

基于边沿检测的声传播智能定位系统

摘要

基于物体固有频率以及介质中声传播特性，应用声源定位、机器学习等算法，我们设计并制作一套智能定位系统，实现对特定区域内敲击声源或放置的物件进行探测和定位。我们具体采用 TDOA 算法，利用时间差对声源进行定位。并且，我们在不同位置放置磁铁，并且采集扫频后的波形数据集，进行机器学习，最终达到识别声源的效果。

关键字： 上升沿检测 TDOA 算法 机器学习

1 系统方案

1.1 方案描述

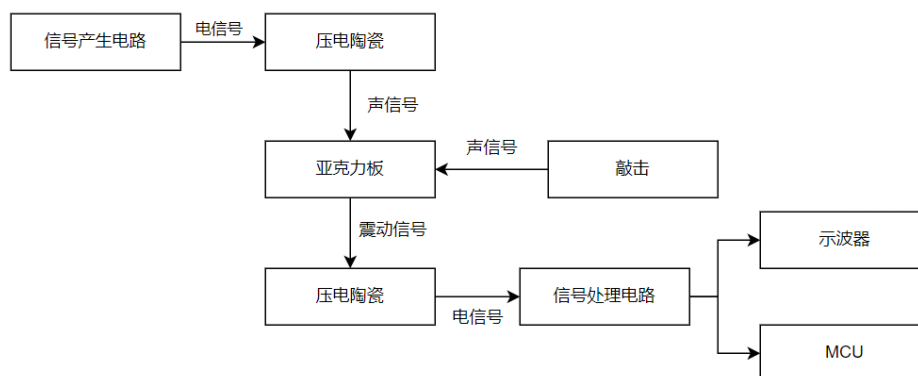


图 1 电路框架图

1.2 比较与选择

1.2.1 信号接收处理方案

方案一：敲击边沿转换

采用转换电路，将敲击信号经过变换，使之成为脉冲信号输入单片机，然后根据脉冲的上升沿到达时间差，采用 TDOA 算法对声源进行计算定位。

优点：较易实现

缺点：提高部分需要另外搭建电路

方案二：ADC 直采

对信号进行放大后等处理后，在进行 AD 转换，将信号输入单片机，直接采集电压数据生成数据集，最终对数据集进行分析，得到声源位置。

优点：能够较为清楚地得到接收到的信号的每个时间的电压值，获得了较多信息，有利于数据的分析

缺点：数据过多，难以处理，典型数据难以选取

综合考虑采用方案一，保证基础部分以及发挥部分的完成进度。

2 理论分析与计算

2.1 TDOA 算法定位原理

假设我们有两个传感器，位置分别是 (\mathbf{p}_1) 和 (\mathbf{p}_2) ，信号源的位置是 (\mathbf{x}) 。设传感器 1 和传感器 2 接收到信号的时间分别为 (t_1) 和 (t_2) 。

则，信号源到传感器 1 和传感器 2 的距离分别是：

$$d_1 = |\mathbf{x} - \mathbf{p}_1| \quad \text{和} \quad d_2 = |\mathbf{x} - \mathbf{p}_2|$$

根据声音的速度 (v) ，我们可以得到两个传感器之间的声音传播时间：

$$t_{\text{prop}} = \frac{d_1 - d_2}{v}$$

而传感器测量到的到达时间差（TDOA）为 $(t_1 - t_2)$ 。假设传感器的时钟同步误差可以忽略不计，则有：

$$t_1 - t_2 = t_{\text{prop}}$$

因此，我们可以将 (t_{prop}) 表示为测量值 (Δt) ：

$$\Delta t = t_1 - t_2 = \frac{d_1 - d_2}{v}$$

这就是 TDOA 算法的基本方程。

接下来，我们可以将距离 (d_1) 和 (d_2) 表示为欧氏距离：

$$d_1 = \sqrt{(x_1 - p_{1x})^2 + (x_2 - p_{1y})^2 + (x_3 - p_{1z})^2}$$
$$d_2 = \sqrt{(x_1 - p_{2x})^2 + (x_2 - p_{2y})^2 + (x_3 - p_{2z})^2}$$

其中， $(x_1), (x_2), (x_3)$ 分别是信号源的 x, y, z 坐标， $(p_{1x}), (p_{1y}), (p_{1z})$ 和 $(p_{2x}), (p_{2y}), (p_{2z})$ 分别是传感器 1 和传感器 2 的 x, y, z 坐标。

然后，我们可以将上述方程组带入 TDOA 的基本方程中，得到关于 $(x_1), (x_2), (x_3)$ 的非线性方程组。通常情况下，我们需要使用数值优化方法（如最小二乘法、梯度下降等）来求解这个方程组，从而估计出信号源的位置 $((x_1, x_2, x_3))$ 。

这就是 TDOA 算法的完整推导过程，其中包括了声速传播、距离计算和非线性方程求解。

2.2 神经网络定位原理

我们根据 TODA 算法，已经在亚克力板内的的三个角位置放置三路传感器，我们接着在第四个位置放置 15kHz 到 20kHz 信号发生器，同时将磁铁圆片放于定位区域，磁片不同的放置位置会对各路接收信号的相位差、幅频特性产生显著影响。并且对于放置位置具有一定的连续性。

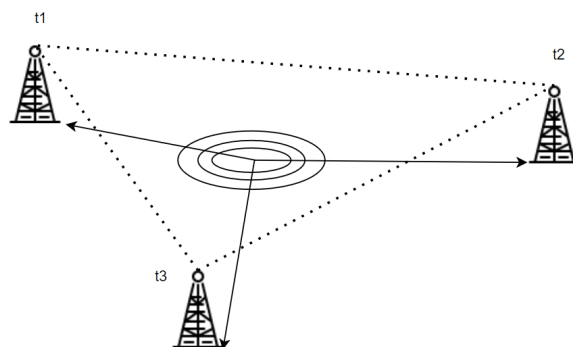


图 2 TDOA: 信号接收与处理

因此我们构建一个卷积神经网络，网络的输入层的三个神经元分别对应三路接受信号的幅频与相位差矩阵，接着我们通过交替使用池化层和卷积层进行网络化简和提取特征，经过两轮的卷积与池化后，通过全连接层输出 x 与 y 坐标值的分类。

在训练阶段，我们收集了不同坐标下声音信号的幅频和相位差信息，并用这些信息来训练网络。一旦网络收敛，它能够学习到声音信号与坐标之间的潜在联系。

最后在测试阶段，我们将采集到的声音信号的幅频和相位差信息输入到经过训练的网络中，从而可以推断出声音源的 x 和 y 坐标。这样，我们就能够通过神经网络来实现声源的定位。

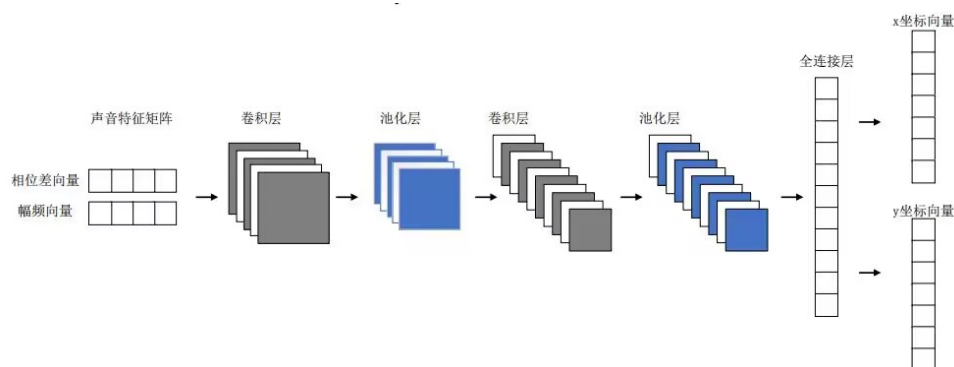


图 3 神经网络结构

3 电路与程序设计

3.1 DDS 模块设计

AD9833 是一款低功耗、可编程波形发生器，能够产生正弦波、三角波和方波输出。可通过 stm32 进行编程控制输出对应的波形与频率。通过使用 systick 系统时钟进行秒计数，定时对 AD9833 产生控制信号，产生 15KHz 20KHz 的步进正弦信号。

3.2 前端信号放大电路设计

我们采用模块 AD9833 进行扫频信号的输出，并且用 STM32F407 作为主控，控制电信号的输出。然后通过压电陶瓷片，将电信号转化为声信号，再通过亚克力板传播。

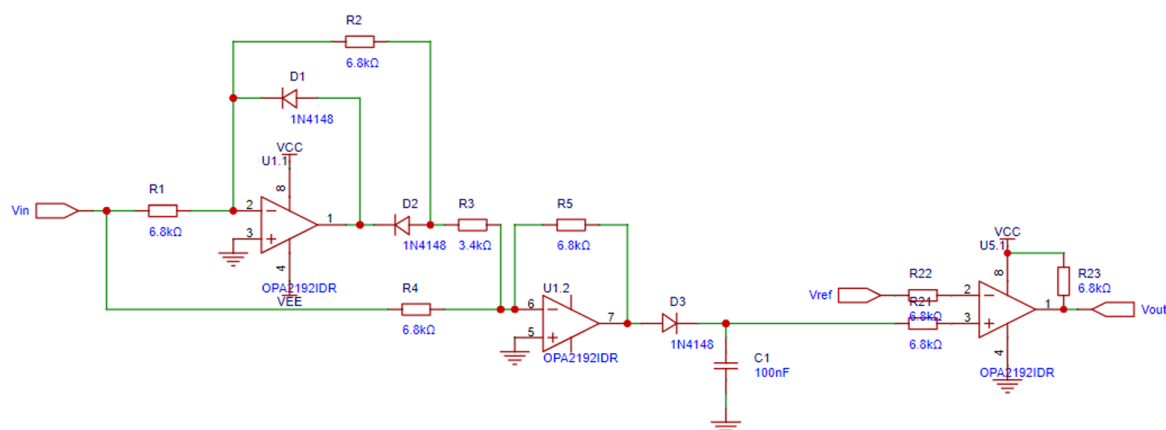


图 4 信号处理电路

3.3 软件设计

我们采用敲击边沿转换的方式对信号时间差进行测量。首先对输入的信号进行全波整流，保证信号处于正半区，保护 GPIO，避免输入负电压。然后，对信号进行过零比较，变换为脉冲信号，便于对上升沿进行中断触发。

接下来，为了避免信号持续时间过短，信号难以采集，我们加上电容，起到峰值检测作用。然后再加上一级比较器，使其信号的电压放大到可以正常输入 GPIO。

然后，在 STM32 中设置上升沿触发，然后通过中断函数，记录中断时的时间，求得时间差，即可通过算法解得声源。

3.3.1 信号采集算法

采用 STM32 的 Timer 的中断捕获功能。将中断设置为上升沿触发，从而使得经过硬件电路处理过的脉冲信号能够触发中断。中断函数中，首先读取中断标志位，判断是哪一路信号触发了中断，判断成功后，读取 CCR 的值，通过所得值乘以时钟周期，即可得到计数时间。由于考虑到精度较高，所以时钟采用 1MHz。但是过高的频率导致非常容易计满溢出。所以，更新中断也要打开。在中断函数中进行判断，如果是更新中断，则采用变量 cnt 计数，并且最终计算时间时，应该加上变量 cnt 的值乘以计满周期。

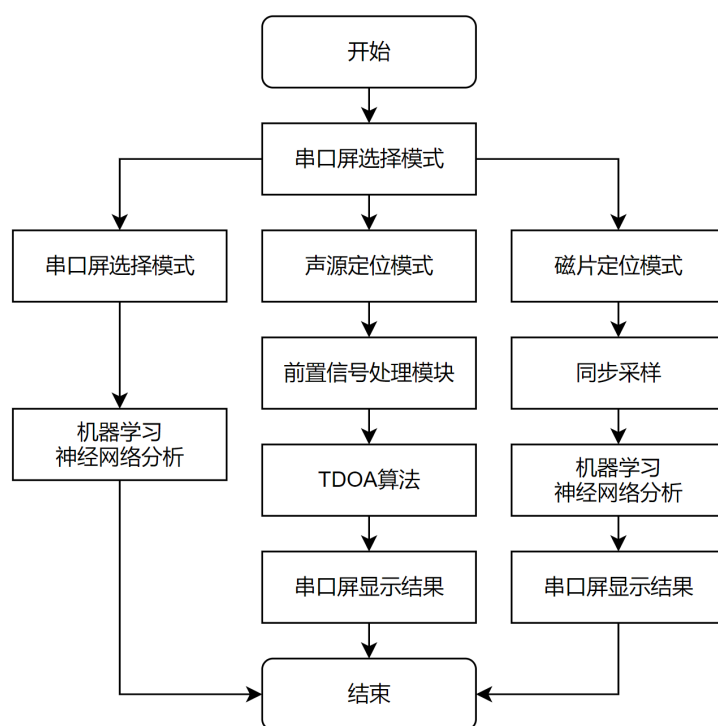


图5 软件框图

3.3.2 TDOA 定位算法

本电路中有三块压电陶瓷片接收信号，作为“信号站”。在接收到信号后，STM32给出时间差，然后采用 TDOA 定位算法计算出声源的位置。

并且，为了提高精度，我们充分利用四个接收信号的压电陶瓷产生的三组时间差，进行求均值处理，得到更加可信的结果。

4 测试方案与测试结果

4.1 测试环境

示波器	GWINSTEK MDO-2204ES
信号发生器	RIGOL DG1062
直流电源	RIGOL DP832

4.2 测试方案

4.2.1 扫频信号测试方案

通过串口屏控制设备进入扫频模式，启动计时装置并使用示波器观察信号输出波形的变化，记录各每一个频率下波形的持续时间。

4.2.2 敲击声源定位测试方案

通过串口屏控制设备进入声源定位模式，在测试板上方格区域进行敲击操作，串口屏将会显示敲击的坐标地址，将系统测量到的方格编号和实际敲击的坐标地址进行验证并记录系统响应的时间，评估系统的定位准确性和时效性。

4.2.3 磁铁圆片定位测试方案

通过串口屏控制设备进入磁片定位模式，在一个格子内放置磁铁圆片，启动计时装置并观察系统测量到的方格编号；随后随机在不同格子放置磁铁圆片，启动计时装置并记录系统测量到的坐标，将检测的坐标和实际放置的坐标进行对比并记录系统响应时间，评估系统在坐标检测和区域检测上的准确性和时效性。

4.2.4 测试结果

1. 扫频信号测试结果分析：通过 DDS 控制的信号发生器可以产生 15kHz 到 20kHz 的扫频信号，扫频周期为 5s。将其通过电声转换装置在亚克力板上面传输可以被其他三路信号接收，通过示波器观测接收到的信号与信号发生器相同，符合题目要求。

表 1 扫频

输入频率	示波器显示频率	持续时间	是否失真
15KHz	15.02KHz	1.00s	否
16KHz	15.97KHz	0.99s	否
17KHz	17.03KHz	0.97s	否
18KHz	17.99KHz	0.98s	否
19KHz	18.97KHz	1.03s	否
20KHz	20.02KHz	1.03s	否

2. 敲击声源定位测试结果分析：在测试区域的 36 格子中任意挑选格子进行敲击，系统能够进行准确的定位，准确性好，同时系统的响应时间均在 0.3s 以内，具有良好的时效性，满足题目 5s 内进行定位的要求。

表 2 敲击结果

敲击位置	显示位置	反应时间
(EF,56)	(EF,56)	0.12s
(AB,34)	(AB,34)	0.21s
(EF,56)	(EF,56)	0.09s
(CD,12)	(CD,12)	0.11s
(EF,56)	(EF,56)	0.12s
(AB,23)	(AB,23)	0.18s

3. 磁铁圆片定位测试结果分析：在划分的 144 格子区域中进行方格编号检测，在磁铁圆片放置在指定的某一方格内后，系统显示对应方格编号，正确率为 95.8%，响应的平均时间在 10.3s，符合题目要求。直接进行坐标检测，显示对应的坐标，正确率 86.7%，响应的平均时间 12.4s，符合题目要求。

表 3 磁铁圆片定位结果表

模式	测试次数	正确显示次数	正确率	平均探测时间
区域检测	144	138	95.8%	10.3s
坐标检测	150	130	86.7%	12.4s

5 参考文献与引用

参考文献

- [1] 《电子线路分析与设计》（第四版）模拟电子技术，[美] 尼曼著，2021，清华大学出版社.
- [2] 刘赓. 基于 TDOA 的空间定位算法 [J]. 计算机工程与设计, 2008, (15): 3892-3894. DOI:10.16208/j.issn1000-7024.2008.15.012.
- [3] 张浩. 基于深度卷积神经网络的目标检测算法研究 [D]. 青岛科技大学, 2023. DOI:10.27264/d.cnki.gqdhc.2023.00025