



(12)发明专利申请

(10)申请公布号 CN 106725594 A

(43)申请公布日 2017. 05. 31

(21)申请号 201611091236.6

(22)申请日 2016.12.01

(71)申请人 汕头大学医学院

地址 515041 广东省汕头市新陵路22号汕头大学医学院

(72)发明人 张琼

(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 汤财宝

(51) Int. Cl.

A61B 8/00(2006.01)

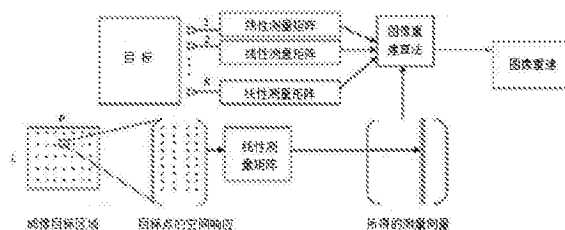
权利要求书4页 说明书9页 附图2页

(54)发明名称

基于压缩感知的超声成像方法和终端

(57)摘要

本发明涉及超声成像技术领域,提供了一种基于压缩感知的超声成像方法和终端,该方法包括以下步骤:将超声阵元接收的信号与预设的线性测量矩阵进行内积计算,得到实际接收的后向散射信号 y ;根据分辨率要求,离散化目标区域,生成对应的超完备字典矩阵 V_{DCS} ;结合所述超完备字典矩阵 V_{DCS} 和所述后向散射信号 y ,通过如下公式进行最大似然估计的求解,得到目标向量 f : $y = V_{DCS} \cdot f$;将所述目标向量 f 转换为图像矩阵。该终端包括:信号获取模块、区域离散化模块、信号矩阵化模块、信号处理模块以及成像模块。本发明可在远低于奈奎斯特采样率的情况下,由采集到少量后向散射信号直接重建出高分辨率超声图像,大大地提高了超声成像的速率、分辨率和对比度。



1. 一种基于压缩感知的超声成像方法,其特征在于,包括以下步骤:

将超声阵元接收的信号与预设的线性测量矩阵进行内积计算,得到实际接收的后向散射信号 y ;

根据分辨率要求,离散化目标区域,生成对应的超完备字典矩阵 V_{DCS} ;

结合所述超完备字典矩阵 V_{DCS} 和所述后向散射信号 y ,通过如下公式进行最大似然估计的求解,得到目标向量 f :

$$y = V_{DCS} \cdot f;$$

将所述目标向量 f 转换为图像矩阵。

2. 根据权利要求1所述的基于压缩感知的超声成像方法,其特征在于,所述将超声阵元接收的信号与预设的线性测量矩阵进行内积计算,得到实际接收的后向散射信号 y ,包括:

第 i 个超声阵元在时间 t 接收到信号 $x_i(t)$:

$$x_i(t) = \sum_{j=1}^Q s_j (t - \tau_i(\rho_j)), \quad i = 1, 2, \dots, K \quad (1);$$

$$\text{其中, } \tau_i(\rho_j) = \|\vec{r}_{irm} - \vec{r}_{\rho_j}\|/c \quad (2);$$

Q 表示散射点的数目, K 表示超声阵元的数目, s_j 表示第 j 个散射点的后向散射信号, $\tau_i(\rho_j)$ 表示散射点 ρ_j 到第 i 个超声阵元的传输延迟, \vec{r}_{irm} 表示第 i 个超声阵元的空间位置, \vec{r}_{ρ_j} 表示散射点 ρ_j 的空间位置, c 表示声速;

将第 i 个超声阵元接收到的信号 x_i 表示为:

$$x_i = \psi * \theta_i \quad (3);$$

其中, $\|\theta_i\|_0 = S$;

S 为信号 $x_i(t)$ 在基 ψ 中的稀疏度;

将 x_i 与大小为 $M_i \times N_t$ 的预设的线性测量矩阵 Φ_i 进行内积计算,得到第 i 个超声阵元实际接收的后向散射信号 y_i :

$$y_i = \Phi_i \cdot x_i \quad (4);$$

其中 $M_i \ll N_t$, M_i 为第 i 个超声阵元实际接收的后向散射信号 y_i 的个数,且 M_i 在其中一个阵元中的稀疏度为 $2S$,在其他阵元的稀疏度为 S ;

则 K 个超声阵元实际接收的后向散射信号 y 表示为:

$$y = [y_1^T, y_2^T, \dots, y_k^T]^T \quad (5)。$$

3. 根据权利要求1所述的基于压缩感知的超声成像方法,其特征在于,所述根据分辨率要求,离散化目标区域,生成对应的超完备字典矩阵 V_{DCS} ,包括:

所述目标区域位于 $[x_s, x_e] \times [y_s, y_e]$ 的内积空间,其中 x_s, y_s 和 x_e, y_e 分别表示目标区域成像的开始和最后地址,并且所述目标区域按照所需的分辨率离散化,产生 $L \times P$ 个假想目标散射点,其中 L 和 P 分别表示离散化的目标区域在轴向和横向的假想目标散射点数目;每一个假想目标散射点,测量到的空间响应是一个大小为 $M \times K$ 的矩阵,其中 M 是一个超声阵元实际接收的后向散射信号的个数, K 是超声阵元的个数,将所有假想目标散射点的空间响应矩阵构成大小为 $MK \times LP$ 的超完备字典矩阵 V_{DCS} 。

4. 根据权利要求1所述的基于压缩感知的超声成像方法,其特征在于,所述结合所述超完备字典矩阵 V_{DCS} 和所述后向散射信号 y ,通过如下公式进行最大似然估计的求解,得到目

标向量 $f: y = V_{DCS} \cdot f$, 包括:

f 的最大似然估计 \hat{f} 表示为:

$$\hat{f} = \max_f p(y, f) \quad (6);$$

$$\text{其中, } \max_f p(f) = \min_f \sum_{l=1}^{LP} \ln |f_l|^2 \quad (7);$$

$p(y, f)$ 表示联合概率密度函数, f_l 表示 f 中的第 l 个元素, L 和 P 分别表示离散化的目标区域在轴向和横向的假想目标散射点数目。

5. 根据权利要求1所述的基于压缩感知的超声成像方法, 其特征在于, 所述结合所述超完备字典矩阵 V_{DCS} 和所述后向散射信号 y , 通过如下公式进行最大似然估计的求解, 得到目标向量 $f: y = V_{DCS} \cdot f$, 包括:

$$f = P_{fix} * f'_{fix} + P_{free} * f'_{free} \quad (8);$$

其中, P_{fix} 和 P_{free} 可通过如下公式利用超完备字典矩阵 V_{DCS} 求取:

$$V_{DCS}^H * V_{DCS} = \begin{pmatrix} P_{fix} & P_{free} \end{pmatrix} * \begin{pmatrix} \Lambda_{fix} & \dots & \dots \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \dots & \dots & \Lambda_{free} \end{pmatrix} * \begin{pmatrix} P_{fix} & P_{free} \end{pmatrix}^H$$

(9);

V_{DCS}^H 表示 V_{DCS} 的共轭矩阵, Λ_{fix} 和 Λ_{free} 表示所述超完备字典矩阵 V_{DCS} 的特征值, P_{fix} 和 P_{free} 表示所述超完备字典矩阵 V_{DCS} 的特征向量;

其中, f'_{fix} 可根据如下公式求取:

$$f'_{fix} = \Lambda_{fix}^{-1} * y'_{fix} \quad (10);$$

$$\Lambda_{fix}^{-1} \text{表示 } \Lambda_{fix} \text{的逆变换, } y'_{fix} = (V_{DCS} * P_{fix})^H * y \quad (11);$$

其中 f'_{free} 可根据下式迭代求解, 直至 f'_{free} 收敛:

$$f'_{free} = (P_{free}^H * T * P_{fix}) * (P_{fix}^H * T * P_{fix})^{-1} * f'_{fix} \quad (12);$$

$T = \text{diag}(|f_1|^2, |f_2|^2, \dots, |f_{LP}|^2)$, f'_{free} 的初始值为0。

6. 一种基于压缩感知的超声成像终端, 其特征在于, 包括:

信号获取模块, 用于将超声阵元接收的信号与预设的线性测量矩阵进行内积计算, 得到实际接收的后向散射信号 y ;

区域离散化模块, 用于根据分辨率要求, 离散化目标区域, 生成对应的超完备字典矩阵 V_{DCS} ;

信号处理模块, 用于结合所述超完备字典矩阵 V_{DCS} 和所述实际接收的后向散射信号 y , 通过如下公式进行最大似然估计的求解, 得到目标向量 $f: y = V_{DCS} \cdot f$;

成像模块, 用于将所述目标向量 f 转换为图像矩阵。

7. 根据权利要求6所述的基于压缩感知的超声成像终端, 其特征在于, 所述信号获取模块具体用于利用如下公式获取实际接收的后向散射信号 y :

第 i 个超声阵元在时间 t 接收到信号 $x_i(t)$:

$$x_i(t) = \sum_{j=1}^Q s_j(t - \tau_i(\rho_j)), \quad i = 1, 2, \dots, K \quad (1);$$

$$\text{其中, } \tau_i(\rho_j) = \|\vec{r}_{irm} - \vec{r}_{\rho_j}\| / c \quad (2);$$

Q 表示散射点的数目, K 表示超声阵元的数目, s_j 表示第 j 个散射点的后向散射信号, $\tau_i(\rho_j)$ 表示散射点 ρ_j 到第 i 个超声阵元的传输延迟, \vec{r}_{irm} 表示第 i 个超声阵元的空间位置, $\vec{r}_{\rho j}$ 表示散射点 ρ_j 的空间位置, c 表示声速;

将第 i 个超声阵元接收到的信号 x_i 表示为:

$$x_i = \psi * \theta_i \quad (3);$$

其中, $\|\theta_i\|_0 = S$;

S 为信号 $x_i(t)$ 在基 ψ 中的稀疏度;

将 x_i 与大小为 $M_i \times N_t$ 的预设的线性测量矩阵 Φ_i 进行内积计算,得到第 i 个超声阵元实际接收的后向散射信号 y_i :

$$y_i = \Phi_i \cdot x_i \quad (4);$$

其中 $M_i \ll N_t$, M_i 为第 i 个超声阵元实际接收的后向散射信号 y_i 的个数,且 M_i 在其中一个阵元中的稀疏度为 $2S$,在其他阵元的稀疏度为 S ;

则 K 个超声阵元实际接收的后向散射信号 y 表示为:

$$y = [y_1^T, y_2^T, \dots, y_k^T]^T \quad (5)。$$

8. 根据权利要求6所述的基于压缩感知的超声成像终端,其特征在于,所述区域离散化模块具体用于利用如下方式生成超完备字典矩阵 V_{DCS} :

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 分别表示目标区域成像的开始和最后地址,并且所述目标区域按照所需的分辨率离散化,产生 $L \times P$ 个假想目标散射点,其中 L 和 P 分别表示离散化的目标区域在轴向和横向的假想目标散射点数目;每一个假想目标散射点,测量到的空间响应是一个大小为 $M \times K$ 的矩阵,其中 M 是一个超声阵元实际接收的后向散射信号的个数, K 是超声阵元的个数,则将所有假想目标散射点的空间响应矩阵构成大小为 $MK \times LP$ 的超完备字典矩阵 V_{DCS} 。

9. 根据权利要求6所述的基于压缩感知的超声成像终端,其特征在于,所述信号处理模块具体用于利用如下公式得到目标向量 f :

f 的最大似然估计 \hat{f} 表示为:

$$\hat{f} = \max_f p(y, f) \quad (6);$$

$$\text{其中, } \max_f p(f) = \min_f \sum_{l=1}^{LP} \ln |f_l|^2 \quad (7);$$

$p(y, f)$ 表示联合概率密度函数, f_l 表示 f 中的第 l 个元素, L 和 P 分别表示离散化的目标区域在轴向和横向的假想目标散射点数目。

10. 根据权利要求6所述的基于压缩感知的超声成像终端,其特征在于,所述信号处理模块具体用于利用如下公式得到目标向量 f :

$$f = P_{fix} * f'_{fix} + P_{free} * f'_{free} \quad (8);$$

其中, P_{fix} 和 P_{free} 可通过如下公式利用超完备字典矩阵 V_{DCS} 求取:

$$V_{\text{DCS}}^{\text{H}} * V_{\text{DCS}} = \begin{pmatrix} P_{\text{fix}} & P_{\text{free}} \end{pmatrix} * \begin{pmatrix} \Lambda_{\text{fix}} & \cdots & \cdot \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \cdot & \cdots & \Lambda_{\text{free}} \end{pmatrix} * \begin{pmatrix} P_{\text{fix}} & P_{\text{free}} \end{pmatrix}^{\text{H}} \quad (9);$$

$V_{\text{DCS}}^{\text{H}}$ 表示 V_{DCS} 的共轭矩阵, Λ_{fix} 和 Λ_{free} 表示所述超完备字典矩阵 V_{DCS} 的特征值, P_{fix} 和 P_{free} 表示所述超完备字典矩阵 V_{DCS} 的特征向量;

其中, f'_{fix} 可根据如下公式求取:

$$f'_{\text{fix}} = \Lambda_{\text{fix}}^{-1} * y'_{\text{fix}} \quad (10);$$

$$\Lambda_{\text{fix}}^{-1} \text{表示} \Lambda_{\text{fix}} \text{的逆变换}, y'_{\text{fix}} = (V_{\text{DCS}} * P_{\text{fix}})^{\text{H}} * y \quad (11);$$

其中 f'_{free} 可根据下式迭代求解,直至 f'_{free} 收敛:

$$f'_{\text{free}} = (P_{\text{free}}^{\text{H}} * T * P_{\text{fix}}) * (P_{\text{fix}}^{\text{H}} * T * P_{\text{fix}})^{-1} * f'_{\text{fix}} \quad (12);$$

$T = \text{diag}(|f_1|^2, |f_2|^2, \dots, |f_{\text{LP}}|^2)$, f'_{free} 的初始值为0。

基于压缩感知的超声成像方法和终端

技术领域

[0001] 本发明涉及超声成像技术领域,尤其涉及一种基于压缩感知的超声成像方法和终端。

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。

[0003] 现有的超声成像方法是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,再通过延时相加(delay and sum,以下简称DAS)方法进行合成后重建出图像。然而DAS方法是一种与信号本身不相关的重建方法,其对不同通道接收到的超声回波信号施加特定的延时后再相加求和,得到目标点的聚焦信号。由于DAS方法采用独立于接收回波信号并且采用预先定义好的、固定的加权系数,没有充分利用回波数据的本身特点,获得的主瓣宽度过宽,旁瓣高度过高。而且主瓣宽度和旁瓣高度之间存在着相互制约,即当抑制旁瓣水平的同时会展宽主瓣宽度,因此不能够获得很好的图像分辨率和对比度。

[0004] 相比于DAS方法,基于最小方差准则(Minimum Variance,以下简称MV)的自适应波束合成方法可以提供更好的分辨率,但其较复杂的计算过程通常会引入很多的计算量。在实际使用中,成像系统为了满足奈奎斯特采样率,尤其在高采样率情况下,会导致较大数据量及对应的计算量。例如,目前通常的超声成像系统中,后向散射信号的频率范围是2MHz-12MHz。根据奈奎斯特采样定理,最低采样率必须要大于或等于两倍的信号带宽,否则信号频谱会出现混叠,不能准确的恢复出原信号。而在实际工程应用中,为了避免混叠,提高分辨率和降低噪声,采样率至少是信号最大频率的4倍。因此,采样频率通常是50MHz。

发明内容

[0005] 本发明要解决的是现有技术中超声成像实际采集信号较多、运算效率低的技术问题。

[0006] 为解决上述问题,本发明提供了一种基于压缩感知的超声成像方法,该方法包括以下步骤:

[0007] 将超声阵元接收的信号与预设的线性测量矩阵进行内积计算,得到实际接收的后向散射信号 y ;

[0008] 根据分辨率要求,离散化目标区域,生成对应的超完备字典矩阵 V_{DCS} ;

[0009] 结合所述超完备字典矩阵 V_{DCS} 和所述后向散射信号 y ,通过如下公式进行最大似然估计的求解,得到目标向量 f :

[0010] $y = V_{DCS} \cdot f$;

[0011] 将所述目标向量 f 转换为图像矩阵。

[0012] 其中,所述将超声阵元接收的信号与预设的线性测量矩阵进行内积计算,得到实际接收的后向散射信号 y ,包括:

[0013] 第 i 个超声阵元在时间 t 接收到信号 $x_i(t)$:

$$[0014] \quad x_i(t) = \sum_{j=1}^Q s_j(t - \tau_i(\rho_j)), \quad i = 1, 2, \dots, K \quad (1);$$

$$[0015] \quad \text{其中, } \tau_i(\rho_j) = \|\vec{r}_{irm} - \vec{r}_{pj}\|/c \quad (2);$$

[0016] Q 表示散射点的数目, K 表示超声阵元的数目, s_j 表示第 j 个散射点的后向散射信号, $\tau_i(\rho_j)$ 表示散射点 ρ_j 到第 i 个超声阵元的传输延迟, \vec{r}_{irm} 表示第 i 个超声阵元的空间位置, \vec{r}_{pj} 表示散射点 ρ_j 的空间位置, c 表示声速;

[0017] 将第 i 个超声阵元接收到的信号 x_i 表示为:

$$[0018] \quad x_i = \psi * \theta_i \quad (3);$$

[0019] 其中, $\|\theta_i\|_0 = S$;

[0020] S 为信号 $x_i(t)$ 在基 ψ 中的稀疏度;

[0021] 将 x_i 与大小为 $M_i \times N_i$ 的预设的线性测量矩阵 Φ_i 进行内积计算,得到第 i 个超声阵元实际接收的后向散射信号 y_i :

$$[0022] \quad y_i = \Phi_i \cdot x_i \quad (4);$$

[0023] 其中 $M_i \ll N_i$, M_i 为第 i 个超声阵元实际接收的后向散射信号 y_i 的个数,且 M_i 在其中一个阵元中的稀疏度为 $2S$,在其他阵元的稀疏度为 S ;

[0024] 则 K 个超声阵元实际接收的后向散射信号 y 表示为:

$$[0025] \quad y = [y_1^T, y_2^T, \dots, y_k^T]^T \quad (5).$$

[0026] 其中,所述根据分辨率要求,离散化目标区域,生成对应的超完备字典矩阵 V_{DCS} ,包括:

[0027] 所述目标区域位于 $[x_s, x_e] \times [y_s, y_e]$ 的内积空间,其中 x_s, y_s 和 x_e, y_e 分别表示目标区域成像的开始和最后地址,并且所述目标区域按照所需的分辨率离散化,产生 $L \times P$ 个假想目标散射点,其中 L 和 P 分别表示离散化的目标区域在轴向和横向的假想目标散射点数目;每一个假想目标散射点,测量到的空间响应是一个大小为 $M \times K$ 的矩阵,其中 M 是一个超声阵元实际接收的后向散射信号的个数, K 是超声阵元的个数,将所有假想目标散射点的空间响应矩阵构成大小为 $MK \times LP$ 的超完备字典矩阵 V_{DCS} 。

[0028] 其中,所述结合所述超完备字典矩阵 V_{DCS} 和所述后向散射信号 y ,通过如下公式进行最大似然估计的求解,得到目标向量 $f: y = V_{DCS} \cdot f$,包括:

[0029] f 的最大似然估计 \hat{f} 表示为:

$$[0030] \quad \hat{f} = \max_f p(y, f) \quad (6);$$

$$[0031] \quad \text{其中, } \max_f p(f) = \min_f \sum_{l=1}^{LP} \ln |f_l|^2 \quad (7);$$

[0032] $p(y, f)$ 表示联合概率密度函数, f_l 表示 f 中的第 l 个元素, L 和 P 分别表示离散化的目标区域在轴向和横向的假想目标散射点数目。

[0033] 其中,所述结合所述超完备字典矩阵 V_{DCS} 和所述后向散射信号 y ,通过如下公式进

行最大似然估计的求解,得到目标向量 $f: y = V_{DCS} \cdot f$,包括:

$$[0034] \quad f = P_{fix} * f'_{fix} + P_{free} * f'_{free} \quad (8)$$

[0035] 其中, P_{fix} 和 P_{free} 可通过如下公式利用超完备字典矩阵 V_{DCS} 求取:

$$[0036] \quad V_{DCS}^H * V_{DCS} = (P_{fix} \quad P_{free}) * \begin{pmatrix} \Lambda_{fix} & \cdots & \vdots \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \cdot & \cdots & \Lambda_{free} \end{pmatrix} * (P_{fix} \quad P_{free})^H \quad (9);$$

[0037] V_{DCS}^H 表示 V_{DCS} 的共轭矩阵, Λ_{fix} 和 Λ_{free} 表示所述超完备字典矩阵 V_{DCS} 的特征值, P_{fix} 和 P_{free} 表示所述超完备字典矩阵 V_{DCS} 的特征向量;

[0038] 其中, f'_{fix} 可根据如下公式求取:

$$[0039] \quad f'_{fix} = \Lambda_{fix}^{-1} * y'_{fix} \quad (10);$$

$$[0040] \quad \Lambda_{fix}^{-1} \text{表示} \Lambda_{fix} \text{的逆变换,} y'_{fix} = (V_{DCS} * P_{fix})^H * y \quad (11);$$

[0041] 其中 f'_{free} 可根据下式迭代求解,直至 f'_{free} 收敛:

$$[0042] \quad f'_{free} = (P_{free}^H * T * P_{fix}) * (P_{fix}^H * T * P_{fix})^{-1} * f'_{fix} \quad (12);$$

[0043] $T = \text{diag}(|f_1|^2, |f_2|^2, \dots, |f_{LP}|^2)$, f'_{free} 的初始值为0。

[0044] 本发明还提供了一种基于压缩感知的超声成像终端,该终端包括:

[0045] 信号获取模块,用于将超声阵元接收的信号与预设的线性测量矩阵进行内积计算,得到实际接收的后向散射信号 y ;

[0046] 区域离散化模块,用于根据分辨率要求,离散化目标区域,生成对应的超完备字典矩阵 V_{DCS} ;

[0047] 信号处理模块,用于结合所述超完备字典矩阵 V_{DCS} 和所述实际接收的后向散射信号 y ,通过如下公式进行最大似然估计的求解,得到目标向量 $f: y = V_{DCS} \cdot f$;

[0048] 成像模块,用于将所述目标向量 f 转换为图像矩阵。

[0049] 其中,所述信号获取模块具体用于利用如下公式获取实际接收的后向散射信号 y :

[0050] 第 i 个超声阵元在时间 t 接收到信号 $x_i(t)$:

$$[0051] \quad x_i(t) = \sum_{j=1}^Q s_j(t - \tau_i(\rho_j)), \quad i = 1, 2, \dots, K \quad (1);$$

$$[0052] \quad \text{其中,} \tau_i(\rho_j) = \|\vec{r}_{irm} - \vec{r}_{\rho_j}\| / c \quad (2);$$

[0053] Q 表示散射点的数目, K 表示超声阵元的数目, s_j 表示第 j 个散射点的后向散射信号, $\tau_i(\rho_j)$ 表示散射点 ρ_j 到第 i 个超声阵元的传输延迟, \vec{r}_{irm} 表示第 i 个超声阵元的空间位置, \vec{r}_{ρ_j} 表示散射点 ρ_j 的空间位置, c 表示声速;

[0054] 将第 i 个超声阵元接收到的信号 x_i 表示为:

$$[0055] \quad x_i = \psi * \theta_i \quad (3);$$

[0056] 其中, $\|\theta_i\|_0 = S$;

[0057] S 为信号 $x_i(t)$ 在基 ψ 中的稀疏度;

[0058] 将 x_i 与大小为 $M_i \times N_t$ 的预设的线性测量矩阵 Φ_i 进行内积计算,得到第 i 个超声阵元实际接收的后向散射信号 y_i :

[0059] $y_i = \varphi_i \cdot x_i$ (4);

[0060] 其中 $M_i \ll N_t$, M_i 为第 i 个超声阵元实际接收的后向散射信号 y_i 的个数, 且 M_i 在其中一个阵元中的稀疏度为 $2S$, 在其他阵元的稀疏度为 S ;

[0061] 则 K 个超声阵元实际接收的后向散射信号 y 表示为:

[0062] $y = [y_1^T, y_2^T, \dots, y_k^T]^T$ (5)。

[0063] 其中, 所述区域离散化模块具体用于利用如下方式生成超完备字典矩阵 V_{DCS} :

[0064] 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 分别表示目标区域成像的开始和最后地址, 并且所述目标区域按照所需的分辨率离散化, 产生 $L \times P$ 个假想目标散射点, 其中 L 和 P 分别表示离散化的目标区域在轴向和横向的假想目标散射点数目; 每一个假想目标散射点, 测量到的空间响应是一个大小为 $M \times K$ 的矩阵, 其中 M 是一个超声阵元实际接收的后向散射信号的个数, K 是超声阵元的个数, 将所有假想目标散射点的空间响应矩阵构成大小为 $MK \times LP$ 的超完备字典矩阵 V_{DCS} 。

[0065] 其中, 所述信号处理模块具体用于利用如下公式得到目标向量 f :

[0066] f 的最大似然估计 \hat{f} 表示为:

[0067] $\hat{f} = \max_f p(y, f)$ (6);

[0068] 其中, $\max_f p(f) = \min_f \sum_{l=1}^{LP} \ln |f_l|^2$ (7);

[0069] $p(y, f)$ 表示联合概率密度函数, f_l 表示 f 中的第 l 个元素, L 和 P 分别表示离散化的目标区域在轴向和横向的假想目标散射点数目。

[0070] 其中, 所述信号处理模块具体用于利用如下公式得到目标向量 f :

[0071] $f = P_{fix} * f'_{fix} + P_{free} * f'_{free}$ (8);

[0072] 其中, P_{fix} 和 P_{free} 可通过如下公式利用超完备字典矩阵 V_{DCS} 求取:

[0073]
$$V_{DCS}^H * V_{DCS} = (P_{fix} \quad P_{free}) * \begin{pmatrix} \Lambda_{fix} & \dots & \cdot \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \cdot & \dots & \Lambda_{free} \end{pmatrix} * (P_{fix} \quad P_{free})^H$$
 (9);

[0074] V_{DCS}^H 表示 V_{DCS} 的共轭矩阵, Λ_{fix} 和 Λ_{free} 表示所述超完备字典矩阵 V_{DCS} 的特征值, P_{fix} 和 P_{free} 表示所述超完备字典矩阵 V_{DCS} 的特征向量;

[0075] 其中, f'_{fix} 可根据如下公式求取:

[0076] $f'_{fix} = \Lambda_{fix}^{-1} * y'_{fix}$ (10);

[0077] Λ_{fix}^{-1} 表示 Λ_{fix} 的逆变换, $y'_{fix} = (V_{DCS} * P_{fix})^H * y$ (11);

[0078] 其中 f'_{free} 可根据下式迭代求解, 直至 f'_{free} 收敛:

[0079] $f'_{free} = (P_{free}^H * T * P_{fix}) * (P_{fix}^H * T * P_{fix})^{-1} * f'_{fix}$ (12);

[0080] $T = \text{diag}(|f_1|^2, |f_2|^2, \dots, |f_{LP}|^2)$, f'_{free} 的初始值为 0。

[0081] 本发明的优点和效果如下:

[0082] 1、本发明提出了一种全新的超声成像方法, 可在远低于奈奎斯特采样率的情况下采集少量后向散射信号, 并直接由采集到的少量后向散射信号重建出高分辨率超声图像, 不仅避免了传统方法上复杂的矩阵运算, 提高了运算效率, 而且可以获得高分辨率的超声

图像。

[0083] 2、本发明方法和终端不依赖于发射模式,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。

[0084] 总之,本发明通过该超声成像方法和终端大大地提高了超声成像的速率、分辨率和对比度,提高了超声图像的质量,进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

[0085] 图1是本发明实施例1的一种基于压缩感知的超声成像方法的流程图;

[0086] 图2是本发明实施例1的一种基于压缩感知的超声成像方法的目标区域离散化示意图;

[0087] 图3是本发明实施例1的一种基于压缩感知的超声成像方法中的大小为 19×771 的线性矩阵;

[0088] 图4是本发明实施例1的一种基于压缩感知的超声成像方法和现有的DAS方法中阵元实际接收的后向散射信号;其中图4(a)为DAS中阵元实际接收的后向散射信号;4(b)为本发明方法中阵元实际接收的后向散射信号;

[0089] 图5是目标区域中的散射点以及本发明实施例1的一种基于压缩感知的超声成像方法和现有的DAS方法的成像结果;其中图5(a)为目标区域中的散射点;5(b)为DAS的成像结果;5(c)为本发明方法的成像结果;

[0090] 图6是基于压缩感知的超声成像终端的示意图。

具体实施方式

[0091] 为使发明的目的、技术方案和优点更加清楚,下面将结合发明中的附图,对发明中的技术方案进行清楚地描述,显然,所描述的实施例是发明一部分实施例,而不是全部的实施例。基于发明中的实施例,本领域普通技术人员在没有做出创造性劳动前提下所获得的所有其他实施例,都属于发明保护的范围。

[0092] 实施例1

[0093] 如图1所示,本发明提供了一种基于压缩感知的超声成像方法,该方法包括以下步骤:

[0094] 将超声阵元接收的信号与预设的线性测量矩阵进行内积计算,得到实际接收的后向散射信号 y ;

[0095] 根据分辨率要求,离散化目标区域,生成对应的超完备字典矩阵 V_{DCS} ;

[0096] 结合超完备字典矩阵 V_{DCS} 和后向散射信号 y ,通过如下公式进行最大似然估计的求解,得到目标向量 f :

[0097] $y = V_{DCS} \cdot f$;

[0098] 将目标向量 f 转换为图像矩阵。

[0099] 本发明将从超声模拟前端中获取的经过放大和A/D转换的超声脉冲回波信号即超声阵元接收的信号,与预设的线性测量矩阵进行内积计算,使超声阵元实际接收的后向散射信号 y 远远少于超声阵元接收的信号,进而大大提高了信号的传输效率和运算效率。另

外,本发明可直接利用超声阵元实际接收的后向散射信号 y 重建出超声图像,不仅避免了传统方法上复杂的矩阵运算,提高了运算效率,而且可以获得高分辨率的超声图像。

[0100] 其中,将超声阵元接收的信号与预设的线性测量矩阵进行内积计算,得到实际接收的后向散射信号 y ,包括:

[0101] 第 i 个超声阵元在时间 t 接收到信号 $x_i(t)$:

$$[0102] \quad x_i(t) = \sum_{j=1}^Q s_j (t - \tau_i(\rho_j)), \quad i = 1, 2, \dots, K \quad (1);$$

$$[0103] \quad \text{其中, } \tau_i(\rho_j) = \|\vec{r}_{irm} - \vec{r}_{\rho_j}\|/c \quad (2);$$

[0104] Q 表示散射点的数目, K 表示超声阵元的数目, s_j 表示第 j 个散射点的后向散射信号, $\tau_i(\rho_j)$ 表示散射点 ρ_j 到第 i 个超声阵元的传输延迟, \vec{r}_{irm} 表示第 i 个超声阵元的空间位置, \vec{r}_{ρ_j} 表示散射点 ρ_j 的空间位置, c 表示声速;

[0105] 将第 i 个超声阵元接收到的信号 x_i 表示为:

$$[0106] \quad x_i = \psi * \theta_i \quad (3);$$

[0107] 其中, $\|\theta_i\|_0 = S$;

[0108] S 为信号 $x_i(t)$ 在基 ψ 中的稀疏度;

[0109] 将 x_i 与大小为 $M_i \times N_t$ 的预设的线性测量矩阵 Φ_i 进行内积计算,得到第 i 个超声阵元实际接收的后向散射信号 y_i :

$$[0110] \quad y_i = \Phi_i \cdot x_i \quad (4);$$

[0111] 其中 $M_i \ll N_t$, M_i 为第 i 个超声阵元实际接收的后向散射信号 y_i 的个数,且 M_i 在其中一个阵元中的稀疏度为 $2S$,在其他阵元的稀疏度为 S ;

[0112] 则 K 个超声阵元实际接收的后向散射信号 y 表示为:

$$[0113] \quad y = [y_1^T, y_2^T, \dots, y_k^T]^T \quad (5)。$$

[0114] 再结合图2所示,根据分辨率要求,离散化目标区域,生成对应的超完备字典矩阵 V_{DCS} ,包括:

[0115] 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 分别表示目标区域成像的开始和最后地址,并且目标区域按照所需的分辨率离散化,产生 $L \times P$ 个假想目标散射点,其中 L 和 P 分别表示离散化的目标区域在轴向和横向的假想目标散射点数目;每一个假想目标散射点,测量到的空间响应是一个大小为 $M \times K$ 的矩阵,其中 M 是一个超声阵元实际接收的后向散射信号的个数, K 是超声阵元的个数,将所有假想目标散射点的空间响应矩阵构成大小为 $MK \times LP$ 的超完备字典矩阵 V_{DCS} 。

[0116] 其中,结合超完备字典矩阵 V_{DCS} 和后向散射信号 y ,通过如下公式进行最大似然估计的求解,得到目标向量 $f: y = V_{DCS} \cdot f$,包括:

[0117] f 的最大似然估计 \hat{f} 表示为:

$$[0118] \quad \hat{f} = \max_f p(y, f) \quad (6);$$

$$[0119] \quad \text{其中, } \max_f p(f) = \min_f \sum_{l=1}^{LP} \ln|f_l|^2 \quad (7);$$

[0120] $p(y, f)$ 表示联合概率密度函数, f_l 表示 f 中的第 l 个元素, L 和 P 分别表示离散化的目标区域在轴向和横向的假想目标散射点数目。

[0121] 其中,结合超完备字典矩阵 V_{DCS} 和后向散射信号 y ,通过如下公式进行最大似然估计的求解,得到目标向量 f : $y=V_{DCS} \cdot f$,包括:

$$[0122] \quad f=P_{fix} \cdot f'_{fix}+P_{free} \cdot f'_{free} \quad (8)$$

[0123] 其中, P_{fix} 和 P_{free} 可通过如下公式利用超完备字典矩阵 V_{DCS} 求取:

$$[0124] \quad V_{DCS}^H * V_{DCS} = \begin{pmatrix} P_{fix} & P_{free} \end{pmatrix} * \begin{pmatrix} \Lambda_{fix} & \cdots & \cdot \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \cdot & \cdots & \Lambda_{free} \end{pmatrix} * \begin{pmatrix} P_{fix} & P_{free} \end{pmatrix}^H$$

(9);

[0125] V_{DCS}^H 表示 V_{DCS} 的共轭矩阵, Λ_{fix} 和 Λ_{free} 表示超完备字典矩阵 V_{DCS} 的特征值, P_{fix} 和 P_{free} 表示超完备字典矩阵 V_{DCS} 的特征向量;

[0126] 其中, f'_{fix} 可根据如下公式求取:

$$[0127] \quad f'_{fix}=\Lambda_{fix}^{-1} * y'_{fix} \quad (10);$$

$$[0128] \quad \Lambda_{fix}^{-1} \text{表示} \Lambda_{fix} \text{的逆变换,} y'_{fix}=(V_{DCS} * P_{fix})^H * y \quad (11);$$

[0129] 其中 f'_{free} 可根据下式迭代求解,直至 f'_{free} 收敛:

$$[0130] \quad f'_{free}=(P_{free}^H * T * P_{fix}) * (P_{fix}^H * T * P_{fix})^{-1} * f'_{fix} \quad (12);$$

[0131] $T=\text{diag}(|f_1|^2, |f_2|^2, \dots, |f_{LP}|^2)$, f'_{free} 的初始值为0。

[0132] 按照上述方法对本发明进行实验,并与传统的DAS方法进行比较,结果如下:

[0133] 实验参数为:采用5MHz的平面波和32个超声阵元,每个超声阵元之间的间距设为150um。

[0134] 图3是本发明实施例1的一种基于压缩感知的超声成像方法中的大小为 19×771 的线性矩阵。

[0135] 图4是本发明实施例1的一种基于压缩感知的超声成像方法和现有的DAS方法中阵元实际接收的后向散射信号;其中图4(a)为DAS中阵元实际接收的后向散射信号;4(b)为本发明方法中阵元实际接收的后向散射信号。

[0136] 从图4结果对比可看出,本发明实际采集的信号数量远远少于DAS方法实际采集的信号数量。具体地,采用DAS方法需要采集 $771 \times 32=22752$ 个信号,采用本发明的方法只需要采集 $19 \times 32=608$ 个信号,也就是说本发明所要采集的信号是上述DAS方法采集的信号与图3中的线性矩阵进行内积运算的结果。

[0137] 图5是目标区域中的散射点以及本发明实施例1的一种基于压缩感知的超声成像方法和现有的DAS方法的成像结果;其中图5(a)为目标区域中的散射点;5(b)为DAS的成像结果;5(c)为本发明方法的成像结果。

[0138] 从图5结果对比可看出,DAS分辨率差、旁瓣大。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19个点目标都可以清晰的辨别。

[0139] 总之,实验结果验证了本发明方法的有效性和实用性,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。

[0140] 实施例2

[0141] 如图6所示,本发明还提供了一种基于压缩感知的超声成像终端,该终端包括:

[0142] 信号获取模块1,用于将超声阵元接收的信号与预设的线性测量矩阵进行内积计

算,得到实际接收的后向散射信号 y ;

[0143] 区域离散化模块2,用于根据分辨率要求,离散化目标区域,用于生成对应的超完备字典矩阵 V_{DCS} ;

[0144] 信号处理模块3,用于结合超完备字典矩阵 V_{DCS} 和后向散射信号 y ,通过如下公式进行最大似然估计的求解,得到目标向量 f : $y = V_{DCS} \cdot f$;

[0145] 成像模块4,用于将目标向量 f 转换为图像矩阵。

[0146] 信号获取模块1对超声阵元接收的信号与线性测量矩阵进行内积计算,获取到实际接收的后向散射信号 y 后,发送给区域离散化模块2;区域离散化模块2根据分辨率要求对目标区域离散化后,利用离散化后目标区域和接收到的实际接收的后向散射信号 y ,生成对应的超完备字典矩阵 V_{DCS} ;信号处理模块3对超完备字典矩阵 V_{DCS} 和后向散射信号 y 进行处理后,得到目标向量 f ;成像模块4将目标向量 f 转换为图像矩阵。

[0147] 具体地,信号获取模块具体用于利用如下公式获取实际接收的后向散射信号 y :

[0148] 第 i 个超声阵元在时间 t 接收到信号 $x_i(t)$:

$$[0149] \quad x_i(t) = \sum_{j=1}^Q s_j(t - \tau_i(\rho_j)), \quad i = 1, 2, \dots, K \quad (1);$$

$$[0150] \quad \text{其中, } \tau_i(\rho_j) = \|\vec{r}_{irm} - \vec{r}_{\rho_j}\|/c \quad (2);$$

[0151] Q 表示散射点的数目, K 表示超声阵元的数目, s_j 表示第 j 个散射点的后向散射信号, $\tau_i(\rho_j)$ 表示散射点 ρ_j 到第 i 个超声阵元的传输延迟, \vec{r}_{irm} 表示第 i 个超声阵元的空间位置, \vec{r}_{ρ_j} 表示散射点 ρ_j 的空间位置, c 表示声速;

[0152] 将第 i 个超声阵元接收到的信号 x_i 表示为:

$$[0153] \quad x_i = \psi * \theta_i \quad (3);$$

[0154] 其中, $\|\theta_i\|_0 = S$;

[0155] S 为信号 $x_i(t)$ 在基 ψ 中的稀疏度;

[0156] 将 x_i 与大小为 $M_i \times N_t$ 的预设的线性测量矩阵 Φ_i 进行内积计算,得到第 i 个超声阵元实际接收的后向散射信号 y_i :

$$[0157] \quad y_i = \Phi_i \cdot x_i \quad (4);$$

[0158] 其中 $M_i \ll N_t$, M_i 为第 i 个超声阵元实际接收的后向散射信号 y_i 的个数,且 M_i 在其中一个阵元中的稀疏度为 $2S$,在其他阵元的稀疏度为 S ;

[0159] 则 K 个超声阵元实际接收的后向散射信号 y 表示为:

$$[0160] \quad y = [y_1^T, y_2^T, \dots, y_k^T]^T \quad (5)。$$

[0161] 具体地,区域离散化模块具体用于利用如下方式生成超完备字典矩阵 V_{DCS} :

[0162] 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 分别表示目标区域成像的开始和最后地址,并且目标区域按照所需的分辨率离散化,产生 $L \times P$ 个假想目标散射点,其中 L 和 P 分别表示离散化的目标区域在轴向和横向的假想目标散射点数目;每一个假想目标散射点,测量到的空间响应是一个大小为 $M \times K$ 的矩阵,其中 M 是一个超声阵元实际接收的后向散射信号的个数, K 是超声阵元的个数,将所有假想目标散射点的空间响应矩阵构成大小为 $MK \times LP$ 的超完备字典矩阵 V_{DCS} 。

[0163] 具体地,信号处理模块具体用于利用利用如下公式得到目标向量 f :

[0164] f 的最大似然估计 \hat{f} 表示为:

$$[0165] \quad \hat{f} = \max_f p(y, f) \quad (6);$$

$$[0166] \quad \text{其中, } \max_f p(f) = \min_f \sum_{l=1}^{LP} \ln |f_l|^2 \quad (7);$$

[0167] $p(y, f)$ 表示联合概率密度函数, f_l 表示 f 中的第 l 个元素, L 和 P 分别表示离散化的目标区域在轴向和横向的假想目标散射点数目。

[0168] 具体地, 信号处理模块具体用于利用如下公式得到目标向量 f :

$$[0169] \quad f = P_{\text{fix}} * f'_{\text{fix}} + P_{\text{free}} * f'_{\text{free}} \quad (8);$$

[0170] 其中, P_{fix} 和 P_{free} 可通过如下公式利用超完备字典矩阵 V_{DCS} 求取:

$$[0171] \quad V_{\text{DCS}}^H * V_{\text{DCS}} = (P_{\text{fix}} \quad P_{\text{free}}) * \begin{pmatrix} \Lambda_{\text{fix}} & \dots & \cdot \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \cdot & \dots & \Lambda_{\text{free}} \end{pmatrix} * (P_{\text{fix}} \quad P_{\text{free}})^H \quad (9);$$

[0172] V_{DCS}^H 表示 V_{DCS} 的共轭矩阵, Λ_{fix} 和 Λ_{free} 表示超完备字典矩阵 V_{DCS} 的特征值, P_{fix} 和 P_{free} 表示超完备字典矩阵 V_{DCS} 的特征向量;

[0173] 其中, f'_{fix} 可根据如下公式求取:

$$[0174] \quad f'_{\text{fix}} = \Lambda_{\text{fix}}^{-1} * y'_{\text{fix}} \quad (10);$$

$$[0175] \quad \Lambda_{\text{fix}}^{-1} \text{ 表示 } \Lambda_{\text{fix}} \text{ 的逆变换, } y'_{\text{fix}} = (V_{\text{DCS}} * P_{\text{fix}})^H * y \quad (11);$$

[0176] 其中 f'_{free} 可根据下式迭代求解, 直至 f'_{free} 收敛:

$$[0177] \quad f'_{\text{free}} = (P_{\text{free}}^H * T * P_{\text{fix}}) * (P_{\text{fix}}^H * T * P_{\text{fix}})^{-1} * f'_{\text{fix}} \quad (12);$$

[0178] $T = \text{diag}(|f_1|^2, |f_2|^2, \dots, |f_{LP}|^2)$, f'_{free} 的初始值为 0。

[0179] 本发明的各个部件实施方式可以以硬件实现, 或者以在一个或者多个处理器上运行的软件模块实现, 或者以它们的组合实现。应该注意的是上述实施方式对本发明进行说明而不是对本发明进行限制, 并且本领域技术人员在不脱离所附权利要求的范围的情况下可设计出替换实施方式。在权利要求中, 不应将位于括号之间的任何参考符号构造成对权利要求的限制。单词“包含”不排除存在未列在权利要求中的元件或步骤。位于元件之前的单词“一”或“一个”不排除存在多个这样的元件。本发明可以借助于包括有若干不同元件的硬件以及借助于适当编程的计算机来实现。在列举了若干装置的单元权利要求中, 这些装置中的若干个可以是通过同一个硬件项来具体体现。单词第一、第二、以及第三等的使用不表示任何顺序。可将这些单词解释为名称。

[0180] 虽然结合附图描述了本发明的实施方式, 但是本领域技术人员可以在不脱离本发明的精神和范围的情况下做出各种修改和变型, 这样的修改和变型均落入由所附权利要求所限定的范围之内。

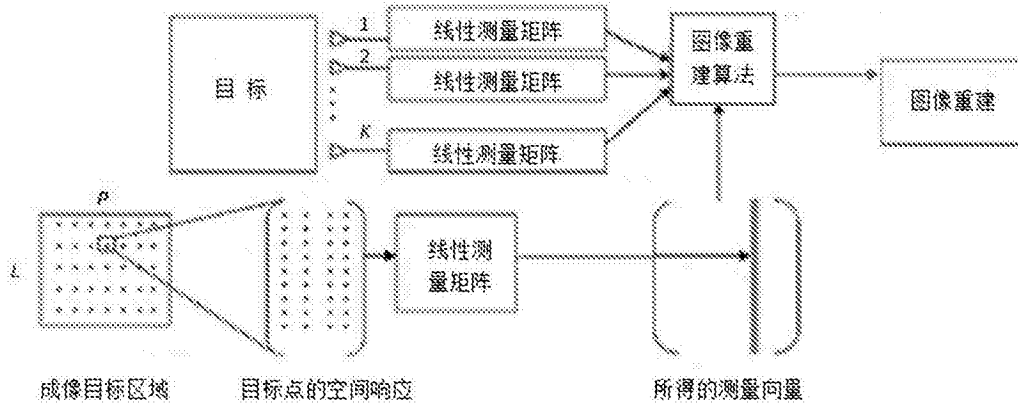


图1

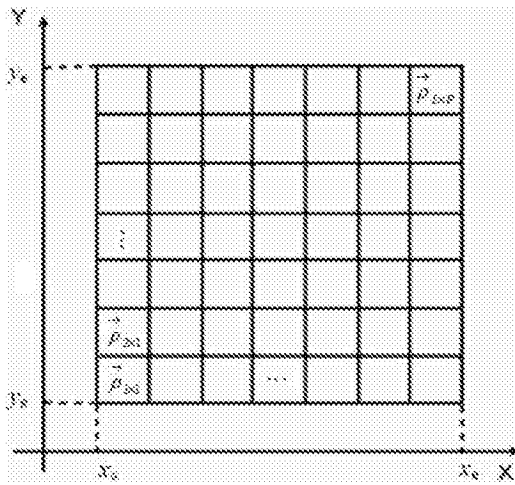


图2

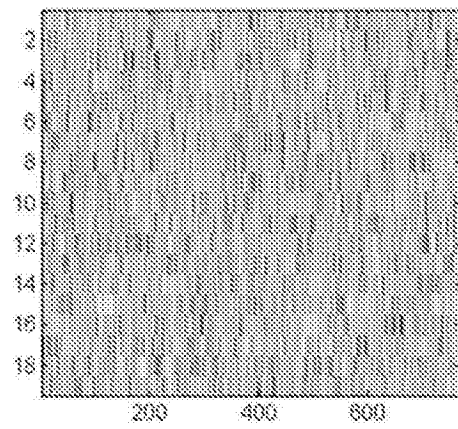
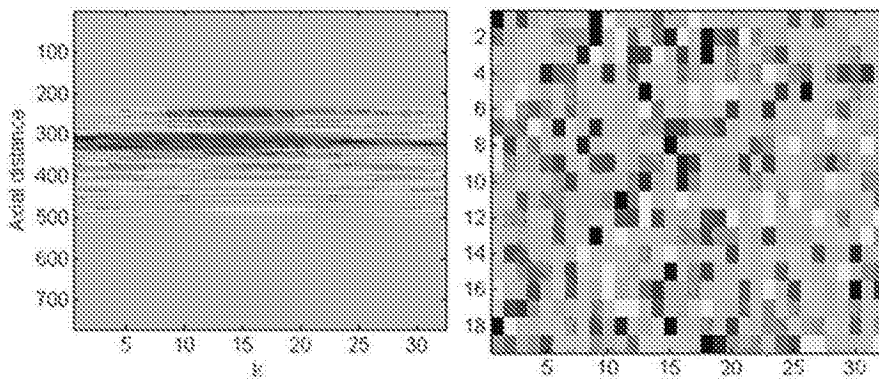


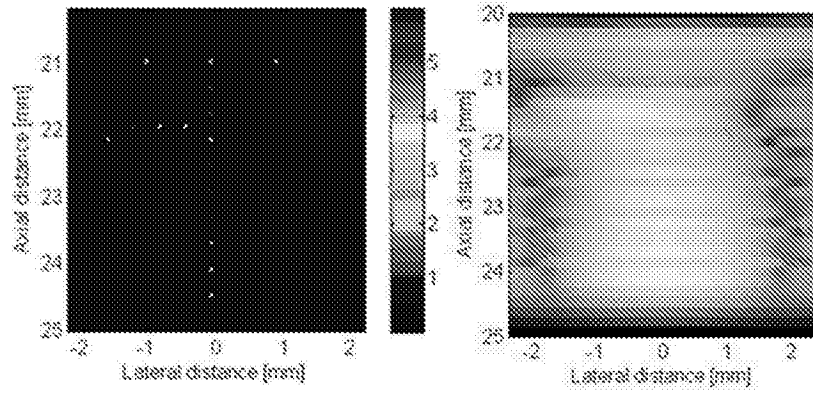
图3



(a)

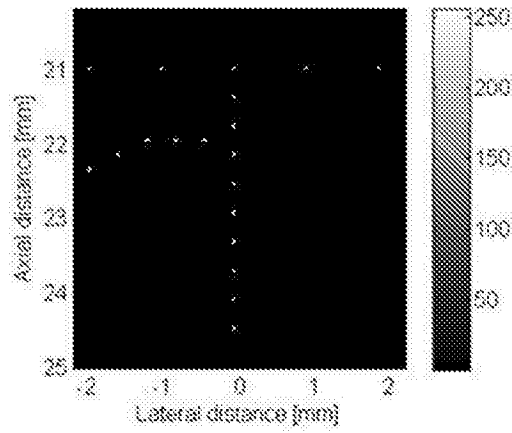
(b)

图4



(a)

(b)



(c)

图5

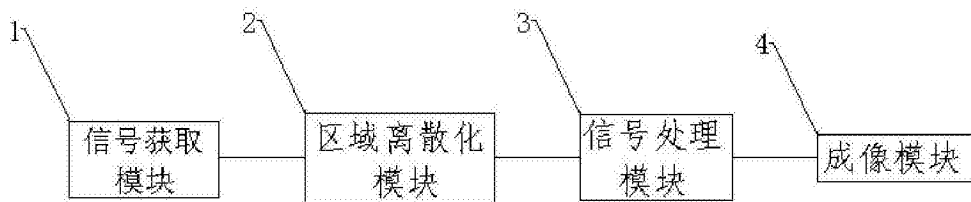


图6

专利名称(译)	基于压缩感知的超声成像方法和终端		
公开(公告)号	CN106725594A	公开(公告)日	2017-05-31
申请号	CN201611091236.6	申请日	2016-12-01
[标]申请(专利权)人(译)	汕头大学医学院		
申请(专利权)人(译)	汕头大学医学院		
当前申请(专利权)人(译)	汕头大学医学院		
[标]发明人	张琼		
发明人	张琼		
IPC分类号	A61B8/00		
CPC分类号	A61B8/5223		
外部链接	Espacenet SIPO		

摘要(译)

本发明涉及超声成像技术领域，提供了一种基于压缩感知的超声成像方法和终端，该方法包括以下步骤：将超声阵元接收的信号与预设的线性测量矩阵进行内积计算，得到实际接收的后向散射信号 y ；根据分辨率要求，离散化目标区域，生成对应的超完备字典矩阵VDCS；结合所述超完备字典矩阵VDCS和所述后向散射信号 y ，通过如下公式进行最大似然估计的求解，得到目标向量 f ： $y = VDCS \cdot f$ ；将所述目标向量 f 转换为图像矩阵。该终端包括：信号获取模块、区域离散化模块、信号矩阵化模块、信号处理模块以及成像模块。本发明可在远低于奈奎斯特采样率的情况下，由采集到少量后向散射信号直接重建出高分辨率超声图像，大大地提高了超声成像的速率、分辨率和对比度。

