

摘 要

本系统以 FPGA 为核心，设计并制作了声源定位跟踪系统。

系统主要包括：使用主控芯片 xc7a35tcpg236-1 的 Basys3 开发板，由多个麦克风构成的声信号接收阵列，LCD1602 显示控件以及 LX1501 舵机平台。

系统采用时延法进行声源定位与追踪。在麦克风阵列的设计上，从 1×2 阵列改进至 2×2 阵列，从而既能对同一水平线上的声源进行定位，也能定位二维平面内的声源。系统采用 AD7606 多通道同步采样，并用 FPGA 对 AD 模块采集所得的声音信号进行快速运算，得到声源的角度距离信息，并驱动显示屏及舵机以实现显示与追踪。

本系统通过高速并行数据传输结构，实现高运算速度、高处理精度、低硬件资源消耗的追踪系统，具有一定实际应用价值。

关键词：多通道同步采样；FPGA；AD7606；声源定位与追踪

1. 设计方案的选取与比较

1.1 主控硬件

本系统的核心硬件需要能够实现多通道信号的基本处理与运算，因此本作品考虑了两种不同方案。

第一个方案为 STM32F4 系列的单片机，其优势为控制功能强大且易于组装拓展模块，方便各额外功能添加。另一方案即 FPGA，相比于单片机，FPGA 运行稳定且擅长并行信号的快速处理，其拥有乘累加快速算法，能够设计出高速的 FIR 数字滤波器。FPGA 可以更加灵活地配置硬件资源及管脚，从而便于实现系统功能。

因此本系统选用芯片型号为 xc7a35tcp236-1 的 Basys3 开发板。

1.2 AD 采样模块

由于时延法声音定位计算时差的需要，核心硬件需要并行处理多通道数据，因此 AD 模块需要具备多路同步采样的功能。

本系统选用型号为 AD7606 的模块，能够实现 8 路 16 位同步采样，且采样率能够到达 200KHz，很好地满足了设计所要求。

1.3 旋转舵机平台

底座舵机用于承载激光笔并通过程序控制旋转，本作品分别考察了 MG 系列、SG 系列与 LX 系列舵机。

MG 和 SG 系列的舵机成本较低且支持 360° 旋转，但考虑到本系统所需旋转角度仅需在 60° 内，且一度的偏差就会导致激光点将近 6cm 的误差，导致激光笔指向的范围很容易落在以声源为中心，半径 5cm 的圆外。MG 和 SG 系列的舵机难以达到这一精度要求。

因此最终本作品使用精度更高的 LX1501 舵机，其堵转扭矩较高，精度为 0.3°，能够很好地适配本作品系统要求。

1.4 显示模块

本系统需要显示角度值和距离这两个数据，本作品最初拟定了串口屏和 LCD 液晶显示这两个方案。

串口屏能够通过串口通信实现数据的传输，进而写入文字或图像，但是其成本高，操作难度大，且本系统只需显示两个数据，使用串口屏显示性价比比较低。LCD 显示通过并行方式输入数据，根据字库中各个字符的地址进行调用以完成不同内容的显示，易于操作，成本低。

因此，本系统选用 LCD1602 显示模块。

1.4 系统整体设计

本系统实现的声源定位追踪系统通过对声音信号的采集、处理，期望实现对声源的定位和追踪

本系统用到的全部硬件模块为：MAX4466 麦克风声音传感模块、AD7606 采样模块、Basys3 FPGA 开发板、LCD1602 液晶显示模块、其总体结构框图如图 1.1 所示。

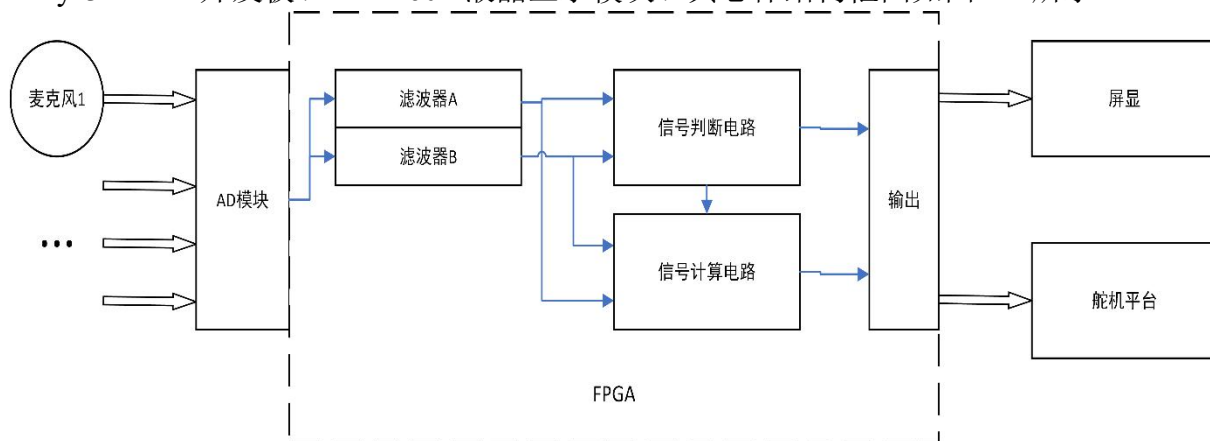


图 1.1 系统整体设计

2. 理论分析与计算

2.1 滤波器参数的计算

考虑到麦克风阵列接收到的信号存在的各种噪声会影响声音信号到达时间点的判断，本作品需要两个滤波器提取不同频带的信号，当两者能量均到达阈值时，才认为该时刻声音信号到达，本系统中采用 FIR 滤波器。

FIR 滤波器由于具有线性相位且设计灵活，广泛应用于数据通信、语音识别等领域。随着集成电路的不断发展，越来越多的 FIR 滤波器选用现场可编程逻辑阵列 FPGA 作为核心。

由于 FIR 滤波器的冲激响应序列是有限长的，需用一个有限长度窗口函数序列 $\Omega(n)$ 来对无限长脉冲响应 $h_d(n)$ 进行截取，即

$$h(n) = \Omega(n) * h_d(n) \quad (2.1)$$

根据技术要求对响应进行采样,当需要给出响应滤波器的频率 r 时，响应采样单元的时间可以用以下公式计算:

$$h_d(n) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} H_d(e^{j\Omega}) e^{j\Omega n} d\Omega \quad (2.2)$$

再利用理想滤波器的特性来作傅里叶逆变换求出 $h_d(n)$ 。

在滤波器的选择上本作品使用 FIR 滤波器而非 IIR 滤波器，因为其无需相位校准网络，精度可重复增加，其次利用 FPGA 的高速计算能简单地实现所需的高速的 FIR 滤波器，理论公式如下：

$$y(k) = \sum_{n=0}^{N-1} a(n)x(k-n) \quad (2.3)$$

其中 N 为滤波器的阶数。本系统分别选用 100~500Hz、1k~1.5kHz 两个通频带，相应滤波器能够满足实验所需功能。

2.2 声源定位相关数据计算

本系统中每个麦克风采样的声音信号会通过两个滤波器得到两个不同频带的信号。在实验开始时，首先启动测量装置并在预留的 2s 对环境噪声采样学习的时间，计算噪声信号的平均功率，得到所有阵元接收信号的相应频带的噪声。

而后启动声源，程序通过时钟控制完成类似于离散序列的遍历的工作，直至检测到第一次声音信号到达，检测方式为：对于阵列中任意一个麦克风，当它输出的两个频带的功率均达到其对应噪声基底平均功率的 20 倍时判断声音信号到达，同时记录每路信号到达的时间。根据本作品设置的 50kHz 采样频率，计算每 8 个数据点的平均功率，其时间分辨率仍然为 20μs，计算原理如图 2.1 所示。

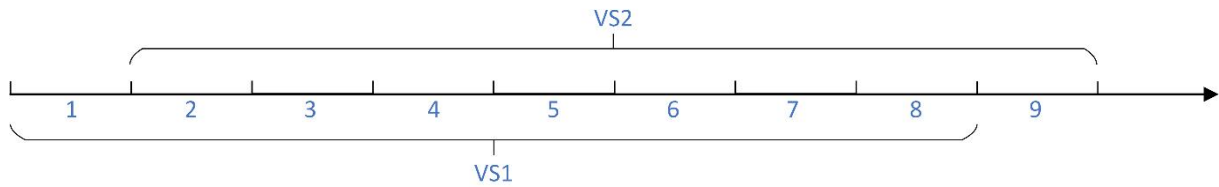


图 2.1 时间判断计算原理

基于题中试验场地的大小，在两个麦克风组成一维线性阵列的情况下，麦克风接收到的声波可视为平面波，如图 2.2 所示。

这样就可以近似计算出结果，其中 L 表示声源距麦克风阵列中心点的距离，d1 为两麦克风之间的距离，d2 为麦克风阵列中心点与声源所在平面的间距。

$$L = \frac{d_2}{\sin\left(\arcsin\left(\frac{v\Delta t}{d_1}\right)\right)} \quad (2.4)$$

角度θ即为：

$$\theta = \arcsin\left(\frac{v\Delta t}{d_1}\right) \quad (2.5)$$

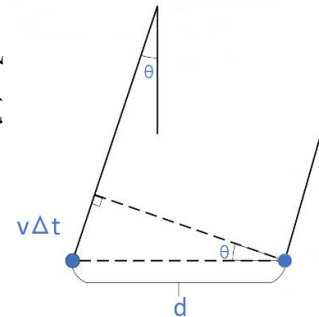


图 2.2 平面波模型示意图

关于四个麦克风组成的长方形阵列，其方法仍然是利用声速×时间=距离，从而得到

几何关系，利用远场假设、平面波假设来近似计算。

2.3 声源追踪原理

在双麦克风线性阵列的情况下，本系统要求接收阵列与声源等高并锁死垂直方向舵机，同时根据计算所得水平偏角 θ 来控制水平方向舵机旋转使激光笔的光电追踪声源方向。在四麦克风组成的长方形阵列情况下，本系统则确定好阵列中心与声源中心高度差后通过计算得出 θ 和 φ 联合控制两舵机旋转角，示意图如图 2.3 所示，左侧为一维阵列，右侧则使用二维阵列。

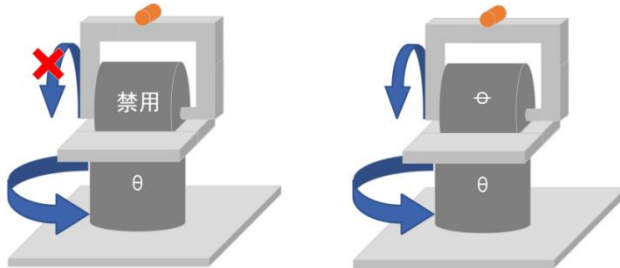


图 2.3 舵机示意图

3.软件与硬件设计

根据题目要求，本作品设计了一套较为完善的软硬件方案，集信号接收、采样、处理、计算、显示、舵机追踪为一体。其主要的运算与控制部分全部由 FPGA 实现，能够提高处理效率，便于方案的不断调试与改进。

3.1 硬件设计总体框图

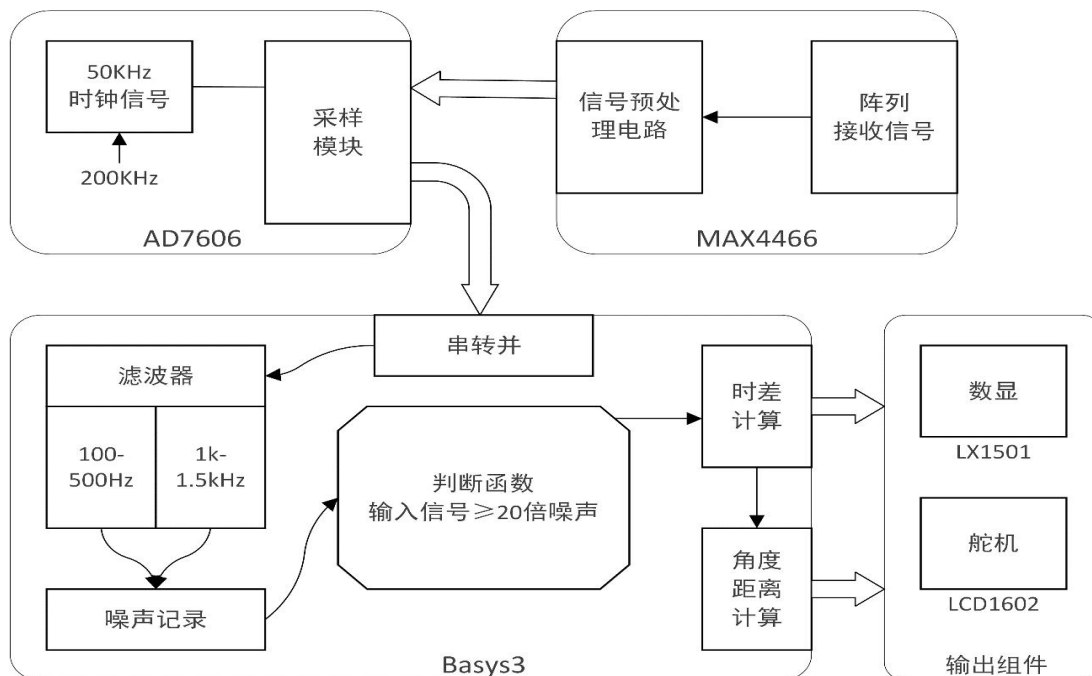


图 3.1 硬件设计总体框图

3.2 对软件编程的相关说明

(1) 本系统基于 Vivado 开发平台，使用 Verilog 硬件描述语言实现编程。

(2) 对于 FIR 滤波器的设计，本系统首先在 MATLAB 中设定采样频率、通带范围和滤波器类型，按照最小阶的原则自动计算出阶数以及各阶系数。接着在 Vivado 平台中采用调用 IP 核的方式调用 FIR 滤波器并设定其预先计算好的系数。最终在时域范围内完成滤波。

(3) 本系统由于需计算的数据量较大，如果直接进行各变量之间计算结果的传输，可能会出现数据来不及计算的问题，因此设置了一些寄存器作为中间变量暂时存放计算结果。大量的数据在这些寄存器上通过类似于数据流的形式传播，传播的节奏和速度由人为设置的时钟控制。这样既实现了数据安全高效的传输，也没有占用过多的内存空间。

4. 测试方案与测试结果

4.1 方案及结果

4.1.1 基础测试

预先让声源与麦克风阵列中心高度一致后，本作品首先对任务点 2、3 的功能进行验证。首先按下声源检测装置的启动按钮学习环境噪声，等待约 2s 后打开音源，记录角度和距离显示及激光指向。随后测量实际距离及角度，记录并计算相对误差；多次改变声源位置并测量。

测量结果如表 4.1 所示。对于要求 4，牵引声源以约 0.2m/s 的速度在水平方向移动时，能够实现激光笔的追踪，其反应延迟接近 2s。

表 4.1 基础测试

位置编号	单位	实际值	测量值	相对误差	光点偏移量	反应时间
方位 1	角度/ $^{\circ}$	27.25	27.4	0.7%	2.28cm	1.3s
	距离/cm	281.21	285.0	1.4%		
方位 2	角度/ $^{\circ}$	21.78	21.5	1.4%	1.85cm	1.7s
	距离/cm	269.22	266.2	1.1%		
方位 3	角度/ $^{\circ}$	23.74	24.0	1.2%	2.24cm	1.9s
	距离/cm	273.11	275.1	0.7%		

4.1.2 提高测试

调整麦克风阵列与声源不在同一水平面上，并重复基础部分的测量，得到了表 4.2 的测量结果。处理问题 4 时，将声源信号在 D 区平面内移动，亦能够实现激光笔的追踪，

但反应时间延迟略有延长，约为 2.5s。

表 4.2 提高测试

位置编号	单位	实际值	测量值	相对误差	光点偏移量	反应时间
方位 1	水平角度/°	26.12	25.9	0.9%	2.57cm	2.0s
	距离/cm	278.52	274.3	1.5%		
方位 2	水平角度/°	21.33	21.0	1.5%	2.65cm	2.3s
	距离/cm	268.48	265.4	1.1%		
方位 3	水平角度/°	29.74	30.1	1.3%	2.14cm	2.2s
	距离/cm	288.01	290.89	1.0%		

4.2 结果分析与方案改进思路

根据误差及反应时间的测算，本系统总体上能够满足设计需求。但是在提高部分中，声源信号在垂直方向上与麦克风阵列中心点存在高度差的时候，出现了普遍的误差增大、反应时间变长的现象，这说明长方形阵列在定位二维声音信号时精确度仍然有改进空间。改进的思路主要立足于方案中的近似部分与简化部分，一是麦克风阵列结构的设计，二是信号模型的优化。

针对本题，近场声源定位模型其实能够达到更高的精确度，但是其计算复杂程度要远远高于目前的远场声源定位模型，如何提高运算速度无疑是有待解决的问题之一。

5. 总结

本系统采用了较为简单的软硬件设计方式，用简单高效的算法实现了一维和二维声源定位与追踪，在达到设计要求并作出适当拓展的同时提出了方案改进的方向。

6. 参考文献

- [1] 夏明秋. 基于 FPGA 声源定位的数据同步采集与算法实现[D].南京信息工程大学,2016.
- [2]居太亮, 邵怀宗, 彭启琮,等. 基于任意麦克风阵列的近场声源三维定位算法研究[J]. 信号处理, 2007, 23(2):4.
- [3]杨磊, 刘美枝, 高海. 基于 FPGA 的多通道带通滤波器设计[J]. 山西大同大学学报: 自然科学版, 2018, 34(4):3.

- [4]郭晓宇, 潘登, 杨同中. 基于 FPGA 实现 FIR 滤波器的研究[J]. 电子技术应用, 2004, 30(4):3.
- [5]胡津健, 石雁祥. 基于 FPGA 的舵机调速 PWM 信号发生器设计与实现[J]. 伊犁师范学院学报: 自然科学版, 2016, 10(1):4.
- [6]段飞, 赵立军, 魏连成,等. 一种基于 FPGA 的噪声功率计算方法:, CN109450469A[P]. 2019.
- [7]齐红涛, 苏涛. 基于 FPGA 的高速 AD 采样设计[J]. 航空兵器, 2010(1):5.
- [8]张超建, 王厚军. 一种基于 FPGA 的 TFT—LCD 液晶显示模块设计[J]. 自动化信息, 2009(9):3.

实物照片:

