



(12)发明专利

(10)授权公告号 CN 109513123 B

(45)授权公告日 2020.05.19

(21)申请号 201811627424.5

(22)申请日 2018.12.28

(65)同一申请的已公布的文献号
申请公布号 CN 109513123 A

(43)申请公布日 2019.03.26

(73)专利权人 西安交通大学
地址 710049 陕西省西安市碑林区咸宁西路28号

(72)发明人 万明习 路舒宽 李任晏

(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 8/08(2006.01)

(56)对比文件

CN 103267800 A,2013.08.28,
CN 103267800 A,2013.08.28,
CN 108324324 A,2018.07.27,
WO 2017126037 A1,2017.07.27,
US 9743909 B1,2017.08.29,
Y. Kurosawa.3-D Finite Element
Analysis on Brain Injury Mechanism.《30th
Annual International IEEE EMBS
Conference》.2008,
Costas D. Arvanitis.Transcranial
Assessment and Visualization.《IEEE
TRANSACTIONS ON MEDICAL IMAGING》.2015,
宗瑜瑾 路舒宽 万明习.“看清”颅内血
管——高分辨率经颅超声诊疗系统.《中国医学
物理学杂志》.2016,

审查员 付庆庆

权利要求书3页 说明书7页 附图3页

(54)发明名称

一种基于半球阵的高分辨三维被动空化成像方法

(57)摘要

本发明提供了一种基于半球阵的高分辨三维被动空化成像方法:对超声半球阵换能器被动接收到的空化信号进行延时,构造协方差矩阵并对其进行对角加载处理,根据对角加载后的协方差矩阵计算最优加权向量,利用最优加权向量对延时信号进行加权,对所得的延时加权信号进行组合、叠加,得到孔径自相关输出信号,然后从中提取二次谐波分量,计算得到三维成像区域内成像位置的空化强度,进行线性插值和对数压缩,从而得到高分辨率的三维被动空化图像。本发明能够有效降低主瓣宽度和旁瓣水平,克服了现有半球阵被动空化成像方法在空间分辨性能方面的不足。

1. 一种基于半球阵的高分辨三维被动空化成像方法,其特征在于:包括以下步骤:

步骤一:计算感兴趣的三维成像区域内任意成像位置和超声半球阵换能器每个阵元位置之间的距离;采集超声半球阵换能器各阵元被动接收的空化信号;

步骤二:根据感兴趣的三维成像区域内某个成像位置和超声半球阵换能器每个阵元位置之间的距离,对所述空化信号进行延时处理,得延时信号,利用延时信号构造协方差矩阵,对该协方差矩阵进行对角加载,根据对角加载后的协方差矩阵和导向向量计算最优加权向量;

步骤三:利用所述最优加权向量对所述延时信号进行加权,得到超声半球阵换能器各阵元的延时加权信号,将超声半球阵换能器中两两阵元的延时加权信号相乘并做符号化、绝对值化及开方处理得到组合信号,对超声半球阵换能器每个阵元的所有组合信号进行叠加得到该阵元的加和信号,然后对所有的加和信号进行叠加,得到孔径自相关的输出信号;

步骤四:从所述孔径自相关的输出信号中提取出二次谐波分量,对该二次谐波分量的平方在一定的空化信号采集时间区间内进行积分,得到所述某个成像位置的空化强度;

步骤五:重复步骤二至步骤四,直至得到感兴趣的三维成像区域内所有成像位置的空化强度,根据该空化强度得到三维被动空化图像。

2. 根据权利要求1所述一种基于半球阵的高分辨三维被动空化成像方法,其特征在于:所述步骤一中,超声半球阵换能器工作在只被动接收而不发射的模式,并由可编程数字化超声成像平台采集超声半球阵换能器接收的空化信号 $p_i(t)$;所述感兴趣的三维成像区域内某个成像位置和超声半球阵换能器每个阵元位置之间的距离采用以下公式进行计算:

$$d_i(x, y, z) = \sqrt{(x_i - x)^2 + (y_j - y)^2 + (z_j - z)^2}$$

其中, x_i 、 y_i 和 z_i 是超声半球阵换能器的第 i 个阵元在以超声半球阵换能器球心为原点建立的直角坐标系中的空间坐标, x 、 y 和 z 是所述某个成像位置在该坐标系中的空间坐标, $i = 1, 2, \dots, N$, N 为超声半球阵换能器的阵元数目。

3. 根据权利要求1所述一种基于半球阵的高分辨三维被动空化成像方法,其特征在于:所述步骤二具体包括以下步骤:

(2.1) 对采集到的空化信号 $p_i(t)$ 进行延时处理,得到超声半球阵换能器每个阵元的延时信号:

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

其中, c 为介质中的声传播速度, $d_i(x, y, z)$ 为所述某个成像位置和超声半球阵换能器的第 i 个阵元位置之间的距离, $i = 1, 2, \dots, N$, N 为超声半球阵换能器的阵元数目;

(2.2) 根据步骤(2.1)所得的每个阵元的延时信号构建延时信号矩阵 $\mathbf{s}(t, x, y, z) = [s_1(t, x, y, z); s_2(t, x, y, z); \dots; s_N(t, x, y, z)]$,根据构建的延时信号矩阵在空化信号采集时间区间 $[T_0, T_0 + \Delta T]$ 内构造协方差矩阵:

$$\mathbf{R}(x, y, z) = \int_{T_0}^{T_0 + \Delta T} \mathbf{s}(t, x, y, z) \mathbf{s}(t, x, y, z)^T dt$$

其中, T_0 为空化信号采集的起始时刻, ΔT 为空化信号采集的时间长度;

(2.3) 对步骤(2.2)所得的协方差矩阵进行对角加载,根据对角加载后的协方差矩阵和导向向量计算自适应波束合成的最优加权向量:

$$\mathbf{w} = \frac{\tilde{\mathbf{R}}(x, y, z)^{-1} \mathbf{a}}{\mathbf{a}^T \tilde{\mathbf{R}}(x, y, z)^{-1} \mathbf{a}}$$

其中, $\tilde{\mathbf{R}}(x, y, z)$ 为对角加载后的协方差矩阵, \mathbf{a} 为导向向量。

4. 根据权利要求1所述一种基于半球阵的高分辨三维被动空化成像方法, 其特征在于: 所述步骤三具体包括以下步骤:

(3.1) 根据所述最优加权向量对超声半球阵换能器每个阵元的延时信号进行加权, 得到每个阵元的延时加权信号:

$$\tilde{s}_i(t, x, y, z) = w_i \cdot s_i(t, x, y, z)$$

其中, w_i 为最优加权向量 \mathbf{w} 的第 i 个元素, $s_i(t, x, y, z)$ 为第 i 个阵元的延时信号, $i = 1, 2, \dots, N$, N 为超声半球阵换能器的阵元数目;

(3.2) 将第 i 个阵元和第 j 个阵元的延时加权信号相乘:

$$\tilde{s}_{ij}(t, x, y, z) = \tilde{s}_i(t, x, y, z) \cdot \tilde{s}_j(t, x, y, z)$$

其中, $i = 1, 2, \dots, N-1$, $j = i+1, i+2, \dots, N$;

(3.3) 对步骤(3.2)所得相乘结果作符号化、绝对值化及开方处理, 得到组合信号 $\hat{s}_{ij}(t, x, y, z)$, 对第 i 个阵元的所有组合信号进行叠加, 得到第 i 个阵元的加和信号, $i = 1, 2, \dots, N-1$:

$$S_i(t, x, y, z) = \sum_{j=i+1}^N \hat{s}_{ij}(t, x, y, z)$$

(3.4) 对步骤(3.3)所得的 $N-1$ 个阵元的加和信号再次叠加, 得到孔径自相关的输出信号:

$$Q(t, x, y, z) = \sum_{i=1}^{N-1} S_i(t, x, y, z) \quad \circ$$

5. 根据权利要求1所述一种基于半球阵的高分辨三维被动空化成像方法, 其特征在于: 所述步骤四具体包括以下步骤:

(4.1) 利用带通滤波器从所述孔径自相关的输出信号中提取出二次谐波分量:

$$\tilde{Q}(t, x, y, z) = Q(t, x, y, z) * h(t)$$

其中, $Q(t, x, y, z)$ 为孔径自相关的输出信号, $h(t)$ 为带通滤波器的单位冲激响应, $*$ 代表信号的卷积运算;

(4.2) 对步骤(4.1)所得的二次谐波分量进行平方并在空化信号采集时间区间 $[T_0, T_0 + \Delta T]$ 内进行积分, 得到成像位置 (x, y, z) 的强度:

$$I(x, y, z) = \frac{1}{\Delta T} \int_{T_0}^{T_0 + \Delta T} \tilde{Q}(t, x, y, z)^2 dt$$

其中, x 、 y 和 z 是所述某个成像位置在以超声半球阵换能器球心为原点建立的直角坐标系中的空间坐标。

6. 根据权利要求1所述一种基于半球阵的高分辨三维被动空化成像方法, 其特征在于: 所述步骤五具体包括以下步骤: 遍历感兴趣的三维成像区域内的所有成像位置, 并按照步

骤二至步骤五得到对应成像位置的强度,然后对所有成像位置的强度做线性插值和对数压缩,得到三维被动空化图像,然后设置动态范围对该图像进行显示。

7.根据权利要求1所述一种基于半球阵的高分辨三维被动空化成像方法,其特征在于:所述感兴趣的三维成像区域以超声半球阵换能器的球心为中心。

一种基于半球阵的高分辨三维被动空化成像方法

技术领域

[0001] 本发明属于超声检测与超声成像技术领域,具体涉及一种基于半球阵的高分辨三维被动空化成像方法。

背景技术

[0002] 空化检测与成像技术一直是生物医学超声领域研究的热点,按照超声换能器工作模式可分为主动和被动两种,其中主动的空化检测与成像主要依靠单阵元超声换能器和诊断超声换能器发射聚焦波脉冲或平面波脉冲同时接收空化信号来实现。在空化的被动检测与成像中,超声换能器的发射被关闭,只是被动地接收空化信号,这样做避免了产生空化的聚焦超声信号对发射脉冲的影响,因此能够实现聚焦超声辐照过程中空化的实时检测与成像。

[0003] 空化的被动检测与成像中,一维时间检测主要是利用单阵元超声换能器被动接收空化信号,来研究空化活动随时间的变化规律,并根据傅里叶变换分析空化的频率特征,进一步利用频谱来计算空化剂量,从而实现空化的定量分析。然而,空化本身是一种随机的瞬态物理过程,一维时间检测无法得到空化在空间中的位置和分布,难以对聚焦超声治疗过程中产生的空化进行有效定征。因此,近年来发展了空化的二维平面成像技术,其是在一维时间检测的基础上发展而来的,主要通过关闭线阵换能器或相控阵换能器的发射,使所有阵元同时接收空化信号,再根据被动波束合成算法进行图像重建,即可对聚焦超声治疗中产生的空化进行实时监控与反馈,例如,当图像中空化较强时则考虑降低声能量,空化较弱时则考虑提高声能量,当空化在非治疗区域产生时则通过图像引导将聚焦超声治疗的焦点移动到治疗区域等等。

[0004] 二维被动空化成像技术仅能看到一个平面,不能实现空化在三维空间中的全方位监控,不适用于一些需要精细治疗的部位,例如颅脑。在经颅超声治疗,例如血脑屏障开放中,有学者采用超声半球阵换能器来实现经颅超声治疗过程中空化活动的实时监控,其中超声半球阵换能器比人类颅骨尺寸稍大,其几何焦距即为半球的圆心。超声半球阵换能器表面分布着若干个阵元,这些阵元将会采集经颅超声治疗过程中产生的空化信号,并采用波束合成算法进行重建,则可得到颅脑内空化在三维空间中的分布。而由于半球阵本身的孔径相比线阵换能器或相控阵换能器要大得多,因此其成像分辨性能相比一维阵列较好。然而现有半球阵被动空化成像方法采用的是最传统的延时、叠加和积分方法,该方法是一种盲波束合成方法,会产生较大的主瓣宽度和较高的旁瓣水平,降低了空化源定位的空间精确程度,从而不利于经颅聚焦超声治疗中空化的检测与成像。

[0005] 鉴于以上内容,很有必要提出一种基于半球阵的高分辨三维被动空化成像方法。

发明内容

[0006] 本发明的目的在于提供一种基于半球阵的高分辨三维被动空化成像方法。

[0007] 为了实现上述目的,本发明采用了以下技术方案:

[0008] 步骤一:计算感兴趣的三维成像区域内任意成像位置和超声半球阵换能器每个阵元位置之间的距离;采集超声半球阵换能器各阵元被动接收的空化信号并存储;

[0009] 步骤二:根据感兴趣的三维成像区域内某个成像位置和超声半球阵换能器每个阵元位置之间的距离,对步骤一所得的空化信号进行延时处理,得延时信号,利用延时信号构造协方差矩阵,对该协方差矩阵进行对角加载以提高其鲁棒性,根据对角加载后的协方差矩阵和导向向量计算最优加权向量;

[0010] 步骤三:利用步骤二所得的最优加权向量对延时信号进行加权,得到超声半球阵换能器各阵元的延时加权信号,将超声半球阵换能器中两两阵元的延时加权信号相乘并做符号化、绝对值化及开方处理得到组合信号,对超声半球阵换能器每个阵元的所有组合信号进行叠加得到该阵元的加和信号,然后对所有的加和信号进行叠加,得到孔径自相关的输出信号;

[0011] 步骤四:从步骤三所得的孔径自相关的输出信号中提取出二次谐波分量,对该二次谐波分量的平方在一定的时间区间内进行积分,得到感兴趣的三维成像区域内某个成像位置的空化强度;

[0012] 步骤五:重复步骤二至步骤四,直至得到感兴趣的三维成像区域内所有成像位置的空化强度,根据该空化强度得到三维被动空化图像。

[0013] 优选的,所述步骤一中,超声半球阵换能器工作在只被动接收而不发射的模式,将超声半球阵换能器与可编程数字化超声成像平台进行匹配,设置发射变迹和接收变迹参数,并由可编程数字化超声成像平台采集空化信号 $p_i(t)$;所述感兴趣的三维成像区域内某个成像位置 (x, y, z) 和超声半球阵换能器每个阵元位置 (x_i, y_i, z_i) 之间的距离采用以下公式进行计算:

$$[0014] \quad d_i(x, y, z) = \sqrt{(x_i - x)^2 + (y_i - y)^2 + (z_i - z)^2}$$

[0015] 其中,以超声半球阵换能器球心为原点,建立直角坐标系,计算超声半球阵换能器每个阵元的空间坐标 x_i, y_i 和 z_i , x, y 和 z 是所述某个成像位置在该坐标系中的空间坐标;其中, $i=1, 2, \dots, N$, N 为超声半球阵换能器的阵元数目。

[0016] 优选的,所述步骤二具体包括以下步骤:

[0017] (2.1)对采集到的空化信号 $p_i(t)$ 进行延时处理,得到每个阵元的延时信号:

$$[0018] \quad s_i(t, x, y, z) = p_i[t + d_i(x, y, z) / c]$$

[0019] 其中, c 为介质中的声传播速度;

[0020] (2.2)根据步骤(2.1)所得的每个阵元的延时信号构建延时信号矩阵 $s(t, x, y, z) = [s_1(t, x, y, z); s_2(t, x, y, z, t); \dots; s_N(t, x, y, z)]$,根据构建的延时信号矩阵在空化信号采集时间区间 $[T_0, T_0 + \Delta T]$ 内构造协方差矩阵:

$$[0021] \quad \mathbf{R}(x, y, z) = \int_{T_0}^{T_0 + \Delta T} \mathbf{s}(t, x, y, z) \mathbf{s}(t, x, y, z)^T dt$$

[0022] 其中, T_0 为空化信号采集的起始时刻, ΔT 为空化信号采集的时间长度;

[0023] (2.3)对步骤(2.2)所得的协方差矩阵进行对角加载,然后根据对角加载后的协方差矩阵和导向向量计算自适应波束合成的最优加权向量:

$$[0024] \quad \mathbf{w} = \frac{\tilde{\mathbf{R}}(x, y, z)^{-1} \mathbf{a}}{\mathbf{a}^T \tilde{\mathbf{R}}(x, y, z)^{-1} \mathbf{a}}$$

[0025] 其中, $\tilde{\mathbf{R}}(x, y, z)$ 为对角加载后的协方差矩阵, $\mathbf{a} = [1, 1, \dots, 1]^T$ 为 N 行 \times 1 列的导向向量。

[0026] 优选的, 所述步骤三具体包括以下步骤:

[0027] (3.1) 根据步骤 (2.3) 所得的最优加权向量对步骤 (2.1) 所得每个阵元的延时信号进行加权, 得到每个阵元的延时加权信号:

$$[0028] \quad \tilde{s}_i(t, x, y, z) = w_i \cdot s_i(t, x, y, z)$$

[0029] 其中, w_i 为步骤 (2.3) 所得最优加权向量 \mathbf{w} 的第 i 个元素, 其中 $i = 1, 2, \dots, N$, N 为超声半球阵换能器的阵元数目;

[0030] (3.2) 将第 i 个阵元和第 j 个阵元的延时加权信号相乘:

$$[0031] \quad \tilde{s}_{ij}(t, x, y, z) = \tilde{s}_i(t, x, y, z) \cdot \tilde{s}_j(t, x, y, z)$$

[0032] 其中, $i = 1, 2, \dots, N-1$, $j = i+1, i+2, \dots, N$;

[0033] (3.3) 对步骤 (3.2) 所得相乘结果作符号化、绝对值化及开方处理, 得到组合信号 $\hat{s}_{ij}(t, x, y, z)$, 对第 i 个阵元的所有组合信号进行叠加, 得到第 i 个阵元 ($i = 1, 2, \dots, N-1$) 的加和信号:

$$[0034] \quad S_i(t, x, y, z) = \sum_{j=i+1}^N \hat{s}_{ij}(t, x, y, z)$$

[0035] (3.4) 对步骤 (3.3) 所得的 $N-1$ 个阵元的加和信号再次叠加, 得到孔径自相关的输出信号:

$$[0036] \quad Q(t, x, y, z) = \sum_{i=1}^{N-1} S_i(t, x, y, z)$$

[0037] 优选的, 所述步骤四具体包括以下步骤:

[0038] (4.1) 利用带通滤波器从步骤 (3.4) 所得的孔径自相关的输出信号中提取出二次谐波分量, 即:

$$[0039] \quad \tilde{Q}(t, x, y, z) = Q(t, x, y, z) * h(t)$$

[0040] 其中, $h(t)$ 为带通滤波器的单位冲激响应, $*$ 代表信号的卷积运算;

[0041] (4.2) 对步骤 (4.1) 所得的二次谐波分量进行平方并在空化信号采集时间区间 $[T_0, T_0 + \Delta T]$ 内进行积分, 得到成像位置 (x, y, z) 的强度:

$$[0042] \quad I(x, y, z) = \frac{1}{\Delta T} \int_{T_0}^{T_0 + \Delta T} \tilde{Q}(t, x, y, z)^2 dt$$

[0043] 优选的, 所述步骤五具体包括以下步骤: 遍历感兴趣的三维成像区域内的所有成像位置, 则可得到所有成像位置的强度, 对其做线性插值和对数压缩, 得到三维被动空化图像, 然后设置动态范围对图像进行显示。

[0044] 优选的, 所述感兴趣的三维成像区域以超声半球阵换能器的球心为中心。

[0045] 本发明的有益效果体现在:

[0046] 本发明是一种针对超声半球阵换能器的高分辨三维被动空化成像技术,针对现有半球阵被动空化成像方法的不足,通过对半球阵被动接收的空化信号进行延时处理,进而根据延时信号构造协方差矩阵并对其做对角加载处理以提高鲁棒性,然后求得最优加权向量对每个阵元的延时信号进行加权;之后对延时加权信号进行两两组合、叠加得到孔径自相关输出信号,并从中提取出二次谐波分量,使x、y和z三个方向的主瓣宽度和旁瓣水平得到有效降低,半球阵三维被动空化成像的空间分辨性能得到显著提高,从而使得空化源在三维空间中的定位更加准确。

附图说明

[0047] 图1是本发明中超声半球阵换能器的三维视图(a)和俯视图(b)。

[0048] 图2是本发明中基于半球阵的高分辨三维被动空化成像方法流程图。

[0049] 图3是本发明中半球阵采集到的空化信号(a)及协方差矩阵(b)、对角加载后的协方差矩阵(c)、延时加权信号的频谱分布(d)、孔径自相关输出信号的频谱分布(e)、提取出的二次谐波分量(f)的结果。

[0050] 图4是根据现有方法和本发明提出方法得到的三维被动空化成像结果。

[0051] 图5是根据三维被动空化成像结果得到的分辨率曲线。

具体实施方式

[0052] 下面结合附图和实施例对本发明作进一步的详细说明。

[0053] 参见图1,超声半球阵换能器(简称半球阵或半球阵换能器)的半径为15cm,阵元数目为128,可和现有超声成像平台直接进行匹配;与超声线阵换能器不同,超声半球阵换能器的所有阵元并不是完全等间隔分布,图1中所示的两两阵元之间的间距范围为3.0~3.5cm。

[0054] 参见图2,基于半球阵的高分辨三维被动空化成像方法具体步骤如下:

[0055] (1) 将超声半球阵换能器与可编程数字化超声成像平台进行匹配,设置发射变迹和接收变迹参数,使半球阵换能器工作在只被动接收而不发射的模式,采集空化信号 $p_i(t)$,其中 $i=1,2,\dots,N$,N为半球阵换能器的阵元数目;

[0056] (2) 以半球阵球心为原点,建立直角坐标系,计算半球阵中每个阵元的空间坐标 x_i 、 y_i 和 z_i :

$$[0057] \quad x_i = r \sin \theta_i \cos \varphi_i$$

$$[0058] \quad y_i = r \sin \theta_i \sin \varphi_i$$

$$[0059] \quad z_i = r \cos \theta_i$$

[0060] 其中,r为半球阵的半径, θ_i 和 φ_i 分别为第i个阵元的方位角和俯仰角;

[0061] (3) 将感兴趣的三维成像区域设置为以半球阵原点为中心的立方体区域内,立方体边长一般可选择为10mm~30mm,计算三维成像区域内某个成像位置(x,y,z)和半球阵每个阵元位置 (x_i, y_i, z_i) 之间的距离:

$$[0062] \quad d_i(x, y, z) = \sqrt{(x_i - x)^2 + (y_i - y)^2 + (z_i - z)^2}$$

[0063] (4) 对采集到的空化信号进行延时处理,得到每个阵元的延时信号:

[0064] $s_i(t, x, y, z) = p_i [t + d_i(x, y, z) / c]$

[0065] 其中, c 为介质中的声传播速度;

[0066] (5) 根据步骤 (4) 所得的每个阵元的延时信号构建延时信号矩阵 $\mathbf{s}(t, x, y, z) = [s_1(t, x, y, z); s_2(t, x, y, z, t); \dots; s_N(t, x, y, z)]$, 在空化信号采集时间区间 $[T_0, T_0 + \Delta T]$ 内构造协方差矩阵:

$$[0067] \quad \mathbf{R}(x, y, z) = \int_{T_0}^{T_0 + \Delta T} \mathbf{s}(t, x, y, z) \mathbf{s}(t, x, y, z)^T dt$$

[0068] 其中, T_0 为空化信号采集的起始时刻, ΔT 为空化信号采集的时间长度, $[\cdot]^T$ 代表矩阵的转置;

[0069] (6) 当采样数据较少时, 协方差矩阵估计存在误差, 造成自适应波束合成的主瓣失真和旁瓣升高; 为了在有限的采样条件下能得到鲁棒的协方差矩阵, 对步骤 (5) 所得的协方差矩阵进行对角加载:

$$[0070] \quad \tilde{\mathbf{R}}(x, y, z) = \mathbf{R}(x, y, z) + \varepsilon \mathbf{I}$$

[0071] 其中, ε 设置为协方差矩阵 $\mathbf{R}(x, y, z)$ 的迹的 δ 倍, 即 $\varepsilon = \delta \cdot \text{trace}\{\mathbf{R}(x, y, z)\}$, $\text{trace}\{\cdot\}$ 代表矩阵的迹运算, \mathbf{I} 是 N 行 \times N 列的单位矩阵;

[0072] (7) 根据步骤 (6) 所得的对角加载后的协方差矩阵 $\tilde{\mathbf{R}}(x, y, z)$ 计算自适应波束合成的最优加权向量:

$$[0073] \quad \mathbf{w} = \frac{\tilde{\mathbf{R}}(x, y, z)^{-1} \mathbf{a}}{\mathbf{a}^T \tilde{\mathbf{R}}(x, y, z)^{-1} \mathbf{a}}$$

[0074] 其中, $\mathbf{a} = [1, 1, \dots, 1]^T$ 为 N 行 \times 1 列的导向向量, $[\cdot]^{-1}$ 代表矩阵的求逆;

[0075] (8) 根据步骤 (7) 所得的最优加权向量对步骤 (4) 所得每个阵元的延时信号进行加权, 得到每个阵元的延时加权信号:

$$[0076] \quad \tilde{s}_i(t, x, y, z) = w_i \cdot s_i(t, x, y, z)$$

[0077] 其中, w_i 为步骤 (7) 所得最优加权向量 \mathbf{w} 的第 i 个元素, $i = 1, 2, \dots, N$, N 为超声半球阵换能器的阵元数目;

[0078] (9) 将第 i 个阵元和第 j 个阵元的延时加权信号相乘:

$$[0079] \quad \tilde{s}_{ij}(t, x, y, z) = \tilde{s}_i(t, x, y, z) \cdot \tilde{s}_j(t, x, y, z)$$

[0080] 其中, $i = 1, 2, \dots, N-1$, $j = i+1, i+2, \dots, N$;

[0081] (10) 由于步骤 (9) 所述延时加权信号相乘之后的结果与第 i 个阵元的延时加权信号 $\tilde{s}_i(t, x, y, z)$ 的幅度单位并不一致, 因此对该结果作符号化、绝对值化及开方处理, 得到组合信号:

$$[0082] \quad \hat{s}_{ij}(t, x, y, z) = \text{sign}\{\tilde{s}_{ij}(t, x, y, z)\} \cdot \sqrt{|\tilde{s}_{ij}(t, x, y, z)|}$$

[0083] (11) 由步骤 (10) 可知, 对于第 1 个阵元将会有 $N-1$ 个组合信号, 第 2 个阵元有 $N-2$ 个组合信号, 依此类推, 第 $N-1$ 个阵元有 1 个组合信号。对第 i 个阵元的所有组合信号进行叠加, 得到第 i 个阵元 ($i = 1, 2, \dots, N-1$) 的加和信号:

$$[0084] \quad S_i(t, x, y, z) = \sum_{j=i+1}^N \hat{s}_{ij}(t, x, y, z)$$

[0085] (12) 对步骤 (11) 所得的N-1个阵元的加和信号再次叠加,这相当于对半球阵换能器的接收孔径做自相关处理(在本发明中称之为孔径自相关),从而使得有效孔径增大;孔径自相关的输出信号为:

$$[0086] \quad Q(t, x, y, z) = \sum_{i=1}^{N-1} S_i(t, x, y, z)$$

[0087] (13) 由于步骤 (9) 所述的第i个阵元和第j个阵元的延时加权信号具有相似的频谱分布,因此相乘之后将会分别产生直流分量和二次谐波分量,为了提高成像分辨率,选用二次谐波分量进行成像;

[0088] (14) 设计一带通滤波器,从步骤 (12) 所得的孔径自相关的输出信号中提取出二次谐波分量,即:

$$[0089] \quad \tilde{Q}(t, x, y, z) = Q(t, x, y, z) * h(t)$$

[0090] 其中, $h(t)$ 为带通滤波器的单位冲激响应,*代表信号的卷积运算;

[0091] (15) 对步骤 (14) 所得的二次谐波分量进行平方并在空化信号采集时间区间 $[T_0, T_0 + \Delta T]$ 内进行积分,得到成像位置 (x, y, z) 的强度:

$$[0092] \quad I(x, y, z) = \frac{1}{\Delta T} \int_{T_0}^{T_0 + \Delta T} \tilde{Q}(t, x, y, z)^2 dt$$

[0093] (16) 重复步骤 (3) ~ (15),直到感兴趣的三维成像区域内的所有成像位置的强度均计算完毕,对所有成像位置的强度做线性插值和对数压缩,得到三维被动空化图像,然后设置动态范围对图像进行显示。

[0094] 以下分别采用半高宽下降的百分比和旁瓣水平下降的幅度来定量评价本发明提出方法在空间分辨率提高和旁瓣水平抑制两方面相比现有方法的优势。

[0095] 从上述三维被动空化图像中寻找强度最大值所在的三维坐标 (x_0, y_0, z_0) ,据此得到x、y和z三个方向的分辨率曲线。为评价本发明提出方法在主瓣宽度降低方面的优势,首先计算所得分辨率曲线的半高宽(强度最大值下降到-6dB时所对应的宽度),然后计算本发明提出方法相比现有方法半高宽下降的百分比;为评价本发明提出方法在旁瓣水平抑制方面的优势,根据所得的分辨率曲线获得x、y和z三个方向的旁瓣水平,然后计算本发明提出方法相比现有方法旁瓣水平下降的幅度。

[0096] 参见图3,图3(a)为采集到的空化信号,其中,聚焦超声辐照频率设置为0.3MHz,采样率设置为20MHz,采样点数设置为4000点;图3(b)~图3(f)均为成像位置为(0mm, 0mm, 0mm)时所得结果,其中图3(b)为根据步骤(5)构造的协方差矩阵,图3(c)为根据步骤(6)所述的对角加载方法得到的协方差矩阵(其中 δ 设置为0.1),图3(d)为步骤(8)所述延时加权信号的频谱分布,结果显示空化信号为稳态空化信号(中心频率为0.6MHz),图3(e)为步骤(12)所述孔径自相关输出信号的频谱分布,很显然,孔径自相关输出信号具有明显的直流分量和二次谐波分量(1.2MHz),图3(f)为根据步骤(14)提取出来的二次谐波分量。

[0097] 参见图4,以位于(0mm, 0mm, 0mm)的空化源所得的成像结果为例,图4(a)、图4(b)和图4(c)分别为根据本发明提出方法所得的半球阵三维被动空化图像的x-y切面、x-z切面和

y-z切面,图4(d)、图4(e)和图4(f)分别为根据现有方法所得的半球阵三维被动空化图像的x-y切面、x-z切面和y-z切面,图像显示的动态范围设置为80dB;显然,本发明提出的方法能够有效地提高成像质量,空化源在三维空间中的定位更加精准。

[0098] 参见图5,以位于(0mm,0mm,0mm)的空化源所得的分辨率曲线为例,图5(a)、图5(b)、图5(c)分别为x、y和z三个方向的分辨率曲线,其中每幅图中分别给出了现有方法和本发明方法的结果。相比现有方法,本发明提出方法的半高宽更小,旁瓣水平更低;经过计算,现有方法的x、y和z三个方向的半高宽分别为0.548mm、0.557mm和1.120mm,而本发明提出方法的半高宽分别为0.180mm、0.185mm和0.566mm,也就是说半高宽分别降低67.2%、66.8%和49.5%;现有方法的x、y和z三个方向的旁瓣水平分别为-99.4dB、-99.8dB和-94.4dB,而本发明提出方法的旁瓣水平分别为-51.0dB、-49.5dB和-46.6dB,也就是说旁瓣水平分别降低-48.4dB、-50.3dB和-47.8dB,以上结果定量地证明了本发明的优越性。

[0099] 本发明具有以下优点:

[0100] 本发明摒弃了传统的半球阵三维被动空化成像方法,而是将最小方差自适应波束合成和孔径自相关有机地结合起来,其中自适应波束合成通过对角加载提高了协方差矩阵的鲁棒性,并根据得到的最优加权向量对每个阵元的信号赋予一个合适的权系数,使得成像方法的分辨率得到提高;而孔径自相关处理相当于将超声半球阵换能器的有效接收孔径进一步增大,同时延时加权信号相乘产生高频的二次谐波分量,孔径的增大和频率的提高使得成像分辨率再次得到提高,因此最终实现了高分辨的三维被动空化成像。

[0101] 本发明提出的基于半球阵的高分辨三维被动空化成像方法可用于经颅超声治疗,如脑部肿瘤超声热消融、经颅超声溶栓、血脑屏障开放等方面的全方位实时监控,对于调整治疗参数、优化治疗方案、分析评价治疗效果等具有重要的意义。

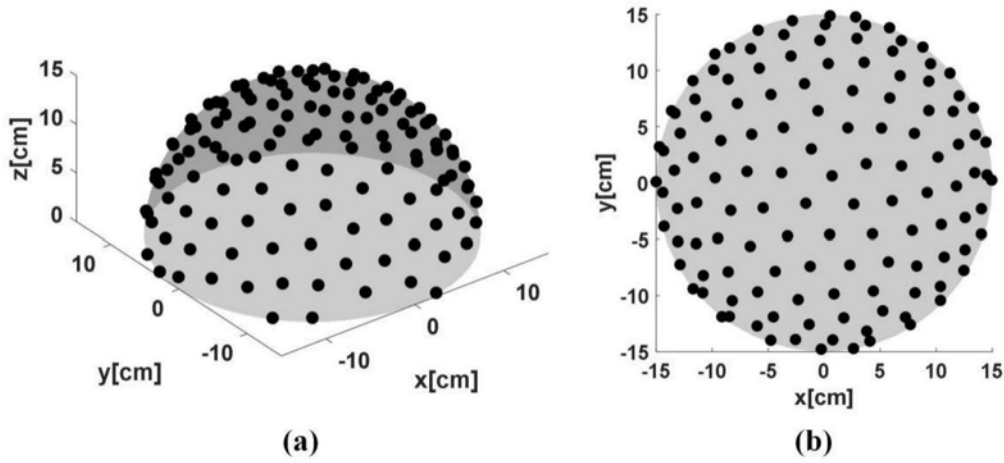


图1

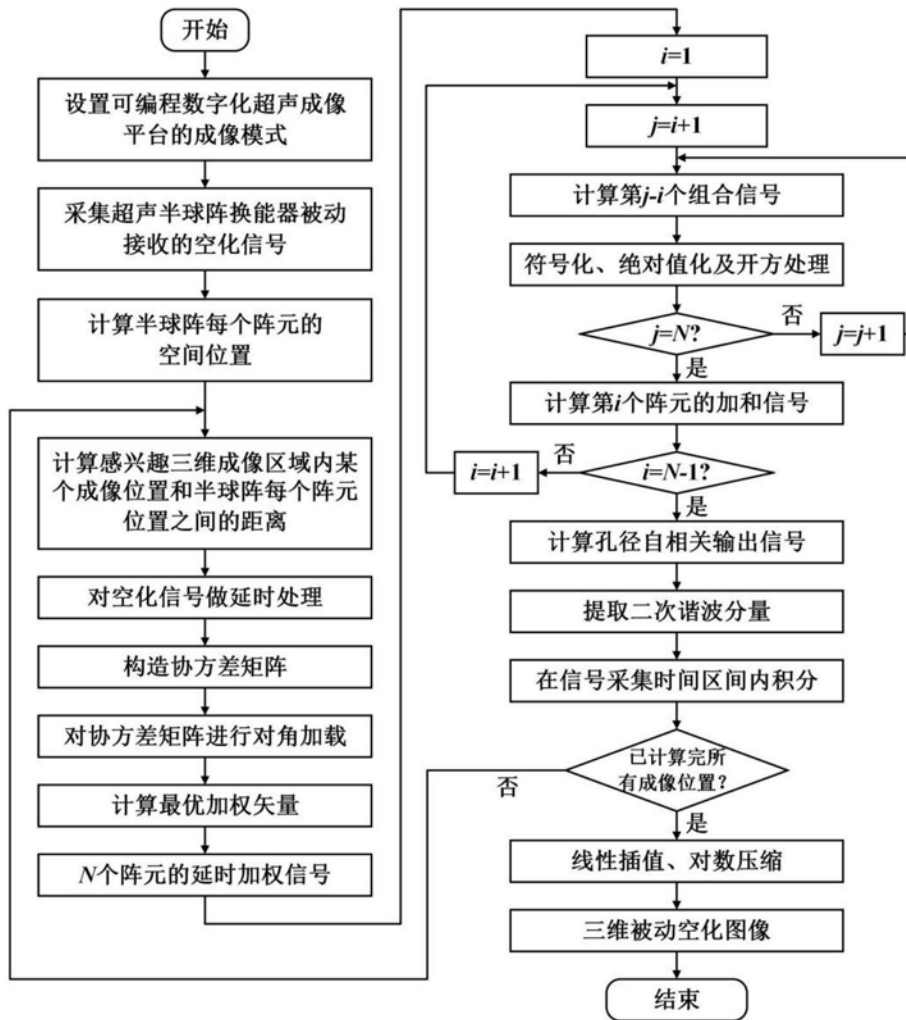


图2

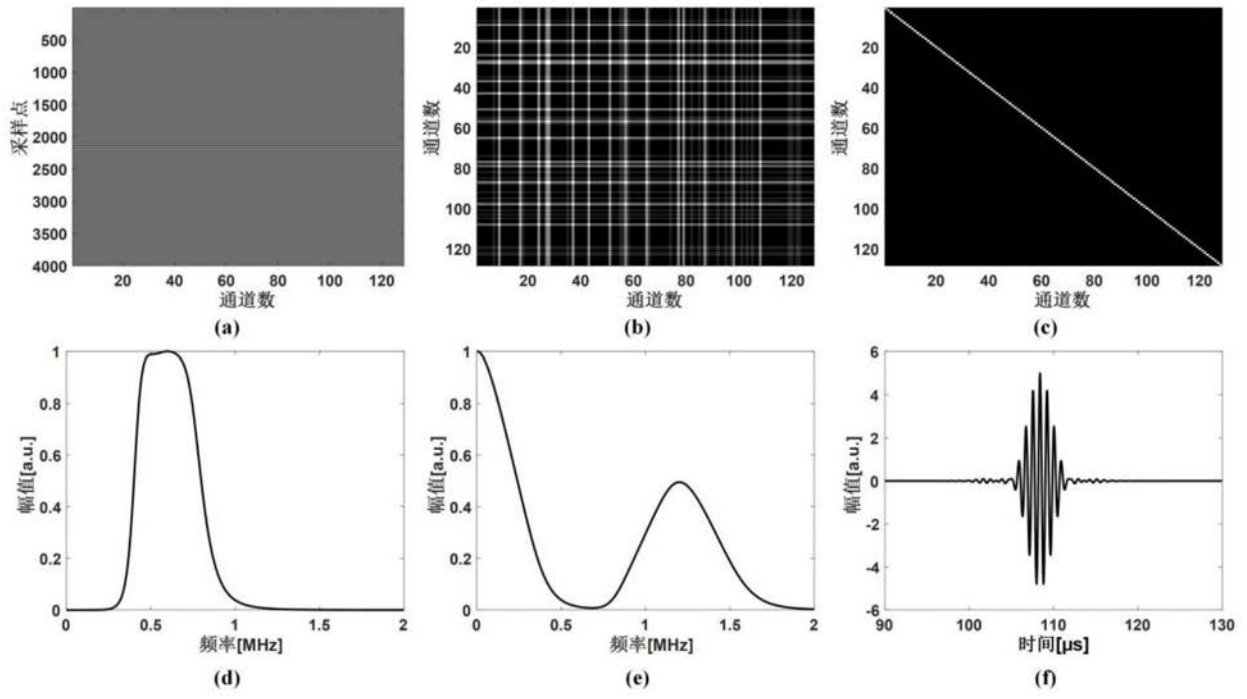


图3

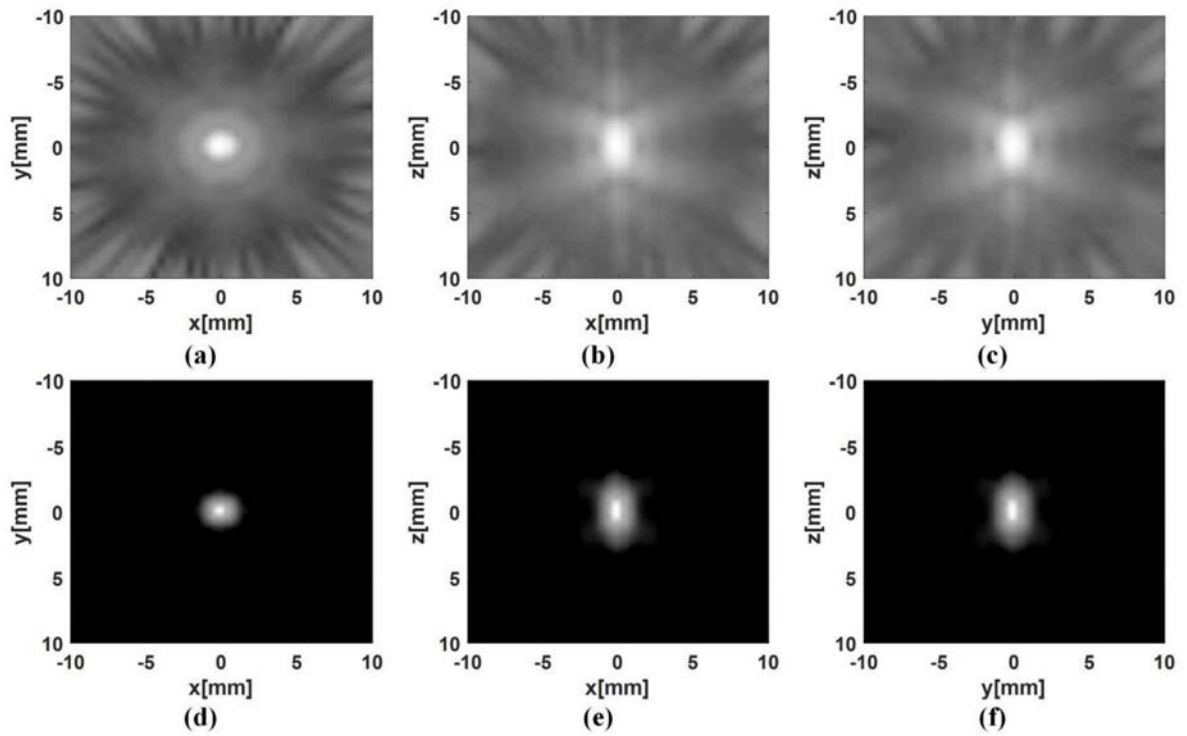


图4

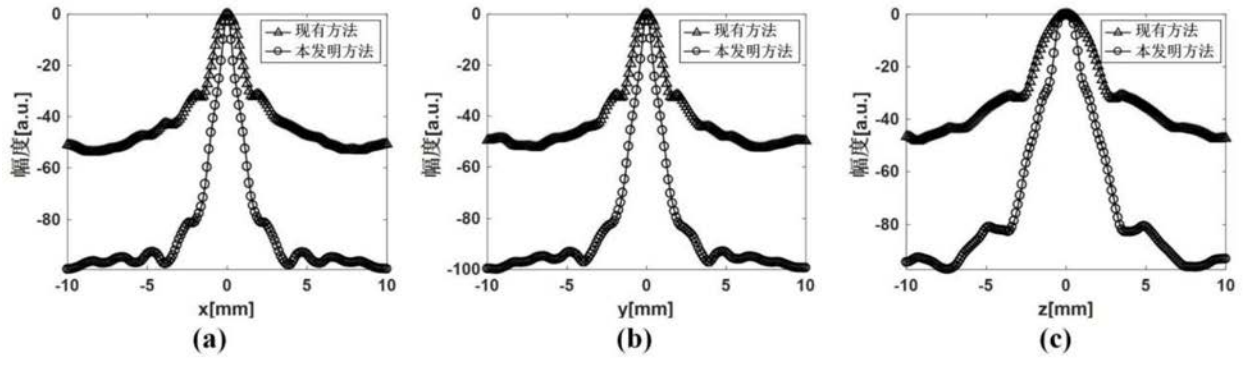


图5

专利名称(译)	一种基于半球阵的高分辨三维被动空化成像方法		
公开(公告)号	CN109513123B	公开(公告)日	2020-05-19
申请号	CN201811627424.5	申请日	2018-12-28
[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 李任晏		
发明人	万明习 路舒宽 李任晏		
IPC分类号	A61B8/08		
CPC分类号	A61N7/02 A61N2007/0021 G01N29/02 G01N2291/022		
代理人(译)	范巍		
其他公开文献	CN109513123A		
外部链接	Espacenet SIPO		

摘要(译)

本发明提供了一种基于半球阵的高分辨三维被动空化成像方法：对超声半球阵换能器被动接收到的空化信号进行延时，构造协方差矩阵并对其进行对角加载处理，根据对角加载后的协方差矩阵计算最优加权向量，利用最优加权向量对延时信号进行加权，对所得的延时加权信号进行组合、叠加，得到孔径自相关输出信号，然后从中提取二次谐波分量，计算得到三维成像区域内成像位置的空化强度，进行线性插值和对数压缩，从而得到高分辨率的三维被动空化图像。本发明能够有效降低主瓣宽度和旁瓣水平，克服了现有半球阵被动空化成像方法在空间分辨性能方面的不足。

$$d_j(x_j, y_j, z_j) = \sqrt{(x_j - x)^2 + (y_j - y)^2 + (z_j - z)^2}$$