

基于平面传声器阵列的声源定位系统

刘 哲, 陈日林, 滕鹏晓, 杨亦春

(中国科学院声学研究所噪声与振动重点实验室, 北京 100190)

摘要: 对阵列的特性进行了研究, 并提出了一种优化的 64 阵元平面螺旋阵列。这种 64 阵元平面螺旋阵列的阵元分布在以阵列中心为轴心的 8 条螺旋上, 并且具有较窄的主瓣宽度和较低的旁瓣级。基于这种优化的阵型, 研制了一种声源定位系统。研究分析了该阵列的探测性能, 并通过实验数据对该声源定位系统的性能指标作了验证和评估。利用波束形成算法进行声源定位, 通过仿真和实验分析, 证明了这种阵型优化的阵列在声源定位应用中的有效性。

关键词: 阵型优化; 探测性能; 声源定位系统

中图分类号: TM937.4

文献标识码: A

文章编号: 1000-3630(2011)-02-0123-06

DOI 编码: 10.3969/j.issn1000-3630.2011.02.003

Sound source localization system based on planar microphone array

LIU Zhe, CHEN Ri-lin, TENG Peng-xiao, YANG Yi-Chun

(Key Laboratory of Noise and Vibration Research, Institute of Acoustics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

Abstract: Array features are investigated and a geometric optimized planar array of 64 microphone elements is proposed. The microphone elements are distributed along 8 helixes, and the proposed planar array possesses narrower main-lobe and lower side-lobes. Based on this optimized planar array, a source localization system is developed. The feature and performance of the proposed source localization system are evaluated and analyzed based on the data recorded in a semi-anechoic chamber. Beam-forming algorithm is used in the source localization system. Simulations and experiments are carried out to validate the effectiveness of this microphone array in source localization.

Key words: geometric optimization; detection performance; sources localization system

0 引言

近年来, 噪声问题越来越受到人们的重视, 在机械制造、汽车、船舶、工业设备等行业领域中的噪声治理和故障诊断成为关注的焦点。在这些应用中, 首先需要确定噪声源的位置及噪声信号特征, 即噪声源定位和噪声源分离问题。利用传声器阵列技术识别噪声源, 一直以来都是科学研究的重点。

用于声源定位和声源分离的阵列一般有以下几种阵型: 十字形阵列, 矩形阵列, 环形阵列, 螺旋形阵列等。NASA 的 Brooks 等人使用平面传声器阵列研究流动噪声源的分布问题。他们在风洞内测量了一个直升机模型的噪声源, 采用的是频域的信号处理算法^[1]。Boeing 公司的 Mosher 等应用平面传声器阵列对许多实际的气动噪声源进行了测量,

专门针对稳定的噪声源进行分析^[2]。法国 ONERA 的 Piet 和 Elias 等人则应用 39 个传声器阵元的十字形阵列测量飞机噪声, 并在风洞内对空中客车的飞机模型进行了实验^[3]。丹麦的 B&K 公司应用时域和频域波束形成算法, 利用不同的传声器(包括规则的, 非规则的)阵列对汽车、起重机、发动机等大型设备进行有效地识别^[4]。

本文对阵列的特性行了分析, 并在此基础上提出了一种优化阵型的 64 阵元平面螺旋阵列。实现了基于这种优化阵型的声源定位系统。通过在半消声实验室进行的实验对声源定位系统的性能进行了分析和评估。利用这个系统进行声源定位, 获得了良好的效果。

1 阵型优化设计

1.1 传声器阵列特性分析

传声器阵列是由一定数量的传声器按照一定的空间几何位置排列而成的。阵列参数包括传声器的数目, 阵列的孔径^[5]大小, 传声器阵元间距, 传

收稿日期: 2011-01-25; 修回日期: 2011-04-12

基金项目: 国家自然科学基金项目(11074278)

作者简介: 刘哲(1986-), 男, 山东德州人, 硕士研究生, 研究方向为阵列信号处理。

通讯作者: 刘哲, E-mail: qiye0127@163.com

声器的空间分布形式等几何参数；另外还包括指向性，波束宽度，最大旁瓣级等衡量阵列性能优劣的特征参数。设计一个好的阵列，需要同时考虑实际需求 and 器材的限制。理论上，应该采用最少的传声器，实现最好的识别效果。

传声器的数目和阵列孔径决定了一个阵列实现的复杂程度。阵列的传声器个数越多，布线方式越复杂。阵列孔径表示的是阵列在空间占据的体积，阵列孔径越大，结构实现越困难。传声器数目还影响阵列增益。由于阵列是在噪声背景下检测信号的，阵列增益 A_w 用来描述阵列作为空间处理器所提供的信噪比改善程度。一般来说，传声器数目和阵列增益成正比^[5]。综合考虑这两个因素，选择采用 64 个阵元的平面传声器阵列。阵列的孔径大约为 1 m。

阵列的阵元最小间距决定了阵列探测的上限频率^[4] $f_{\max} = c/2r$ ，其中， c 为声音传播速度， r 为阵元最小间距。对于孔径相同的传声器阵列，阵元间距越小，阵列探测的频率越高。在实际测量中，感兴趣的主要频率范围为 100~3500 Hz，这个频率范围是主要的机器噪声和语音的频率范围。所以传声器的最小间距一般不大于 0.07 m。

阵列的指向性是衡量阵列性能优劣的主要参数，阵列的指向性表示阵列对各个方向信号的接收或抑制能力，所以研究阵列指向性对分析和设计阵列都有重要意义。阵列的指向性可以由阵列的波束方向图来表征^[5]。

如图 1 所示，假设 M 个阵元的传声器阵列位于 xoy 平面内，传声器的位置坐标为

$$\mathbf{r} = \begin{bmatrix} x_1 & y_1 & 0 \\ x_2 & y_2 & 0 \\ \dots & \dots & \dots \\ x_M & y_M & 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{r}_1 \\ \mathbf{r}_2 \\ \dots \\ \mathbf{r}_M \end{bmatrix} \quad (1)$$

假定声源为远场窄带平面波模型，平面波 $(\theta, \varphi, \omega_c)$ 入射到阵列表面，其中， θ 为仰角， φ 为方位角， ω_c 为入射平面波的中心角频率。

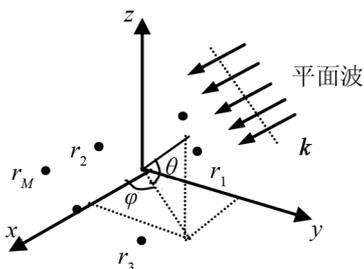


图 1 平面阵列和平面波模型

Fig.1 Planar array and plane wave model

以坐标原点为参考点，假设位于参考点的传声器接收到的信号为 $p(t)$ ，则位于 xoy 平面内的第 i 个传声器接收到的信号为 $p(t-\tau_i)$ ($i=1, 2, \dots, M$)， τ_i 为到第 i 个传声器相对于参考点的时间延时。

时间延时为：

$$\tau_i = \frac{\mathbf{r}_i \cdot \mathbf{a}}{c} \quad (2)$$

\mathbf{a} 为入射平面波的单位方向矢量：

$$\mathbf{a} = \begin{bmatrix} -\cos \theta \cos \varphi \\ -\cos \theta \sin \varphi \\ -\sin \theta \end{bmatrix} \quad (3)$$

这里定义 \mathbf{a} 对于每个轴的方向余弦为：

$$k_x = \cos \theta \cos \varphi \quad (4)$$

$$k_y = \cos \theta \sin \varphi \quad (5)$$

$$k_z = \sin \theta \quad (6)$$

在阵列信号处理中，定义阵列流形矢量^[6]为：

$$\mathbf{A}(\theta, \varphi, \omega_c) = [e^{-j\omega_c \tau_1}, e^{-j\omega_c \tau_2}, \dots, e^{-j\omega_c \tau_M}]^T \quad (7)$$

矢量 $\mathbf{A}(\theta, \varphi, \omega_c)$ 包含了阵列的所有空间信息。

在波束形成算法中，定义波束方向图^[6]为：

$$B(\theta, \varphi, \omega_c) = \mathbf{W} \mathbf{A}(\theta, \varphi, \omega_c) \quad (8)$$

其中， \mathbf{W} 为参数加权矩阵，通过改变波束方向图的加权矩阵，可以改变阵列的波束方向图，在本文中采用均匀加权的方式，即

$$\mathbf{W} = \frac{1}{M} [1, 1, \dots, 1], \text{ 为 } 1 \times M \text{ 维矩阵。}$$

此时波束方向图为

$$B(\theta, \varphi, \omega_c) = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M e^{-j\omega_c \tau_i} = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M e^{-j\omega_c \frac{\mathbf{r}_i \cdot \mathbf{a}}{c}} \quad (9)$$

阵列指向性可以由阵列波束方向图的 3 dB 波束宽度^[6]来考量，3 dB 波束宽度是波束宽度的一个考量。3 dB 波束宽度定义为对应归一化的波束方向图中 $|B(\theta, \varphi, \omega_c)| = 1/\sqrt{2}$ 的点。其中 $B(\theta, \varphi, \omega_c)$ 为均匀加权方式的波束方向图。3 dB 波束宽度衡量了阵列分辨两个不同平面波的能力。如果第二个波束方向图的峰值在第一个波束方向图的 3 dB 波束宽度之外，则认为这两个平面波是可以分辨的。所以 3 dB 波束宽度越窄，阵列的探测分辨率越高，阵列的指向性越好。

最大旁瓣级是阵列波束方向图中的一个重要参数。旁瓣的产生会导致声像中出现虚像，从而降低阵列的分辨能力。在归一化波束方向图中，最大旁瓣级为 G dB ($G < 0$)。如果一个信号在产生最大旁瓣的角度入射，且比主瓣所在的位置高 $(-G)$ dB，则这两个信号将产生相同的响应，导致虚源的产生。最大旁瓣级越低，阵列指向性越好。

1.2 优化的传声器阵列模型

最易实现的平面阵列是矩形阵列。一个孔径为 1 m 的矩形阵列上均匀的分布着 64 个传声器单元,组成 8×8 的网格,如图 2 所示。阵元的最小间距为 0.125 m,无法满足 1.1 节中提出的阵元最小间距要求。若把孔径为 1 m 的矩形阵列均匀的分 16×16 的网格,阵元最小间距为 0.0625 m,可满足要求。本文提出的优化阵型的螺旋阵列就是在这种 16×16 网格形阵列的基础上设计的。不规则的选取 16×16 网格上的 64 个点,组成新型的传声器阵列。

B&K 公司在 2002 年提出了一种车轮形阵列^[7],66 阵元车轮阵列的阵元分布在以原点为轴心的 11 根辐条上,每根辐条上有 6 个传声器单元,每根辐条上传声器之间的间距不均匀,如图 3 所示。对这种 66 阵元车轮阵列和 64 阵元矩形阵列进行了对比分析。假设入射声源为远场窄带平面波,如图 1 所示,平面阵列位于 xoy 面,阵列中心位于原点。入射平面波的中心频率为 2kHz,入射波仰角为 θ ,方位角为 φ 。

由于阵列位于 xoy 平面内,传声器位置的竖坐标为零,当波束在整个空间内扫描时,波束方向图可以表示为 k_x, k_y 的函数。由式(9)可以得到阵列的波束方向图如图 4、5 所示。

由图 2~5 对比可以看出,64 阵元矩形阵列最大旁瓣级接近于主瓣的声压级,有 8 个声压级较高的旁瓣;66 阵元车轮阵列的最大旁瓣级为 -15 dB,旁瓣数目较少,所以这样不规则形状的阵列具有更好指向性。

在 16×16 网格上不规则的选取传声器阵元位置时,借鉴了这种螺旋线式排布的方法,使得传声器阵元大体分布在以原点为中心的 8 条螺旋线上,每条螺旋线上有 8 个阵元。优化的 64 阵元平面螺旋阵列的几何结构如图 6 所示。图 7 所示为相同模型下的优化的 64 阵元螺旋阵列的波束方向图。

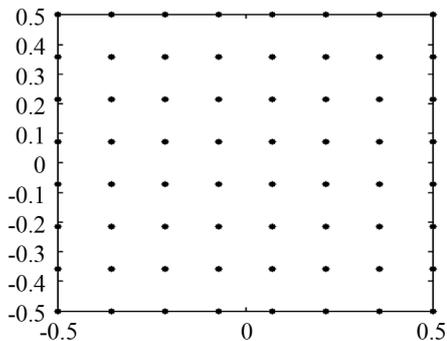


图 2 64 阵元矩形阵列几何结构
Fig.2 Rectangular array of 64 elements

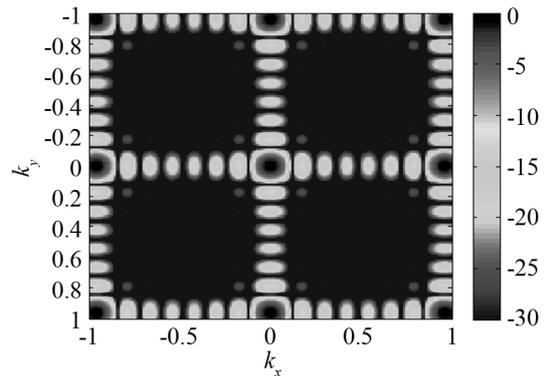


图 3 64 阵元矩形阵列波束方向图
Fig.3 Beam pattern of the array of Fig.2

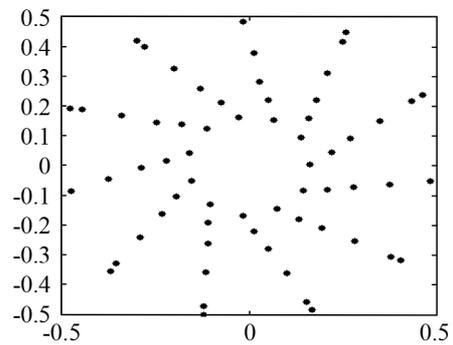


图 4 66 阵元车轮形阵列几何结构
Fig.4 Wheel-like array of 66 elements

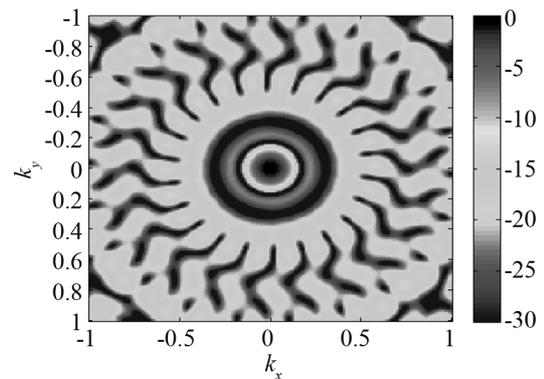


图 5 66 阵元车轮形阵列波束方向图
Fig.5 Beam pattern of the array of Fig.4

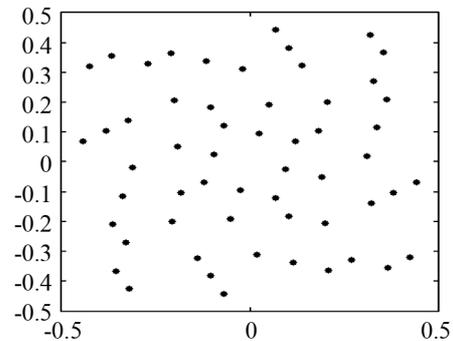


图 6 优化 64 阵元螺旋阵列几何结构
Fig.6 Optimized helix array of 64 elements

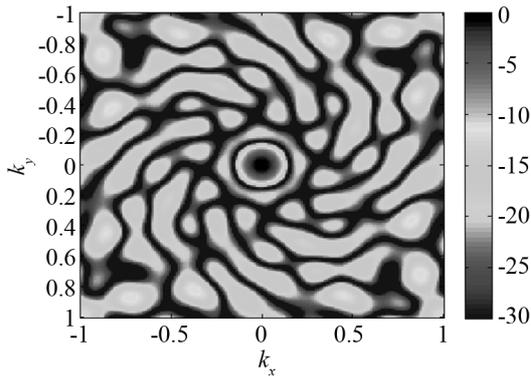


图7 优化 64 阵元螺旋阵列波束方向图
Fig.7 Beam pattern of the array of Fig.6

由图 7 可以得出，优化的 64 阵元螺旋阵列的最大旁瓣级为-15 dB，旁瓣数目较少。由图 2~7 可以得出，优化的 64 阵元螺旋阵列和 66 阵元车轮阵列具有更好的指向性。64 阵元矩形阵列有很大的旁瓣干扰，指向性较差。

2 声源定位系统的实现和性能分析

选择这种优化的 64 阵元螺旋阵列阵型作为声源定位系统的模型。基于这种阵列模型，实现了一种可以将声像图与实际图像相融合的声源定位系统，也称为阵列声成像系统，如图 8 所示。它具有和优化的 64 阵元螺旋阵列相同的几何结构和阵元数目。阵列的正中心安装有高分辨率的摄像头，可以实现声像图和实际图像相融合，直观的得到声源的位置。

2.1 传声器阵列声源定位系统设计

图 9 所示为声源定位系统的系统框图。声源定位系统主要由传声器，64 路高速信号采集板，DSP 信号处理板，视频摄像头和控制显示用的计算机组成。声源定位系统使用的是具有滤波放大功能的驻极体式测量传声器，具有比较高的信噪比和平坦的频率响应，可以实现精确的声场测量。传声器按照 1.2 节中提出的优化的阵型分布在阵体上。



图 8 声源定位系统(64 阵元平面螺旋传声器阵列)
Fig.8 Sound source localization system (SSLS) with the array of Fig.6

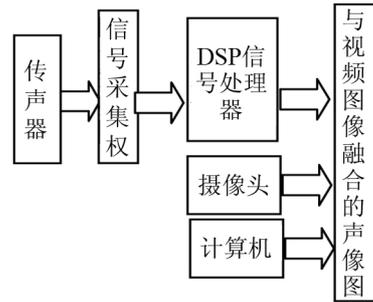


图 9 声源定位系统的系统框图
Fig.9 Block diagram of SSLS

64 个传声器接收的模拟信号经过 64 路高速信号采集板转换为数字信号，进入 DSP 信号处理器进行计算。本文采用常规波束形成算法进行声源定位。在 DSP 信号处理器中，由接收的信号计算出的声像图与视频摄像头接收的真实环境的图像按照像素点进行叠加，生成叠加后的图像。这样就可以直观的找出声源的位置，为机器的故障诊断，环境的噪声检测提够可靠的依据。

2.2 声源定位系统性能分析

为了测试声源定位系统的性能指标，在半消声室进行实验。首先测试声源定位系统对远场平面波方向上的空间分辨能力和最大旁瓣级。将声源放置在阵列正前方，距离满足 $d > 1.356R$ ，其中 d 为声源距离阵列的距离， R 为阵列的孔径， $R=1\text{m}$ 。声源可以视为远场平面波。播放单频声音信号，由声源定位系统接收的信号计算阵列的波束方向图如图 10 所示。可见，对 2 kHz 的入射波，声源定位系统的 3 dB 波束宽度小于 5° ，最高旁瓣低于 -15 dB。

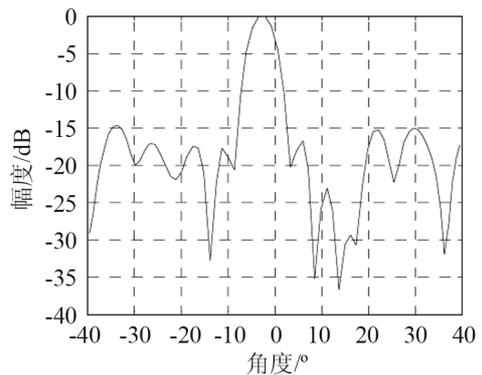


图 10 声源定位系统半消声室实验波束方向图(2kHz)
Fig.10 Beam pattern of SSLS tested in semi-anechoic room (2kHz)

下面对声源定位系统近场定位性能进行测试。通过测试系统对径向距离上的分辨能力来反映^[5]。

声源的频率仍为 2 kHz，声源依次置于阵列正前方 0.4 m，0.8 m，1.6 m，3.2 m 和 6.4 m 五个位置点，在每个位置点，扫描距离从 0.2 m 到 8 m，计算

出其声压值, 形成一条与距离分辨率相关的曲线, 如图 11 所示。

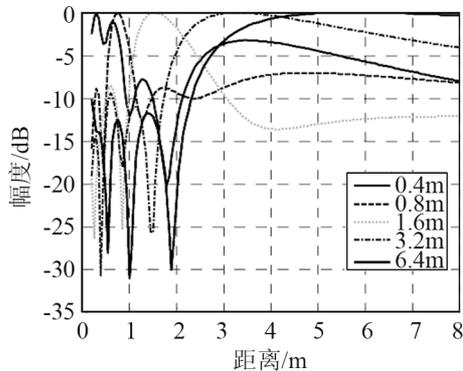


图 11 声相仪系统对径向距离的分辨能力曲线
Fig.11 Radial range resolution curve of SSLS

图 11 反映了声源定位系统在径向距离上的分辨能力, 由图中曲线可见声源在较近距离时有较高的距离分辨能力, 而随着声源远离声源定位系统, 距离上的分辨率逐步下降, 直至声源较远时, 可以视为平面波, 此时不能分辨径向距离方向的声源。

2.3 利用声源定位系统进行声源定位

为了验证利用优化阵型的声源定位系统进行声源定位的可行性, 分别进行了仿真分析和半消声室实验。

仿真分析中, 建立空间直角坐标系, 假设空间只存在两个单频声源, 频率都为 2 kHz, 一个声源的位置为[-1, 0, 3], 另外一个声源的位置为[1, 0, 3]。平面传声器阵列位于 xy 平面内, 阵列中心位于原点, 仿真扫描 $-4\text{ m} \leq x \leq 4\text{ m}$, $-4\text{ m} \leq y \leq 4\text{ m}$, $z=3\text{ m}$ 的平面, 可以得到声源的位置图, 如图 12 所示。

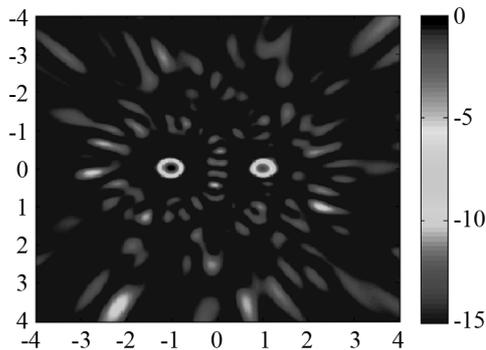


图 12 64阵元优化螺旋阵列声源定位仿真图像
Fig.12 Simulation image of sound source localization with the optimized helix array of 64 elements

在半消声室进行的实验中, 两个扬声器分别放置于声源定位系统前方 3 m 处, 一个扬声器位于阵列中心左侧 1 m 处, 另一个扬声器位于阵列中心右



图 13 声源定位系统声源定位半消声室实验图像
Fig.13 Experiment picture of SSLS in semi-anechoic room

侧 1 m 处。扬声器播放 2 kHz 的单频声音。由于视频摄像头的视角范围有限, 在声源到阵列平面的距离为 3 m 时, 扫描范围为 $-2.1\text{ m} \leq x \leq 2.1\text{ m}$, $-1.6\text{ m} \leq y \leq 1.6\text{ m}$, $z=3\text{ m}$ 的平面。得到实验的视频图像如图 13 所示。

从声源定位的仿真图像(图 12)来看, 优化的 64 阵元螺旋阵列可以实现对双声源的精确定位。成像图中虚像较少, 而且虚像的声压级比较低。从半消声室的实验图像(图 13)来看, 传声器声源定位系统可以有效的将实际图像和空间声场的成像图相融合, 实现声源定位, 使声场可视化。

本文还利用传声器声源定位系统对多种机械, 电子设备进行了噪声源定位实验。图 14 为在半消

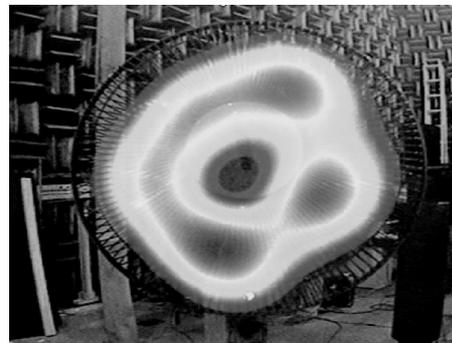


图 14 风扇噪声声场成像结果
Fig.14 Imaging result of fan noise field



图 15 汽车噪声成像结果
Fig.15 Imaging result of automobile noise field

声实验室中对电风扇的声场的成像结果。由于电风扇噪声主要来自叶片尖击打空气产生的涡流噪声,电风扇高速运转后形成的噪声场是在扇叶尖附近的一个环形带,成像结果很好地刻画出此时的声场。图 15 为汽车发动机噪声声场的成像结果。可以看到,打开汽车前盖,主要噪声源为汽车的发动机噪声,但是汽车发动机牵引的皮带轮也产生了较大的噪声,也是汽车噪声的主要来源。

3 结 论

在噪声治理中,确定主要噪声源的位置及提取噪声信号特征是至关重要的。本文研制的传声器声源定位系统能够实时、准确地计算出被测物产生的声场,识别出多个噪声源的位置以及噪声源信号分离,提取信号的特征用于噪声降噪。本文讨论了阵型对性能的影响,以及通过实验手段测试了所研制的声源定位系统的性能指标,从半消声室的测试结果以及实验结果来看,可以很好地应用于机器、工业设施的噪声监测和噪声治理等领域。

参 考 文 献

- [1] Brooks T F, Marcolini M A, Pope D S. A directional array approach for the measure of rotor noise source distributions with controlled spatial resolution[J]. *Journal of Sound Vibration*, 1987, 112(1): 192-197.
- [2] Mosher M. Phased Array for Aeroacoustics Testing: Theoretical Development[C]// AIAA. 2nd AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference, State College, Pa. 1996, 96-1713.
- [3] Piet J-F, Elias G. Airframe Noise Source Localization Using a Microphone Array[C]// AIAA 3rd AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference, Atlanta, Georgia. 1997, 97-1643.
- [4] Christensen J J. Beam forming—Technical Review. B&K Sound & Vibration Measurement A/S[J/OL]. 2004.1: 22-23,60-92.
- [5] 孙超. 水下多传感器阵列信号处理[M]. 西安: 西北工业大学出版社, 2007: 26, 77, 80.
- [6] 第斯(Tree H L V)[M]. 汤俊等译. Optimum array processing part IV of detection, estimation, and modulation theory 北京: 清华大学出版社, 2008: 20, 32, 45-46.
- [7] Hald J, Christensen J J. A class of optimal broadband phased array geometries designed for easy construction[C]// The 31st International Congress and Exposition on Noise Control Engineering, USA. 2002.