



(12) 发明专利申请

(10) 申请公布号 CN 105266847 A

(43) 申请公布日 2016. 01. 27

(21) 申请号 201510567122. 3

(22) 申请日 2015. 09. 08

(71) 申请人 西安交通大学

地址 710049 陕西省西安市咸宁西路 28 号

(72) 发明人 万明习 王弟亚 柏晨 钟徽

(74) 专利代理机构 西安通大专利代理有限责任
公司 61200

代理人 徐文权

(51) Int. Cl.

A61B 8/00(2006. 01)

G01S 15/89(2006. 01)

权利要求书3页 说明书8页 附图3页

(54) 发明名称

基于压缩感知自适应波束合成的脉冲逆转谐波平面波快速造影成像方法

(57) 摘要

本发明提供了一种基于压缩感知自适应波束合成的脉冲逆转谐波平面波快速造影成像方法,使得高分辨率、造影组织比的平面波造影图像实时成像成为可能。本方法仅对超声阵列探头阵元接收到的造影回波的 2 阶谐波分量,进行压缩随机采样处理,大幅度剔除冗余数据,减少波束合成运算量;进一步采用压缩感知理论对自适应波束合成算法性能优化,在保证图像分辨率不降低的前提下,实现快速波束合成运算;联合脉冲逆转谐波造影成像方式,换能器交替发射一对相位相反的平面波,高灵敏地检测微泡的非线性谐波分量、大幅度改善图像造影组织比的同时,使得快速合成一幅平面波造影图像只需 2 次平面波发射,避免了微泡多次辐射造成的破坏,准确地扑捉微泡的瞬态分布。

1. 一种基于压缩感知自适应波束合成的脉冲逆转谐波平面波快速造影成像方法,其特征在于,包括以下步骤:

1) 超声阵列换能器交替发射相位分别为 0° 相与 180° 相的平面波,计算机采集超声阵列换能器阵元的 0° 相与 180° 相射频造影回波信号 $X_0(t)$ 与 $X_{180}(t)$;

2) 在 0° 相与 180° 相射频造影回波信号加和运算得到射频回波信号 $X(t)$ 之后,依据第 i 条待合成扫描线上的第 d 个目标点空间位置与对应的动态孔径 N ,对 N 个有效阵元通道数据延时后得到加和延时域信号 $X_{id}(t)$;

3) 对加和延时域信号 $X_{id}(t)$ 通过傅立叶变换转换为频域信号 $X_{id}(\omega)$,并选取谐波分量内的频点 $X_{id}(\omega_k)$,进行按比率的压缩随机采样抽取,得到压缩采样后的造影谐波频域频点 $\hat{X}_{id}(\omega_k)$;

4) 通过构造所选频点 $\hat{X}_{id}(\omega_k)$ 的稳健自相关矩阵,计算该频点所对应的最小方差自适应波束合成的最优加权系数 $w_{id}(\omega_k)$,从而得到该频点的最优波束合成的频域输出 $\hat{y}_{id}(\omega_k)$;

5) 按照步骤 4) 遍历第 i 条待合成扫描线上所有抽取的造影谐波频点 $\hat{X}_i(\omega_k)$,并由多点欠定系统聚焦求解算法重建谐波分量的频域信息,然后重建第 i 条待合成扫描线的频域信息 $y_i(\omega)$;

6) 按扫描线波束合成次序,重复步骤 2) ~ 步骤 5) 得到所有待合成扫描线的频域信息 $Y(\omega)$,将 $Y(\omega)$ 通过逆傅立叶变换变换到时域,得到 $Y(t)$,对 $Y(t)$ 进行图像后处理得到平面波造影图像。

2. 根据权利要求 1 所述的方法,其特征在于:步骤 1) 具体包括以下步骤:

1.1) 超声阵列换能器按脉冲逆转模式交替发射中心频率为 f_0 的一对相位相反的平面波,其相位分别为 0° 相与 180° 相, f_0 范围为 $2.0\text{MHz} \sim 5.0\text{MHz}$;

1.2) 计算机采集超声阵列换能器阵元的 0° 相与 180° 相的射频造影回波信号 $X_0(t)$ 与 $X_{180}(t)$ 。

3. 根据权利要求 1 所述的方法,其特征在于:步骤 2) 具体包括以下步骤:

2.1) 将 0° 相与 180° 相的射频造影回波信号 $X_0(t)$ 与 $X_{180}(t)$ 在整个时域加和运算得到射频回波信号 $X(t)$;

$$X(t) = X_0(t) + X_{180}(t)$$

2.2) 选定第 i 条待合成扫描线上目标点并根据目标点与中心阵元垂直距离计算波束合成的有效阵元数大小 N ,并选定有效阵元,待合成扫描线数量为 $128 \sim 256$;

2.3) 根据第 i 条待合成扫描线上第 d 个目标点与 N 个有效阵元相对位置,对 N 个阵元通道接收信号计算每一个通道的信号延时时间 τ_{id} ;

$$\tau_{id} = [\tau_1 \quad \tau_2 \quad \cdots \quad \tau_N]^T$$

其中, $\tau_j = \frac{D_j - D_c}{c}$ 为第 j 个有效阵元的延时时间, D_j 为第 j 个有效阵元到第 d

个目标点的距离, D_c 为目标点中心阵元到第 d 个目标点的距离, c 为组织中声速, $j =$

1, 2, 3, ..., N;

2.4) 对 N 个有效阵元对应射频回波信号按 τ_{id} 依次延时, 得到加和延时域信号 $X_{id}(t) = X(t - \tau_{id})$

$$X_{id}(t) = [x_1(t) \ x_2(t) \ \cdots \ x_N(t)]^T$$

其中, $x_j(t)$ 表示有效阵元中第 j 个射频回波信号, $j = 1, 2, 3, \dots, N$ 。

4. 根据权利要求 1 所述的方法, 其特征在于: 步骤 3) 具体包括以下步骤:

3.1) 对加和延时域信号 $X_{id}(t)$ 进行傅里叶变换, 得到频域信号 $X_{id}(\omega)$;

$$X_{id}(\omega) = [x_1(\omega) \ x_2(\omega) \ \cdots \ x_N(\omega)]^T$$

其中, $x_j(\omega)$ 是对应于 $x_j(t)$ 的傅立叶变换后的频域信号, $j = 1, 2, 3, \dots, N$;

3.2) 对频域信号 $X_{id}(\omega)$ 进行 $2f_0$ 谐波滤波, 将谐波分量 ω_k 内的频点构成维数为 $k \times N$ 的谐波信号 $X_{id}(\omega_k)$, 谐波分量有效带宽为 $1.4f_0 \sim 2.6f_0$, k 为有效带宽内的频点数;

3.3) 基于该频点数 k , 构造 k 阶的主对角线元素为 1, 其余为 0 的压缩随机抽取矩阵 T , 抽取比例为 $30\% \sim 40\%$;

3.4) 对 $X_{id}(\omega_k)$ 按行进行随机抽取: $\hat{X}_{id}(\omega_k) = T \times X_{id}(\omega_k)$, 得到压缩采样后的造影谐波频域频点 $\hat{X}_{id}(\omega_k)$ 。

5. 根据权利要求 1 所述的方法, 其特征在于: 步骤 4) 具体包括以下步骤:

4.1) 通过构造所选频点 $\hat{X}_{id}(\omega_k)$ 的稳健自相关矩阵, 计算该频点所对应的最小方差自适应波束合成的最优加权系数 $w_{id}(\omega_k)$;

4.2) 对于 $\hat{X}_{id}(\omega_k)$ 中的频点, 把有效阵元数为 N 的阵列分为 $L \times k$ 、总数为 $N-L+1$ 的子阵 $\hat{X}_{id}^l(\omega_k)$;

4.3) 将所有子阵 $\hat{X}_{id}^l(\omega_k)$ 与其对应的最优加权系数 $w_{id}(\omega_k)$ 依次点乘求和并平均, 得到 $\hat{X}_{id}(\omega_k)$ 中频点的最优波束合成的频域输出 $\hat{y}_{id}(\omega_k)$:

$$\hat{y}_{id}(\omega_k) = \frac{1}{N-L+1} \sum_{l=1}^{N-L+1} w_{id}(\omega_k) \hat{X}_{id}^l(\omega_k)$$

其中, $\hat{X}_{id}^l(\omega_k)$ 为 $\hat{X}_{id}(\omega_k)$ 的第 l 个子阵。

6. 根据权利要求 1 所述的方法, 其特征在于: 步骤 5) 具体包括以下步骤:

1) 计算第 i 条待合成扫描线上所有抽取频点的最优波束合成的频域信号输出 $\hat{y}_i(\omega_k)$;

2) 构建 $k \times k$ 的傅里叶基 F 作为稀疏基, k 为有效带宽内的频点数, 利用下式:

$$\hat{y}_i^H(\omega_k) = TFb_i^H(\omega_k)$$

采用多点欠定系统聚焦求解算法和构建的抽取矩阵 T 与傅里叶基 F , 从 $\hat{y}_i(\omega_k)$ 中估计出稀疏投影系数向量 $b_i(\omega_k)$;

3) 由 $y_i(\omega_k) = Fb_i(\omega_k)$ 计算阵元输出所有有效带宽内的最优波束合成的频域信号输出 $y_i(\omega_k)$;

4) 对所有谐波分量 ω_k 外的频点替换为 0 点, 得到第 i 条扫描线上整个频域的最优波束合成的频域信息 $y_i(\omega)$ 。

7. 根据权利要求 1 所述的方法, 其特征在于: 步骤 6) 具体包括以下步骤:

6. 1) 按扫描线波束合成次序, 得到所有扫描线在整个频域的最优波束合成的频域信息 $Y(\omega)$

$$Y(\omega) = [y_1(\omega) \ y_2(\omega) \ \cdots \ y_{line}(\omega)]^T$$

其中, $line$ 为波束合成扫描线数;

6. 2) 将 $Y(\omega)$ 进行逆傅里叶变换, 得到整个成像区域射频信号 $Y(t)$;

6. 3) 对 $Y(t)$ 进行包络检波、对数压缩以及坐标变换后得到平面波造影图像。

基于压缩感知自适应波束合成的脉冲逆转谐波平面波快速 造影成像方法

技术领域

[0001] 本发明属于超声造影成像技术领域,具体涉及一种基于压缩感知自适应波束合成的脉冲逆转谐波(PIH-CSBF)平面波快速造影成像方法。

背景技术

[0002] 超声造影成像是利用包膜微泡在声场激励下的强非线性响应,以增强超声对血流的检测能力,有效地从周围组织中鉴别微血管分布的成像方式,可得到高分辨性能的微血管造影图像。它在实时描绘造影灌注的动态分布过程,同时可从中提取与生理病理相关的血流动力学参量,使得心血管疾病与恶性肿瘤新生血管的早期诊断和血流灌注时相分析成为可能,并在临床广泛应用。传统的超声造影成像技术采取的聚焦波逐条扫描成像方式,以获得对比度、分辨率较佳的造影图像。但该扫描成像方式存在扫描线间延时导致的伪实时成像、成像帧率难以提高以及在焦点区域对造影微泡破坏率较高的问题。虽然,可以通过降低成像发射声压以减少造影微泡的破坏率、减少扫描线次数并降低成像深度以提高图像帧率;尽管如此,其改善依然是局限性的,未能从技术上突破,且以损失细节分辨率、信噪比为代价。

[0003] 因此,为克服上述问题,近年兴起了以平面波为发射方式的造影成像技术。但因平面波发射声压较低缺乏焦点的问题,其成像造影组织比(Contrast-to-tissue ratio, CTR)和分辨率受限,为此发展了多角度发射的相干复合平面波成像方法、脉冲逆转微泡小波平面波造影成像等方法,以提高造影图像的 CTR 和分辨率,并在血流仿体、兔肾脏造影团注成像中应用。遗憾的是,上述平面波造影成像方法均为离线处理方法,它们均采用延时叠加(Delay and Sum, DAS)波束合成法。但 DAS 没有考虑通道数据的差异,加权系数固定,其主瓣宽度过宽,旁瓣高度过高,所得图像质量较差。为此就有上述脉冲逆转微泡小波变换与多角度发射相干复合平面造影成像技术的出现,以改善 DAS 所得造影图像的图像质量。近期有文献显示已有学者为了提高横向分辨率和对比度,通过自适应波束合成方法以改善 DAS 的技术缺陷。

[0004] 尽管自适应波束合成相比 DAS 可得到高分辨率的造影图像,但其较复杂的算法引入更多的计算量。在实际应用中,为获得高 CTR 与分辨率造影图像而采用的多角度发射相干复合与脉冲逆转微泡小波变换造影成像方法联合自适应波束合成技术均极为复杂,在面对成像系统高采样率、平面波快速发射采集的极为庞大的数据量时,使得超快平面波造影成像难以实时实现。因此,如何在保证造影图像 CTR 与分辨率的前提下,实现平面波造影实时成像是本领域一大挑战。

发明内容

[0005] 本发明的目的在于提供一种基于压缩感知自适应波束合成的脉冲逆转谐波平面波快速造影成像方法。

[0006] 为了实现上述目的,本发明采用了以下技术方案:

[0007] 步骤一超声阵列换能器按脉冲逆转模式发射平面波,其交替发射相位分别为 0° 相与 180° 相,计算机采集超声阵列换能器阵元的 0° 相与 180° 相射频回波信号 $X_0(t)$ 与 $X_{180}(t)$;

[0008] 步骤二将 0° 相与 180° 相射频回波信号加和运算所得射频回波信号 $X(t)$,依据第 i 条待合成扫描线上的第 d 个目标点空间位置与动态孔径 N ,对 N 个有效阵元通道数据延时后得到加和延时域信号 $X_{id}(t)$;

[0009] 步骤三对加和延时域信号 $X_{id}(t)$ 通过傅立叶变换转换为频域信号 $X_{id}(\omega)$,并选取造影回波的谐波分量内的频点 $X_{id}(\omega_k)$,进行按比率的压缩随机采样抽取,得到压缩采样后的造影谐波频域信号 $\hat{X}_{id}(\omega_k)$;

[0010] 步骤四通过构造所选频点 $\hat{X}_{id}(\omega_k)$ 的稳健自相关矩阵,计算该频点所对应的最小方差自适应波束合成的最优加权系数 $w_{id}(\omega_k)$,从而得到该频点的最优波束合成的频域输出 $\hat{y}_{id}(\omega_k)$;

[0011] 步骤五按照步骤四遍历所有抽取的造影谐波频点 $\hat{X}_i(\omega_k)$,并由多点欠定系统聚焦求解 (RM-FOCUSS) 算法重建谐波分量的频域信息,然后重建第 i 条扫描线的频域信息 $y_i(\omega)$;

[0012] 步骤六按扫描线波束合成次序,重复步骤二~步骤五得到所有扫描线的频域信息 $Y(\omega)$,并将加和射频数据的频域信息 $Y(\omega)$ 通过逆傅立叶变换变换到时域,得到 $Y(t)$,对 $Y(t)$ 进行包络检波、对数压缩、坐标变换等图像后处理得到高质量的平面波造影图像。

[0013] 具体步骤如下:

[0014] 一、本发明所采用的技术方案步骤一,具体步骤如下:

[0015] 1) 超声阵列换能器按脉冲逆转模式交替发射中心频率为 f_0 的一对相位相反的平面波,其相位分别为 0° 相与 180° 相,探头工作频率 f_0 范围: $2.0\text{MHz} \sim 5.0\text{MHz}$;

[0016] 2) 计算机采集超声阵列换能器阵元的 0° 相与 180° 相射频回波信号 $X_0(t)$ 与 $X_{180}(t)$;

[0017] 3) 其成像特征为,合成一副平面波造影图像,仅需发射 2 次,即:一对相位相反的平面波。

[0018] 二、本发明所采用的技术方案步骤二,具体步骤如下:

[0019] 1) 将 0° 相与 180° 相的射频回波信号 $X_0(t)$ 与 $X_{180}(t)$ 在整个时域加和运算得到射频回波信号 $X(t)$, $X(t) = X_0(t) + X_{180}(t)$;

[0020] 2) 选定第 i 条 ($1 \leq i \leq 128 \sim 256$) 待合成扫描线上目标点并根据目标点与中心阵元垂直距离计算波束合成的有效阵元数大小 N ,并选定阵元;

[0021] 3) 根据第 i 条待合成扫描线上第 d 个目标点与 N 个阵元相对位置,对 N 个阵元通道接收信号计算每一个通道的信号延时时间 τ_{id} , $\tau_{id} = [\tau_1 \quad \tau_2 \quad \cdots \quad \tau_N]^T$,其中,

$\tau_j = \frac{D_j - D_c}{c}$ 为第 j 个阵元的延时时间, D_i 为第 j 个阵元到目标点距离, D_c 为目标点中心

阵元到目标点距离, c 为组织中声速, $j = 1, 2, 3, \dots, N$;

[0022] 4) 根据第 d 个待合成目标点与 N 个阵元相对位置, 对 N 个阵元对应射频回波信号 $X(t)$ 按 τ_{id} 依次延时, 得到延时后列向量信号 $X_{id}(t) = X(t - \tau_{id})$, $X_{id}(t) = [x_1(t) \ x_2(t) \ \cdots \ x_N(t)]^T$ 。

[0023] 三、本发明所采用的技术方案步骤三, 具体步骤如下:

[0024] 1) 对延时后时域信号 $X_{id}(t)$ 进行傅里叶变换, 得到频域信号 $X_{id}(\omega)$, $X_{id}(\omega) = [x_1(\omega) \ x_2(\omega) \ \cdots \ x_N(\omega)]^T$;

[0025] 2) 对造影回波的频域信号 $X_{id}(\omega)$ 进行 $2f_0$ 谐波滤波, 对谐波分量 ω_k 内的频点构成维数为 $k \times N$ 的谐波信号 $X_{id}(\omega_k)$, 其有效带宽为 $1.4f_0 \sim 2.6f_0$, k 为有效带宽内的频点数;

[0026] 3) 基于该频点数 k , 构造 k 阶的主对角线元素为 1、其余为 0 的压缩随机抽取矩阵 T , 抽取比例为 $30\% \sim 40\%$;

[0027] 4) 对 $X_{id}(\omega_k)$ 按行进行随机抽取: $\hat{X}_{id}(\omega_k) = T \times X_{id}(\omega_k)$, 抽取比例为 $30\% \sim 40\%$, 得到压缩采样后的造影谐波频域信号 $\hat{X}_{id}(\omega_k)$ 。

[0028] 四、本发明所采用的技术方案步骤四, 具体步骤如下:

[0029] 1) 通过构造所选频点 $\hat{X}_{id}(\omega_k)$ 的稳健自相关矩阵, 计算该频点所对应的最小方差自适应波束合成的最优加权系数 $w_{id}(\omega_k)$;

[0030] 2) 对于 $\hat{X}_{id}(\omega_k)$ 中的频点, 把有效阵元数为 N 的阵列分为 $L \times k$ 、总数为 $N-L+1$ 的子阵 $\hat{X}_{id}^l(\omega_k)$;

[0031] 3) 将所有子阵 $\hat{X}_{id}^l(\omega_k)$ 与其对应的最优加权系数 $w_{id}(\omega_k)$ 依次点乘求和并平均, 得到该频点的最优波束合成的频域输出 $\hat{y}_{id}(\omega_k)$;

$$[0032] \quad \hat{y}_{id}(\omega_k) = \frac{1}{N-L+1} \sum_{l=1}^{N-L+1} w_{id}(\omega_k) \hat{X}_{id}^l(\omega_k) \quad (1)$$

[0033] 其中, $\hat{X}_{id}^l(\omega_k)$ 为 $\hat{X}_{id}(\omega_k)$ 的第 l 个子阵。

[0034] 五、本发明所采用的技术方案中, 基于最小方差自适应波束合成的最优加权系数 $w_{id}(\omega_k)$ 的计算方法, 具体步骤如下:

[0035] 1) 基于互相关原理, 构造所选频点 $\hat{X}_{id}(\omega_k)$ 的稳健自相关矩阵 $\tilde{R}_{id}(\omega_k)$:

$$[0036] \quad \tilde{R}_{id}(\omega_k) = R_{id}(\omega_k) - A A^H R_{id}(\omega_k) A A^H / (A^H A)^2 \quad (2)$$

[0037] 其中, $[\]^H$ 表示矩阵的共轭转置, $R_{id}(\omega_k)$ 为 $\hat{X}_{id}^l(\omega_k)$ 的自相关矩阵:

$$[0038] \quad R_{id}(\omega_k) = \frac{1}{N-L+1} \sum_{l=1}^{N-L+1} \hat{X}_{id}^l(\omega_k) \hat{X}_{id}^{lH}(\omega_k) \quad (3)$$

[0039] 其中, A 为长度为 L 的 1 维单位向量; $A A^H R_{id}(\omega_k) / (A^H A)^2$ 为造影回波所选频点

$\hat{X}_{id}(\omega_k)$ 的主信号能量项；

[0040] 2) 利用自相关矩阵 $\tilde{R}_{id}(\omega_k)$ 和单位向量 A 计算最优加权系数 $w_{id}(\omega_k)$ ：

$$[0041] \quad w_{id}(\omega_k) = \tilde{R}_{id}^{-1}(\omega_k) A / A^H \tilde{R}_{id}^{-1}(\omega_k) A \quad (4)$$

[0042] 其中， $[\]^{-1}$ 表示矩阵的逆，为避免 $\tilde{R}_{id}^{-1}(\omega_k)$ 求逆运算出现不稳定性，将 $\tilde{R}_{id}(\omega_k)$ 奇异值分解出现的负特征值替换为分解所得的最小正值特征解；同时，从 $R_{id}(\omega_k)$ 中减掉 $\hat{X}_{id}(\omega_k)$ 的主信号能量项，以增强 $\tilde{R}_{id}(\omega_k)$ 的稳健性。

[0043] 六、本发明所采用的技术方案步骤五，具体步骤如下：

[0044] 1) 重复步骤四，计算第 i 条待合成扫描线上所有抽取频点的最优波束合成的频域信号输出 $\hat{y}_i(\omega_k)$ ；

[0045] 2) 构建 $k \times k$ 的傅里叶基 F 作为稀疏基，利用下式：

$$[0046] \quad \hat{y}_i^H(\omega_k) = T F b_i^H(\omega_k) \quad (5)$$

[0047] 因抽取矩阵 T 与傅里叶基 F 相乘矩阵不满秩，故采用 RM-FOCUSS 算法和构建的抽取矩阵 T 与傅里叶基 F ，从阵元矩阵 $\hat{y}_i(\omega_k)$ 中估计出稀疏投影系数向量 $b_i(\omega_k)$ ；

[0048] 3) 由 $y_i(\omega_k) = F b_i(\omega_k)$ 计算阵元输出所有有效带宽内的最优波束合成的频域信号输出 $y_i(\omega_k)$ ；

[0049] 4) 对 $y_i(\omega_k)$ 中造影谐波有效带宽外的频点替换为 0 点，得到第 i 条扫描线上整个频域的最优波束合成的频域信号输出 $y_i(\omega)$ 。

[0050] 七、本发明所采用的技术方案步骤六，具体步骤如下：

[0051] 1) 按扫描线波束合成次序，得到所有扫描线在整个频域的最优波束合成的频域信号输出 $Y(\omega)$ ， $Y(\omega) = [y_1(\omega) \ y_2(\omega) \ \cdots \ y_{line}(\omega)]^T$ ，其中， $line$ 为波束合成扫描线数，其取值一般为 $128 \sim 256$ ；

[0052] 2) 将 0° 相与 180° 相的射频回波信号脉冲逆转加和后并 $2f_0$ 谐波滤波后的最优波束合成的频域信号 $Y(\omega)$ 进行逆傅里叶变换，得到整个成像区域射频信号 $Y(t)$ ；

[0053] 3) 对造影信号 $Y(t)$ 进行包络检波、对数压缩、坐标变换等图像后处理得到高质量的平面波造影图像。

[0054] 本发明的有益效果体现在：

[0055] 本发明采用压缩感知自适应波束合成 (CSBF) 算法，其各阵元接收数据的有用频点信息都集中在造影回波信号的谐波分量的有效带宽内，因而对这部分有效带宽内的数据进行压缩感知处理，而非对整个频域进行压缩感知处理，从而在频域自适应波束合成的基础上，进一步降低频域采样点数，在保证图像分辨率不降低的前提下，极大地减少波束合成时所需的计算量。同时，联合脉冲逆转谐波 (PIH) 造影成像方式，超声阵列换能器交替发射一对相位相反的平面波，在有效抑制组织线性回波、高灵敏地检测微泡非线性谐波分量、大幅度改善图像 CTR 的同时，使得快速合成一幅平面波造影图像只需 2 次平面波发射，避免了微泡多次辐射造成的破坏，准确地捕捉了微泡的瞬态分布。

[0056] 本发明的优点如下：

[0057] 1、通过在频域仅对微泡谐波分量进行压缩随机采样,大幅度减少波束合成所需计算量,由此,可使平面波造影实时成像成为可能。

[0058] 2、通过压缩感知理论对自适应波束合成算法性能的优化,完美重建平面波造影回波的时域数据,可得到高横向分辨率的造影图像。

[0059] 3、联合对数字超声影像平台来说实现较为简单的 PIH 影成像方法,进一步提高平面波造影图像的 CTR。

[0060] 4、发射 2 次平面波便可获得一幅高 CTR 与分辨率平面波造影图像,避免了平面波多次发射造成的微泡破坏及运动伪迹的干扰,准确扑捉微泡的瞬态分布。

附图说明

[0061] 图 1 是本发明的算法流程图。

[0062] 图 2 是基于压缩感知自适应波束合成的脉冲逆转谐波 (PIH-CSBF) 狭窄血管流动仿体平面波造影图像,从左至右分别为第 100 帧、3900 帧、4000 帧平面波造影图像。

[0063] 图 3 是第 7000 帧在不同波束合成方法下的 PIH 狭窄血管流动仿体平面波造影图像,(a) 为 DAS 波束合成方法所得图像;(b) 为传统自适应波束合成 (Regular) 方法所得图像;(c) 为压缩感知自适应波束合成 (CSBF) 方法所得图像。

[0064] 图 4 是第 7000 帧不同波束合成方法下的 PIH 狭窄血管流动仿体平面波造影图像横向 (a) 与纵向 (b) 分辨率的对比结果。

[0065] 图 5 是第 7000 帧不同波束合成方法下的 PIH 狭窄血管流动仿体平面波造影图像的 CTR 与运行时间的比较;(a) DAS 所得结果,(b) 传统自适应波束合成 (Regular) 方法所得结果,(c) CSBF 所得结果。

具体实施方式

[0066] 下面结合附图和实施例(一狭窄血管流动仿体平面波造影成像实例)对本发明作进一步说明。

[0067] 本发明提出一种基于压缩感知自适应波束合成的脉冲逆转谐波 (PIH-CSBF) 平面波快速造影成像方法,以克服现有技术在高帧率、超快速成像,尤其是以瞬态信息为特征的造影成像研究中所存在的问题和局限性。

[0068] 1) 超声阵列换能器按脉冲逆转模式交替发射一对中心频率为 f_0 的相位相反的平面波,而计算机采集超声线阵换能器接收 0° 相与 180° 相射频回波信号,仅用 2 次平面波发射得到一副平面波造影图像,以减少对微泡的辐照,减低微泡的破坏率,同时最大程度避免运动等杂波信号的干扰,准确扑捉微泡的瞬态分布。

[0069] 2) 将 0° 相与 180° 相射频信号加和处理,并从时域信号转换为频域信号,按其频域信息分布,选取频域上造影微泡谐波分量有效带宽内的频点,并按比率的压缩随机采样(抽取);这个过程,通过谐波滤波、压缩采样,大幅度剔除冗余数据、减少自适应波束合成计算量(减少 50%~70%),为平面波造影快速成像奠定数据样本基础。

[0070] 3) 对所抽取的频点构造稳健自相关矩阵,并计算该频点所对应的最小方差自适应波束合成的最优加权系数,从而得到该频点的最优输出;此过程中,考虑阵元信号的差异性,通过压缩感知方法提高自适应波束合成方法性能,在提高运算速度的同时获得高质量

的 CSBF 频域数据。

[0071] 4) 按照步骤 2) ~ 3) 遍历第一条扫描线上所有抽取的频点,并由压缩感知理论重建谐波分量的该相位频域信息,然后通过填 0 重建整个频域信息;将第一条扫描线上整个频域信息变换到时域射频信号。

[0072] 5) 按扫描线波束合成次序,重复上述 2) ~ 4) 步骤,得到所有扫描线相应谐波滤波后的 CSBF 射频数据,并进行包络检波、对数压缩、坐标变换等射频后处理得到平面波造影图像。

[0073] 参照图 1 所示流程图,所述平面波快速造影成像方法,具体步骤如下:

[0074] (1) 超声阵列换能器按脉冲逆转模式交替发射中心频率为 f_0 的一对相位相反的平面波,其相位分别为 0° 相与 180° 相,探头工作频率 f_0 范围: $2.0\text{MHz} \sim 5.0\text{MHz}$;

[0075] (2) 计算机采集超声阵列换能器阵元的 0° 相与 180° 相射频回波信号 $X_0(t)$ 与 $X_{180}(t)$;

[0076] (3) 将 0° 相与 180° 相的射频回波信号 $X_0(t)$ 与 $X_{180}(t)$ 在整个时域加和运算得到射频回波信号 $X(t)$;

[0077] $X(t) = X_0(t) + X_{180}(t)$ (1)

[0078] (4) 对造影回波数据 $X(t)$, 计算第 i 条 ($1 \leq i \leq 128 \sim 256$) 待合成扫描线上目标点并根据目标点与中心阵元垂直距离计算波束合成的有效阵元数 (即有效孔径) 大小, 记为 N ;

[0079] (5) 根据第 i 条待合成扫描线上第 d 个目标点与 N 个阵元相对位置, 对 N 个阵元通道接收信号计算每一个通道的信号延时时间 τ_{id} ;

[0080] $\tau_{id} = [\tau_1 \ \tau_2 \ \cdots \ \tau_N]^T$ (2)

[0081] 其中, $\tau_j = \frac{D_j - D_c}{c}$ 为第 j 个阵元的延时时间, D_j 为第 j 个阵元到目标点距离, D_c 为为目标点中心阵元到目标点距离, c 为组织中声速;

[0082] (6) 根据第 d 个待合成目标点与 N 个阵元相对位置, 对 N 个阵元对应射频回波信号 $X(t)$ 按 τ_{id} 依次延时, 得到延时后列向量信号 $X_{id}(t) = X(t - \tau_{id})$;

[0083] $X_{id}(t) = [x_1(t) \ x_2(t) \ \cdots \ x_N(t)]^T$ (3)

[0084] (7) 对 $X_{id}(t)$ 进行傅里叶变换, 得到 $X_{id}(\omega)$;

[0085] $X_{id}(\omega) = [x_1(\omega) \ x_2(\omega) \ \cdots \ x_N(\omega)]^T$ (4)

[0086] (8) 根据超声发射频率 f_0 , 选取 $2f_0$ 有效带宽 ω_k ($1.4f_0 \sim 2.6f_0$ 有效频带) 的频点构成维数为 $k \times N$ 的信号 $X_{id}(\omega_k)$, k 为有效带宽内频点数;

[0087] (9) 在有效带宽 ω_k 内, 构造维数为 $k \times k$ 、主对角线元素为 1、其余为 0 的抽取矩阵 T ;

[0088] (10) 对谐波滤波后的频域信号 $X_{id}(\omega_k)$ 按行进行随机抽取: $\hat{X}_{id}(\omega_k) = T \times X_{id}(\omega_k)$, 抽取比例为 $30\% \sim 40\%$;

[0089] (11) 对于抽取的频点 $\hat{X}_{id}(\omega_k)$, 把有效阵元数为 N 的阵列分为长度为 L 的子阵, 子阵的总数为 $N-L+1$, 采用空间平滑技术计算 $\hat{X}_{id}(\omega_k)$ 的空间平滑相关矩阵 $R_{id}(\omega_k)$;

[0090]
$$\mathbf{R}_{id}(\omega_k) = \frac{1}{N-L+1} \sum_{l=1}^{N-L+1} \hat{\mathbf{X}}_{id}^l(\omega_k) \hat{\mathbf{X}}_{id}^{l*}(\omega_k)^H \quad (5)$$

[0091] 其中, $\hat{\mathbf{X}}_{id}^l(\omega_k)$ 为 $\hat{\mathbf{X}}_{id}(\omega_k)$ 的第 l 个子阵;

[0092] (12) 基于互相关原理, 构造所选频点 $\hat{\mathbf{X}}_{id}^l(\omega_k)$ 的稳健自相关矩阵 $\tilde{\mathbf{R}}_{id}(\omega_k)$:

[0093]
$$\tilde{\mathbf{R}}_{id}(\omega_k) = \mathbf{R}_{id}(\omega_k) - \mathbf{A} \mathbf{A}^H \mathbf{R}_{id}(\omega_k) \mathbf{A} \mathbf{A}^H / (\mathbf{A}^H \mathbf{A})^2 \quad (6)$$

[0094] 其中, $[\cdot]^H$ 表示矩阵的共轭转置, $\mathbf{A}$ 为长度为 L 的 1 维单位向量; $\mathbf{A} \mathbf{A}^H \mathbf{R}_{id}(\omega_k) / (\mathbf{A}^H \mathbf{A})^2$ 为造影回波所选频点 $\hat{\mathbf{X}}_{id}(\omega_k)$ 的主信号能量项;

[0095] (13) 利用自相关矩阵 $\tilde{\mathbf{R}}_{id}(\omega_k)$ 和单位向量 $\mathbf{A}$ 计算最优加权系数:

[0096]
$$\mathbf{w}_{id}(\omega_k) = \tilde{\mathbf{R}}_{id}^{-1}(\omega_k) \mathbf{A} / \mathbf{A}^H \tilde{\mathbf{R}}_{id}^{-1}(\omega_k) \mathbf{A} \quad (7)$$

[0097] 其中, $[\cdot]^{-1}$ 表示矩阵的逆, 为避免 $\tilde{\mathbf{R}}_{id}^{-1}(\omega_k)$ 求逆运算出现不稳定性, 将 $\tilde{\mathbf{R}}_{id}(\omega_k)$ 奇异值分解出现的负特征值替换为分解所得的最小正值特征解; 同时, 从 $\mathbf{R}_{id}(\omega_k)$ 中减掉 $\hat{\mathbf{X}}_{id}(\omega_k)$ 的主信号能量项, 以增强 $\tilde{\mathbf{R}}_{id}(\omega_k)$ 的稳健性。

[0098] (14) 通过下式计算该频点的最优波束合成的频域输出 $\hat{\mathbf{y}}_{id}(\omega_k)$:

[0099]
$$\hat{\mathbf{y}}_{id}(\omega_k) = \frac{1}{N-L+1} \sum_{l=1}^{N-L+1} \mathbf{w}_{id}(\omega_k) \hat{\mathbf{X}}_{id}^l(\omega_k) \quad (8)$$

[0100] (15) 重复步骤 (11) 至步骤 (14), 计算第 i 条扫描线上所有抽取频点的最优波束合成频域输出 $\hat{\mathbf{y}}_i(\omega_k)$,

[0101] (16) 构建 $k \times k$ 的傅里叶基 $\mathbf{F}$ 作为稀疏基, 利用下式:

[0102]
$$\hat{\mathbf{y}}_i^H(\omega_k) = \mathbf{T} \mathbf{F} \mathbf{b}_i^H(\omega_k) \quad (9)$$

[0103] 因抽取矩阵 $\mathbf{T}$ 与傅里叶基 $\mathbf{F}$ 相乘矩阵不满秩, 故采用 RM-FOCUSS 算法从阵元矩阵 $\hat{\mathbf{y}}_i(\omega_k)$ 中估计出稀疏投影系数向量 $\mathbf{b}_i(\omega_k)$;

[0104] (17) 由 $\mathbf{y}_i(\omega_k) = \mathbf{F} \mathbf{b}_i(\omega_k)$ 计算阵元输出所有有效带宽内的最优波束合成的频域信号输出 $\mathbf{y}_i(\omega_k)$;

[0105] (18) 对有效带宽外频点以 0 填充, 得到第 i 条扫描线上整个频域的最优波束合成频域输出 $\mathbf{y}_i(\omega)$;

[0106] (19) 按扫描线波束合成次序, 重复步骤 (4) 至步骤 (18), 得到所有扫描线在整个频域的最优波束合成的频域信号输出 $\mathbf{Y}(\omega)$, $\mathbf{Y}(\omega) = [\mathbf{y}_1(\omega) \ \mathbf{y}_2(\omega) \ \cdots \ \mathbf{y}_{line}(\omega)]^T$, 其中, $line$ 为波束合成扫描线数, 其取值一般为 $128 \sim 256$;

[0107] (20) 对 $\mathbf{Y}(\omega)$ 进行逆傅里叶变换, 得到整个造影微泡成像区域的射频信号 $\mathbf{Y}(t)$;

[0108] (21) 对造影信号 $\mathbf{Y}(t)$ 进行包络检波、对数压缩、坐标变换等图像后处理得到高质量的平面波造影图像。

[0109] 实施平台为 Sonix-Touch, 选用 128 阵元线阵换能器为成像探头, 按脉冲逆转模

式,发射中心频率为 3MHz 的平面波,其负峰值声压约为 178kPa,并在外触发源的控制下,按触发频率 200Hz 工作。参见图 2,实施对象一狭窄血管流动仿体,其正常直径为 5mm,按 0.2mL 的剂量对浓度为 2.0×10^8 MB/mL 团注。阵元数据被 Sonix-DAQ 采集约 40s 的数据。

[0110] 图 3 结果显示,CSBF 与 Regular 方法所得 PIH 平面波造影图像质量相当。

[0111] 图 4 结果显示,相比 DAS 与 Regular 方法,CSBF 在横向与轴向分辨率均取得最佳结果。

[0112] 图 5 结果显示,相比基于 DAS 的 PIH 成像方法 (PIH-DAS) 与基于 Regular 的 PIH 成像方法 (PIH-Regular),PIH-CSBF 所得造影图像的 CTR 最高可提高约 2dB。而在取得与 PIH-Regular 相当图像质量 (CTR) 的同时,其分辨率更好,且运算时间仅为 PIH-Regular 的 22.5%。同时,在前期实验中,PIH-CSBF 相比基于 DAS 波束合成的 B 模式成像方法,CTR 大幅度提高。

[0113] 本发明通过压缩感知自适应波束合成方法 (CSBF) 大幅度剔除冗余数据,减少波束合成计算量,并实现快速自适应波束合成;同时,联合脉冲逆转谐波 (PIH) 造影成像技术,使得微泡非线性谐波分量更为灵敏地检测出来,得到高 CTR 与分辨率的造影图像,也使得波束合成数据仅为压缩采样的阵元接收的造影回波的谐波频带,再一次减少波束合成数据量。其中,方法基于近年兴起的稀疏采样理论,在远低于奈奎斯特采样率的情况下,通过非线性重建算法高概率的完美重建信号,可有效改善波束合成算法的计算性能;其压缩采样比例仅为有效频带内的回波信号的 30%~40%,并通过最优稀疏基与阵元加权系数计算,快速频域加和、时域重建造影回波信号。因此,本发明一种基于压缩感知自适应波束合成的脉冲逆转谐波 (PIH-CSBF) 平面波快速造影成像方法的提出,使得高 CTR 与分辨率的平面波造影成像的实时实现成为可能。

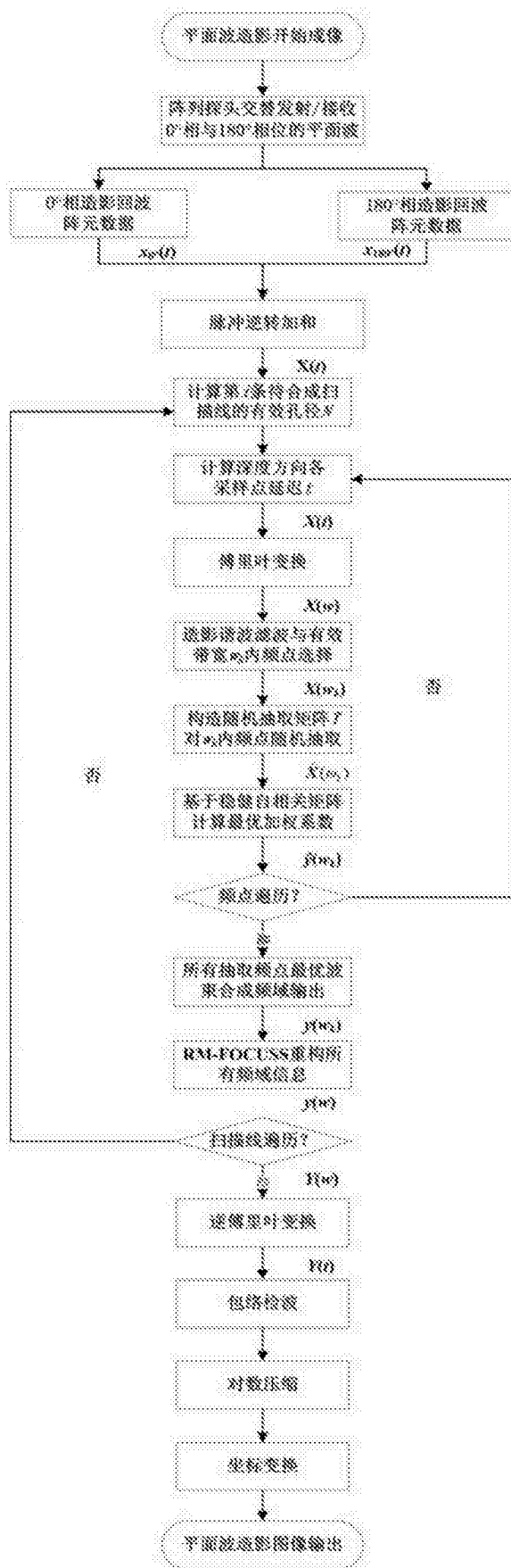


图 1

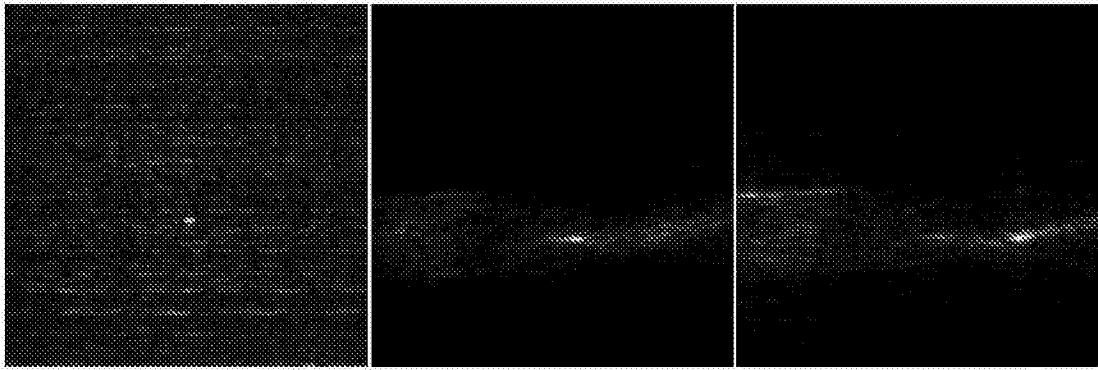


图 2

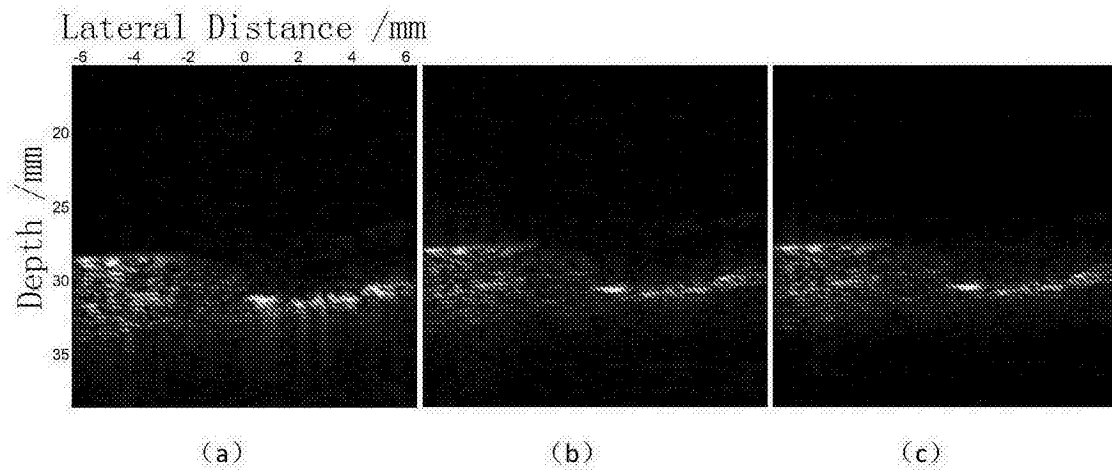


图 3

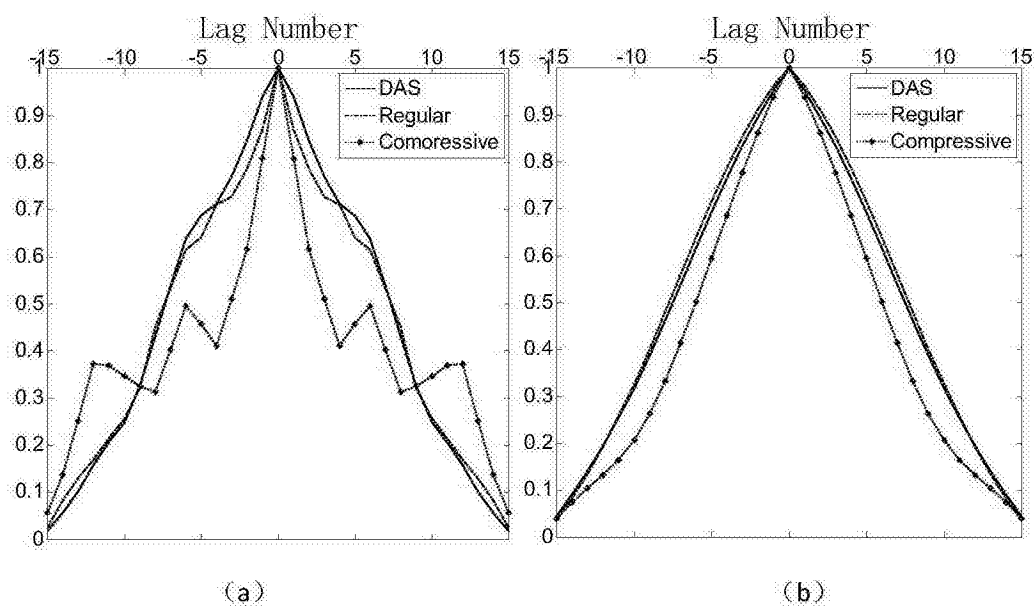


图 4

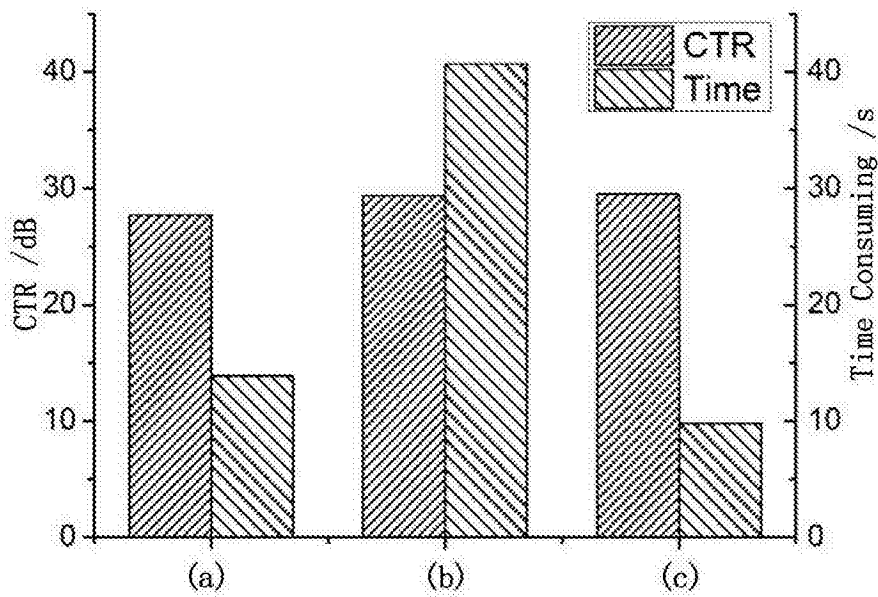


图 5

专利名称(译)	基于压缩感知自适应波束合成的脉冲逆转谐波平面波快速造影成像方法		
公开(公告)号	CN105266847A	公开(公告)日	2016-01-27
申请号	CN201510567122.3	申请日	2015-09-08
[标]申请(专利权)人(译)	西安交通大学		
申请(专利权)人(译)	西安交通大学		
当前申请(专利权)人(译)	西安交通大学		
[标]发明人	万明习 王弟亚 柏晨 钟徽		
发明人	万明习 王弟亚 柏晨 钟徽		
IPC分类号	A61B8/00 G01S15/89		
代理人(译)	徐文权		
其他公开文献	CN105266847B		
外部链接	Espacenet SIPO		

摘要(译)

本发明提供了一种基于压缩感知自适应波束合成的脉冲逆转谐波平面波快速造影成像方法，使得高分辨率、造影组织比的平面波造影图像实时成像成为可能。本方法仅对超声阵列探头阵元接收到的造影回波的2阶谐波分量，进行压缩随机采样处理，大幅度剔除冗余数据，减少波束合成运算量；进一步采用压缩感知理论对自适应波束合成算法性能优化，在保证图像分辨率不降低的前提下，实现快速波束合成运算；联合脉冲逆转谐波造影成像方式，换能器交替发射一对相位相反的平面波，高灵敏地检测微泡的非线性谐波分量、大幅度改善图像造影组织比的同时，使得快速合成一幅平面波造影图像只需2次平面波发射，避免了微泡多次辐射造成的破坏，准确地扑捉微泡的瞬态分布。

