

纪念应崇福院士诞辰 95 周年

面向目标的定向声辐射技术及其应用研究

杨 军[†] 叶 超 姬培锋 蔡野锋 田 静

(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 面向目标的定向声辐射是指利用声源特性和阵列信号处理技术, 将声波传送至目标方向或区域的声场控制方法。本文介绍了定向声辐射技术的原理和进展, 重点阐述了普通扬声器阵列和参量阵扬声器这两种声源形式的理论、算法和应用研究。其中, 针对扬声器阵列, 主要分析了基于声能量对比度控制的声聚焦技术; 针对参量阵扬声器, 综述了利用非线性效应产生高指向性可听声的计算方法、信号预处理和应用等进展。面向目标的定向声辐射技术的研究对实现智能声场控制有着重要意义。

关键词 面向目标, 定向声, 声能量对比度控制, 参量阵扬声器

中图分类号: O422.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-310X(2013)04-0277-13

Target-oriented acoustic radiation generation technique and its applications

YANG Jun YE Chao JI Peifeng CAI Yefeng TIAN Jing

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

Abstract Target-oriented Acoustic Radiation Generation Technique (TARGET) utilizes the array signal processing to transmit the audible sound wave to the targeted direction or predefined region by a transducer array, which is one of the sound-field control techniques. This paper reviews the principles and recent progresses of TARGET for the linear loudspeaker array and parametric acoustic array, respectively. The sound energy in the target region based on linear loudspeaker array is analyzed. The calculation method of sound field, signal pre-processing and applications of parametric acoustic array is presented as well. The study of the TARGET is helpful for realizing the smart sound field control.

Key words Target-oriented, Directional sound, Acoustic contrast control, Parametric acoustic array

2013-05-07 收稿; 2013-05-20 定稿
作者简介: 杨军 (1968-), 男, 安徽安庆人, 研究员, 研究方向: 声学信号处理, 声场控制。
叶超 (1984-), 男, 博士后。
姬培锋 (1980-), 男, 副研究员。
蔡野锋 (1987-), 男, 博士研究生。
田静 (1960-), 男, 研究员。

[†]通讯作者: 杨军, E-mail: jyang@mail.ioa.ac.cn

1 引言

21 世纪, 以人为本的个性化科技逐渐成为现代科学技术的发展方向。随着虚拟现实技术、多媒体技术和智能终端的迅速发展, 音频声学越来越凸显其重要性。三维虚拟音效、声载波通信以及个性化的声场重放技术, 已经逐渐成为未来科技发展的趋势, 传统的电声系统已经不能满足人们的需求。面向目标的定向声辐射技术因其广泛的应用背景, 成为现代声学最为活跃的热点之一。

近年来, 作者先后提出了基于参量阵的高指向性声辐射技术和利用扬声器阵列的面向目标的声辐射生成方法^[1-2]。所谓的面向目标的定向声辐射技术有两层含义: 一是强调面向, 即形成从声源到目标的波束传播方式如通过设计指向性声源来实现可听声波束的辐射和传播; 二是侧重于目标, 即为了满足声场控制要求如在指定的区域产生特定声场的分布而发展的声学阵列辐射技术。

目前, 产生指向性可听声的方法大体有三种: (1) 聚音亭 (Sound Dome); (2) 扬声器阵列 (Loudspeaker Array); (3) 参量阵 (Parametric Acoustic Array)。聚音亭的原理是通过一个弯曲的反射面, 通常是抛物面或者是球面, 反射扬声器发出的声音, 将声波“聚焦”到反射面所指向的接收者处。聚音亭实现起来相对简单, 但是作用距离较短, 而且只有发射体足够大且听者位置准确时才能产生好的效果。扬声器阵列可通过各个扬声器单元发射具有不同延的信号实现定向声辐射, 时延大小对应于声音从扬声器单元传播到目标区域的声程差。但是, 这种经典时延方法仅能实现某个方向的定向声传播, 并不能形成定向区域。以目标区域声场控制为目的, 产生了基于扬声器阵列信号处理技术的定向声生成技术, 主要包括声场重建、波束形成和声能量控制等方法。基于参量阵原理的定向声辐射技术, 将可听声调制到超声载波上并由超声换能器发射到空气中, 利用非线性声学效应对可听声进行自解调, 从而产生具有高指向性的可听声。本文重点介绍基于扬声器阵列和参量阵原理的定向声辐射技术, 对其产生机理、算法实现以及应用研究等方面进行综述。

2 基于扬声器阵列信号处理的声聚焦技术

基于扬声器阵列的定向声辐射的目的是传送声波到特定的区域或方向, 产生声学上的“亮区” (Acoustically Bright Zone), 即在目标区域或方向聚集声能, 同时在某些区域或方向产生声学上的“暗区” (Acoustically Dark Zone), 即尽量减少某些区域或方向上的声能量, 如图 1 所示。其信号处理方法主要有以下三种: (1) 多区域声场重放 (Multi-zone Sound Reproduction)^[3-7]; (2) 波束形成^[8-9]; (3) 声能量对比度控制 (Acoustic Contrast Control, ACC)^[10-26]。

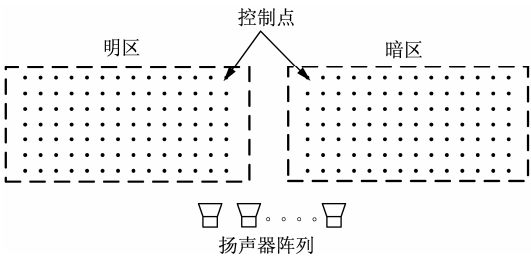


图 1 基于扬声器阵列的定向声辐射

多区域声场重放和波束形成技术本质上都是基于声压信号处理的控制方法。多区域声场重放的主要思想是在明区和暗区设置幅值不同的期望声场响应, 即明区响应幅值大, 暗区响应幅值小, 通过调整扬声器阵列输入信号权向量的幅度和相位, 使得实际声场响应逼近期望声场响应, 从而达到定向辐射声的效果^[3]。Betlehem 等人^[4]在此基础上对准则进行了修改, 在暗区声场能量不高于某值的条件下, 通过凸优化方法调整输入权向量, 使得明区的实际声场和期望声场响应的均方误差最小, 同时为了提高解的鲁棒性, 准则中加入了输入权向量能量约束。相比于直接采用最小二乘法 (Least Square, LS)^[3]所得的结果, 该方法对不同角度方向明区的期望响应, 都能取得较好的定向辐射效果。Jennifer 等人^[5]通过球谐波函数转换将多区域局部声场重建转换为全局声场重建, 充分利用了所有声场信息。Radmanesh 等人^[6-7]将多区域声场重放的单频信号处理方法拓展到了整个语音频带, 测试其语音效果, 并对扬声器位置和个数进行了优化, 使用数量较少的扬声器仍可以取得相近的定向辐射效果。总体来说, 多区域声场重放可以实现较好的定向辐射效果, 但是计算过程通常比较复杂, 所需扬声器数

目较多，且现有研究基本都局限于圆形扬声器阵列。波束形成方法^[8-9]来源于传声器阵列领域，其设计方法较多且比较成熟，但是该方法一般只能将声能量辐射于特定方向而不是区域，且研究多限于线性阵列，同时其相关参数存在相互耦合，不易求解。

与前述两种方法的控制机理不同，ACC 方法是一种基于声能量信号处理的控制方法，其主要思想是通过将声学明区的平均能量与声学暗区的平均能量比值最大化设计出最优化滤波器。相比于基于声压信号的方法，ACC 方法不受阵型、阵元特性的限制，设计和求解方程简单，因此得到更广泛的应用。

ACC 方法最早由 Choi 等人^[10]在 2002 年提出。2008 年，他们通过自由场实验证实了采用长度为 32 cm 的 9 元小型扬声器阵列可以在 800 Hz~5 kHz 的范围内取得不低于 19 dB 的对比聚焦效果，并且对比聚焦效果随着频率变大而升高^[11]。同年，他们进一步考虑了自由场中人头散射的影响，仿真表明明区的控制点只选取在人耳的附近时，ACC 方法可以基本不受人头散射的影响^[12]。2010 年，他们又将 ACC 方法应用于基于扬声器阵列的立体声通道音频系统中，频率大于 1 kHz 时，双耳通道分离度可达 20 dB 以上^[13]。

Elliott 等人^[14]首先将 ACC 方法应用于有源耳罩中，他们通过实验发现频率为 50 Hz~2 kHz 时，小房间中相邻座位之间的声隔离度在 5 dB 到 25 dB 之间。在此基础上，他们将暗区从一个区域扩大成了两个区域，同样证明了此方法的有效性^[15]。在 2012 年，他们将 ACC 方法应用于电视机音频领域，并与传统的 LS 方法进行对比，仿真和实验结果均表明 ACC 方法和 LS 方法在此种情况下对比聚焦性能相差不大^[16]。同时，他们研究了此方法对声学环境变化的敏感性，通过对扬声器输入限幅增强算法的鲁棒性^[17]。

针对低频鲁棒性问题，Shin 等人^[18]在 ACC 的基础上提出了一个类似方法，在扬声器输入能量固定的条件下，通过调整滤波器使明区与暗区之间的平均声能量之差最大。此方法避免了 ACC 方法中对矩阵求逆时存在的病态问题，仿真和实验结果表明，选取合适的权重因子，可以获取更佳的能量增益，同时降低声学测量误差对结果的影响。Kim 等人^[19]认为在阵列定向辐射中，除了关心对比聚焦能

力，还需关注阵列能量增益，即明区的声能量与扬声器阵列输入能量之比。他们将 ACC 方法和阵列能量增益约束相结合，通过遗传算法求解扬声器阵列的滤波器。阵列能量增益反映了阵列的辐射效率，只有在阵列的辐射效率得到保证的前提下，对比聚焦能力才更有意义。Chang 等人^[20]考虑了声场重放问题，他们结合 ACC 方法和 LS 方法，通过调节权重参数，在声场重建性能 and 对比聚焦能力之间取得了较好的平衡，同时采用双层扬声器阵列，相比于单层扬声器阵列可以取得更好的对比聚焦效果。作者等人^[21-23]在 ACC 方法基础上提出了面向目标的声辐射技术，并用在多输入输出系统中，仿真结果表明相比于传统方法，此技术能取得更好的能量增益。进一步的，我们又将 ACC 方法应用于多波束声发射系统中，实验证实阵列长度为 64 cm 时，频率在 800 Hz 以上，可同时向-20°和 20°两个方向发射具有旁瓣级衰减 10 dB 的波束^[24-25]。

传统的 ACC 方法一般都只考虑对比聚焦性能，并且只针对单频信号进行处理。在处理宽带信号时，此方法通常都在一系列控制频率点上设计，再通过逆傅里叶变换将频响转换为时域冲激响应滤波器，因此其宽带聚焦性能可能不是最优的。特别是在滤波器长度不足的情况下，此设计过程可能导致在非控制频率点上具有较低的对比聚焦性能，影响了宽带定向辐射性能。另一方面，此方法并没有考虑频率响应的一致性，从而使用户区域的时域冲激响应偏离脉冲冲激响应，可能会损坏用户区的音质，降低用户的聆听感受。针对此问题，作者等人^[26]在 ACC 基础上提出了一种时域中设计新方法 Broadband Acoustic Contrast Control- Response Variation (BACC-RV)。与传统的频域声能量对比度不同，该方法将声能量对比度定义在时域中，利用时域相关取得整个频带上的聚焦效果，同时为了在明区取得较好的音质，在准则中添加了频响一致性约束。

作者在中国科学院声学研究所的全消声实验室验证了 BACC-RV 的可行性。如图 2 所示，扬声器阵列由 8 个间距为 12 cm 的动圈式扬声器单元组成。暗区和明区处在扬声器阵列两侧，分别由间距 8 cm 的 5 个控制点表示，与扬声器阵列中垂线夹角都为 45°，距离正中心 1 m。扬声器阵列与控制点之间的传递函数由实际测量获得，如图 3 所示，频率

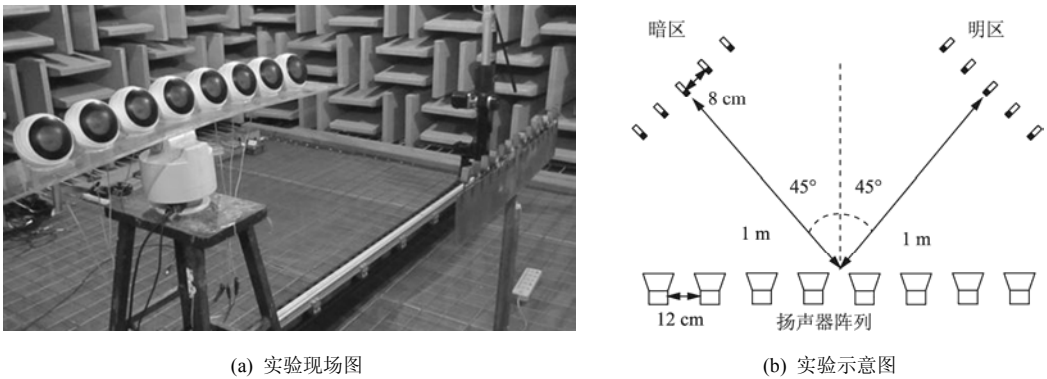


图 2 实验系统图

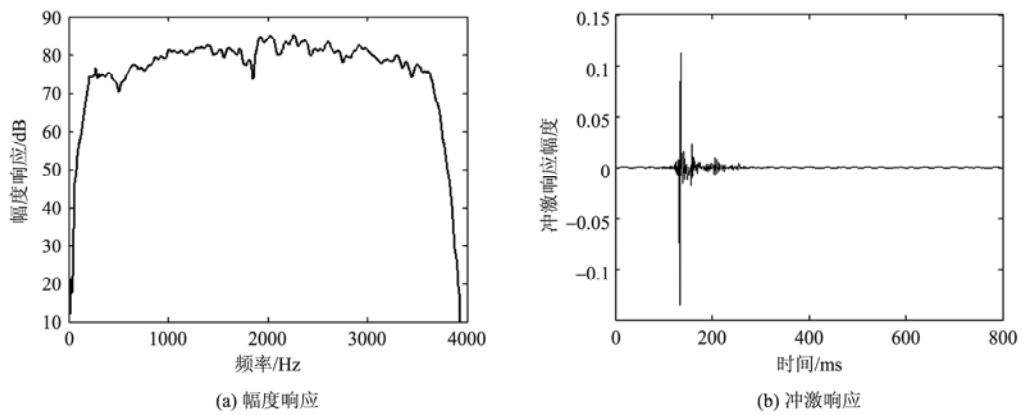


图 3 左起第一个扬声器单元到明区中心控制点的声场特性

间隔为 10 Hz，冲激响应通过对传递函数做逆傅里叶变换获得。本实验暂时只考虑语音信号，系统中加入了低通滤波器，截止频率 3.6 kHz，采样频率设为 8 kHz。

传统的 ACC 方法和作者提出的 BACC-RV 方法的性能比较如图 4 所示。滤波器阶数为 200 阶，即控制频率点间距 40 Hz，观测频率点间距为 10 Hz。

从图 4(a)中可以看出，BACC-RV 方法可以在整个频带上取得较好的聚焦效果，而 ACC 方法只能在控制频率点上取得较好的聚焦效果，在非控制点上的聚焦性能则迅速下降。图 4(b)给出了明区中心控制点处的幅度响应。相比于 ACC 方法，BACC-RV 方法的频响更平坦，因此能取得更好的声场保真度。

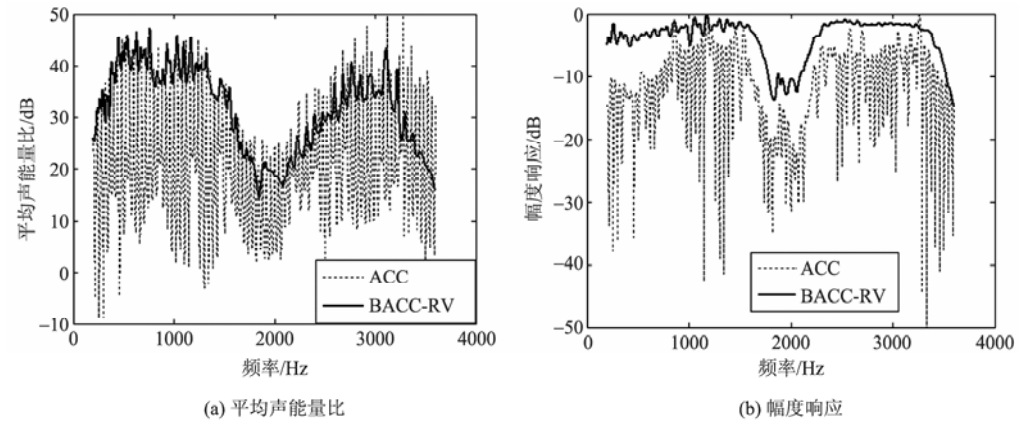


图 4 BACC-RV 与 ACC 方法的性能比较

3 基于参量阵原理的定向声辐射技术及其应用

参量阵原理如图 5 所示。与传统声源相比，参量阵形成的指向性声源具有以下特点：(1) 辐射声波只向指定方向传播；(2) 可以传播很长的距离；(3) 利用反射面可以产生虚拟声源。

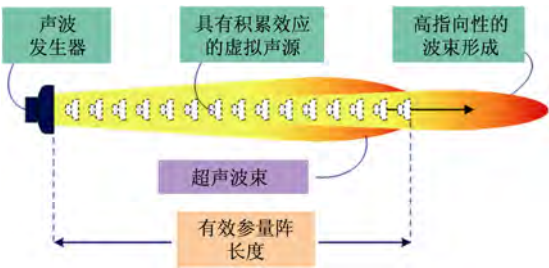


图 5 参量阵高指向性声源的原理图

参量阵的概念首先由 Westervelt 提出^[27-28]。他基于 Lighthill 的理论，给出了两个平面波在不均匀介质中传播时产生的二阶场关系和具体的理论推导。1965 年，Berklay^[29]提出了一个更精确、更完整的关于参量化阵的解释，给出的 Berklay 远场解得到了广泛应用。假定原波为 $p_1(t) = p_0 E(t) \cos(\omega_c t)$ ，其中 ω_c 是载波频率， $E(t)$ 是任意包络函数， p_0 是原波幅度。由于介质非线性作用下的自解调现象，发射换能器的轴向声压发射轴可表示为 $p_2(t) \propto \partial^2 E^2(t) / \partial t^2$ ，即自解调后的信号与包络信号的平方对时间的两次微分成正比。如果包络信号是声频信号，则得到的解调信号也是可听声。参量阵在低频的高指向性使得其首先在水声中得以应用，但由于空气的吸收系数比较大，而且非线性参数比较小，导致在空气中产生非线性作用相对比较困难。直到 1974 年，Blackstock 等人^[30]首次在空气中实现了参量阵。1983 年，Yoneyama 等人^[31]率先在空气中开展了声频定向辐射系统的实验研究。进入 21 世纪后，参量阵在工程和研究领域均取得重要进展。一方面，商业化的参量阵产品相继问世，主要有美国的 Holosonic Research Lab 与 American Technology Corporation (ATC)，德国的 Sennheiser 等。另一方面，参量阵扬声器成为声频工程领域的研究热点，在基础理论和关键技术等方面有大量的学术成果涌现，主要体现在以下几个方向。

3.1 数值计算

基于非线性声学的参量阵技术不满足线性叠加原理，对系统做物理或数学建模得不到解析解，只能通过数值计算手段进行声场仿真。目前，指向性波束声传播问题的数值计算一般都基于抛物线近似的 Khokhlov-Zabolotskaya-Kuznetsov (KZK) 方程^[32]，该方程包含了衍射作用、热粘滞吸收作用和非线性作用。KZK 方程没有解析解，只能使用数值计算方法求解。准线性条件下，声场被简化成一阶和二阶声场的和，可以分别用两重积分和五重积分来表示，并通过积分法求解^[33-36]。当声源分布函数用高斯函数叠加和的形式来表示时，利用高斯函数的可积性可以得到一阶声波的解析形式，并将二阶声波简化成一重积分，从而明显减小声场计算量^[37-40]。不过，这种方法只适用于弱非线性的情况，且不能计算高次谐波，使用范围受到了一定的限制。

现有的高斯波束展开系数计算方法均不完善：或计算速度慢，或得到的系数精度不高，或稳定性差。作者等人^[41]针对高斯波束展开法的核心——高斯波束展开系数的计算，在空间域提出了一种新的高精度简单算法，并对其做了波数(k)空间域的扩展和“轴向近场逼近”的扩展。在保证高精度的同时，计算出了个数较少的高斯波束展开系数，为声场的快速计算奠定了基础。采用作者算法得到 $N=15$ 的系数用于计算圆形声源的衍射声场，并给出了 Wen 和 Breazeale^[42]的结果作对比，如图 6 中所示。图 6(a) 和(b)分别为轴向声压和远场轴向声压的相对误差。图 6(c)和(d)分别为 $z = 0.25z_0$ 和 $z = z_0$ (z_0 是 Fresnel 距离) 处的旁轴声压分布。从图中可以看到，使用作者给出的系数计算得到的声场分布与 Rayleigh 积分解符合的很好。与文献[42]相比，轴向声压的精度更高，由相对误差为 1%降低到近 0.05%，精度提高了 20 倍。

声压强度较高时，高斯波束展开法不再适用，一般只能使用基于 KZK 方程的时域算法^[43-45]、频域算法^[46-48]或时频域混合算法^[49-53]等纯数值算法求解。时域有限差分算法不受准线性近似的限制，能够计算强非线性条件下的声场。与只能研究稳态问题的频域有限差分算法相比，时域有限差分算法还能研究瞬态问题。但该方法的缺点是计算量较大，在三维声场的情况下尤其明显，这也是前人的研究主要针对轴对称声场，而较少研究非轴对称声

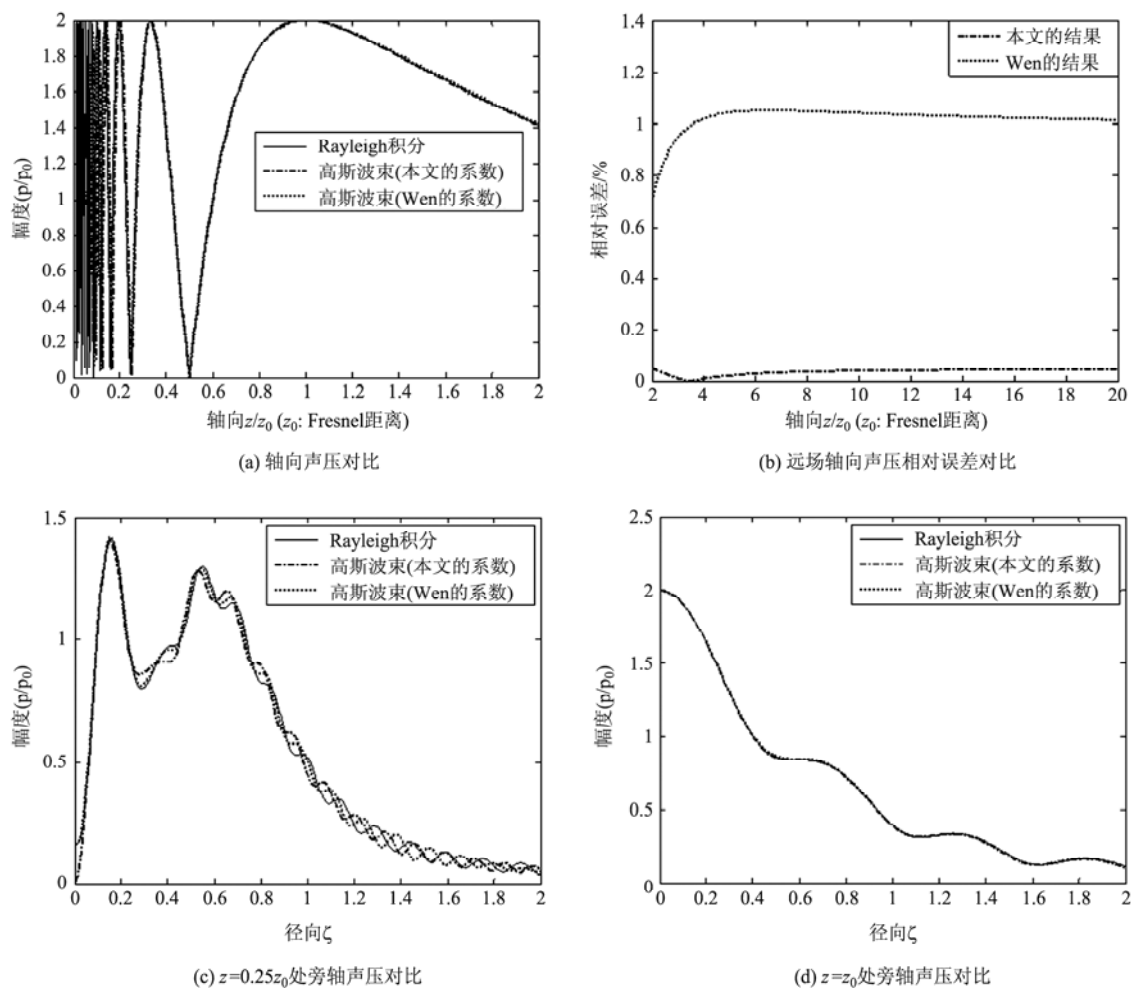


图 6 表面声压均匀分布的圆形声源的声场计算结果

场的原因之一。现有的三维时域算法主要针对弱聚焦波束，虽然可以用于计算非聚焦波束，但在计算远场时效率很低。作者提出了一种求解扩展版 KZK 方程的三维时域有限差分算法^[54]，解决了二维算法受轴对称限制的问题。该算法首先将扩展版的 KZK 方程转换成 Transformed beam equation (TBE) 方程，以减小波束在远场球面波传播时的计算量，然后依次求解衍射、热粘滞吸收、弛豫吸收和非线性的作用。与高斯波束展开法相比，该算法不受准线性近似的限制，能够用来计算强非线性条件下的声场，为高强度指向性波束的声场仿真提供更加精确的结果。与前人的数值和实验结果的对比验证了算法的有效性。图 7 给出了矩形参量阵声源可听声的声场分布与 Kamakura 等人结果^[55]的对比。其中，图 7(a)是轴向声场，图 7(b)是 $z=6\text{ m}$ 处 x 方向旁轴声场。可以看到，作者的计算结果与 Kamakura 等

人的计算结果符合的很好。

3.2 预处理算法

由于参量阵扬声器涉及非线性作用，为了实现高质量的声场重放，必须对参量阵扬声器的输入信号进行预处理，以减少谐波失真。研究人员基于 Bertkay 远场解提出了各种信号预处理算法并应用于参量阵扬声器。Yoneyama 等人^[31]使用双边带调制方法 (DSB-AM) 产生包络信号 $E(t)=1+mg(t)$ ，其中 $g(t)$ 是输入的声频信号， m 是调制系数，但是这种简单的处理方法有较大的谐波失真。1984 年，Kamakura 等人^[56]提出开方双边带调制方法 (Square Root AM, SRAM)，生成包络信号 $E(t)=\sqrt{1+mg(t)}$ 。相比于双边带调制方法，该方法能够有效减小谐波失真，却需要有无无限带宽的超声换能器以产生开方处理形成的多个谐波信号。随后，他们又提出了单边带调制方法 (SSB-AM)^[57]，相比于双边带调制，

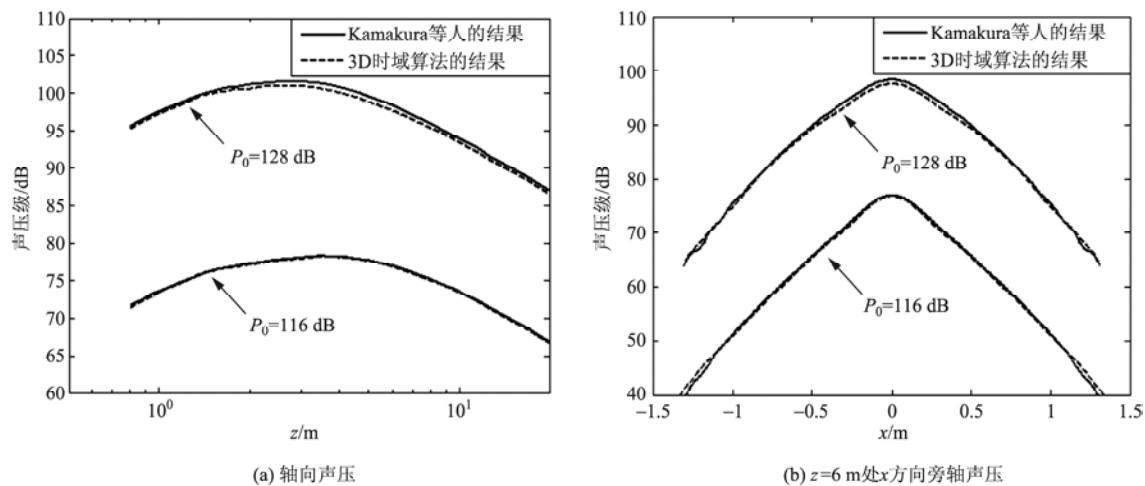


图 7 三维时域代码计算的差频波声场分布

这种方法只需要一半的换能器带宽。但是对于复杂的输入信号，SSB-AM 容易引入误差。因此，Croft 等人^[58-59]提出了迭代单边带调制方法(RSSB-AM)，通过迭代来逼近开方双边带调制的结果，但是需要高速处理器以实现实时计算。作者等人^[60]对该预处理方法进行了更详细的分析，对于指向性语音重放给出了包括调制因数和迭代次数在内的最佳参数。图 8 给出了一个典型的应用实例，可以看到当迭代次数为 4 和 5 时，误差功率谱基本不再改变。Tan 等人^[61]利用正交信号的相互作用，提出了修正的双边带调制方法(Modified AM, MAM)，能够有效减小谐波失真，并且降低了计算复杂度。Kamakura 等人^[62]提出了动态载波的单边带调制方法(Dynamic SSB-AM)，根据调制信号的幅值动态的调整载波信号幅值，以提高输出信号与调制信号的线性关系，从而减少谐波失真。由于 Berktag 远场解只是参量阵扬声器近似解，并不能真实的反映声场的实际情况，因此作者等人^[63]对各种预处理算法进行了总结，并且基于 KZK 方程的时域解对比了上述的 DSB-AM、SRAM、SSB-AM 和 MAM 等预处理算法，给出了适用于语音重放的最佳预处理方法选择，并根据总谐波失真(THD)与原波幅度 P_0 的关系指出目前基于 Berktag 远场解的预处理方法所适用 P_0 范围，如图 9 所示。

3.3 声场测量中的伪噪声问题

参量阵扬声器不同于普通扬声器，在其产生的可听声波中同时存在超声波，这对参量阵扬声器的准确测量提出了更高的要求。伪噪声来源于两方

面，一是传声器预放大电路的非线性作用，二是传声器表面的辐射声压。这两者形成的伪噪声频率均为两超声波 p_1 和 p_2 频率之差 $|f_1 - f_2|$ ，伪噪声的幅值与超声波 p_1 和 p_2 幅值的乘积成正比，即

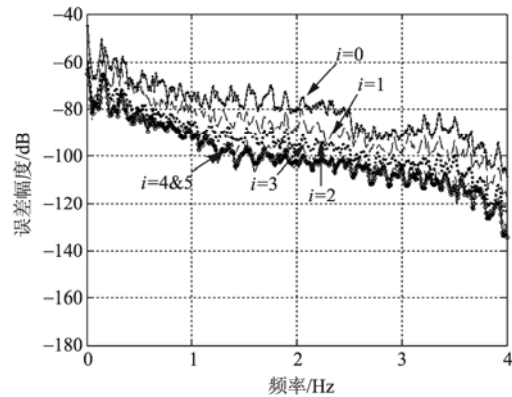


图 8 当 $m=0.75$ 时使用 RSSB-AM 不同迭代次数的原始信号与输出信号的误差功率谱

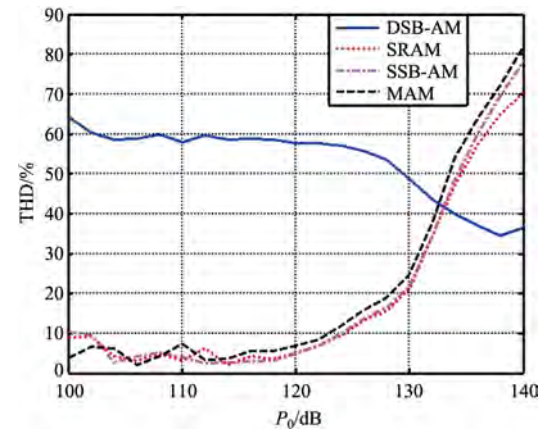


图 9 基于 KZK 方程得到的 THD 和 P_0 的关系

$p_n \propto p_1 p_2$ 。由此可见，伪噪声会严重干扰实际可听声的测量，尤其在近场区域，伪噪声比参量阵扬声器产生的可听声要大得多，因此必须使用合理方法滤除伪噪声，得到真实的可听声。

1975 年，Blackstock 等人^[30]首次在空气参量阵扬声器的实验中滤除伪噪声。他们将一个由厚度为 0.06 mm 塑料玻璃纸制成的半球形声滤波器置于测量传声器的前端，使差频声（5 kHz）衰减 3.5 dB，而令超声原波（18.6 kHz 和 23.5 kHz）衰减 20 dB，实现了低通特性，因此可以有效的减少伪噪声。Toda^[64]设计了一个四层聚合薄膜结构的管状声滤波器，其中四层薄膜之间的间距为载波波长（载波频率为 34 kHz）的一半，对超声载波衰减最大达 30 dB。但是这种声滤波器结构过于复杂，不便于实际应用。Wygant 等人^[65]在利用电容式微加工超声换能器（CMUT）作为参量阵扬声器的发射源进行测量时，采用一层赛伦合成纤维作为声滤波器，但并没有对该滤波器的结构和性能进行详细描述。由于声滤波器对于参量阵扬声器的准确测量至关重要，因此作者设计了一种结构相对简单的声滤波器，以滤除测量过程中由于传声器引起的伪噪声干扰，并通过实际测量证实了滤波器的有效性^[66]。参量阵扬声器的频率响应如图 10 所示，在未加滤波器的情况下，伪噪声的幅值与差频波的频率无关。参量阵扬声器产生的可听声幅值正比于 f_d^n ，其中 f_d 为差频波频率， $n \approx 1.6$ 。参量阵扬声器的轴向声压测量结果如图 11 所示。伪噪声信号可以表示为 $p_{sn} = Kp_a p_b$ ，其中 p_a 和 p_b 分别为传声器处的超声波信号幅值。通过曲线拟合的方法，可以得到常数 $K \approx 2.8 \times 10^{-4} Pa^{-1}$ 。作者还基于高斯波束展开法和 Kamakura 等人的相位相消法^[68]提出了一种不需要声滤波器的替代方法来测量可听声信号，通过理论和实验证明该方法能更精确测量解调得到的可听声信号^[69]。

3.4 应用研究

参量阵扬声器作为一种新型的指向性声源，在噪声控制、个人通信、声学探测和材料测量等方面具有广泛的应用前景。传统的有源噪声控制一般采用全指向性的扬声器作为次级声源，在目标区域降低噪声，但是容易导致声场其他区域的噪声增大。当控制区域是某个方向或特定局部空间时，全指向性的传统扬声器并不能很好的满足要求。而具有强

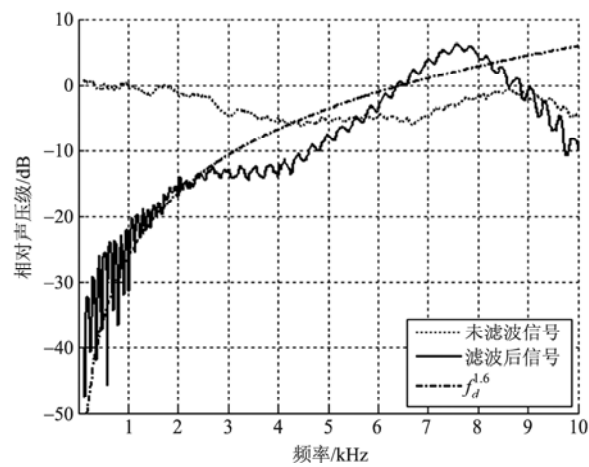


图 10 参量阵扬声器的频率响应

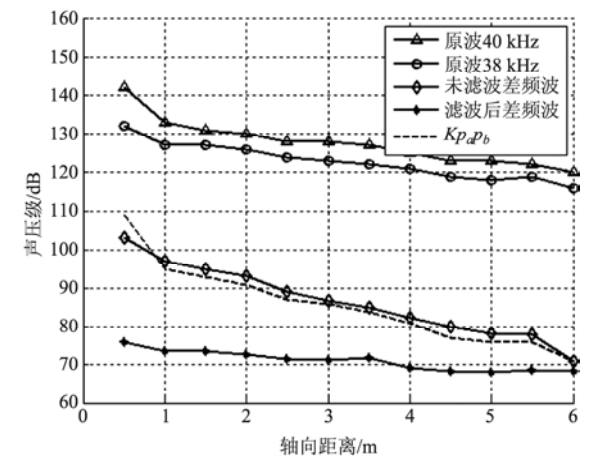


图 11 参量阵扬声器的轴向声压

指向性的参量阵扬声器作为次级声源用于有源噪声控制系统，不仅可以减少次级通道声反馈，而且可以减少次级声源对声场中非控制区域的影响。Brooks 等人^[70]初步探讨了将参量阵扬声器作为次级声源用于有源噪声控制系统的可能性，认为尽管参量阵扬声器能够产生具有强指向性的可听声，但由于涉及非线性作用，因此不能很精确的控制可听声相位和幅值。另外，由于其转换效率较低，为了得到合适的可听声需增大输入信号幅度，因此会产生较高声压级的超声波，这可能会引起关于超声波的安全问题。该研究小组又研究了参量阵扬声器和虚拟传声器技术相结合的有源噪声控制系统，但仅限于理论探讨，并未给出实际可行的方案^[71]。Tanaka 等人^[72-73]利用相控阵技术对参量阵扬声器进行波束偏转，并作为次级声源用于有源噪声控制系统，对运动噪声源进行跟踪。他们的进一步研究，利用弧形参量阵扬声器的反射向初级声源声场辐

射球面波，与初级声源的辐射声波尽量重合叠加，实现整个声场的全局降噪。作者等人^[74-75]对参量阵扬声器和普通全指向性扬声器分别作为次级声源的情况进行了仿真和实验研究，结果显示参量阵扬声器作为次级声源，不仅可以实现局部空间噪声控制，并且对声场其他区域几乎没有影响。

在个人通信方面，Nakashima 等人^[76-77]在手机原型机上安装了两个由 16 个压电陶瓷换能器组成的参量阵扬声器，实验测得距离手机 50 cm 处声压级超过 70 dB。利用参量阵扬声器的高指向性，双耳的声级差约为 15 dB，因此可以实现双耳声重放。

由于参量阵扬声器在低频段也具有较强的指向性，因此可用于材料声学特性测量。Castagnede 等人^[78-79]利用参量阵扬声器激发脉冲信号在正入射情况下测量材料的吸声系数。作者等人^[80-81]提出了采用传递函数方法实现吸声系数的现场测量，并且结合相位相消技术^[68]减小伪噪声的影响，提高测量精度，实验测量结果如图 12 所示。由于声源具有高指向性，大部分声能量在接触材料后为材料所吸收，通过壁面和室内放置物的反射和散射进入传

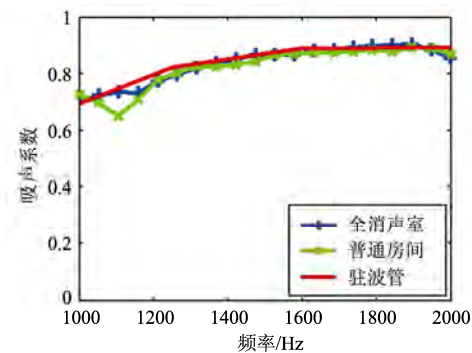
声器的信号已非常微弱，故房间的大小，墙壁的特性以及房间内物品放置对测试结果影响有限。该方法对复杂声环境下的吸声系数测量有非常好的效果，对于工程施工现场快速测量以及材料生产的在线自动检测都有很高的应用价值。

3.5 国内研究

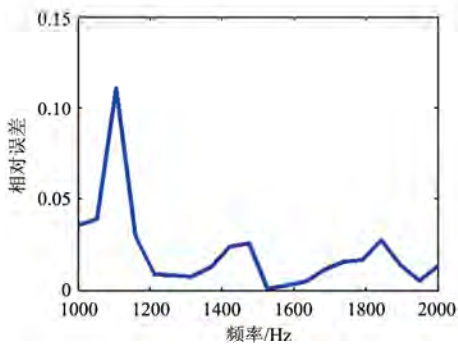
与国外相比，国内对参量阵扬声器的研究起步较晚，而且多集中于参量阵扬声器的研制与实验研究等方面，应用研究却鲜有报道。作者领导的课题组长期致力于声场控制和定向声发射技术研究，在参量阵扬声器系统的基础理论研究、关键技术开发和系统实用化等方面都做了大量工作。除此之外，作者等人还在工程研制方面对新型超声换能器 PVDF 薄膜^[82]，多通路参量阵扬声器^[83]以及换能器阵列的阻抗匹配^[84-85]等进行了研究，并相继开发出多款样机，如图 13 所示。



图 13 参量阵扬声器样机



(a) 边长0.45m被测材料吸声系数



(b) 边长0.45m被测材料全消声室与普通房间测量结果之间的相对误差(以驻波管结果为参考值)

图 12 全消声室与普通房间测量结果对比

在应用研究方面，采用 Farrow 结构小数延时滤波器和 FPGA 处理器，设计了相控参量阵扬声器系统，实现了差频声波束的任意偏转^[86]。Farrow 结构通过多项式近似使小数延时与滤波器系数分离，从而使滤波器系数固定，无需根据延时计算滤波器系数，简化了波束偏转的算法。偏转角度与延时呈线性关系，因此输入任意的小数延时就可以实现波束的任意偏转，偏转精度不受采样率的限制。对 900 Hz 差频声偏转 5°和 10°的结果见图 14 所示。

参量阵扬声器可以看作是声散射现象^[87]的一种特殊情况，即两个声源同中心同方向发射。作者等人^[88]通过实验研究了两个超声波束在 KEMAR 人工头附近的声散射声现象，实现了局部空间可听声重放。实验系统中两列超声波束并排放置，

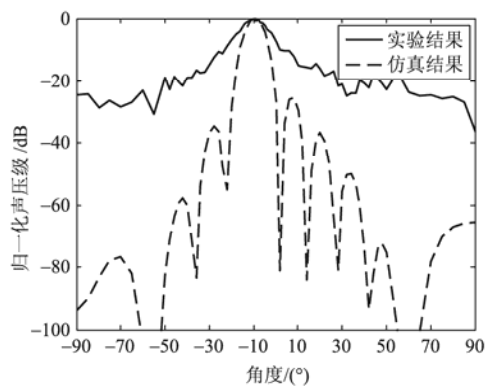


图 14 差频波波束偏转

如图 15 所示。声场测量结果如图 16 所示，没有人工头时，两列超声波束轴向区域约 20 cm 宽度内产

生了差频声波。在有人工头的情况下，头散射作用使头后差频波声场明显扩大。两列超声波束垂直交叉时的声场测量结果如图 17 所示，差频波声压级在 原点处达到最大值 51 dB，差频波可听声的区域面积约为 10 cm×10 cm，几乎为人工头的大小。从实验结果中可以看出，利用两列垂直交叉的超声波束的相互作用，可以产生局部的可听声声场。并且，由于人工头的散射作用，散射声得到了明显的增强，而人工头的阴影作用导致两耳的声压级有明显不同。作者等人^[89-90]提出了交叉波束的非向性相互作用下声场的快速算法并进行相关实验研究。这些研究结果对指向性声源在声频工程中的实际应用具有指导意义，也为实现局部的声场重放提供了新的途径。

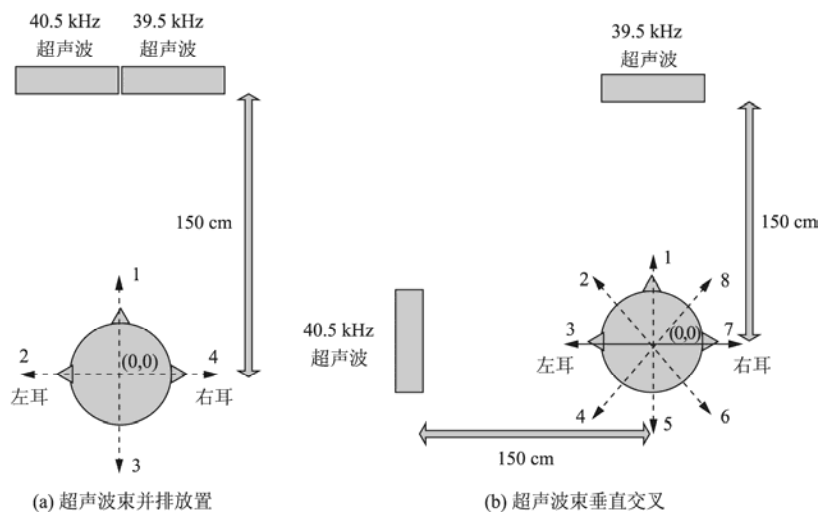


图 15 实验系统示意图

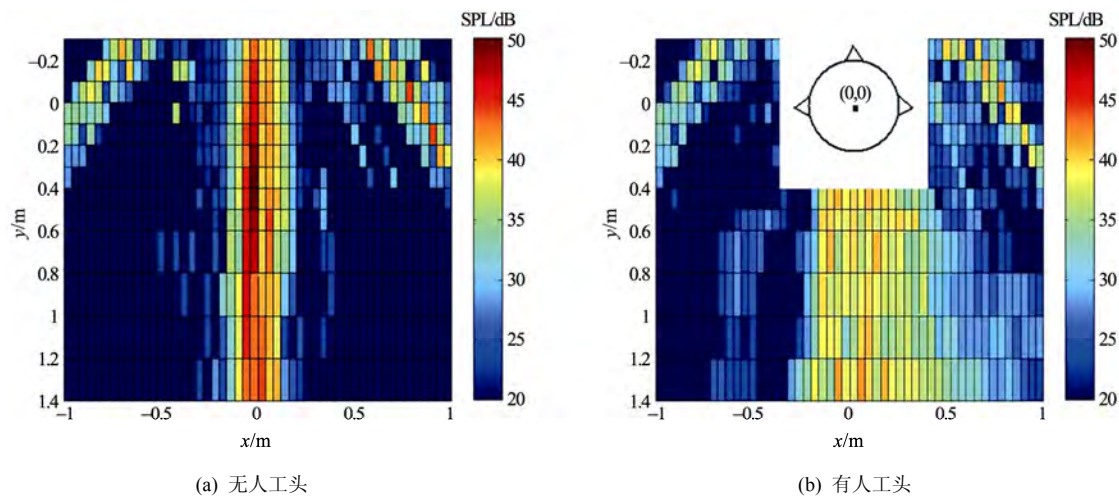


图 16 超声波束并排放置时的差频波声场

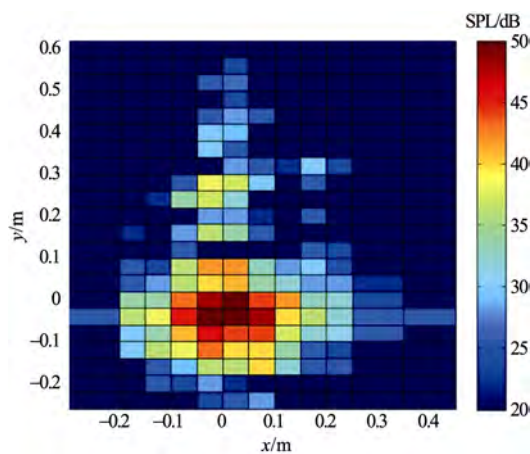


图 17 超声波束垂直放置时的差频波声场

电子科技大学的徐利梅等人从预处理算法^[91]、超声换能器^[92-94]以及硬件实现^[95-96]等方面对参量阵扬声器进行了研究。另外，中国科学院声学研究所嘉兴工程中心的杨益等人^[97]对参量阵扬声器也进行了系统设计与测试。

4 总结

本文介绍了面向目标的定向声辐射技术的研究进展，从扬声器阵列和参量阵扬声器两方面进行了详细的阐述。基于扬声器阵列的定向声生成技术，能够形成声学“亮区”和“暗区”，实现特定目标区域的声重放。基于参量阵原理的定向声生成技术，具有尺寸小、频带宽、指向性强等特点，且能够避免声反馈带来的问题。可以利用波束反射实现虚拟声源，得到环绕声效果，还可以利用定向传声实现保密通话等功能，在噪声控制、个人通信和声学测量等方面具有广泛的应用前景。面向目标的定向声辐射技术是实现智能声场的重要手段。未来声学技术发展的一个关键在于如何采用面向目标的控制策略，实现量“声”定做的新思路，从而真正地推动声学技术的研究向个性化、智能化、实用化等更深层次发展。

参 考 文 献

[1] YANG J, GAN W S, ER M H, et al. Steering of directional sound beams [P]. US Patent: US7146011B2, 2006.
[2] 杨军, 温源. 一种面向目标的声辐射生成方法 [P]. 中国专利: 200510107830.5, 2005.
[3] POLETTI M. An investigation of 2D multizone surround sound

systems [C]. 125th AES Convention. 2008: 167-175.
[4] BETLEHEM T, TEAL P D. A constrained optimization approach for multi-zone surround sound [C]. IEEE Int Conf Acoust Speech Signal Process. 2011: 437-440.
[5] WU Y J, ABHAYAPALA T D. Spatial multizone soundfield reproduction: Theory and design [J]. IEEE Trans Audio Speech Lang Process. 2011, 19 (6): 1711-1720.
[6] RADMANESH N, BURNETT I S. Reproduction of independent narrowband soundfields in a multizone surround system and its extension to speech signal sources [C]. IEEE Int Conf Acoust Speech Signal Process. 2011: 461-464.
[7] RADMANESH N, BURNETT I S. Generation of isolated wideband sound fields using a combined two-stage Lasso-LS algorithm [J]. IEEE Trans Audio Speech Lang Process. 2013, 21 (2): 378-387.
[8] TASHEV I, DROPPA J, SELTZER M, et al. Robust design of wideband loudspeaker arrays [C]. IEEE Int Conf Acoust Speech Signal Process. 2008: 381-384.
[9] BOONE M M, CHO W H, IH J G. Design of a highly directional endfire loudspeaker array [J]. J Audio Eng Soc. 2009, 57 (5): 309-325.
[10] CHOI J W, KIM Y H. Generation of an acoustically bright zone with an illuminated region using multiple sources [J]. J Acoust Soc Am. 2002, 111 (4): 1695-1700.
[11] CHANG J H, LEE C H, PARK J Y, et al. A realization of sound focused personal audio system using acoustic contrast control [J]. J Acoust Soc Am. 2009, 125 (4): 2091-2097.
[12] CHANG J H, PARK J Y, KIM Y H. Scattering effect on the sound focused personal audio system [J]. J Acoust Soc Am. 2009, 125 (5): 3060-3066.
[13] PARK J Y, CHANG J H, KIM Y H. Generation of independent bright zones for a two-channel private audio system [J]. J Audio Eng Soc. 2010, 58 (5): 382-393.
[14] ELLIOTT S J, JONES M. An active headrest for personal audio [J]. J Acoust Soc Am. 2006, 119 (5): 2702-2709.
[15] JONES M, ELLIOTT S J. Personal audio with multiple dark zones [J]. J Acoust Soc Am. 2008, 124 (6): 3497-3506.
[16] GALVEZ M F S, ELLIOTT S J, CHEER J. A super directive array of phase shift sources [J]. J Acoust Soc Am. 2012, 132 (2): 746-756.
[17] ELLIOTT S J, CHEER J, CHOI J W, et al. Robustness and regularization of personal audio systems [J]. IEEE Trans Audio Speech Lang Process. 2012, 20 (7): 2123-2133.
[18] SHIN M, LEE S Q, FAZI F M, et al. Maximization of acoustic energy difference between two spaces [J]. J Acoust Soc Am. 2010, 128 (1): 121-131.
[19] KIM D, KIM K, WANG S, et al. Maximization of the directivity ratio with the desired audible gain level for broadband design of near field loudspeaker arrays [J]. J Sound Vib. 2011, 330 (23): 5517-5529.
[20] CHANG J H, JACOBSEN F. Sound field control with a circular double-layer array of loudspeakers [J]. J Acoust Soc Am. 2012, 131 (6): 4518-4525.
[21] WEN Y, GAN W S, YANG J. Application of radiation mode in desired sound field generation using loudspeaker array [C]. IEEE Inter Symp Circuits Syst. 2005: 3139-3142.
[22] WEN Y, YANG J, GAN W S. Strategies for an acoustical-hotspot generation [J]. IEICE Trans Fundam Electron Commun Comput Sci. 2005, E88A (7): 1739-1746.

[23] WEN Y, YANG J, GAN W S. Target-oriented acoustic radiation generation technique for sound field control [J]. IEICE Trans Fundam Electron Commun Comput Sci. 2006, E89A (12): 3671-3677.

[24] CAO J, WU M, YANG J. Realization of sound reproduction in a specified region based on transfer function interpolation [J]. Electr Power Syst Comput. 2011, 99: 221-228.

[25] 曹洁, 吴鸣, 杨军. 多波束声发射系统的实现 [J]. 电声技术. 2011, 35 (6): 19-21.

[26] CAI Y, WU M, YANG J. Design of a time-domain acoustic contrast control for broadband input signals in personal audio systems [C]. IEEE Int Conf Acoust Speech Signal Process. 2013.

[27] WESTERVELT P J. Parametric end-fire array [J]. J Acoust Soc Am. 1960, 32 (7): 934-935.

[28] WESTERVELT P J. Parametric acoustic array [J]. J Acoust Soc Am. 1963, 35 (4): 535-537.

[29] BERKTAY H O. Possible exploitation of non-linear acoustics in underwater transmitting applications [J]. J Sound Vib. 1965, 2 (4): 435-461.

[30] BENNETT M B, BLACKSTOCK D T. Parametric array in air [J]. J Acoust Soc Am. 1975, 57 (3): 562-568.

[31] YONEYAMA M, FUJIMOTO J, KAWAMO Y, et al. The audio spotlight: An application of nonlinear interaction of sound waves to a new type of loudspeaker design [J]. J Acoust Soc Am. 1983, 73 (5): 1532-1536.

[32] HAMILTON M F, BLACKSTOCK D T. Nonlinear acoustics [M]. San Diego: Academic Press, 1998.

[33] GARRETT G S, TJOTTA J N, TJOTTA S. Nearfield of a large acoustic transducer, Part I. Linear radiation [J]. J Acoust Soc Am. 1982, 72 (3): 1056-1061.

[34] GARRETT G S, TJOTTA J N, TJOTTA S. Nearfield of a large acoustic transducer, Part II: Parametric radiation [J]. J Acoust Soc Am. 1983, 74 (3): 1013-1020.

[35] GARRETT G S, TJOTTA J N, TJOTTA S. Nearfield of a large acoustic transducer. Part III: General results [J]. J Acoust Soc Am. 1984, 75 (3): 769-779.

[36] BERNTSEN J, TJOTTA J N, TJOTTA S. Nearfield of a large acoustic transducer. Part IV: Second harmonic and sum frequency radiation [J]. J Acoust Soc Am. 1984, 75 (5): 1383-1391.

[37] DING D. A simplified algorithm for the second-order sound fields [J]. J Acoust Soc Am. 2000, 108 (6): 2759-2764.

[38] KIM H J, SCHMERR L W, SEDOV A. Generation of the basis sets for multi-Gaussian ultrasonic beam models - An overview [J]. J Acoust Soc Am. 2006, 119 (4): 1971-1978.

[39] SHA K, YANG J, GAN W S. A complex virtual source approach for calculating the diffraction beam field generated by a rectangular planar source [J]. IEEE Trans Ultrason Ferroelectr Freq Control. 2003, 50 (7): 890-897.

[40] YANG J, SHA K, GAN W S, et al. Modeling of finite-amplitude sound beams: Second order fields generated by a parametric loudspeaker [J]. IEEE Trans Ultrason Ferroelectr Freq Control. 2005, 52 (4): 610-618.

[41] LIU W, YANG J. A simple and accurate method for calculating the Gaussian beam expansion coefficients [J]. Chin Phys Lett. 2010, 27 (12): 124301.

[42] WEN J J, BREAZEALE M A. A diffraction beam field expressed as the superposition of Gaussian beams [J]. J Acoust Soc Am. 1988, 83 (5): 1752-1756.

[43] LEE Y S. Numerical solution of the KZK equation for pulsed finite amplitude sound beams in thermoviscous fluids [D]. The University of Texas, Austin, 1993.

[44] LEE Y S, HAMILTON M F. Time-domain modeling of pulsed finite-amplitude sound beams [J]. J Acoust Soc Am. 1995, 97 (2): 906-917.

[45] AVERKIOU M A, LEE Y S, HAMILTON M F. Self-demodulation of amplitude- and frequency-modulated pulses in a thermoviscous fluid [J]. J Acoust Soc Am. 1993, 94 (5): 2876-2883.

[46] AANONSEN S I, BARKVE T, TJOTTA J N, et al. Distortion and harmonic generation in the nearfield of a finite amplitude sound beam [J]. J Acoust Soc Am. 1984, 75 (3): 749-768.

[47] BERNTSEN J. Numerical calculations of finite amplitude sound beams [J]. Front Nonlinear Acoust. 1990: 191-196.

[48] HAMILTON M F, TJOTTA J N, TJOTTA S. Nonlinear effects in the farfield of a directive sound source [J]. J Acoust Soc Am. 1985, 78 (1): 202-216.

[49] BAKHVALOV N S, ZHILEIKIN Y M, ZABOLOTSKAYA E A. Parametric interaction of sound beams [J]. Sov Phys Acoust. 1979, 25: 280-283.

[50] BAKHVALOV N S, ZHILEIKIN Y M, ZABOLOTSKAYA E A. Nonlinear propagation of sound beams with a uniform amplitude distribution [J]. Sov Phys Acoust. 1980, 26: 95-100.

[51] BAKHVALOV N S, ZHILEIKIN Y M, ZABOLOTSKAYA E A, et al. Nonlinear propagation of a sound beam in a nondissipative medium [J]. Sov Phys Acoust. 1976, 22 (4): 272-274.

[52] BAKHVALOV N S, ZHILEIKIN Y M, ZABOLOTSKAYA E A, et al. Propagation of Finite Amplitude Sound Beams in a Dissipative Medium [J]. Sov Phys Acoust. 1978, 24: 271-275.

[53] BAKHVALOV N S, ZHILEIKIN Y M, ZABOLOTSKAYA E A, et al. Harmonic generation in sound beams [J]. Sov Phys Acoust. 1979, 25: 101-106.

[54] 刘伟, 杨军, 田静. 有限振幅波的三维时域建模 [J]. 声学学报. 2011, 36 (4): 349-357.

[55] KAMAKURA T, TANI M, KUMAMOTO Y, et al. Harmonic generation in finite amplitude sound beams from a rectangular aperture source [J]. J Acoust Soc Am. 1992, 91 (6): 3144-3151.

[56] KAMAKURA T, YONEYAMA M, IKEGAYA K. Developments of parametric loudspeaker for practical use [C]. Proc 10th Inter Symp Nonlinear Acoust. 1984: 147-150.

[57] KAMAKURA T, TASHIHIDE Y, IKEGAYA K. A study for the realization of a parametric loudspeaker [J]. J Acoust Soc Jpn. 1985: 1-18.

[58] CROFT J J, SPENCER M E, NORRIS J O. Modulator processing for a parametric speaker system [P]. US 20080063214A1, 2003.

[59] CROFT J J, NORRIS J O. Theory, history, and the advancement of parametric loudspeaker [J]. White Paper of American Technology Corporation. 2001.

[60] JI P, GAN W S, TAN E L, et al. Performance analysis on recursive single-sideband amplitude modulation for parametric loudspeakers [C]. IEEE Inter Conf Multimedia Expo. 2010: 748-756.

[61] TAN E L, GAN W S, JI P F, et al. Distortion analysis and reduction for the parametric array [C]. 124th AES Convention. 2008.

[62] SAKAI S, KAMAKURA T. Dynamic single sideband modulation for

realizing parametric loudspeaker [C]. 18th Inter Symp Nonlinear Acoust. 2008: 613-616.

[63] JI P, TAN E L, GAN W S, et al. A comparative analysis of preprocessing methods for the parametric loudspeaker based on the Khokhlov-Zabolotskaya-Kuznetsov equation for speech reproduction [J]. IEEE Trans Audio Speech Lang Process. 2011, 19 (4): 937-946.

[64] TODA M. New type of acoustic filter using periodic polymer layers for measuring audio signal components excited by amplitude-modulated high-intensity ultrasonic waves [J]. J Audio Eng Soc. 2005, 53 (10): 930-941.

[65] WYGANT I O, KUPNIK M, WINDSOR J C, et al. 50 kHz capacitive micromachined ultrasonic transducers for generation of highly directional sound with parametric arrays [J]. IEEE Trans Ultrason Ferroelectr Freq Control. 2009, 56 (1): 193-203.

[66] YE C, KUANG Z, WU M, et al. Development of an acoustic filter for parametric loudspeaker in air [J]. Jpn J Appl Phys. 2011, 50 (7): 07HE18.

[67] BERKTAY H O, LEAHY D J. Farfield performance of parametric transmitters [J]. J Acoust Soc Am. 1974, 55 (3): 539-546.

[68] KAMAKURA T, SAKAI S, NOMURA H, et al. Parametric audible sounds by phase-cancellation excitation of primary waves [C]. Proc Second ASA-EAA Joint Conf Acoust. 2008: 4367-4372.

[69] JI P, LIU W, WU S, et al. An alternative method to measure the on-axis difference-frequency sound in a parametric loudspeaker without using an acoustic filter [J]. Appl Acoust. 2012, 73 (12): 1244-1250.

[70] BROOKS L A, ZANDER A C. Investigation into the feasibility of using a parametric array control source in an active noise control system [C]. Proc Acoust. 2005: 39-45.

[71] KIDNER M R F, PETERSEN C, ZANDER A C, et al. Feasibility study of localized active noise control using an audio spotlight and virtual sensors [C]. Proc Acoust. 2006: 55-61.

[72] TANAKA N, TANAKA M. Active noise control using a steerable parametric array loudspeaker [J]. J Acoust Soc Am. 2010, 127 (6): 3526-3537.

[73] TANAKA N, TANAKA M. Mathematically trivial control of sound using a parametric beam focusing source [J]. J Acoust Soc Am. 2011, 129 (1): 165-172.

[74] 叶超, 吴鸣, 杨军. 利用参量阵扬声器进行有源噪声控制的研究 [J]. 电声技术. 2011, 35 (3): 61-63.

[75] YE C, WU M, YANG J. Actively created quiet zones by parametric loudspeaker as control sources in the sound field [C]. 19th Inter Symp Nonlinear Acoust. 2012: 367-374.

[76] NAKASHIMA Y, YOSHIMURA T, NAKA N, et al. Prototype of mobile super directional loudspeaker [J]. NTT DoCoMo Tech J. 2006, 8 (1): 25-32.

[77] NAKASHIMA Y, YOSHIMURA T, OHYA T. Prototype of parametric array loudspeaker on mobile phone and its acoustical characteristics [C]. 118th AES Convention. 2005.

[78] CASTAGNEDE B, MOUSSATOV A, LAFARGE D, et al. Low frequency in situ metrology of absorption and dispersion of sound absorbing porous materials base on high power ultrasonic non-linearly demodulated waves [J]. Appl Acoust. 2008, 69 (7): 634-648.

[79] CASTAGNEDE B, SAEID M, MOUSSATOV A, et al. Reflection and transmission at normal incidence onto air-saturated porous materials and direct measurements based on parametric demodulated ultrasonic waves [J]. Ultrasonics. 2006, 44 (2): 221-229.

[80] 匡正, 叶超, 吴鸣, 等. 一种现场测量材料吸声特性的新方法 [J]. 声学学报. 2010, 35 (2): 162-168.

[81] KUANG Z, YE C, YANG J. A method for measuring diffuse-field sound absorption coefficients of materials using parametric loudspeaker [C]. Proc Symp Ultrason Electron. 2010: 331-332.

[82] 匡正, 叶超, 杨军. 新型 PVDF 超声换能器的指向性研究 [J]. 声学技术. 2008, 27 (5): 530-531.

[83] 叶超, 匡正, 纪伟, 等. 多通路高指向性声频声源的实验研究 [J]. 声学技术. 2007, 26 (5): 1026-1027.

[84] 叶超, 匡正, 马登永, 等. 高指向性声频声源的阻抗匹配 [J]. 噪声与振动控制. 2007, 27 (S1): 441-443.

[85] 张维, 匡正, 叶超, 等. 高指向性声频声源中 PVDF 膜换能器的阻抗匹配 [J]. 电声技术. 2010, 34 (4): 30-32.

[86] WU S, WU M, HUANG C, et al. FPGA-based implementation of steerable parametric loudspeaker using fractional delay filter [J]. Appl Acoust. 2012, 73 (12): 1271-1281.

[87] 钱祖文. 非线性声学 [M]. 北京: 科学出版社, 2009.

[88] YE C, KUANG Z, JI P, et al. Generation of audible sound from two ultrasonic beams with dummy head [J]. Jpn J Appl Phys. 2008, 47 (5): 4333-4335.

[89] JI P, YANG J, TIAN J. A fast calculation method for the scattered sound fields from two sound beams using the Gaussian-beam expansion technique [J]. Jpn J Appl Phys. 2008, 47 (5): 4253-4256.

[90] JI P, YANG J, GAN W S. The investigation of localized sound generation using two ultrasound beams [J]. IEEE Trans Ultrason Ferroelectr Freq Control. 2009, 56 (6): 1282-1287.

[91] CHEN M, HUANG D G, XU S H, et al. An approximate realization method of the square root signal processing algorithm of audio directional loudspeaker [C]. Proc IEEE Inter Conf Mechatron Autom. 2007.

[92] XU L M, CAO J F, HUANG D G. Design and characterization of a PVDF ultrasonic acoustic transducer applied in audio beam loudspeaker [C]. Proc IEEE Inter Conf Mechatron Autom. 2005.

[93] 曹建芳, 徐利梅, 李辉. 声频定向 PVDF 超声波传感器的设计与测试 [J]. 实验科学与技术. 2005, 3 (3): 1-4.

[94] 陈敏, 徐利梅, 黄大贵, 等. 谐振频率可调式 PVDF 膜声频定向换能器 [J]. 压电与压光. 2007, 29 (1): 53-55.

[95] 刘珊梅, 姚维, 徐利梅. DSP 在新型声频定向系统中的应用 [J]. 电声技术. 2007, 31 (3): 27-30.

[96] 李学生, 徐利梅, 陈敏, 等. 基于 ADSP-BF533 的声频定向算法实现 [J]. 微计算机信息. 2006, 22 (5): 176-178.

[97] 杨益, 温周斌, 冯海泓, 等. 超指向性扬声器的系统设计与测试 [J]. 声学技术. 2008, 27 (1): 66-70.