



(12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 110850371 B

(45) 授权公告日 2021.09.21

(21) 申请号 201911193132.X

(22) 申请日 2019.11.28

(65) 同一申请的已公布的文献号
申请公布号 CN 110850371 A

(43) 申请公布日 2020.02.28

(73) 专利权人 合肥工业大学
地址 230009 安徽省合肥市包河区屯溪路
193号

(72) 发明人 徐亮 李子风 毕传兴 徐文
权璐纯

(74) 专利代理机构 安徽省合肥新安专利代理有
限责任公司 34101
代理人 陆丽莉 何梅生

(51) Int. Cl.
G01S 5/20 (2006.01)

(56) 对比文件

CN 106646376 A, 2017.05.10

CN 107765221 A, 2018.03.06

CN 106546967 A, 2017.03.29

CN 109001681 A, 2018.12.14

KR 101397566 B1, 2014.06.27

Fang Wang. Aeroacoustic noise calculation of noncompact bodies with time-domain scattered green's function. 《Journal of Physics: Conference Series》. 2019, 第1411卷1-9页.

姬庆等. 基于不同格林函数的噪声源定位方法研究. 《压电与声光》. 2017, 第39卷(第3期), 378-382页.

审查员 王文君

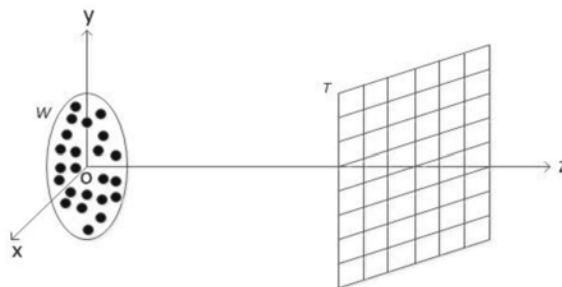
权利要求书3页 说明书10页 附图5页

(54) 发明名称

一种基于Green函数修正的高分辨率声源定位方法

(57) 摘要

本发明公开了一种基于Green函数修正的高分辨率声源定位方法,包括:1采集传声器阵列上各个传感器处的声压数据形成测量面声压列向量;2建立测量面声压列向量与聚焦面声源源强列向量之间的Green函数;3通过稀疏重构方法进行求解,获得聚焦面各网格点处的声源源强列向量,并通过其中源强的大小在聚焦面网格上识别与定位出声源的初步位置;4在获得声源的初步位置后,通过一阶泰勒展开,并结合坐标轮换迭代优化方法对Green函数进行修正,利用初步位置处的Green函数迭代估计出实际声源位置对应的修正后的Green函数,从而在聚焦面上的网格点之间实现声源精确位置的亚网格搜索,进而获得声源的高分辨率、高精度定位结果。



1. 一种基于Green函数修正的高分辨率声源定位方法,其特征包括以下步骤:

步骤1、在K个声源辐射形成的声场中布置M个传感器,从而形成测量面W;采集各传感器所检测到的声压数据 $p = [p(r_1), p(r_2), \dots, p(r_m)]$,其中, r_m 表示测量面W上第m个测量点的坐标向量, $p(r_m)$ 表示第m个测量点的声压数据;

步骤2、定义聚焦面T为离散化声源计算平面所形成的网格面;所述聚焦面T包含N个网格点,且每个网格点为聚焦点;

将每个聚焦点作为潜在声源点,从而利用式(1)构造声源源强列向量 q :

$$q = [q(r_1), q(r_2), \dots, q(r_n)] \quad (1)$$

式(1)中, r_n 表示聚焦面T上第n个聚焦点的坐标向量, $n = 1, 2, 3, \dots, N$;

利用式(2)建立所述聚焦面T上各网格点与传感器阵列中各传感器之间的Green函数矩阵 G :

$$G = \begin{bmatrix} g_1(r_1) & g_1(r_2) & \cdots & g_1(r_n) \\ g_2(r_1) & & & \\ \vdots & & \ddots & \\ g_m(r_1) & & & g_m(r_n) \end{bmatrix} \quad (2)$$

式(2)中, $g_m(r_n)$ 为第n个聚焦点到第m个传感器之间的Green函数,且 $g_m(r_n) = \frac{e^{-jk|r_n - r_m|}}{4\pi|r_n - r_m|}$, j 为虚数单位, k 表示声波波数, $|r_n - r_m|$ 为第n个聚焦点到第m个传感器之间的距离, $m = 1, 2, 3, \dots, M$;

步骤3、利用式(3)建立声源源强列向量 q 与传感器阵列声压测量值 p 之间的关系:

$$p = Gq \quad (3)$$

步骤4、通过稀疏重构算法对(3)式进行求解,获得所述聚焦面T上各网格点处的声源源强列向量,通过所述声源源强列向量中的源强大小确定所述聚焦面上声源的个数K及各声源的初步位置;

根据各声源的初步位置,从所述Green函数矩阵 G 中抽取相应的列,从而形成如式(4)所示的待修正的Green函数矩阵 G_k :

$$G_k = [g(r_{c1}), g(r_{c2}), \dots, g(r_{cK})] \quad (4)$$

式(4)中, $g(r_{cK})$ 为第K个声源的初步位置到传感器阵列中各传感器的Green函数所组成的列向量,即 $g(r_{cK}) = [g_1(r_{cK}), g_2(r_{cK}), \dots, g_m(r_{cK})]^T$;其中 $g_m(r_{cK})$ 为第K个声源的初步位置到第m个传感器的Green函数;

步骤5、对所述待修正的Green函数矩阵 G_k 进行一阶泰勒展开,并结合坐标轮换迭代优化方法,从而估计出实际声源位置对应的修正后的Green函数矩阵 G_t ,从而在所述聚焦面T上网格点之间实现亚网格搜索,得到准确的声源位置。

2. 根据权利要求1中所述的高分辨率声源定位方法,其特征在于:所述步骤5是按如下过程进行:

步骤5.1:利用式(5)所示的一阶泰勒展开方法,得到修正后的Green函数矩阵 G_t :

$$G_t = G_k + \frac{\partial G_k}{\partial x} \times \Delta X + \frac{\partial G_k}{\partial y} \times \Delta Y \quad (5)$$

式 (5) 中, ΔX , ΔY 分别为由各声源在 x 、 y 方向的位置偏差所组成的对角矩阵, 并有:

$$\Delta \mathbf{X} = \begin{bmatrix} \Delta x_1 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & \Delta x_2 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & \Delta x_K \end{bmatrix} \quad \Delta \mathbf{Y} = \begin{bmatrix} \Delta y_1 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & \Delta y_2 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & \Delta y_K \end{bmatrix}$$

式中, Δx_K 为第 K 个声源实际位置相对于初步位置在 x 方向的位置偏差, Δy_K 为第 K 个声源实际位置相对于初步位置在 y 方向的位置偏差;

步骤 5.2: 利用式 (6) 建立声压数据 p 与 K 个声源对应的修正后的 Green 函数矩阵 G_t 之间的数学关系:

$$\mathbf{p} = \left(\mathbf{G}_K + \frac{\partial \mathbf{G}_K}{\partial x} \times \Delta \mathbf{X} + \frac{\partial \mathbf{G}_K}{\partial y} \times \Delta \mathbf{Y} \right) \times \mathbf{q}_K \quad (6)$$

式 (6) 中, \mathbf{q}_K 为 K 个声源的源强列向量;

步骤 5.3: 定义当前迭代次数为 i , 最大迭代次数为 I_{\max} ; 定义当前迭代维度为 j , 并初始化 $i=1$;

步骤 5.4: 令第 i 轮迭代中第 j 个维度的 K 个声源的源强列向量为 $\mathbf{q}_{K(j)}^i$, 并初始化为 \mathbf{q}_K ;

步骤 5.5: 初始化 $j=0$;

步骤 5.6: 先进行 x 方向偏差修正, 利用式 (7) 计算第 i 轮迭代中由于声源在 x 方向存在位置偏差造成的传感器阵列中各传感器处的声压偏差:

$$\left[\Delta p_{x_1}^i, \Delta p_{x_2}^i, \cdots, \Delta p_{x_m}^i \right]^T = \mathbf{p} - \mathbf{G}_K \times \mathbf{q}_{K(j)}^i - \frac{\partial \mathbf{G}_K}{\partial y} \times \Delta \mathbf{Y}^i \times \mathbf{q}_{K(j)}^i \quad (7)$$

式 (7) 中, $\Delta p_{x_m}^i$ 为第 i 轮迭代中由于声源在 x 方向存在位置偏差造成的第 m 个传感器处的声压偏差; $\Delta \mathbf{Y}^i$ 为第 i 轮迭代中 K 个声源的 y 方向位置偏差组成的对角矩阵; 当 $i=1$ 时, $\Delta \mathbf{Y}^i$ 为 0;

步骤 5.7: 利用式 (8) 计算第 i 轮迭代中声源在 x 方向的位置偏差:

$$\left[\Delta x_1^i, \Delta x_2^i, \cdots, \Delta x_K^i \right]^T = \left[\frac{\partial \mathbf{G}_K}{\partial x} \right]^{-1} \times \left[\Delta p_{x_1}^i, \Delta p_{x_2}^i, \cdots, \Delta p_{x_m}^i \right]^T \cdot \frac{1}{\mathbf{q}_{K(j)}^i} \quad (8)$$

式 (8) 中, Δx_K^i 为第 i 轮迭代中第 K 个声源在 x 方向的位置偏差;

步骤 5.8: 将 $j+1$ 赋值给 j ;

步骤 5.9: 利用式 (9) 计算第 i 轮迭代中第 j 个维度的修正后的 Green 函数矩阵 $\mathbf{G}_{t(j)}^i$:

$$\mathbf{G}_{t(j)}^i = \mathbf{G}_K + \frac{\partial \mathbf{G}_K}{\partial x} \times \Delta \mathbf{X}^i + \frac{\partial \mathbf{G}_K}{\partial y} \times \Delta \mathbf{Y}^i \quad (9)$$

式 (9) 中, $\Delta \mathbf{X}^i$ 为第 i 轮迭代中 K 个声源的 x 方向位置偏差组成的对角矩阵;

步骤 5.10: 利用式 (10) 计算第 i 轮迭代中第 j 个维度的 K 个声源的源强列向量 $\mathbf{q}_{K(j)}^i$:

$$\mathbf{q}_{K(j)}^i = \left(\mathbf{G}_{t(j)}^i \right)^{-1} \times \mathbf{p} \quad (10)$$

步骤5.11:再进行y方向偏差修正,利用式(11)计算第i轮迭代中由于声源在y方向存在位置偏差造成的传感器阵列中各传感器处的声压偏差:

$$\left[\Delta p_{y_1}^i, \Delta p_{y_2}^i, \dots, \Delta p_{y_m}^i \right]^T = \mathbf{p} - \mathbf{G}_K \times \mathbf{q}_{K(j)}^i - \frac{\partial \mathbf{G}_K}{\partial \mathbf{x}} \times \Delta \mathbf{X}^i \times \mathbf{q}_{K(j)}^i \quad (11)$$

式(11)中, $\Delta p_{y_m}^i$ 为第i轮迭代中由于声源在y方向存在位置偏差造成的第m个传感器处的声压偏差;

步骤5.12:利用式(12)计算第i轮迭代中声源在y方向的位置偏差:

$$\left[\Delta y_1^i, \Delta y_2^i, \dots, \Delta y_K^i \right]^T = \left[\frac{\partial \mathbf{G}_K}{\partial \mathbf{y}} \right]^{-1} \times \left[\Delta p_{y_1}^i, \Delta p_{y_2}^i, \dots, \Delta p_{y_m}^i \right]^T \cdot \frac{1}{\mathbf{q}_{K(j)}^i} \quad (12)$$

式(12)中, Δy_K^i 为第i轮迭代中第K个声源在y方向的位置偏差;

步骤5.13:将j+1赋值给j;

步骤5.14:利用式(13)计算第i轮迭代中第j个维度的修正后的Green函数矩阵 $\mathbf{G}_{t(j)}^i$:

$$\mathbf{G}_{t(j)}^i = \mathbf{G}_K + \frac{\partial \mathbf{G}_K}{\partial \mathbf{x}} \times \Delta \mathbf{X}^i + \frac{\partial \mathbf{G}_K}{\partial \mathbf{y}} \times \Delta \mathbf{Y}^i \quad (13)$$

步骤5.15:利用式(14)计算第i轮迭代中第j个维度的K个声源的源强列向量 $\mathbf{q}_{K(j)}^i$:

$$\mathbf{q}_{K(j)}^i = \left(\mathbf{G}_{t(j)}^i \right)^{-1} \times \mathbf{p} \quad (14)$$

步骤5.16:判断 $i > I_{\max}$ 是否成立,若成立,则停止迭代,并得到准确的声源位置,否则,将 $\mathbf{q}_{K(j)}^i$ 赋值给 $\mathbf{q}_{K(0)}^{i+1}$ 后,将 $i+1$ 赋值给 i ,同时返回步骤5.5顺序执行。

一种基于Green函数修正的高分辨率声源定位方法

技术领域

[0001] 本发明涉及噪声源的识别和定位领域,具体涉及一种基于Green函数修正的高分辨率声源定位方法。

背景技术

[0002] 噪声源识别技术在机械设备故障诊断、环境噪声治理以及舰船、潜艇减振降噪,高铁、汽车NVH开发等方面有着广泛的应用,并逐步发展出了波束形成、近场声全息、反卷积声源成像等多种先进的噪声源识别技术。近年来,信号处理领域中压缩感知理论的出现为进一步提高噪声源识别精度与空间分辨率,并降低噪声源识别系统的硬件成本提供了理论保证和实现途径,籍此发展出了一些基于压缩感知理论中稀疏重构方法的新兴的噪声源识别技术,例如:基于压缩感知的波束形成算法,基于稀疏等效源和稀疏模态等效源法的近场声全息,基于正交匹配追踪的反卷积声源成像方法等等,这些方法都利用了实际中声源分布通常是空域的先验信息,通过稀疏重构算法求解带有稀疏约束的欠定方程组获得声源分布的稀疏解,实现声源分布的精确重构,从而进一步提高了声源识别的精度与分辨率,降低了测量所需的传感器数目和测量数据量。然而,无论是传统的还是新兴的噪声源识别技术,无论其声源定位精度高低、分辨率如何,其所得到的识别定位结果总是位于聚焦面预先划分好的离散网格点上。这是因为上述方法均假设声源位置恰好落在这些预先划分的离散网格点上,并据此建立相应的Green函数矩阵。然而在实际中声源位置不可能总是正好位于预划分的网格点上,从概率论上来说,声源位置正好在网格点上是小概率事件,其概率接近为0,因此实际中其实很难满足上述假设。实际中对上述声源位置假设的违背,造成算法采用的Green函数与真实的Green函数间存在误差,导致声源识别结果总是落在聚焦面网格点上,使算法无法精确定位位于相邻网格点间的声源,降低了声源识别定位的精度和分辨率。并且由此可见,上述已有的声源识别技术其识别定位精度受聚焦面网格划分密度影响,聚焦面网格越稀疏则算法的识别定位精度越低。当然,加密聚焦面网格可以在一定程度上缓解这个问题,但加密网格同时会导致计算量的成倍增加,影响算法的计算效率和声源识别的实时性。

发明内容

[0003] 本发明的目的是克服上述现有技术的不足,提出一种基于Green函数修正的高分辨率声源定位方法,以期能实现高精度高分辨率声源识别定位。

[0004] 为实现上述目的,本发明采用以下技术方案:

[0005] 本发明一种基于Green函数修正的高分辨率声源定位方法的特点包括以下步骤:

[0006] 步骤1、在K个声源辐射形成的声场中布置M个传感器,从而形成测量面W;采集各传感器所检测到的声压数据 $p = [p(r_1), p(r_2), \dots, p(r_m)]$,其中, r_m 表示测量面W上第m个测量点的坐标向量, $p(r_m)$ 表示第m个测量点的声压数据;

[0007] 步骤2、定义聚焦面T为离散化声源计算平面所形成的网格面;所述聚焦面T包含N

个网格点,且每个网格点为聚焦点;

[0008] 将每个聚焦点作为潜在声源点,从而利用式(1)构造声源源强列向量 q :

$$[0009] \quad q = [q(r_1), q(r_2), \dots, q(r_n)] \quad (1)$$

[0010] 式(1)中, r_n 表示聚焦面T上第n个聚焦点的坐标向量, $n=1,2,3,\dots,N$;

[0011] 利用式(2)建立所述聚焦面T上各网格点与传感器阵列中各传感器之间的Green函数矩阵 G :

$$[0012] \quad G = \begin{bmatrix} g_1(r_1) & g_1(r_2) & \cdots & g_1(r_n) \\ g_2(r_1) & & & \\ \vdots & & \ddots & \\ g_m(r_1) & & & g_m(r_n) \end{bmatrix} \quad (2)$$

[0013] 式(2)中, $g_m(r_n)$ 为第n个聚焦点到第m个传感器之间的Green函数,且

$$g_m(r_n) = e^{-jk|r_n - r_m|} / 4\pi|r_n - r_m|, j \text{ 为虚数单位, } k \text{ 表示声波波数, } |r_n - r_m| \text{ 为第n个聚焦点到第m个传感器之间的距离, } m=1,2,3,\dots,M;$$

[0014] 步骤3、利用式(3)建立声源源强列向量 q 与传感器阵列声压测量值 p 之间的关系:

$$[0015] \quad p = Gq \quad (3)$$

[0016] 步骤4、通过稀疏重构算法对(3)式进行求解,获得所述聚焦面T上各网格点处的声源源强列向量,通过所述声源源强列向量中的源强大小确定所述聚焦面上声源的个数 K 及各声源的初步位置;

[0017] 根据各声源的初步位置,从所述Green函数矩阵 G 中抽取相应的列,从而形成如式(4)所示的待修正的Green函数矩阵 G_k :

$$[0018] \quad G_k = [g(r_{c1}), g(r_{c2}), \dots, g(r_{cK})] \quad (4)$$

[0019] 式(4)中, $g(r_{cK})$ 为第 K 个声源的初步位置到传感器阵列中各传感器的Green函数所组成的列向量,即 $g(r_{cK}) = [g_1(r_{cK}), g_2(r_{cK}), \dots, g_m(r_{cK})]^T$;其中 $g_m(r_{cK})$ 为第 K 个声源的初步位置到第 m 个传感器的Green函数;

[0020] 步骤5、对所述待修正的Green函数矩阵 G_k 进行一阶泰勒展开,并结合坐标轮换迭代优化方法,从而估计出实际声源位置对应的修正后的Green函数矩阵 G_t ,从而在所述聚焦面T上网格点之间实现亚网格搜索,得到准确的声源位置。

[0021] 本发明所述的高分辨率声源定位方法的特点也在于:所述步骤5是按如下过程进行:

[0022] 步骤5.1:利用式(5)所示的一阶泰勒展开方法,得到修正后的Green函数矩阵 G_t :

$$[0023] \quad G_t = G_k + \frac{\partial G_k}{\partial x} \times \Delta X + \frac{\partial G_k}{\partial y} \times \Delta Y \quad (5)$$

[0024] 式(5)中, ΔX , ΔY 分别为由各声源在 x 、 y 方向的位置偏差所组成的对角矩阵,并有:

$$[0025] \quad \Delta \mathbf{X} = \begin{bmatrix} \Delta x_1 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & \Delta x_2 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & \Delta x_K \end{bmatrix} \quad \Delta \mathbf{Y} = \begin{bmatrix} \Delta y_1 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & \Delta y_2 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & \Delta y_K \end{bmatrix}$$

[0026] 式中, Δx_K 为第K个声源实际位置相对于初步位置在x方向的位置偏差, Δy_K 为第K个声源实际位置相对于初步位置在y方向的位置偏差;

[0027] 步骤5.2: 利用式(6)建立声压数据p与K个声源对应的修正后的Green函数矩阵 G_t 之间的数学关系:

$$[0028] \quad \mathbf{p} = \left(\mathbf{G}_K + \frac{\partial \mathbf{G}_K}{\partial x} \times \Delta \mathbf{X} + \frac{\partial \mathbf{G}_K}{\partial y} \times \Delta \mathbf{Y} \right) \times \mathbf{q}_K \quad (6)$$

[0029] 式(6)中, \mathbf{q}_K 为K个声源的源强列向量;

[0030] 步骤5.3: 定义当前迭代次数为i, 最大迭代次数为Imax; 定义当前迭代维度为j, 并初始化i=1;

[0031] 步骤5.4: 令第i轮迭代中第j个维度的K个声源的源强列向量为 $\mathbf{q}_{K(j)}^i$, 并初始化为 \mathbf{q}_K ;

[0032] 步骤5.5: 初始化j=0;

[0033] 步骤5.6: 先进行x方向偏差修正, 利用式(7)计算第i轮迭代中由于声源在x方向存在位置偏差造成的传感器阵列中各传感器处的声压偏差:

$$[0034] \quad [\Delta p_{x_1}^i, \Delta p_{x_2}^i, \cdots, \Delta p_{x_m}^i]^T = \mathbf{p} - \mathbf{G}_K \times \mathbf{q}_{K(j)}^i - \frac{\partial \mathbf{G}_K}{\partial y} \times \Delta \mathbf{Y}^i \times \mathbf{q}_{K(j)}^i \quad (7)$$

[0035] 式(7)中, $\Delta p_{x_m}^i$ 为第i轮迭代中由于声源在x方向存在位置偏差造成的第m个传感器处的声压偏差; $\Delta \mathbf{Y}^i$ 为第i轮迭代中K个声源的y方向位置偏差组成的对角矩阵; 当i=1时, $\Delta \mathbf{Y}^i$ 为0;

[0036] 步骤5.7: 利用式(8)计算第i轮迭代中声源在x方向的位置偏差:

$$[0037] \quad [\Delta x_1^i, \Delta x_2^i, \cdots, \Delta x_K^i]^T = \left[\frac{\partial \mathbf{G}_K}{\partial x} \right]^{-1} \times [\Delta p_{x_1}^i, \Delta p_{x_2}^i, \cdots, \Delta p_{x_m}^i]^T \cdot \frac{1}{\mathbf{q}_{K(j)}^i} \quad (8)$$

[0038] 式(8)中, Δx_K^i 为第i轮迭代中第K个声源在x方向的位置偏差;

[0039] 步骤5.8: 将j+1赋值给j;

[0040] 步骤5.9: 利用式(9)计算第i轮迭代中第j个维度的修正后的Green函数矩阵 $\mathbf{G}_{t(j)}^i$:

$$[0041] \quad \mathbf{G}_{t(j)}^i = \mathbf{G}_K + \frac{\partial \mathbf{G}_K}{\partial x} \times \Delta \mathbf{X}^i + \frac{\partial \mathbf{G}_K}{\partial y} \times \Delta \mathbf{Y}^i \quad (9)$$

[0042] 式(9)中, $\Delta \mathbf{X}^i$ 为第i轮迭代中K个声源的x方向位置偏差组成的对角矩阵;

[0043] 步骤5.10: 利用式(10)计算第i轮迭代中第j个维度的K个声源的源强列向量 $\mathbf{q}_{K(j)}^i$:

$$[0044] \quad \mathbf{q}_{K(j)}^i = \left(\mathbf{G}_{t(j)}^i \right)^{-1} \times \mathbf{p} \quad (10)$$

[0045] 步骤5.11:再进行y方向偏差修正,利用式(11)计算第i轮迭代中由于声源在y方向存在位置偏差造成的传感器阵列中各传感器处的声压偏差:

$$[0046] \quad [\Delta p_{y_1}^i, \Delta p_{y_2}^i, \dots, \Delta p_{y_m}^i]^T = \mathbf{p} - \mathbf{G}_K \times \mathbf{q}_{K(j)}^i - \frac{\partial \mathbf{G}_K}{\partial \mathbf{x}} \times \Delta \mathbf{X}^i \times \mathbf{q}_{K(j)}^i \quad (11)$$

[0047] 式(11)中, $\Delta p_{y_m}^i$ 为第i轮迭代中由于声源在y方向存在位置偏差造成的第m个传感器处的声压偏差;

[0048] 步骤5.12:利用式(12)计算第i轮迭代中声源在y方向的位置偏差:

$$[0049] \quad [\Delta y_1^i, \Delta y_2^i, \dots, \Delta y_K^i]^T = \left[\frac{\partial \mathbf{G}_K}{\partial \mathbf{y}} \right]^{-1} \times [\Delta p_{y_1}^i, \Delta p_{y_2}^i, \dots, \Delta p_{y_m}^i]^T \cdot \frac{1}{\mathbf{q}_{K(j)}^i} \quad (12)$$

[0050] 式(12)中, Δy_K^i 为第i轮迭代中第K个声源在y方向的位置偏差;

[0051] 步骤5.13:将j+1赋值给j;

[0052] 步骤5.14:利用式(13)计算第i轮迭代中第j个维度的修正后的Green函数矩阵 $\mathbf{G}_{t(j)}^i$:

$$[0053] \quad \mathbf{G}_{t(j)}^i = \mathbf{G}_K + \frac{\partial \mathbf{G}_K}{\partial \mathbf{x}} \times \Delta \mathbf{X}^i + \frac{\partial \mathbf{G}_K}{\partial \mathbf{y}} \times \Delta \mathbf{Y}^i \quad (13)$$

[0054] 步骤5.15:利用式(14)计算第i轮迭代中第j个维度的K个声源的源强列向量 $\mathbf{q}_{K(j)}^i$:

$$[0055] \quad \mathbf{q}_{K(j)}^i = \left(\mathbf{G}_{t(j)}^i \right)^{-1} \times \mathbf{p} \quad (14)$$

[0056] 步骤5.16:判断 $i > \text{Imax}$ 是否成立,若成立,则停止迭代,并得到准确的声源位置,否则,将 $\mathbf{q}_{K(j)}^i$ 赋值给 $\mathbf{q}_{K(0)}^{i+1}$ 后,将 $i+1$ 赋值给 i ,同时返回步骤5.5顺序执行。

[0057] 与现有技术相比,本发明的有益效果在于:

[0058] 1、本发明通过对Green函数的精确修正,实现了聚焦面上网格点之间的亚网格声源搜索与定位,使得声源识别的结果更加准确,显著提高了实际位置不在聚焦面网格点上的声源的识别定位精度。

[0059] 2、本发明方法对实际位置在网格点上的声源识别也很精确,因此本方法可用于聚焦面上任意位置声源的识别定位,且定位精度相对于传统方法得到了明显提升。

[0060] 3、本发明方法在聚焦面网格密集度仅为传统方法网格密集度的几分之一时即可获得优于传统方法的声源定位精度和空间分辨率。因此,在实际中可配合较为稀疏的聚焦面网格点使用,显著降低了计算规模,可实现高效率的声源识别定位。

附图说明

[0061] 图1为本发明声源识别示意图;

[0062] 图2为声源频率为1600Hz时,传统稀疏重构声源定位方法和本发明方法对两个实际位置不在预划分网格点上的声源的定位效果图;

[0063] 图3为声源频率为2000Hz时,传统稀疏重构声源定位方法和本发明方法对两个实际位置不在预划分网格点上的声源的定位效果图;

[0064] 图4为声源频率为2400Hz时,传统稀疏重构声源定位方法和本发明方法对两个实

际位置不在预划分网格点上的声源的定位效果图；

[0065] 图5a为传统稀疏重构声源定位方法对两个实际位置在预划分网格点上的声源的定位效果图；

[0066] 图5b为本发明方法对两个实际位置在预划分网格点上的声源的定位效果图；

[0067] 图6为本发明方法在聚焦面网格被划分为 11×11 个聚焦点时对两个实际位置不在预划分网格点上的声源的定位效果图；

[0068] 图7为传统稀疏重构声源定位方法在聚焦面网格被划分为 21×21 个聚焦点时对两个实际位置不在预划分网格点上的声源的定位效果图；

[0069] 图8为传统稀疏重构声源定位方法在聚焦面网格被划分为 41×41 个聚焦点时对两个实际位置不在预划分网格点上的声源的定位效果图；

具体实施方式

[0070] 本实施例中,一种基于Green函数修正的高分辨率声源定位方法是利用稀疏重构算法所得到的初步定位结果,通过一阶泰勒展开的方式和利用坐标轮换法实现了Green函数的精确修正,从而能识别与定位出实际位置不在聚焦面网格点上的声源的精确位置,实现了声源的亚网格精确定位。该方法不但可以进一步提高声源的定位精度与分辨率,实际应用时还可配合较为稀疏的聚焦面网格点使用,从而降低了计算规模,提高了计算效率,因此该方法具有广泛的运用范围和实际意义。具体的说,如图1所示,是按如下步骤进行:

[0071] 步骤1、在K个声源辐射形成的声场中布置M个传感器,从而形成测量面W;采集各传感器所检测到的声压数据 $p = [p(r_1), p(r_2), \dots, p(r_m)]$,其中, r_m 表示测量面W上第m个测量点的坐标向量, $p(r_m)$ 表示第m个测量点的声压数据;传感器的数量M大于声场中潜在的声源个数K。

[0072] 步骤2、定义聚焦面T为离散化声源计算平面所形成的网格面;聚焦面T包含N个网格点,且每个网格点为聚焦点;

[0073] 将每个聚焦点作为潜在声源点,从而利用式(1)构造声源源强列向量q:

[0074] $q = [q(r_1), q(r_2), \dots, q(r_n)]$ (1)

[0075] 式(1)中, r_n 表示聚焦面T上第n个聚焦点的坐标向量, $n=1, 2, 3, \dots, N$;

[0076] 利用式(2)建立聚焦面T上各网格点与传感器阵列中各传感器之间的Green函数矩阵G:

$$[0077] \quad \mathbf{G} = \begin{bmatrix} g_1(r_1) & g_1(r_2) & \cdots & g_1(r_n) \\ g_2(r_1) & & & \\ \vdots & & \ddots & \\ g_m(r_1) & & & g_m(r_n) \end{bmatrix} \quad (2)$$

[0078] 式(2)中, $g_m(r_n)$ 为第n个聚焦点到第m个传感器之间的Green函数,且

$g_m(r_n) = e^{-jk|r_n - r_m|} / 4\pi|r_n - r_m|$, j为虚数单位, k表示声波波数, $|r_n - r_m|$ 为第n个聚焦点到第m个传感器之间的距离, $m=1, 2, 3, \dots, M$;

[0079] 步骤3、利用式(3)建立声源源强列向量q与传感器阵列声压测量值p之间的关系:

[0080] $p=Gq$ (3)

[0081] 步骤4、通过稀疏重构算法对(3)式进行求解,获得聚焦面T上各网格点处的声源源强列向量,通过声源源强列向量中的源强大小确定聚焦面上声源的个数K及各声源的初步位置;

[0082] 根据各声源的初步位置,从Green函数矩阵G中抽取相应的列,从而形成如式(4)所示的待修正的Green函数矩阵 G_K :

[0083]
$$G_K = \begin{bmatrix} g_1(r_{c1}) & g_1(r_{c2}) & \cdots & g_1(r_{cK}) \\ g_2(r_{c1}) & g_2(r_{c2}) & \cdots & g_2(r_{cK}) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ g_m(r_{c1}) & g_m(r_{c2}) & \cdots & g_m(r_{cK}) \end{bmatrix} = [g(r_{c1}), g(r_{c2}), \cdots, g(r_{cK})] \quad (4)$$

[0084] 式(4)中, $g(r_{cK})$ 为第K个声源的初步位置到传感器阵列中各传感器的Green函数所组成的列向量,即 $g(r_{cK}) = [g_1(r_{cK}), g_2(r_{cK}), \cdots, g_m(r_{cK})]^T$;其中 $g_m(r_{cK})$ 为第K个声源的初步位置到第m个传感器的Green函数;

[0085] 步骤4中,采用稀疏重构算法求得聚焦面上声源数量与初步位置。具体可以采用的稀疏重构算法有很多选择,可以是正交匹配追踪算法、基追踪算法、L1范数最小化算法、稀疏贝叶斯方法等等。其中正交匹配追踪算法具有收敛速度快,计算量小的优点;同时为了便于说明和仿真例计算,本发明仿真验证将采用正交匹配追踪算法作为选用的稀疏重构算法,其他稀疏重构算法在实际中也同样适用。

[0086] 步骤5、对待修正的Green函数矩阵 G_K 进行一阶泰勒展开,并结合坐标轮换迭代优化方法,从而估计出实际声源位置对应的修正后的Green函数矩阵 G_t ,从而在聚焦面T上网格点之间实现亚网格搜索,得到准确的声源位置。

[0087] 步骤5.1:利用式(5)所示的一阶泰勒展开方法,得到修正后的Green函数矩阵 G_t :

[0088]
$$G_t = \left[g(r_{c1}) + \frac{\partial g(r_{c1})}{\partial x} \times \Delta x_1 + \frac{\partial g(r_{c1})}{\partial y} \times \Delta y_1, g(r_{c2}) + \frac{\partial g(r_{c2})}{\partial x} \times \Delta x_2 + \frac{\partial g(r_{c2})}{\partial y} \times \Delta y_2, \cdots, g(r_{cK}) + \frac{\partial g(r_{cK})}{\partial x} \times \Delta x_K + \frac{\partial g(r_{cK})}{\partial y} \times \Delta y_K \right] \quad (5)$$

$$= G_K + \frac{\partial G_K}{\partial x} \times \Delta X + \frac{\partial G_K}{\partial y} \times \Delta Y$$

[0089] 式(5)中, $\Delta X, \Delta Y$ 分别为由各声源在x、y方向的位置偏差(实际声源位置与声源初步位置的坐标差值)所组成的对角矩阵,并有:

[0090]
$$\Delta X = \begin{bmatrix} \Delta x_1 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & \Delta x_2 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & \Delta x_K \end{bmatrix} \quad \Delta Y = \begin{bmatrix} \Delta y_1 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & \Delta y_2 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & \Delta y_K \end{bmatrix}$$

[0091] 式中, Δx_K 为第K个声源实际位置相对于初步位置在x方向的位置偏差, Δy_K 为第K个声源实际位置相对于初步位置在y方向的位置偏差;

[0092] 步骤5.2:利用式(6)建立声压数据p与K个声源对应的修正后的Green函数矩阵 G_t 之间的数学关系:

[0093]
$$p = \left(G_K + \frac{\partial G_K}{\partial x} \times \Delta X + \frac{\partial G_K}{\partial y} \times \Delta Y \right) \times q_K \quad (6)$$

[0094] 式(6)中, \mathbf{q}_K 为K个声源的源强列向量;

[0095] 步骤5.3:定义当前迭代次数为i,最大迭代次数为Imax;定义当前迭代维度为j(j=1代表进行x方向位置修正,j=2代表进行y方向位置修正),并初始化i=1;

[0096] 步骤5.4:令第i轮迭代中第j个维度的K个声源的源强列向量 $\mathbf{q}_{K(j)}^i$,初始化为 \mathbf{q}_K ;

[0097] 步骤5.5:初始化j=0;

[0098] 步骤5.6:先进行x方向偏差修正,利用式(7)计算第i轮迭代中由于声源在x方向存在位置偏差造成的传感器阵列中各传感器处的声压偏差:

$$[\Delta p_{x_1}^i, \Delta p_{x_2}^i, \dots, \Delta p_{x_m}^i]^T = \mathbf{p} - \mathbf{G}_K \times \mathbf{q}_{K(j)}^i - \frac{\partial \mathbf{G}_K}{\partial y} \times \Delta Y^i \times \mathbf{q}_{K(j)}^i \quad (7)$$

[0100] 式(7)中, $\Delta p_{x_m}^i$ 为第i轮迭代中由于声源在x方向存在位置偏差造成的第m个传感器处的声压偏差; ΔY^i 为第i轮迭代中K个声源的y方向位置偏差组成的对角矩阵;当i=1时, ΔY^i 为0;

[0101] 步骤5.7:利用式(8)计算第i轮迭代中声源在x方向的位置偏差:

$$[\Delta x_1^i, \Delta x_2^i, \dots, \Delta x_K^i]^T = \left[\frac{\partial \mathbf{G}_K}{\partial x} \right]^{-1} \times [\Delta p_{x_1}^i, \Delta p_{x_2}^i, \dots, \Delta p_{x_m}^i]^T \cdot \frac{1}{\mathbf{q}_{K(j)}^i} \quad (8)$$

[0103] 式(8)中, Δx_K^i 为第i轮迭代中第K个声源在x方向的位置偏差;

[0104] 步骤5.8:将j+1赋值给j;

[0105] 步骤5.9:利用式(9)计算第i轮迭代中第j个维度的修正后的Green函数矩阵 $\mathbf{G}_{t(j)}^i$:

$$\mathbf{G}_{t(j)}^i = \mathbf{G}_K + \frac{\partial \mathbf{G}_K}{\partial x} \times \Delta X^i + \frac{\partial \mathbf{G}_K}{\partial y} \times \Delta Y^i \quad (9)$$

[0107] 式(9)中, ΔX^i 为第i轮迭代中K个声源的x方向位置偏差组成的对角矩阵;

[0108] 步骤5.10:利用式(10)计算第i轮迭代中第j个维度的K个声源的源强列向量 $\mathbf{q}_{K(j)}^i$:

$$\mathbf{q}_{K(j)}^i = (\mathbf{G}_{t(j)}^i)^{-1} \times \mathbf{p} \quad (10)$$

[0110] 步骤5.11:再进行y方向偏差修正,利用式(11)计算第i轮迭代中由于声源在y方向存在位置偏差造成的传感器阵列中各传感器处的声压偏差:

$$[\Delta p_{y_1}^i, \Delta p_{y_2}^i, \dots, \Delta p_{y_m}^i]^T = \mathbf{p} - \mathbf{G}_K \times \mathbf{q}_{K(j)}^i - \frac{\partial \mathbf{G}_K}{\partial x} \times \Delta X^i \times \mathbf{q}_{K(j)}^i \quad (11)$$

[0112] 式(7)中, $\Delta p_{y_m}^i$ 为第i轮迭代中由于声源在y方向存在位置偏差造成的第m个传感器处的声压偏差;

[0113] 步骤5.12:利用式(12)计算第i轮迭代中声源在y方向的位置偏差:

$$[\Delta y_1^i, \Delta y_2^i, \dots, \Delta y_K^i]^T = \left[\frac{\partial \mathbf{G}_K}{\partial y} \right]^{-1} \times [\Delta p_{y_1}^i, \Delta p_{y_2}^i, \dots, \Delta p_{y_m}^i]^T \cdot \frac{1}{\mathbf{q}_{K(j)}^i} \quad (12)$$

[0115] 式(12)中, Δy_K^i 为第i轮迭代中第K个声源在x方向的位置偏差;

[0116] 步骤5.13:将j+1赋值给j;

[0117] 步骤5.14:利用式(13)计算第i轮迭代中第j个维度的修正后的Green函数矩阵 $\mathbf{G}_{t(j)}^i$:

$$[0118] \quad \mathbf{G}_{t(j)}^i = \mathbf{G}_K + \frac{\partial \mathbf{G}_K}{\partial \mathbf{x}} \times \Delta \mathbf{X}^i + \frac{\partial \mathbf{G}_K}{\partial \mathbf{y}} \times \Delta \mathbf{Y}^i \quad (13)$$

[0119] 步骤5.15:利用式(14)计算第i轮迭代中第j个维度的K个声源的源强列向量 $\mathbf{q}_{K(j)}^i$:

$$[0120] \quad \mathbf{q}_{K(j)}^i = \left(\mathbf{G}_{t(j)}^i \right)^{-1} \times \mathbf{p} \quad (14)$$

[0121] 步骤5.16:判断 $i > I_{\max}$ 是否成立,若成立,则停止迭代,并得到准确的声源位置,否则,令 $\mathbf{q}_{K(0)}^{i+1} = \mathbf{q}_{K(j)}^i$ 并将i+1赋值给i,同时返回步骤5.5顺序执行。

[0122] 综上所述,本方法先通过稀疏重构方法定位与识别出声源的初步位置,再通过一阶泰勒展开,结合坐标轮换的迭代优化方法对Green函数进行修正,利用初步位置处的Green函数迭代估计出实际声源位置对应的更加精确的Green函数,从而在在聚焦面上网格点之间实现了声源的亚网格搜索,提高了声源定位识别的效果,使得声源定位更加精确。

[0123] 为进一步的描述本发明,此处给出如下仿真例:

[0124] 仿真例1

[0125] 仿真目的:验证本发明算法相比传统稀疏重构声源定位方法能更好地识别与定位实际位置不在聚焦面预划分的网格点上的声源。

[0126] 仿真过程:数值仿真中,测量面W、聚焦面T的分布如图1所示,假设空间中有二个等强度的点声源——声源1和声源2,分别位于聚焦面上 $(-0.23, -0.23) \text{ m}$, $(0.02, 0.02) \text{ m}$ 的位置。测量面W位于 $Z=0 \text{ m}$ 平面,W的平面尺寸为 $1 \text{ m} \times 1 \text{ m}$,其上沿x轴、y轴均匀划分 11×11 个测量点,测量点间距为 0.1 m 。聚焦面T位于 $Z=1 \text{ m}$ 平面,T的平面尺寸也为 $1 \text{ m} \times 1 \text{ m}$,并划分 21×21 个聚焦网格点,聚焦点间距为 0.05 m 。根据聚焦点的划分方法可知,两个声源均不在聚焦面的网格点上。为使仿真与实际实施中存在测量噪声的情况更加一致,测量面声压添加了高斯白噪声,信噪比为 30 dB 。

[0127] 图2、图3、图4则分别给出了声源频率为 1600 Hz 、 2000 Hz 、 2400 Hz 时传统稀疏重构声源定位方法和本发明算法对2个实际位置不在预划分网格点上的声源的识别效果图。声源识别结果的图像中‘o’表示声源实际所在位置,‘▽’表示通过传统稀疏重构声源定位方法定位的声源位置,‘+’表示本发明所提方法识别的声源位置。

[0128] 从图2、图3、图4中可以看出,当2个声源的实际位置不在预划分的网格点上时,无论声源频率为 1600 Hz , 2000 Hz 还是 2400 Hz ,传统稀疏重构声源定位方法识别到的定位结果总在实际声源位置临近的网格点上,两个声源的识别位置与其实际位置存在偏移,传统稀疏重构声源定位方法识别与定位误差大。为定量的描述声源定位精度,定义声源定位相对误差如下:

$$[0129] \quad \text{相对误差} = \frac{|\text{算法定位的声源坐标} - \text{声源真实坐标}|}{|\text{声源真实坐标}|} \times 100\%$$

[0130] 根据声源定位相对误差公式,声源频率为 1600 Hz 时,通过传统稀疏重构声源定位方法定位,声源1的x轴和y轴坐标的相对误差分别为 8.7% 和 8.7% ,声源2的x轴和y轴坐标

的相对误差分别为100%和100%。通过本发明算法进行定位时,声源1的x轴和y轴坐标的相对误差分别为0.65%和0.48%,声源2的x轴和y轴坐标的相对误差分别为3%和13%;声源频率为2000Hz时,通过传统稀疏重构声源定位方法定位,声源1的x轴和y轴坐标的相对误差分别为8.7%和8.7%,声源2的x轴和y轴坐标的相对误差分别为100%和100%。通过本发明算法进行定位时,声源1的x轴和y轴坐标的相对误差分别为0.91%和0.39%,声源2的x轴和y轴坐标的相对误差分别为2%和5%;声源频率为2400Hz时,通过传统稀疏重构声源定位方法定位,声源1的x轴和y轴坐标的相对误差分别为8.7%和8.7%,声源2的x轴和y轴坐标的相对误差分别为100%和100%。通过本发明算法进行定位时,声源1的x轴和y轴坐标的相对误差分别为0.63%和0.91%,声源2的x轴和y轴坐标的相对误差分别为6%和5.5%;本发明算法的声源定位相对误差减小到了传统稀疏重构声源定位方法的十分之一左右甚至更小。由此可以看出,在不同频率下,本发明算法对声源的实际位置不在预划分的网格点上时定位更精确。

[0131] 仿真例2

[0132] 仿真目的:验证对于实际位置落在预划分的网格点上的声源,本发明算法和传统稀疏重构声源定位方法有着相同的识别定位精度。

[0133] 仿真过程:数值仿真中,测量面W、聚焦面T的分布如图1所示,假设空间中有二个等强度的点声源——声源1和声源2,分别位于聚焦面上 $(-0.25, -0.25)$ m, $(0.05, 0.05)$ m的位置,声源频率为2000Hz。测量面W位于 $Z=0$ m平面,W的平面尺寸为 $1\text{m} \times 1\text{m}$,其上沿x轴、y轴均匀划分 11×11 个测量点,测量点间距为0.1m。聚焦面T位于 $Z=1$ m平面,T的平面尺寸也为 $1\text{m} \times 1\text{m}$,并划分 21×21 个聚焦网格点,聚焦点间距为0.05m。根据聚焦点的划分方法可知,两个声源均在聚焦面的网格点上。

[0134] 图5a、图5b则分别展示了传统稀疏重构声源定位方法和本发明算法对2个实际位置在预划分网格点上的声源的识别效果图。声源识别结果的图像中‘o’表示声源实际所在位置,‘▽’表示通过传统稀疏重构声源定位方法定位的声源位置,‘+’表示本发明所提方法所识别的声源的位置。通过对比图5a和图5b,可以看出两图都能准确识别出声源位置,从而得到结论:当声源位置在离散网格点上时,两种方法都具有很好的性能,均能精确的识别与定位声源。

[0135] 仿真例3

[0136] 仿真目的:验证对于实际位置不在预划分的网格点上的声源,本发明算法可以在较稀疏的聚焦面网格上获得比传统稀疏重构声源定位方法在更密集的网格上更好的定位精度和更高的计算效率。

[0137] 仿真过程:数值仿真中,测量面W、聚焦面T的分布如图1所示,假设空间中有二个等强度的点声源——声源1和声源2,分别位于聚焦面上 $(-0.23, -0.23)$ m, $(0.02, 0.02)$ m的位置,声源频率为2000Hz。测量面W位于 $Z=0$ m平面,W的平面尺寸为 $1\text{m} \times 1\text{m}$,其上沿x轴、y轴均匀划分 11×11 个测量点,测量点间距为0.1m。聚焦面T位于 $Z=1$ m平面,T的平面尺寸也为 $1\text{m} \times 1\text{m}$,聚焦面分别划分为 11×11 , 21×21 , 41×41 个聚焦网格点,聚焦点间距分别为0.1m, 0.05m, 0.025m。根据聚焦点的划分方法可知,两个声源均不在聚焦面的网格点上。

[0138] 图6为本发明算法在更稀疏的网格上(聚焦面被划分为 11×11 个聚焦点)对两个实际位置不在预划分网格点上的声源的声源定位效果图;图7为传统稀疏重构声源定位方法

在密集一倍的网格上(聚焦面被划分为 21×21 个聚焦点)对两个实际位置不在预划分网格点上的声源的声源定位效果图。图8为传统稀疏重构声源定位方法在更密集的网格上(聚焦面被划分为 41×41 个聚焦点)对两个实际位置不在预划分网格点上的声源的声源定位效果图。声源识别结果的图像中‘o’表示声源实际所在位置,‘▽’表示通过传统稀疏重构声源定位方法定位的声源位置,‘+’表示本发明所提方法所识别的声源的位置。可以看出,本发明算法在更稀疏的网格上定位到的声源位置比传统稀疏重构声源定位方法在更密集的网格上还准确;本发明算法在聚焦面被划分为 11×11 个聚焦点的网格上定位时,声源1的x轴和y轴坐标的相对误差分别为1.69%和1.26%,声源2的x轴和y轴坐标的相对误差分别为10%,10%,计算时间为0.508s;传统稀疏重构声源定位方法在聚焦面被划分为 21×21 个聚焦点的网格上定位时,声源1的x轴和y轴坐标的相对误差分别为8.7%和8.7%,声源2的x轴和y轴坐标的相对误差分别为100%,100%,计算时间为0.561s;传统稀疏重构声源定位方法在聚焦面被划分为 41×41 个聚焦点的网格上定位时,声源1的x轴和y轴坐标的相对误差分别为2.17%和2.17%,声源2的x轴和y轴坐标的相对误差分别为25%,25%,计算时间为1.101s;表1为本发明算法与传统稀疏重构声源定位方法在稀疏程度不同的聚焦面网格上进行声源定位时的相对误差和计算时间,所使用的同一服务器的处理器CPU为Intel Core i5-7200U 2.50GHz、内存RAM为8.0GB。

[0139] 表1

	传统稀疏重构 声源定位方法	传统稀疏重构 声源定位方法	本发明算法
聚焦面点数	21×21	41×41	11×11
x 坐标相对误差(声源 1)	8.7%	2.17%	1.69%
y 坐标相对误差(声源 1)	8.7%	2.17%	1.26%
x 坐标相对误差(声源 2)	100%	25%	10%
y 坐标相对误差(声源 2)	100%	25%	10%
计算时间	0.561s	1.101s	0.508s

[0141] 从表1中可以看出本发明算法采用 11×11 点的聚焦面网格获得的定位误差甚至比传统稀疏重构方法采用 41×41 点的聚焦面网格还要小很多,这充分说明了本方法在定位精度与分辨率方面的巨大优势。同时在计算效率上,由于本发明算法可采用更稀疏的聚焦面网格,因此其计算规模远小于传统稀疏重构方法,所需的计算时间也就更少。因此,本方法相比于传统稀疏重构声源定位方法,在识别精度和计算效率上都有明显的提升。

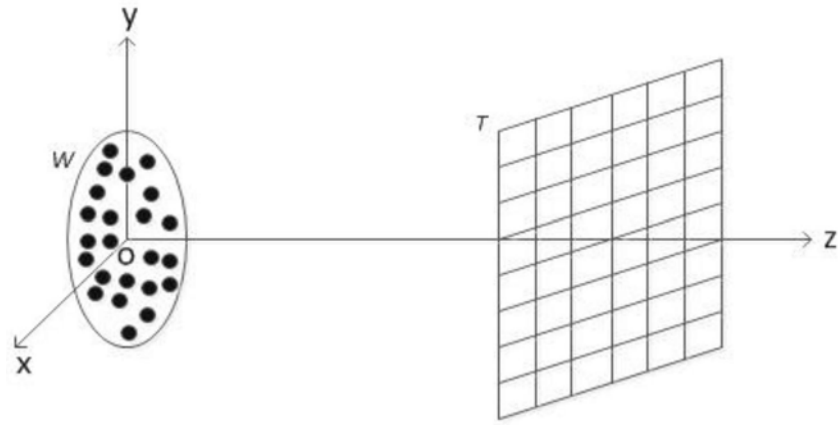


图1

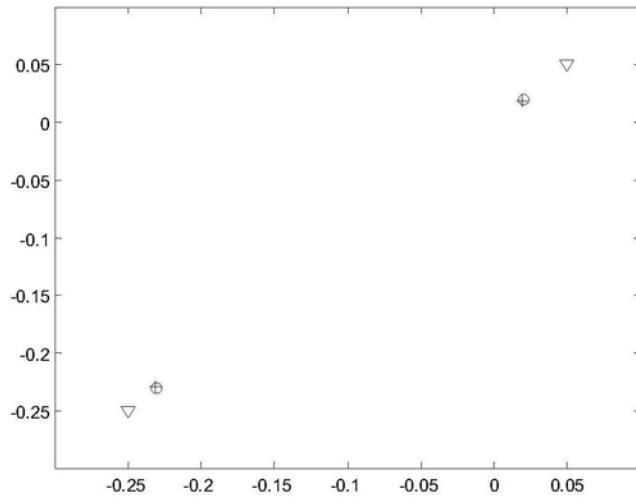


图2

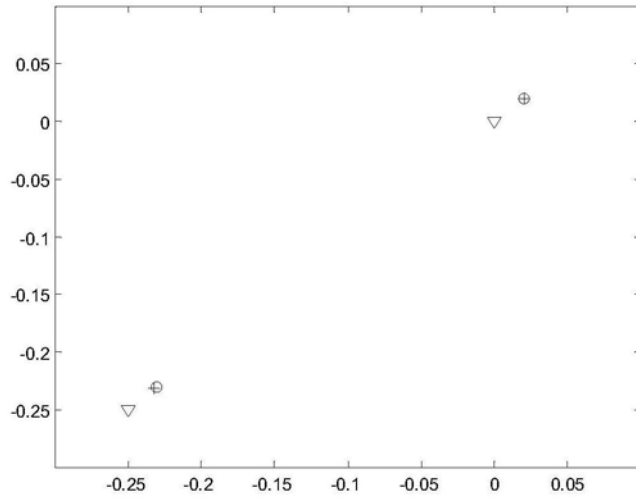


图3

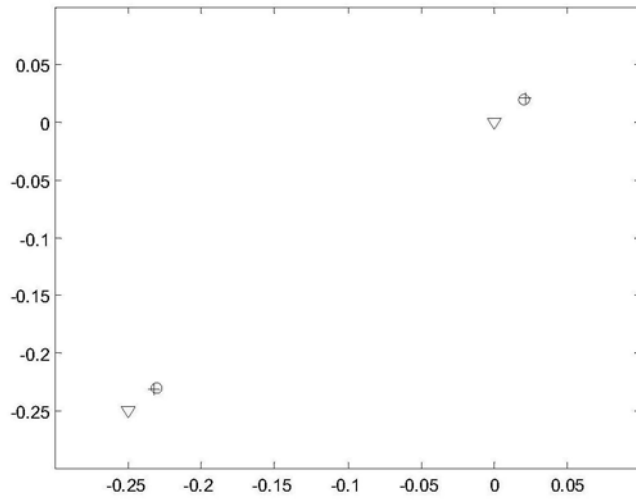


图4

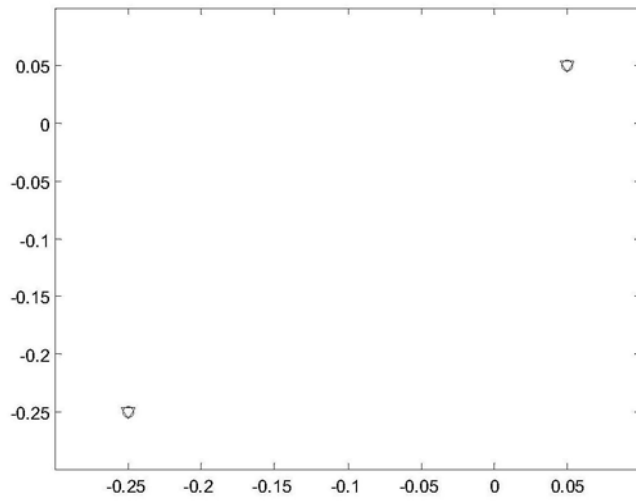


图5a

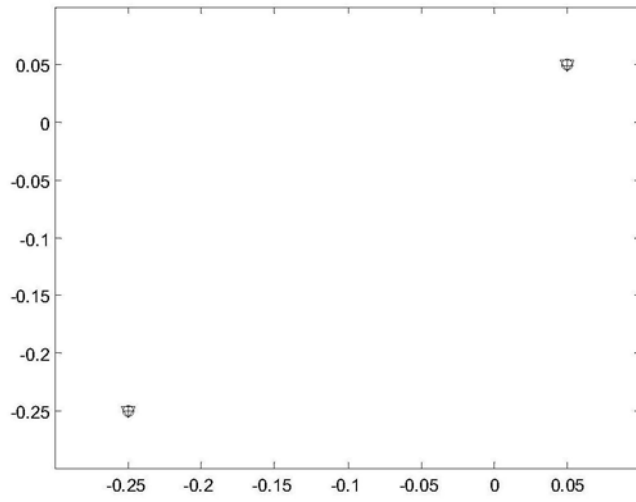


图5b

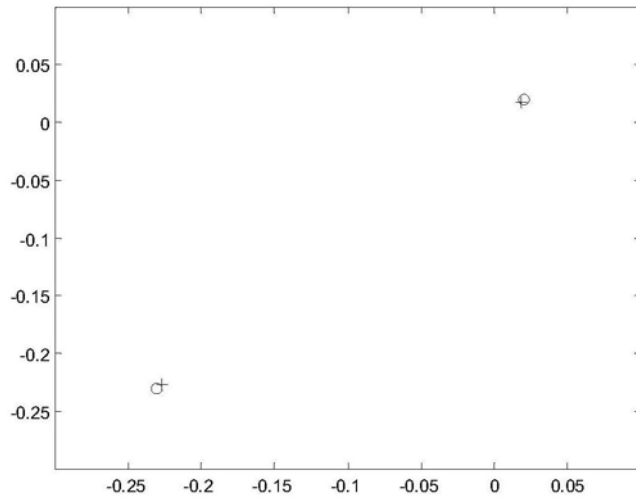


图6

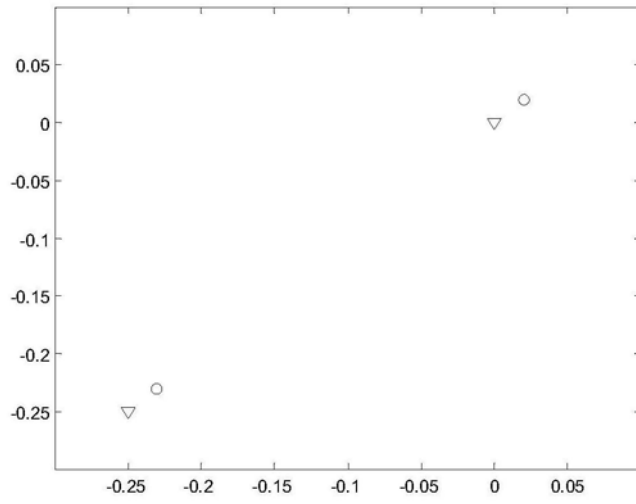


图7

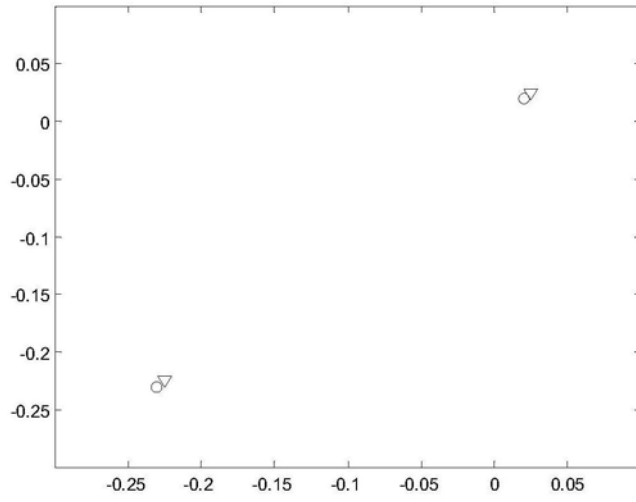


图8