

用于手机的微型声频定向扬声器

李学生¹,徐利梅¹,姜丽峰¹,蒲刚¹,陈敏¹,许亮峰²

(1 电子科技大学 空天科学技术研究院,四川 成都 611731;2 诺基亚研究中心,北京 100176)

摘要:提出了一种用于手机的微型声频定向扬声器实现方法,该新型扬声器可将声音控制在发声单元正前方轴向传播,能为使用者提供免提的局部声音服务。4只直径为 $\varnothing 10$ mm的锆钛酸铅(PZT)压电陶瓷超声换能器组阵作为发声部件,换能器阵列谐振频率作为超声载波频率,数字信号处理器(DSP)芯片作为声频定向调制算法实现平台,D类超声功率放大器为阵列驱动器,诺基亚N73手机作为外壳,制作出了样机。对换能器单元及阵列阻抗、声压级频率响应等特性进行了测试和分析,对样机作了自解调可听声指向性测试和整机功耗测试。实验结果表明,样机尺寸、功率和声压级基本满足手机中的应用需求,为微型声频定向扬声器在便携式多媒体设备中的应用提供了实践依据。

关键词:微型声频定向扬声器;局部声音服务;PZT压电陶瓷超声换能器;指向性;便携式多媒体设备

中图分类号:TN64 **文献标识码:**A

Micro Audio Directional Loudspeaker for Mobile Phone

LI Xuesheng¹, XU Limei¹, JIANG Lifeng¹, PU Gang¹, CHEN Min¹, XU Liangfeng²

(1. Institute of Astronautics and Aeronautics, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 611731, China;
2. Nokia Research Center, Beijing 100176, China)

Abstract: A method for realizing the micro audio directional loudspeaker in mobile phone is investigated to examine a novel auditory experience in this paper. This novel directional loudspeaker can provide private listening service by emitting the audible sound with high directivity along propagating axis. A prototype using Nokia N73 mobile phone as the package is constructed in which the emitter array is assembled by four PZT ceramic ultrasonic transducers with the diameter of 10mm. The emitter array is driven by a class D amplifier. The modulation algorithm is realized on a DSP platform on which the carrier frequency is equal to the resonant frequency of the emitter array. The testing results of impedance, frequency response and sound pressure level characteristics are described and analyzed. The directivity angle and power consumption of the prototype are measured. The experiment result indicates that the prototype size, power and the acoustic pressure level can satisfy the requirements for the mobile phone, thus the micro audio directional loudspeaker can be used for the portable multimedia devices.

Key words: micro audio directional loudspeaker; private listening service; PZT ceramic ultrasonic transducer; directivity angle; portable multimedia device

0 引言

传统的手机喇叭指向性较差,在公共场合使用时难以保证良好的私密性。虽然使用有线或无线耳机可解决此问题,但长时间佩戴会引起不适,此外,由于耳机与外界隔音,行进中使用也存在不安全因素。用于手机的微型声频定向扬声器可有效解决上述问题,它通过免提方式为使用者提供局部声音服

务,建立良好的私密性声音空间。声频定向扬声器又称声参量阵^[1]、参量扬声器^[2]、声束扬声器^[3]、超声传声系统^[4]、音频聚光灯^[5]。该新型扬声器将可听声音信号调制到超声信号中,利用超声在空气中的非线性传播效应,通过超声换能器阵列产生出一系列沿传播轴分布的端射虚拟声源,这些虚拟声源又被称为参量阵,它们将声音控制在一个狭长的

收稿日期:2011-06-22

基金项目:国家自然科学基金资助项目(60901062)

作者简介:李学生(1980-),男,山东沂南人,讲师,博士生,主要从事微机电系统、信号处理及测试的研究。徐利梅(1969-),女,四川成都人,教授,博导,主要从事传感器技术、机电一体化系统建模与测试、薄膜技术及应用、MEMS器件设计与动力学分析的研究。

区域传播,进而形成具备高度指向性的可听声束^[6-7]。

20世纪90年代,声频定向扬声器技术开始成熟并出现了商业化产品。1998年,Pompei博士成功地实现了第一个接近商用的声频定向扬声器^[8],并于2002年在其博士论文中讨论了关于参量扬声器的设计、测试和信号处理方法^[3]。美国ATC公司在2001年推出了HSS系列声频定向扬声器^[4],美国的Holosonic研究实验室、德国的森海塞尔公司也相继推出了相应产品。所有这些产品均针对展览馆、高级餐厅、多国会议等应用场合,体积和功耗均较大,并不适用于手机等便携式移动设备。

近年来,用于手机等便携式多媒体设备的微型声频定向技术未见报道,国内外仅有少数研究机构对声频定向扬声器的微型化做了相关探索。2005年,日本NTT DoCoMo公司的Yusuke Nakashima等展示了一个用于手机的声频定向扬声器原型机^[10],该样机有左、右两个声道,每个声道由16个压电陶瓷超声换能器阵列作为发声部件,整机尺寸为250 mm×65 mm×20 mm,最大可听声声压级为70 dB,功耗为1 W,音量和功耗均不能达到手机的便携式应用需求。声频定向扬声器的微型化关键是换能器阵列的小型化,一种采用微机电系统(MEMS)技术制作的声频定向换能器可解决尺寸和功耗问题^[11]。但到目前为止,由于工艺复杂,使用MEMS技术制造的换能器阵列单元一致性难以保证,机电转换效率较低,不能有效提高声压级,距离实际应用还有诸多问题需要解决。

本文探讨了一种用于手机的微型声频定向扬声器实现方法,PZT压电陶瓷超声换能器阵列作为发声部件,数字信号处理器(DSP)系统作为声频定向算法调制平台,D类功率放大器作为换能器阵列驱动器,设计出低功耗、小体积的样机。

1 系统工作原理

用于手机的微型声频定向扬声器工作原理如图1所示。来自手机平台的音频信号被高于30 kHz的超声信号调制,经超声功率放大器放大后,驱动换能器阵列振动发声。含有可听声成分的超声束被发射到空气中时,由于空气的非线性交互作用,产生出差频、和频等多次谐波^[5],随着传播距离的增加,高次谐波在空气中快速衰减,超声束不断自解调出可听声信号,实现出一个端射虚拟声源阵列,该阵列使

可听声波在前进方向上能量不断加强,而由于超声的高指向性,最终导致产生出的可听声束也具有高的指向性^[4,12-13]。

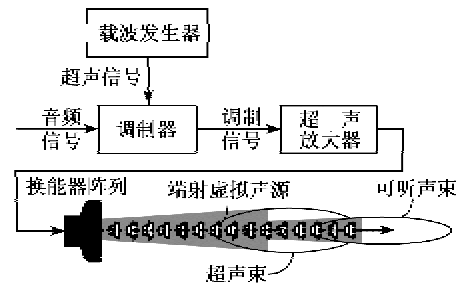


图1 声频定向扬声器系统结构

由图1可知,声频定向扬声器主要包括调制器、放大器和换能器阵列3个部分。

调制器通常由DSP、现场可编程逻辑门阵列(FPGA)或高级RISC微处理器(ARM)等嵌入式处理器平台实现,用于手机平台的调制器可由手机CPU实现,以缩小体积,简化结构。Pompei^[9]、陈敏^[14]分别探讨了几种调制算法,包括双边带调制(DSB)、单边带调制(SSB)及平方根调制等方法,其中DSB调制最易实现,但其总谐波失真(THD)比其他方法大。SSB和平方根调制算法的THD较小,但对调制器硬件平台运算速度要求较高,不利于实现低功耗运行。通过优化调制系数,并作合适补偿,DSB调制算法THD可控制在一个较低的范围^[15]。

放大器通常采用D类、E类、G类及T类等开关式放大器以保证高的转换效率,放大器输出阻抗与换能器阵列阻抗匹配是放大器的关键环节,最佳阻抗匹配网络可将功率最大化地施加到换能器上。

换能器阵列作为发声部件,其结构和阵列形式设计是实现可听信号大功率输出、高指向传播的关键。根据声频定向技术原理,要求换能器工作频率为30 kHz以上超声频段,此时,由于单个换能器单元输出功率有限,通常采用阵列形式来增大声输出功率。

2 原理验证与换能器测试

为了验证微型声频定向扬声器原理,搭建了原理验证及测试平台,如图2所示。带有DSB-AM调制功能的信号发生器用于产生扫频或调制信号。超声放大器使用日本NF株式会社的HAS 4011高频D类放大器。4个直径 $\varnothing 10$ mm、高5 mm的PZT压电陶瓷超声换能器单元被用来组成 2×2 换能器

阵列,作为微型声频定向扬声器的发声单元。各阵元间采用并联方式连接。换能器阵列与超声麦克风放置于消声室内,两者距离为 L 。信号采集与测试平台使用丹麦 B&K 公司的 PULSE 声学测试系统。

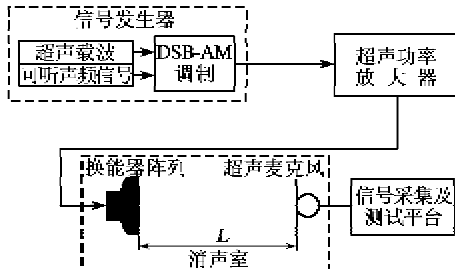


图 2 微型声频定向扬声器原理验证及测试平台原理验证及测试平台有两个功能,即

1) 调整信号发生器为同步扫频输出,扫频信号被超声放大器放大后驱动换能器阵列发声,同时超声麦克风采集每个频点声压级,由 PULSE 系统软件生成换能器阵列超声频率响应曲线。

2) 调整信号发生器为调制信号输出,超声载波信号和可听声信号均由信号发生器内部产生,并进行内部 DSB 调制,换能器阵列被放大后的调制信号驱动发声,根据声频定向原理,调制信号将自解调出高指向性可听声,超声麦克风负责采集每个可听声频点的声压级,由 PULSE 系统软件生成自解调可听声频率响应曲线。

安捷伦 HP 4294A 精密阻抗分析仪分别对换能器单元和阵列作阻抗测试,考察换能器阵列阻抗特性及阵列中各单元的一致性。换能器正负电极引线以最短方式等长连接至阻抗分析仪夹具电极,以减小引线带来的阻抗特性影响。测得换能器单元及阵列相频特性如图 3 所示。由图可以看出,单元与阵列的相频特性曲线形状近似,两条曲线中均存在 3 个明显的谐振点,第 1 个谐振点(A 点与 D 点)频率相差 0.85 kHz,第 2 个谐振点(B 点与 E 点)频率相

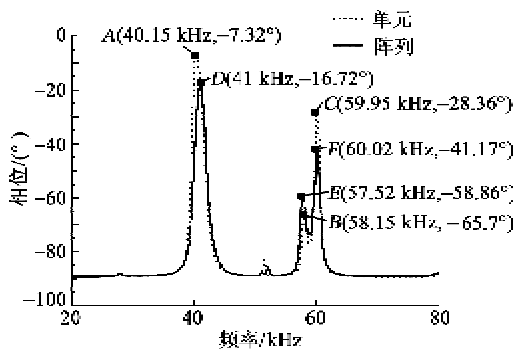


图 3 换能器相频特性

差 0.63 kHz,第 3 个谐振点(C 点与 F 点)频率相差 0.07 kHz,差别相对微小,说明各单元的一致性较好。相位度数在扫描频率段全部为负数,表明换能器阻抗特性呈容性。由于 4 个换能器单元采用并联方式连接,单元的等效电容值约为阵列的 1/4,故谐振点上单元的相位绝对值相比阵列要小。

为了研究换能器阵列在空气中振动发声的特性,用图 2 所示的测试平台,分别做超声声压级频率响应测试及不同激励电压下自解调可听声声压级频率响应测试。前者用于考察换能器阵列本身频响特性,信号发生器在 PULSE 系统控制下,以 1 Hz 步进宽度从 20~80 kHz 扫描,同步发出扫频正弦信号,由功率放大器放大后施加到阵列的驱动电压为 30 V(峰-峰值),阵列与麦克风的间距为 20 cm。后者用于研究不同激励电压下调制波经换能器阵列发射到空气中后的自解调特性,用信号发生器产生可听声单频正弦信号,并在其内部进行载波 DSB 调制,载波频率与换能器阵列谐振频率一致,可听声频率从以 1 kHz 步进,并从 1~10 kHz 常用频率段扫描,考虑调制信号自解调出可听声需要一定的距离,阵列与麦克风的间距设为 50 cm,激励电压峰-峰值分别为 60 V 和 80 V。

测得超声声压级频率响应特性如图 4 所示。由图可知,曲线中存在 3 个明显的谐振点(A 点、B 点、C 点)。这 3 个点与图 3 中实线所示的阵列相频特性曲线中的 D 点、E 点、F 点频率相近,有微小差别,是因为相频特性曲线是阻抗分析仪根据换能器阵列的电参数测量所得,而在消声室里测得的频响曲线更接近实际应用,当信号施加到换能器上时,由于声波在空气中的非线性交互作用,产生了多次谐波,另外波在传输过程中也会衰减,最终导致曲线谐振点发生频率偏移。

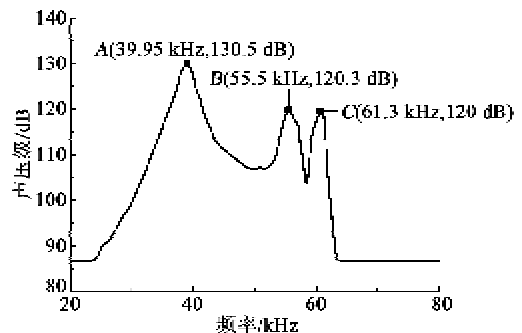


图 4 换能器阵列声压级频率响应

根据测得的换能器阵列频率响应特性,为了保

证换能器输出最大功率,常选取其谐振点频率作为超声载波频率,此时,换能器阵列的振幅最大,机电转换效率也最高。由图4可知,谐振点A声压级最大,选其频率39.95 kHz作为载波频率。B点和C点声压级相对A点偏小,选其作为载波频率将不能发挥换能器阵列最大效率,进而导致自解调可听声声压级也会偏小。选择A点作为载波频率时,由于声频调制算法采用DSB调制法,B点与A点频率差为15.55 kHz,当可听声频率也为15.55 kHz时,调制信号上边频将落到B点,受B点影响,该频率下的可听声声压级将形成一个峰值,进而导致自解调可听声频响将不够平滑。C点与A点频率差为21.35 kHz,已超出了可听声频段范围,其影响可忽略。

不同激励电压下自解调可听声频响特性如图5所示。测量1 kHz以下自解调可听声声压级时,由于声频定向扬声器在不作任何补偿的前提下,在理论上低频响应较差^[9,14],且消声室本底噪声与截止频率不够低,麦克风采集回的数据被噪声湮没,图中并未列出,10 kHz以上可听声频率信号在手机中并不常见,未作测试,因此,图4中B点和C点对声压级的实际影响也未作考察。由图5可知,更高的激励电压产生的自解调可听声具有更高声压级,但并不成线性关系,原因是调制波在空气中传播是非线性的。80 V(峰-峰值)激励电压时,1 kHz频率可听声压级最大,达到72 dB,基本达到人耳的正常听觉声压范围。另一方面,从图中还可知,由于换能器在谐振点附近带宽较小,导致可听声频率响应曲线不平滑,尤其是在5 kHz处,存在明显的谷值。可通过补偿算法弥补换能器阵列带宽狭小的不足。

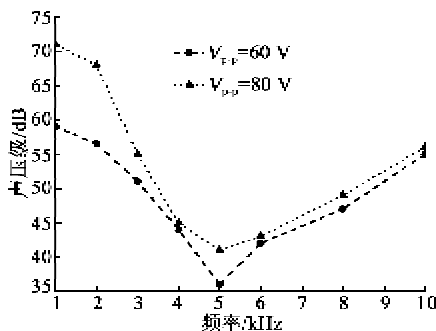
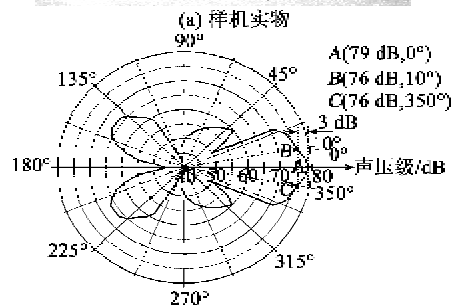


图5 不同激励电压下的可听声频响

3 样机制作及测试

为了验证微型声频定向扬声器在手机中的应用可行性,根据换能器阵列测试结果,制造了一个以NOKIA N73手机为蓝本的样机,如图6(a)所示。

该样机使用4只直径均为 $\varnothing 10$ mm的压电陶瓷超声换能器组成 2×2 阵列,DSP芯片作为调制器和载波发生器平台,采用DSB调制算法,载波频率为39.95 kHz,采用D类功放芯片作为超声放大器,换能器阵列激励电压为100 V(峰-峰值)。电路部分尺寸为80 mm \times 50 mm \times 5 mm。



(b) 输入可听声频率2 kHz时极坐标指向性图
图6 微型声频定向扬声器样机测试

图6(b)与传统的扬声器心形指向性图不同,声频定向扬声器样机指向性图呈带有旁瓣的锥形。声场主要分布在阵列正前方一个锥形主瓣区域内,呈强指向性,表现出了声音定向传播的特性。由图6(b)可得到样机3 dB指向角为 $\pm 10^\circ$,正前方主瓣两侧有2个幅值较小的旁瓣,后方有2个幅值达到65 dB的旁瓣,通过增加换能器阵列中单元个数可抑制旁瓣的个数,阵列后方加入隔声和吸声材料可抑制后方旁瓣的幅度。 0° 方向即扬声器正前方声压级为79 dB,基本满足在手机中的应用要求。

样机的最大功耗约为0.5 W,其中换能器阵列功耗为0.35 W。比传统手机扬声器0.2 W的功耗稍大,通过优化调制算法、优化换能器结构和功率放大器效率,可进一步缩小功耗以适合手机应用。

4 结束语

本文探讨了微型声频定向扬声器在手机中的实现方法,描述了该新型扬声器的基本工作原理,设计了基于PZT压电陶瓷换能器的阵列,搭建了原理验证平台,制作出了样机。对换能器阵列做了阻抗、频率响应及自解调可听声压级频响测试,对样机做指向性和功耗测试。测试结果表明, 2×2 换能器阵列达到的声压级基本满足手机的应用要求,与传统的手机喇叭相比,指向性图狭长,两侧旁瓣幅值较小,

实现了声频定向的功能。另一方面,由于换能器阵列谐振点处带宽较小,导致自解调可听声压级频响曲线不平滑,5 kHz左右频率信号能量微弱,声压级微小,需通过软件算法补偿以弥补带宽的不足。扬声器后方声场分布有两个幅值较大的旁瓣,需要通过优化阵列形式,并对换能器阵做隔声和消声处理。此外,样机功耗较传统扬声器大,需通过优化换能器结构、算法补偿,在保持低功耗的前提下,产生更大的声压级和更好的音质。

参考文献:

- [1] BENNET M B, BLACKSTOCK D T. Parametric array in air[J]. *Journal of the Acoustical Society of America*, 1975, 57(3): 562-568.
- [2] KAMAKURA T, YONEYAMA M, IKEGAYA K. Developments of parametric loudspeaker for practical use [A]//*Proceeding of the 10th International Symposium on Nonlinear Acoustics* [C]//Kobe: AIP, 1984: 147-150.
- [3] DIRK O, FRANSISKUS P, KLAUS L. Steerable highly directional audio beam loudspeaker [A]//*Proceedings of the 9th European Conference on Speech Communication and Technology* [C]//Lisbon, Portugal: International Speech and Communication Association, 2005: 137-140.
- [4] JAMES J, NORRIS J O. HSS white paper [M]. USA: American Technology Corporation, 2005: 6-8.
- [5] YONEYAMA M, FUJIMOTO J I. The audio spotlight: An application of nonlinear interaction of sound waves to a new type of loudspeaker design [J]. *Journal of the Acoustical Society of America*, 1983 73 (5): 1532-1536.
- [6] AOKI K, KAMAKURA T, KUMAMOTO Y. A parametric loudspeaker-applied examples [J]. *The Electronic Journal of Communication in Japan*, 1994, 77(1): 64-74.
- [7] BLACKSTOCK D T. Audio application of the parametric array [J]. *Journal of the Acoustical Society of America*, 1997, 102(1): 3106-3109.
- [8] POMPEI F J. The use of airborne ultrasonics for generating audible sound beams [A]//*Proceedings of the Audio Engineering Society 105th Convention* [C]//San Francisco: AES, 1998: 503-507.
- [9] POMPEI F J. Sound from ultrasound: The parametric array as an audible sound source [D]. Cambridge, Massachusetts: Massachusetts Institute of Technology, 2002.
- [10] NAKASHIMA Y, YOSHIMURA T, OHYA T. Prototype of parametric array loudspeaker on mobile phone and its acoustical characteristics [A]//*Proceedings of Audio Engineering Society 118th Convention* [C]//Barcelona, Spain: AES, 2005: 205-209.
- [11] WANG Z, ZHU W, MIAO J, et al. Micromachined thick film piezoelectric ultrasonic transducer array [J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2006, 130/131: 485-490.
- [12] WESTERVELT P J. Parametric end-fire array [J]. *Journal of the Acoustical Society of America*, 1960, 32(4): 934-935.
- [13] WESTERVELT P J. Parametric acoustic array [J]. *Journal of the Acoustical Society of America*, 1963, 35(4): 535-537.
- [14] 陈敏. 声频定向系统理论与关键技术研究 [D]. 成都: 电子科技大学, 2008.
- [15] 陈敏, 徐利梅, 黄大贵. 声频定向扬声器谐波失真测试 [J]. *仪器仪表学报*, 2009, 30(8): 1591-1596.

(上接第714页)

参考文献:

- [1] 吴锦武, 谭斐, 毛崎波. 利用 ADM 方法设计振动梁的体积位移传感器 [J]. *压电与声光*, 2011, 33(6): 906-909.
WU Jinwu, TAN Fei, MAO Qibo. Design of the volume displacement sensors of vibrating beam Using ADM Methods [J]. *Piezoelectrics & Acoustooptics*, 2011, 33(6): 906-909.
- [2] 李志春, 吴锦武. 利用压电薄膜设计体积位移传感器 [J]. *压电与声光*, 2007, 29(5): 523-526.
LI Zhichun, WU Jinwu. Design of volume displacement sensor using PVDF film [J]. *Piezoelectrics & Acoustooptics*, 2007, 29(5): 523-526.
- [3] 吴锦武, 姜哲. 基于 PVDF 压电传感器测量振动结构体积位移 [J]. *振动工程学报*, 2007, 20(1): 73-78.
WU Jinwu, JIANG Zhe. Measurement of volume displacement of vibration structure based on PVDF piezo-
- [4] YANG L J, HSU C K, HO J Y, et al. Flapping wings with PVDF sensors to modify the aerodynamic forces of a micro aerial vehicle [J]. *Sensors and Actuators A*, 2007, 139(1/2): 95-103
- [5] 王代华, 周德高, 刘建胜, 等. PVDF 压电薄膜振动传感器及其信号处理系统 [J]. *压电与声光*, 1999, 4(2): 122-126.
WANG Daihua, ZHOU Degao, LIU Jianshen, et al. PVDF piezoelectric-film vibrating sensors and its signal processing system [J]. *Piezoelectrics & Acoustooptics*, 1999, 4(2): 122-126.
- [6] 刘岚, 方宗德, 张西金. 微型扑翼飞行器的升力风洞试验 [J]. *航空动力学报*, 2007, 22(8): 1315-1319.
LIU Lan, FANG Zongde, ZHANG Xijin. Experimental study of flapping-wing MAV in wind tunnel [J]. *Journal of Aerospace Power*, 2007, 22(8): 1315-1319.