

摘 要

本系统以 xc7a35tcpg236-1 为主控芯片，基于 Basys3 FPGA 开发板，采用时延法进行声源定位与追踪。对于一维范围内的声源，本系统使用 2 个麦克风构成简单线性阵列，在此基础上进行了自主发挥，即对于二维平面内的声源，本系统使用 4 个麦克风构成长方形阵列。FPGA 通过声音信号的采集、滤波及运算，得到角度及距离，并驱动 LCD1602 及舵机，实现显示与追踪。

本系统使用 Verilog 编程控制 FPGA，充分利用了时序分析的便利性及 FPGA 的灵活性，力求硬件连接的简明及软件算法的处理速度，具有运算速度快、处理精度高、硬件资源消耗少的优点，具有一定的实际应用价值。

关键词：声源定位；时延法；Basys3；多路信号同步处理

1 系统方案的比较与选择

声源定位追踪系统在科学研究和日常生活中都有广泛的应用，本系统通过对声音信号的接收、采集、处理，期望实现对声源的定位和追踪。

1.1 麦克风阵列的选型

对于麦克风的选型，市面上主流的麦克风有动圈式、铝带式 and 驻极体电容式。动圈式麦克风成本低，结构牢固且无需直流电压工作，但频带范围窄，灵敏度低；铝带式麦克风虽然信号保真效果好但价格昂贵，在本实验中性价比太低。相比之下电容式麦克风灵敏度高，频率响应好且工作稳定。

因此本系统选用电容式麦克风，使用 MAX4466 声音传感器模块作为声音信号接收装置，其具有高性能、低成本、低功耗的特点。

1.2 AD 采样模块的选型

本系统需要对麦克风阵列接收的声音信号进行多路同步采样，3PA1030 等 AD 模块虽然有 50MHz 的采样率，但只能实现一路采样，故需要使用多个模块，导致成本高、同步控制难度大，此外，本系统对采样率并没有太高的要求。

因此本系统选用 AD7606 模块，其能够实现 8 路 16 位同步采样，采样率为 200KHz，能够满足设计要求并达到较好的性能。

1.3 声源定位主控硬件的选择

本系统需要实现信号处理与角度、距离的运算。方案一为 STM32 等单片机，方案二为 FPGA。相比于单片机，FPGA 拥有抗干扰性强、运行稳定的优势，对于本系统多路并行信号的处理，使用 FPGA 搭建的累加器运算速度更快，并且可以利用资源的合理组织减少硬件的开销。

因此本系统选用 basys3 开发板，板载芯片为 xc7a35tcpg236-1。

1.4 声源追踪舵机控制方法

对于舵机的选择，方案一为 MG996R 舵机，其成本较低，且能够支持 360° 旋转，但是精度有所欠缺。方案二为 LX1501 舵机，其能够支持 270° 旋转，采用串行总线接线方式，堵转扭矩较高，精度为 0.3°，但是成本较高。

综合考虑本系统性能需求，本系统的舵机用于声源追踪，需要高精度，而并不要求 360° 的旋转范围，因此选用 LX1501 舵机。

1.5 系统整体框图

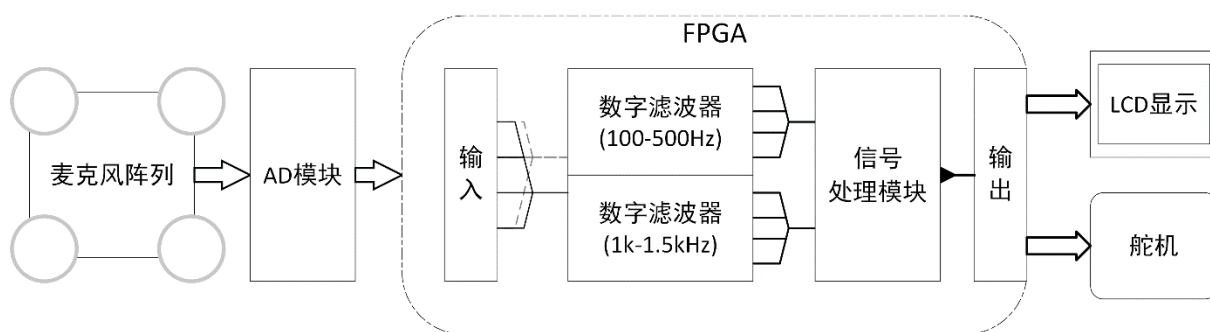


图 1.1 系统总体框图

2 理论分析与计算

2.1 FIR 滤波器^[1]

在实际的非理想状态下，声音信号模型可以表示为：

$$x(t) = x_s(t) + x_i(t) + x_n(t) \quad (2.1)$$

其中 $x_s(t)$ 、 $x_i(t)$ 、 $x_n(t)$ 分别为期望信号、干扰和噪声，干扰和噪声的影响是造成系统误差的主要因素。针对这一问题，较为完善的方法的稳健的自适应波束形成，但由于其中的协方差矩阵重构过程包含大量的积分迭代运算，软件编程实现较为困难，现有的硬件在计算复杂度方面难以达到要求。^[2-4]

考虑到本系统所使用的声音信号是宽频带的，因此在每个麦克风接收阵元处，仅需使用两个带通滤波器，提取两个不同频带的信号，当它们的幅值都超过设定的门限时，即可以认为这是该麦克风阵元接收到信号的时间点，从而进行后续的计算。

相较于 IIR 滤波器，FIR 滤波器无需相位校准网络，且可以无限增加精度，利用 FPGA 的乘累加快速算法，可以设计出高速的 FIR 滤波器，其理论公式如下：

$$y(k) = \sum_{n=0}^{N-1} a(n)x(k-n) \quad (2.2)$$

其中 N 为滤波器的阶数，本系统选取了 100~500Hz、1K~1.5KHz 两个通频带，设计了两个 FIR 滤波器，如图 2.1 所示。

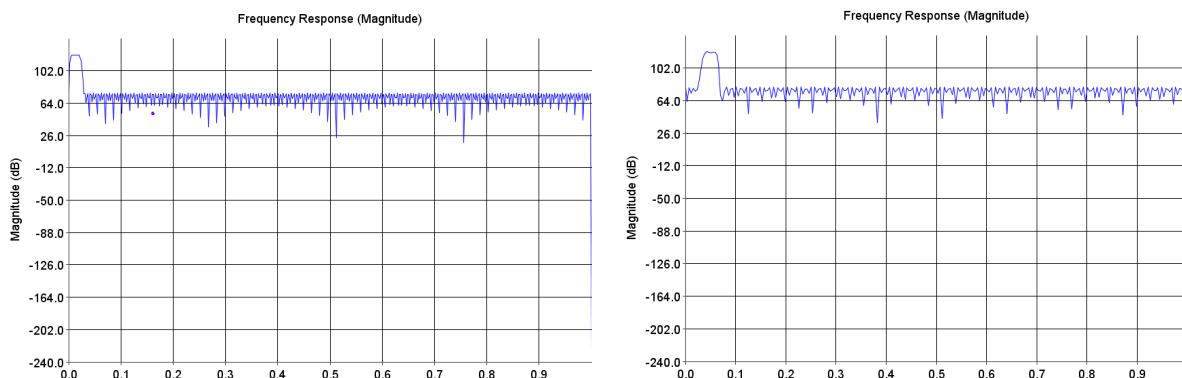


图 2.1 FIR 滤波器

2.2 声源定位^[5-8]

本系统的声音信号经采样、滤波后，每路得到两个频带的信号。首先预留 2s 的环境噪声学习时间，计算这 2s 的信号平均功率，得到第 j 个阵元的第 k 个频带的噪声基底 VN_{jk} 。（ $j=1,2,\dots;k=1,2$ ）

接着开始离散序列的遍历，根据 50KHz 采样频率，设定每帧包含 1 个数据点，计算每 8 帧的平均功率 VS （第 1~8 帧得到 $VS1$ ，2~7 帧得到 $VS2$ ……），当两个频带的 VS 均达到其对应的噪声基底的 20 倍时，认为声音信号到达，记录每路信号到达的时间。

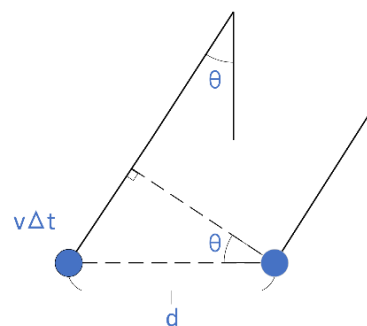


图 2.2 一维线性麦克风阵列

对于两个麦克风组成的最简线性阵列，声音信号可以建模为远场窄带信号，示意图如图 2.2 所示。

由此可算出角度及距离（ d 为麦克风间距， D 为麦克风阵列与声源的距离 2.5m）：

$$\theta = \arcsin\left(\frac{v\Delta t}{d}\right) \quad (2.3)$$

$$S = \frac{D}{\sin\theta} \quad (2.4)$$

此方案中若两麦克风相距 60cm，那么可计算得到每帧对应的角度误差为 0.65° 。

四个麦克风组成的长方形阵列如图 2.3 所示，通过两两时差的测算和理论计算得到的声源定位矩阵 \mathbf{A} ，可以得到水平和垂直的两个角度 θ 和 φ ，从而得到距离：

$$S = \sqrt{\left(\frac{D}{\sin(\theta)}\right)^2 + \left(\frac{D}{\sin(\varphi)}\right)^2} \quad (2.5)$$

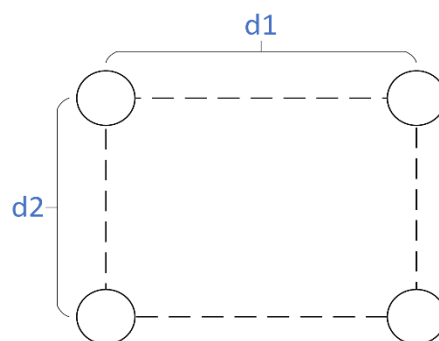


图 2.3 长方形阵列

2.3 声源追踪

对于一维简单线性阵列，本系统预先让接收阵列与声源高度一致，控制垂直方向舵机保持水平，根据 θ 控制水平方向舵机的旋转角度，继而控制激光笔点亮。

对于长方形阵列，本系统通过 θ 和 φ 联合控制两舵机旋转角度。

3 电路与程序设计

3.1 软硬件总体框图

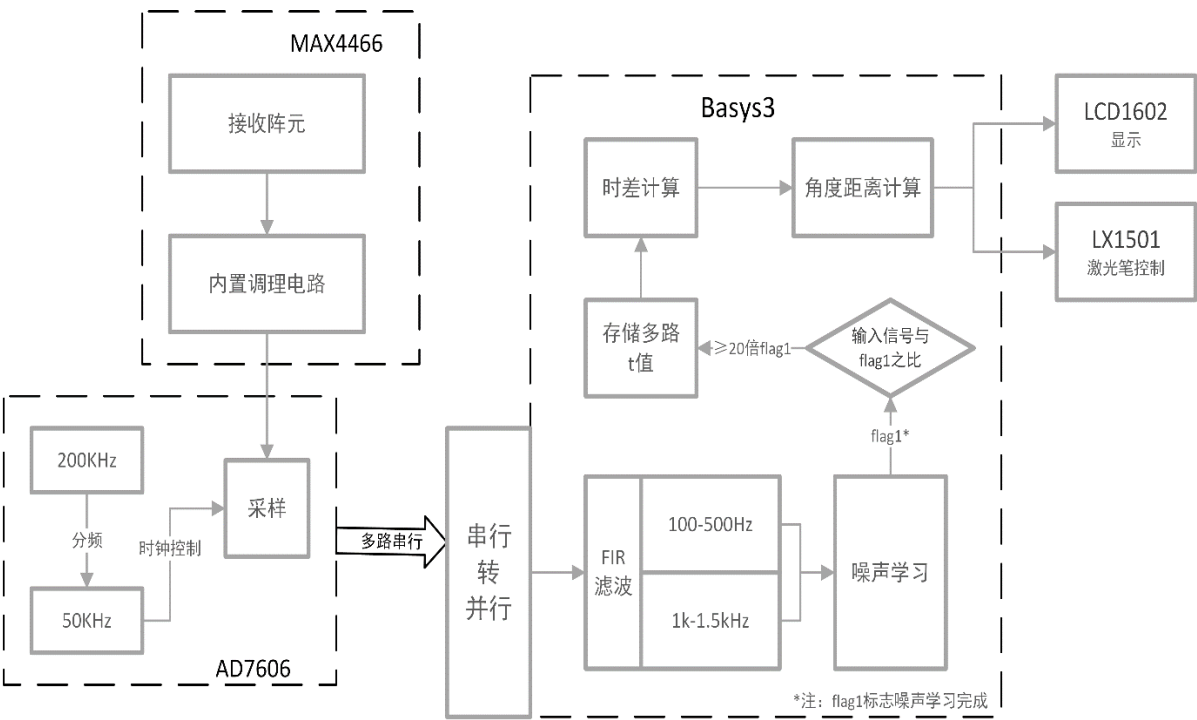


图 3.1 软硬件总体框图

3.2 相关说明

(1) 本系统的信号调理电路是内置于 MAX4466 模块内的，其能够对麦克风阵元接收到的信号进行一定的放大、偏置等处理，能够使信号稳定，从而满足 AD7606 的输入要求，故本系统不需要另外的调理电路。

(2) 采样数据进入 FPGA 后，一直保持并行状态，以每个数据 $20\mu s$ 的恒定速度进行一系列信号处理，从而有助于时域分析和快速运算。整个软件算法没有积分等复杂运算，能够进一步提高运算速度。

(3) 本系统采用多路、多模块同步动态处理的方式，即上一模块处理完成的数据能够及时传输至下一模块继续运算，同时释放寄存器的空间以备新的模块传入，如此循环往复，能够节约硬件资源。

(4) LX1501 舵机采用 PWM 脉宽控制原理，通过周期同为 20ms 的脉冲信号的脉宽变化，控制舵机转过的角度。脉宽 0.5ms~2.5ms 与转动角度 0° ~ 270° 线性映射。

4 测试方案与测试结果

4.1 测试方案与结果

4.1.1 基础部分

对于要求 2、3，首先调整声源与麦克风阵列中心及激光笔处于同一高度上。先按启动按钮，后放置音源，等待角度和距离显示及激光笔开启，记录结果。随后测量实际距离及角度，记录并计算相对误差。改变声源位置，再次测量。更换声源声音，再次测量。结果如表 4.1~表 4.3 所示。对于要求 4，将声源以 0.2m/s 的速度在水平方向上移动时，能够实现激光笔的追踪，反应时间延迟约为 1.8s。

表 4.1 声源 1 位置 1

	真实值	实测值	相对误差	激光笔偏离	反应时间
角度/ $^{\circ}$	28.12	28.4	1.0%	1.45cm	1.2s
距离/cm	283.45	285.7	0.8%		

表 4.2 声源 1 位置 2

	真实值	实测值	相对误差	激光笔偏离	反应时间
角度/ $^{\circ}$	25.20	24.8	1.6%	1.52cm	1.1s
距离/cm	276.30	273.6	1.0%		

表 4.3 声源 2 位置 1

	真实值	实测值	相对误差	激光笔偏离	反应时间
角度/ $^{\circ}$	16.88	16.7	0.7%	1.20cm	1.4s
距离/cm	261.25	258.8	0.9%		

4.1.2 自主发挥部分

对于要求 2、3，无需调整声源与激光笔处于同一高度，重复基础部分的测量，得到表 4.4~表 4.6 所示的测量结果。对于问题 4，将声源信号在 D 区平面内上下左右移动，能够实现激光笔的追踪，反应时间延迟约为 2.5s。

表 4.4 声源 1 位置 3

	真实值	实测值	相对误差	激光笔偏离	反应时间
水平角度 $\theta/^\circ$	26.35	25.9	2.7%	2.35cm	1.6s
距离/cm	279.16	274.2	1.8%		

表 4.5 声源 1 位置 4

	真实值	实测值	相对误差	激光笔偏离	反应时间
水平角度 $\theta/^\circ$	22.53	22.8	1.2%	1.95cm	1.7s
距离/cm	270.92	273.2	0.8%		

表 4.6 声源 2 位置 2

	真实值	实测值	相对误差	激光笔偏离	反应时间
水平角度 $\theta/^\circ$	18.25	18.6	1.9%	2.72cm	1.9s
距离/cm	263.36	266.7	1.3%		

4.2 结果分析

根据以上结果，一维阵列测量平均角度误差为 1.1%，平均距离误差为 0.9%，激光笔平均偏移距离为 1.39cm，平均反应时间为 1.2s。二维阵列测量平均角度误差为 1.9%，平均距离误差为 1.3%，激光笔平均偏移距离为 2.34cm，平均反应时间为 1.7s。

总体上本系统达到了较好的性能，在满足各项要求的同时增加了自主发挥部分，但是对于声源追踪的问题，想要直观地观察到比较精确的追踪过程，对反应时间有较高的要求，有待进一步提高。

5 总结

本系统以 FPGA 为核心部分，根据采集到的接收信号，进行滤波、噪声学习、结果运算等一系列处理，并驱动舵机及显示模块的工作，在达到基本要求的同时做出自主发挥，实现了二维平面空间的声源定位，总体性能良好。

在系统设计中，本系统力求降低算法的时间复杂度和空间复杂度，满足声源实时定位追踪的要求，并且节省硬件资源空间，有一定的实际应用价值。

6 参考文献

[1] 石小磊,阎东.基于 FPGA 的数字滤波器设计与仿真[J].铁道机车与动车,2022(06):21-

24+39+5.

- [2] 叶中付,朱星宇.基于协方差矩阵重构的稳健自适应波束形成算法综述[J].数据采集与处理,2019,34(06):962-973.
- [3] 杨帆. 稳健自适应波束形成算法及多通道数字接收技术研究[D].南京信息工程大学,2022.
- [4] 张国义. 自适应数字波束形成及抗干扰研究[D].南京理工大学,2021.
- [5] 屈顺彪. 基于小型数字麦克风阵列的声源定位方法研究[D].中北大学,2022.
- [6] 李彦塘,沈一,潘欣裕,孙云飞,夏文浩,郭笑非,陆家欣,周岑.基于麦克风阵列的声源定位系统研究[J].物联网技术,2021,11(07):26-28.
- [7] 黄静,胡馨月.基于麦克风阵列的室内三维声源定位优化算法[J].计算机系统应用,2021,30(09):212-218.
- [8] 王玉莹. 基于麦克风阵列的声源定位新方法研究[D].浙江大学,2021.

7 附录

作品实物图:

