

识别运动声源随机阵列生成法研究^{*}

王 雁 刘志红 吴波波 仪垂杰

(青岛理工大学 机械工程学院 青岛 266033)

2013 年 7 月 3 日收到

2014 年 4 月 29 日定稿

摘要 针对随机阵列结构设计方面欠缺高效的生成方法这一问题,在保证阵列对声源识别精度的前提下,提出一种在极坐标下用于识别运动声源的随机阵列生成方法。根据声阵列识别运动声源的原理,推导了非等间距基本同轴圆环的半径,再通过阵列分区、极坐标下条件筛选和模拟评价三个步骤,生成适用于识别运动声源的目标随机阵列,最后进行数值模拟和运动汽车噪声源识别实验进行验证。研究结果表明,用该方法能够高效地生成目标随机阵列,与常用规则阵列相比具有更良好的声源识别特性,并且具有准确的运动声源识别性能。

PACS 数: 43.58

Study of random array generation method for moving sound source identification

WANG Yan LIU Zhihong WU Bobo YI Chuijie

(School of Mechanical Engineering, Qingdao Technological University Qingdao 266033)

Received Jul. 3, 2013

Revised Apr. 29, 2014

Abstract Based on the problem that the existing generating method of random array structure is inefficient, a method is proposed to generate the random target arrays by using coaxial circular array in the polar coordinates in the premise that the array angular resolution of source identification is guaranteed. According to the principle of moving sound source identification, this paper deduces the basic non-equidistance coaxial circular rings' radius, and generates target random arrays which were suitable for moving sound source identification through array partitioning, condition filtering in the polar coordinates and simulation evaluation. Finally, numerical simulation and moving car sound source identification test have been done. The analysis results show that using this method to generate random array is effective. Compared with the traditional regular arrays, the target random array has more accurate moving sound source identification performance.

引言

传声器阵列技术是一种识别噪声源的主要方法,国内外许多研究人员已对该技术的理论与应用进行了大量的研究^[1-5]。通过研究发现,影响声源识别精度的因素较多,其中阵列结构的设计与优化尤为重要^[6-7]。目前已有众多对规则满布阵列结构的声源识别性能的研究,包括线性阵列^[8-9]、平面阵列^[10-11]和立体阵列^[12-13]。对运动声源的识别应

考虑以下布阵条件:为了避免发生空间混淆现象,相邻两传声器间距要达到入射声波的半波长;与此同时,为了能够准确识别多个噪声源,整个阵列孔径要足够大。一个满阵布置的阵列若要满足以上条件,需要的传声器数量则会相应增加,这将导致传声器阵列的搭建成本与信号处理计算量的大幅增加。因此,对随机阵列的研究成为近几年声阵列声源识别技术研究的一个重要分支。

H. KOOK, G. B. MOEBS^[14] 提出在直线随机阵列中,保证随机阵主瓣宽度与满布阵列一致的前提

^{*} 国家自然科学基金(61271387)和山东省自然科学基金(ZR2012FZ001)资助

下，只要随机阵列孔径与满布直线阵列孔径相同，则可同时满足上述两个布阵条件。生成随机阵列对阵列面进行分区时存在基线冗余问题，针对这种情况，Chen W. L. 通过限制有限阵列的冗余数符合阵列无零相关值的条件设计出最小冗余线性阵列^[15]。Keizer 等人应用迭代傅里叶变换稀疏优化了均匀一维线阵^[16]。Kumar 等人提出应用勒让德分数变换优化稀疏线阵及平面阵^[17]。用于汽车运动噪声源识别的随机阵列生成方法，清华大学许峰、连小珉等人通过生成、筛选和评价三个步骤进行了相关研究^[18]。而目前随机阵列阵元位置设计，缺乏高效的生成方法，存在盲目性，计算量大并且难以方便快捷地筛选出符合条件的目标随机阵列。

针对上述问题，本文在介绍了声阵列技术识别运动声源的基础上，提出在极坐标中同轴圆环阵生成目标随机阵列的方法。首先推导非等间距基本同轴圆环半径的生成，再对阵列分区，借助矩阵对随机生成的阵列加以条件筛选，使其成为候选随机阵列，然后根据波束形成原理对候选随机阵列进行声源识别模拟，通过评价阵列旁瓣抑制比确定可否成为目标随机阵列。最后，通过模拟实验和应用生成的随机阵列对运动汽车进行测试，实验结果显示应用本文所述方法生成的随机阵列有良好可靠的运动声源识别性能。

1 声阵列对运动声源的定位

一般情况，应用声阵列技术识别运动声源的示意图如图 1 所示。其中， $Oxyz$ 坐标系固定， $O'pq$ 坐标平面紧贴汽车并随其一起运动。假设所需测量的汽车运动走过的平面长为 A_1 ，宽为 B_1 ；阵列面长为 A_2 ，宽为 B_2 ，阵列面底端距离地面高度为 h ； Z_0 为固定阵列平面到运动声源面之间的距离，称为焦距。

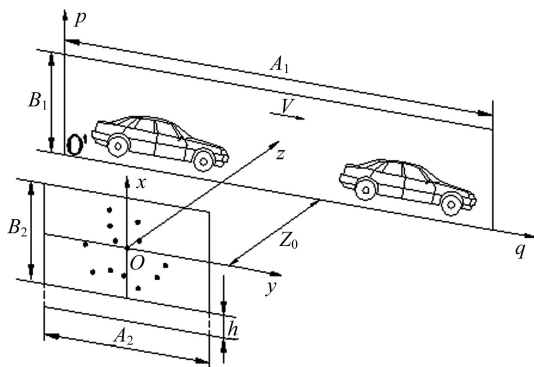


图 1 声阵列技术识别运动声源示意图

若在后期信号处理时使用常规波束形成算法，其主要问题在于角分辨率。一般情况下，当两个同频

噪声源的空间方位角差小于阵列主瓣波束宽度时，阵列无法分辨两噪声源。根据瑞利准则，对于远场噪声源，当且仅当噪声源空间方位角差大于阵列孔径的倒数时，方可被分辨。因此如果要提高阵列的角分辨率，在不增加阵元个数的条件下，增大阵列孔径是一种行之有效的方法。而在实际应用时，阵列孔径不可能无限制增大，其大小则由所需测量的运动平面宽度以及阵列的极限测量俯仰角度 θ 来确定。图 2 为图 1 的俯视图。

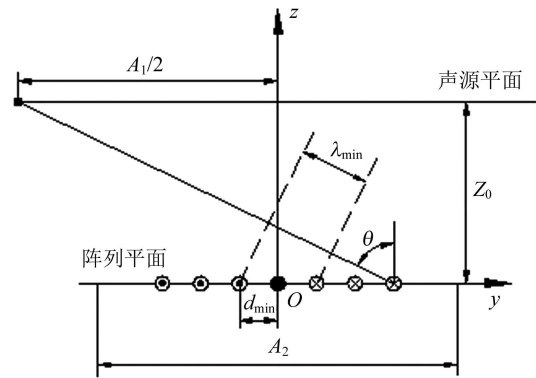


图 2 声阵列技术识别运动声源俯视图

为了避免空间混淆，相邻两阵元最小间距应该满足：

$$d_{\min} = \frac{c}{(2f_{\max} \sin \theta)}, \tag{1}$$

其中， f_{\max} 为所要测量噪声频率范围中的最高频率， c 为声速。

2 基础网点阵列的确定

在生成随机阵列时，常用的基础网点阵列有以下几种，如图 3 所示。

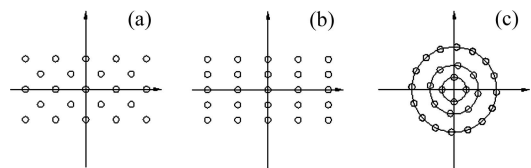


图 3 常用基础网点阵列

本文生成随机阵列结构时选用如图 3(c) 所示的同轴圆环阵作为基础网点阵列，原因有：其一，若要增大阵列孔径，只需对照表 1 比例选取半径生成基础阵列即可；其二，同轴圆环网点阵列能够在极坐标下，通过控制极径与极角实现对阵元的筛选，该方法不仅方便快捷，而且在编程实现时具有极强的可扩展性。

下面推导确定非等间距同轴圆环的半径：

设任意同轴圆环阵的圆环数为 M ，第 m 环上的阵元数有 N_m 个。假设声源为远场点声源，用球面

坐标系表示声源入射平面波的波达方向, 坐标系的原点 O 位于同轴圆环阵中心, 如图 4 所示。声源俯仰角为原点到声源点的连线与 z 轴正向夹角 θ , 方位角为原点到声源连线在 xOy 平面内的投影与 y 轴正向夹角 φ 。

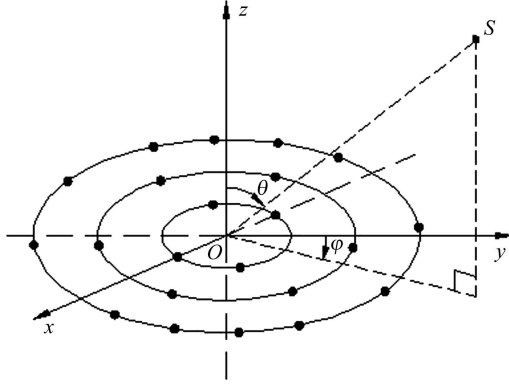


图 4 同轴圆环阵计算模型

根据几何位置关系, 第 m 环上第 n 个阵元的空间位置向量:

$$\mathbf{S}_{mn} = (\rho_m \cos \varphi_n, \rho_m \sin \varphi_n, 0), \quad (2)$$

其中, ρ_m 是第 m 环的半径长度, φ_n 是第 n 个阵元的方位角, $\varphi_n = 2\pi n/N_m$ 。

则某时刻原点与第 m 环上第 n 个阵元接收到的信号相位差 Δ 表示为:

$$\Delta = e^{jk\rho_m \sin \theta \cos(\varphi - \varphi_n)}, \quad (3)$$

其中, $k = 2\pi/\lambda$ 为波数, λ 为波长。

由此推知, 同轴圆环阵的阵列响应函数为:

$$E(\theta, \varphi) = \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^{N_m} A_{mn} e^{jk\rho_m \sin \theta \cos(\varphi - \varphi_n)}, \quad (4)$$

其中, A_{mn} 为第 m 环上第 n 个阵元的输入。

对于一个宽带阵列模型, 可以假定 A_{mn} 为常数, 即 $A_{mn} = A$ 。结合贝塞尔零阶函数, 上式化简为:

$$E(\theta, \varphi) = A \sum_{m=1}^M N_m J_0(k\rho_m \sin \theta). \quad (5)$$

对上式进行正弦三角转换, 令 $t = \sin \theta$, 则转换函数 $S(a_M)$ 为:

$$S(a_M) = \int_0^\pi E(\theta, \varphi) \sin(a_M t) dt = A \sum_{m=1}^M N_m \int_0^\pi J_0(k\rho_m t) \sin(a_M t) dt, \quad (6)$$

其中, $a_M = k(\rho_M + \lambda/2)$ 。

根据文献 17 提出的理论知, 贝塞尔零阶函数正弦三角转换的值为:

$$g(k\rho_m, a_M) = \int_0^\pi J_0(k\rho_m t) \sin(a_M t) dt = \begin{cases} \sqrt{1/[(k\rho_m)^2 - a_M^2]}, & k\rho_m \leq a_M, \\ 0, & k\rho_m > a_M. \end{cases} \quad (7)$$

式 (6) 可写为:

$$S(a_M) = A \sum_{m=1}^M N_m \sqrt{1/[(k\rho_m)^2 - a_M^2]} = AN_M \sqrt{1/[(k\rho_M)^2 - a_M^2]} + A \sum_{m=1}^{M-1} N_m \sqrt{1/[(k\rho_m)^2 - a_M^2]}, (k\rho_m \leq a_M). \quad (8)$$

令相邻两环半径差为 $\rho_\Delta = \rho_m - \rho_{m-1}$ 。对于同轴圆环传声器阵列, 为了减少互耦和旁瓣效应, 圆环半径差的分布条件应为: $0.5\lambda \leq \rho_\Delta \leq \lambda$ 。若最内环半径已知, 则由式 (8) 可列出第一个转换函数:

$$S(a_1) = AN_1 g(k\rho_1, a_1), \quad (9)$$

递推得到:

$$\rho_M = \sqrt{a_M^2 - \frac{A^2 N_M^2}{\left[S(a_M) - \sum_{m=1}^{M-1} AN_m g(k\rho_m - a_{M-1}) \right]^2}} / k. \quad (10)$$

表 1 给出了均匀同轴圆环半径与应用式 (9)、式 (10) 确定的非等间距同轴圆环半径的比例关系。

表 1 等间距与非等间距同轴圆环阵列半径

圆环序号	等间距	非等间距
1	0.50	0.50
2	1.00	1.00
3	1.50	1.50
4	2.00	2.00
5	2.50	2.50
6	3.00	3.00
7	3.50	3.68
8	4.00	4.44
9	4.50	5.26
10	5.00	6.11

3 生成随机阵列

将根据表 1 及式 (1) 计算得出的同轴圆环网点阵列放置在极坐标下进行筛选, 可以根据筛选条件通过控制阵列极径和极角得以实现, 操作方法灵活方便, 并且具有良好的可推广性。

3.1 阵列分区

设生成的随机阵列中传声器个数为 Sum , 可供选择的网点数为 Sum_0 , 若直接从阵列平面上任意选取的计算量为 $A_{Sum_0}^{Sum}$, 以图 5 为例, 随机选取时的计算量高达 1.28×10^{95} 次, 并且阵列声源识别性能并非良好。根据阵列孔径原理^[9]和大量仿真结果得知, 将阵列面进行合理等面积分区, 使每个传声器占据同等大小的面积, 就能保证传声器在阵列面上尽量均匀布置。图 5 是将一个三环同轴圆环阵等分成 12 区, 从内到外落在圆环上的网点数分别为 12, 24, 36。

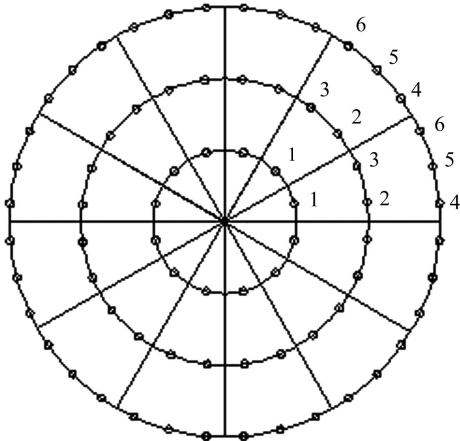


图 5 三环同轴圆阵分区图

考虑到所要测量噪声源的频率范围及式 (1) 限制条件, 在阵列中心放置一个传声器, 并规定最内环半径 ρ_1 为:

$$\rho_1 = \frac{c}{(2f_{\max} \sin \theta)}. \quad (11)$$

3.2 筛选方法

对于生成的随机阵列结构, 如果传声器分布过于稠密, 则阵列的清晰度好, 但是声源分辨率低, 反之则阵列分辨率高而清晰度差。因此, 本筛选步骤通过在极坐标下控制极径与极角的方法, 生成符合几何筛选条件的候选随机阵列结构。

设要生成的候选随机阵列个数为 Num , 分区个数为 C , 每个分区内可供选择网点数为 J , 对每个分区内的网点位置编号为 $1, 2, \dots, J$, 使不同分区内相同位置的网点编号相同, 如图 5 所示。同轴圆环基础网点阵列的圆环数为 K , 落在从内到外第 k 环上的网点数目为 m_k 。

第 1 步, 生成 $J \times C$ 阶网点极径矩阵 R , 其中列向量均为 $r_i = (r_1, r_2, \dots, r_J)^T (i=1, 2, \dots, C)$, r_j 表示编号为 j 的网点所在的圆环半径; 生成 $J \times C$ 阶网点极角矩阵 Φ , 其中每一列向量均为 $\Phi_j = (\phi_1, \phi_2, \dots, \phi_J)^T (j=1, 2, \dots, C)$, Φ_j 表示编号为 j 的网点的分区极角角度。分区极角角度定义为每个分区线到阵元的旋转角, 取逆时针为正方向。

若每个分区只取一个网点放置传声器, 除掉中心放置的传声器, 则有 $C = Sum - 1$ 。下面随机生成阵元点的极径矩阵 R' 与分区极角矩阵 Φ' , 所生成的阵元点极径 (分区极角) 矩阵与上述网点极径 (分区极角) 矩阵不同, 其特点为: 分别从矩阵 R 与 Φ 中每列只取一个元素, 其他元素均为零, 所选元素值与网点极径 (分区极角) 矩阵中对应下标的元素值相等。例如:

$$R' = \begin{pmatrix} 0 & 0 & \dots & 0 & r_1 & 0 \\ r_2 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 \\ 0 & r_3 & \dots & 0 & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & r_{m-1} \\ 0 & 0 & \dots & r_m & 0 & 0 \end{pmatrix} \quad \Phi' = \begin{pmatrix} 0 & 0 & \dots & 0 & t_1 & 0 \\ t_2 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 \\ 0 & t_3 & \dots & 0 & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & t_{m-1} \\ 0 & 0 & \dots & t_m & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

第 2 步, 借助矩阵计算对所生成的阵列加限制条件以筛选出候选随机阵列, 限制传声器摆放位置的步骤可分为:

(1) 使落在每一圆环的传声器数目符合统计比例, 且避免所选阵元位置具有规则性, 具体方法是:

定义落在第 k 环上的传声器数为 P_k , 对应落在该环上的传声器所占据的不同分区极角个数为 Q_k 。

根据大量阵列统计分析得知, 为了使传声器分布能够满足条件 (1), 可通过对 P_k 和 Q_k 加以限制来实现。

$$P_k \geq \frac{m_k}{Sum'} \times C, \quad (12)$$

$$Q_k = \frac{m_k}{Sum'} \times k. \quad (13)$$

(2) 传声器在阵列面上尽量均匀地分布, 不出现过于集中或稀疏的现象, 具体方法是:

将随机生成的阵元位置的分区极角化为以水平向右为 0° 的普通极角, 并列成矢量形式 $\varphi = (\varphi_1, \varphi_2, \dots, \varphi_C)$, 再将该矢量中的所有元素两两相减, 得到只有主对角线为 0 的方阵; 然后将该方阵与主对角线为 2π 而其他元素为 0 的同规模方阵相加, 构成一个均不为零的阵元极角差方阵 ψ 。可通过限制方阵 ψ 中的第 p 行第 q 列元素 ψ_{pq} 值, 以满足条件 (2)。

$$\psi_{pq} \geq \frac{2\pi}{C}, \quad (p = 1, 2, \dots, C; q = 1, 2, \dots, C) \quad (14)$$

(3) 使在同一圆环上相邻传声器的角度差不同, 以保证阵列测试频率范围, 具体方法是:

将普通极角矢量 φ 中表示同一圆环上所选阵元位置的极角角度分别列为矢量, 即第 k 环上的阵元极角矢量为 $\varphi_k = (\varphi_{k1}, \varphi_{k2}, \dots, \varphi_{kP_k})$, 将 φ_k 中后一元素依次减去前一元素, 第一项减去最后一项, 构成第 k 环上相邻传声器阵元位置的极角角度差矢量 $\Delta\varphi_k$ 。判断矢量 $\Delta\varphi_k$ 中所有元素值的大小, 若其中所有元素均不相等, 方可满足限制条件 (3)。

第 3 步, 若随机生成的阵列满足上述阵元位置筛选条件, 则该随机阵列被称为候选随机阵列; 若不符合以上筛选条件, 再重新随机生成阵元点矩阵 (包括阵元点极径和分区极角矩阵), 返回第 2 步重新进行筛选, 直到生成了需要的 Num 个候选随机阵列。图 6 为应用该方法生成的候选随机阵列之一。

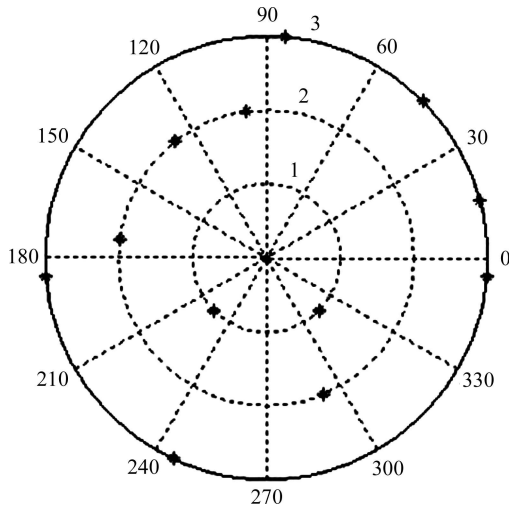


图 6 候选 (或目标) 随机阵列

3.3 目标随机阵列的确定

应用上述筛选方法选出的候选阵列还应与阵列对声源识别性能联系起来, 通过模拟结果来评价候选阵列可否成为目标随机阵列。

假设任意 n 元阵列位于同一平面, 阵列中第 m 个传声器的位置坐标为 $(x_m, y_m, 0)$, 声源入射方向的俯仰角为 θ_0 , 方位角为 ϕ_0 , 声波长为 λ 。根据波束形

成原理, 可得阵列的 (声波入射) 方向矢量为:

$$\mathbf{a}(\varphi_0, \theta_0) = \begin{bmatrix} e^{-j2\pi(x_1 \sin \varphi_0 \cos \theta_0 + y_1 \sin \varphi_0 \sin \theta_0)/\lambda} \\ e^{-j2\pi(x_2 \sin \varphi_0 \cos \theta_0 + y_2 \sin \varphi_0 \sin \theta_0)/\lambda} \\ \vdots \\ e^{-j2\pi(x_n \sin \varphi_0 \cos \theta_0 + y_n \sin \varphi_0 \sin \theta_0)/\lambda} \end{bmatrix} \quad (15)$$

设置声源频率为 $f = f_0$, 来波方向为 $\theta_0 = \pi/4$, $\varphi_0 = \pi/4$ 时, 以阵列能够测量到的俯仰角和方位角范围为自变量, 应用阵列方向矢量及式 (4), 能够得到阵列响应函数图如图 7 所示。

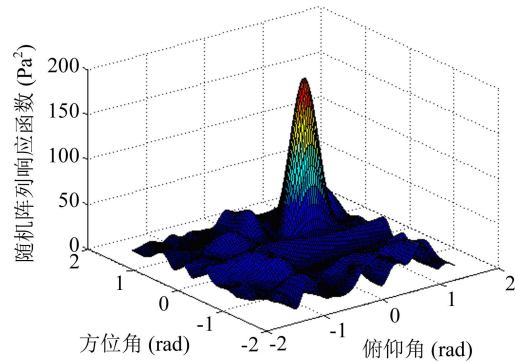


图 7 随机阵列响应函数三维图

从图中能够看出, 平面随机阵列响应函数三维图由一个主瓣和若干个不同高度的旁瓣组成。定义阵列响应旁瓣抑制比 r_{sp} 的计算式如下:

$$r_{sp} = 20 \lg \left(\frac{h_p}{h_s} \right), \quad (16)$$

其中, h_p 为主瓣峰值, h_s 为最大旁瓣峰值。改变声源频率 f , 能够得出同一阵列在不同频率下的旁瓣抑制比并绘制成抑制比频率特性曲线。

若使候选随机阵列能够成为目标随机阵列, 则要求该阵列在所测试的频率范围内有良好的旁瓣抑制比能力。根据大量模拟、实验及文献 [17] 得知: 阵列的旁瓣抑制比最大值受阵元个数的影响, 阵元个数越多, 旁瓣抑制比越大。当 r_{sp} 达到 16 时, 阵列的旁瓣抑制能力已足够良好。因此,

$$r_{sp} \geq \begin{cases} Sum - 1, & Sum \leq 16, \\ 16, & Sum > 16. \end{cases} \quad (17)$$

按照该方法从 Num 个候选随机阵列中进行筛选, 符合条件的随机阵列成为目标随机阵列, 若不符合, 则返回第 1 步, 重新随机生成阵元点极径与分区极角矩阵。图 6 亦为符合以上所有条件的一个目标随机阵列。

图 8 为以上随机阵列结构生成的流程图。

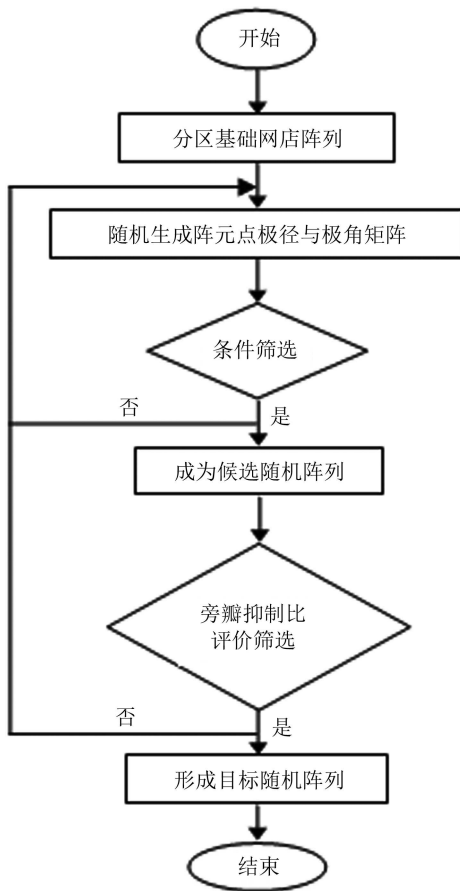


图 8 随机阵列结构生成流程图

4 验证

4.1 数值模拟

阵列旁瓣抑制比频率特性曲线是评价阵列对运动声源识别性能的一个重要标准。为与如图 6 所示的 13 个传声器构成的目标随机阵列进行对比分析，选择传声器数目不小于 13 的矩形、三角形、十字形阵列与随机阵列进行模拟对比。图 9 为旁瓣抑制比频率特性曲线对比图。表 2 为随机阵列与规则阵列的其他阵列特性参数对比表。

该对比实验参数为：规则阵列包含的传声器数

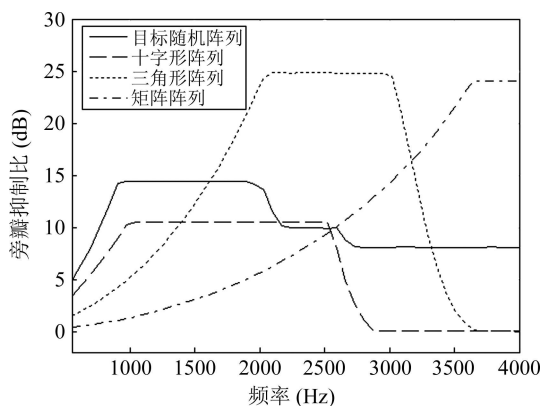


图 9 旁瓣抑制比频率特性曲线对比图

目均大于等于目标随机阵列，入射声波的频率为 750~4000 Hz，结合式 (1) 确定阵元最小间距均为 0.0425 m。

表 2 阵列特性参数对比表

阵型	随机	十字	三角	矩形
阵元个数	13	13	28	25
阵列孔径 (m)	0.255	0.255	0.255	0.255
主瓣宽度 (mm)	11.86	12.27	14.03	13.93
分辨率	1.424	1.472	2.03	1.76
截止频率 (Hz)	4000	4000	4000	4000

表 2 和图 9 表明，在阵列孔径与截止频率相同的条件下，目标随机阵列的阵元个数少，主瓣宽度与分辨率较小，即阵列的声源识别性能较好。波束宽度正比于入射声波波长，声源频率越低，波束宽度越宽，导致旁瓣抑制比越小，因此在 750~1000 Hz 内，阵列的抑制比均较小。在 1000~4000 Hz 较宽频段内，目标随机阵列的旁瓣抑制比较为稳定，均为大于 7 dB。

综上所述，生成的目标随机阵列的旁瓣抑制比频率特性稳定良好，且阵列孔径较大，主瓣宽度较小，分辨率较好。

4.2 汽车实验

应用于该汽车实验的阵列结构为图 6 所示的随机阵列，实验测试现场如图 10 所示，其位置关系如图 1。

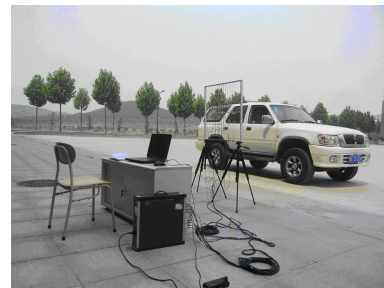
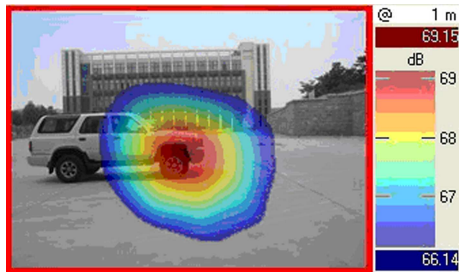


图 10 汽车实验测试现场

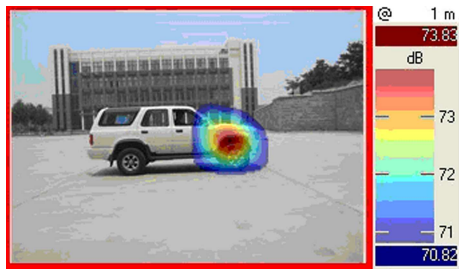
目标随机阵列共由 13 个传声器组成，阵列平面长 $A_2 = 0.76$ m，宽 $B_2 = 0.76$ m，阵列平面底离地面距离 $h = 1$ m，焦距为 $Z_0 = 4$ m。汽车行驶速度为 $v = 20$ km/h。用声级计在汽车空挡时，距发动机 30 cm 处测试得发动机声压为 83.74 dB。

实验采用比利时 LMS Test.lab 声学测试分析平台，包括 SCADASIII 移动式信号采集仪和 LMS Signature Test 信号采集分析模块；传声器由丹麦 G.R.A.S 公司 1/4inch40PL 声压传感器和 1/4inch26AA 型内置放大器组成，传声器的灵敏度均在 12.23~16.45 mV/Pa 之间；声学成像系统为法国 ACB 公司的 APM 分析系统。

图 11 中 (a)(b) 两图分别为汽车在阵列左侧和正前方的成像结果。



(a) 汽车在阵列左侧成像结果



(b) 汽车在阵列正前方成像结果

图 11 汽车实验成像结果

实验结果数据如下: 当汽车位于阵列左侧和正前方时, 阵列的声源识别区域范围分别为 7.065 m^2 和 3.14 m^2 , 声源识别动态特性分别为 $66.14 \sim 69.15 \text{ dB}$ 与 $70.82 \sim 73.83 \text{ dB}$ 。在整个测试过程中, 聚焦识别图像均只有一个, 其他位置虚假声源个数为 0, 图像中心与发动机中心间距分别为 0.5 m 和 0.2 m 。从理论方面来看, 由于汽车低速行驶, 汽车轮胎与地面的摩擦噪声和车体表面的气动噪声相对较小, 此时发动机噪声就是低速行驶汽车的主要噪声源。结合上述汽车实验结果分析, 当汽车在阵列正前方位置时, 阵列的声源识别性能优于汽车在阵列左侧的情形, 并且实验结果与理论分析相符。因此该汽车实验结果表明, 该目标随机阵列能够应用于实际行驶汽车的声源识别中。

5 结论

(1) 通过对同轴圆环阵进行分区筛选, 能够满足识别运动声源所需的大孔径阵列条件, 基本圆环阵的半径可由式 (10) 计算得到;

(2) 通过应用矩阵对随机生成的阵列加条件筛选, 能够高效地生成满足条件的候选随机阵列, 减少筛选盲目性;

(3) 在所需频率范围通过评价候选阵列的旁瓣抑制比, 能够使随机阵列结构与声场特性相结合, 数值模拟及对运动汽车的声源识别实验结果验证了本文提出的随机阵列生成方法的可行性与有效性。

参 考 文 献

- 1 蔡野锋, 邱小军, 杨军. 基于时间反转的复杂声场拾声传声器阵列性能研究. 声学学报, 2010; **35**(6): 593—600
- 2 李道江, 陈航, 倪云鹿. 阵元间互辐射对基阵指向性的影响研究及试验. 声学学报, 2012; **37**(3): 319—323
- 3 Han Dong, Li Jian, Kang Chunyu. Towed line array sonar platform noise suppression based on spatial matrix filtering technology. *Chinese Journal of Acoustic*, 2013; **32**(4): 379—390
- 4 Thomas Padois, Phillippe-Aubert Gauthier, Alain Berry. Inverse problem with beamforming regularization matrix applied to sound source localization in closed wind-tunnel using microphone array. *Journal of Sound and Vibration*, 2014; **333**: 6858—6868
- 5 Chen Xuelian, Dong Xingmeng, Tan Baohai. Experimental studies of linear phased-array transmitter acoustic logging in cased wells with scaled borehole models. *Chinese Journal of Acoustic*, 2013; **32**(3): 274—283
- 6 Li Zhibao, Cedric Yiu K F, Feng Zhiguo. A hybrid descent method with genetic algorithm for microphone array placement design. *Applied Soft Computing*, 2013; **13**: 1486—1490
- 7 Nongpiur R C. Design of minimax robust broadband beamformers with optimized microphone positions. *Digital Signal Processing*, 2014; **32**: 100—108
- 8 褚志刚, 杨洋, 蒋忠翰. 波束形成传声器阵列性能研究. 传感技术学报, 2011; **24**(5): 665—670
- 9 Nakano A Y, Burt P M S. Directional acoustic source orientation estimation using only two microphones. *Digital Signal Processing*, 2013; **23**: 1918—1922
- 10 陈日林, 刘哲, 滕鹏晓等. 基于旁瓣级最小化的平面螺旋阵列设计的粒子群优化方法. 应用声学, 2011; **30**(6): 401—406
- 11 王雁, 仪垂杰, 刘志红, 吴波波. 麦克风基阵结构的噪声源识别性能研究. 测试技术学报, 2013; **27**(4): 304—309
- 12 王良峰, 乔渭阳, 纪良等. 轴流风扇/压气机管道周向声模态的测量. 航空动力学报, 2014; **4**(29): 917—926
- 13 金光明, 谢植, 张传义, 金日炳. 基于两个 L 型阵列的远场多声源定位方法. 东北大学学报(自然科学版), 2012; **9**(33): 1222—1225
- 14 Kook H, Davies P, Bolton J S. Statistical properties of random sparse arrays. *Journal of Sound and Vibration*, 2002; **255**(5): 819—848
- 15 Chen W L, Panayirci E. Minimum redundancy array structure for interference cancellation. *Signal Processing*, 1995; **42**(3): 319—334
- 16 Keizer W P M N. Linear Array Thinning Using Iterative FFT Techniques. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2008; **56**(8): 2757—2760
- 17 Kumar B P, Branner G R. Generalized analytical technique for the synthesis of unequally spaced arrays with linear, planar, cylindrical or spherical geometry. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2005; **53**(2): 621—634
- 18 许峰, 连小珉, 杨殿阁等. 用于汽车运动噪声源识别的随机阵列生成法. 汽车工程, 2006; **28**(3): 281—286