



## (12) 发明专利申请

(10) 申请公布号 CN 103356238 A

(43) 申请公布日 2013. 10. 23

(21) 申请号 201310124254. X

(22) 申请日 2013. 04. 11

(71) 申请人 汕头大学

地址 515063 广东省汕头市大学路 243 号

(72) 发明人 张琼 沈民奋 李斌

(74) 专利代理机构 北京路浩知识产权代理有限公司 11002

代理人 王朋飞

(51) Int. Cl.

A61B 8/00(2006. 01)

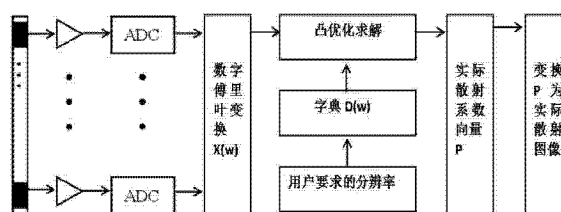
权利要求书2页 说明书7页 附图4页

## (54) 发明名称

一种高分辨率超声成像方法

## (57) 摘要

本发明涉及一种高分辨率超声成像方法,包括以下步骤:1) 从超声模拟前端中获取的被放大后的超声脉冲回波信号经过 A/D 转化后,使用动态延时叠加方法来处理接收到的后向散射信号,得到初始波束  $y_{DAS}$ ;2) 将接收到的后向散射信号进行数字傅里叶变换,处理得到后向散射信号的频谱  $X(\omega)$ ;3) 根据实际的分辨率要求,离散化目标区域,生成对应的字典矩阵  $D(\omega)$ ;4) 结合所述字典矩阵  $D(\omega)$  和后向散射信号的频谱  $X(\omega)$ ,通过如下公式进行凸优化问题的求解,得到目标索引矩阵  $P$ :  $\min \|X(\omega) - D(\omega) \cdot P\|_2^2 + \lambda \|P\|_1$ ;5) 将所述目标索引矩阵  $P$  与初始波束  $y_{DAS}$  相乘,得到最终的成像输出结果  $y_{SR}$ 。本发明提出了一种全新的超声成像技术,实现高分辨率和高对比度的超声成像,具有巨大的应用前景和 market 价值。



1. 一种高分辨率超声成像方法,包括以下步骤:

1) 从超声模拟前端中获取的被放大后的超声脉冲回波信号经过 A/D 转化后,使用动态延时叠加方法来处理接收到的后向散射信号,得到初始波束  $y_{DAS}$ ;

2) 将接收到的后向散射信号进行数字傅里叶变换,处理得到后向散射信号的频谱  $X(\omega)$ ;

3) 根据实际的分辨率要求,离散化目标区域,生成对应的字典矩阵  $D(\omega)$ ;

4) 结合所述字典矩阵  $D(\omega)$  和后向散射信号的频谱  $X(\omega)$ ,通过如下公式进行凸优化问题的求解,得到目标索引矩阵  $P$ :

$$\min \|X(\omega) - D(\omega) \cdot P\|_2^2 + \lambda \|P\|_1;$$

5) 将所述目标索引矩阵  $P$  与初始波束  $y_{DAS}$  相乘,得到最终的成像输出结果  $y_{SR}$ 。

2. 根据权利要求 1 所述的高分辨率超声成像方法,其特征在于,步骤 2) 中,所述后向散射信号的频谱  $X(\omega)$  获得过程为:

假设感兴趣目标区域存在  $Q$  个散射点,那么接收到的后向散射信号  $x_k(t)$  表示为:

$$x_k(t) = \sum_{i=1}^Q h_p(t) * s_i(t - \tau_k(\rho_i)) + n_k, \quad k = 1, 2, \dots, K. \quad (1);$$

$$\text{其中, } \tau_k(\rho_i) = \|\vec{r}_{krm} - \vec{r}_{\rho_i}\|/c \quad (2);$$

$Q$  表示散射点的数目,  $h_p(t)$  为超声成像系统探头的相应函数,  $s_i$  表示第  $i$  个散射点的后向散射信号,  $\tau_k(\rho_i)$  表示散射点  $\rho_i$  到第  $k$  个阵元的传输延迟,  $n_k$  表示第  $k$  个通道的加性噪声,  $\vec{r}_{krm}$  表示第  $k$  个接收阵元的空间位置,  $\vec{r}_{\rho_i}$  表示散射点  $\rho_i$  的空间位置;  $c$  表示声速。

上述式 (1) 进行数字傅里叶变换后表示为:

$$x_{wk}(\omega) = \sum_{i=1}^Q h_{wp}(\omega) s_{wi}(\omega) \cdot \exp[j\omega\tau_k(\rho_i)] + n_{wk}. \quad (3);$$

其中  $x_{wk}(\omega)$  表示接收到的第  $k$  个阵元信号的傅里叶变换,  $s_{wi}(\omega)$  表示第  $i$  个目标点的频谱,  $h_{wp}(\omega)$  表示超声成像系统探头响应函数的频谱,  $n_{wk}$  表示噪声的频谱; 令

$$S(\omega) = [s_{w1}(\omega), s_{w2}(\omega), \dots, s_{wQ}(\omega)]^T;$$

$$a_k(\omega) = [\exp[j\omega\tau_k(\rho_1)], \exp[j\omega\tau_k(\rho_2)], \dots, \exp[j\omega\tau_k(\rho_Q)]];$$

则上述式 (3) 表示为:

$$x_{wk}(\omega) = h_{wp}(\omega) \cdot a_k(\omega) \cdot S(\omega) + n_{wk}. \quad (4);$$

所有  $K$  个接收阵元接收到的后向散射信号可以表示为:

$$X(\omega) = h_{wp}(\omega) \cdot A_1(\omega) \cdot S(\omega) + N(\omega). \quad (5);$$

上述式 (5) 中,

$$X(\omega) = [x_{w1}(\omega) \ x_{w2}(\omega) \ \dots \ x_{wK}(\omega)]^T;$$

$$A_1(\omega) = \begin{bmatrix} a_1(\omega) \\ a_2(\omega) \\ \vdots \\ a_K(\omega) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \exp[j\omega\tau_1(\rho_1)] & \exp[j\omega\tau_1(\rho_2)] & \cdots & \exp[j\omega\tau_1(\rho_Q)] \\ \exp[j\omega\tau_2(\rho_1)] & \exp[j\omega\tau_2(\rho_2)] & \cdots & \exp[j\omega\tau_2(\rho_Q)] \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \exp[j\omega\tau_K(\rho_1)] & \exp[j\omega\tau_K(\rho_2)] & \cdots & \exp[j\omega\tau_K(\rho_Q)] \end{bmatrix},$$

$$N(\omega) = [n_{w1}(\omega), n_{w2}(\omega), \dots, n_{wK}(\omega)]^T;$$

令  $PAT = [\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_Q]^T$  表示  $Q$  个真实散射目标的散射强度向量,  $K$  阵元接收到的后向散射信号的频谱  $X(\omega)$  可表示为:

$$X(\omega) = h_{wp}(\omega) \cdot A_1(\omega) \cdot \begin{bmatrix} u_{w1}(\omega) \\ u_{w2}(\omega) \\ \vdots \\ u_{wQ}(\omega) \end{bmatrix} \bullet \begin{bmatrix} \alpha_1 \\ \alpha_2 \\ \vdots \\ \alpha_Q \end{bmatrix} + N(\omega). \quad (6);$$

$$= h_{wp}(\omega) \cdot A_1(\omega) \cdot (U(\omega) \bullet PAT) + N(\omega)$$

$u_{wi}(\omega)$  为  $u_i(t)$  的频谱, 上述式 (6) 中,

$$U(\omega) = [u_{w1}(\omega), u_{w2}(\omega), \dots, u_{wQ}(\omega)]^T.$$

3. 根据权利要求 1 所述的高分辨率超声成像方法, 其特征在于, 步骤 3) 中, 字典矩阵  $D(\omega)$  获得过程为:

感兴趣目标区域位于  $[x_s, x_e] \times [y_s, y_e]$  的内积空间, 其中  $x_s, y_s$  和  $x_e, y_e$  分别表示感兴趣目标区域成像的开始和最后地址, 并且按照所需的分辨率离散化, 产生  $L$  个目标点位置  $\Theta = \{\rho_1, \rho_2, \dots, \rho_L\}$ ,  $L \gg Q$ ; 用  $\rho_i$  表示向量  $[x_i; y_i]$ , 对任意的离散目标位置  $\rho_i$ , 在频率点  $\omega$  上的导向矢量表示为:

$$d\rho_i = h_{wp}(\omega) \cdot u_i(\omega) \cdot [\exp[j\omega\tau_1(\rho_i)], \exp[j\omega\tau_2(\rho_i)], \dots, \exp[j\omega\tau_K(\rho_i)]]^T \quad (7);$$

将  $L$  个确切位置的离散目标点构成字典矩阵:

$$D(\omega) = [d\rho_1, d\rho_2, \dots, d\rho_L]$$

$$= h_{wp}(\omega) \begin{bmatrix} u_1(\omega)\exp[j\omega\tau_1(\rho_1)] & u_2(\omega)\exp[j\omega\tau_1(\rho_2)] & \cdots & u_L(\omega)\exp[j\omega\tau_1(\rho_L)] \\ u_1(\omega)\exp[j\omega\tau_2(\rho_1)] & u_2(\omega)\exp[j\omega\tau_2(\rho_2)] & \cdots & u_L(\omega)\exp[j\omega\tau_2(\rho_L)] \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ u_1(\omega)\exp[j\omega\tau_K(\rho_1)] & u_2(\omega)\exp[j\omega\tau_K(\rho_2)] & \cdots & u_L(\omega)\exp[j\omega\tau_K(\rho_L)] \end{bmatrix} \quad (8).$$

4. 根据权利要求 2 或 3 所述的高分辨率超声成像方法, 其特征在于, 则根据所述式 (6) 和式 (8), 后向散射信号的频谱  $X(\omega)$  表示为:

$$X(\omega) = D(\omega) \cdot P + N(\omega). \quad (9);$$

式中  $P = [\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_L]^T$  为整个感兴趣目标区域 (ROI) 中对应于  $L$  个已知位置的散射强度。

5. 根据权利要求 2 ~ 4 任意一项所述的高分辨率超声成像方法, 其特征在于, 所述感兴趣目标区域按轴向每 0.15mm、侧向每 0.1mm 来离散化。

## 一种高分辨率超声成像方法

### 技术领域

[0001] 本发明涉及超声成像技术领域,具体地,涉及一种高分辨率超声成像方法。

### 背景技术

[0002] 超声成像技术是现代医学超声诊断中极为重要的技术,它利用脉冲回波检测原理对人体组织进行成像,协助临床应用对各种病症进行诊断。由于其廉价、使用方便、无副作用等优点,已成为当今四大主流医学成像手段之一。超声成像技术虽然在临床上得到了非常广泛的应用,但由于超声基础成像理论的一些限制,目前的超声图像质量并不理想,主要体现在:(1)成像分辨率不高:受超声探头和系统带宽的限制,一般采用 2MHz ~ 15MHz 的超声基波成像,因此无法辨别毫米量级以下的相邻目标;(2)成像对比度有待提高:由于探头接收到的超声回波很弱,约为微伏量级,容易受到热噪声的影响,再加上回波中还存在大量相干干扰,所以系统的信噪比不高,成像对比度有待提高。

[0003] 传统的超声成像系统使用聚焦波发射,动态延时叠加(delay and sum,DAS)接收。图 1(a)表示点目标在接收聚焦点位置的情况(见附图说明)。位于聚焦点的点散射体对照射的超声波产生反射,这些反射波传输到换能器,通过压电阵元转化成电子信号。接收延迟保证从同一个聚焦点产生的信号是对齐的,然后把这些对齐的信号相加起来。对应聚焦点处的各通道回波信号经过延迟后调整为同相的,加和后起到放大的效果。在接收过程中对同一扫描线上各深度处的焦点依次进行聚焦,就得到动态聚焦后的接收波束。图 1(b)表示当点目标不在聚焦点位置的情况(见附图说明)。由于换能器接收延迟是以放大聚焦点处的散射回波为目标,因此,当散射点不位于聚焦点处时,对应的各通道回波信号经过延迟调整后将不会被对齐,加和后的回波信号将不会被放大。

[0004] 在上述 DAS 接收方法中,为了减小离轴信号对成像对比度和分辨率的影响,常采用幅度变迹技术,即对不同阵元施加不同的加权值,如 Hamming、Hanning、Gaussian 和 Blackman 等窗函数。然而由于用于幅度变迹的加权值都是固定的,与空间中散射点的分布以及接收到的数据是无关的,因此幅度变迹虽然抑制了旁瓣,但却增加了主瓣宽度,降低了成像的空间分辨率。

[0005] 因此,若能针对传统的超声成像技术存在分辨率低,对比度差的缺点,提出一种全新的超声成像技术,实现高分辨率的超声成像,将会有巨大的应用前景和市场价值。

### 发明内容

[0006] 本发明的目的是提供一种高分辨率超声成像方法,该方法在线性超声成像系统模型的基础上,提出一种全新的基于稀疏表示理论的超声成像模型,实现高分辨率和高对比度的超声成像。

[0007] 为了实现上述目的,本发明提供的高分辨率超声成像方法,包括以下步骤:

[0008] 1) 从超声模拟前端中获取的被放大后的超声脉冲回波信号经过 A/D 转化后,使用动态延时叠加方法来处理接收到的后向散射信号,得到初始波束  $y_{DAS}$ ;

[0009] 2) 将接收到的后向散射信号进行数字傅里叶变换, 处理得到后向散射信号的频谱  $X(\omega)$ ;

[0010] 3) 根据实际的分辨率要求, 离散化目标区域, 生成对应的字典矩阵  $D(\omega)$ ;

[0011] 4) 结合所述字典矩阵  $D(\omega)$  和后向散射信号的频谱  $X(\omega)$ , 通过如下公式进行凸优化问题的求解, 得到目标索引矩阵  $P$ :

[0012]

$$\min \|X(\omega) - D(\omega) \cdot P\|_2^2 + \lambda \|P\|_1;$$

[0013] 5) 将所述目标索引矩阵  $P$  与初始波束  $y_{\text{DAS}}$  相乘, 得到最终的成像输出结果  $y_{\text{SR}}$ 。

[0014] 其中, 步骤 2) 中, 所述后向散射信号的频谱  $X(\omega)$  获得过程为:

[0015] 假设感兴趣目标区域存在  $Q$  个散射点, 那么在假设情况下接收到的后向散射信号  $x_k(t)$  表示为:

$$[0016] \quad x_k(t) = \sum_{i=1}^Q h_p(t) * s_i(t - \tau_k(\rho_i)) + n_k, \quad k=1, 2, \dots, K. \quad (1);$$

$$[0017] \quad \text{其中, } \tau_k(\rho_i) = \|\vec{r}_{krm} - \vec{r}_{\rho_i}\|/c \quad (2);$$

[0018]  $Q$  表示散射点的数目,  $h_p(t)$  为超声成像系统探头的相应函数,  $s_i$  表示第  $i$  个散射点的后向散射信号,  $\tau_k(\rho_i)$  表示散射点  $\rho_i$  到第  $k$  个阵元的传输延迟,  $n_k$  表示第  $k$  个通道的加性噪声,  $\vec{r}_{krm}$  表示第  $k$  个接收阵元的空间位置,  $\vec{r}_{\rho_i}$  表示散射点  $\rho_i$  的空间位置;  $c$  表示声速。

[0019] 上述式 (1) 进行数字傅里叶变换 (DFT) 后表示为:

$$[0020] \quad x_{wk}(\omega) = \sum_{i=1}^Q h_{wp}(\omega) s_{wi}(\omega) \cdot \exp[j\omega\tau_k(\rho_i)] + n_{wk}. \quad (3);$$

[0021] 其中  $x_{wk}(\omega)$  表示接收到的第  $k$  个阵元信号的傅里叶变换,  $s_{wi}(\omega)$  表示第  $i$  个目标点的频谱,  $h_{wp}(\omega)$  表示超声成像系统探头响应函数的频谱,  $n_{wk}$  表示噪声的频谱; 令

$$[0022] \quad S(\omega) = [s_{w1}(\omega), s_{w2}(\omega), \dots, s_{wQ}(\omega)]^T;$$

[0023]

$$a_k(\omega) = [\exp[j\omega\tau_k(\rho_1)], \exp[j\omega\tau_k(\rho_2)], \dots, \exp[j\omega\tau_k(\rho_Q)]];$$

[0024] 则上述式 (3) 表示为:

$$[0025] \quad x_{wk}(\omega) = h_{wp}(\omega) \cdot a_k(\omega) \cdot S(\omega) + n_{wk}. \quad (4);$$

[0026] 所有  $K$  个接收阵元接收到的后向散射信号可以表示为:

$$[0027] \quad X(\omega) = h_{wp}(\omega) \cdot A_1(\omega) \cdot S(\omega) + N(\omega). \quad (5);$$

[0028] 上述式 (5) 中,

$$[0029] \quad X(\omega) = [x_{w1}(\omega), x_{w2}(\omega), \dots, x_{wK}(\omega)]^T;$$

[0030]

$$A_1(\omega) = \begin{bmatrix} a_1(\omega) \\ a_2(\omega) \\ \vdots \\ a_K(\omega) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \exp[j\omega\tau_1(\rho_1)] & \exp[j\omega\tau_1(\rho_2)] & \cdots & \exp[j\omega\tau_1(\rho_Q)] \\ \exp[j\omega\tau_2(\rho_1)] & \exp[j\omega\tau_2(\rho_2)] & \cdots & \exp[j\omega\tau_2(\rho_Q)] \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \exp[j\omega\tau_K(\rho_1)] & \exp[j\omega\tau_K(\rho_2)] & \cdots & \exp[j\omega\tau_K(\rho_Q)] \end{bmatrix},$$

[0031]  $N(\omega) = [n_{w1}(\omega), n_{w2}(\omega), \dots, n_{wK}(\omega)]^T$ ;

[0032] 令  $PAT = [\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_Q]^T$  表示  $Q$  个真实散射目标的散射强度向量,  $K$  阵元接收到的后向散射信号的频谱  $X(\omega)$  可表示为:

$$[0033] \quad X(\omega) = h_{wp}(\omega) \cdot A_1(\omega) \cdot \begin{pmatrix} \begin{bmatrix} u_{w1}(\omega) \\ u_{w2}(\omega) \\ \vdots \\ u_{wQ}(\omega) \end{bmatrix} \bullet \begin{bmatrix} \alpha_1 \\ \alpha_2 \\ \vdots \\ \alpha_Q \end{bmatrix} \end{pmatrix} + N(\omega). \quad (6);$$

$$[0034] \quad = h_{wp}(\omega) \cdot A_1(\omega) \cdot (U(\omega) \bullet PAT) + N(\omega)$$

[0035]  $u_{wi}(\omega)$  为  $u_i(t)$  的频谱, 上述式 (6) 中,

[0036]  $U(\omega) = [u_{w1}(\omega), u_{w2}(\omega), \dots, u_{wQ}(\omega)]^T$ 。

[0037] 其中, 步骤 3) 中, 字典矩阵  $D(\omega)$  获得过程为:

[0038] 感兴趣目标区域 (ROI) 位于  $[x_s, x_e] \times [y_s, y_e]$  的内积空间, 其中  $x_s, y_s$  和  $x_e, y_e$  分别表示感兴趣目标区域 (ROI) 成像的开始和最后地址, 并且按照所需的分辨率离散化, 产生  $L$  个目标点位置  $\Theta = \{\rho_1, \rho_2, \dots, \rho_L\}$  ( $L \gg Q$ ); 用  $\rho_i$  表示向量  $[x_i; y_i]$ , 对任意的离散目标位置  $\rho_i$ , 在频率点  $\omega$  上的导向矢量表示为:

$$[0039] \quad d\rho_i = h_{wp}(\omega) \cdot u_i(\omega) \cdot [\exp[j\omega\tau_1(\rho_i)], \exp[j\omega\tau_2(\rho_i)], \dots, \exp[j\omega\tau_K(\rho_i)]]^T \quad (7);$$

[0040] 将  $L$  个确切位置的离散目标点构成字典矩阵:

$$[0041] \quad D(\omega) = [d\rho_1, d\rho_2, \dots, d\rho_L]$$

[0042]

$$= h_{wp}(\omega) \begin{bmatrix} u_1(\omega)\exp[j\omega\tau_1(\rho_1)] & u_2(\omega)\exp[j\omega\tau_1(\rho_2)] & \cdots & u_L(\omega)\exp[j\omega\tau_1(\rho_L)] \\ u_1(\omega)\exp[j\omega\tau_2(\rho_1)] & u_2(\omega)\exp[j\omega\tau_2(\rho_2)] & \cdots & u_L(\omega)\exp[j\omega\tau_2(\rho_L)] \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ u_1(\omega)\exp[j\omega\tau_K(\rho_1)] & u_2(\omega)\exp[j\omega\tau_K(\rho_2)] & \cdots & u_L(\omega)\exp[j\omega\tau_K(\rho_L)] \end{bmatrix} \quad (8)。$$

[0043] 则根据上述式 (6) 和式 (8), 后向散射信号的频谱  $X(\omega)$  表示为:

$$[0044] \quad X(\omega) = D(\omega) \cdot P + N(\omega). \quad (9);$$

[0045] 式中  $P = [\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_L]^T$  为整个感兴趣目标区域 (ROI) 中对应于  $L$  个已知位置的散射强度。

[0046] 本发明所述感兴趣目标区域 (ROI) 按轴向每 0.15mm、侧向每 0.1mm 来离散化。

[0047] 本发明所述的字典矩阵为超完备字典矩阵。

[0048] 本发明公式中的  $\omega$ 、 $\lambda$  和  $t$  分别指代: 角频率、超声波的波长和时间。

[0049] 本发明的优点和效果如下:

[0050] 1、本发明提出了一种全新的超声成像方法, 直接由采集到的单次回波数据得到高

空间分辨率的超声图像。

[0051] 2、本发明方法在存在斑点噪声的情况下,能够比目前广泛应用的 DAS 方法获得更出色的对比度分辨率。

[0052] 3、本发明方法不依赖于发射模式,在各种发射模式下均能得到高分辨率、高对比度的超声图像。

[0053] 总之,本发明提出了一种全新的超声成像技术,实现高分辨率和高对比度的超声成像;应用此方法,结合硬件系统,可以实现高性能的超声成像;即本发明大大地提高超声成像的分辨率和对比度,提高了超声图像的质量,从而能够获取体内更多的生理、病理信息,显示更为细微的组织结构。

## 附图说明

[0054] 图 1 为 DAS 方法示意图,换能器聚焦于点线表示的十字形;其中图 1(a) 表示散射点位于聚焦点上的情况,图 1(b) 表示散射点不是位于聚焦点上的情况。

[0055] 图 2 为本发明方法中 ROI 离散化示意图。

[0056] 图 3 为本发明方法和 DAS 方法在 9 个不同位置的点目标情况下的实验结果图;其中图 3(a) 为 DAS 的成像效果;3(b) 为本发明方法的成像结果。

[0057] 图 4 是本发明方法和 DAS 方法在深度为 50mm 处的侧向分辨率的对比实验结果;虚线表示 DAS 方法,实线表示本发明方法。

[0058] 图 5 是 DAS 方法和本发明方法对囊肿区域的成像结果;其中图 5(a) 为 DAS 的成像效果;5(b) 为本发明方法的成像结果。

[0059] 图 6 为本发明方法的处理流程图。

## 具体实施方式

[0060] 以下实施例用于说明本发明,但不用来限制本发明的范围。

[0061] 本发明应用的硬件系统和其他未提及的参数,均为本领域的常规选择。

[0062] 本发明方法实施的具体方法分为下面几个步骤:

[0063] 1、将接收到的经过放大和模数转换后的后向散射信号进行 DFT 变换,将处理得到后向散射信号频谱,DFT 的长度为激励脉冲波与换能器的双向脉冲响应卷积的长度;

[0064] 2、根据实际的分辨率要求,离散化目标区域,生成对应的超完备字典矩阵(本发明中的例子的 ROI 按轴向每 0.15mm、侧向每 0.1mm 来离散化);

[0065] 3、结合得到的超完备字典构成的矩阵和后向散射信号的频谱,求解凸优化问题,得到散射系数向量(即目标索引矩阵 P)。

[0066] 4、变换为实际图像矩阵,记为  $y_{SR}$ 。

[0067] 本发明具体是通过以下技术方案实现的:

[0068] 1、从超声模拟前端中获取的被放大后的超声脉冲回波信号经过 A/D 转化(模数转换)后,使用动态延时叠加(delay and sum, DAS)方法来处理接收到的后向散射信号,得到初始波束  $y_{DAS}$ 。

[0069] 2、对接收到的后向散射信号建立新的成像模型,得到目标索引矩阵,具体为:

[0070] 2a) 对接收到的后向散射信号建立新的成像模型

[0071] 假设感兴趣目标区域(region of interested, ROI)存在 Q 个散射点,那么接收到的后向散射信号  $x_k(t)$  可以表示为:

$$[0072] \quad x_k(t) = \sum_{i=1}^Q h_p(t) * s_i(t - \tau_k(\rho_i)) + n_k, \quad k=1,2,\dots,K. \quad (1)$$

$$[0073] \quad \tau_k(\rho_i) = \|\vec{r}_{krm} - \vec{r}_{\rho_i}\|/c \quad (2)$$

[0074] 其中 Q 表示散射点的数目,  $h_p(t)$  为超声成像系统探头的相应函数,  $s_i$  表示第 i 个散射点的后向散射信号,  $\tau_k(\rho_i)$  表示散射点  $\rho_i$  到第 k 个阵元的传输延迟,  $n_k$  表示第 k 个通道的加性噪声,  $\vec{r}_{krm}$  表示第 k 个接收阵元的空间位置,  $\vec{r}_{\rho_i}$  表示散射点  $\rho_i$  的空间位置; c 表示声速。

[0075] 式 (1) 进行 DFT (数字傅里叶变换) 后可以表示为:

$$[0076] \quad x_{wk}(\omega) = \sum_{i=1}^Q h_{wp}(\omega) s_{wi}(\omega) \cdot \exp[j\omega\tau_k(\rho_i)] + n_{wk}. \quad (3)$$

[0077] 其中  $x_{wk}(\omega)$  表示接收到的第 k 个阵元信号的傅里叶变换,  $s_{wi}(\omega)$  表示第 i 个目标点的频谱,  $h_{wp}(\omega)$  表示超声成像系统探头响应函数的频谱,  $n_{wk}$  表示噪声的频谱。令

$$[0078] \quad S(\omega) = [s_{w1}(\omega), s_{w2}(\omega), \dots, s_{wQ}(\omega)]^T$$

[0079]

$$a_k(\omega) = [\exp[j\omega\tau_k(\rho_1)], \exp[j\omega\tau_k(\rho_2)], \dots, \exp[j\omega\tau_k(\rho_Q)]]$$

[0080] 则式 (3) 可表示为:

$$[0081] \quad x_{wk}(\omega) = h_{wp}(\omega) \cdot a_k(\omega) \cdot S(\omega) + n_{wk}. \quad (4)$$

[0082] 所有 K 个接收阵元接收到的后向散射信号可以表示为:

$$[0083] \quad X(\omega) = h_{wp}(\omega) \cdot A_1(\omega) \cdot S(\omega) + N(\omega). \quad (5)$$

[0084] 式 (5) 中,

$$[0085] \quad X(\omega) = [x_{w1}(\omega), x_{w2}(\omega), \dots, x_{wK}(\omega)]^T$$

[0086]

$$A_1(\omega) = \begin{bmatrix} a_1(\omega) \\ a_2(\omega) \\ \vdots \\ a_K(\omega) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \exp[j\omega\tau_1(\rho_1)] & \exp[j\omega\tau_1(\rho_2)] & \cdots & \exp[j\omega\tau_1(\rho_Q)] \\ \exp[j\omega\tau_2(\rho_1)] & \exp[j\omega\tau_2(\rho_2)] & \cdots & \exp[j\omega\tau_2(\rho_Q)] \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \exp[j\omega\tau_K(\rho_1)] & \exp[j\omega\tau_K(\rho_2)] & \cdots & \exp[j\omega\tau_K(\rho_Q)] \end{bmatrix}$$

$$[0087] \quad N(\omega) = [n_{w1}(\omega), n_{w2}(\omega), \dots, n_{wK}(\omega)]^T$$

[0088] 令  $PAT = [\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_Q]^T$  表示 Q 个真实散射目标的散射强度向量, K 阵元接收到的后向散射信号的频谱  $X(\omega)$  可表示为:

$$[0089] \quad X(\omega) = h_{wp}(\omega) \cdot A_1(\omega) \cdot \begin{pmatrix} u_{w1}(\omega) \\ u_{w2}(\omega) \\ \vdots \\ u_{wQ}(\omega) \end{pmatrix} \bullet \begin{bmatrix} \alpha_1 \\ \alpha_2 \\ \vdots \\ \alpha_Q \end{bmatrix} + N(\omega). \quad (6)$$

$$[0090] \quad = h_{wp}(\omega) \cdot A_1(\omega) \cdot (U(\omega) \bullet PAT) + N(\omega)$$



[0091] 式中  $u_{wi}(\omega)$  为  $u_i(t)$  的频谱,  $U(\omega)=[u_{w1}(\omega), u_{w2}(\omega), \dots, u_{wQ}(\omega)]^T$

[0092] 2b) 根据用户对成像分辨率的要求, 建立超完备字典。

[0093] 如图 2 所示, ROI 位于  $[x_s, x_e] \times [y_s, y_e]$  的内积空间, 其中  $x_s, y_s$  和  $x_e, y_e$  分别表示成像 ROI 的开始和最后地址, 并且按照所需的分辨率离散化, 产生  $L$  个目标点位置  $\Theta=\{\rho_1, \rho_2, \dots, \rho_L\}$  ( $L \gg Q$ ), 其中  $\rho_i$  表示向量  $[x_i; y_i]$ 。对任意的离散目标位置  $\rho_i$ , 在频率点  $\omega$  上的导向矢量可以表示为:

[0094]  $d\rho_i=h_{wp}(\omega) \cdot u_i(\omega) \cdot [\exp[j\omega\tau_1(\rho_i)], \exp[j\omega\tau_2(\rho_i)], \dots, \exp[j\omega\tau_K(\rho_i)]]^T$  (7)

[0095] 将  $L$  个确切位置的离散假想目标点就可以构成一个字典:

[0096]  $D(\omega)=[d\rho_1, d\rho_2, \dots, d\rho_L]$

[0097]

$$=h_{wp}(\omega) \begin{bmatrix} u_1(\omega)\exp[j\omega\tau_1(\rho_1)] & u_2(\omega)\exp[j\omega\tau_1(\rho_2)] & \dots & u_L(\omega)\exp[j\omega\tau_1(\rho_L)] \\ u_1(\omega)\exp[j\omega\tau_2(\rho_1)] & u_2(\omega)\exp[j\omega\tau_2(\rho_2)] & \dots & u_L(\omega)\exp[j\omega\tau_2(\rho_L)] \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ u_1(\omega)\exp[j\omega\tau_K(\rho_1)] & u_2(\omega)\exp[j\omega\tau_K(\rho_2)] & \dots & u_L(\omega)\exp[j\omega\tau_K(\rho_L)] \end{bmatrix} \quad (8)$$

[0098] 则式(6)可表示为

[0099]  $X(\omega)=D(\omega) \cdot P+N(\omega)$ . (9)

[0100] 式中  $P=[\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_L]^T$  为整个感兴趣目标区域(ROI)中对应于  $L$  个已知位置的散射强度。

[0101] 2c) 通过如下式(10)凸优化问题的求解, 得到目标索引矩阵  $P$ 。

[0102]

$$\min \|X(\omega)-D(\omega) \cdot P\|_2^2+\lambda\|P\|_1 \quad (10)$$

[0103] 3、将式(10)求解得到的目标索引矩阵  $P$  与步骤 1 得到的初始波束  $y_{DAS}$  相乘, 按照如下式(11)得到最终的成像输出结果:

[0104]  $y_{SR}(k)=P(k) y_{DAS}(k)$  (11)。

[0105] 实施例 1

[0106] 本发明的实施框图如图 6 所示。

[0107] 按具体实施方式中对本发明进行实验, 并与传统的 DAS 方法进行比较, 结果如下:

[0108] 图 1 为 DAS 方法示意图, 换能器聚焦于点线表示的十字形。其中图 1(a) 表示散射点位于聚焦点上的情况, 图 1(b) 表示散射点不是位于聚焦点上的情况。

[0109] 图 2 为本发明方法中 ROI 离散化示意图; ROI 位于内积空间  $[x_s, x_e] \times [y_s, y_e]$ , 被离散化成  $L$  个散射点。

[0110] 图 3 为本发明方法和 DAS 方法在点目标(9 个不同位置的点目标)情况下的实验结果图; 横坐标为侧向距离, 纵坐标为轴向距离。

[0111] 9 个点目标分别位于  $(x, z)=\{(-2.3, 40), (0, 40), (0.9, 40), (0, 50), (-2.3, 60), (0, 60), (0.9, 60), (-3, 70), (3, 70)\} \text{mm}$ ; 其中, 图 3(a) 为 DAS 的成像效果; 3(b) 为本发明方法的成像结果。所有图像在 60dB 动态范围下显示。从图 3 结果对比可看出, DAS 分辨率差、旁瓣高。本发明方法在分辨率和旁瓣水平上都表现出了优秀的性能, 图中的 9 个点目标都

可以清晰的辨别。

[0112] 图4是本发明方法和DAS方法在深度为50mm处的侧向分辨率的对比实验结果。横坐标为侧向距离,纵坐标为轴向距离。虚线表示DAS方法,实线表示本发明方法。与DAS方法相比,本发明方法在旁瓣水平和主瓣宽度上都表现非常出色。

[0113] 图5是DAS方法和本发明方法对囊肿区域的成像结果;其中图5(a)为DAS的成像效果;3(b)为本发明方法的成像结果。横坐标为侧向距离,纵坐标为轴向距离。

[0114] 图像显示的动态范围均为60dB;无回声圆形囊肿半径3mm,中心位于 $(x, z)=(0, 50)$ mm;图像的大小为 $10\text{mm} \times 10\text{mm}$ ;在每一个波长大小的分辨单元里存在10个随机的散射体,散射幅度服从高斯分布。从图5可以看到,本发明方法可以大大地提高成像的对比度和识别组织的能力。

[0115] 表1是对应于图5结果的对比度比(Contrast ratio, CR)和对比度噪声比(Contrast-to-noise ratio, CNR)指标的计算结果。

[0116] 表1:对应图5结果的CR和CNR的对比

[0117]

|             | CR (dB) | CNR   |
|-------------|---------|-------|
| 图5(a)-DAS方法 | 22.83   | 3.45  |
| 图5(b)-本发明方法 | 33.11   | 10.31 |

[0118] 其中,CR的定义为:

[0119] 
$$CR = |\bar{S}_t - \bar{S}_b|$$

[0120] 其中 $\bar{S}_t$ 为囊肿区域的平均强度(dB), $\bar{S}_b$ 为背景区域的平均强度(dB)。CR越大表明囊肿与背景的区别越明显,更有利于观察。

[0121] CNR的定义为:

[0122] 
$$CNR = \frac{|\bar{S}_t - \bar{S}_b|}{\sigma_b}$$

[0123] 其中 $\bar{S}_t$ 为囊肿区域的平均强度(dB), $\bar{S}_b$ 为背景区域的平均强度(dB), $\sigma_b$ 为背景区域的标准差(dB)。与CR不同,CNR除了与目标区域和背景区域的平均强度有关外,还与背景区域的标准差有关,综合考虑了目标与背景区域的对比度和对背景噪声的抑制能力。从表1上可以看出,本发明方法的对比度分辨率远远优越于DAS方法。

[0124] 总之,实验结果验证了本发明方法的有效性和实用性。从图3和图4可以看到,DAS分辨率差、旁瓣高,本发明方法在分辨率和旁瓣水平上都表现出了优秀的性能;图中的9个点目标都可以清晰的辨别;从图5和表1可明显看出本发明方法比DAS获得更高的CR和CNR,表明了本发明方法在有斑点噪声的情况下仍能获得十分出色的对比度分辨率。而且本发明方法不依赖于发射模式,适用于目前各种超声成像平台。

[0125] 虽然,上文中已经用一般性说明及具体实施方案对本发明作了详尽的描述,但在本发明基础上,可以对之作一些修改或改进,这对本领域技术人员而言是显而易见的。因此,在不偏离本发明精神的基础上所做的这些修改或改进,均属于本发明要求保护的范围。

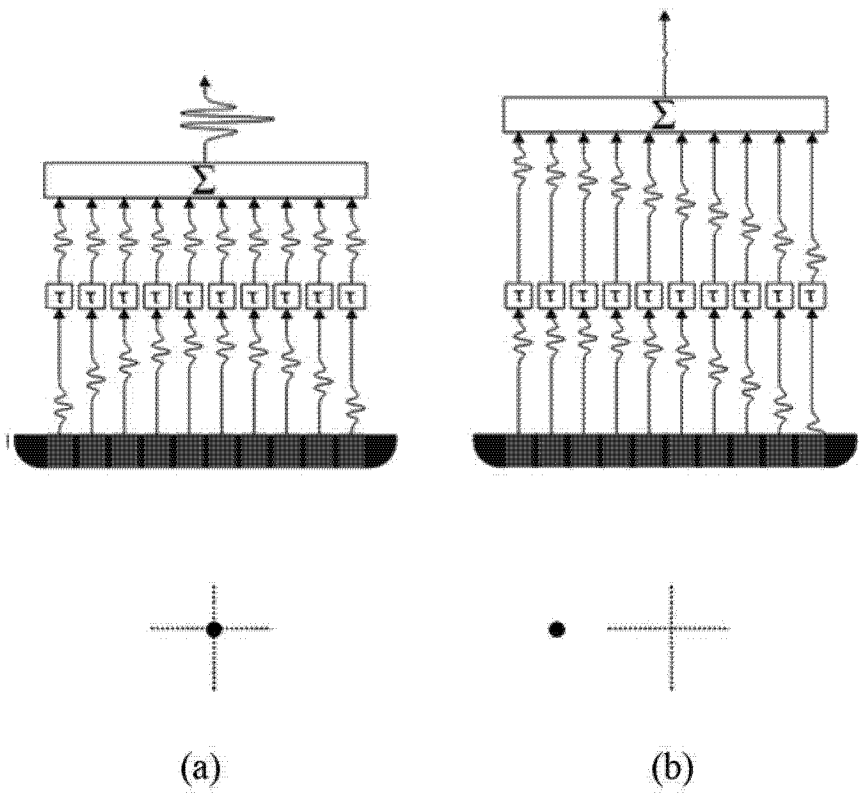


图 1

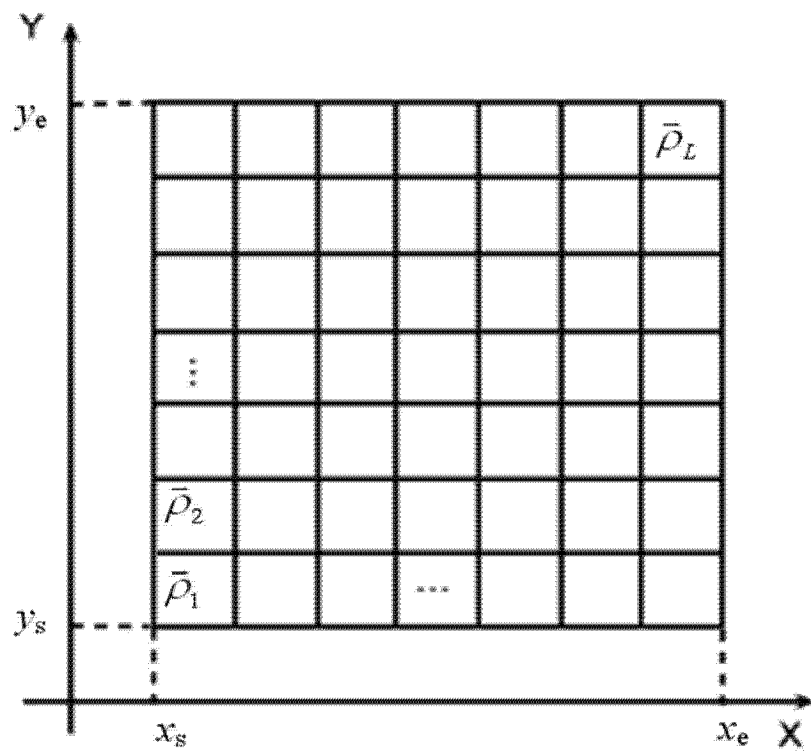


图 2

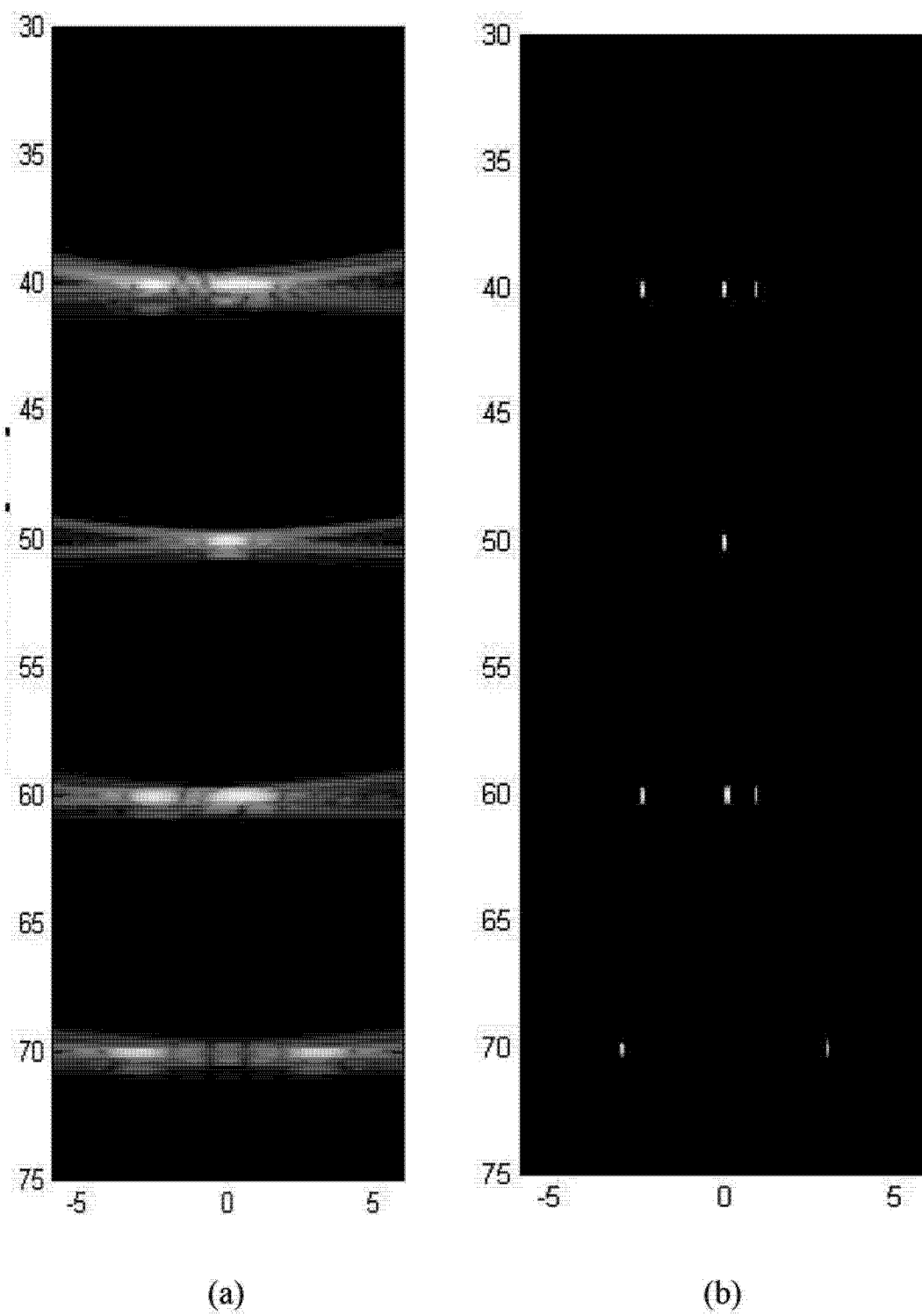


图 3

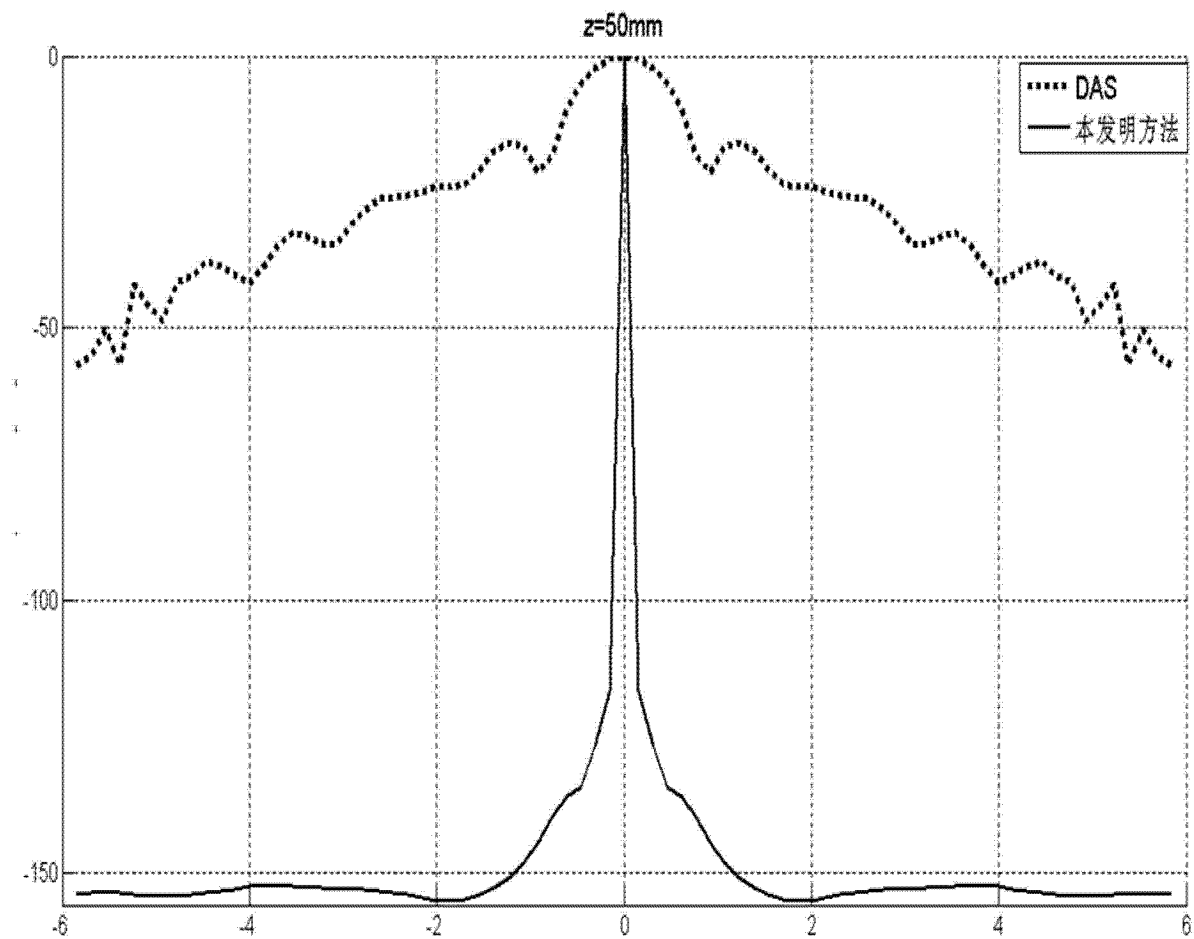


图 4

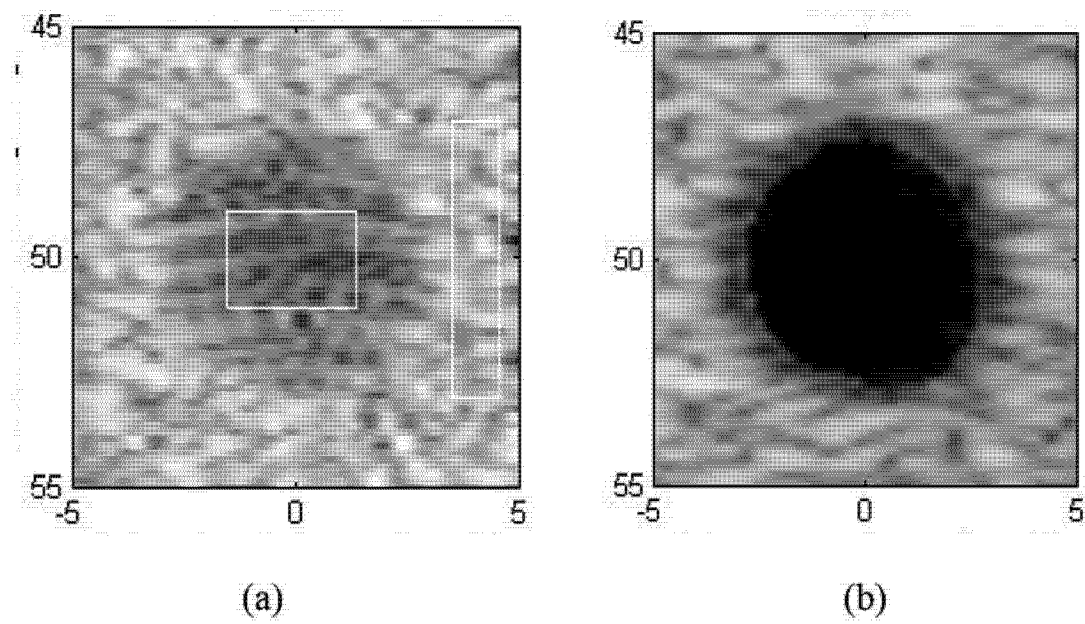


图 5

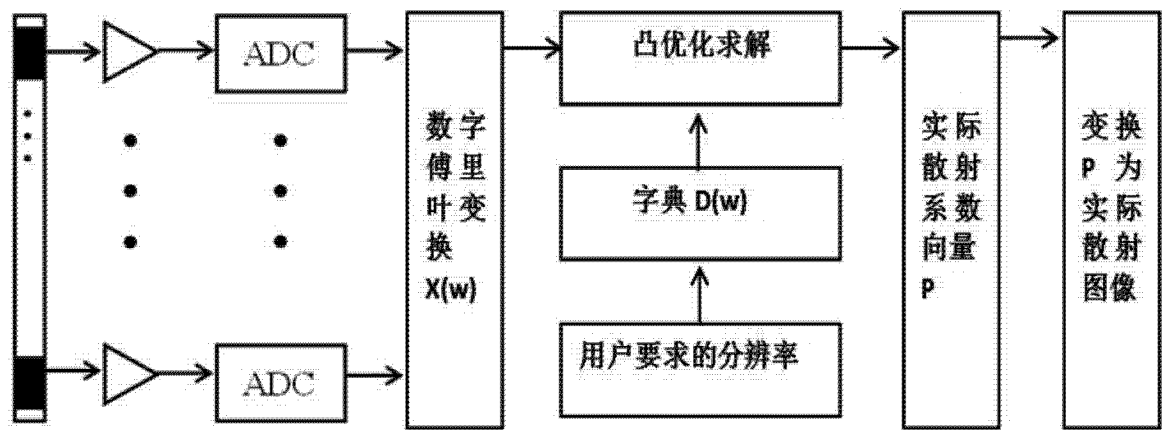


图 6

|                |                                                |         |            |
|----------------|------------------------------------------------|---------|------------|
| 专利名称(译)        | 一种高分辨率超声成像方法                                   |         |            |
| 公开(公告)号        | <a href="#">CN103356238A</a>                   | 公开(公告)日 | 2013-10-23 |
| 申请号            | CN201310124254.X                               | 申请日     | 2013-04-11 |
| [标]申请(专利权)人(译) | 汕头大学                                           |         |            |
| 申请(专利权)人(译)    | 汕头大学                                           |         |            |
| 当前申请(专利权)人(译)  | 汕头大学                                           |         |            |
| [标]发明人         | 张琼<br>沈民奋<br>李斌                                |         |            |
| 发明人            | 张琼<br>沈民奋<br>李斌                                |         |            |
| IPC分类号         | A61B8/00                                       |         |            |
| 代理人(译)         | 王朋飞                                            |         |            |
| 其他公开文献         | CN103356238B                                   |         |            |
| 外部链接           | <a href="#">Espacenet</a> <a href="#">SIPO</a> |         |            |

#### 摘要(译)

本发明涉及一种高分辨率超声成像方法，包括以下步骤：1) 从超声模拟前端中获取的被放大后的超声脉冲回波信号经过A/D转化后，使用动态延时叠加方法来处理接收到的后向散射信号，得到初始波束 $y_{DAS}$ ；2) 将接收到的后向散射信号进行数字傅里叶变换，处理得到后向散射信号的频谱 $X(\omega)$ ；3) 根据实际的分辨率要求，离散化目标区域，生成对应的字典矩阵 $D(\omega)$ ；4) 结合所述字典矩阵 $D(\omega)$ 和后向散射信号的频谱 $X(\omega)$ ，通过如下公式进行凸优化问题的求解，得到目标索引矩阵 $P$ ；5) 将所述目标索引矩阵 $P$ 与初始波束 $y_{DAS}$ 相乘，得到最终的成像输出结果 $y_{SR}$ 。本发明提出了一种全新的超声成像技术，实现高分辨率和高对比度的超声成像，具有巨大的应用前景和 market 价值。

