(19)中华人民共和国国家知识产权局

(12)发明专利

(10)授权公告号 CN 102089633 B
(45)授权公告日 2013.01.02

(21)申请号 200980126438.1
(22)申请日 2009.06.26
(30)优先权数据
PA200800956 2008.07.08 DK
(85)PCT申请进入国家阶段日
2011.01.07
(86)PCT申请的申请数据
PCT/EP2009/058036 2009.06.26
(87)PCT申请的公布数据
WO2010/003836 EN 2010.01.14
(73)专利权人 布鲁尔及凯尔声音及振动测量公司
地址 丹麦奈鲁姆
(72)发明人 J. 哈德 J. 戈梅斯
(74)专利代理机构 中国专利代理(香港)有限公司 72001
代理人 马永利 卢江
(51)Int.Cl.
G01H 3/12(2006.01)

(56)对比文件
CN 1472514 A,2004.02.04,
CN 1952627 A,2007.04.25,
US 6615143 B2,2003.09.02,
US 2006080418 A1,2006.04.13,
US 5712805 A,1998.01.27,
雷宣扬,等. 基于Helmholtz方程最小二乘法的声场重构. 《上海交通大学学报》. 2006, 第40卷(第1期),

审查员 杨建坤

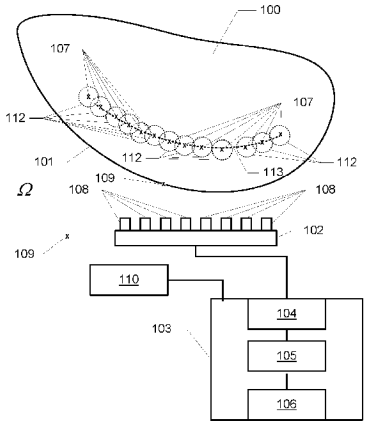
权利要求书 2 页 说明书 12 页 附图 2 页

(54)发明名称

用于重建声学场的方法

(57)摘要

在此公开了一种重建声场的方法。所述方法包括接收指示在一组测量位置处测量的第一声学量的测量值;定义虚拟源位置集合;以及根据均表示源自所定义的虚拟源位置集合的相应一个的相应声场的一个或多个波函数来计算用于至少一个目标位置的第二声学量;其中所述一个或多个波函数用相应一个或多个权重因子加权,并且其中计算包括根据所述一个或多个波函数对于接收到的测量值的最小范数拟合来确定一个或多个权重因子。



CN 102089633 B

1. 一种在至少一个目标位置重建声场的方法，所述方法包括：

- 接收在一组测量位置处测量的第一声学量的一个或多个测量值；

- 定义虚拟源位置集合和波函数集合，所述波函数集合中的每个波函数表示源自所定义的虚拟源位置集合中的相应一个的相应声场；

- 根据乘以相应展开系数的波函数集合的叠加来计算用于至少一个目标位置的第二声学量；其中计算包括根据波函数集合的叠加对于接收到的测量值的最小范数拟合来确定展开系数。

2. 根据权利要求 1 所述的方法，其中，所述声场是由至少一个声源生成的；其中所述测量位置和所述至少一个目标位置位于第一无源区域中；并且其中所述虚拟源位置位于所述第一无源区域外部。

3. 根据权利要求 2 所述的方法，其中定义包括为每个虚拟源位置定义相应缩放表面，所述缩放表面位于所述第一无源区域外部；并且将所述波函数集合中的每一个缩放为每个在所定义的缩放表面的对应一个上都具有预定幅度。

4. 一种在至少一个目标位置重建声场的方法，所述声场是由至少一个声源生成的，所述方法包括：

- 接收在一组测量位置处测量的第一声学量的一个或多个测量值；

- 定义虚拟源位置集合和波函数集合，每个所述波函数表示源自所定义的虚拟源位置集合中的相应一个的相应声场；

- 根据乘以相应展开系数的波函数集合的叠加来计算用于至少一个目标位置的第二声学量，所述测量位置和所述至少一个目标位置位于第一无源区域中，并且所述虚拟源位置位于所述第一无源区域外部；

其中，定义包括为所定义的虚拟源位置中的每一个定义相应缩放表面，所述缩放表面位于所述第一无源区域外部；并且将所述波函数集合中的每一个缩放为每个在对应虚拟源位置的缩放表面上都具有预定幅度。

5. 根据权利要求 4 所述的方法，其中计算包括根据波函数集合的叠加对于接收到的测量值的最小二乘拟合来确定展开系数。

6. 根据权利要求 2 至 5 中的任一项所述的方法，其中所述第一无源区域是由第一表面限定的；其中所述至少一个声源被包括在具有对象表面的对象中；并且其中至少一部分对象表面限定所述第一表面的至少一部分。

7. 根据前述任一项权利要求所述的方法，其中计算所述第二声学量包括：

- 计算相关函数集合中的每一个，每个相关函数指示在所述测量位置的第一个处的波函数集合与在第二位置处的波函数集合的相关性，所述第二位置选自所述目标位置和所述测量位置；

- 根据至少所计算的相关函数以及一个或多个测量值来计算所述第二声学量。

8. 根据权利要求 7 所述的方法，其中所述相关函数集合中的第一个是具有等于测量位置的数量的维度的平方相关矩阵，并且其中所述平方相关矩阵的每个元素指示在相应测量位置处估计的波函数集合的相关性。

9. 根据前述权利要求中的任一项所述的方法，其中所述波函数集合中的每一个是亥姆霍兹方程的解。

10. 根据权利要求 9 所述的方法，其中所述波函数集合中的每一个选自球面波函数、多极波函数、单极波函数、双极波函数。

11. 根据前述权利要求中的任一项所述的方法，其中波函数的总数大于测量位置的数量。

12. 根据权利要求 6 至 11 中的任一项所述的方法，其中所述对象表面限定包括所述测量位置和所述目标位置的第一空间域以及与所述第一空间域不同的第二空间域，所述第二空间域包括所述虚拟源位置。

13. 根据权利要求 12 所述的方法，其中所有虚拟源位置具有距所述对象表面的相同距离。

14. 根据前述权利要求中的任一项所述的方法，其中所述测量位置以规则栅格布置。

15. 根据前述权利要求中的任一项所述的方法，其中所述第一声学量选自声压、粒子速度、声压梯度、及其组合。

16. 根据前述权利要求中的任一项所述的方法，其中所述第二声学量选自声压、粒子速度、以及声强度。

17. 一种用于重建声场的处理装置，所述处理装置包括 ：接口，用于接收在一组测量位置处测量的第一声学量的测量值 ；以及处理单元，被配置为 ：

- 定义虚拟源位置集合和波函数集合，所述波函数集合中的每个波函数表示源自所定义的虚拟源位置集合中的相应一个的相应声场 ；

- 根据乘以相应展开系数的波函数集合的叠加来计算用于至少一个目标位置的第二声学量 ；其中计算包括根据波函数集合的叠加对于接收到的测量值的最小范数拟合来确定展开系数。

18. 一种用于在至少一个目标位置重建声场的处理装置，所述声场是由至少一个声源生成的，所述处理装置包括 ：

接口，用于接收在一组测量位置处测量的第一声学量的测量值 ；以及

处理单元，被配置为 ：

- 定义虚拟源位置集合和波函数集合，每个所述波函数表示源自所定义的虚拟源位置集合中的相应一个的相应声场 ；

- 根据乘以相应展开系数的波函数集合的叠加来计算用于至少一个目标位置的第二声学量，所述测量位置和所述至少一个目标位置位于第一无源区域中，并且所述虚拟源位置位于所述第一无源区域外部 ；

其中所述处理单元适于为所定义的虚拟源位置中的每一个定义相应缩放表面，所述缩放表面位于所述第一无源区域外部 ；并且适于将所述波函数集合中的每一个缩放为每个在对应虚拟源位置的缩放表面上都具有预定幅度。

19. 一种用于重建声场的系统，所述系统包括如在权利要求 17 或 18 中定义的处理装置，以及换能器集合，其用于测量在一组测量位置的第一声学量并且能够以通信连接的方式连接到所述装置以便将测量的声学量转发到所述处理装置。

20. 权利要求 17 或 18 所述的装置用于重建由交通工具的噪声源生成的声场的用途。

用于重建声学场的方法

技术领域

[0001] 本发明涉及声学场的重建。

背景技术

[0002] 近场声全息(Near-field Acoustical Holography,NAH)对于声辐射的3D可视化以及基于在声源附近表面上的测量的精确噪声源定位来说是非常有用的工具。其用于还重建渐逝(evanescent)波分量的能力确保了非常高的空间分辨率。

[0003] 已知的近场声全息方法基于穿过可分离的坐标系统中的等位面(level surface)的规则栅格(regular — grid)测量,允许由空间离散傅立叶变换(DFT)来执行NAH计算,参见例如E. G. Williams、J. D. Maynard和E. J. Skudrzyk的“Sound source reconstruction using a microphone array,”J. Acoust. Soc. Am. 68, 340-344 (1980)。由于DFT的使用,处理非常快,但使用DFT的副效果包括严重空间开窗(windowing)效果,除非测量区域完全覆盖具有高声压的区域。在某些情况下,对测量区域的这种要求无法满足,并且在很多情况下,必须的大小变得过分地大。

[0004] 已经提出一组技术来在保持DFT空间处理的同时仍降低空间开窗效果,但代价是增加的复杂性和计算需求,参见例如J. Hald的“Reduction of spatial windowing effects in acoustical holography,”Proceedings of Inter-Noise 1994。典型地,迭代过程首先用于将测量的声压外推(extrapolate)到测量区域外部,随后在扩展数据窗上应用基于DFT的全息方法。

[0005] 已经提出了致力于避免使用空间DFT并且提供所要求的测量区域的减少的其它方法。

[0006] 一种这样的方法是亥姆霍兹方程最小二乘(HELS)方法,其使用依据球面波函数的声场(sound field)的局部模型,参见例如US 6,615,143, Z. Wang和S. F. Wu的“Helmholtz equation — least — squares method for reconstructing the acoustic pressure field,”J. Acoust. Soc. Am, 102(4), 2020-2032 (1997);或S. F. Wu的“On reconstruction of acoustic fields using the Helmholtz equation — least — squares method,”J. Acoust. Soc. Am, 107, 2511-2522 (2000)。然而,由于仅具有共同原点的球面波函数被用于表示声场,因此将会在源表面上的声场重建中引入误差,除非源表面也是球面的并且以同一原点为中心。上述现有技术方法的另一缺点在于,其需要大量测量位置来获得足够精确的模型。第三个缺点在于,传统正则化方法(比如Tikhonov正则化)并非正确地起作用。相反,上述现有技术方法对与最小二乘解组合的球面波展开的优化截断应用计算上昂贵的迭代搜索,而无需正则化。

[0007] 另一先前提出的方法是统计学优化近场声全息(SONAH)方法,公开于R. Steiner和J. Hald的“Near-field Acoustical Holography without the errors and limitations caused by the use of spatial DFT,”Intern. J. Acoust. Vib. 6,83-89 (2001)中。然而,该现有技术方法基于平面波函数,并且没有考虑在非平面源表面上声场

的精确重建。

发明内容

[0008] 根据第一方面，在此公开的是一种基于测量集合重建声场的方法，所述方法包括：

[0009] - 接收在测量位置集合测量的第一声学量的测量值；

[0010] - 定义虚拟源位置集合和波函数集合，每个波函数表示源自所定义的虚拟源位置集合中的相应一个的相应声场；

[0011] - 根据乘以相应展开系数的波函数集合的叠加来计算在目标位置处的第二声学量；其中，计算包括：根据波函数集合的叠加对接收到的测量值的最小范数拟合(least-norm fit)来确定一个或多个展开系数。

[0012] 发明人已经认识到，在此描述的方法和装置的实施例允许甚至在测量点的数量小于声学模型中所使用的波函数的总数时声场的精确重建。具体地说，在此描述的方法的实施例使用最小范数解公式来确定声学模型的展开系数，以便处理未确定的估计问题，即未知的展开系数的数量大于测量的数量的情况。因此，提供了一种高效技术，其允许甚至以相对少的数量的测量以及相对低的计算成本对具有复杂表面几何结构的源进行详细建模。

[0013] 通常，术语重建声场指代用于基于不同(或相同)点集合中的相同或不同(一个或多个)声学量的测量而例如通过近似值的计算 / 估计来预测点集合中的一个或多个声学量(例如声压、粒子速度、强度和 / 或声功率)的任何过程。

[0014] 将会理解，每个虚拟源位置可以是用于一个或多个波函数的原点，即，若干波函数可以起源于一个虚拟源位置。

[0015] 根据第二方面，在此公开的是一种在至少一个目标位置重建声场的方法，所述声场是由至少一个声源生成的，所述方法包括：

[0016] - 接收在测量位置集合测量的第一声学量的一个或多个测量值；

[0017] - 定义虚拟源位置集合和波函数集合，每个波函数表示源自所定义的虚拟源位置集合中的相应一个的相应声场；

[0018] - 根据乘以相应展开系数的波函数集合的叠加来计算用于至少一个目标位置的第二声学量，所述测量位置和所述至少一个目标位置位于第一无源(source — free)区域中，并且所述虚拟源位置位于所述第一无源区域外部；

[0019] 其中，定义包括为所定义的虚拟源位置中的每一个定义相应缩放(scaling)表面，所述缩放表面位于所述第一无源区域外部；并且将所述波函数集合中的每一个缩放为在对应虚拟源位置的缩放表面上具有预定幅度。

[0020] 因此，在此描述的方法的实施例中，波函数(例如相应虚拟声源位置周围的不同量级的多极和 / 或球面波函数)被缩放为在它们的相应虚拟声源周围的缩放表面上具有相等或至少近似相等的幅度。具体地说，具有与它们的原点相同的虚拟源位置的所有波函数可以被缩放在该虚拟源位置周围的相同缩放表面上。缩放表面可以是其中心在对应虚拟源位置中的球面表面。具体地说，当缩放表面是全部具有相同半径的球面表面时，波函数被缩放为在距它们的相应虚拟源位置(即波函数原点)的预定距离处具有相同幅度。

[0021] 因此，在此所描述的方法的实施例应用波函数的缩放，方式如此：在模型区域中具

有较强衰减(decay)的函数被缩放到相同区域(具体地说,在测量位置处)中的较低幅度。例如在具有单个虚拟源位置以及以单个虚拟源位置作为原点而定义的多个波函数的实施例中,当波函数集合包括不同量级的多极和/或球面波函数时,在此描述的缩放方案尤其有用。由于波函数在相应缩放表面上具有(近似)相等的幅度,因此与具有较弱衰减的波函数相比,当这些具有较强衰减的波函数进入第一无源区域(具体地说,在测量位置处)时,它们已经到达较低等级。由于这些快速衰减波在测量位置处具有较小的幅度,因此它们在对于展开系数的计算而设置的方程系统中将得到较低的权重,并且因此它们将首先被正则化过程截去(cut away)。对于能够将场分量保持为远高于测量数据的本底噪声(noise floor)并且截去已经衰减到如此低的等级以致它们被测量不精确性支配的波分量的正则化方法来说,这种类型的行为是期望的。因此,这种缩放的优点是,其允许正则化方案执行优化滤波,由此允许更精确的重建。

[0022] 将会理解,在此描述的缩放实施例可以结合 HELS 方法以及在此描述的最小范数方法二者而得以使用。

[0023] 所述声源可以是发射或者反射声学辐射的任何对象。所述对象可以是任意形状的,并且声音可以是任何种类的声音,例如噪声、可听见的声音、听不见的声音(例如超声或次声(infra sound))等、或其组合。

[0024] 可以由任何适合的声学测量设备(例如传声器(microphone)、水诊器(hydrophone)、压力梯度换能器(transducer)、粒子速度换能器等、或其组合)来测量在测量位置处的第一声学量。在某些实施例中,由声学测量设备阵列(例如以规则或不规则栅格(例如二维或三维栅格)布置的这样的设备集合)来执行测量。测量的第一声学量可以是声压、声压梯度、粒子速度、和/或类似物。

[0025] 重建的声场可以由指示第二声学量(例如声压、声强度或粒子速度)的空间分布的任何适合数据集合来表示。第一声学量和第二声学量可以是相同量或不同量。数据集合可以被表示为映射,例如直接在任意表面(例如待分析的声音/噪声发射对象的表面或靠近对象的表面)的实际表面几何结构上的第二声学量的映射。

[0026] 由于硬表面的顶部上的粒子速度密切对应于表面自身的实际振动,因此结果可以直接用于与结构模型的相关性。在某些实施例中,声场被表示为保角(conformal)映射。在某些实施例中,声场参数得以重建并且被映射在表面上,典型地接近源表面。可替换地或者另外,例如,可以重建在波函数表示的有效性的 3D 区域中的单个位置处的谱。

[0027] 一个或多个缩放的波函数对于接收到的测量值的最小范数拟合通常指代这样的数值过程:确定求解线性方程集合的复数展开系数集合,其中,所确定的因子集合具有至少近似的极小(minimal)范数,即在方程集合没有唯一解的情况下,该过程确定在可能的解集合当中具有极小范数的解。线性方程集合在测量位置处需要每一个都乘以相应展开系数的波函数之和等于测量值。展开系数是表示幅度和相位的复数。发明人已经认识到,甚至当方程集合的解不唯一时,也可以实现声场的精确重建,并且该过程确定最小范数解。

[0028] 在此描述的方法的实施例的另一优点在于,根据最小范数解公式的第二声学量的计算可以基于指示在所述测量位置的第一个处的波函数集合与在第二位置处的波函数集合的相应相关性的相关函数的计算,所述第二位置选自所述目标位置和所述测量位置。具体地说,所述最小范数解公式包括具有等于测量位置的数量的维度的平方(square)相关矩

阵，其中，平方相关矩阵的每个元素指示在相应测量位置处估计的波函数集合的相关性。

[0029] 测量位置和至少一个目标位置可以位于第一无源、均匀(homogeneous)区域中，并且虚拟源位置可以位于第一无源区域外部，典型地在距第一无源区域的边界的预定距离中。每个虚拟源位置充当一个或多个波函数集合的原点。

[0030] 在某些实施例中，第一无源区域由第一表面限定，至少一个声源包括于具有对象表面的对象中，并且对象表面的至少一部分限定第一表面的至少一部分。因此，对象表面可以至少部分地限定可以重建声场的第一无源测量和重建域，由此允许至少某些目标位置位于对象表面上。虚拟源位置被限定在测量和重建域外部。

[0031] 例如，虚拟源位置(即波函数的相应波函数的原点)可以按与待分析的声源周围的对象表面的预定空间关系而被限定。例如，虚拟源可以被限定在全部具有距对象表面预定距离的位置处，由此提供表面的精确映射。通常，对象表面可以具有面向声源和虚拟源位置的第一侧面以及面向测量和目标位置的第二侧面。然而，在某些实施例中，某些虚拟源位置可以位于源对象外部，但在所述第一无源区域外部。

[0032] 波函数可以是适合的基本波函数集合，例如基函数正交集合。每个基本波函数在重建区域中均满足所谓的亥姆霍兹方程或简约波方程。在某些实施例中，基本波函数是球面波函数。在某些实施例中，对于每个虚拟源位置，使用缩放球面波函数的有限集合，例如用于定义有限多极展开，即例如选自单极点函数、双极点函数集合(具有不同定向)、和/或类似物的有限数量的多极基函数的线性组合。具体地说，该过程可以直接或者间接地根据基本波函数的线性组合来计算第二声学量，每个基本波函数用相应展开系数加权。例如，计算可以包括计算波函数的空间导数。如果波函数的线性组合提供压力，则可以根据波函数的空间导数的加权和来获得粒子速度(使用相同展开系数，但具有与常数因子有关的附加频率)。此外，可以根据压力和粒子速度计算声强度。

[0033] 注意，以上和以下描述的方法的特征可以至少部分地以软件或固件来实施，并且可以在数据处理设备或通过执行程序代码装置(例如计算机可执行指令)所产生的其它处理装置上实行。在此以及以下中，术语处理装置包括适合用于执行以上功能的任何电路和/或设备。具体地说，以上术语包括通用或专用可编程微处理器、数字信号处理器(DSP)、专用集成电路(ASIC)、可编程逻辑阵列(PLA)、现场可编程门阵列(FPGA)、专用电子电路等，或其组合。

[0034] 本发明实施例可以以多种方式实施，包括以上和以下描述的方法、系统、设备和产品装置，每个都产生结合首先提及的方法之一而描述的一个或多个利益和优点，并且每个都具有与结合首先提及的方法之一而描述的以及/或者在从属权利要求中公开的实施例对应的一个或多个实施例。

[0035] 具体地说，用于重建声场的处理设备的实施例包括用于接收在测量位置集合测量的第一声学量的测量值的接口，以及处理单元。

[0036] 用于重建声场的系统可以包括以上以及以下公开的装置，以及换能器集合，所述换能器用于在测量位置集合测量第一声学量，并且可以通信连接的方式连接到所述装置，从而将测量值转发到所述装置。

[0037] 计算机程序可以包括程序代码装置，其适于当在数据处理系统上执行所述程序代码装置时使得该数据处理系统执行以上以及以下公开的方法的步骤。计算机程序可以被存

储在存储装置上，或者体现为数据信号。存储装置可以包括任何适合的用于存储数据的电路或设备(例如 RAM、ROM、EPROM、EEPROM、闪速存储器)、磁或光存储设备(例如 CD ROM、DVD、硬盘)、和 / 或类似物。

附图说明

[0038] 参照附图根据以下描述的实施例，上述和其它方面将是清楚和明确的，在附图中：

[0039] 图 1 示出用于重建声场的系统的示意性框图。

[0040] 图 2 示出计算重建的声场的过程的实施例的流程图。

[0041] 图 3 示出计算重建的声场的过程的另一实施例的流程图。

[0042] 遍及附图，凡在可行之处，相等的参考标记指代相等或对应的元件、特征或组件。

具体实施方式

[0043] 图 1 示出用于重建声场的系统的示意性框图。该系统包括声学接收机 108 集合和分析单元 103，所述分析单元 103 连接到声学接收机。

[0044] 在以下，声学接收机 108 也将被称为换能器。然而，应理解，声学接收机可以是传声器、水诊器或任何其它适合的用于测量声学特性(例如声压、声压梯度、粒子速度、和 / 或其它线性量、或其组合)的设备。在图 1 的实施例中，换能器 108 被实施为换能器的阵列 102，其中，换能器 108 以规则栅格(例如 1 维栅格、2 维栅格或 3 维栅格)布置。虽然规则栅格中的布置考虑了高效数值实施，但可以使用其它几何结构。在某些实施例中，甚至单个换能器可以用于串行地在不同点处进行测量。这种串行测量可以例如用在声源为固定的情况，以及可以相对于一个或若干个基准信号而测量相位的情况。换能器的数量以及阵列的几何结构(例如换能器之间的间距)可以根据待分析的对象的大小和几何结构复杂性、感兴趣的频率范围以及期望的空间分辨率而得以选取。

[0045] 换能器阵列 102 连接到分析单元 103，以使得该换能器 108 可以例如经由有线信号连接或无线信号连接而将测量的信号转发到分析单元。

[0046] 分析单元 103 包括：接口电路 104，用于接收并且处理来自换能器阵列 102 的测量信号；处理单元 105，其与接口电路 104 进行数据通信；以及输出单元 106，其与处理单元 105 进行数据通信。

[0047] 接口电路包括信号处理电路，其适合用于从换能器 108 接收输出信号，并且处理接收到的信号以用于由处理单元 105 进行后续分析。接口电路 104 可以包括以下组件中的一个或多个：用于放大接收到的信号的一个或多个预放大器、用于将接收到的信号转换为数字信号的一个或多个模拟到数字(A/D)转换器、一个或多个滤波器(例如带宽滤波器)、和 / 或类似物。例如，接口电路可以将作为每一个换能器的频率的函数的相位和幅度提供作为输出数据。在某些实施例中，接口单元可以执行同时时间数据获取，并且所有其他处理于是可以由处理单元 105 典型地使用 FFT 来完成，包括数据到频域的变换。

[0048] 处理单元 105 可以是适合编程的微处理器、计算机的中央处理单元、或用于处理从接口单元 104 接收到的信号的任何其它适合的设备(例如 ASIC、DSP、和 / 或类似物)。处理单元适于处理经由接口电路 104 接收到的换能器信号，以便计算在此所描述的重建的声

场。

[0049] 输出单元 106 可以包括显示器或用于提供重建的声场的视觉表示的任何其他适合的设备或电路(例如用于提供打印后的表示的打印机和 / 或打印机接口)。可替换地或者另外,输出单元 106 可以包括用于传送以及 / 或者存储指示重建的声场的数据的任何适合的电路或设备(例如 RAM、ROM、EPROM、EEPROM、闪速存储器)、磁或光存储设备(例如 CD ROM、DVD、硬盘)、有线或无线数据通信接口(例如到计算机或电信网络(例如 LAN、广域网和互联网)的接口)、和 / 或类似物。

[0050] 分析单元 103 可以被实施为适合编程的计算机,例如包括适合的信号获取板或电路的 PC。

[0051] 该系统可以还包括连接到分析单元 103 的适合的位置检测设备 110,用于检测换能器 108 例如相对于基准坐标系统的位置。位置检测设备可以包括测试台、框、或其它结构,换能器阵列可以以预定位置和定向安装至其,以及 / 或者阵列的位置和定向可以手动测量或者例如由适合的传感器自动测量的地方。可替换地,换能器阵列 102 可以包括位置检测设备、或其至少一部分。例如,换能器阵列可以包括磁场位置检测系统、回转仪、光学位置检测系统和 / 或类似物的线圈(coil)。

[0052] 在操作期间,换能器阵列 102 位于发射声学辐射并且为之重建声场的对象 100 的表面 101 附近。换能器的数量、阵列的几何结构(例如换能器之间的间距)、以及阵列与对象表面 101 之间的距离可以根据待分析的对象的大小和几何结构复杂性、感兴趣的频率范围以及期望的空间分辨率而得以选取。例如,对于车辆引擎的声场的重建,可以使用具有例如 3cm 元件之间间距的 8×8 传声器矩阵阵列。然而,应理解,同样可以使用其它类型和大小的阵列。

[0053] 阵列 102 的位置是例如由位置检测设备 110 确定的,并且被馈送到分析单元 103 中。阵列 102 的换能器 108 测量所确定的位置处的声压或另一适合的声学量,并且所得换能器信号被发送到分析单元 103。

[0054] 例如,换能器阵列可以是具有集成位置检测设备的手持阵列,因而允许在对象周围分布的不同的可访问位置处的测量,并且减少在用于测试的源的特殊准备上所花费的时间是最小的。例如,当将声源(例如压缩机、泵或其它机器)映射(map)在测试台上时,改变测试设置(例如燃料线路、电子引线等的布线(routing))以提供对完全表面的不受阻访问所需的时间得以减少,如果未消除的话。另一典型应用可以是在车舱内部,其中 3D 阵列栅格可以用于能够区分所有方向上的源,例如可以使用双层阵列(例如包括 8×8×2 个传感器)。

[0055] 分析单元 103 根据输入数据计算重建的声场,并且存储以及 / 或者输出重建的声场的表示。

[0056] 现将参照图 2 并且继续参照图 1 描述用于生成重建的声场的过程的实施例。

[0057] 在步骤 S1 中,过程接收位置集合 r_i, i = 1,2, ..., I 的坐标以及在位置集合 r_i 处测量的复数时间谐波声压 $p(r_i)$。r_i 表示相对于适合的坐标系统的位置的坐标矢量,例如根据从位置检测设备 110 接收到的输入而确定的换能器位置。为了该描述,将假设位置 r_i 位于均匀流体(例如空气或水)所占据的无源区域 Ω 中。可以以各种方式根据接收到的换能器信号确定复数时间谐波声压 $p(r_i)$。例如,可以进行与所有换能器的单个同时记录,随后进行所有信号的 FFT,其为每个 FFT 线路提供复数(时间谐波)声场。可替换地,可以根据

对于所有阵列换能器的基准信号执行互谱(cross spectra)的测量，并且执行基准信号的自谱(auto — spectrum)的测量。除以自谱的平方根的互谱于是为所应用的谱的每个频率线路提供复数(时间谐波)声场。图 2 的过程基于测量的声压执行 Ω 中声场的重建。

[0058] 为此，在步骤 S2 中，该过程定义能够以足够高精度表示可以存在于 Ω 中的所有声压场的基本波函数集合，Ψ_n, n = 1, ...,N：

[0059] $$p(\mathbf{r}) = \sum_{n=1}^{N} a_n \Psi_n(\mathbf{r}) \qquad (1)$$

[0060] 其中，a_n 是复数加权因子，其还将被称为展开系数。基本波函数可以是缩放的球面波函数，或者等效地，来自多极源(例如单极、双极和 / 或四极等)的声场，其中这些虚拟源分布在 Ω 周围，但在 Ω 外部。因此，该过程定义场表示的域 Ω 外部的虚拟源位置 107 集合。例如，该过程可能已经存储虚拟源集合的位置，以及 / 或者接收位置(例如作为用户输入)，以及 / 或者生成预定几何结构中的位置，典型地跟随(following)源表面，以及 / 或者类似行动。在某些实施例中，该过程可以使用单个虚拟源位置，例如通过定义单个虚拟源位置的多极展开函数的集合，而其它实施例可以利用多个虚拟源位置，例如使用每个虚拟源位置的单个波函数。此外，其它组合可以是可能的。虚拟源位置可以定义为位于与待研究的对象的真实对象表面保角或者至少接近保角的表面上。然而，同样可以通过其它方式来定位虚拟源位置。具体地说，在图 1 的示例中，无源区域 Ω 示出为具有与对象表面 101 重合的边界。因此，在图 1 的示例中，虚拟声源 107 也全部示出在对象 100 内部。然而，在可替换的实施例中，区域 Ω 可以由与对象表面至少部分地不同的边界表面(典型地，部分在对象 100 外部而部分与对象表面 101 重合的表面)限定。因此，在这些可替换的实施例中，至少某些虚拟源位置可以位于对象 100 外部，但仍然在 Ω 外部。例如，当使用双层阵列时，该过程可以限定围绕阵列的虚拟源位置。这种布置在反射和 / 或源来自于阵列后面的情况下可能是有用的。

[0061] 对于每个虚拟源位置，该过程定义缩放的波函数集合。例如，对于每个虚拟源位置，可以从以下选取波函数集合：

[0062] - 有限的球面波函数集合(可以注意，除了与频率有关的缩放因子之外，球面波函数和多极场是相同的)；

[0063] - 仅第零次(degree)函数，其与多极展开的单极点函数对应；

[0064] - 仅 1、2 或 3 个第一次函数，其与多极展开的单极、双极和四极对应。

[0065] 选取所有基本波函数，以便在重建区域中实现亥姆霍兹方程。具体地说，这是来自多极的球面波函数和场的情况，设想它们的原点在重建区域外部。在某些实施例中，仅边界条件是测量场值，但可以结合其它已知的边界条件，例如反射表面。

[0066] 注意，在此描述的方法的实施例也可应用在未确定的情况下，即当展开函数的数量 N 大于测量点的数量 1 时，即 N>1。

[0067] 每个波函数具有缩放因子，其可以取决于函数的频率和 / 或原点。缩放可以例如使得所有函数在距充当它们的原点的虚拟源位置的某个所选取的距离处(即在相应虚拟源位置 107 周围的球面缩放表面 112 上)具有相同的(或者至少近似相同的)幅度。缩放表面

112 的半径被选取为小于虚拟源位置 107 与区域 Ω 的边界之间的距离(或所有这些距离中的最小距离)。如上所述,边界可以是对象表面 101。因此,波函数 Ψ_n 可以定义为标准球面波函数的缩放版本。可以值得注意的是,这种缩放指代在基于包括缩放的波函数 Ψ_n 的方程执行展开系数的确定时所定义的波函数的特性。

[0068] 对象表面可以是该过程的输入参数,其可以例如是以与换能器位置相似的方式例如从手动测量的表面点或者从来自于位置检测设备的数据而获得的;可替换地或者另外,作为该过程的一部分,对象表面可以被测量 / 确定。它可以是所考虑的对象的物理表面。缩放和源模型表面是由重建过程所限定的。源模型表面是虚拟源位置 107 位于其上的表面,而缩放表面 112 是相应虚拟源位置周围的球面表面,在其上源自对应虚拟源位置的缩放波函数全部具有相等的幅度。源模型表面和缩放表面可以限定在对象内部,即在与测量域相对的对象表面的一侧。通常,源模型表面和缩放表面可以被限定,以使得缩放表面完全位于区域 Ω 外部,例如对象 100 内部。例如,缩放表面的半径可以小于从源模型表面到对象表面的距离。这种缩放允许正则化方法正确地起作用。具体地说,正则化方法通常对于具有强衰减的波函数比具有弱衰减的波函数在测量区域中具有更低的幅度的模型良好地起作用。如果波函数未被缩放,则较高阶的多极(其为具有强衰减的波函数)将比较低阶函数(其具有弱衰减)(例如单极和双极)在重建区域中具有更大的幅度。正则化的目的在于抑制测量噪声的影响,并且这是通过微扰方程系统而完成的。如果波未被缩放,则微扰从源于较低阶波的关联矩阵移除有价值的信息,而缩放的版本从较不重要的较高阶项移除更多信息。

[0069] 应理解,可替换地或者另外对于声压,该过程可以计算不同的声学量,例如粒子速度。例如,方向 x (例如选自笛卡尔坐标系统的 x、y 或 z 方向的某个方向)上的粒子速度 $u_x(r)$ 可以通过应用欧拉方程而获得:

[0070] $$\mathbf{u}_\chi(\mathbf{r}) = \frac{-1}{j\omega\rho_0}\frac{\partial p(\mathbf{r})}{\partial \chi} = \frac{-1}{j\omega\rho_0}\sum_{n=1}^{N} a_n \frac{\partial \Psi_n(\mathbf{r})}{\partial \chi} = \sum_{n=1}^{N} a_n \Phi_{\chi,n}(\mathbf{r})$$

(2)

[0071] 其中,我们引入展开函数的空间导数。

[0072] $$\Phi_{\chi,n}(\mathbf{r}) \equiv \frac{-1}{jk\rho_0 c}\frac{\partial \Psi_n(\mathbf{r})}{\partial \chi} \qquad (3)$$

[0073] 在此,ω 是角频率,k=ω/c 是波数,c 是声音的传播速度,ρ_0 是介质(即流体)密度,并且 j 是虚数单位。

[0074] 相应地,该过程可以计算在待重建的声场的目标点集合 r 中的每一个处的声压和 / 或粒子速度。目标点的两个示例在图 1 中被指定为 109。在很多情况下,将会感兴趣的是在待研究的对象的对象表面上重建声场。例如,该过程可以计算在规则栅格的栅格点集合中的每一个处的声压。为了该描述,要对于其来计算重建的声场值的点也将被指代为计算点。

[0075] 定义包含计算位置处的展开系数和波函数的以下矢量:

[0076] $$\mathbf{a} \equiv \{a_n\} \equiv \begin{Bmatrix} a_1 \\ a_2 \\ \vdots \\ a_N \end{Bmatrix}, \quad \boldsymbol{\alpha}(\mathbf{r}) \equiv \begin{Bmatrix} \Psi_1(\mathbf{r}) \\ \Psi_2(\mathbf{r}) \\ \vdots \\ \Psi_N(\mathbf{r}) \end{Bmatrix}, \quad \boldsymbol{\beta}_\chi(\mathbf{r}) \equiv \begin{Bmatrix} \Phi_{\chi,1}(\mathbf{r}) \\ \Phi_{\chi,2}(\mathbf{r}) \\ \vdots \\ \Phi_{\chi,N}(\mathbf{r}) \end{Bmatrix}$$

(4)

[0077] 允许将方程(1)和(2)重写为：

[0078] $$p(\mathbf{r}) = \mathbf{a}^T \boldsymbol{\alpha}(\mathbf{r}) = \left[\boldsymbol{\alpha}(\mathbf{r})\right]^T \mathbf{a} \qquad (5)$$

[0079] $$u_\chi(\mathbf{r}) = \mathbf{a}^T \boldsymbol{\beta}_\chi(\mathbf{r}) = \left[\boldsymbol{\beta}_\chi(\mathbf{r})\right]^T \mathbf{a} \qquad (6)$$

[0080] 其中，上标 T 表示矩阵或矢量的转置。

[0081] 我们定义在测量位置处的波函数值的矩阵 A 和 B：

[0082] $$\mathbf{B} \equiv \{\Psi_n(\mathbf{r}_i)\} \equiv \begin{Bmatrix} \Psi_1(\mathbf{r}_1) & \Psi_2(\mathbf{r}_1) & \cdots & \Psi_N(\mathbf{r}_1) \\ \Psi_1(\mathbf{r}_2) & \Psi_2(\mathbf{r}_2) & & \Psi_N(\mathbf{r}_2) \\ \vdots & & \ddots & \vdots \\ \Psi_1(\mathbf{r}_I) & \Psi_2(\mathbf{r}_I) & \cdots & \Psi_N(\mathbf{r}_I) \end{Bmatrix}, \quad \mathbf{A} \equiv \mathbf{B}^T$$

(7)

[0083] 以及所测量的压力的矢量 p：

[0084] $$\mathbf{p} \equiv \{p(\mathbf{r}_i)\} \equiv \begin{Bmatrix} p(\mathbf{r}_1) \\ p(\mathbf{r}_2) \\ \vdots \\ p(\mathbf{r}_I) \end{Bmatrix} \qquad (8)$$

[0085] 因此，在步骤 S3 中，因此该过程可以根据下式来计算展开系数的矢量 a 作为亥姆霍兹方程的正则化最小范数解：

[0086] $$\mathbf{a} = \mathbf{B}^H \left(\mathbf{B}\mathbf{B}^H + \varepsilon \mathbf{I}\right)^{-1} \mathbf{p} \qquad (9)$$

[0087] 其中，上标 H 表示复数矩阵或矢量的厄密(共轭)转置，I 是适当维度的单位对角二次矩阵，并且 ε 是可以根据所指定的信噪比(SNR)而计算的正则化参数，或者其可以是使用广义交叉验证(GCV)、L 曲线方法或其它适合的参数估计方法而基于噪声测量数据自动计算的。当指定 SNR 时，于是可以获得典型地作为乘以 10^(SNR/10)) 的矩阵 BB^H 中的对角元素的平均值的参数。可替换地，可以使用最大对角元素。

[0088] 在方程(9)中，所谓的 Tikhonov 正则化已经被应用于未正则化的解。

[0089]

$$\mathbf{a}=\mathbf{B}^{H}\left(\mathbf{B}\mathbf{B}^{H}\right)^{-1}\mathbf{p}$$

[0090] 然而，应理解，可以使用其它形式的正则化。

[0091] 可以通过用于求解矩阵方程并且反转（invert）矩阵的任何适合的技术来求解方程（9）。应理解，矩阵 BB^{H} 是 1×1 维矩阵，即，对于 $I<N$，在此所描述的过程提供一种需要相对少的计算资源的方法。此外，甚至在这种待确定的情况下，$I<N$，该过程提供良好定义的解，即具有极小范数的解，在一个实施例中，具有极小 2 范数的解。

[0092]

$$\left\|\mathbf{a}\right\|_{2}=\sqrt{\sum_{n=1}^{N}\left|a_{n}\right|^{2}}$$

[0093] 随后，该过程可以循环通过所有计算点，并且计算期望的声学量，例如根据方程（5）的声压、或根据方程（6）的粒子速度，或者这二者。具体地说，在步骤 S4 中，该过程使用方程（5）和 / 或（6），用于当前计算位置。在步骤 S5 中，该过程确定是否存在留下的未处理的计算点。如果情况如此，则过程返回到步骤 S4，否则，该过程在步骤 S6 处继续进行，在此，计算的声压和 / 或粒子速度集合得以输出，例如作为图形表示、作为数值阵列、和 / 或以任何其它适合的格式。可以容易地从声压和粒子速度获得声强度。

[0094] 在图 2 的实施例中，该过程最初计算展开系数，于是所述展开系数在对于每个计算点的计算中得以重新使用。在可替换实施例中，并非分离地计算展开系数矢量 a，该过程可以根据以下公式使用方程（5）和（9）的组合：

[0095] $$p(\mathbf{r})=\left[\mathbf{a}(\mathbf{r})\right]^{T}\mathbf{B}^{H}\left(\mathbf{B}\mathbf{B}^{H}+\varepsilon\mathbf{I}\right)^{-1}\mathbf{p}=\left[\mathbf{A}^{H}\mathbf{a}(\mathbf{r})\right]^{T}\left(\mathbf{B}\mathbf{B}^{H}+\varepsilon\mathbf{I}\right)^{-1}\mathbf{p}$$

（10）

[0096] 还可以使用方程（5）中的其它形式按以下方式将其写出：

[0097] $$p(\mathbf{r})=\mathbf{p}^{T}\left(\mathbf{A}^{H}\mathbf{A}+\varepsilon\mathbf{I}\right)^{-1}\mathbf{A}^{H}\mathbf{a}(\mathbf{r})$$ （10）

[0098] 在图 3 所示的该实施例中，该处理因而可以：

[0099] 步骤 S1：在该初始化步骤中，该过程定义适合的坐标系统 113、虚拟源位置 107 集合、以及适合地缩放的波函数集合，如上所述。步骤 S1 的初始化还可以包括设置一个或多个参数、用于应用所使用的测量系统的类型和特性（例如换能器的数量以及它们在阵列中的相对位置、声场将得以重建的目标位置的坐标、待计算的一个或多个声学特性等）的正则化方案。例如，这些和另外或可替换的参数可以是用户经由分析单元 103 的适合的用户界面而定义的。

[0100] 在步骤 S2 中，该过程接收位置集合 r_{i}，i =1, 2, ..., I 的坐标以及在位置集合 r_{i} 处测量的相应复数时间谐波声压 $p(r_{i})$，如结合图 2 所描述的那样。

[0101] 在步骤 S3 中，该过程计算 $\mathbf{A}^{H}\mathbf{A}$ 或 $\mathbf{B}\mathbf{B}^{H}=(\mathbf{A}^{H}\mathbf{A})^{T}$

[0102] 在步骤 S4 中，该过程计算矢量 q 作为

[0103]

$$\mathbf{q}=\left(\mathbf{B}\mathbf{B}^{H}+\varepsilon\mathbf{I}\right)^{-1}\mathbf{p}$$

[0104] 或

[0105]

$$\mathbf{q}^{T}=\mathbf{p}^{T}\left(\mathbf{A}^{H}\mathbf{A}+\varepsilon\mathbf{I}\right)^{-1}$$

[0106] 在此，ε 是如上所述的正则化参数。

[0107] 该过程可以循环通过所有计算点，并且计算期望的声学量。具体地说，在步骤 S5 中，该过程计算在当前计算位置 r 处的期望声学量。

[0108] 例如，在步骤 S5 中，该过程可以对于当前计算位置 r 计算（一个或多个）矢量

[0109]

$$\boldsymbol{\varphi}(\mathbf{r})\equiv\mathbf{A}^{H}\boldsymbol{\alpha}(\mathbf{r})$$

[0110] 和 / 或

[0111]

$$\boldsymbol{\psi}_{x}(\mathbf{r})\equiv\mathbf{A}^{H}\boldsymbol{\beta}_{x}(\mathbf{r})$$

[0112] 并且获得压力作为

[0113]

$$p(\mathbf{r})=\mathbf{q}^{T}\boldsymbol{\varphi}(\mathbf{r})$$

[0114] 和 / 或速度作为

[0115]

$$u_{x}(\mathbf{r})=\mathbf{q}^{T}\boldsymbol{\psi}_{x}(\mathbf{r})$$

[0116] 在步骤 S6 中，该过程确定是否存在留下的未处理的计算点。如果情况如此，则该过程返回到步骤 S5，否则，该过程在步骤 S7 处继续进行，在此，计算的声压和 / 或粒子速度集合得以输出，例如，如结合图 2 所描述的那样。

[0117] 虽然已经详细描述并且示出了某些实施例，但本发明不限于此，而是也可以在所附权利要求所定义的主题的范围内以其它方式体现。例如，已经结合所测量的声学量是声压的实施例主要描述了在此公开的方法的实施例。然而，应理解，在其它实施例中，可以测量不同的声学量。例如，代替声压，可以在测量位置 r_i 处测量方向 x 上的粒子速度 $u_x(r_i)$。在该实施例中，代替方程（1），当对于展开系数矢量 a 而求解的线性方程系统被设置时，可以对于位置 r_i 使用方程（2）。这意味着，在矩阵 A 和 B 中，函数 $\Psi_n(r_i)$ 被 $\Phi_{x,n}(r_i)$ 替换，其中 n=1 ，2，...，N，并且在方程（8）的矢量 p 中，压力 $p(r_i)$ 被所测量的粒子速度 $u_x(r_i)$ 替换。其它所有东西保持不变。

[0118] 在此描述的方法和装置可以用于例如在分析机器、电动机、引擎、交通工具（例如车辆）和 / 或类似物的声学特性时重建各种声音 / 噪声源（例如振动对象）的声场。

[0119] 在此描述的方法的实施例可以通过包括若干独特元件的硬件、以及/或者至少部分地通过适合编程的微处理器而得以实施。

[0120] 在列举了若干部件的装置权利要求中，这些部件中的几个可以由一个以及相同的元件、组件或硬件项来体现。仅仅在相互不同的从属权利要求中陈述或者在不同实施例中描述特定措施(measure)的事实并非指示这些措施的组合不能被有利地使用。

[0121] 应强调，当在该说明书中使用术语“包括/包含”时，其指定所声明的特征、整体、步骤或组件的存在，但不排除一个或多个其它特征、整体、步骤、组件或其群组的存在或增加。

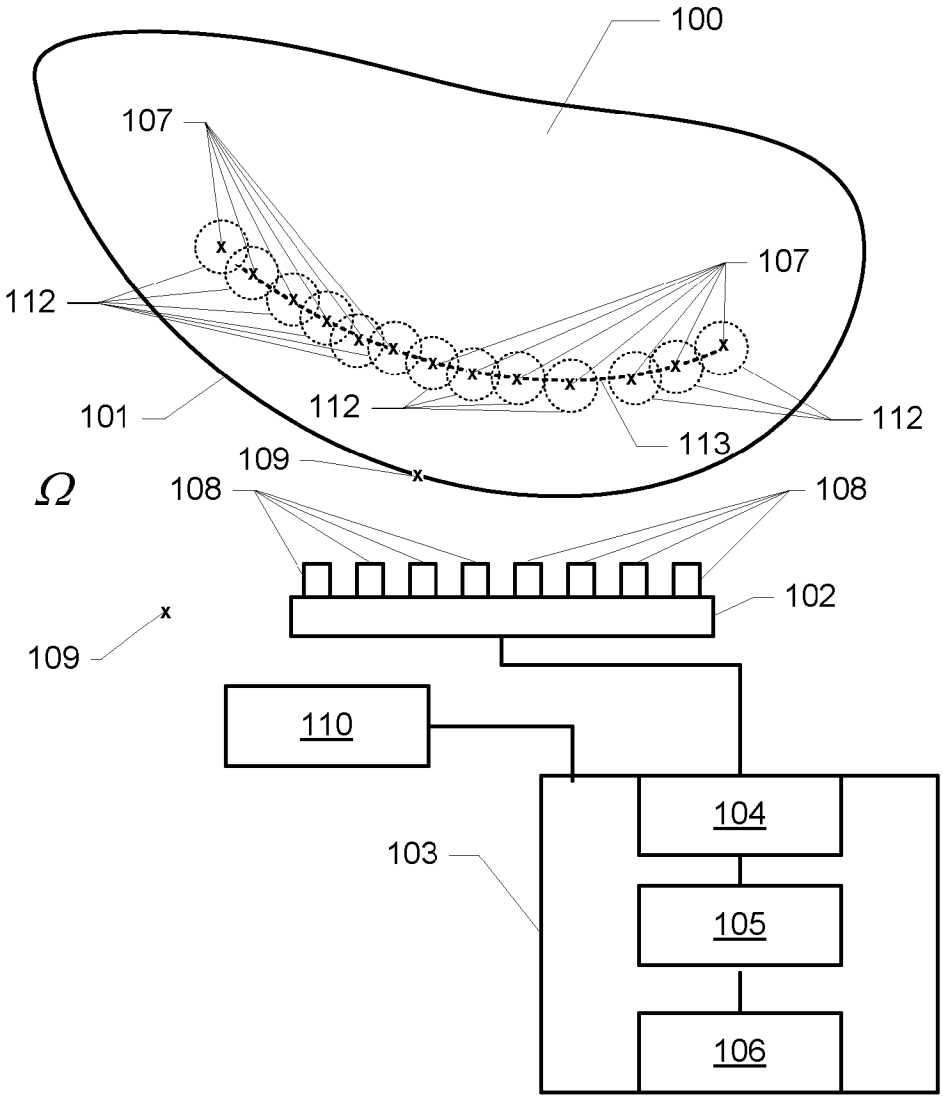

100
107
107
112
112
101
112
113
109
Ω
108
108
102
109
110
104
103
105
106

图 1

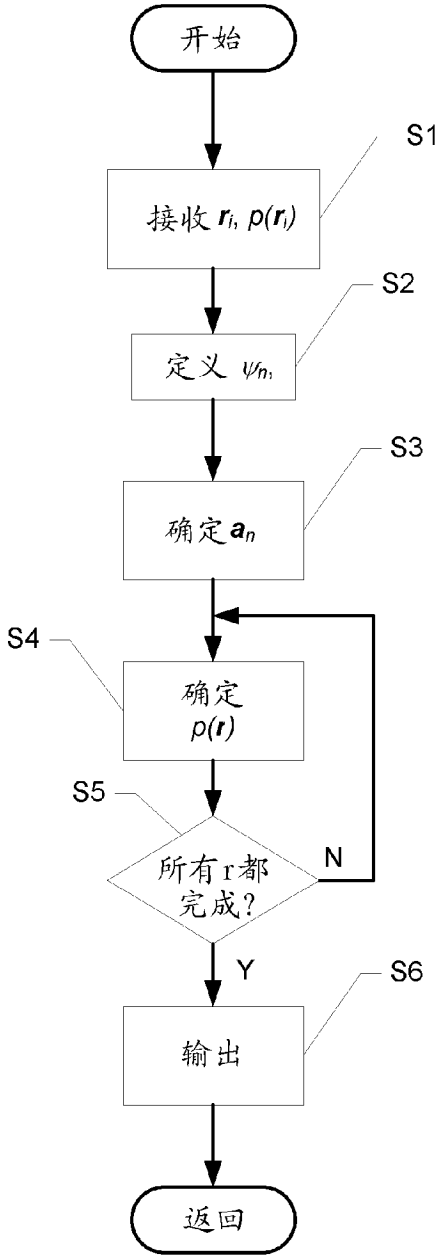

开始
S1
接收 r_i, $p(r_i)$
S2
定义 $\psi_{n,}$
S3
确定 a_n
S4
确定 $p(r)$
S5
所有r都完成?
N
Y
S6
输出
返回

图 2

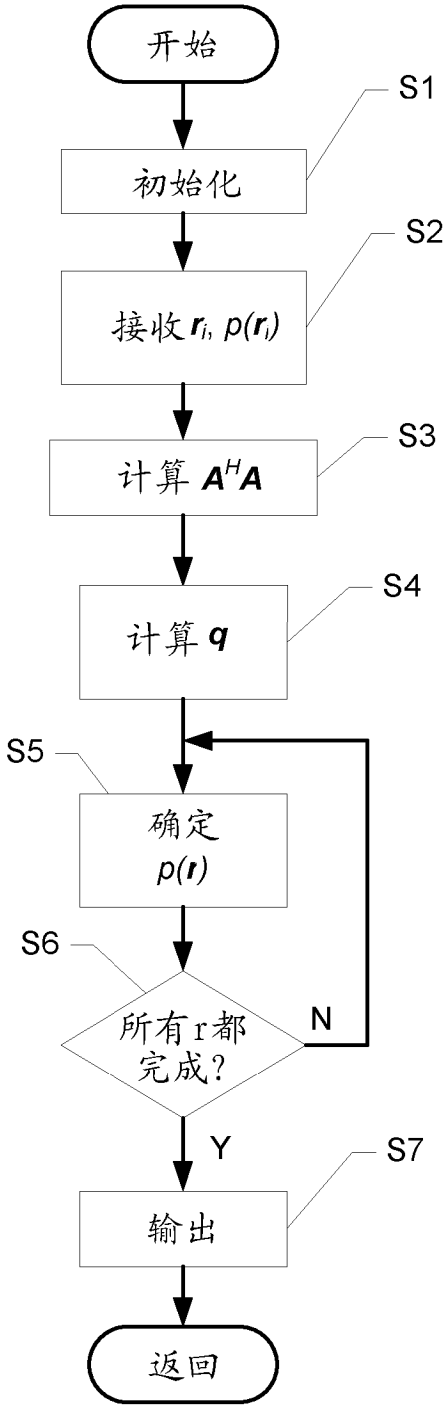

开始
S1
初始化
S2
接收 r_i, $p(r_i)$
S3
计算 $A^H A$
S4
计算 q
S5
确定 $p(r)$
S6
所有r都完成?
N
Y
S7
输出
返回

图 3