(19)中华人民共和国国家知识产权局

(12)发明专利申请

(10)申请公布号 CN 111134719 A
(43)申请公布日 2020.05.12

(21)申请号 201911319128.3

(22)申请日 2019.12.19

(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 路舒宽

(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 范巍

(51)Int.Cl.
A61B 8/00(2006.01)

权利要求书3页 说明书14页 附图7页

(54)发明名称

一种聚焦超声辐照相变纳米液滴的主被动超声复合成像方法及系统

(57)摘要

本发明提供了一种聚焦超声辐照相变纳米液滴的主被动超声复合成像方法及系统，对被动超声原始射频信号进行延时补偿处理后，分别通过两个互补的方波变迹函数和幅度相干系数得到互相关系数矩阵和被动幅度相干波束合成能量矩阵，二者点乘后得到高分辨被动超声成像结果；通过相变微泡群振动模型构造相变微泡群母小波，利用该母小波对主动超声原始射频信号延时叠加后所得的主动波束合成射频信号进行连续小波变换得到高对比主动超声成像结果；对高分辨被动与高对比主动超声成像结果复合之后得到复合图像。本发明能对聚焦超声辐照相变纳米液滴过程中的空化活动及辐照停止时的残留相变微泡进行全过程监控。

CN 111134719 A

1.一种聚焦超声辐照相变纳米液滴的主被动超声复合成像方法，其特征在于：包括以下步骤：

1)通过控制聚焦超声辐照和原始射频信号采集的时序，分别获得被动超声原始射频信号和主动超声原始射频信号，其中，被动超声原始射频信号是指聚焦超声辐照相变纳米液滴的过程中线阵换能器(5)被动接收的由空化活动所产生的声辐射信号，主动超声原始射频信号是指聚焦超声辐照停止间隙内线阵换能器(5)在发射超声波后接收到的残留相变微泡的回波信号；

2)针对被动超声成像区域内任意一目标点，对步骤1)所得的被动超声原始射频信号进行延时和补偿处理，得到每个阵元的延时补偿信号，通过两个互补的方波变迹函数对每个阵元的延时补偿信号进行阵元变迹处理并分别将两个方波变迹函数处理的结果进行叠加，得到两个半孔径波束合成信号，计算两个半孔径波束合成信号的归一化互相关系数并作阈值化处理，得到对应目标点的互相关系数；由被动超声成像区域内各目标点的互相关系数构成互相关系数矩阵；

3)针对所述被动超声成像区域内任意一目标点，利用步骤2)所得的在对应目标点下每个阵元的延时补偿信号计算全孔径波束合成信号以及所有阵元延时补偿信号的平方和，然后通过计算幅度相干系数得到全孔径幅度相干波束合成信号，对该信号的平方进行积分，得到对应目标点的能量输出值；由被动超声成像区域内各目标点的能量输出值构成被动幅度相干波束合成能量矩阵，将该矩阵与步骤2)所得的互相关系数矩阵进行点乘运算之后做对数压缩，得到被动超声成像结果；

4)根据聚焦超声辐照所导致的相变微泡内的饱和蒸汽压升高程度对Keller-Miksis模型进行修正，并基于微泡之间的相互作用建立相变微泡群振动模型，利用四阶龙格库塔算法求解该模型得到每个相变微泡振动半径的时变曲线并计算每个相变微泡的散射回波，将所有相变微泡的散射回波叠加并通过带通滤波和归一化处理构造得到相变微泡群母小波；

5)对步骤1)所得的主动超声原始射频信号中与主动超声成像区域内各目标点对应的有效孔径中的阵元接收信号进行延时处理，得到延时信号，对延时信号进行窗函数加权叠加，得到主动波束合成射频信号；利用步骤4)所得的相变微泡群母小波对主动波束合成射频信号按照不同的小波变换尺度参数进行连续小波变换，对所得小波相关性系数矩阵进行希尔伯特包络检波后计算小波相关性系数包络检波矩阵的对比度，然后对所述对比度最高时对应的小波相关性系数包络检波矩阵进行对数压缩，得到主动超声成像结果；

6)对步骤3)所得的被动超声成像结果与步骤5)所得的主动超声成像结果分别进行插值、标准化和RGB转换处理，然后对被动超声RGB图像做透明化处理并叠加到主动超声RGB图像上，得到被动与主动超声复合图像。

2.根据权利要求1所述一种聚焦超声辐照相变纳米液滴的主被动超声复合成像方法，其特征在于：所述线阵换能器发射的超声波为平面波。

3.根据权利要求1所述一种聚焦超声辐照相变纳米液滴的主被动超声复合成像方法，其特征在于：所述原始射频信号采集的时序为：自聚焦超声辐照相变纳米液滴的触发时刻开始，经过延时T_1后，触发工作在不发射只接收模式的开放式超声成像平台(3)采集被动超声原始射频信号；自聚焦超声辐照相变纳米液滴的触发时刻开始，经过延时T_2后，触发工作在既发射又接收模式的开放式超声成像平台(3)采集主动超声原始射频信号。

4.根据权利要求1所述一种聚焦超声辐照相变纳米液滴的主被动超声复合成像方法，其特征在于：所述两个互补的方波变迹函数分别表示为：

$$Apod_i^1=\begin{cases}1,\ i=(j-1)A+1\sim jA,\ j=1,3,\ldots,N/A-1\\0,\ i=(j-1)A+1\sim jA,\ j=2,4,\ldots,N/A\end{cases}$$

$$Apod_i^2=\begin{cases}0,\ i=(j-1)A+1\sim jA,\ j=1,3,\ldots,N/A-1\\1,\ i=(j-1)A+1\sim jA,\ j=2,4,\ldots,N/A\end{cases}$$

其中，A＝2,4,8,...,N/4，N为线阵换能器的阵元数目；

所述变迹处理是指将方波变迹函数与被动超声成像区域内某一目标点下线阵换能器各阵元的延时补偿信号相乘；

所述归一化互相关系数的计算公式表示为：

$$NCC(x,z)=\frac{Cov\left[RX_1(x,z,t),RX_2(x,z,t)\right]}{\sqrt{Av\left[RX_1(x,z,t)\right]}\sqrt{Av\left[RX_2(x,z,t)\right]}}$$

其中，Cov[•]表示求两个信号的协方差，Av[•]表示求信号的方差，RX_1(x,z,t)和RX_2(x,z,t)分别为被动超声成像区域内某一目标点(x,z)处的两个半孔径波束合成信号；

所述阈值化处理中阈值参数的取值范围为10^{-6}～10^{-3}。

5.根据权利要求1所述一种聚焦超声辐照相变纳米液滴的主被动超声复合成像方法，其特征在于：所述幅度相干系数的计算公式表示为：

$$ACF(x,z,t)=\frac{\left[S(x,z,t)\right]^2}{N\cdot SQS(x,z,t)}$$

其中，S(x,z,t)为被动超声成像区域内某一目标点(x,z)处将每个阵元的延时补偿信号叠加得到的全孔径波束合成信号，SQS(x,z,t)为被动超声成像区域内某一目标点(x,z)处所有阵元延时补偿信号的平方和，N为线阵换能器的阵元数目。

6.根据权利要求1所述一种聚焦超声辐照相变纳米液滴的主被动超声复合成像方法，其特征在于：所述相变微泡群振动模型表示为：

$$\left(1-\frac{\dot{R}_i}{c}\right)R_i\ddot{R}_i+\frac{3}{2}\left(1-\frac{\dot{R}_i}{3c}\right)\dot{R}_i^2+\sum_{j=1,j\neq i}^{B}\frac{2R_i\dot{R}_i^2+R_i^2\ddot{R}_i}{D_{ij}}=\left(1+\frac{\dot{R}_i}{c}\right)\frac{P_{s_i}}{\rho}+\frac{R_i}{\rho c}\frac{d}{dt}\left(P_{s_i}-P_\infty\right)$$

$$P_{s_i}=\left(P_\infty-P_v+\frac{2\sigma}{R_{i0}}\right)\left(\frac{R_{i0}}{R_i}\right)^{3\gamma}+P_v-\frac{2\sigma}{R_i}-\frac{4\mu\dot{R}_i}{R_i}+P_A$$

其中，i＝1,2,...,B，R_i为第i个相变微泡的振动半径，$\dot{R}_i$为第i个相变微泡振动的径向速度，$\ddot{R}_i$为第i个相变微泡振动的径向加速度，c为声传播速度，ρ为液体密度，B为相变微泡的数目，D_{ij}为第i个和第j个相变微泡之间的间距，P_{s_i}为第i个相变微泡的壁压力；P_∞为液体静压力，P_v为相变微泡内气体的饱和蒸汽压，σ为液体表面张力系数，R_{i0}为第i个相变微泡的初始振动半径，γ为多方指数，μ为粘滞系数，P_A为激励波形。

7.根据权利要求1所述一种聚焦超声辐照相变纳米液滴的主被动超声复合成像方法，

其特征在于：所述带通滤波的滤波带宽与线阵换能器(5)的接收带宽一致。

8.一种聚焦超声辐照相变纳米液滴的被动超声成像方法，其特征在于：包括以下步骤：

1)通过控制聚焦超声辐照和原始射频信号采集的时序，获得被动超声原始射频信号，被动超声原始射频信号是指聚焦超声辐照相变纳米液滴的过程中线阵换能器(5)被动接收的由空化活动所产生的声辐射信号；

2)针对被动超声成像区域内任意一目标点，对步骤1)所得的被动超声原始射频信号进行延时和补偿处理，得到每个阵元的延时补偿信号，通过两个互补的方波变迹函数对每个阵元的延时补偿信号进行阵元变迹处理并分别将两个方波变迹函数处理的结果进行叠加，得到两个半孔径波束合成信号，计算两个半孔径波束合成信号的归一化互相关系数并作阈值化处理，得到对应目标点的互相关系数；由被动超声成像区域内各目标点的互相关系数构成互相关系数矩阵；

3)针对所述被动超声成像区域内任意一目标点，利用步骤2)所得的在对应目标点下每个阵元的延时补偿信号计算全孔径波束合成信号以及所有阵元延时补偿信号的平方和，然后通过计算幅度相干系数得到全孔径幅度相干波束合成信号，对该信号的平方进行积分，得到对应目标点的能量输出值；由被动超声成像区域内各目标点的能量输出值构成被动幅度相干波束合成能量矩阵，将该矩阵与步骤2)所得的互相关系数矩阵进行点乘运算之后做对数压缩，得到被动超声成像结果。

9.一种聚焦超声辐照相变纳米液滴的主动超声成像方法，其特征在于：包括以下步骤：

1)通过控制聚焦超声辐照和原始射频信号采集的时序，获得主动超声原始射频信号，主动超声原始射频信号是指聚焦超声辐照停止间隙内线阵换能器(5)在发射超声波后接收到的残留相变微泡的回波信号；

2)根据聚焦超声辐照所导致的相变微泡内的饱和蒸汽压升高程度对Keller-Miksis模型进行修正，并基于微泡之间的相互作用建立相变微泡群振动模型，利用四阶龙格库塔算法求解该模型得到每个相变微泡振动半径的时变曲线并计算每个相变微泡的散射回波，将所有相变微泡的散射回波叠加并通过带通滤波和归一化处理构造得到相变微泡群母小波；

3)对步骤1)所得的主动超声原始射频信号中与主动超声成像区域内各目标点对应的有效孔径中的阵元接收信号进行延时处理，得到延时信号，对延时信号进行窗函数加权叠加，得到主动波束合成射频信号；利用步骤2)所得的相变微泡群母小波对主动波束合成射频信号按照不同的小波变换尺度参数进行连续小波变换，对所得小波相关性系数矩阵进行希尔伯特包络检波后计算小波相关性系数包络检波矩阵的对比度，然后对所述对比度最高时对应的小波相关性系数包络检波矩阵进行对数压缩，得到主动超声成像结果。

10.一种聚焦超声辐照相变纳米液滴的主被动超声复合成像系统，其特征在于：该复合成像系统包括聚焦超声辐照装置、被动与主动原始射频信号采集装置以及用于同步聚焦超声辐照和原始射频信号采集的时序控制装置；所述聚焦超声辐照装置包括聚焦超声换能器以及与该聚焦超声换能器相连的脉冲发射/接收器；所述被动与主动原始射频信号采集装置包括开放式超声成像平台(3)以及与该开放式超声成像平台(3)相连的线阵换能器(5)；所述开放式超声成像平台(3)及脉冲发射/接收器分别与所述时序控制装置相连；开放式超声成像平台(3)包括被动超声成像软件模块及主动超声成像软件模块。

一种聚焦超声辐照相变纳米液滴的主被动超声复合成像方法及系统

技术领域

[0001] 本发明属于超声检测与超声成像领域，具体涉及一种聚焦超声辐照相变纳米液滴的主被动超声复合成像方法及系统。

背景技术

[0002] 近年来，相变纳米液滴已被广泛地应用于超声治疗与诊断成像方面，相比超声造影剂，相变纳米液滴的尺寸足够小，可以通过扩散作用穿过肿瘤血管内皮细胞间隙从而达到肿瘤组织，然后结合体外聚焦超声辐照可实现超声靶向治疗肿瘤的目的；另外，相变纳米液滴具有很高的稳定性，能在血液循环中长时间存在。

[0003] 聚焦超声联合相变纳米液滴治疗的安全性依赖于监控成像技术的发展，即以低成本的超声成像技术实现对治疗过程进行动态的监控。聚焦超声联合相变纳米液滴治疗的主要物理机制是聚焦超声辐照相变纳米液滴过程中产生的空化活动。空化活动的产生与治疗效果直接相关，因此对于空化活动的实时监控至关重要。近年来发展的被动超声成像技术通过将超声成像换能器设置在只接收而不发射的模式，被动接收聚焦超声作用过程中产生的声辐射信号，然后通过图像重建算法得到空化图像，从而实现空化活动的实时监控。然而传统的被动超声成像方法由于算法本身限制、成像换能器接收带宽及孔径限制以及组织非均一性等，会形成较高的成像伪影，降低了成像的空间分辨性能，从而造成空化活动空间信息的不准确估计，因此不利于聚焦超声辐照相变纳米液滴过程中空化活动的监控。

[0004] 在聚焦超声停止辐照相变纳米液滴的间隙(根据占空比确定1个脉冲周期内的辐照时间和停止辐照时间)，残留的相变微泡对于空化的产生起着双重作用，一方面，相变微泡可对聚焦超声的传播形成遮挡，从而引起空化活动的改变；另一方面，相变微泡也可以作为空化核使得下一次聚焦超声辐照过程中的空化活动更容易发生。因此对于相变微泡的动态监控同样重要，相变微泡的空间分布可通过将超声成像换能器设置在既发射又接收的模式来实现，即采用主动超声成像技术来获得相变微泡的空间分布。目前最常用的B模式超声成像方法就是主动超声成像的一种，但由于多次线扫描导致成像帧率较低。基于平面波的主动超声成像方法可以在单次发射的情况下获得整幅超声图像，成像帧率得到有效提高，但由于平面波本身不聚焦且发射能量低，导致成像对比度较低，因此不利于聚焦超声辐照相变纳米液滴停止之后残留的相变微泡的高灵敏度检测。

[0005] 此外，使用被动超声成像只能对聚焦超声辐照相变纳米液滴过程中的空化活动进行监控，而不能得到相变微泡的空间分布，而使用主动超声成像技术则只能实现对聚焦超声辐照相变纳米液滴停止后相变微泡的监控。因此，单一的被动或主动超声成像不能实现聚焦超声辐照相变纳米液滴的全过程监控。鉴于此，亟待提出一种聚焦超声辐照相变纳米液滴的高分辨被动与高对比主动超声复合成像方法。

发明内容

[0006] 本发明的目的在于提供一种聚焦超声辐照相变纳米液滴的主被动超声复合成像方法及系统。

[0007] 为了实现上述目的，本发明采用了以下技术方案：

[0008] 一种聚焦超声辐照相变纳米液滴的高分辨被动与高对比主动超声复合成像方法，包括以下步骤：

[0009] 1)通过控制聚焦超声辐照和原始射频信号采集的时序，分别获得被动超声原始射频信号和主动超声原始射频信号，其中，被动超声原始射频信号是指聚焦超声辐照相变纳米液滴的过程中线阵换能器被动接收的由空化活动所产生的声辐射信号，主动超声原始射频信号是指聚焦超声辐照停止间隙内线阵换能器在发射超声波后接收到的残留相变微泡的回波信号；

[0010] 2)针对被动超声成像区域内任意一目标点，对步骤1)所得被动超声原始射频信号进行延时和补偿处理，得到每个阵元的延时补偿信号，通过两个互补的方波变迹函数对每个阵元的延时补偿信号进行阵元变迹处理并分别将两个方波变迹函数处理的结果进行叠加，得到两个半孔径波束合成信号，计算两个半孔径波束合成信号的归一化互相关系数并作阈值化处理，得到对应目标点的互相关系数；由被动超声成像区域内各目标点的互相关系数构成互相关系数矩阵；

[0011] 3)针对所述被动超声成像区域内任意一目标点，利用步骤2)所得的在对应目标点下每个阵元的延时补偿信号计算全孔径波束合成信号以及所有阵元延时补偿信号的平方和，然后通过计算幅度相干系数得到全孔径幅度相干波束合成信号，对该信号的平方进行积分，得到对应目标点的能量输出值；由被动超声成像区域内各目标点的能量输出值构成被动幅度相干波束合成能量矩阵，将该矩阵与步骤2)所得的互相关系数矩阵进行点乘运算之后进行对数压缩，得到高分辨被动超声成像结果；

[0012] 4)根据聚焦超声辐照所导致的相变微泡内的饱和蒸汽压升高程度对Keller-Miksis模型进行修正，并基于微泡之间的相互作用建立相变微泡群振动模型，利用四阶龙格库塔算法求解该模型得到每个相变微泡振动半径的时变曲线并计算每个相变微泡的散射回波，将所有相变微泡的散射回波叠加并通过带通滤波和归一化处理构造得到相变微泡群母小波；

[0013] 5)对步骤1)所得的主动超声原始射频信号中与主动超声成像区域内各目标点对应的有效孔径中的阵元接收信号进行延时处理，得到延时信号，对延时信号进行窗函数加权叠加，得到主动波束合成射频信号；利用步骤4)所得相变微泡群母小波对主动波束合成射频信号按照不同的小波变换尺度参数进行连续小波变换，对所得小波相关性系数矩阵进行希尔伯特包络检波后计算小波相关性系数包络检波矩阵的对比度，然后对所述对比度最高时对应的小波相关性系数包络检波矩阵进行对数压缩，得到高对比主动超声成像结果；

[0014] 6)对步骤3)所得的高分辨被动超声成像结果与步骤5)所得的高对比主动超声成像结果分别进行插值、标准化和RGB转换处理，然后对高分辨被动超声RGB图像做透明化处理并叠加到高对比主动超声RGB图像上，得到被动与主动超声复合图像。

[0015] 优选的，所述线阵换能器发射的超声波为平面波。

[0016] 优选的，所述原始射频信号采集的时序为：自聚焦超声辐照相变纳米液滴的触发

时刻开始，经过延时T_1后，触发工作在不发射只接收模式的开放式超声成像平台采集被动超声原始射频信号；自聚焦超声辐照相变纳米液滴的触发时刻开始，经过延时T_2后，触发工作在既发射又接收模式的开放式超声成像平台采集主动超声原始射频信号。

[0017] 优选的，所述两个互补的方波变迹函数分别表示为：

[0018] $$Apod_i^1=\begin{cases}1,\ i=(j-1)A+1\sim jA,\ j=1,3,\ldots,N/A-1\\0,\ i=(j-1)A+1\sim jA,\ j=2,4,\ldots,N/A\end{cases}$$

[0019] $$Apod_i^2=\begin{cases}0,\ i=(j-1)A+1\sim jA,\ j=1,3,\ldots,N/A-1\\1,\ i=(j-1)A+1\sim jA,\ j=2,4,\ldots,N/A\end{cases}$$

[0020] 其中，A选自2,4,8,...,N/4中的某一个数值，N为线阵换能器的阵元数目。

[0021] 优选的，所述变迹处理是指将方波变迹函数与被动超声成像区域内某一目标点下线阵换能器各阵元的延时补偿信号相乘。

[0022] 优选的，所述归一化互相关系数的计算公式表示为：

[0023] $$NCC(x,z)=\frac{Cov\left[RX_1(x,z,t),RX_2(x,z,t)\right]}{\sqrt{Av\left[RX_1(x,z,t)\right]}\sqrt{Av\left[RX_2(x,z,t)\right]}}$$

[0024] 其中，Cov[•]表示求两个信号的协方差，Av[•]表示求信号的方差，$RX_1(x,z,t)$和$RX_2(x,z,t)$分别为被动超声成像区域内某一目标点(x,z)处的两个半孔径波束合成信号。

[0025] 优选的，所述阈值化处理中阈值参数的取值范围为10^{-6}～10^{-3}。

[0026] 优选的，所述幅度相干系数的计算公式表示为：

[0027] $$ACF(x,z,t)=\frac{\left[S(x,z,t)\right]^2}{N\cdot SQS(x,z,t)}$$

[0028] 其中，S(x,z,t)为被动超声成像区域内某一目标点(x,z)处将每个阵元的延时补偿信号叠加得到的全孔径波束合成信号，SQS(x,z,t)为被动超声成像区域内某一目标点(x,z)处所有阵元延时补偿信号的平方和，N为线阵换能器的阵元数目。

[0029] 优选的，所述相变微泡群振动模型表示为：

[0030] $$\left(1-\frac{\dot{R}_i}{c}\right)R_i\ddot{R}_i+\frac{3}{2}\left(1-\frac{\dot{R}_i}{3c}\right)\dot{R}_i^2+\sum_{j=1,j\neq i}^{B}\frac{2R_i\dot{R}_i^2+R_i^2\ddot{R}_i}{D_{ij}}=\left(1+\frac{\dot{R}_i}{c}\right)\frac{P_{s_i}}{\rho}+\frac{R_i}{\rho c}\frac{d}{dt}\left(P_{s_i}-P_\infty\right)$$

[0031] $$P_{s_i}=\left(P_\infty-P_v+\frac{2\sigma}{R_{i0}}\right)\left(\frac{R_{i0}}{R_i}\right)^{3\gamma}+P_v-\frac{2\sigma}{R_i}-\frac{4\mu\dot{R}_i}{R_i}+P_A$$

[0032] 其中，i＝1,2,...,B，R_i为第i个相变微泡的振动半径，$\dot{R}_i$为第i个相变微泡振动的径向速度，$\ddot{R}_i$为第i个相变微泡振动的径向加速度，c为声传播速度，ρ为液体密度，B为相变微泡的数目，D_{ij}为第i个和第j个相变微泡之间的间距，P_{s_i}为第i个相变微泡的壁压力；P_∞为液体静压力，P_v为相变微泡内气体的饱和蒸汽压，σ为液体表面张力系数，R_{i0}为第i个相变微泡的初始振动半径，γ为多方指数，μ为粘滞系数，P_A为激励波形。

[0033] 优选的，所述带通滤波的滤波带宽与线阵换能器的接收带宽一致。

[0034] 优选的，所述连续小波变换具体包括以下步骤：

[0035] 利用相变微泡群母小波对主动波束合成射频信号中的各列信号分别进行连续小波变换，得到某一小波变换尺度参数下各列信号$V_i(t)$的小波相关性系数$C_i(a,b)$：

[0036] $$C_i(a,b)=\frac{1}{\sqrt{a}}\int_{-\infty}^{+\infty}V_i(t)\varphi^*\left(\frac{t-b}{a}\right)dt$$

[0037] 其中，i＝1,2,...,N，N为线阵换能器的阵元数目，$C_i(a,b)$为表征主动波束合成射频信号中的第i列信号$V_i(t)$和相变微泡群母小波$\varphi(t)$相关性的小波相关性系数，*表示复共轭，a和b分别为小波变换尺度参数和小波变换位移参数。

[0038] 一种聚焦超声辐照相变纳米液滴的高分辨被动与高对比主动超声复合成像系统，该复合成像系统包括聚焦超声辐照装置、被动与主动原始射频信号采集装置以及用于同步聚焦超声辐照和原始射频信号采集的时序控制装置；所述聚焦超声辐照装置包括单阵元(或多阵元)聚焦超声换能器以及与该聚焦超声换能器相连的高功率脉冲发射/接收器；所述被动与主动原始射频信号采集装置包括开放式超声成像平台以及与该开放式超声成像平台相连的线阵换能器；所述开放式超声成像平台及高功率脉冲发射/接收器分别与所述时序控制装置相连；开放式超声成像平台包括用于执行以上步骤2)和3)的高分辨被动超声成像软件模块、用于执行以上步骤4)和5)的高对比主动超声成像软件模块，及用于将高分辨被动超声成像软件模块与高对比主动超声成像模块输出的成像结果进行复合的软件(参照步骤6))模块。

[0039] 优选的，所述时序控制装置为可编程双通道任意波形发生器。

[0040] 优选的，所述复合成像系统中，可编程双通道任意波形发生器按时序触发高功率脉冲发射/接收器和开放式超声成像平台，通过高功率脉冲发射/接收器驱动单阵元(或多阵元)聚焦超声换能器对相变纳米液滴进行辐照，利用开放式超声成像平台的并行通道数据采集单元分别采集线阵换能器接收的聚焦超声辐照相变纳米液滴过程中空化活动产生的被动超声原始射频信号以及聚焦超声辐照相变纳米液滴停止时含有残留相变微泡的空间分布信息的主动超声原始射频信号。

[0041] 本发明的有益效果体现在：

[0042] 本发明针对单一超声成像模式无法对聚焦超声辐照相变纳米液滴的整个过程进行监控以及传统被动超声成像方法分辨率低且主动超声成像方法对比度低的缺陷，一方面通过构造方波变迹函数并计算归一化互相关系数得到互相关系数矩阵，将该矩阵与通过幅度相干系数所得到的被动幅度相干波束合成能量矩阵进行点乘运算，有效提高了被动超声成像的分辨率；另一方面，基于高饱和蒸汽压和微泡之间的相互作用建立相变微泡群振动模型，采用四阶龙格库塔算法求解该模型，在此基础上构造相变微泡群母小波，利用该母小波对主动波束合成射频信号做连续小波变换，从而有效提高了主动超声成像的对比度；本发明由此可通过将高分辨被动超声成像结果与高对比主动超声成像结果进行复合，实现对聚焦超声辐照相变纳米液滴过程中空化活动以及聚焦超声辐照相变纳米液滴停止时残留相变微泡的空间分布的时空全过程监控。

[0043] 进一步的，本发明利用线阵换能器发射平面波来检测聚焦超声停止辐照间隙内残

余的相变微泡，一方面可以提高成像帧频，另一方面由于平面波发射不聚焦使得发射能量较低，可减少对相变微泡的破坏。

[0044] 进一步的，本发明采用的原始射频信号采集的时序，可分别对聚焦超声辐照相变纳米液滴的过程中由空化活动所产生的声辐射信号以及在聚焦超声辐照停止间隙内残留相变微泡的回波信号进行采集，为聚焦超声辐照相变纳米液滴过程中的超声监控提供了时空全过程的原始射频数据。

[0045] 进一步的，本发明在计算被动幅度相干波束合成能量矩阵中引入的幅度相干系数，可有效降低旁瓣干扰所形成的成像伪影，提高被动超声成像的分辨性能。

[0046] 进一步的，本发明构造的两个互补的方波变迹函数及采用的变迹处理，可以在空化源位置处产生两个非常相似的半孔径波束合成信号而在空化源以外的其他位置处则产生两个相似程度低的半孔径波束合成信号；利用归一化互相关系数来定量化这种相似性，则可产生一个在空化源位置处互相关系数高而在其他位置互相关系数低的互相关系数矩阵，将该矩阵与被动幅度相干波束合成能量矩阵点乘之后，有助于进一步抑制干扰伪影。

[0047] 进一步的，本发明对归一化互相关系数的阈值化处理，一方面有助于抑制更多的干扰伪影，另一方面也有助于被动超声成像结果的对数显示。

[0048] 进一步的，本发明基于饱和蒸汽压修正的相变微泡群振动模型能够更好地描述多个相变微泡在超声平面波激励下的动力学变化，从而构造出与实际的相变微泡散射回波有着较强相关性的相变微泡群母小波。在连续小波变换中利用与实际相变微泡散射回波高度相关的母小波对主动波束合成射频信号进行处理，使得与母小波相关性较强的相变微泡回波信号被增强而与母小波相关性较弱的背景噪声信号被衰减，从而有效提高了主动超声成像在检测相变微泡时的对比度。

[0049] 进一步的，本发明中带通滤波的带宽是根据实际所使用的线阵换能器的接收带宽来确定的，这有助于获得更准确的相变微泡群母小波，使其与实际的相变微泡散射回波的相关性更强。

[0050] 进一步的，本发明采用的可编程双通道任意波形发生器可实现不同脉冲长度、不同脉冲重复频率、不同触发电压和不同触发模式下触发脉冲波形的编辑，可同时控制聚焦超声辐照相变纳米液滴和被动与主动原始射频信号采集的时序。

[0051] 进一步的，本发明利用可编程双通道任意波形发生器按所述时序来触发高功率脉冲发射/接收器和开放式超声成像平台，可获得多个脉冲下聚焦超声辐照相变纳米液滴的过程中空化活动所产生的声辐射信号以及在聚焦超声辐照停止间隙内残留相变微泡的回波信号，一方面可对单个脉冲下空化活动和相变微泡的分布进行观察，另一方面也可观察前一个脉冲对后一个脉冲所产生的空化活动和相变微泡的影响。

附图说明

[0052] 图1是本发明实施例中聚焦超声辐照相变纳米液滴和被动与主动超声成像实验平台示意图(a)及被动和主动原始射频信号采集时序控制示意图(b)。

[0053] 图2是本发明实施例中两个互补的方波变迹函数及利用其构建互相关系数矩阵的流程图。

[0054] 图3是本发明实施例中高分辨被动超声成像方法的流程图。

[0055] 图4是利用传统被动超声成像方法(a)以及本发明提出的高分辨被动超声成像方法(b)得到的结果。

[0056] 图5是本发明实施例中构造相变微泡群母小波的流程图；

[0057] 图6是本发明实施例中高对比主动超声成像方法的流程图；

[0058] 图7是利用传统主动超声成像方法(a)以及本发明提出的高对比主动超声成像方法(b)得到的结果。

[0059] 图8是本发明实施例中高分辨被动成像与高对比主动超声成像的复合流程图(a)和结果(b)。

具体实施方式

[0060] 下面结合附图和实施例对本发明作进一步的详细说明。

[0061] 本发明提供一种聚焦超声辐照相变纳米液滴的高分辨被动与高对比主动超声复合成像方法，包括以下步骤：

[0062] 步骤一：搭建聚焦超声辐照相变纳米液滴和原始射频信号采集的实验平台并制备仿体管道模型和相变纳米液滴溶液，通过控制聚焦超声辐照和原始射频信号采集的时序，分别采集被动超声原始射频信号和主动超声原始射频信号。

[0063] 所述步骤一的具体流程如下：

[0064] (1.1)搭建聚焦超声辐照相变纳米液滴和原始射频信号采集的实验平台

[0065] 参见图1(a)，上述实验平台主要包括聚焦超声辐照装置、被动与主动原始射频信号采集装置以及用于同步聚焦超声辐照和原始射频信号采集的时序控制装置；聚焦超声辐照装置包括单阵元聚焦超声换能器1(例如：孔径为156mm，中心频率为1.2MHz)和高功率脉冲发射/接收器2。被动与主动原始射频信号采集装置包括开放式超声成像平台3(含并行通道数据采集单元4)和线阵换能器5(例如：孔径为38mm，接收带宽为5～14MHz)；其中在开放式超声成像平台3上可通过编写自定义函数从而实现不同超声成像模式的切换，当自定义函数中的发射变迹为1而接收变迹为0时可实现被动超声成像功能，当发射变迹和接收变迹均为1时可实现主动超声成像功能；线阵换能器5与开放式超声成像平台3相匹配，线阵换能器5垂直于单阵元聚焦超声换能器1的轴向、平行于仿体管道模型6中的管道且位于单阵元聚焦超声换能器1的焦点正上方，单阵元聚焦超声换能器1的焦点位于仿体管道模型6的管道内；并行通道数据采集单元4负责采集线阵换能器5接收到的实验数据(例如，聚焦超声辐照仿体管道模型6的管道中的相变纳米液滴发生空化时所形成的原始射频信号，即被动超声原始射频信号，及聚焦超声辐照停止辐照后线阵换能器5自身发射超声平面波并接收到的残余相变微泡的回波信号，即主动超声原始射频信号)，并由开放式超声成像平台3根据实验数据生成高分辨被动与高对比主动超声复合图像。同步聚焦超声辐照和原始射频信号采集的时序控制装置为可编程双通道任意波形发生器7，通过在可编程双通道任意波形发生器7的界面上编辑两个通道的触发波形并分别触发高功率脉冲发射/接收器2和开放式超声成像平台3，实现聚焦超声辐照和原始射频信号采集的时序同步。水槽8的侧面和底部均放有吸声材料9(例如：硅橡胶基复合材料)以减少多次反射对实验结果的影响，仿体管道模型6置于水槽8内的水中。

[0066] (1.2)制备仿体管道模型

[0067] 上述仿体管道模型6是由丙烯酰胺、Tris缓冲液和去离子水等试剂按照一定比例配制而成的混合溶液经凝固之后形成的仿体，该仿体与实际生物组织具有相似的声学特性；在制作初期向仿体盒内插入一根管状物(例如：直径为5mm)，待仿体溶液凝固之后将其抽出，即可形成仿体管道模型6，管道两端分别接于脉动泵10的出口和废液池11，脉动泵10的进口与原液池12通过橡胶管连接；

[0068] (1.3)制备相变纳米液滴溶液

[0069] 上述相变纳米液滴溶液的配制过程中，首先按照一定比例将去离子水、相变材料和负离子氟化表面活性剂配制成溶液，并由超声粉碎机按照一定占空比(例如：80%)作用一定时间(例如：90秒)，得到相变纳米液滴原液(例如：平均直径为200～300nm，浓度为10^{10}/mL)。实验过程中相变纳米液滴原液按照一定的体积比(例如：1:500～1000)被生理盐水稀释，得到稀释后的相变纳米液滴溶液，由脉动泵10泵入并充盈仿体管道模型6中的管道；

[0070] (1.4)采用可编程双通道任意波形发生器7按时序触发高功率脉冲发射/接收器2和开放式超声成像平台3，通过高功率脉冲发射/接收器2来驱动单阵元聚焦超声换能器1对仿体管道模型6的管道中的相变纳米液滴进行辐照，开放式超声成像平台3利用并行通道数据采集单元4分别采集聚焦超声辐照相变纳米液滴的过程中线阵换能器被动接收的由空化活动所产生的被动超声原始射频信号，以及在聚焦超声辐照停止间隙内线阵换能器平面波发射后接收到的残留相变微泡所产生的主动超声原始射频信号；

[0071] 参见图1(b)，在可编程双通道任意波形发生器7上编辑的第一个通道的触发脉冲信号(例如：波形为方波，触发方式为上升沿触发，峰峰值为2V，电压偏移为1V，脉宽为1μs)，用于触发高功率脉冲发射/接收器2，并由高功率脉冲发射/接收器2驱动单阵元聚焦超声换能器1，此时单阵元聚焦超声换能器1按照高功率脉冲发射/接收器2中设置好的声学参数(例如：波形为正弦波，发射频率为1.2MHz，声压为1～10MPa，脉冲长度为10～100μs，脉冲个数为1～100)对仿体管道模型6的管道中的相变纳米液滴进行辐照。在可编程双通道任意波形发生器7上编辑的第二个通道的触发脉冲信号(例如：波形为方波，触发方式为上升沿触发，峰峰值为2V，电压偏移为1V，脉宽为1μs)，用于触发开放式超声成像平台3，然后并行通道数据采集单元4按照设置好的采集参数(例如：采样频率为10～80MHz，采样点数为2000～10000)来分别采集聚焦超声辐照相变纳米液滴的过程中线阵换能器5被动接收的由空化活动产生的被动超声原始射频信号以及在聚焦超声辐照停止间隙内线阵换能器5平面波发射后接收到的残留相变微泡所产生的主动超声原始射频信号；可编程双通道任意波形发生器7的第二个通道的第一个触发脉冲信号相对于第一个通道的触发脉冲信号的延时设置为T_1(例如：80～100μs)，经过T_1后，此时开放式超声成像平台3工作在不发射只接收的模式，并行通道数据采集单元4采集到的是被动超声原始射频信号；可编程双通道任意波形发生器7的第二个通道的第二个触发脉冲信号相对于第一个通道的触发脉冲信号的延时设置为T_2(例如：1～2ms)，经过T_2后，此时开放式超声成像平台3工作在既发射又接收的模式(例如，线阵换能器5发射平面波且全孔径接收)，并行通道数据采集单元4采集到的是主动超声原始射频信号。

[0072] 步骤二：设置被动超声成像区域；针对某一目标点，对步骤一所得被动超声原始射频信号进行延时和补偿处理，得到每个阵元的延时补偿信号，通过构造的两个互补的方波变迹函数对每个阵元的延时补偿信号进行阵元变迹处理并进行叠加，分别得到两个半孔径

波束合成信号，计算两个半孔径波束合成信号的归一化互相关系数并作阈值化处理；针对被动超声成像区域内其他目标点分别重复以上处理过程，从而得到互相关系数矩阵。

[0073] 所述步骤二的具体流程如下(图2)：

[0074] (2.1)设置被动超声成像区域(例如：横向坐标x的范围为-19～19mm，轴向坐标z的范围为40～80mm)；

[0075] (2.2)计算被动超声成像区域内某一目标点(x,z)到第i个阵元的(x_i,0)的距离d_i(x,z)：

[0076] $$d_i(x,z)=\sqrt{z^2+(x_i-x)^2}$$

[0077] 其中，i＝1,2,...,N，N为线阵换能器5的阵元数目(例如：N为128)；

[0078] (2.3)计算目标点(x,z)所对应的空间灵敏度补偿系数η_i(x,z)：

[0079] $$\eta_i(x,z)=\sqrt{d_i(x,z)}$$

[0080] (2.4)根据步骤(2.2)所得目标点(x,z)到第i个阵元的(x_i,0)的距离d_i(x,z)和步骤(2.3)所得空间灵敏度补偿系数η_i(x,z)对步骤一所得被动超声原始射频信号进行延时和补偿处理，得到每个阵元的延时补偿信号s_i(x,z,t)：

[0081] $s_i(x,z,t)=\eta_i(x,z)p_i[t+d_i(x,z)/c]$

[0082] 其中，p_i(t)为步骤一所得被动超声原始射频信号中第i个阵元接收到的信号，t为时间，c为声传播速度；

[0083] (2.5)构造两个互补的方波变迹函数$Apod_i^1$和$Apod_i^2$，在其中一个方波变迹函数$Apod_i^1$中，由相邻的A(例如：8)个阵元形成一个阵元组，第1个阵元组中的阵元对应的函数值为1，第2个阵元组中的阵元对应的函数值为0，以此类推，第N/A-1个阵元组中的阵元对应的函数值为1，第N/A个阵元组中的阵元对应的函数值为0；而另一个方波变迹函数$Apod_i^2$的取值则与$Apod_i^1$相反，即$Apod_i^1$函数值为1的阵元在$Apod_i^2$中所对应的函数值为0，$Apod_i^1$函数值为0的阵元在$Apod_i^2$中所对应的函数值为1；$Apod_i^1$和$Apod_i^2$的具体表达式分别为：

[0084] $$Apod_i^1=\begin{cases}1, & i=(j-1)A+1\sim jA,\ j=1,3,\ldots,N/A-1\\ 0, & i=(j-1)A+1\sim jA,\ j=2,4,\ldots,N/A\end{cases}$$

[0085] $$Apod_i^2=\begin{cases}0, & i=(j-1)A+1\sim jA,\ j=1,3,\ldots,N/A-1\\ 1, & i=(j-1)A+1\sim jA,\ j=2,4,\ldots,N/A\end{cases}$$

[0086] (2.6)分别利用步骤(2.5)所得的两个互补的方波变迹函数对步骤(2.4)所得的每个阵元的延时补偿信号进行阵元变迹处理，然后进行叠加，分别得到两个半孔径波束合成信号RX_1(x,z,t)和RX_2(x,z,t)：

[0087] $$RX_1(x,z,t)=\sum_{i=1}^{N}Apod_i^1\cdot s_i(x,z,t)$$

[0088] $$RX_2(x,z,t)=\sum_{i=1}^{N}Apod_i^2\cdot s_i(x,z,t)$$

[0089] (2.7)计算步骤(2.6)所得两个半孔径波束合成信号的归一化互相关系数NCC(x,z)：

[0090] $$NCC(x,z)=\frac{Cov\left[RX_1(x,z,t),RX_2(x,z,t)\right]}{\sqrt{Av\left[RX_1(x,z,t)\right]}\sqrt{Av\left[RX_2(x,z,t)\right]}}$$

[0091] 其中,Cov[•]表示求两个信号的协方差,Av[•]表示求信号的方差；

[0092] (2.8)对步骤(2.7)所得归一化互相关系数进行阈值化处理,得到目标点(x,z)对应的阈值化处理后的归一化互相关系数$\overline{NCC}(x,z)$：

[0093] $$\overline{NCC}(x,z)=\begin{cases}NCC(x,z), & NCC(x,z)\geq\varepsilon\\ \varepsilon, & NCC(x,z)<\varepsilon\end{cases}$$

[0094] 其中,ε为阈值(例如:10^{-3})；

[0095] (2.9)重复步骤(2.2)～(2.8),直至计算得到被动超声成像区域内所有目标点各自所对应的阈值化处理后的归一化互相关系数,得到互相关系数矩阵CCM。

[0096] 步骤三:针对步骤二所述被动超声成像区域内的某一目标点,利用步骤二所得每个阵元的延时补偿信号计算全孔径波束合成信号以及所有阵元延时补偿信号的平方和,然后通过计算幅度相干系数得到全孔径幅度相干波束合成信号,对该信号的平方进行积分,计算得到能量输出值;针对所述被动超声成像区域内其他目标点分别重复以上计算过程,得到被动幅度相干波束合成能量矩阵,将该矩阵与步骤二所得互相关系数矩阵进行点乘运算之后做对数压缩,得到高分辨被动超声成像结果。

[0097] 所述步骤三的具体流程如下(图3)：

[0098] (3.1)针对步骤(2.1)所述被动超声成像区域内的某一目标点(x,z),根据步骤(2.4)所得每个阵元的延时补偿信号,计算得到全孔径波束合成信号S(x,z,t)：

[0099] $$S(x,z,t)=\sum_{i=1}^{N}s_i(x,z,t)$$

[0100] (3.2)针对步骤(2.1)所述被动超声成像区域内的某一目标点(x,z),根据步骤(2.4)所得每个阵元的延时补偿信号,计算得到所有阵元延时补偿信号的平方和SQS(x,z,t)：

[0101] $$SQS(x,z,t)=\sum_{i=1}^{N}\left|s_i(x,z,t)\right|^2$$

[0102] (3.3)根据步骤(3.1)所得全孔径波束合成信号S(x,z,t)以及步骤(3.2)所得所有阵元延时补偿信号的平方和SQS(x,z,t)来计算幅度相干系数ACF(x,z,t)：

[0103] $$ACF(x,z,t)=\frac{\left[S(x,z,t)\right]^2}{N\cdot SQS(x,z,t)}$$

[0104] (3.4)根据步骤(3.1)所得全孔径波束合成信号S(x,z,t)和步骤(3.3)所得幅度相干系数ACF(x,z,t)来计算目标点(x,z)的全孔径幅度相干波束合成信号q(x,z,t)：

[0105] q(x,z,t)＝S(x,z,t)ACF(x,z,t)

[0106] (3.5)在被动超声原始射频信号采集时间区间[t_0,t_0+Δt]内对步骤(3.4)所得全

孔径幅度相干波束合成信号q(x,z,t)的平方进行积分，得到目标点(x,z)的能量输出值I(x,z)：

[0107] $$I(x,z)=\int_{t_0}^{t_0+\Delta t} q(x,z,t)^2\,dt$$

[0108] 其中，t_0为被动超声原始射频信号采集的起始时刻，ΔT为被动超声原始射频信号采集的时间长度；

[0109] (3.6)重复步骤(3.1)～(3.5)，直至计算得到步骤(2.1)所述被动超声成像区域内所有目标点各自的能量输出值，得到被动幅度相干波束合成能量矩阵PBEM；

[0110] (3.7)将步骤(3.6)所得被动幅度相干波束合成能量矩阵PBEM和步骤(2.9)所得互相关系数矩阵CCM进行点乘运算之后做对数压缩，得到高分辨被动超声成像结果：

[0111] 参见图4，其中(a)和(b)分别为利用传统被动超声成像方法(未使用双重变迹互相关以及幅度相干系数)和本发明提出的高分辨被动超声成像方法得到的聚焦超声辐照相变纳米液滴过程中空化活动的成像结果，动态范围为50dB。可以看出，图4(b)中成像伪影相比图4(a)有了明显的降低，表明对空化活动的空间定征更加准确。经过计算，图4(a)所示结果的横向半高宽为1.61mm，轴向半高宽为20.72mm，图4(b)所示结果的横向半高宽为0.94mm，轴向半高宽为6.49mm，图4(b)所示结果的横向和轴向半高宽均低于图4(a)所示结果，说明本发明提出的高分辨被动超声成像方法有效提高了成像的空间分辨率。

[0112] 步骤四：采用高饱和蒸汽压对Keller-Miksis模型进行修正，并基于微泡之间的相互作用建立相变微泡群振动模型，利用四阶龙格库塔算法求解该模型得到每个相变微泡振动半径的时变曲线并计算每个相变微泡的散射回波，将所有相变微泡的散射回波叠加并通过带通滤波和归一化处理来构造相变微泡群母小波。

[0113] 所述步骤四的具体流程如下(图5)：

[0114] (4.1)由于聚焦超声辐照使得周围温度升高，从而导致相变微泡内的饱和蒸汽压升高，因此传统的Keller-Miksis模型不再适用。采用高饱和蒸汽压(例如，饱和蒸汽压为87600Pa)对传统的Keller-Miksis模型进行修正，得到单个相变微泡的振动模型：

[0115] $$\left(1-\frac{\dot{R}}{c}\right)R\ddot{R}+\frac{3}{2}\left(1-\frac{\dot{R}}{3c}\right)\dot{R}^2=\left(1+\frac{\dot{R}}{c}\right)\frac{P_s}{\rho}+\frac{R}{\rho c}\frac{d}{dt}\left(P_s-P_\infty\right)$$

[0116] 其中，R为相变微泡的振动半径，$\dot{R}$为相变微泡振动的径向速度，$\ddot{R}$为相变微泡振动的径向加速度，c为声传播速度，ρ为液体密度，$\frac{d}{dt}(\cdot)$表示对某一时变函数做时间微分，P_s为相变微泡的壁压力：

[0117] $$P_s=\left(P_\infty-P_v+\frac{2\sigma}{R_0}\right)\left(\frac{R_0}{R}\right)^{3\gamma}+P_v-\frac{2\sigma}{R}-\frac{4\mu\dot{R}}{R}+P_A$$

[0118] 其中，P_∞为液体静压力，P_v为相变微泡内气体的饱和蒸汽压，σ为液体表面张力系数，R_0为相变微泡的初始振动半径，γ为多方指数，μ为粘滞系数，P_A为激励波形；上述各参数的可以取为：c＝1540m/s，ρ＝998kg/m^3，P_∞＝101000Pa，P_v＝87600Pa，σ＝0.072N/m，R_0＝2μm，γ＝1.4，μ＝0.001Pa·s；

[0119] (4.2)在考虑微泡间相互作用的基础上，对步骤(4.1)所得单个相变微泡的振动模

型进行进一步修正，建立相变微泡群振动模型：

[0120] $$\left(1-\frac{\dot{R}_i}{c}\right)R_i\ddot{R}_i+\frac{3}{2}\left(1-\frac{\dot{R}_i}{3c}\right)\dot{R}_i^2+\sum_{j=1,j\neq i}^{B}\frac{2R_i\dot{R}_i^2+R_i^2\ddot{R}_i}{D_{ij}}=\left(1+\frac{\dot{R}_i}{c}\right)\frac{P_{s_i}}{\rho}+\frac{R_i}{\rho c}\frac{d}{dt}\left(P_{s_i}-P_\infty\right)$$

[0121] 其中，i＝1,2,...,B，$\sum_{j=1,j\neq i}^{B}\frac{2R_i\dot{R}_i^2+R_i^2\ddot{R}_i}{D_{ij}}$表示除第i个相变微泡以外B-1个相变微泡对第i个相变微泡的作用，R_i为第i个相变微泡的振动半径，$\dot{R}_i$为第i个相变微泡振动的径向速度，$\ddot{R}_i$为第i个相变微泡振动的径向加速度，B为相变微泡的数目，D_{ij}为第i个和第j个相变微泡之间的间距，P_{s_i}为第i个相变微泡的壁压力：

[0122] $$P_{s_i}=\left(P_\infty-P_v+\frac{2\sigma}{R_{i0}}\right)\left(\frac{R_{i0}}{R_i}\right)^{3\gamma}+P_v-\frac{2\sigma}{R_i}-\frac{4\mu\dot{R}_i}{R_i}+P_A$$

[0123] 其中，R_{i0}为第i个相变微泡的初始振动半径，其余参数的定义和取值均与步骤(4.1)所述的单个相变微泡的振动模型相同；

[0124] (4.3)根据相变微泡群在三维空间中的分布结构来确定步骤(4.2)中所述相变微泡的数目B以及第i个和第j个相变微泡之间的间距D_{ij}。三维空间分布结构可考虑正方体结构、正四面体结构，球体结构等。例如，考虑正方体结构，正方体八个顶点分布八个相变微泡，则相变微泡数目B为8；若正方体结构的边长为10μm，则相变微泡群中两两微泡之间的间距分别有10μm、14.14μm和17.32μm三种情况；

[0125] (4.4)利用针式水听器测量开放式超声成像平台3工作在平面波发射且全孔径接收模式(既发射又接收的模式)时线阵换能器5发射的平面波波形，将该波形做插值平滑处理后作为步骤(4.2)所述相变微泡群振动模型的激励波形P_A；

[0126] (4.5)设置计算步长(例如：10ns)并使用四阶龙格库塔算法求解步骤(4.2)所述的相变微泡群振动模型，分别得到第i个相变微泡的振动半径的时变曲线$R_i(t)$，对$R_i(t)$做一阶时间微分和二阶时间微分，分别得到相变微泡振动的径向速度的时变曲线$\dot{R}_i(t)$和径向加速度的时变曲线$\ddot{R}_i(t)$；

[0127] (4.6)根据步骤(4.5)所得的第i个相变微泡的振动半径的时变曲线$R_i(t)$、径向速度的时变曲线$\dot{R}_i(t)$和径向加速度的时变曲线$\ddot{R}_i(t)$，计算第i个相变微泡的散射回波$P_i(t)$：

[0128] $$P_i(t)=\rho\left[R_i^2(t)\ddot{R}_i(t)+2R_i(t)\dot{R}_i^2(t)\right]/r$$

[0129] 其中，r为单阵元聚焦超声换能器1的焦点与线阵换能器5之间的垂直距离；

[0130] (4.7)将按照步骤(4.6)分别得到的B个相变微泡的散射回波沿着时间轴进行叠加，得到相变微泡群的散射回波P(t)：

[0131] $$P(t)=\sum_{i=1}^{B}P_i(t)$$

[0132] (4.8)设计滤波带宽与线阵换能器5接收带宽一致的带通滤波器(例如：滤波带宽为5～14MHz)，对步骤(4.7)所得相变微泡群的散射回波进行带通滤波，然后以滤波所得回波的最大绝对值为基准进行归一化处理，得到相变微泡群母小波。

[0133] 步骤五：对步骤一所得主动超声原始射频信号进行延时处理并对延时信号进行窗函数加权叠加，得到主动波束合成射频信号；利用步骤四所得相变微泡群母小波对主动波束合成射频信号按照不同的小波变换尺度参数进行连续小波变换，对所得小波相关性系数矩阵进行希尔伯特包络检波后计算小波相关性系数包络检波矩阵的对比度，然后对所述对比度最高时对应的小波相关性系数包络检波矩阵进行对数压缩得到高对比主动超声成像结果。

[0134] 所述步骤五的具体流程如下(图6)：

[0135] (5.1)设置主动超声成像区域(例如：横向坐标x的范围为-19～19mm，轴向坐标z的范围为40～80mm)；

[0136] (5.2)计算主动超声成像区域内某一目标点(x,z)对应的有效孔径的阵元数K：

[0137] K＝z/(2Fnum)

[0138] 其中，Fnum一般为1或2；

[0139] (5.3)根据线阵换能器的平面波发射时间与回波接收时间来计算有效孔径中K个阵元中第k个阵元的时间延时$\tau_k(x,z)$：

[0140] $$\tau_k(x,z)=\left(z+\sqrt{z^2+(x-x_k)^2}\right)/c$$

[0141] 其中，k＝1,2,...,K，x_k为第k个阵元的横向位置，c为声传播速度；

[0142] (5.4)从步骤一所得的主动超声原始射频信号中提取出与目标点(x,z)对应的有效孔径中的第k个阵元的信号$s_k(t)$，利用步骤(5.3)所得时间延时对该信号进行延时处理，得到延时信号$rf_k(x,z)$：

[0143] $rf_k(x,z)=s_k[\tau_k(x,z)]$

[0144] (5.5)利用窗函数向量(例如：Hanning窗)对步骤(5.4)所得延时信号$rf_k(x,z)$进行加权，然后进行叠加，得到目标点(x,z)的强度输出值v(x,z)：

[0145] $$v(x,z)=\sum_{k=1}^{K}w_k\cdot rf_k(x,z)$$

[0146] 其中，w_k为窗函数向量中的第k个元素；

[0147] (5.6)重复步骤(5.2)～(5.5)，直至计算得到主动超声成像区域内所有目标点各自的强度输出值，从而得到主动波束合成射频信号，记为V(t)；

[0148] (5.7)针对某一小波变换尺度参数，利用步骤四所得的相变微泡群母小波对步骤(5.6)所得主动波束合成射频信号中的第i列信号$V_i(t)$进行连续小波变换，得到该尺度参数下第i列信号$V_i(t)$的小波相关性系数$C_i(a,b)$：

[0149] $$C_i(a,b)=\frac{1}{\sqrt{a}}\int_{-\infty}^{+\infty}V_i(t)\varphi^*\left(\frac{t-b}{a}\right)dt$$

[0150] 其中，i＝1,2,...,N，N为线阵换能器5的阵元数目，$C_i(a,b)$为表征信号$V_i(t)$和相变微泡群母小波相关性的小波相关性系数，*表示复共轭，$\varphi(t)$为步骤四所得的相变微泡群母小波，a和b分别为尺度参数和位移参数(由于位移参数对成像效果无影响，因此可将其设置为任意值，例如为0)；

[0151] (5.8)将按照步骤(5.7)得到的主动波束合成射频信号中每一列信号的小波相关

性系数构成小波相关性系数矩阵C，对该矩阵C进行希尔伯特包络检波，然后计算小波相关性系数包络检波矩阵的对比度CR：

[0152] $CR=20\lg(I_B/I_N)$

[0153] 其中，I_B为相变微泡感兴趣区域的像素平均值，I_N为背景噪声感兴趣区域的像素平均值，例如，背景噪声感兴趣区域可从主动超声成像区域中管道以外的区域中进行选取；

[0154] (5.9)选择不同的小波变换尺度参数(例如：尺度参数范围为1～100)，并按照步骤(5.7)和(5.8)，得到不同小波变换尺度参数下的对比度CR，选择对比度CR最高时的小波变换尺度参数为最优尺度参数；

[0155] (5.10)对步骤(5.9)所得最优尺度参数下的小波相关性系数包络检波矩阵进行对数压缩得到高对比主动超声成像结果。

[0156] 参见图7，其中(a)和(b)分别为利用传统主动超声成像方法(未利用基于相变微泡群母小波的连续小波变换)和本发明提出的高对比主动超声成像方法得到的聚焦超声辐照相变纳米液滴停止时残留相变微泡的成像结果，动态范围为40dB。可以看出，相比图7(a)，图7(b)中仿体管道模型6的管道以外的背景噪声信息得到了有效的抑制，而仿体管道模型6的管道中的相变微泡的信息并未丢失。选取图7中所示的实线框和虚线框分别作为相变微泡感兴趣区域和背景噪声感兴趣区域，然后分别计算图7(a)和图7(b)的对比度CR；经过计算，图7(a)所示结果的对比度CR为12.95dB，图7(b)所示结果的对比度CR为22.66dB，说明本发明提出的高对比主动超声成像方法有效提高了成像的对比度。

[0157] 步骤六：对步骤三所得的高分辨被动超声成像结果与步骤五所得的高对比主动超声成像结果分别进行插值、标准化和RGB转换处理，然后对高分辨被动超声RGB图像做透明化处理并叠加到高对比主动超声RGB图像上，得到被动与主动超声复合图像。

[0158] 所述步骤六的具体流程如下(图8(a))：

[0159] (6.1)对步骤(3.7)所得的高分辨被动超声成像结果和步骤(5.10)所得的高对比主动超声成像结果分别进行插值，以统一二者的像素数目，对应得到图像IHRP和IHRA；

[0160] (6.2)对步骤(6.1)所得图像IHRP和IHRA分别标准化至区间[1,ub](例如，ub为64)，得到标准化图像$\overline{\mathbf{IHRP}}$和$\overline{\mathbf{IHRA}}$：

[0161] $$\overline{\mathbf{IHRP}}=\mathrm{round}\left[\frac{\mathbf{IHRP}}{\max(\mathbf{IHRP})}\times(ub-1)\right]+1$$

[0162] $$\overline{\mathbf{IHRA}}=\mathrm{round}\left[\frac{\mathbf{IHRA}}{\max(\mathbf{IHRA})}\times(ub-1)\right]+1$$

[0163] 其中，round[•]表示四舍五入取整数，max(•)表示寻找图像中的像素最大值；

[0164] (6.3)设置高分辨被动超声成像的显示色系(例如：hot色系)和高对比主动超声成像的显示色系(例如：gray色系)，然后将步骤(6.2)所得标准化图像$\overline{\mathbf{IHRP}}$和$\overline{\mathbf{IHRA}}$转换成RGB(目前应用最广的一种颜色系统，R、G和B分别代表红色、绿色和蓝色)图像，分别得到高分辨被动超声RGB图像和高对比主动超声RGB图像；

[0165] (6.4)设置透明度(例如：0.2～0.5)，对步骤(6.3)所得高分辨被动超声RGB图像做透明化处理，然后叠加到高对比主动超声RGB图像上，得到被动与主动超声复合图像。

[0166] 参见图8(b),图8(b)为根据图4(b)所示的高分辨被动超声成像结果和图7(b)所示的高对比主动超声成像结果得到的被动与主动超声复合图像;图8(b)既反映了聚焦超声辐照相变纳米液滴过程中空化活动的空间分布,也反映了聚焦超声辐照相变纳米液滴停止时残留相变微泡的空间分布。

[0167] 本发明具有以下优点:

[0168] (1)本发明提出的高分辨被动超声成像方法通过构造两个互补的方波变迹函数得到互相关系数矩阵,将其与利用幅度相干系数得到的被动幅度相干波束合成能量矩阵进行点乘,对成像伪影进行了大幅度的抑制,从而提高了成像的空间分辨率,使得聚焦超声辐照相变纳米液滴过程中空化活动的空间定位更加准确;

[0169] (2)本发明提出的高对比主动超声成像方法采用平面波发射方式,能够有效降低对相变微泡的破坏率,且通过相变微泡群振动模型构造的相变微泡群母小波与实际实验中所得的相变微泡散射回波信号有着较高的相关性,使得成像对比度得到有效提高,从而改善了相变微泡的检测灵敏度;

[0170] (3)本发明基于高分辨被动超声成像和高对比主动超声成像得到的被动与主动超声复合图像能够同时对聚焦超声辐照相变纳米液滴过程中的空化活动以及辐照停止时的残留相变微泡进行监控,实现了聚焦超声辐照相变纳米液滴的全过程监控,对于聚焦超声联合相变纳米液滴的治疗监控应用有着重要意义;

[0171] (4)本发明可用于气体栓塞血管治疗、血管破裂与肿瘤乏氧区载药治疗、细胞声致穿孔、血脑屏障开放、超声溶栓以及高强度聚焦超声治疗增效等多种聚焦超声联合相变纳米液滴的治疗监控方面;

[0172] (5)本发明提出的高分辨被动与高对比主动超声复合成像方法不仅可以用于聚焦超声联合相变纳米液滴的治疗监控方面,也适用于聚焦超声联合其他微纳颗粒的治疗监控应用,同时也为聚焦超声治疗中空化与微泡的时空动力学特性分析提供了有效手段。

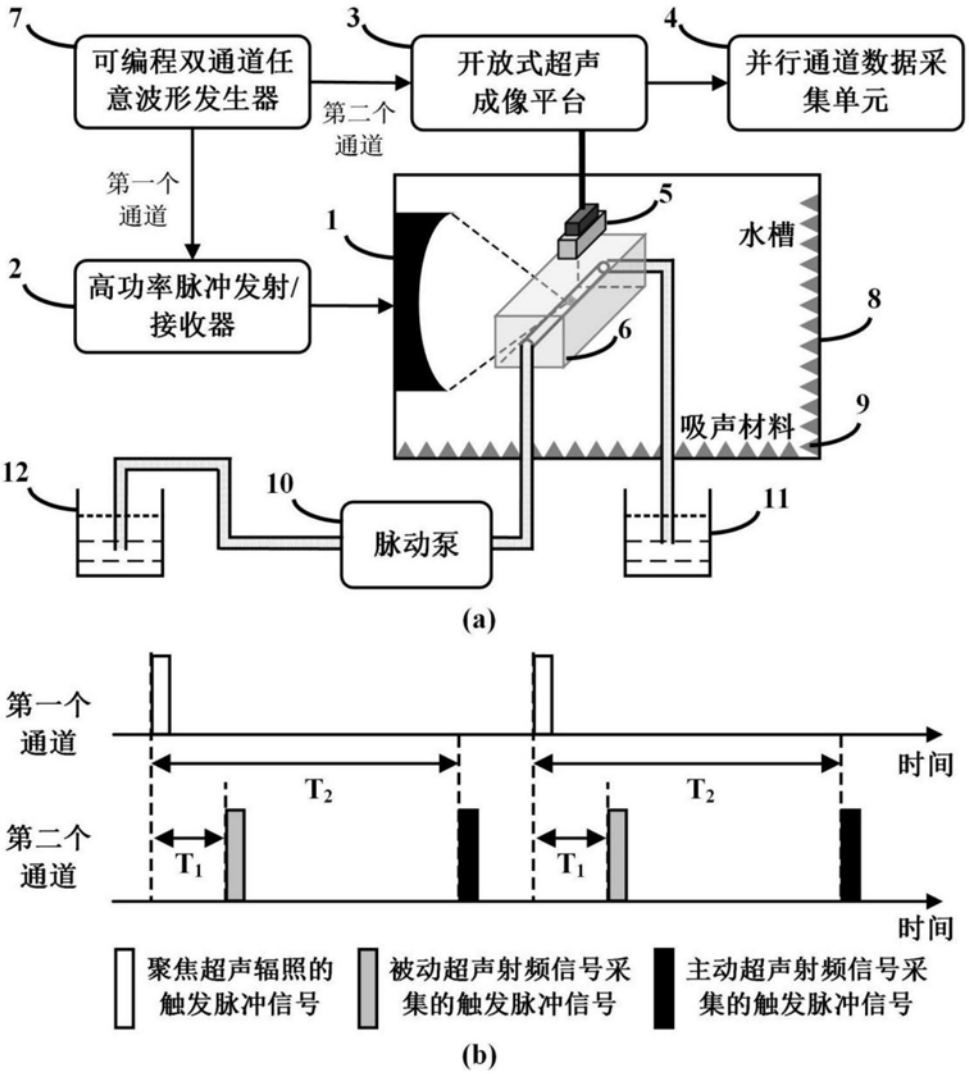

7
可编程双通道任意波形发生器
3
开放式超声成像平台
4
并行通道数据采集单元
第二个通道
第一个通道
1
5
水槽
2
高功率脉冲发射/接收器
8
6
9
吸声材料
12
10
脉动泵
11
(a)
第一个通道
时间
T_2
T_2
第二个通道
T_1
T_1
时间
聚焦超声辐照的触发脉冲信号
被动超声射频信号采集的触发脉冲信号
主动超声射频信号采集的触发脉冲信号
(b)

图1

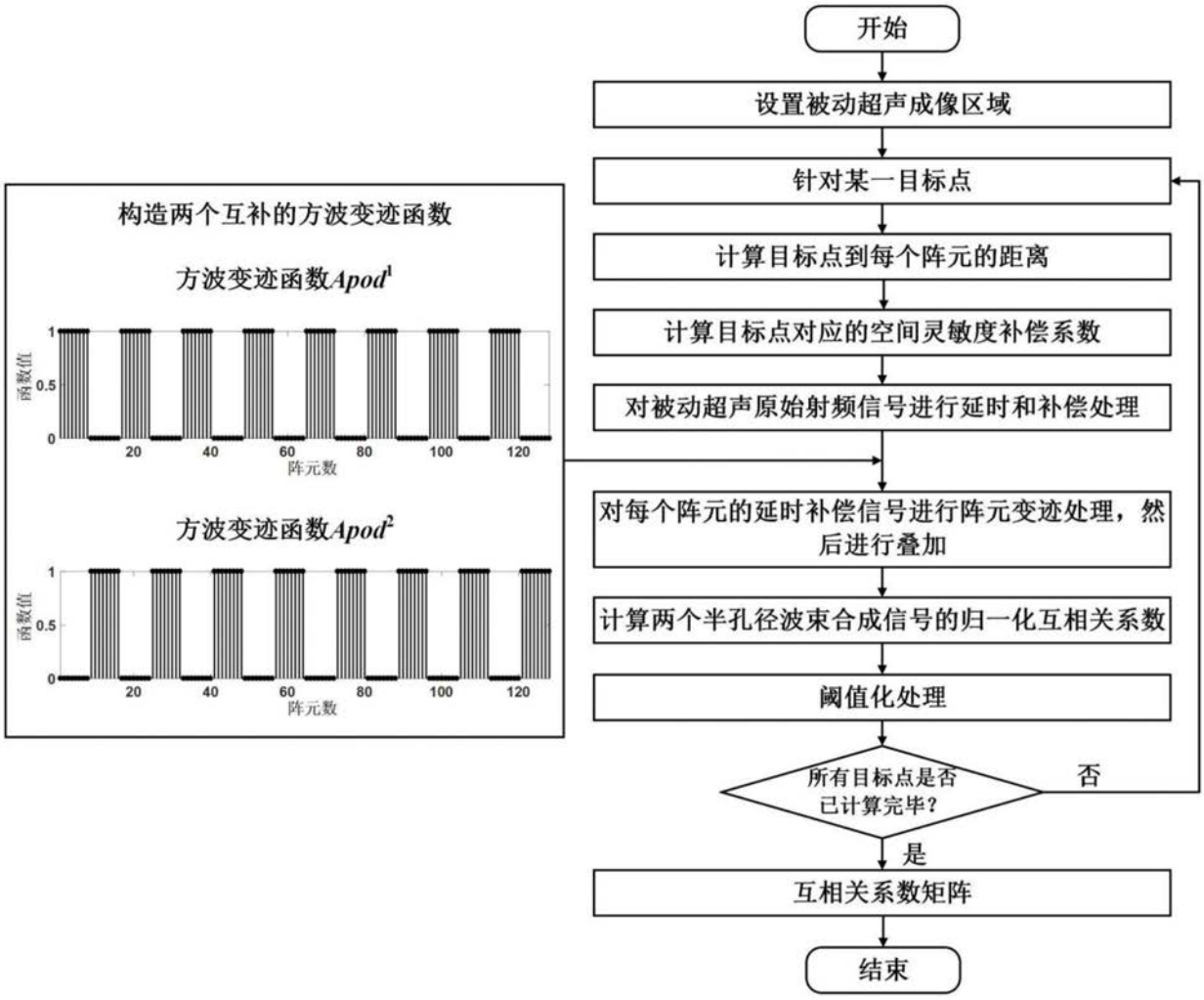

构造两个互补的方波变迹函数
方波变迹函数Apod1
函数值
1
0.5
0
20
40
60
80
100
120
阵元数
方波变迹函数Apod2
函数值
1
0.5
0
20
40
60
80
100
120
阵元数
开始
设置被动超声成像区域
针对某一目标点
计算目标点到每个阵元的距离
计算目标点对应的空间灵敏度补偿系数
对被动超声原始射频信号进行延时和补偿处理
对每个阵元的延时补偿信号进行阵元变迹处理，然后进行叠加
计算两个半孔径波束合成信号的归一化互相关系数
阈值化处理
所有目标点是否已计算完毕？
否
是
互相关系数矩阵
结束

图2

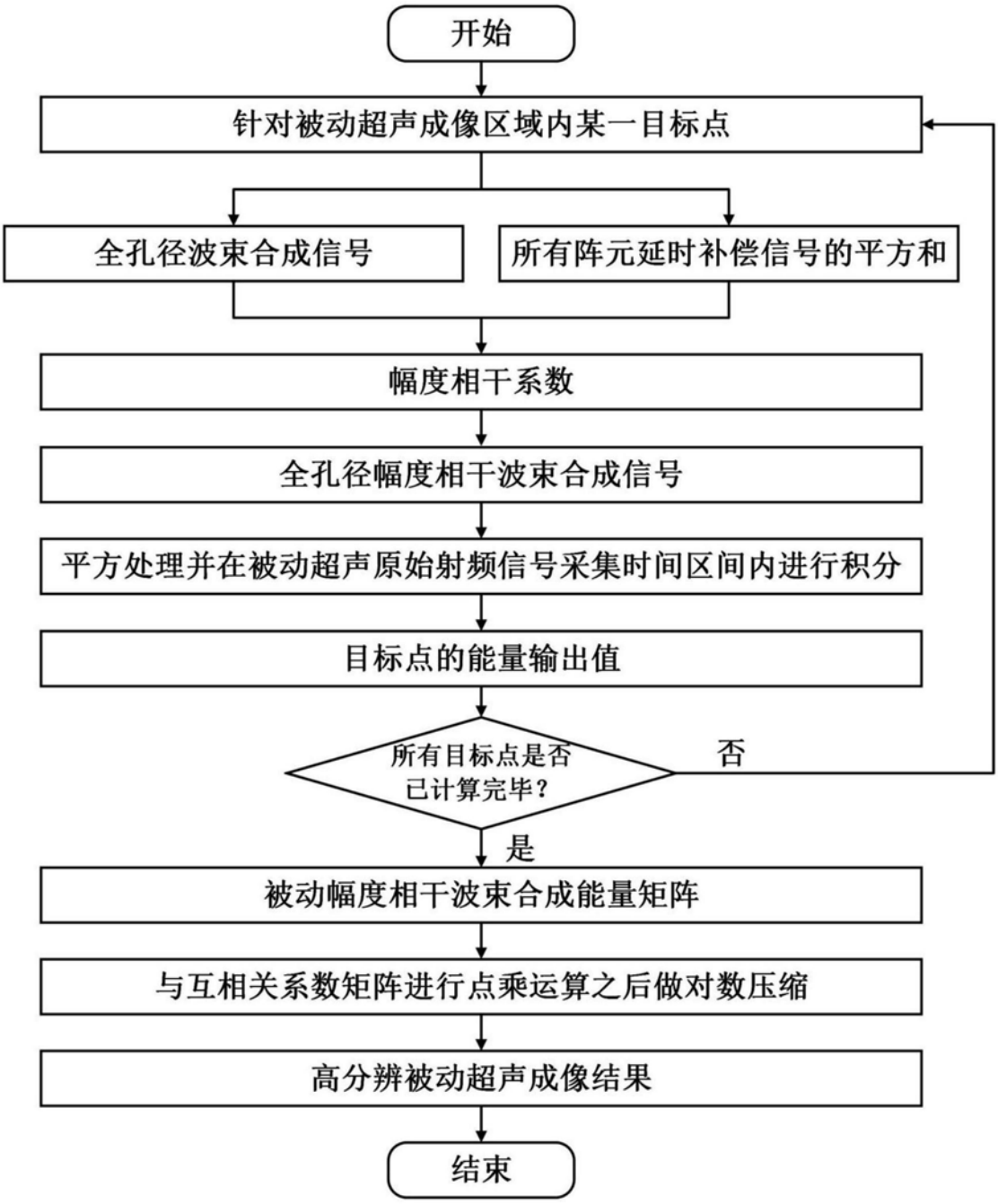

开始
针对被动超声成像区域内某一目标点
全孔径波束合成信号
所有阵元延时补偿信号的平方和
幅度相干系数
全孔径幅度相干波束合成信号
平方处理并在被动超声原始射频信号采集时间区间内进行积分
目标点的能量输出值
所有目标点是否已计算完毕？
否
是
被动幅度相干波束合成能量矩阵
与互相关系数矩阵进行点乘运算之后做对数压缩
高分辨被动超声成像结果
结束

图3

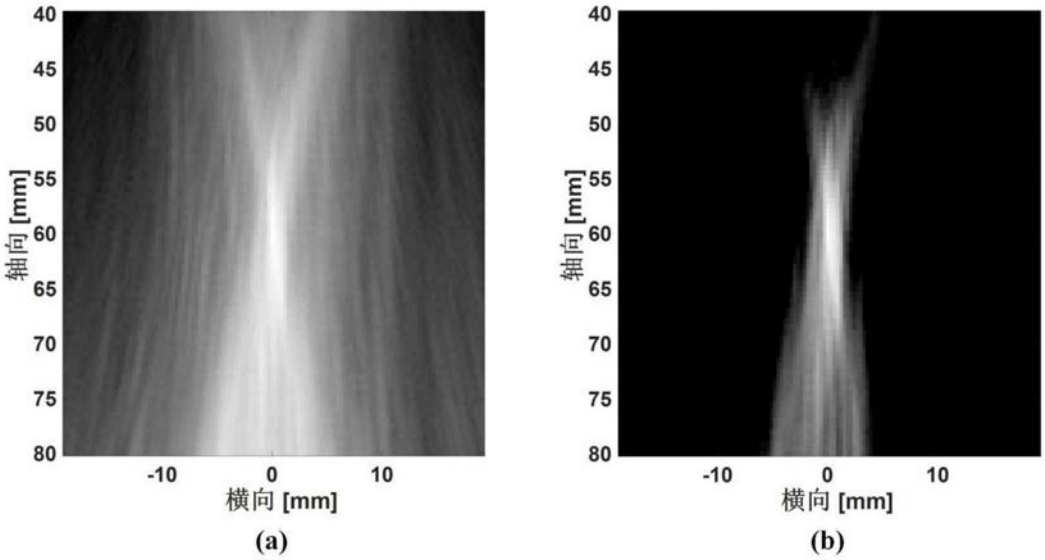

40
45
50
55
60
65
70
75
80
轴向 [mm]
-10
0
10
横向 [mm]
(a)
40
45
50
55
60
65
70
75
80
轴向 [mm]
-10
0
10
横向 [mm]
(b)

图4

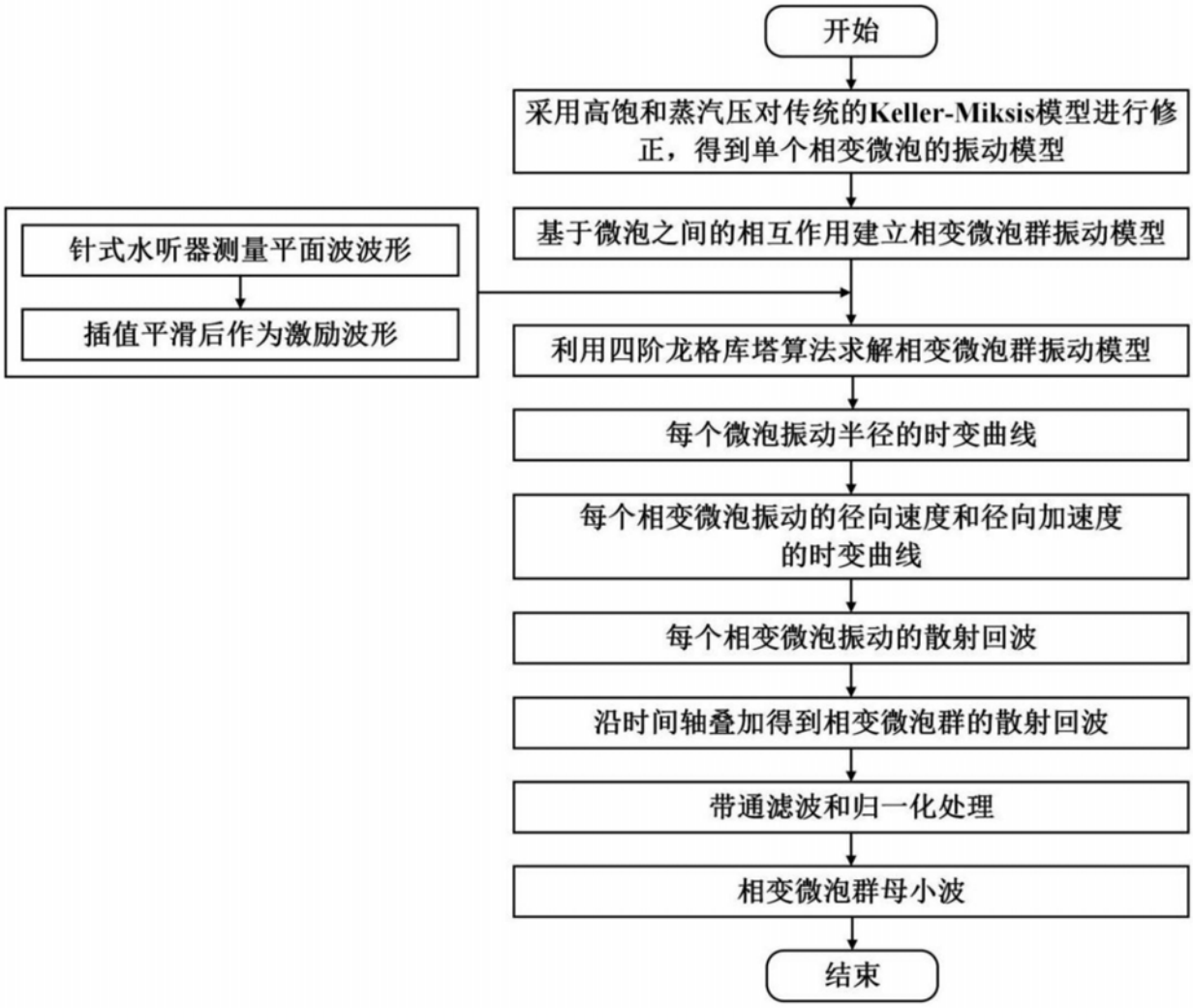

开始
采用高饱和蒸汽压对传统的Keller-Miksis模型进行修正，得到单个相变微泡的振动模型
基于微泡之间的相互作用建立相变微泡群振动模型
针式水听器测量平面波波形
插值平滑后作为激励波形
利用四阶龙格库塔算法求解相变微泡群振动模型
每个微泡振动半径的时变曲线
每个相变微泡振动的径向速度和径向加速度的时变曲线
每个相变微泡振动的散射回波
沿时间轴叠加得到相变微泡群的散射回波
带通滤波和归一化处理
相变微泡群母小波
结束

图5

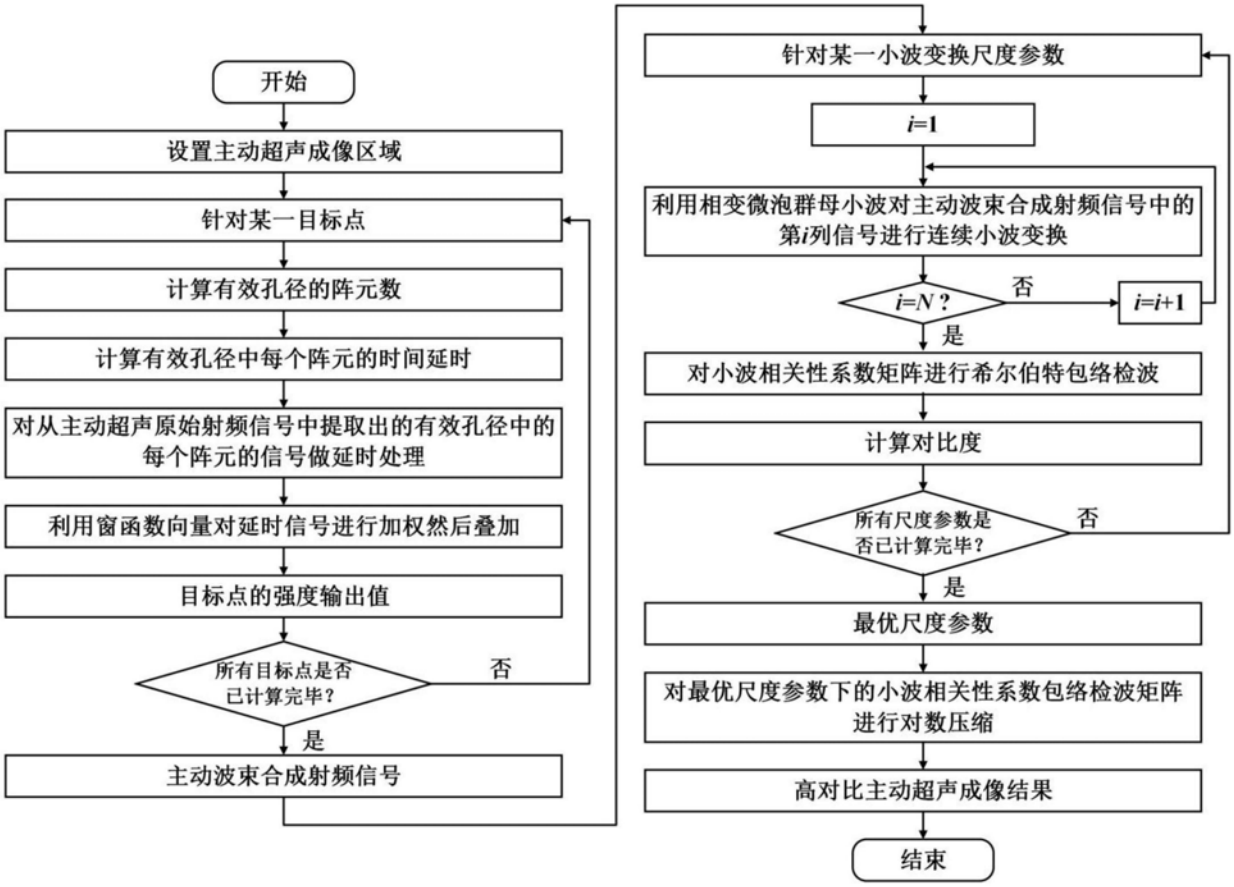

开始
设置主动超声成像区域
针对某一目标点
计算有效孔径的阵元数
计算有效孔径中每个阵元的时间延时
对从主动超声原始射频信号中提取出的有效孔径中的每个阵元的信号做延时处理
利用窗函数向量对延时信号进行加权然后叠加
目标点的强度输出值
所有目标点是否已计算完毕？
否
是
主动波束合成射频信号
针对某一小波变换尺度参数
i=1
利用相变微泡群母小波对主动波束合成射频信号中的第i列信号进行连续小波变换
i=N？
否
i=i+1
是
对小波相关性系数矩阵进行希尔伯特包络检波
计算对比度
所有尺度参数是否已计算完毕？
否
是
最优尺度参数
对最优尺度参数下的小波相关性系数包络检波矩阵进行对数压缩
高对比主动超声成像结果
结束

图6

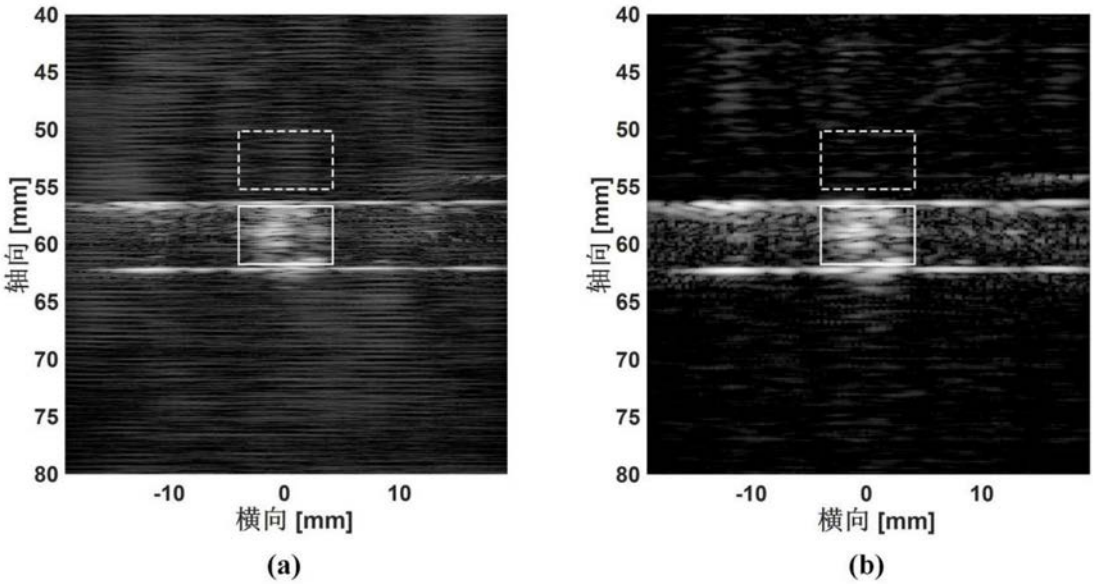
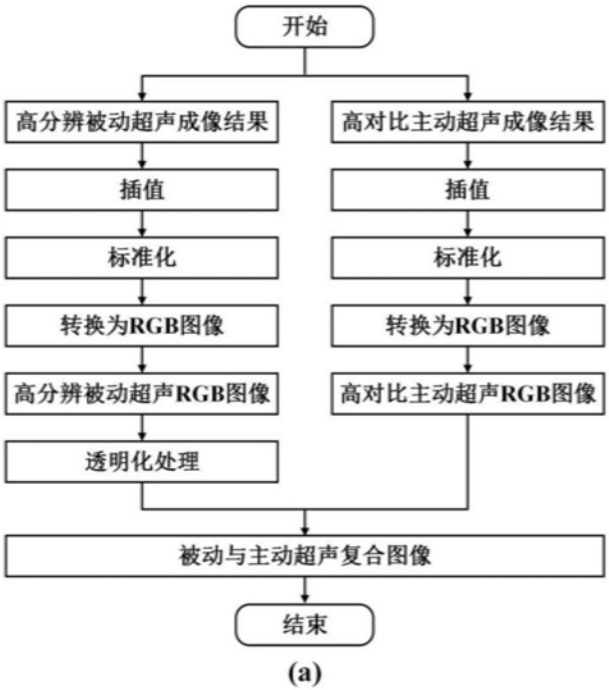
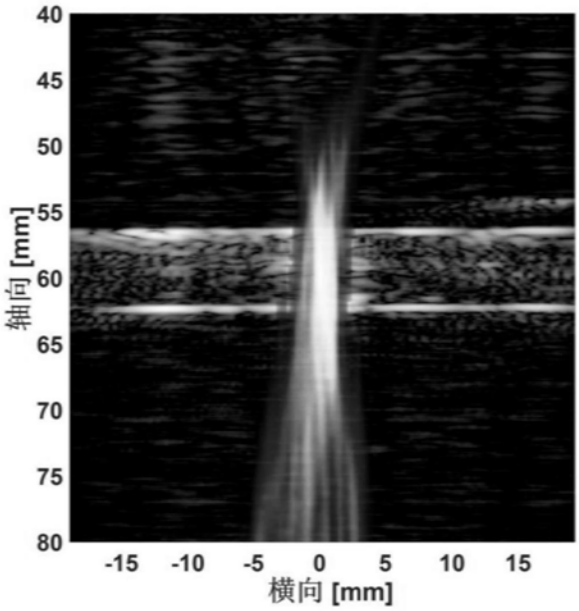

40
45
50
55
60
65
70
75
80
轴向 [mm]
-10
0
10
横向 [mm]
(a)
40
45
50
55
60
65
70
75
80
轴向 [mm]
-10
0
10
横向 [mm]
(b)

图7


开始
高分辨被动超声成像结果
高对比主动超声成像结果
插值
插值
标准化
标准化
转换为RGB图像
转换为RGB图像
高分辨被动超声RGB图像
高对比主动超声RGB图像
透明化处理
被动与主动超声复合图像
结束

(a)


40
45
50
55
60
65
70
75
80
轴向 [mm]
-15
-10
-5
0
5
10
15
横向 [mm]

(b)

图8

专利名称(译)	一种聚焦超声辐照相变纳米液滴的主被动超声复合成像方法及系统		
公开(公告)号	CN111134719A	公开(公告)日	2020-05-12
申请号	CN201911319128.3	申请日	2019-12-19
[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 路舒宽		
发明人	万明习 路舒宽		
IPC分类号	A61B8/00		
代理人(译)	范巍		
外部链接	Espacenet SIPO		

摘要(译)

本发明提供了一种聚焦超声辐照相变纳米液滴的主被动超声复合成像方法及系统，对被动超声原始射频信号进行延时补偿处理后，分别通过两个互补的方波变迹函数和幅度相干系数得到互相关系数矩阵和被动幅度相干波束合成能量矩阵，二者点乘后得到高分辨被动超声成像结果；通过相变微泡群振动模型构造相变微泡群母小波，利用该母小波对主动超声原始射频信号延时叠加后所得的主动波束合成射频信号进行连续小波变换得到高对比主动超声成像结果；对高分辨被动与高对比主动超声成像结果复合之后得到复合图像。本发明能对聚焦超声辐照相变纳米液滴过程中的空化活动及辐照停止时的残留相变微泡进行全过程监控。

$$Apod_i^1=\begin{cases}1, & i=(j-1)A+1\sim jA,\ j=1,3,\ldots,N/A-1\\ 0, & i=(j-1)A+1\sim jA,\ j=2,4,\ldots,N/A\end{cases}$$