从均匀随机分布, 散射子的强度服从高斯分布<sup>[10-11]</sup>。组织大小为40 mm(轴向)×40 mm(侧向)×30 mm(横向)。采样频率设为40 MHz。声速被设定为常数1 540 m/s, 发射脉冲中心频率为5 MHz。仿真的每帧数据大小是2 076(采样点)×128(线), RF信号通过调制解调到基带信号。对仿真的体模组织分别施加0.01%、0.1%、0.5%、1%、2%、3%、4%、5%不同应变, 用来探究在不同应变情况下本文的方法对幅度调制噪声抑制的效果。

仿真成像中窗轴向重叠率设为75%, 算法迭代2次。为了比较, 本文也实现了信号幅度压缩算法和幅度调制修正算法。

### 2.2 体模实验

实验采用CIRS Inc.研发的专用于弹性成像研究的Model 049弹性体模。体模在背景介质中放有4个10 mm和4个20 mm直径的球形包容物、球体和背景等回声, 在B-Mode中不可区分。背景的弹性模量是30 kPa, 每种直径的4个包容物有不同弹性模量, 分

别是8 kPa(Type I, 软)、18 kPa(Type II, 软)、44 kPa(Type III, 硬)和63 kPa(Type IV, 硬)。实验中成像对象选择直径10 mm、弹性模量为63 kPa的包容物。

超声机采用成都声泰特公司研发的iMago C21 (Saset Inc., Chengdu, Sichuan, China)。RF信号使用积分解调器解调到基带I/Q信号; 实验中采用的探头型号为SA5L38B的128阵元线阵探头(Broadsound Corporation, Jupei City, Hsinchu 30252, Taiwan), 阵元之间的间隙为0.3 mm, 其中心频率是5 MHz, 75%分数阶带宽。实验过程中没有安装其他额外装置, 使用徒手(Freehand)准静态压缩体模方式进行数据采集。在压缩/释放过程中, 保持探头匀速轴向运动, 用力均匀, 确保扫描在轴向同一平面内。

## 3 结果

### 3.1 仿真结果

弹性图像信噪比的计算采用文献[9]中的定义, 使用整个应变图像作为信噪比计算区域。图1给出了各种方法产生弹性图像的信噪比曲线, 组织施加整体0.01%应变。图上显示了当估计窗长从40个采样点变化到340时, 各算法产生信噪比曲线。从图中可以看出, 当使用相同的窗长时, 位移场修正(DFC)算法获得最高的信噪比, 幅度调制修正(AMC)算法获得次高的信噪比, 信号幅度压缩(ALC)算法获得较低的信噪比, 没有经过幅度调制噪声抑制的原始算法获得最低的信噪比。并且随着窗长的增加, 位移场修正算法提高图像的信噪比更加显著。图2和图3分别显示了当对仿真组织施加1%和3%整体应变时, 各算法获得弹性图像的信噪比。从图2和图3中可以得出与图1类似的结论: 不论采用多大窗长, DFC算法总是获得最高信噪比。

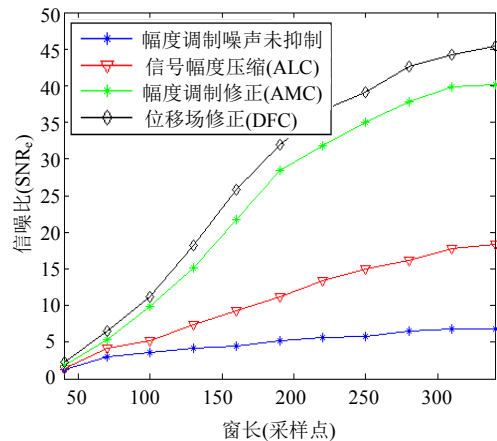


图1 仿真施加0.01%整体应变时, 各算法产生弹性图像的信噪比曲线

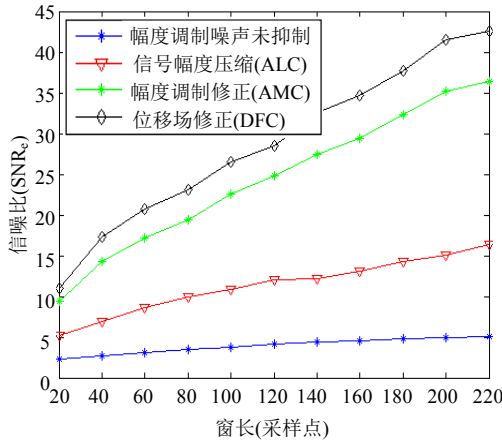


图2 仿真施加1%整体应变时, 各算法产生弹性图像的信噪比曲线

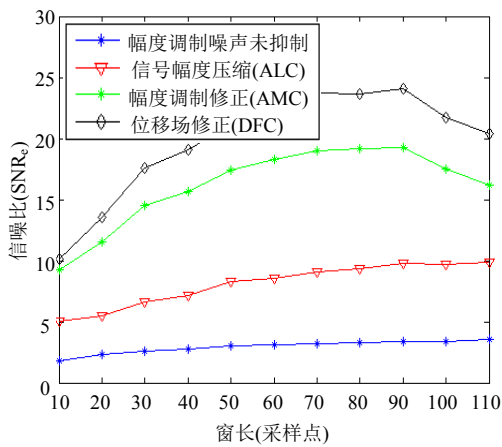


图3 仿真施加3%整体应变时, 各算法产生弹性图像的信噪比曲线

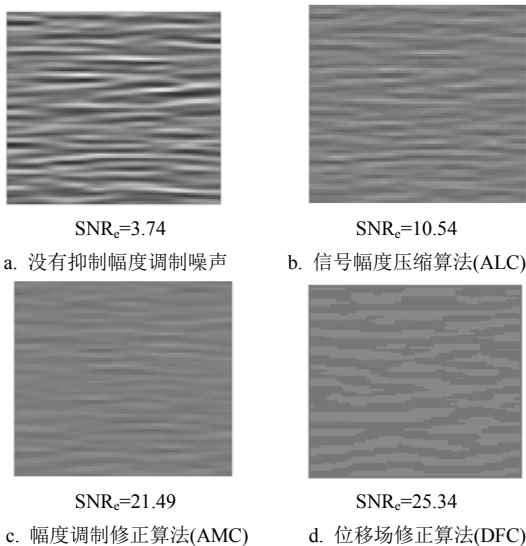


图4 仿真的均匀弹性组织模型施加1%应变时, 使用各方法产生的弹性图像

图4给出了当窗长采用90个采样点时, 在1%应变情况下各算法产生的弹性图像。图像采用256级灰度, 平均应变映射成灰度值128。由图可知, 没有经过任何幅度调制噪声抑制的弹性图像噪声最大(见

图4a), ALC算法的应用使应变图像的噪声显著减少(见图4b), AMC算法使应变图像质量进一步提高(见图4c), 本文的DFC算法获得的图像最为平滑细腻, 噪声最少(见图4d)。

表1列出了当窗长采用90个采样点时, 各种算法在不同应变情况下产生弹性图像的信噪比。从图中可以看出, 在仿真的各种应变情况下, DFC算法总是取得最高信噪比。另外, 原始算法和ALC算法在1%应变时信噪比达到最高, 而AMC和DFC算法在2%应变时达到最高。

表1 在不同应变情况下各算法产生图像的信噪比

算法	应变/(%)							
	0.01	0.1	0.5	1	2	3	4	5
AM噪声	3.54	3.67	3.73	3.74	3.72	3.42	3.11	2.63
ALC	4.60	9.52	10.48	10.54	10.44	9.78	8.75	7.03
AMC	8.84	18.09	20.36	21.49	21.61	19.22	12.53	7.48
DFC	11.26	22.18	24.55	25.34	26.07	24.09	16.14	8.81

### 3.2 体模实验结果

图5显示了弹性体模实验结果。图5a~图5d分别是使用原始算法、ALC算法、AMC算法和DFC算法产生的体模(Phantom)弹性图像, 信噪比使用黑色矩形窗区域进行计算。窗轴向重叠率为75%, 算法迭代2次。显然, 除原始算法外其他各种算法均使弹性图像的噪声得到了抑制。通过比较可以看出, 位移场修正算法再次产生了最少噪声的弹性图像, 其信噪比最高, 这与仿真实验结果相一致。

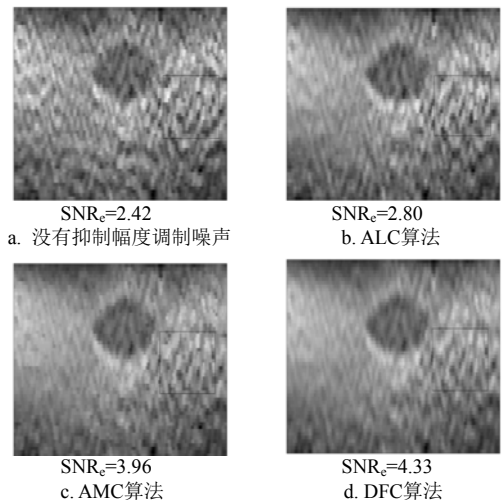


图5 弹性体模的应变图像

## 4 讨论与结论

在进行窗长实验时, 本文选择了0.01%、1%和3% 3种有代表性的应变, 分别代表弹性成像中较小应变、中等应变和较大应变。从实验的结果可以看

出,在3种应变情况下,不论采用何种窗长,本文的DFC方法均取得了最好的性能,最有效地抑制了幅度调制噪声。ALC方法虽然对信号幅度进行了压缩,但仍不能完全避免信号幅度对窗匹配的影响。ALC方法的极限形式是信号幅度归一化,此时信号幅度不影响位移估计精度,但产生的弹性图像信噪比仍低于AMC算法<sup>[8]</sup>,因为信号幅度log压缩在减少信号幅度对位移估计影响的同时,也使信号在一定程度上失真,进而影响了窗匹配精度。AMC算法使用位移位置进行应变计算,所获取的应变值不是估计窗中心点的应变值,直接梯度操作产生的图像将发生应变外观扭曲。本文的方法通过位移位置估计对位移进行插值修正到估计窗中心点上,在抑制幅度调制噪声的同时克服了ALC和AMC算法本身的问题,取得了较理想的幅度调制噪声抑制效果。从图3还看到当窗长大于90时,AMC和DFC方法的信噪比曲线开始下降(但仍比原始算法和ALC算法高),算法的性能增强程度下降。这主要因为对于大应变(本例中为3%),长窗使信号窗匹配精确度降低,位移位置估计的精度也随之降低,图像噪声随之下降。

为了探究算法的普适性,在进行应变实验时,本文仿真了各类型应变,实验结果均表明本文的方法最有效地抑制了幅度调制噪声。当应变从0.01%变化到5%的过程中,各算法的信噪比都先升高再降低,呈现带通状态,这与以前的研究相符<sup>[12]</sup>。而本文的方法使通带变宽变高,且向高应变移动,进而提高了弹性成像的动态范围<sup>[12]</sup>。

本文的仿真中数据没有加噪,主要目的是探查各算法对幅度调制噪声而不是其他噪声的抑制效果。应变估计也直接采用梯度操作产生,主要原因是为了仅研究算法本身而不是其他方法(如应变滤波技术)对图像品质提高程度。

另外,在窗长实验和应变实验结果中发现,原始算法信噪比变化较缓慢。其主要原因是位移估计时窗重叠率为75%,而应变估计又直接使用梯度操作,相关噪声削弱了因窗长和应变变化对信噪比变化的影响。但信噪比变化趋势仍与以前的研究结果相符<sup>[12]</sup>。

本文在位移位置估计的基础上提出了抑制弹性图像幅度调制噪声的位移场修正(DFC)算法。通过位移位置估计,采用线性插值法将位移估计值修正到估计窗中心点位置,然后采用梯度操作进行应变估计成像。通过仿真实验,对DFC算法与ALC和AMC算法进行了定性和定量比较。结果表明,本文的算

法与其他算法相比,更能有效地抑制幅度调制噪声,使应变图像更加细腻平滑,获得了更高的信噪比。尤其在长窗和大应变时性能改进更显著。弹性体模实验结果进一步证实了本文的方法的有效性。该方法的提出为高品质弹性成像系统设计提供了一种切实有效的方案。

## 参 考 文 献

- [1] OPHIR J, ÉSPEDES I, PONNEKANTI H, et al. Elastography: a quantitative method for imaging the elasticity of biological tissue[J]. *Ultrasonic Imaging*, 1991, 13(3): 111-134.
- [2] PESAVENTO A, PERREY C, KRUEGER M, et al. A time efficient and accurate strain estimation concept for ultrasonic elastography using iterative phase zero estimation[J]. *IEEE Trans Ultrason Ferroelec Freq Control*, 1999, 46(5): 1057-1067.
- [3] LINDOP J E, TREECE G E, GEE A, et al. Phase-based ultrasonic deformation estimation[J]. *IEEE Trans Ultrason Ferroelec Freq Control*, 2008, 55(1): 94-111.
- [4] 崔少国, 彭彩碧, 胡明, 等. 基于先验估计和相关相位的实时超声弹性成像[J]. *中国生物医学工程学报*, 2011, 30(3): 800-804.
- [5] 王彬, 凌涛, 沈勇, 等. 提高准静态弹性成像运动估计精度的算法及其仿体实验研究[J]. *中国医学物理学杂志*, 2011(3): 78-84.
- [6] WANG Bin, LING Tao, SHEN Yong, et al. Algorithms of enhancing the accuracy of motion detection in quasi-static elastography and experimental results in phantoms[J]. *Chinese Journal of Medical Physics*, 2011(3): 78-84.
- [7] CÉSPEDES I, OPHIR J. Reduction of image noise in elastography[J]. *Ultrasonic Imaging*, 1993, 15(2): 89-96.
- [8] LINDOP J E. 2D and 3D elasticity imaging using freehand ultrasound[D]. England: University of Cambridge, 2008.
- [9] LINDOP J E, TREECE G M, GEE A H, et al. Estimation of displacement location for enhanced strain imaging[J]. *IEEE Trans Ultrason Ferroelec Freq Control*, 2007, 54(9): 1751-1771.
- [10] SRINIVASAN S, RIGHETTI R, OPHIR J. Tradeoffs between the axial resolution and the signal-to-noise ratio in elastography[J]. *Ultrasound Med Biol*, 2003, 29(6): 847-866.
- [11] JENSEN J A. Field: A program for simulating ultrasound systems[J]. *Med Biol Eng Comp*, 1996(4): 351-353.
- [12] JENSEN J A. Computer phantoms for simulating ultrasound B-mode and CFM images[J]. *Acoustical Imaging Symposium*, 1997(23): 75-80.
- [13] VARGHESE T, OPHIR J. A theoretical framework for performance characterization of elastography: The strain filter[J]. *IEEE Trans Ultrason Ferroelec Freq Cont*, 1997, 44(8): 164-172.