



(12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 108700651 B

(45) 授权公告日 2022.03.29

(21) 申请号 201580085761.4

(51) Int.CI.

(22) 申请日 2015.12.01

G01S 7/52 (2006.01)

(65) 同一申请的已公布的文献号

申请公布号 CN 108700651 A

(56) 对比文件

(43) 申请公布日 2018.10.23

US 6048315 A, 2000.04.11

(85) PCT国际申请进入国家阶段日

US 6213946 B1, 2001.04.10

2018.07.27

CN 102429684 A, 2012.05.02

(86) PCT国际申请的申请数据

CN 102393520 A, 2012.03.28

PCT/IB2015/002652 2015.12.01

US 2015269417 A1, 2015.09.24

(87) PCT国际申请的公布数据

邹强鑫.超声数字波束合成方法的研究与优

W02017/093778 EN 2017.06.08

化设计.《中国优秀博硕士学位论文全文数据库
(硕士)信息科技辑》.2015, (第01期), 第7-48页.

(73) 专利权人 声科影像有限公司

Changhan Yoon et al..Orthogonal

地址 法国爱昂普罗旺斯

Quadratic Chirp Signals for Simultaneous
Multi-Zone Focusing in Medical Ultrasound

(72) 发明人 克里斯托菲·弗拉斯奇尼

Imaging.《IEEE Transactions on
Ultrasonics, Ferroelectrics, and(74) 专利代理机构 北京国昊天诚知识产权代理
有限公司 11315Frequency Control》.2012, 第59卷 (第5期), 第
1061-1069页.

代理人 南霆 李有财

审查员 许铃健

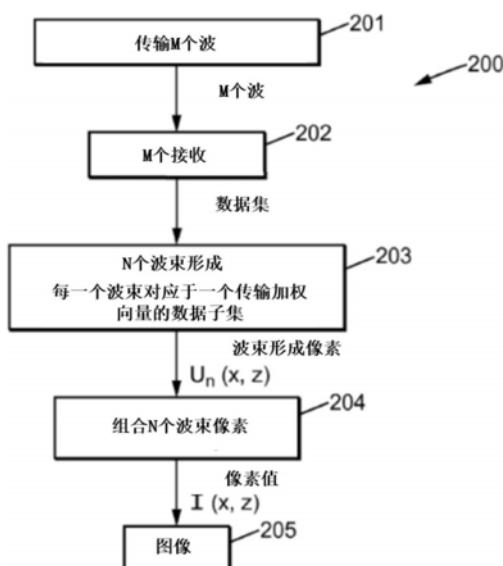
权利要求书3页 说明书13页 附图8页

(54) 发明名称

成像方法、实施所述方法的装置以及计算机
可读存储介质

(57) 摘要

适用于通过换能器阵列(2)来生成介质内的区域的图像的成像方法,包括在介质内传输多个波的传输步骤(201)、用于采集数据集的接收步骤(202)、根据不同的发送加权向量来提供多个波束成形像素值的波束成形步骤(203),以及将波束成形像素值组合到图像中每个像素的像素值中的组合步骤(204)。发送加权向量(W_{Tn})互不相同且彼此相互正交。



1. 适用于生成介质内的区域的图像的成像方法,其中,所述方法通过连接着换能器阵列的处理单元来实施,所述换能器阵列与所述介质有关,所述方法包括以下步骤:

(a) 传输步骤,其中,第一数量(M)个波通过换能器在介质中传输,M是第一数量,即介质中传输波的数量,

(b) 接收步骤,其中,数据集通过对波响应的所述换能器来采集,

(c) 波束成形步骤,其中,数据集通过第二数量个波束成形处理来处理,所述波束成形处理用于提供至少一部分图像的波束成形像素值($U_n(x, z)$),每个波束成形处理使用波束成形像素值运算中的发送加权向量(W_{Tn}),N是第二数量,即发送加权向量的数量,以及,

(d) 组合步骤,其中,组合所述第二数量的波束成形像素值,以便提供图像内像素的像素值($I(x, z)$),而且

其中,发送加权向量(W_{Tn})互不相同且彼此相互正交,

指标数i的发送加权向量正交于指标数j的发送加权向量,指标数i不同于指标数j,而且 $\sum_{l=1}^L W_{Ti}(l) \cdot W_{Tj}(l) = 0$,L是发送加权向量(W_{Tn})的组件的数量,其中,所述发送加权向量(W_{Tn})应用于波束成形步骤(c)中,以及,

-在波束成形步骤(c)过程中,波束成形处理是合成波束成形,其中,波束成形的像素值($U_n(x, z)$)可由以下公式计算:

$$U_n(x, z) = \sum_{m=1}^M W_{Tn}[m] \sum_{l=1}^{12} W_R[l] DS(k - \tau(x, z, l, m), l, m)$$

式中:

$DS(k, l, m)$ 是数据集的矩阵,

W_R 是接收加权向量,

$\tau(x, z, l)$ 是适合于波束成形处理的延迟函数,

l是阵列中换能器的指标数,介于11至12之间,构成线波束成形的孔径,

k是超时样本的指标数,

m是介于1至M之间的指标数,M是第一数量,即介质中传输波的数量,

n是介于1至N之间的指标数,N是第二数量,即发送加权向量的数量,

W_{Tn} 是发送加权向量,

x,z是图像内像素的坐标。

2. 根据权利要求1所述的成像方法,其特征在于,所述合成波束成形处理选自包括合成孔径聚焦技术(SAFT)波束成形处理、虚拟换能器SAFT波束成形处理、空间编码SAFT波束成形处理、圆形波合成波束成形处理、平面波合成波束成形处理的列表中。

3. 根据权利要求1所述的成像方法,在组合步骤(d)过程中,图像的像素值($I(x, z)$)可由以下公式计算:

$$I(x, z) = \sum_{n=1}^N |U_n(x, z) + iHT\{U_n(x, z)\}|^2$$

式中:

i是复单位虚数,

n是介于1至N之间的指标数,N是第二数量,即发送加权向量的数量,
 $|X|$ 是X的模数,
 $HT\{X\}$ 是X的希尔伯特变换,
 $U_n(x, z)$ 是所述第二数量的波束成形像素值。

4. 根据权利要求1所述的成像方法,其特征在于,所述发送加权向量(W_{Tn})通过选自包括Riedel-Sidorenko函数、离散椭球函数和哈达玛函数的列表中的正交函数来确定。

5. 根据权利要求1所述的成像方法,其特征在于,所述换能器是适用于发送或接收超声波的超声换能器,以及所述方法生成在介质内的区域的超声图像。

6. 根据权利要求1所述的成像方法,进一步包括以下步骤:

-初始成像步骤,其中,所述区域的第一个图像通过所述处理单元和阵列来确定,

-评估步骤,其中,度量值根据第一个图像的像素来确定,

-成像步骤,其中,如果度量值包含在第一个范围中,则不使用发送加权向量来计算图像中的像素值,如果度量值包含在与所述第一个范围不同的第二个范围中,则使用发送加权向量来计算图像中的像素值,所述发送加权向量互不相同且彼此相互正交。

7. 根据权利要求6所述的成像方法,其特征在于,确定度量值,以便区分与显著反射信号相对应的第一个图像中的像素和与非显著散斑信号相对应的第一个图像中的像素。

8. 根据权利要求7所述的成像方法,其特征在于,所述度量值通过自相关函数的运算来确定。

9. 根据权利要求8所述的成像方法,其特征在于,所述度量值是关于介于10度至30度之间所滞后的自相关函数的平均值。

10. 适用于生成介质内的区域的图像的装置,包括连接着与所述介质有关的换能器阵列的处理单元,以及,

其中,阵列和处理单元实施以下步骤:

(a) 传输步骤,其中,第一数量(M)个波通过换能器在介质内传输,M是第一数量,即介质中传输波的数量,

(b) 接收步骤,其中,数据集通过对波响应的所述换能器来采集,以及,其中,所述处理单元实施以下步骤:

(c) 波束成形步骤,其中,所述数据集通过第二数量个波束成形处理来处理,所述波束成形处理用于提供至少一部分图像的波束成形像素值($U_n(x, z)$),每个波束成形处理使用波束成形像素值运算中的发送加权向量(W_{Tn}),N是第二数量,即发送加权向量的数量,以及,

(d) 组合步骤,其中,组合所述第二数量的波束成形像素值,以便提供图像中每个像素的像素值($I(x, z)$),以及

其中,所述发送加权向量(W_{Tn})互不相同且彼此相互正交,

指标数i的发送加权向量正交于指标数j的发送加权向量,指标数i不同于指标数j,而且 $\sum_{l=1}^L W_{Ti}(l)W_{Tj}(l) = 0$,L是发送加权向量(W_{Tn})的组件的数量,其中,所述发送加权向量(W_{Tn})

应用于波束成形步骤(c)过程中,以及,

-在波束成形步骤(c)过程中,所述波束成形处理是合成波束成形,其中,波束成形像素值($U_n(x, z)$)可由以下公式计算:

$$U_n(x, z) = \sum_{m=1}^M W_{Tn}[m] \sum_{l=1}^{l2} W_R[l] DS(k - \tau(x, z, l, m), l, m)$$

式中：

DS(k, l, m) 是数据集的矩阵，

W_R是接收加权向量，

τ(x, z, l) 是适合于波束成形处理的延迟函数，

l是阵列中换能器的指标数, 介于11至12之间, 构成线波束成形的孔径，

k是超时样本的指标数，

m是介于1至M之间的指标数,M是第一数量, 即介质内传输波的数量，

n是介于1至N之间的指标数,N是第二数量, 即发送加权向量的数量，

W_{Tn}是发送加权向量，

x, z是图像内像素的坐标。

11. 根据权利要求10所述的装置, 其特征在于, 合成波束成形处理选自包括合成孔径聚焦技术(SAFT) 波束成形处理、虚拟换能器SAFT波束成形处理、空间编码SAFT波束成形处理、圆形波合成波束成形处理、平面波合成波束成形处理的列表中。

12. 根据权利要求10所述的装置, 进一步实施以下步骤：

- 初始成像步骤, 其中, 区域的第一个图像通过所述处理单元和阵列来确定, 以及,

- 评估步骤, 其中, 度量值根据第一个图像的像素来确定,

- 成像步骤, 其中, 如果度量值包含在第一个范围中, 则不使用发送加权向量来计算图像中的像素值, 如果度量值包含在与所述第一个范围不同的第二个范围中, 则使用发送加权向量来计算图像中的像素值, 所述发送加权向量互不相同且彼此相互正交。

13. 计算机可读存储介质, 在所述计算机可读存储介质上储存计算机程序, 在计算机执行所述程序时, 所述计算机程序包括执行根据权利要求1所述的成像方法的步骤的指令。

成像方法、实施所述方法的装置以及计算机可读存储介质

技术领域

[0001] 本发明涉及成像方法以及实施所述方法的装置,尤其是用于医学成像的装置。

背景技术

[0002] 本发明更准确地涉及适用于在介质内生成区域图像的成像方法,更准确地说,超声成像方法。

[0003] 所述方法通过连接着与所述介质有关的换能器阵列的处理单元来实施。

[0004] 由响应入射波的反射波所产生的这种类型的图像通常包括斑点噪声,所述斑点噪声与所讨论区域的反射波所产生的随机波动相对应。该斑点噪声会导致图像判读的困难。

[0005] 斑点噪声可以通过使多个图像平均化来减少,因为每个图像的斑点噪声会不同于所述多个图像之中的另一个图像的斑点噪声。

[0006] 最后,适用于平均化的图像可以通过从不同角度观察区域(空间复合)或者通过改变信号频率(频率复合)来获得。

[0007] 最终,为了获得平均化的图像,可以将多个不同的接收加权向量应用于接收波束成形。

[0008] 然而,这些方法都增加了要进行采集的数量,降低了帧速率,并且有时降低了生成图像的分辨率。

发明内容

[0009] 本发明的一个目的旨在提供适用于在介质内产生区域图像的另一种成像方法,该方法可减少斑点噪声且没有现有技术方法的缺点。

[0010] 为此目的,该方法包括以下步骤:

[0011] (a) 传输步骤,其中,第一数量个波通过换能器在介质中传输,

[0012] (b) 接收步骤,其中,数据集通过对波响应的所述换能器来采集,

[0013] (c) 波束成形步骤,其中,数据集通过第二数量个波束成形处理来处理,波束成形处理用于提供至少一部分图像的波束成形像素值,每个波束成形处理或者使用与通过发送加权向量所生成的波相对应的数据集或者使用波束成形像素值运算中的发送加权向量,以及,

[0014] (d) 组合步骤,其中,组合所述第二数量的波束成形像素值,以便提供图像内像素的像素值,而且其中,发送加权向量是互不相同的且彼此相互正交。

[0015] 得益于上述这些特征,每个发送加权向量都产生一个不相关的斑点噪声,加权数据的组合使之能够计算斑点噪声减少的区域的图像。

[0016] 在成像方法的各个不同实施例中,可选择性地包含以下特征中的一项和/或其它项。

[0017] 根据方法的一方面:

[0018] -在传输步骤(a)过程中,每个发送加权向量都用于生成一个波,以及,

[0019] - 在波束成形步骤(c)过程中,波束成形处理是常规的波束成形,其中,波束成形的像素值可由以下公式计算:

$$[0020] U_n(x, z) = \sum_{l=1}^{l2} W_R[l] DS(k - \tau(x, z, l), l, m)$$

[0021] 式中:

[0022] DS(k, l, m) 是数据集的矩阵,

[0023] W_R 是接收加权向量,

[0024] $\tau(x, z, l)$ 是适合于波束成形处理的延迟函数,

[0025] l 是阵列2中换能器的指标数,介于11至12之间,构成线波束成形的孔径,以及,

[0026] x, z 是图像内像素的坐标。

[0027] 根据方法的一方面,在波束成形步骤(c)中应用发送加权向量,以及,

[0028] - 在波束成形步骤(c)过程中,波束成形处理是合成波束成形,其中,波束成形的像素值可由以下公式计算:

$$[0029] U_n(x, z) = \sum_{m=1}^M W_{Tn}[m] \sum_{l=1}^{l2} W_R[l] DS(k - \tau(x, z, l, m), l, m)$$

[0030] 式中:

[0031] DS(k, l, m) 是数据集的矩阵,

[0032] W_R 是接收加权向量,

[0033] $\tau(x, z, l)$ 是适合于波束成形处理的延迟函数,

[0034] l 是阵列2中换能器的指标数,介于11至12之间,构成线波束成形的孔径,

[0035] m 是介于1至M之间的指标数,M是第一数量,即介质中传输波的数量, W_{Tn} 是发送加权向量,

[0036] x, z 是图像内像素的坐标。

[0037] 根据方法的一方面,波束成形处理选自包括合成孔径聚焦技术(SAFT) 波束成形处理、虚拟换能器SAFT波束成形处理、空间编码SAFT波束成形处理、圆形波合成波束成形处理、平面波合成波束成形处理的列表中。

[0038] 根据方法的一方面,图像的像素值在组合步骤(d)过程中可由以下公式计算:

$$[0039] I(x, z) = \sum_{n=1}^N |U_n(x, z) + iHT\{U_n(x, z)\}|^2$$

[0040] 式中:

[0041] i 是复单位虚数,

[0042] n 是介于1至N之间的指标数,N是第二数量,即发送加权向量的数量,

[0043] |X| 是X的模数,

[0044] HT{X} 是X的希尔伯特变换,

[0045] $U_n(x, z)$ 是所述第二数量的波束成形像素值。

[0046] 根据方法的一方面,发送加权向量可由选自包括Riedel-Sidorenko函数、离散椭球函数和哈达玛函数的列表中的正交函数来确定。

[0047] 根据方法的一方面,换能器是发送或接收超声波的超声换能器,方法生成介质内

的区域的超声图像。

[0048] 根据方法的一方面,进一步包括以下步骤:

[0049] -初始成像步骤,其中,区域的第一个图像可由所述处理单元和阵列来确定,

[0050] -评估步骤,其中,度量值根据第一个图像的像素来确定,

[0051] -成像步骤,其中,如果度量值包含在第一个范围中,则不使用发送加权向量来计算图像中的像素值,如果度量值包含在与所述第一个范围不同的第二个范围中,则使用发送加权向量来计算图像中的像素值,所述发送加权向量不相同并且彼此相互正交。

[0052] 根据方法的一方面,确定度量值,以便区分出与显著反射信号相对应的第一个图像中的像素和与非显著散斑信号相对应的第一个图像中的像素。

[0053] 根据方法的一方面,度量值通过自相关函数的运算来确定。

[0054] 根据方法的一方面,度量值是关于介于10度至30度之间所滞后的自相关函数的平均值。

[0055] 本发明的另一个目的旨在提供实施所述成像方法的装置。用于生成介质内的区域的图像的所述装置包括连接着与所述介质有关的换能器阵列的处理单元,以及,

[0056] 其中,阵列和处理单元实施以下步骤:

[0057] (a) 传输步骤,其中,第一数量 (M) 个波通过换能器在介质内传输,

[0058] (b) 接收步骤,其中,数据集通过对波响应的所述换能器来采集,以及,

[0059] 其中,处理单元实施以下步骤:

[0060] (c) 波束成形步骤,其中,数据集通过第二数量个波束成形处理来处理,所述波束成形处理用于提供至少一部分图像的波束成形像素值,每个波束成形处理或者使用与通过发送加权向量所生成的波相对应的数据集或者使用波束成形像素值运算中的发送加权向量,以及,

[0061] (d) 组合步骤,其中,组合所述第二数量的波束成形像素值,以便提供图像中每个像素的像素值,以及其中,发送加权向量不相同并且彼此相互正交。

[0062] 在装置的各个实施例中,可选择性地包含以下特征中的一项和/或其它项。

[0063] 根据装置的一方面,在波束成形步骤 (c) 过程中应用发送加权向量,以及,

[0064] -在波束成形步骤 (c) 过程中,波束成形处理是合成波束成形,其中,波束成形像素值可由以下公式计算:

$$[0065] U_n(x, z) = \sum_{m=1}^M W_{Tn}[m] \sum_{l=1}^{l2} W_R[l] DS(k - \tau(x, z, l, m), l, m)$$

[0066] 式中:

[0067] DS (k, l, m) 是数据集的矩阵,

[0068] W_R 是接收加权向量,

[0069] $\tau (x, z, l)$ 是适合于波束成形处理的延迟函数,

[0070] l 是阵列2中换能器的指标数,介于11至12之间,构成一条线波束成形的孔径,

[0071] m 是介于1至M之间的指标数,M是第一数量,即介质内传输波的数量, W_{Tn} 是发送加权向量,

[0072] x, z 是图像内像素的坐标。

[0073] 根据装置的一方面,合成波束成形处理选自包括合成孔径聚焦技术 (SAFT) 波束成

形处理、虚拟换能器SAFT波束成形处理、空间编码SAFT 波束成形处理、圆形波合成波束成形处理、平面波合成波束成形处理的列表中。

- [0074] 根据装置的一方面,进一步实施以下步骤:
- [0075] -初始成像步骤,其中,区域的第一个图像可由所述处理单元和阵列来确定,以及,
- [0076] -评估步骤,其中,度量值根据第一个图像的像素来确定,
- [0077] -成像步骤,其中,如果度量值包含在第一个范围中,则不使用发送加权向量来计算图像中的像素值,如果度量值包含在与所述第一个范围不同的第二个范围中,则使用发送加权向量来计算图像中的像素值,所述发送加权向量不相同并且彼此相互正交。
- [0078] 本发明的另一个目的旨在提供一种计算机程序,在计算机执行所述程序时,所述计算机程序包括实施上述成像方法的步骤的指令。
- [0079] 本发明的另一个目的旨在提供一种计算机可读存储介质,所述计算机程序储存于所述计算机可读存储介质,且在计算机执行所述程序时,所述计算机程序包括执行上述成像方法的步骤的指令。

附图说明

- [0080] 本发明的其它特征和优点将通过以非限制性示例方式所列出的本发明两个实施例的以下详细说明及其参考附图而更为显而易见。在附图中:
- [0081] -图1是显示了根据本发明一个实施例的超声成像装置的示意图;
- [0082] -图2是显示了图1所示装置的一部分的方框图;
- [0083] -图3是显示了根据本发明通过图1所示装置来实施成像方法的第一个示例的图表;
- [0084] -图4是显示了根据本发明通过图1所示装置来实施成像方法的第二个示例的图表;
- [0085] -图5a至图5c是彼此相互正交的三个发送加权向量的第一个示例,所述向量与Riedel-Sidorenko函数相对应;
- [0086] -图6a至图6c是彼此相互正交的三个发送加权向量的第二个示例,所述向量与离散椭球函数相对应;
- [0087] -图7a至图7c是彼此相互正交的三个发送加权向量的第三个示例,所述向量与哈达玛函数相对应;
- [0088] -图8是根据本发明的成像方法的第三个示例,所述第三个示例是自适应方法;
- [0089] -图9显示了针对一个样本计算且与图8所示方法中的度量评价决策相对应的决策图像的示例;
- [0090] -图10显示了针对与图9中相同的样本计算的图像的示例;以及,
- [0091] -图11显示了在图8的成像方法的第三个示例中使用的自相关函数的示例。

具体实施方式

- [0092] 在各图中,相同标号指代相同或相似元素。
- [0093] 图1所示的装置适合于区域1的成像,所述区域1例如是活体组织,尤其是患者的人体组织。装置可包括,例如:

[0094] -换能器阵列2,例如,通常包括数十个(例如,100至300个)换能器的线性阵列,所述换能器沿着轴X(水平或者阵列方向X)并列,如同使区域1成像的常用探头中已知的那样(因此,阵列2适合执行区域1的二维(2D)成像,但是,阵列2也可以是适合执行区域1的3D成像的二维阵列);

[0095] -电子舱3,用于控制换能器阵列并采集其信号;

[0096] -微型计算机4,用于控制电子舱3并查看由电子舱所获得的图像(在一个变体中,单个电子装置可以完成电子舱3和微型计算机4的所有功能)。

[0097] 图1上的轴Z是垂直于轴X的轴,通常指向由阵列换能器生成的超声束的方向。在本文件中,该方向是指垂直或轴向方向。

[0098] 换能器阵列2也可以是包括沿着曲线对齐的多个换能器的凸阵。

[0099] 如图2所示,例如,电子舱3可包括:

[0100] -L个模拟/数字转换器5(A/D₁-A/D_L),分别连接着换能器阵列2的L个换能器(T1-TL);

[0101] -L个缓冲存储器6(B₁-B_L),分别连接着L个模拟/数字转换器5,

[0102] -与缓冲存储器6和微型计算机4相通讯的中央处理单元8(CPU),

[0103] -连接着中央处理单元8的存储器9(MEM);

[0104] -连接着中央处理单元8的数字信号处理器10(DSP)。

[0105] 在此公开的装置是用于超声成像的装置,换能器是超声换能器,所实施的方法适用于生成区域1的超声图像。

[0106] 然而,装置可以是利用除超声波以外其它波(波长不同于超声波长的波)的任何成像装置,换能器和电子舱组件可用于所述波。

[0107] 图3和图4显示了通过图1和图2所示装置实施所述方法的两个示例。方法的步骤主要通过中央处理单元8并最终籍助于数字信号处理器10或者任何其它装置来控制。

[0108] 方法包括以下主要步骤:

[0109] (a) 传输步骤(101;201),其中,通过换能器在介质的区域内传输第一数量个波;

[0110] (b) 接收步骤(102;202),其中,通过对波响应的所述换能器来采集数据集;

[0111] (c) 波束成形步骤(103;203),其中,通过第二数量个波束成形处理来处理在接收步骤所采集到的数据集,以便提供适用于至少一部分图像的第二数量个波束成形像素值U_n(x,z),以及,

[0112] (d) 组合步骤(104;204),其中,组合N个波束成形像素值,以便提供图像中每个像素的像素值。

[0113] 第一数量是为了处理图像在介质的区域内所传输的波的数量。即换能器为了生成所述波而连续发射的数量。

[0114] 第二数量是方法中所使用的发送加权向量W_{Tn}的数量。

[0115] 根据本发明的方法采用第二数量(数量N)个发送加权向量W_{Tn},所述发送加权向量彼此相互不同。

[0116] 此外,在方法中所使用的发送加权向量W_{Tn}彼此相互正交,换言之:

[0117] 指标数i,j属于1···N,

[0118] 指标数i与指标数j不同,则W_{Ti}·W_{Tj}=0。

[0119] 即: $\sum_{l=1}^L W_{Tl}(l) \cdot W_{Tj}(l) = 0$

[0120] 发送加权向量 W_{Tn} 是包括数量 L 个分量的向量, 每个分量都与施加的信号的放大系数相对应, 所述信号通常在传输步骤 (a) 过程中发送到阵列 2 的换能器。发送加权向量 W_{Tn} 的分量可定义为小于或等于 1 的值:

[0121] $W_{Tn}(l) \leq 1$, 当 $l = 1$ 至 L 。

[0122] 根据图 3 所阐释的第一个变体, 在传输步骤 a) (101) 过程中将发送加权向量应用于传输波, 从而提供包括与多个发送加权向量相对应的数据的数据集。

[0123] 然后, 在波束成形步骤 c) 过程中使用该数据集, 这个步骤的每个波束成形处理都是用与特定发送加权向量 (特定传输波) 相对应的数据。

[0124] 在该第一个变化例中, 由于每个发送加权向量的加权效应, 所以在介质中传输的振幅波可以较小, 因此, 所接收到的数据集的信噪比可以较低。此外, 该第一个变体需要对波进行 $M \times N$ 次传输和采集, 所以, 也降低了成像帧频。而且, 其生成的图像具有斑点噪声且在整个扫描区域中都不是最优的, 因为它只适用于波束的焦点深度。

[0125] 根据图 4 所示的第二个变化例中, 发送加权向量都应用在波束成形步骤 (c) (203) 过程中的各个波束成形处理计算中的数据集 (未加权的)。

[0126] 在那种情况下, 第一个变体的加权效应可通过在波束成形步骤 (c) (203) 过程中的适当的计算 (求和) 来获得, 所述计算利用各个波束成形处理的发送-接收波束成形公式。

[0127] 在该第二个变体中, 波通过单位放大系数 (与加窗或孔径相关的系数除外) 在介质内传输。传输加权系数仅通过计算在接收步骤 (b) 中所采集到的数据集来应用。

[0128] 得益于该发送-接收波束成形处理, 真正在介质内传输的波的振幅没有减少, 而且保存了数字化为数据集的所接收到的信号的信噪比 (SNR)。

[0129] 在方法的所有变体中, 将换能器阵列 2 与待成像的介质 (例如, 患者的身体) 相接触。

[0130] 传输波的数量可例如介于 2 至 100 之间。超声波的频率可例如介于 0.5 至 100MHz 之间, 例如, 介于 1 至 10MHz 之间。

[0131] 发送加权向量 W_{Tn} 的数量 N 是例如较小的数, 例如, 介于 2 至 10 之间, 或, 例如, $N = 3$ 。可有很多正交函数用于确定该发送加权向量 W_{Tn} 。

[0132] 图 5a 至图 5c 显示了 3 个发送加权向量 W_{Tn} 的第一个示例。在这些图中, 横坐标是换能器指标数, 纵坐标是各个向量中分量的值。

[0133] 这些发送加权向量 W_{T1-3} 是彼此相互正交的 Riedel-Sidorenko 函数的向量。

[0134] 图 6a 至图 6c 显示了采用离散椭球函数的 3 个发送加权向量 W_{Tn} 的第二个示例, 也是彼此相互正交的。

[0135] 图 7a 至图 7c 显示了采用哈达玛函数的 3 个发送加权向量 W_{Tn} 的第三个示例, 也是彼此相互正交的。

[0136] 发送加权向量的数量 N 最好小于或等于传输到介质中的波的数量 (第一数量)。

[0137] 关于本发明效果的演示

[0138] 由于采用正交发送加权向量, 使图像中的斑点噪声光滑, 因为每个传输向量都成产生互不相关的散斑。

[0139] 可以用数学方法证明这一点。在这部分,我们采用1991年11月《美国声学学会杂志》第90(5)期中由Raoul Mallart和Mathias Fink编著的文件《脉冲回波测量中的van Cittert-Zernike定理》中所用的形式和符号。

[0140] 在点 X_1 及频率 f 下的入射压力场可由下式给出:

$$[0141] H_k(X_1, f) = \iint_O O_k(X) \frac{\exp(j2\pi f r)}{r} dX$$

[0142] 式中:

[0143] $O(X)$ 是聚焦孔径的发送孔径函数;以及,

[0144] $X = (x, y, 0)$,其中, x, y 是图像中的坐标。

[0145] 这部分的目的是表明正交传输孔径 $O_k(X)$ 和 $O_1(X)$ 产生互不相关的散斑图。由位于再点 X_1 的个别散射体散射的压力场是球面波。

[0146] 在点 X_0 的接收压力场表达为:

$$[0147] P_k(X_0, X_1, f) = \chi(X_1, f) H_k(X_1, f) \frac{\exp(j2\pi f r_{01}/c)}{r_{01}}$$

[0148] 式中: $r_{01} = |X_0 - X_1|$ 。

[0149] 假设散射介质是不连贯的,换言之,其结构是随机的并且比成像系统所使用的最小波长更细。介质就不能分辨出,其散射函数 R_M 的自相关形式如下:

$$[0150] R_M(X_1 - X_2, f) = \chi(X, f) \delta(X_1 - X_2)$$

[0151] 式中: χ 是点坐标 (x, z) 附近的局部散射系数。

[0152] 在点 X_0 感测到的响应狄拉克脉冲由整个介质反向散射的压力场可由下式给出:

$$[0153] P_k(X_0, f) = \iiint_V \chi(X_1, f) H_k(X_1, f) \frac{\exp(j2\pi f r_{01}/c)}{r_{01}} d^3 X_1$$

[0154] 压力场 $P_k(X_0, f)$ 和 $P_1(X_0, f)$ 的互相关 $R_{kl}(X_0, f)$ 可由下式给出:

$$[0155] R_{kl}(X_0, f) = E\{P_k(X_0, f) P_l(X_0, f)\}$$

[0156] 式中:

[0157] $E\{.\}$ 表示数学期望值。

[0158] 可以通过上述方程式把乘积 $P_k(X_0, f) \cdot P_l(X_0, f)$ 表达为:

$$P_k(X_0, f) P_l(X_0, f)$$

$$[0159] = \iiint_V \iiint_V \chi(X_1, f) \chi^*(X_2, f) H_k(X_1, f) H_l^*(X_2, f) \frac{\exp(j2\pi f (r_{01} - r_{02})/c)}{r_{01} r_{02}} d^3 X_1 d^3 X_2$$

[0160] 通过上述方程式,可以推导出:

$$R_{kl}(X_0, f) = \chi_0(f) \iiint_V \iiint_V \delta(X_1 - X_2) H_k(X_1, f) H_l^*(X_2, f) \dots$$

[0161]

$$\frac{\exp(j2\pi f (r_{01} - r_{02})/c)}{r_{01} r_{02}} d^3 X_1 d^3 X_2$$

[0162] 于是,压力场 $P_k(X_0, f)$ 和 $P_l(X_0, f)$ 的互相关可由下式给出:

[0163] $R_{kl}(X_0, f) = \chi_0(f) \iiint_V H_k(X_1, f) H_l^*(X_1, f) d^3 X_1$

[0164] 通过上文引用的Mallart等人的出版物,在点X₁的入射压力场大约为:

[0165] $H_k(X_1, f) = \varphi_k \iint_O O_k(x) \exp\left(\frac{j\pi f}{zc} x \cdot x\right) \exp\left(\frac{j\pi f}{zc} x \cdot X_1\right) d^2 x$

[0166] 式中: φ_k 是相位项。

[0167] 关于在深度z聚焦的孔径,孔径函数O(x)包含相位项 $\exp\left(-\frac{j\pi f}{zc} x \cdot x\right)$,因此 $O_k(x) \exp\left(\frac{j\pi f}{zc} x \cdot x\right)$ 是实值。

[0168] 使 $\widetilde{O}_k(x) \triangleq O_k(x) \exp\left(\frac{j\pi f}{zc} x \cdot x\right)$, 则入射场的乘积可表达为:

$$H_k(X_1, f) H_l^*(X_1, f) = \varphi_k \iint_O \iint_O \widetilde{O}_k(x_1) \widetilde{O}_l(x_2) \dots$$

[0169] $\exp\left(\frac{j\pi f}{zc} (x_1 - x_2) \cdot X_1\right) dx_1^2 dx_2^2$

[0170] 而且,将最后一个方程注入前一个方程中,可以推导出:

$$\begin{aligned} R_{kl}(X_0, f) &= \chi_0(f) \varphi_k \varphi_l^* \iint_O \iint_O \widetilde{O}_k(x_1) \widetilde{O}_l(x_2) \iiint_V \exp\left(\frac{j\pi f}{zc} (x_1 - x_2) \cdot X_1\right) d^3 X_1 d^2 x_1 d^2 x_2 \\ [0171] &= \chi_0(f) \varphi_k \varphi_l^* \iint_O \iint_O \widetilde{O}_k(x_1) \widetilde{O}_l(x_2) \delta(x_1 - x_2) d^2 x_1 d^2 x_2 \\ &= \chi_0(f) \varphi_k \varphi_l^* \iint_O \widetilde{O}_k(x_1) \widetilde{O}_l(x_1) d^2 x_1 \end{aligned}$$

[0172] 上述方程式表明,正交孔径,即 $(\widetilde{O}_k(x_1), \widetilde{O}_l(x_1))$, 使之 $\iint_O \widetilde{O}_k(x_1) \widetilde{O}_l(x_1) d^2 x_1 = 0$, 从而获得的互不相关的采集数据,即 $R_{kl}(X_0, f) = 0$ 。

[0173] 因此,压力场的互相关为空值,而且斑点噪声是互不相关的。

[0174] 所以,与现有技术的方法相比,本发明的方法可以减少斑点噪声。实际上,根据所述方法的斑点噪声是最小的。

[0175] 本发明的方法可应用于任何超声成像方法。以下说明将对其中几项进行解释。

[0176] 示例1:常规成像

[0177] 现在对第一个示例进行说明,所述第一个示例与传统成像方法相对应,通常称为常规的聚焦孔径或传统的B型成像。

[0178] 在传输步骤(a)过程中,通过换能器将数量M个波连续传输到区域中。这些波都是按照大致垂直于阵列方向(X)的垂直方向(Z)在介质内传输的聚焦波束,并且聚焦于在与换能器阵列2相分隔开的焦距(或者焦点深度)处。

[0179] M个连续聚焦波束按照侧向彼此横向移动,所述侧向与阵列方向(X)一致,以便扫描区域。

[0180] 根据本发明,每个聚焦波束都要重复N次,换言之,一个聚焦波束适用于各个指标数n的发送加权向量W_{Tn}聚焦波束。将发送加权向量W_{Tn}直接应用于换能器:将发送加权向量的指标数1的各个分量用于放大或减小发送到阵列2的指标数1的换能器的信号。

- [0181] 在该第一个示例中,第一数量(在介质内传输的波的数量)因此等于MxN。
- [0182] 每个波都在区域中传播,在此与扩散粒子相互作用,所述扩散粒子是超声波的反射。于是,波将作为朝向换能器阵列2的反射波(包括回声)的反向散射。
- [0183] 在接收步骤(b)中,如果各个反射波能被换能器所接收且通过模拟数字转换器采集和转换为数据并储存于存储器中。然后,将所有反射波都以数据集或数据组的方式储存于存储器中。
- [0184] 将来自采集波的数据集组成矩阵DS (k,1,m) ,式中:
- [0185] k是超时样本的指标数,
- [0186] 1是阵列中换能器的指标数,
- [0187] m是数量MxN个发射或传输波(数量与第一数量相一致)中的传输波的指标数。
- [0188] 在波束成形步骤(c)过程中,通过波束成形处理来计算图像的一行或几行(垂直行或水平行)。这些行都平行于垂直或轴向方向Z(聚焦波束的方向) 并且包含在聚焦波束内。
- [0189] 对于N个发送加权向量 W_{Tn} 中的各个而言,行内像素的波束成形像素值 $U_n(x, z)$ 都可由以下与接收波束成形相对应的波束成形公式来计算:

$$[0190] U_n(x, z) = \sum_{l=1}^{l2} W_R[l] DS(k - \tau(x, z, l), l, m)$$

- [0191] 式中:
- [0192] DS (k, 1, m) 是储存所有数据集的矩阵,
- [0193] W_R 是接收加权向量,
- [0194] $\tau (x, z, l)$ 是波束成形处理的延迟函数,即与当前传统的波束成形处理相一致,
- [0195] l是阵列2中换能器的指标数,介于11至12之间,构成一行波束成形的孔径,
- [0196] m是指向指标数n的唯一或确定发送加权向量 W_{Tn} 的指标数并且与在介质内坐标为(x, z) 点附近聚焦的波束相对应,以及,
- [0197] x,z是图像被像素的坐标。
- [0198] 在组合步骤(d)中,N(第二数量) 个波束成形像素值 $U_n(x, z)$ 可根据各个发送加权向量来计算,并将其组合,以便提供图像内各个像素的像素值 I(x, z)。
- [0199] 然后,像素值I(x, z)可由以下求和公式来计算:

$$[0200] I(x, z) = \sum_{n=1}^N |U_n(x, z) + iHT\{U_n(x, z)\}|^2$$

- [0201] 式中:
- [0202] i是复单位虚数。
- [0203] n是介于1至N之间的指标数,N是第二数量中发送加权向量的数量,
- [0204] $|X|$ 是X的模数,
- [0205] HT {X} 是X的希尔伯特变换,
- [0206] $U_n(x, z)$ 是指标数n的波束成形像素值。
- [0207] 可惜,上述方法:
- [0208] -需要MxN次传输和采集波,因此,步骤a) 和b) 要花费一些时间,
- [0209] -生成的图像具有斑点噪声且在整个扫面区域中不是最优的,因为它只适用于波束的焦点深度。

[0210] 示例2合成成像

[0211] 现在对与合成成像方法相对应的第二个示例进行说明。

[0212] 作为合成成像方法,应理解为称之为合成方法的任何方法,以及至少以下列表中的所有方法:

[0213] 1) 合成孔径聚焦技术方法(SAFT),

[0214] 2) 虚拟换能器SAFT方法,

[0215] 3) 空间编码SAFT方法,

[0216] 4) 圆形波合成方法,以及,

[0217] 5) 平面波合成方法。

[0218] 1) SAFT方法,例如,在2006年的《超声波学》44, e5-e15中J.A.Jensen, S.I.Nikolov,K.L.Gammelmark,M.H.Pedersen的发表文件《合成孔径超声成像》中所详细说明的。

[0219] 该方法执行:

[0220] -传输步骤(a),其中,至少有一次波的传输是根据阵列2的各个换能器来进行(发射)的:阵列2的各个换能器是一个接一个激发的,以及,

[0221] -接收步骤(b),其中,采集所有换能器的信号,并将其作为数据集记录(储存)在存储器中。

[0222] 也可以将数据集组合成矩阵DS(k,l,m),通常称为“完整数据集”,式中:

[0223] k是超时样本的指标数,

[0224] l是阵列中换能器的指标数,

[0225] m是在发射波数量(与第一数量相一致的数量)中的传输波的指标数。

[0226] 因此,发射波的数量M通常等于阵列2中换能器的数量L。但是,如果没有使用阵列的所有换能器,则该数量可小于换能器的数量L,或者,如果使其部分作平均化,则可大于换能器的数量L。

[0227] 于是,波束成形步骤(c)和组合步骤(d)不同于已知的SAFT方法,在下文对其进行说明。

[0228] 在波束成形步骤(c)过程中,波束成形像素值 $U_n(x, z)$ 可由包括双重求和(一个根据所采用的具有指标数l的换能器的数量,另一个根据具有指标数m的超声波的数量)的以下波束成形公式来计算:

$$[0229] U_n(x, z) = \sum_{m=1}^M W_{Tn}[m] \sum_{l=1}^{l2} W_R[l] DS(k - \tau(x, z, l, m), l, m)$$

[0230] 式中:

[0231] DS(k, l, m)是数据集的矩阵,

[0232] W_R 是接收加权向量,

[0233] $\tau(x, z, l)$ 是波束成形处理的延迟函数,即与当前SAFT波束成形处理相对应,

[0234] l是阵列2中换能器的指标数,介于11至12之间,构成线波束成形的孔径,

[0235] m是介于1至M之间的指标数,M是第一数量,即介质内传输波的数量, W_{Tn} 是指标数n的发送加权向量,

[0236] x, z是图像内像素的坐标。

[0237] 在组合步骤(d)过程中,根据数量N(第二数量)个发送加权向量所计算的波束成形像素值 $U_n(x, z)$ 也进行组合,以便提供图像内每个像素的像素值 $I(x, z)$ 。

[0238] 然后,像素值 $I(x, z)$ 可由上文所述的相同求和公式来计算:

$$[0239] I(x, z) = \sum_{n=1}^N |U_n(x, z) + iHT\{U_n(x, z)\}|^2$$

[0240] 发送加权向量 W_T 通过在波束成形步骤(c)中的计算来应用,该方法无需额外发射(将波发射到介质中)。

[0241] 通过SAFT方法生成的图像通常在整个扫描区域内具有较高质量:高分辨率及高对比度。信噪比(SNR)不是最佳的,因为每次发射仅使用一个转移的阵列,而且,与其它方法相比,发射能量较低。

[0242] 得益于正交发送加权向量 W_{Tn} ,上述改进的SAFT方法能够减少图像的斑点噪声。

[0243] 2)虚拟换能器SAFT方法在信噪比方面改进了SAFT方法。该方法,例如,在2008年IEEE国际超声研讨会会议记录第966-969页,J.Kortbek,J.A. Jensen,K.L.Gammelmark的发表文件《合成孔径的连续波束成形》中公开了。

[0244] 与以前的SAFT方法相比,发射波并非仅通过阵列的一个换能器来生成,而是由阵列的多个换能器来生成的,使得发射波是聚焦在区域内预定聚焦区的聚焦波束。

[0245] 于是,在该虚拟换能器SAFT方法中:

[0246] -在传输步骤(a)过程中,通过多个换能器来传输分别与区域内聚焦区的聚焦波束相对应的多个发射波,以及,

[0247] -在接收步骤(b)过程中,数据集可根据多个聚焦区来采集并且数据集可组成矩阵 $DS(k, l, m)$,通常称之为“完整数据集”,与SAFT方法相等效。

[0248] 然后,将本发明的波束成形步骤(c)和组合步骤(d)应用于虚拟换能器SAFT方法,并且与上述改进的SAFT方法所应用的方法相同或相似。

[0249] 得益于该改进的虚拟换能器SAFT方法,利用了第二数量个发送加权向量 W_{Tn} ,所生成的图像的斑点噪声减少了。

[0250] 3)空间编码SAFT方法也在信噪比方面改进了SAFT方法。

[0251] 在该方法中,

[0252] -在传输步骤(a)过程中,波是通过将传输矩阵 TM 应用于SAFT方法的换能器信号来发射:对于M个发射波(第一数量)中的各个波而言,将换能器的信号乘以传输矩阵 TM ,所述传输矩阵是可逆的矩阵,以及,

[0253] -在接收步骤(b)响应发射波所采集到的数据集储存于接收矩阵 $RM(k, l, m)$ 中,而且数据集的矩阵 $DS(k, l, m)$ 可由以下反演公式利用接收矩阵 RM 和传输矩阵 TM 来获得:

$$[0254] DS(k, l, m) |_{k=constant} = TM^{-1} \cdot RM(k, l, m) |_{k=constant},$$

[0255] 关于 $k=1$ 至 K 。

[0256] 数据集的矩阵 DS 相同于上文在SAFT方法中所述的。

[0257] 然后,将本发明的波束成形步骤(c)和组合步骤(d)应用于空间编码SAFT方法,并且与上述改进的SAFT方法所应用的方法相似。

[0258] 得益于该改进的空间编码SAFT方法,利用了发送加权向量 W_{Tn} 的第二数量,所生成的图像的斑点噪声减少了。

[0259] 4) 圆形波合成方法也在信噪比方面改进了SAFT方法。也与虚拟换能器 SAFT方法相似,但区别之处在于聚焦波束聚焦于阵列之后,使得圆形波可在介质内传输。

[0260] 该方法的详细信息可见于2009年IEEE超声波研讨会议记录第515-518 页, M.Couade, M.Pernot, M.Tanter, E.Messas, A.Bel, M.Ba, A.-A.Hagege, M.Fink的发表文章《利用相控阵列的圆形波合成成像进行心脏超快成像》。

[0261] 然后,将本发明的波束成形步骤(c)和组合步骤(d)应用于该圆形波合成方法,并且与上述改进的SAFT方法所应用的方法相同或相似。

[0262] 得益于该改进的圆形波合成方法,利用第二数量个发送加权向量 W_{Tn} ,所生成的图像的斑点噪声减少了。

[0263] 5) 平面波合成方法也在信噪比方面改进了SAFT方法。

[0264] 该方法的详细信息可见于已发布专利US6,551,246或已发布专利申请书US2009/0234230。

[0265] 在该方法中:

[0266] -在传输步骤(a)过程中,将第一数量(M)个平面波发射到介质中,以及,

[0267] -在接收步骤(b)过程中,采集换能器信号并将其作为数据集的矩阵DS (k,1,m) 记录(储存)于存储器,m是传输到介质中的平面波的指标数。

[0268] 因此,该方法与SAFT方法的不同之处在于在介质内传输(射出、发射) 数量M个平面波。

[0269] 然后,将本发明的波束成形步骤(c)和组合步骤(d)应用于该平面波合成方法,而且与上述改进的SAFT方法所应用的方法相同或相似。

[0270] 在波束成形步骤(c)中,波束成形像素值 $U_n(x,z)$ 可由以下波束成形公式来计算:

$$[0271] U_n(x,z) = \sum_{m=1}^M W_{Tn}[m] \sum_{l=1}^{l2} W_R[l] DS(k - \tau(x,z,l,m), l, m)$$

[0272] 按照平面波合成方法,各个平面波可通过不同的发送加权向量 W_{Tn} 来加权。

[0273] 在以上所有波束成形处理中,延迟函数 $\tau(x,z,1,m)$ 是取决于各种类型的波束成形处理以及各种类型的探针(形状、尺寸)所众所周知的函数。

[0274] 根据图8阐释的成像方法的第三个变体,成像方法没有把多个发送加权向量用于图像中的所有像素。由于这一特征,所以没有降低这些像素的横向分辨率(没有组合发送加权向量)而且减少了图像中其它像素的斑点噪声(具有发送加权向量组合)。

[0275] 在该第三个变体中,成像方法进一步包括以下步骤。

[0276] -初始成像步骤(301),其中,区域的第一个图像可由所述处理单元和阵列来确定,

[0277] -评估步骤(302),其中,度量值根据第一个图像内的像素来确定,

[0278] -成像步骤(303,304,305),其中,如果度量值包含在第一个范围内,则图像中的像素值可以直接计算而不使用多个发送加权向量,如果度量值包含在与所述第一个范围不同的第二个范围内,则图像中的像素值要使用多个(第二数量,N个)发送加权向量来计算,所述发送加权向量互不相同且按照(第二)数量彼此相互正交。

[0279] 然后,成像方法通过组合在成像步骤(303,304,305)所计算的像素就可以建立最终图像307。根据上文所述的方法之一,或者在步骤304不使用发送加权向量,或者在步骤305中使用发送加权向量,来计算最终图像得像素值。

[0280] 有利的是,确定度量值,以便区分出与显著反射信号相对应的第一个图像中的像素和与非显著散斑信号相对应的第一个图像中的像素。来自第一个图像中像素的显著反射信号通常是与具有强反射体要素的介质内的位置相对应的像素。在那种情况下,成像方法不使用降低横向分辨率的发送加权向量。来自第一个图像中像素的非显著散斑信号通常是与不具有强反射体要素的介质内的位置相对应的像素。该位置与图像中的斑点噪声的位置相对应。在那种情况下,成像方法可采用减少所述斑点噪声的发送加权向量,所述这些斑点噪声对用户来说既难以令人满意且又不重要。

[0281] 图9和图10是通过成像方法的第三个变体所生成的图像的示例。图9是二值图像303,其中,黑色像素是没有传输加权(方法的步骤304)的像素,白色像素是具有传输加权(方法的步骤305)的像素。图10是通过第三个变体的成像方法300所提供的最终图像。

[0282] 得益于上述混合的自适应方法,该图像307的斑点噪声减少了且具有良好的横向分辨率。

[0283] 度量值可由自相关函数 $R(\theta, x, z)$ 的运算来确定。

[0284] 例如,自相关函数可由下式确定:

$$[0285] R(\theta, x, z) = E\{I_{m1}(x, z) \cdot I_{m2}(x, z)\}$$

[0286] 式中: $E\{\}$ 是数学期望值,以及,

$$[0287] I_m(x, z) = |V_m(x, z) + iHT\{V_m(x, z)\}|^2$$

$$[0288] V_m(x, z) = \sum_{l=1}^{l2} W_R[l] DS(k - \tau(x, z, l, m), l, m)$$

[0289] $DS(k, l, m)$ 是数据集的矩阵,

[0290] k 是超时指标数,

[0291] l 是阵列中换能器的指标数,

[0292] m 是关于合成波束成形的传输波(例如,平面波)的指标数,

[0293] W_R 是接收加权向量,

[0294] $\tau(x, z, l, m)$ 是波束成形处理的延迟函数,例如,与平面波的波束成形处理相对应。

[0295] 滞后 θ 是第一个角度与第二个角度之间相差的角度,所述第一个角度与指标数 $m1$ 的第一次发射相对应,第二个角度与指标数 $m2$ 的第二次发射相对应。第一次发射和第二次发射都是平面波发射,第一个角度和第二个角度是与换能器阵列相关的所述平面波的角度。

[0296] 图11显示了这种自相关函数的两个示例:在与强反射体相对应的介质内的位置创建的第一个自相关函数的曲线401,以及在与斑点噪声相对应的介质内的位置创建的第二个自相关函数402。

[0297] 两个自相关函数401,402的区别是10度至30度的滞后范围。该差异可用于区分第一个图像中的两种类型的像素,以及选择(步骤303)是否使用(步骤304,305)发送加权向量来计算成像方法的最终图像的像素。

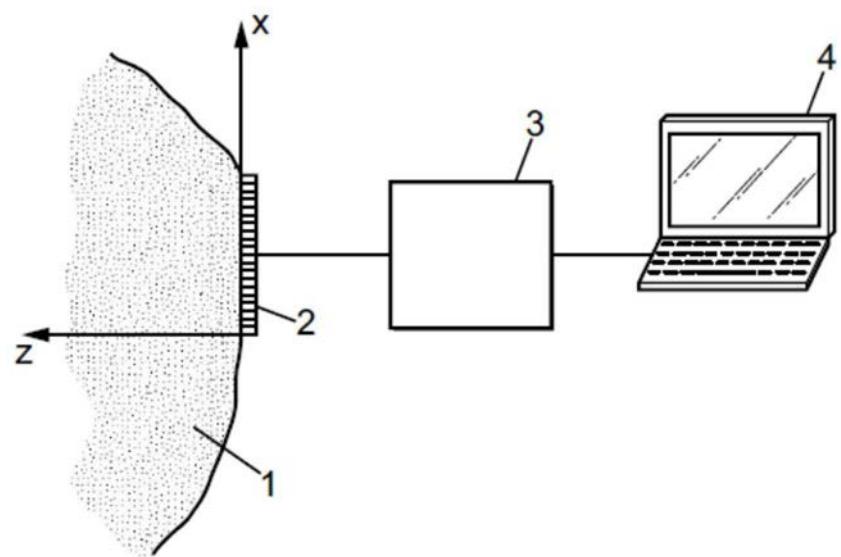


图1

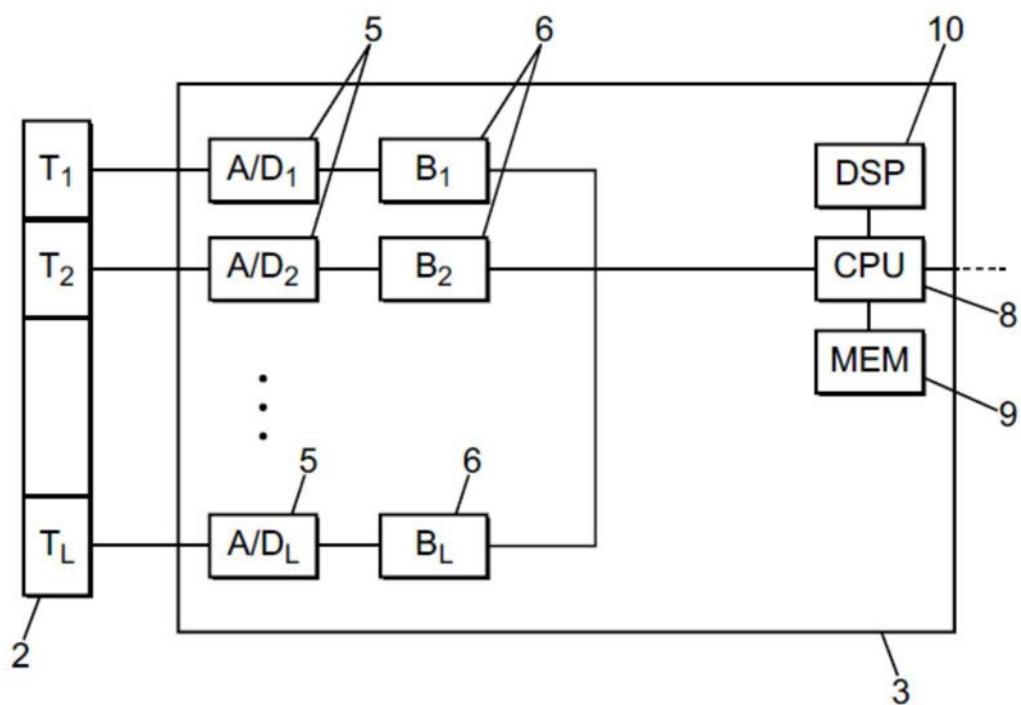


图2

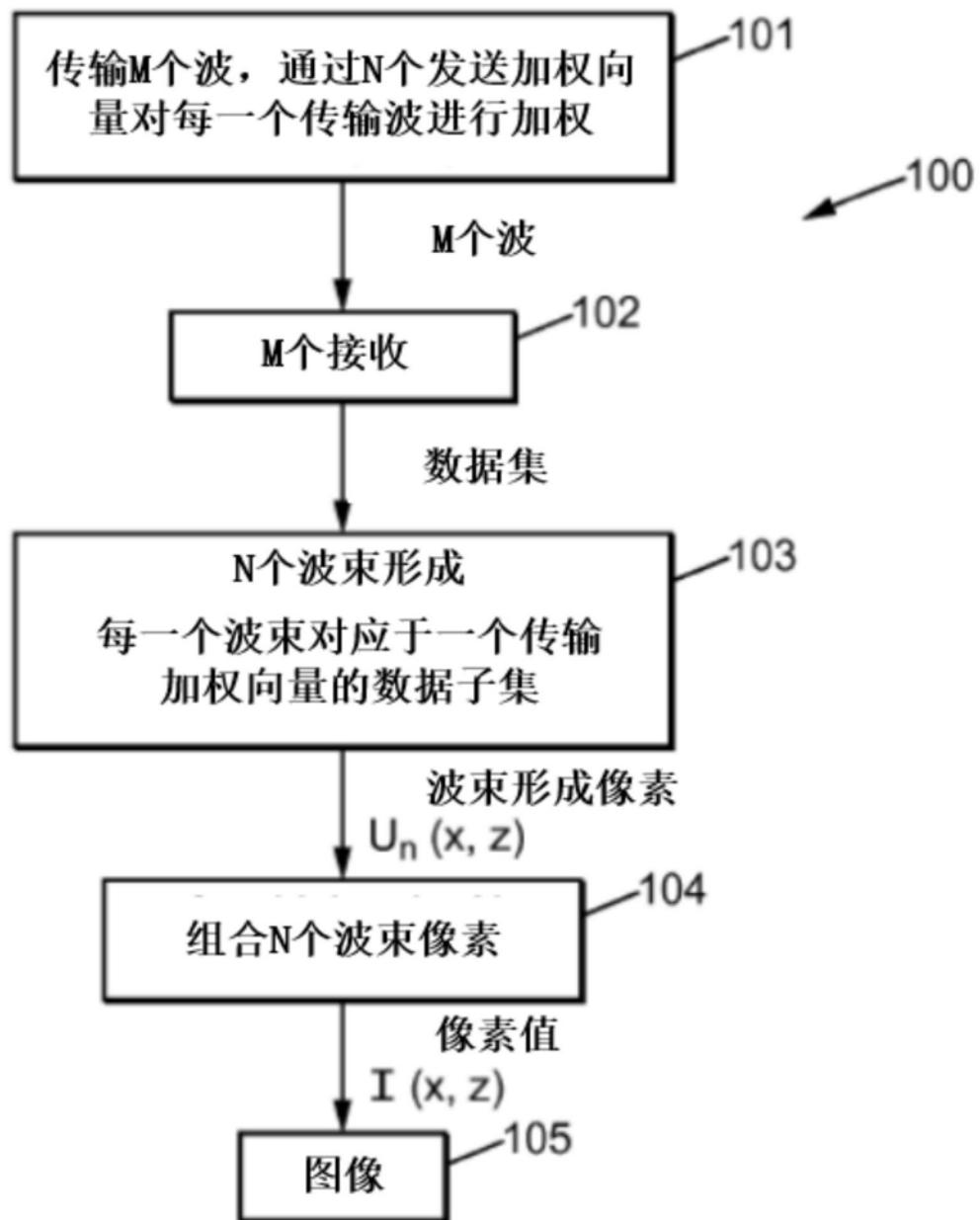


图3

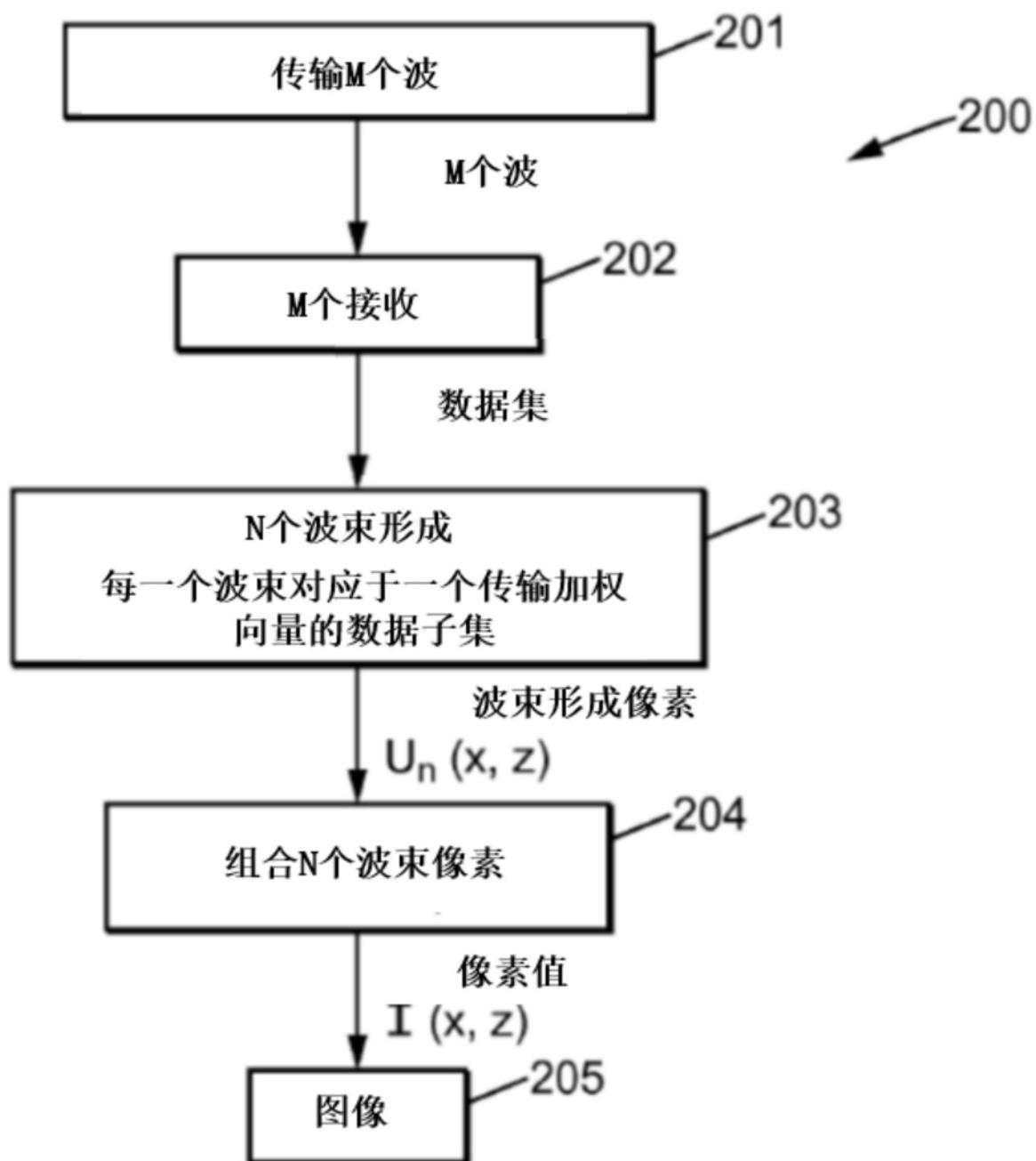


图4

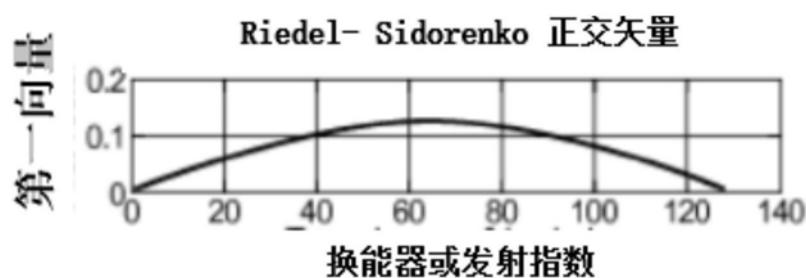


图5a

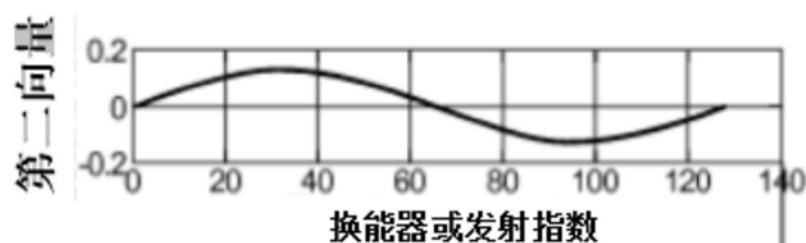


图5b

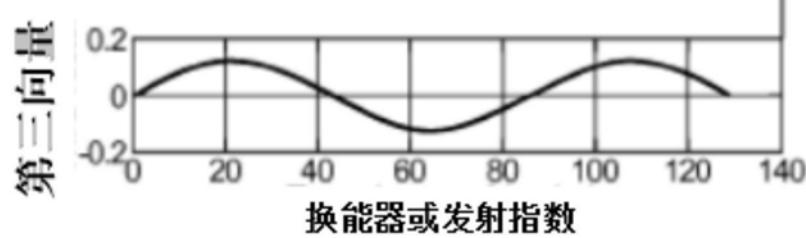


图5c

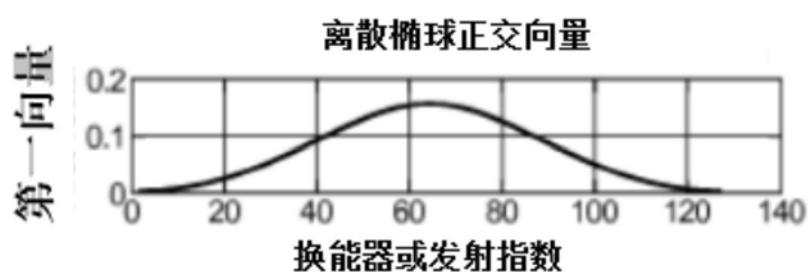


图6a

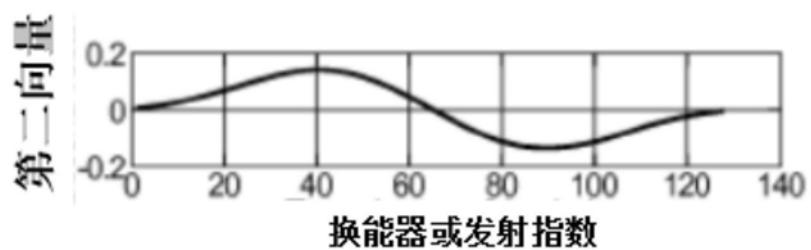


图6b

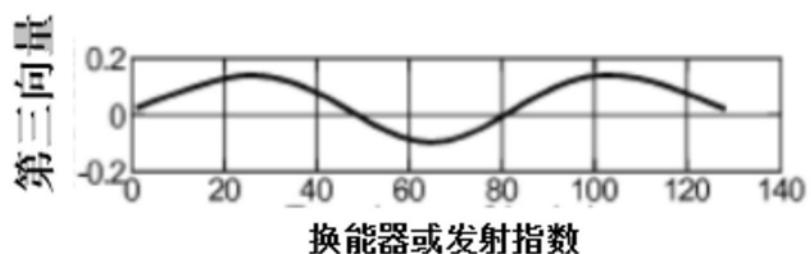


图6c

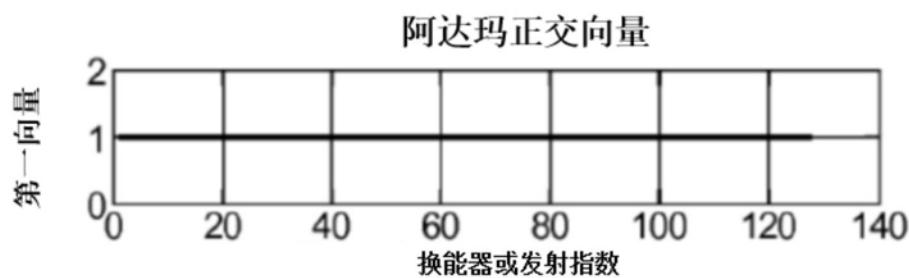


图7a

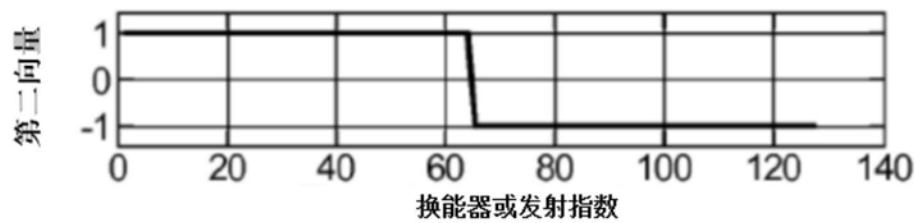


图7b

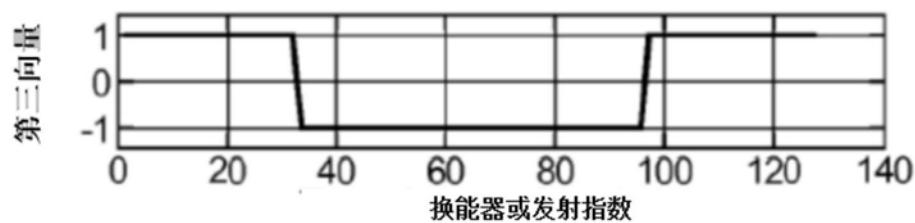


图7c

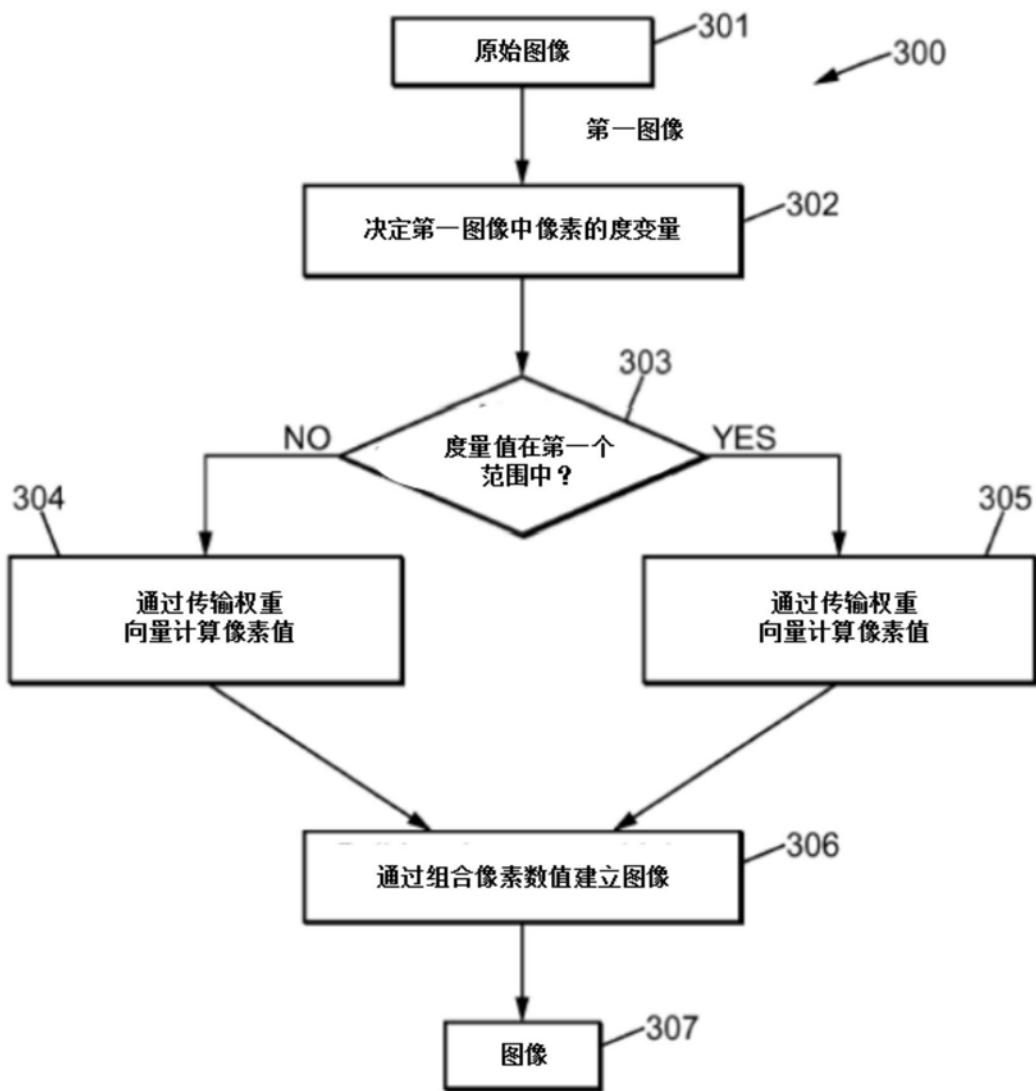


图8

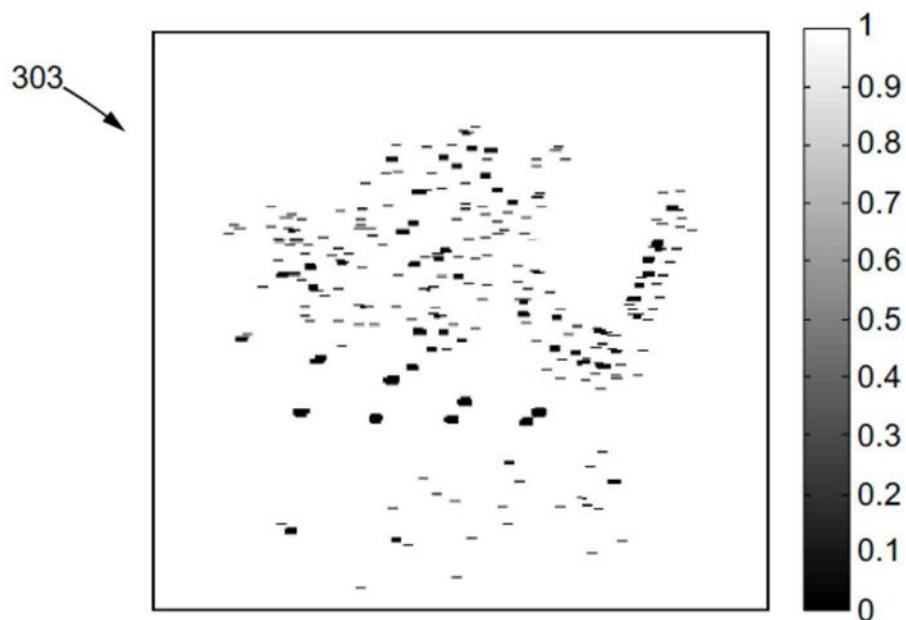


图9

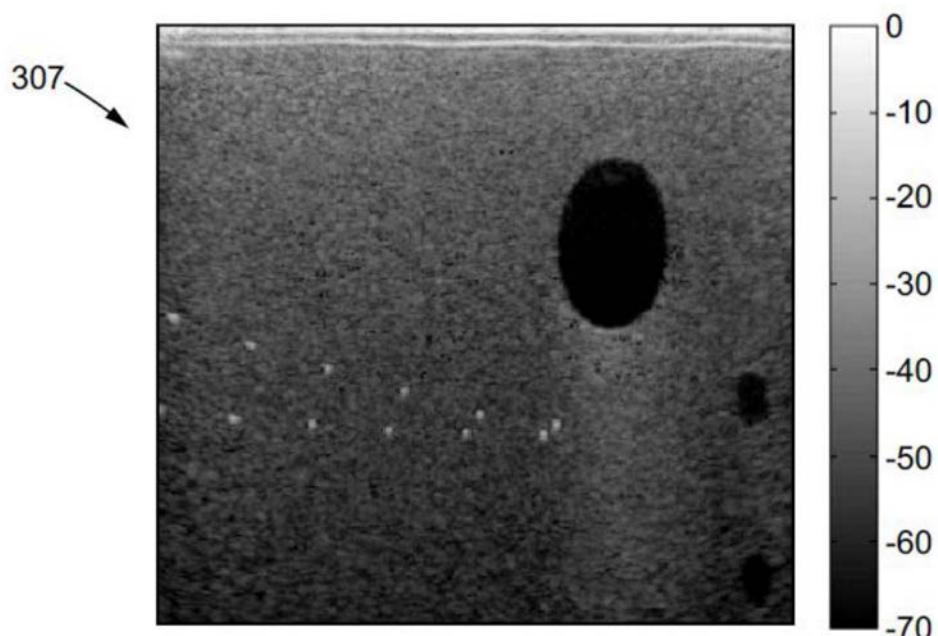


图10

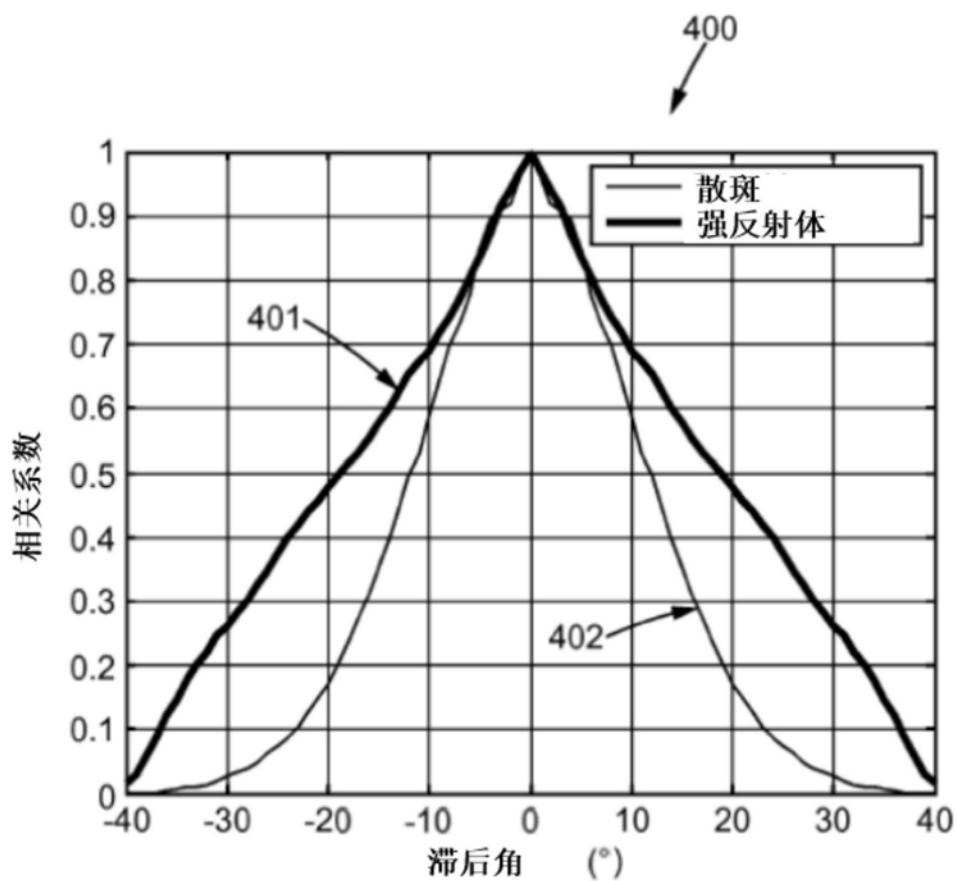


图11