

摘 要

声源定位与追踪主要由到达方向和距离估计两部分组成，在当今社会有着越来越广泛的应用。经过性能、成本等因素的综合考虑，本产品基于 Basys3 开发板，设计了一种集采样、滤波、计算、显示、舵机驱动为一体的声源定位追踪系统，并通过原理分析，可以将一维定位推广到二维，从而提高了系统的实用性。

本设计在声源定位方面有较高的精度，在声源追踪方面有较快的反应速度，整体性能良好，设计的算法简明高效，达到了设计要求。

关键词：FPGA；声源定位追踪；FIR 滤波；舵机 PWM 脉宽控制

1 方案的比较与选择

1.1 系统总体框图

本系统的总体框图如图 1.1 所示，本系统主要包括信号接收与放大模块、AD 采集模块、滤波器模块、运算模块、舵机控制模块、显示模块 6 大部分，各部分之间需要进行信号的传输。因此系统方案的选择在考虑系统性能的同时，还应考虑模块之间的连接。

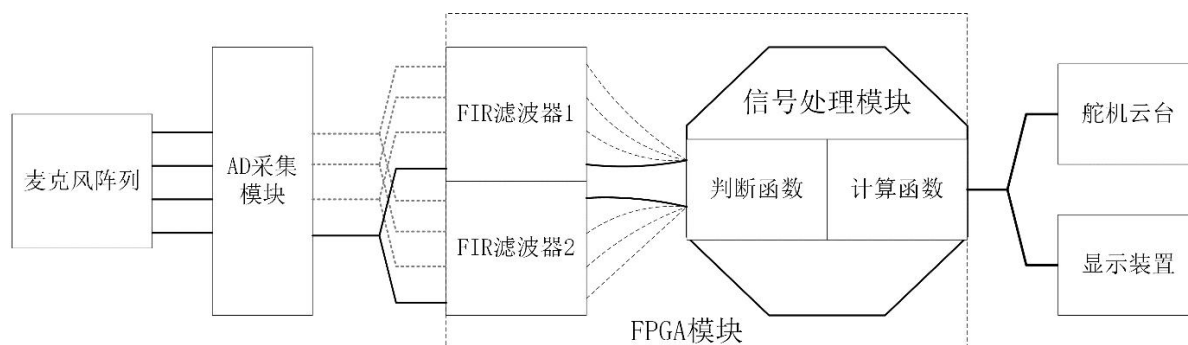


图 1.1 总体方案图

1.2 各模块方案的选取

本设计要使用时延法进行声源定位，其中必然涉及多路信号同步处理，从而计算时差的过程，因此在 AD 采样模块的选型上最重要的要求即为多路同步，本作品有两个方案，一是 USB-3000 数据采集卡，二是 AD7606 模块，数据采集卡能够很好地完成多路采集，拥有较高的采样频率，但是其较为笨重、成本较高，其能够通过 LabView 图形编程进行控制，并实现一定的信号处理功能，但是功能有限，灵活性差，难以与显示及舵机控制模块交互。而 AD7606 虽然在通道数及采样频率上不如数据采集卡，但 8 通道 200KHz 的采样完全能够满足麦克风阵列接收信号的数据采集要求。并且其允许的输入电压范围可达 -10V~+10V，从而麦克风阵列的接收信号不需要较为严格的放大与偏置，可以节省单独设计信号调理电路的硬件资源。因此，本作品选用 AD7606 模块进行信号采集。

在主控芯片的选择方面，本作品主要有三个方案，分别是 STM32F1 单片机、DSPF28335 芯片和 FPGA，主要完成的工作为信号处理与结果计算。

STM32F1 单片机操作简单，其众多函数库可以方便地调用，以实现各种信号处理功能，并且方便实现同显示模块与舵机控制模块的交互。但是在处理多路信号时，受限于芯片性能和较大的数据量，其处理速度会受到较大影响。

F28335 芯片是一款专用于信号处理的硬件，相比于单片机，其拥有更高的运算速度和处理精度，但是其拥有与单片机类似的弊端，即多路并行信号的处理速度问题，此

外，这个方案在舵机控制方面有较大的难度。

FPGA 为可编程门阵列，能够通过算法地控制灵活地选择硬件资源，针对系统方案中用到的 FIR 滤波器，FPGA 善于实现快速的累加运算，对于较高阶次的差分方程模型可以保证较高运算速度。此外 FPGA 在时序控制方面更加灵活，可以轻松实现采样频率的改变及信号处理速度的控制，通过寄存器的灵活使用，可以较大程度地节省内存空间。

因此，本作品选用 xc7a35tcpg236-1 芯片，基于 FPGA 进行核心部分的处理。

本作品使用的其他模块的硬件有：MAX4466 声音传感器模块、LCD1602 显示屏、LX1501 舵机。

2 理论分析与计算

声源定位系统中，主要涉及的运算过程有 FIR 滤波、能量监测、时差计算、距离及角度的测算四个部分；声源追踪系统中，主要工作是把水平旋转角及俯仰角数据传输给舵机进行控制，并非理论计算。

2.1 FIR 滤波^[1]

FIR 滤波器为有限长单位冲激滤波器，根据不同的设计需求可规定任意的幅频特性，其具有严格的相频特性。由于其单位抽样响应由现场，因此其具有稳定的系统。

其在时域上的表达式为：

$$y(n) = \sum_{i=0}^{N-1} a_i x(n-i) \quad (2.1)$$

单位冲激响应及系统函数为：

$$h(n) = \sum_{i=0}^{N-1} a_i \delta(n-i) \quad (2.2)$$

$$\Rightarrow h(i) = a_i$$

$$H(z) = \sum_{i=0}^{N-1} h(i) z^{-k} \quad (2.3)$$

代入 $z = e^{j\omega}$ 可以得到幅频特性与相频特性。

本设计中 FIR 滤波器的作用不仅仅是滤除噪声，还要提取两个不同频带范围的信号，由于本作品使用的生源信号频带较宽，因此当两个频带信号均达到阈值时，可以认为该路信号已经到达，从而可以计算时间。

本作品使用的两个 FIR 带通滤波器的通频带分别为 150~650Hz，1.25~1.75kHz。

2.2 能量监测及结果计算^[2]

对信号进行能量监测的目的在于当信号能量超过设定的阈值时，记录该点位信号到达的时间点。对于阈值的设定需要统一标准，这个标准即为噪声基底，对于每一路信号分别经过每一个滤波器得到的信号，都有一个相应的噪声基底。在本设计中，第一路信号经过两个滤波器分别滤波之后能量均超过噪声基底的 20 倍时，即认为信号以到达，记录时间点 t_1 ，第二路到达为 t_2 ，由此可计算时差，乘以声速得到长度。

本题可以简化为远场声源定位，故发射信号可以简化为平行，即拥有相同的入射角度，最简单的麦克风阵列为一维 2 元线性阵列，如图 2.1 所示，题中装置的布局位置如图 2.2 所示，根据几何关系及预先给定的声源和麦克风阵列的间距，人为设定两麦克风的间距，可以计算角度及距离。

由于一维 2 元麦克风阵列只能定位与接收阵元相同高度的声源，因此本设计将其改进为 4 个麦克风组成的长方形阵列，计算两两的时差，可以构造三维空间内的几何关系，从而计算水平角与俯仰角，通过勾股定理得到距离。

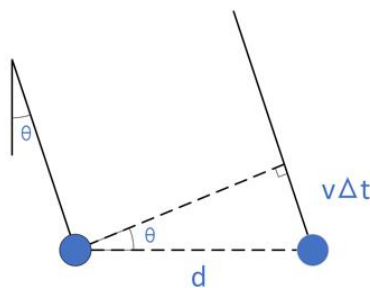


图 2.1 一维线性阵列

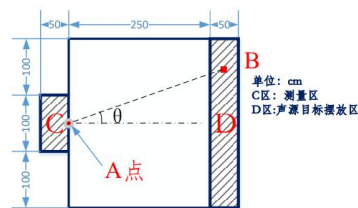


图 2.2 测量装置布局

3 软硬件设计

3.1 信号的接收与采样

该模块的流程图如图 3.1 所示，声音传感器模块 MAX7606 有内置的信号调理电路，实现信号预处理。AD7606 模块的采样频率本作品设置为 48.6KHz，本作品使用 FPGA 产生转换开始信号来控制信号 CONVST A 和 CONVST B，由于使用多通道同步采样，因此，本作品将 CONVST A 和 CONVST B 信号短接在一起。由于采用串行模式输出信号，因此，本作品将 DB7 和 DB8 作为输出信号接入 FPGA 开发板，并将并行输出信号管脚接低电平。BUSY 信号在 CONVST A 和 CONVST B 上升沿到来时，变为高电平，进行模拟信号的采集，BUSY 信号拉低后，FPGA 开始进行数据的处理操作。

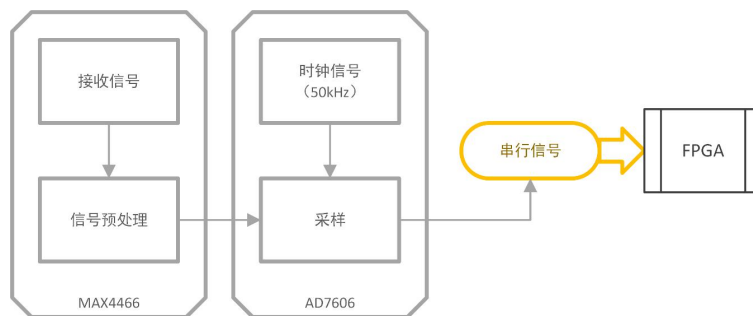


图 3.1 信号接收与采样

3.2 信号的处理及运算

该模块的流程图如图 3.2 所示,本作品用 FPGA 滤波后,首先进行 1~2s 的噪声学习,预先计算得到各自通道,各滤波后信号的噪声基底,接着以此设定阈值计算时差,将信号模型转化为空间几何模型,得到距离和角度。

整个过程仅仅在时域处理数据,处理的频率始终与采样频率一致,从而在时差的计算上实现了一致性。

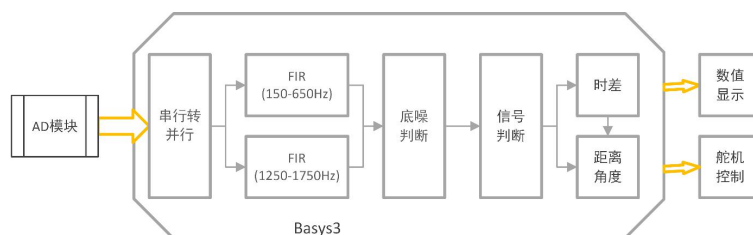


图 3.2 信号的运算与处理

3.3 显示与声源追踪

结果显示采用 LCD 屏,先根据 LCD1602 所需数据位数,从原有的数据中截取高位,接着通过 FPGA 管脚的定义,得到输入接口和控制接口,从而实现与 FPGA 和 LCD 显示模块的级联。最后通过时钟控制可 LCD1602 内部的控制,实现 LCD1602 的显示、暂存和消隐。

对于声源追踪,本设计将复位信号设置为周期 20ms 的脉冲,与 LX1501 的 PWM 脉宽控制原理的脉冲周期一致,从而让 FPGA 传入舵机的角度数据按 PWM 脉冲的频率不断刷新,从而舵机应该转过的角度也不断刷新,从而让激光笔追踪声源。

4 测试方案与结果

4.1 声源高度固定

将声源、麦克风阵列、激光笔预先置于同一高度,先启动程序完成噪声学习存入噪

声基底，完成后发送信号，放置声源，待结果显示及激光笔指向位置稳定后记录结果，并记录激光笔的反应时间，如表 4.1~表 4.4 所示。

接着将声源放置于不同位置、更换声源种类，按复位键重新操作。

最后用细绳牵引，让声源以约 20cm/s 的速度水平移动，观察激光笔的追踪效果，延迟约为 2s。

表 4.1 声音信号 1 位置 1

	测量值	真实值	相对误差	追踪偏离	反应时间
角度/ $^{\circ}$	27.1	26.87	0.9%	1.67cm	0.7s
距离/cm	283.7	280.26	1.2%		

表 4.2 声音信号 1 位置 2

	测量值	真实值	相对误差	追踪偏离	反应时间
角度/ $^{\circ}$	28.7	28.34	1.1%	1.15cm	1.2s
距离/cm	286.2	284.04	0.7%		

表 4.3 声音信号 2 位置 1

	测量值	真实值	相对误差	追踪偏离	反应时间
角度/ $^{\circ}$	22.9	23.51	2.7%	1.28cm	1.0s
距离/cm	270.1	272.63	0.9%		

表 4.4 声音信号 2 位置 2

	测量值	真实值	相对误差	追踪偏离	反应时间
角度/ $^{\circ}$	23.9	24.22	1.3%	0.94cm	1.5s
距离/cm	272.0	274.13	0.8%		

4.2 声源高度可变

不调整声源与激光笔在同一高度，其他测量方案同 4.1 节，记录水平入射角、距离、追踪偏离、反应时间。最后将声源在 D 区竖直平面上任意移动，观察追踪效果，反应时间延迟约为 2.2s。测量结果如表 4.5~表 4.7 所示。

表 4.5 声音信号 1 位置 3

	测量值	真实值	相对误差	追踪偏离	反应时间
水平入射角/ $^{\circ}$	26.3	25.86	1.7%	1.36cm	2.1s
距离/cm	280.9	277.94	1.1%		

表 4.6 声音信号 1 位置 4

	测量值	真实值	相对误差	追踪偏离	反应时间
水平入射角/ $^{\circ}$	23.7	23.11	2.6%	2.07cm	1.3s
距离/cm	275.1	271.93	1.2%		

表 4.7 声音信号 2 位置 3

	测量值	真实值	相对误差	追踪偏离	反应时间
水平入射角/ $^{\circ}$	19.9	20.22	1.7%	2.02cm	1.8s
距离/cm	263.0	266.54	1.3%		

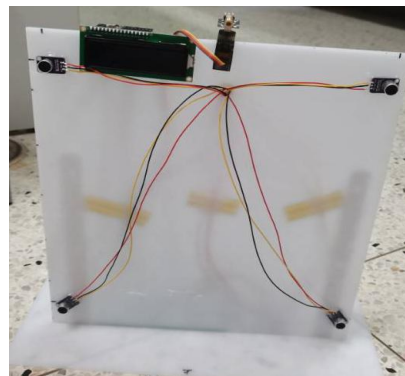
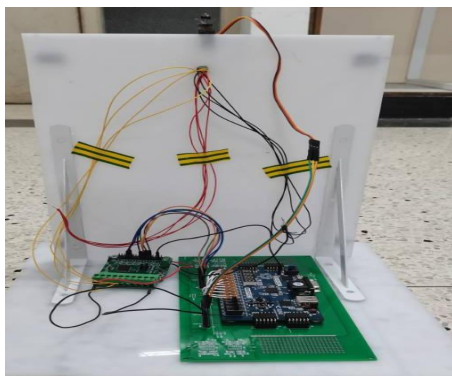
4.3 结果分析

总体来说，本设计的测试结果角度和距离测算的误差较小，追踪偏离较少，反映时间较短，能够达到设计要求并进行适当的拓展延伸。下面对数据中的几个普遍现象进行说明。

不难发现，角度的相对误差总是大于距离的相对误差，这是由二者之间的函数关系式决定的，对于一维 2 元阵列，可由简单三角函数关系推导，对于长方形阵列，二者之间存在复杂的非线性关系，总之距离变化对角度变化的敏感性较低。

此外追踪偏离理论上是由于角度误差造成的在 D 平面上的水平距离误差，但是经计算二者并不相等，此现象的原因可能在于 LX1501 舵机本身存在 0.3° 的最大偏差，从而导致实际转过的角度与实际角度与传入的数据有微小的不一致。

5 实物展示



6 总结

本设计的总体性能良好，在减小误差和缩短反应时间两个方面有比较显著的优势。本设计较为完善地完成了 FIR 滤波、时差计算、角度及距离计算等各个部分，实现了采样、信号处理、显示、追踪各个功能。

7 参考文献

- [1] 百度百科, FIR 滤波器, [https://baike.baidu.com/item/FIR 滤波器/1983543](https://baike.baidu.com/item/FIR%20滤波器/1983543), 2022-7-30.
- [2] 汪诗怡, 殳国华, 李丹. 基于 FPGA 的声音定位系统设计[J]. 电气自动化, 2019, 41(01): 68-70.
- [3] 贾艺石; 王军程; 赵越; 马华晨. 基于 STM32 的声音定位系统[J]. 电子世界, 2021, (02): 172-173.
- [4] 钟宇. 基于声音到达时间及频率估计的高精度室内遮挡定位方法研究[C]. 长安大学, 2021.
- [5] 严炎. 基于声音信号与 PDR 的融合室内定位系统的设计与实现[C]. 华中科技大学, 2020.
- [6] 王硕朋; 杨鹏; 孙昊. 基于声音位置指纹的室内声源定位方法[J]. 北京工业大学学报, 2017, (02): 224-229.
- [7] 刘汉森. 多旋翼无人机声音定位与图像识别研究[C]. 江西理工大学, 2021.
- [8] 肖波. 基于声音能量的单声源定位与追踪技术研究[C]. 广州大学, 2022.
- [9] 程清远. 基于声音能量强度的无线传感器网络目标定位研究[C]. 南京理工大学, 2010.