

基于 FPGA 的声频定向扬声器系统的设计

朱荣钊¹, 刘晶², 刘文超¹, 周艳玲¹, 曾张帆¹

(1. 湖北大学 计算机与信息工程学院, 武汉 430062; 2. 武汉晴川学院 计算机学院, 武汉 430204)

摘要: 传统扬声器系统在给人们生活带来便利的同时, 也产生了很多噪声污染, 比如广场舞音响, 超市促销宣传喇叭; 为了缓解噪声污染, 构造独立的语音空间, 提升大众生活质量, 实现了基于 FPGA 的声频定向扬声器的设计; 通过自主开发信号处理单元, 设计功率放大电路, 探究超声波换能器数目与指向性的影响, 最终在 FPGA 上实现了信号的调制, 不仅完成了可听声的定向传播, 而且使系统具有更好的频率响应特性, 从而构造出独立的语音空间, 从根源上缓解噪声污染; 除此之外, 该系统在一定环境下进行了指向性测试, 测试结果表明设计出的系统具有较强指向性, 可以广泛用于国际会议、银行保密性通话、博物馆展厅等场合, 无论军用还是民用, 声频定向扬声器系统都具有极大的应用潜力。

关键词: 声频定向; 换能器阵列; FPGA

Design of FPGA Based Audio Directional Loudspeaker System

Zhu Rongzhao¹, Liu Jin², Liu Wenchao¹, Zhou Yanling¹, Zeng Zhangfan¹

(School of Computer Science and Information Engineering, Hubei University, Wuhan 430062)

(School of Computer Science, Wuhan Qingchuan University, Wuhan 430204)

Abstract: Audio directional system is a kind of apparatus that can realize the audible sound propagation in a certain area. And an audio directional loudspeaker system based on FPGA has been designed successfully eventually by designing the signal processing unit and a power amplifier circuit. In addition, the system has conducted directional test under certain environment, which shows that the designed system has strong directivity.

Keywords: audio directional; transducer array; FPGA

0 引言

随着科技的发展, 我们身边的噪声源越来越多。广场舞音响、汽车鸣笛、店铺促销喇叭等产生的噪声在不同程度上影响了人们的正常生活^[1]。声频定向技术是一种可以实现可听声在一定区域内传播的新技术, 从而可以构造出独立的语音空间。基于此现状, 本文设计出一种声频定向扬声器系统, 相比于已有的声频定向系统, 本系统的创新点在于基于 FPGA 的信号处理模块的搭建以及功率放大电路的设计, 经过一定环境下的测试, 实验结果表明本系统具有较强的指向性, 可以在一定程度上缓解噪声污染。

1 系统结构与原理

声频定向系统可以产生高指向性可听声主要是利用了超声波在空气中的非线性传播效应, Helmholtz 提出的非线性声学理论可以对这种非线性过程进行初步解释^[2]。该理论指出, 若向超声波换能器阵列输入两列频率分别为 f_1 、 f_2 的超声波电信号时, 在空气的非线性自解调作用下, 将会产生频率分别为 f_1 、 f_2 、 $f_1 + f_2$ 、 $f_1 - f_2$ 以及各阶谐波在内的复杂声波, 由于声波在空气中的衰减系数与声波自身频率的平方成正比, 所以频

率较高的 $f_1 + f_2$ 、 f_1 、 f_2 以及各阶次谐波将会很快被空气吸收掉, 只有处于可听声范围内的差频信号继续传播。若超声波频率选择的合适, 则可产生与原输入可听声信号频率一致的高指向性可听声, 这便是实现声频定向扬声器系统的基本原理, 如图 1 所示。

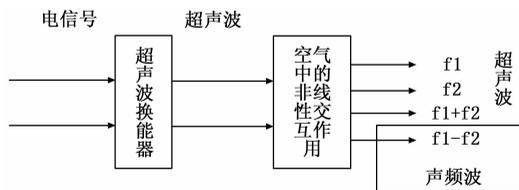


图 1 非线性传播效应

声频定向扬声器系统基于参量声学阵理论而设计。目前, 主要存在两种理论, 分别为“Westervelt 方程”和“Berklay 远场解”^[4]。“Westervelt 方程”可解释如何通过两列超声波产生高指向性差频波, 而“Berklay 远场解”则可解释如何通过参量声学阵原理产生宽带高指向性声频波。

本文中涉及到的参量阵系统的输入信号是宽带信号, 所以下面简要介绍一下“Berklay 远场解”。Berklay 在“Westervelt 方程”的基础上, 推导了宽带信号作为参量声学阵输入时通过非线性产生的声压为:

$$p(\tau) = \frac{\beta p_0^2 S}{8\pi p_0 c_0^4 z \alpha_0} \frac{\partial^2}{\partial \tau^2} E^2(\tau) \quad (1)$$

其中: β 为非线性系数, S 为声源面积, p_0 为原波声压幅值, $E(\tau)$ 为调制包络函数, z 为声波传播距离, $\tau = t - z/c_0$ 为延迟时间。

收稿日期: 2017-06-09; 修回日期: 2017-08-04。

基金项目: 国家自然科学基金(61601175)。

作者简介: 朱荣钊(1981-), 男, 湖北恩施市人, 硕士, 实验师, 主要从事软件实验教学方向的研究。

通讯作者: 刘晶(1982-), 女, 湖北武汉人, 硕士, 讲师, 主要从事计算机专业课教学方向的研究。

式 (1) 明确表明宽带参量声学阵最后在空气中自解调得到的声压 $p(t)$ 与包络 $E(\tau)$ 平方的两次时间导成正比, 即为“Berkaty 远程解”^[5]。本系统就是基于“Berkaty 远场解”理论, 将输入声频信号合理融入到包络平方函数的 $E^2(\tau)$ 中去, 利用宽带参量阵实现该声频信号的定向传播。现有声频定向系统信号处理方法皆是建立在“Berkaty 远场解”基础上的。

2 信号处理系统的设计

该声频定向系统在结构上包括前端音频放大模块、FPGA 中信号处理模块、ADDA 模块、功率放大模块等, 整体结构如图 2 所示。

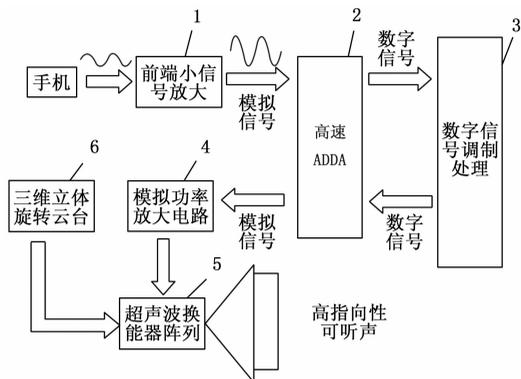


图 2 系统组成框图

需要对该系统组成进行说明的有:

1) 超声波载波信号的产生和信号的调制均在 FPGA 中进行。

2) 为了得到最好的指向性效果, 在探究了超声波换能器阵列数目及形状的基础上, 最终确定该系统的超声波换能器阵列由中心频率为 40 kHz^[6], 直径为 16 mm, 数目为 91 的超声换能器组成, 形状为正六边形。

3) 由于驱动超声波换能器需要较大的电压, 所以本系统选用 OPA548 芯片, 自主设计功率放大电路, 经过测试分析, 结果表明该功率放大电路可以较好地驱动超声波换能器模块。

本系统软件方面主要是基于 DE1-SOC 提供的硬件开发环境和 Quartus13.1 提供的软件开发环境, 采用 SoC 核心思想, 通过 ARM 和 FPGA 之间的交互访问, 实现对声频定向系统的灵活控制, 包括 LED 灯、SD Card 和声束的偏转角度等外围设备。同时, 实现了多种方式的输入, 包括麦克风输入、模拟音频信号输入以及 SD Card 数字音频信号输入等。

下面分别介绍关键模块的设计方法。

2.1 前端音频放大模块的设计

若采用手机、MP3 等输入方式, 则输出的模拟音频信号的电压幅值较小, 在 AD 转换模块中, 无法较好的进行模/数转换, 所以需要将前端音频信号进行放大。OP07 芯片是一种低噪声, 非斩波稳零的双极性运算放大器集成电路, 具有输入偏置电流低和开环增益高的特点, 很适合作为本系统的前端小信号放大器。采用 OP07 芯片实现前端小信号的放大, 放大倍数可以由滑动变阻器进行调节, 具体电路图如图 3, 其中 $R1 = R3 = 1 \text{ k}\Omega$, 滑动变阻器 $R2$ 选用 3 296 W 103 系列, 阻值变化范围为 $0 \sim 10 \text{ k}\Omega$ 。

若采用 SD 卡输入, 其实现方法为: 利用 Quartus13.1 里

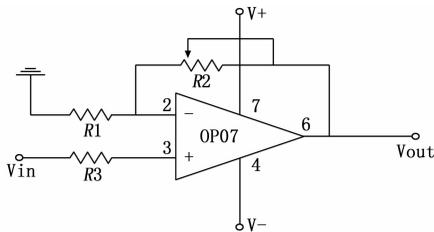


图 3 前端电压放大电路

面的 Qsys 软件快速生成读取 SD 卡里面 .WAV 文件音频数字信号所需的硬件配置, 待系统生成成功之后, 再到 Quartus13.1 里面对不同的硬件进行相应的引脚分配, 同时可以在 Eclipse 软件里面编写 C 语言程序实现所需要的逻辑, 最终成功捕捉到 SD 卡里面纯正的数字音频信号。

2.2 FPGA 中信号处理模块的设计

2.2.1 麦克劳林预处理

作为一种新概念声源, 声频定向系统与传统扬声器的发声机理有本质区别。传统扬声器可近似看作线性系统, 一般不需要进行信号预处理就可以直接产生无指向性可听声, 而声频定向系统则是一种典型的非线性系统, 必须对信号进行处理才能产生失真度小、具有高指向性的可听声。

其具体实现方法为: 根据非线性声学理论, 将音频信号送入 FPGA 中进行麦克劳林 N 阶近似平方根处理^[7], 本系统直接采用了 Quartus13.1 软件里面的宏模块, 包括加法器、乘法器以及除法等, 通过 DE1-SOC 核心板进行高速数学运算, 最终完成了对可听声信号的预处理。

2.2.2 频率为 40 kHz 的载波信号的生成

在信号调制部分的一个关键问题是如何产生调制所需要的载波^[7]。在本系统中, 采用 Altera 公司的 DE1-SOC 开发板作为信号处理核心器件, 凭借 FPGA 的自身优势, 自主制作 40 kHz 的载波信号的过程为: 先用 VS2013 软件编写 C 语言程序, 程序的功能为输出一个位宽为 8 位, 深度为 500 的正弦表, 然后将程序格式制作成 MIF 格式文件, 再调用 FPGA 中宏模块 ROM, 将制作的 MIF 格式文件固化到单口 ROM 里面, 然后用 Verilog 语言写一个计算器对 ROM 进行地址读取, 从而实现对 ROM 里面的正弦表数据进行读取, 完成正弦信号的制作。

2.2.2 信号调制

利用 FPGA 对信号进行超声调制, 使调制后的超声波信号在空气的非线性自解调作用下还原出可听声。目前常用的调制算法有 DSB 法、平方根法、SSB 法等, 但是 DSB 法不满足无失真包络平方条件, 平方根法的实现需要一个具有无限带宽的物理系统, 而实际物理系统无法提供这种无限带宽, 在输入宽带信号条件下, SSB 法存在较为严重的互调失真。基于此现状, 本作品采用 N 阶近似平方根法^[8]进行信号调制, 解决了平方根法的无限带宽及信号失真问题。采用 Signal Tap 采集到的调制波形如图 5, 第一行为输入 1 kHz 的正弦波, 第二行为从 ROM 中调用的 40 kHz 载波, 第三行为调制后信号的波形。

2.3 信号的转换与放大

经过 FPGA 核心板高速运算的调制信号从 FPGA 的 GPIO 口以 8 位的数据位宽并行输出与外围设备高速 ADA 模

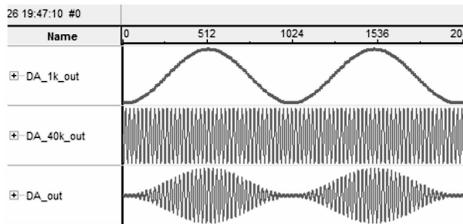


图 5 SignalTap 采集的调制波形

块进行对接，这里使用了 FPGA 提供的 PLL IP Core，将产生的高速率时钟送到高速 ADA 的 DA 时钟线上，通过高速率的精确的 DA 转换，实现了调制信号从数字信号到模拟信号的跨变。

实现调制信号从数字信号转变为模拟信号后，还存在从 FPGA 核心板输出的调制信号强度很小的问题。即经由数模转换后，信号强度还是很难驱动超声波换能器阵列。OPA548 作为高电压、高电流、宽输出电压摆幅功率运算放大器，可以用来实现调制后输出信号的功率放大。因此本系统独立设计了对超声波调制信号进行放大的功率放大电路，实现了将 7 V 左右的超声波调制信号放大到 35 V 左右，可以较好驱动超声波换能器。功率放大电路的设计如图 6 所示。

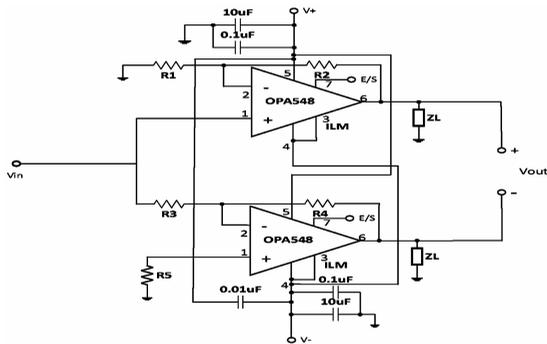


图 6 功率放大电路的设计

3 实验结果与分析

声频定向扬声器系统整体实物图如 7 和 8 所示。

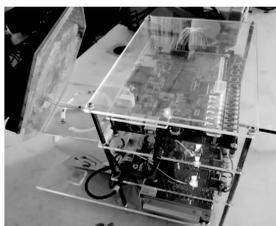


图 7 声频定向扬声器系统实物侧视图



图 8 超声波换能器

图 7 为声频定向扬声器系统侧视图，从上到下分为三层，第一层为 Altera 的 DE1-SoC 开发板，在 FPGA 中实现信号的预处理和调制，第二层包括自主设计研发并完成的前端音频放大模块，AD/DA 模块、功率放大模块、散热模块以及 DC-DC 降压模块，第三层为开关电源 NES-200-24，通过降压等模块，给整个系统提供合适的电压。

图 8 为自主设计的超声波换能器，由 91 个直径为 15 mm

的超声波阵列组成，整体呈正六边形。

除此之外，为了验证此声频定向系统设计方案的正确性和可行性，并检验系统的定向传声性能，本章对声频定向进行系统测试。通过研究相关的实验数据，从而得出声场指向性、反射性、虚拟声源效果等系统的性能参数，同时也为优化系统设计提供依据。

在测试声频定向系统性能的过程中，必须选定以下测试条件：

- 1) 大面积空旷场地；
- 2) 弱噪声干扰环境。

根据上述条件，按照以下步骤进行具体测试：

- 1) 选择大面积空旷场地摆放声频定向系统；
- 2) 给系统供电，启动系统的各个模块；
- 3) 分别进行定向传声测试、反射性测试、远距离传播测试等；
- 4) 记录声音强度，距离等参数；
- 5) 将记录的数据与理论结果对比，分析系统的优势及不足。

在测试系统的硬件性能过程中，测试主要针对系统逻辑电路在 FPGA 端的逻辑利用率、相关运算速度等。测试在 Quartus II 13.1 中进行。

3.1 定向性测试

根据以上测试条件，本系统在无噪声或者小噪声的环境下进行了测试，采用单一变量的测试原则，分别用普通扬声器和声频定向系统播放相同的音频，以播放器为中心，在半径为 5 米的圆周上，分贝仪进行 180 度旋转采集，记录分贝仪上的波形变化，测试结果如图 9 所示。图 9 (a) 为设计的定向系统测试结果，图 9 (b) 为普通非定向扬声器的测试结果。

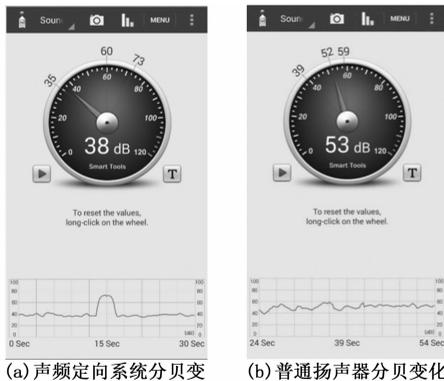


图 9 测试结果图

从图 9 (a) 可以看出，在 13~17 s 的时间内，分贝仪位于声频定向系统的正前方区域，声音可以被听到，分贝仪测试曲线出现了升高现象，验证了声频定向系统具有定向性的特点。

由图 9 (b) 可以看出，对于普通扬声器，在以 5 m 为半径的圆周上旋转采集信号强度时，分贝仪曲线基本不变，大约为 50 dB，验证了普通扬声器的声音是 360°全向传播的。

3.2 远距离传声测试

根据理论知识可知，声频定向系统发出的可听声具有能量集中，可远距离传播的特点。下面将分别在一定距离处测试普通扬声器声音强度与声频定向系统声音强度，数据汇总表如表

1 所示。

表 1 远距离传播测试数据汇总表

编号	距离/m	普通扬声器 声音强度/dB	声频定向系统 声音强度/dB
1	2	65	75
2	5	56	72
3	10	44	65
4	15	39	59

测试标号表示 4 次测试样本, 测试均以相同的测试方法、测试设备、测试环境下完成。分析数据可以得到以下结论:

1) 在相同的传播距离下, 声频定向系统的声音强度大于普通扬声器的声音强度, 符合声频定向系统具有能量集中的特点。

2) 随着传播距离的增加, 声频定向系统声音强度的衰减速度小于扬声器声音强度的衰减速度, 符合声频定向系统的声音可以远距离传播的特点。

4 结语

本设计基于 DE1-SoC 硬件集成开发环境, 借助 SoC 嵌入式软件编程技术, 实现了声频定向传播系统, 打破了传统扬声器全方位音频传播的特征, 构建了独立的语音空间, 可以缓解噪声污染, 提升通话保密性, 在民用和军用场合都具有极大的应用潜力。除此之外, 通过使用 HPS, 在大大提升系统灵活性的同时, 降低了系统的设计难度, 设计平台的搭建也更为迅速。

从实际出发, 该系统还具有以下设计特点:

1) 将频率为 20~20 K 的可听声与频率为 40 K 的高频信号进行调制, 改变了可听声全方位传播的特性, 使可听声只能在指定区域内传播。最终创造出一种新概念声源^[11], 使可听声具有定向性, 反射性, 能量集中等特点。

2) 支持麦克风、手机、Mp3 等模拟音频信号的输入的同时, 还支持 SD 卡等数字音频信号的输入, 扩大系统的使用范围。

3) 通过对换能器阵列形式、阵列数目、阵列间距的研究, 采用正六边形阵列, 使系统具有更好的宽带特性及平坦的频率响应特性。

4) 在实现了机械式声波偏转的基础上, 我们后续的研究方向主要为相位控制声束偏转技术。相比于机械式声束偏转成本低、易实现的特点, 相控阵声束偏转具有操作灵活、变化速率快、全方位偏转等优点。

但是, 初步设计的声频定向扬声器系统的音质无法与传统扬声器媲美, 若向大规模推向市场, 还需进一步研究如何提升音质以及如何减少功耗的问题。

参考文献:

- [1] 倪晓鸣. 广场舞噪音扰民多视角分析 [J]. 体育文化导刊, 2015 (2): 13-16.
- [2] Jamea J, Norris J O. HSS white paper [Z]. USA: American Technology Corporation, 2005.
- [3] 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.
- [4] Berkta H O. Possible exploitation of non-linear acoustics in underwater transmitting applications [J]. Journal of Sound & Vibration, 1965, 2 (4): 435-461.
- [5] Westervelt P J. Parametric Acoustic Array [J]. Journal of the Acoustical Society of America, 1963, 35 (4): 535-537.
- [6] James J, Norris J O. HSS white paper [Z]. American Technology Corporation, San Diego, California, USA, 2005.
- [7] Shi C, Kajikawa Y. Automatic gain control for parametric array loudspeakers [A]. International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing [C]. 2016.
- [8] Yoneyama M, Fujimoto J, Yu K, et al. 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 (57): 1972-1986.
- [9] 姬培锋. 指向性声源的理论与实验研究 [D]. 济南: 山东科技大学, 2005.
- [10] 贾宝贤, 边文凤, 赵万生, 等. 压电超声换能器的应用与发展 [J]. 压电与声光, 2005, 27 (2): 131-135.
- [11] 董丽杰, 熊传溪, 陈娟, 等. 聚偏氟乙烯-钛酸钡复合材料的介电性能 [J]. 复合材料学报, 2003, 20 (3): 122-126.
- [12] H. O. Berkta, 钱祖文. 非线性声学 [J]. 声学技术, 1975 (1).
- [13] 王永兵, 侯静, 李志国. 超声相控阵检测技术研究进展 [J]. 中国化工装备, 2012, 14 (6): 15-18.
- [14] 韩捷, 张坡, 尤国雷. 国家标准《扬声器主要性能测试方法》解读 [J]. 电声技术, 2012, 36 (11): 86-90.
- [15] Hua H, Wang Y, Yan D. A low-cost dynamic range-finding device based on amplitude-modulated continuous ultrasonic wave [J]. Instrumentation & Measurement, IEEE, 2002, 51 (2): 362-367.
- [16] Smith P R, Cowell D M J, Raiton B, et al. A PLL-based phased array method to minimize phase quantization errors and reduce phasing-lobes [J]. 2010: 1837-1840.
- [17] 计算机工程与应用, 2008, 44 (23): 226-232.
- [3] Zhang Y Q, Li L L, Zhang Y J. Research and design of location tracking system used in underground mine based on WiFi technology [A]. International Forum on Computer Science - Technology and Application [C]. 2009, 3: 417-419;
- [4] 荣晓峰, 杨娜. RSSI 位置指纹定位误差分析与仿真 [J]. 西安工业大学学报, 2010, 30 (6): 574-578.
- [5] Ahmed I, Irafli S, Khattab T, et al. Characterization of the Indoor-I outdoor Radio Propagation Channel at 2.4 Ge z [A]. GCC Conference and Exhibition (GCC) [C]. 2011: 605-608.

参考文献:

- [1] 郎昕培, 许可, 赵明. 基于无线局域网的位置定位技术研究和应用 [J]. 计算机科学, 2006, 33 (6): 21-24.
- [2] 唐文胜, 李珊, 匡旺秋. RF 室内定位指纹库空间相关生产算法

(上接第 153 页)

得室内三维位置, 在基于建库数据插值和信号信噪比建库的基础上, 进行信噪比和幅度多重位置指纹建库与匹配算法研究, 通过数据插值进一步提高了定位精度。结合该算法模型, 提出了系统的组成与设计, 并基于该系统完成了实际定位试验, 在传感节点间隔 5 米的情况下, 定位精度可达到 3 米。