

摘 要

本系统以 STM32H743 单片机为核心，设计制作了一套高效的简易阻塞式录音屏蔽系统。系统包括电源变压器模块，加法器，功率放大器，超声波发生器阵列等。利用麦克风硬件中的非线性特征，将 40kHz 超声波与噪声信号进行调制，通过超声波探头对麦克风发送，达到录音屏蔽的效果。本装置能够实时显示工作状态、输出功率，录音屏蔽距离 $\geq 5\text{m}$ ，录音屏蔽角度 $\geq 60^\circ$ ，能够快速识别人声和音频，且能进行选择性的屏蔽。

关键词：超声波；麦克风非线性；录音屏蔽；人声与音频识别

1. 题目分析

由题目要求可知，要求设计并制作一个简易录音屏蔽系统，能够屏蔽录音/回放装置和普通录音设备的窃录，且对正常音频交流无影响。发生装置负责发出强度为人类正常谈话声压值（大约 50dB/1m）的音频信号，录音/回放装置可接收并录制/回放 100Hz-20kHz 频率范围的音频信号。屏蔽系统由信号发生器和音频信号监测/识别模块构成，最后检测录音屏蔽的效果。

2. 系统方案比较

本方案主要由电源变压器模块，加法器，功率放大器，超声波发生器阵列等模块构成。

2.1 电源变压器模块

2.1.1 线性直流稳压电源模块

线性直流稳压电源模块的输入电压范围：交流 220V，可同时输出 $\pm 12V$ ， $\pm 5V$ ，3.3V 直流电压，输出总功率不超过 14W，正电源输出不超过 7W 负电源输出功率不超过 7W，具有低噪声，低纹波的特点，可应用于精密运放，数模转换，模数转换等模拟电路供电，要求低纹波，高可靠性，电磁兼容要求较高的仪器设备供电，小功率的单片机系统供电等。

2.1.2 DC-DC 电源模块

该模块 DC-DC 变换由开关电源芯片转换完成，输入电压范围： $\pm 6.5-30V$ ，输出直流电压： $\pm 5V$ 。输出电压纹波不超过 450mVpp。

2.1.3 方案选择

由方案可知，我们需要一个大功率、电源纹波小的电源模块，方案一输出电压符合电路需求，且有大功率，低噪声低纹波的特点，输出电压类型多，包括（ $\pm 12V$ ， $\pm 5V$ ，3.3V）。故选择方案一。

2.2 信号调制模块

2.2.1 加法器调制信号

运放加法器是一种基本的电子电路设计，它利用运算放大器的高输入阻抗、低输出阻抗以及开环增益极高的特性，将两个或更多的电压信号相加以得出总和。这种电路的主要工作原理是通过反相输入端和同相输入端，将电压信号施加到运放的两个输入上。由于运放内部的电压跟随特性，当输入信号差异足够小（即处于线性区域）时，输出电压将是两个输入电压之和减去零点漂移。

运放加法器可以配置成单端输入或双端输入，常见的应用包括精密测量、信号合成以及在模拟系统中处理微弱信号。它的优点是精度高、速度快，并且对信号源的要求相对较低。

2.2.2 乘法器调制信号

乘法器在信号处理中扮演着重要角色，尤其在调制信号方面。调制信号是指通过调制过程将信息（如音频、视频或数据）加载到载波信号上的过程。乘法器在调制信号中主要作为调制器使用，通过将基带信号（即要传输的信息信号）与载波信号相乘，实现信号的调制。

2.2.3 方案选择

加法器和乘法器都是 AM 信号调制，但麦克风仅在可听频率范围内保持强线性，在此范围之外，响应表现出非线性，经过一系列计算（详情见理论计算），发现加法器可以更好的适应这一特点，故选择方案一。

2.3 功率放大器

2.3.1 甲乙类功率放大器

甲乙类功率放大器的工作原理涉及甲类和乙类两种工作状态的切换。甲类功率放大器在整个输入信号周期内，输出晶体管都保持在导通状态，无论输入信号大小如何，输出晶体管都处于导通状态，其输出波形与输入信号完全一致。而乙类功率放大器则是将输入信号分为正半周期和负半周期，由两个输出晶体管分别负责放大正半周期和负半周期的信号。甲乙类功率放大器则通过合理设计，使得在信号接近零点时两个晶体管都不会完全截止，从而减少了交越失真，同时提高了效率。

2.3.2 丙类功率放大器

丙类功率放大器的工作原理基于晶体管的非线性导通特性。在丙类功率放大器中，输入信号被分为两个部分：一个部分用于控制晶体管的导通，另一个部分则用来控制晶体管的关断。这种设计使得晶体管只在输入信号的特定时间段内导通，而在其他时间段内则处于截止状态。具体实现时，丙类功率放大器通常采用交叉耦合的方式，将输入信号通过耦合电容分为正信号和负信号，分别作用于两个晶体管的控制端。在正信号过程中，正信号晶体管导通，负信号晶体管关闭；在负信号过程中，负信号晶体管导通，正信号晶体管关闭。这样，输入信号就被放大到输出端。

2.3.3 方案论证

丙类功放失真较大：虽然可以通过滤波电路进行补偿，但相对于甲类和乙类功率放大器来说，丙类功率放大器的失真仍然较大，无法用于对精度要求较高的场合。输出功率受限由于晶体管在部分时间段内处于截止状态，因此丙类功率放大器的输出功率相对较小。

2.4 超声波发生阵列

2.4.1 超声波换能器

超声波换能器是一种将电功率转换成机械功率（即超声波）并传递出去的装置，同时自身消耗很少的一部分功率。其核心功能是将高频电能转化为机械能，实现声波的发射和接收。工作原理主要基于材料的压电效应。当电信号被添加到换能器时，压电材料（如压电陶瓷）会发生形变，从而产生机械振动，进而形成超声波。这些超声波在介质中传播，遇到障碍物时会反射回来，形成回波信号。回波信号被换能器接收后，再次通过压电效应转换为电信号，供后续处理和分析。

2.4.2 超声波发生器整齐排列

超声波发生器的工作原理主要基于压电效应。在工作时，驱动电路会向压电材料（如压电陶瓷）施加一个交变电压信号。由于压电效应的存在，当施加电场时，压电材料会发生体积变化，进而引起振动。这种振动被传递给超声波发生器的输出端，从而产生超声波。超声波的频率、强度和方向等都可以调节压电材料的特性来进行控制。将超声波发生器排列为整齐的上下对齐阵列。

2.4.3 超声波发生器蜂窝状排列

将超声波发生器排列成蜂窝状，紧密排列，两发生器直接间距减小，由中间向外发散开来。

2.4.4 方案论证

超声波换能器体积大，只能输出一固定频率信号，故选择超声波发生器，超声波发生器经过实验，发现蜂窝状排列输出干扰效果相比整齐排列较好，故选择方案三。

3. 理论分析与计算

3.1 录音屏蔽原理

由题可知，需要设计并制作一个简易阻塞式录音屏蔽系统，能够屏蔽录音/回放装置和普通录音设备的窃录，且对正常音频交流无影响。其核心在于利用麦克风硬件中的非线性特征，将超出人类听觉范围(20kHz)和麦克风可记录范围(24kHz)的声音，比如 40kHz 与噪声信号进行调制，通过超声波探头/超声波换能器对麦克风发送。以下我们将证明，这些高频声音可以被设计成可以被未经修改的麦克风记录下来，而人类却听不到。

对于一个常见麦克风系统，其结构包括：麦克风、放大器、低通滤波器、ADC。麦克风内部的模块大多是线性系统，这意味着输出信号是输入信号的线性组合。对于前置放大器，如果输入声音为 S ，则输出可表示为

$$S_{out} = A1 * S$$

然而，实际上，声学放大器仅在可听频率范围内保持强线性；在此范围之外，响应表现出非线性。因此，对于 $f > 25\text{kHz}$ ，净记录声音 S_{out} 可以用输入声音 S 表示如下：

$$S_{out} = A1 * S + A2 * S^2 + A3 * S^3 + \dots$$

虽然理论上非线性输出是无穷大的幂级数，三阶和高阶项极其微弱，可以忽略。

$$\text{若 } S = \sin(\omega_1 t) + \sin(\omega_2 t)$$

$$S_{out} = A1(S1 + S2) + A2(S1 + S2)^2$$

$$= A1\sin(\omega_1 t) + \sin(\omega_2 t) + A2\sin^2(\omega_1 t) + \sin^2(\omega_2 t) + 2\sin(\omega_1 t)\sin(\omega_2 t)$$

$$\text{经三角函数化简后， } A2(S1 + S2)^2 = 1 - 0.5\cos(2\omega_1 t) - 0.5\cos(2\omega_2 t) + \cos((\omega_1 - \omega_2)t) - \cos((\omega_1 + \omega_2)t)$$

而常见麦克风系统包括低通滤波器，给出例子： $\omega_1 = 50\text{kHz}$ ， $\omega_2 = 40\text{kHz}$ 时，经滤波后，只剩下 $\omega_1 - \omega_2 = 10\text{kHz}$ 的波，也就是说利用两个人耳听不见的超声波，我们在麦克风凭空生成了一个 10kHz 的波。

利用以上原理，我们可以在麦克风产生白噪声，而不影响正常音频交流，达到录音屏蔽的效果。

3.2 人声与音频识别

声音识别主要依赖对人声和音频做快速傅里叶变换，通过识别频谱达到对音频和人声的快速区分。对于一个人来说，其声音的音调大致不变，其声音频谱呈现一定特征性，能量将集中在特定频率波段，而音频的音调富于变化，能量相对离散度较高。

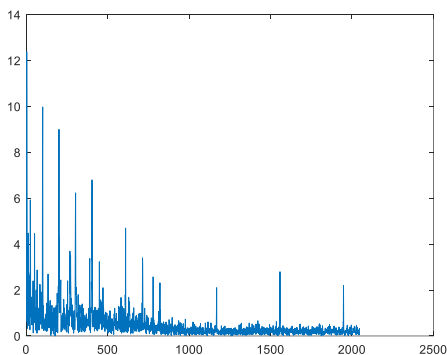


图 1 音频频谱

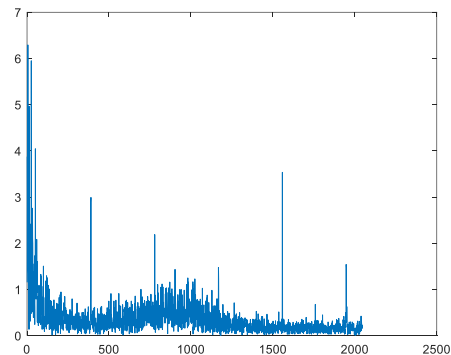


图 9 人声频谱

4. 电路与程序设计

4.1 音频识别装置设计

该部分由麦克风放大电路、ADC 处理电路组成。为方便后续功率测量，该部分电路均可使用 $\pm 5V$ 供电电压实现。根据实验可知，麦克风接收到的原始信号幅度平均为 $10mV$ 左右，而 ADC 最佳测量幅度范围为 $200mV \sim 3V$ ，故应将原始信号放大 100 倍，并加入 $1.5V$ 直流偏置，以便单片机 ADC 进行采集

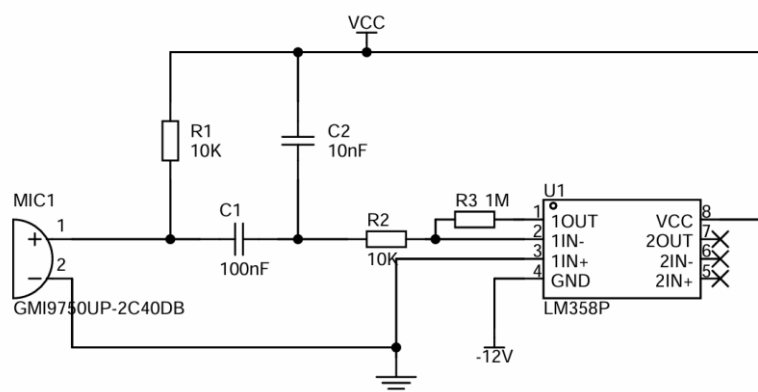


图 2 麦克风接收放大电路

4.2 信号发生器设计

该部分由运算放大电路、加法器、功率放大电路组成。为方便测量，该部分供电电源均使用 $\pm 12V$ 电压进行供电。单片机利用随机序列生成函数通过板载 DAC 和定时器分别配置输出白噪声和 $40kHz$ 幅度可调载波信号。滤直电路和反向放大器原理图如下，为使全功率输出时，载波信号最大，故放大倍数应为 7.2 倍，故 $RF1=7 \times R1$ ， $C4$ 为 $10\mu F$ 隔直电容。其中载波信号经过隔直电容和 4 倍反向放大器后 V_{pp} 最大达到 $13.4V$ 。

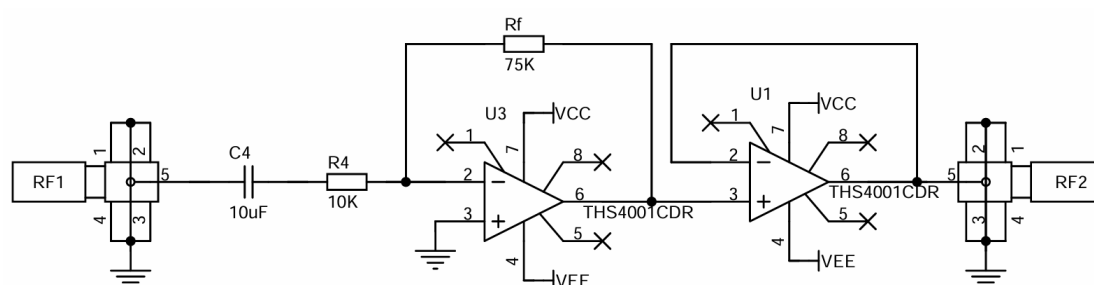


图 3 载波放大电路

信号调制器由 THS4001C 高速运放加法器构成，其放大增益为 1，原理图如下所示，其中 $R10$ 为平衡电阻，当 $R1/R2=R3/R5$ 时可省略。根据基尔霍夫定律，易得

$$V_{out} = \left(1 + \frac{R2}{R1}\right) \left(\frac{R5}{R3 + R5} V_{in1} + \frac{R3}{R3 + R5} V_{in2}\right)$$

令 $R1=R2=R3=R4=R10=10k$ 时，得到

$$V_{out} = V_{in1} + V_{in2}$$

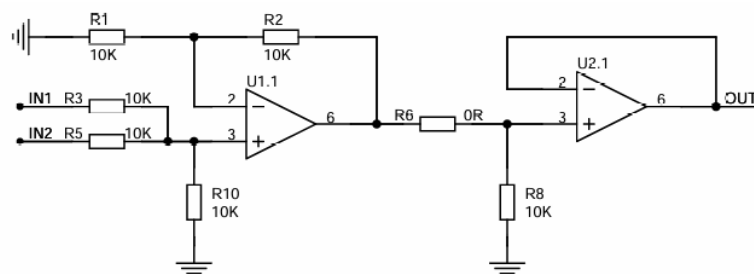


图 4 超声波加法调制电路

放大器构成放大后的载波信号与 $V_{pp}=3.3$ 的白噪声信号相加，成功调制出如下图所示的超声信号。



图 5 调制噪声信号

参考芯片手册，使用 TDA2030A 设计功率放大器，原理图如下

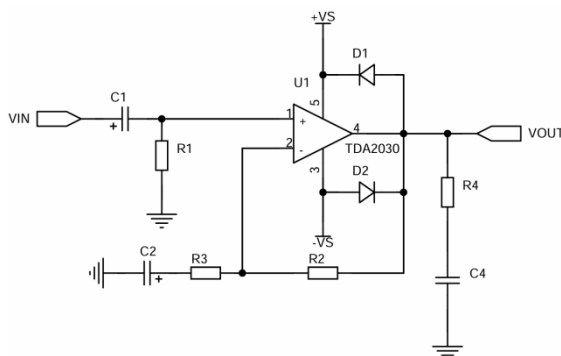


图 6 功率放大器

功率放大器输出信号 V_{pp} 最大达到 16.7V 左右，最终驱动超声波阵列 (40khz) 对外发射超声信号，使用户手机中产生无序白噪声，从而达到录音屏蔽

的效果。

4.3 软件处理流程图

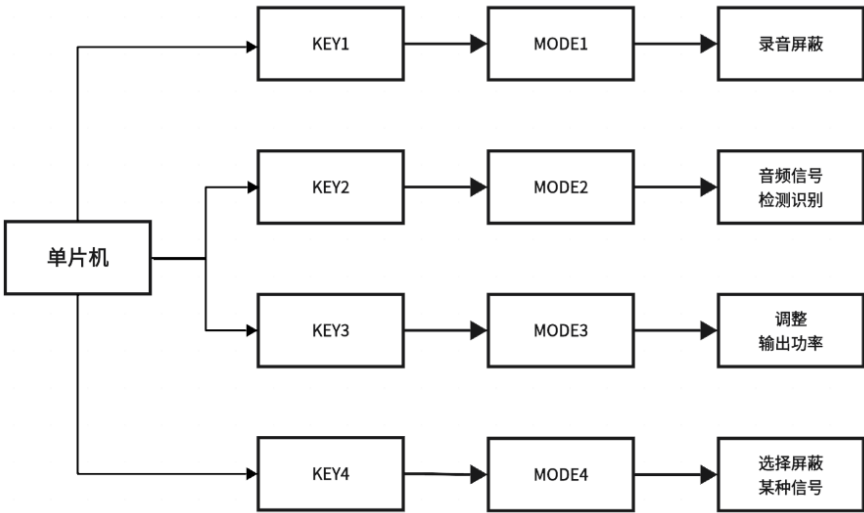


图 7 软件处理流程图

4.4 系统结构框图

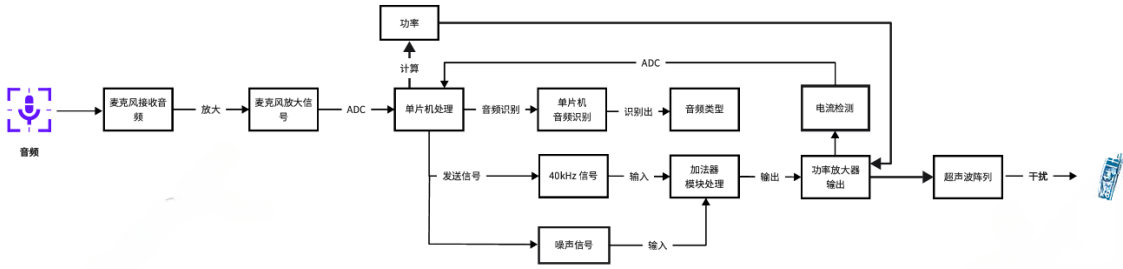


图 8 系统结构示意图

5. 测试方案与测试结果

5.1 测试方案

装置应处于环境音为 30-40dB 的安静环境下，声源端播放新闻联播人声或“卡农”音频，使音量大小在距离声源 1m 处为 50dB，超声波阵列面中心为原点，该面与水平面尽可能垂直，手机作为录音回放工具。通过调节载波幅度，将功率设定为全功率后，手机录音应当被白噪声全部掩盖，不断移远手机，直至录音回放能听见较为清晰的声音。同理保持距离为 1m~2m，不断调节手机与阵列面的角度，直至录音回放能听见较为清晰的声音。

5.2 测试数据

屏蔽距离与角度		屏蔽情况	屏蔽距离与角度		屏蔽情况
0°	0.8m	完全屏蔽	0°	1m	完全屏蔽
	1m	完全屏蔽	10°		完全屏蔽
	1.5m	完全屏蔽	20°		完全屏蔽
	2m	完全屏蔽	30°		完全屏蔽
	2.5m	完全屏蔽	40°		完全屏蔽
	3m	完全屏蔽	50°		完全屏蔽
	3.5m	完全屏蔽	60°		完全屏蔽
	4m	完全屏蔽	70°		完全屏蔽
	4.5m	听不清	80°		完全屏蔽
	5m	听不清	90°		听不清
	5.5m	无法屏蔽	100°		无法屏蔽
	6m	无法屏蔽	110°		无法屏蔽

表 1 满功率屏蔽角度效果

功率	1W	2W	3W	4W	满功率(8w)
屏蔽距离	131cm	240m	386cm	445cm	540cm

表 2 不同功率屏蔽极限距离

人声识别	新闻主播（男）	新闻主播（女）	音频识别	卡农	爱情转移	天空之城
	完全屏蔽	完全屏蔽		完全屏蔽	完全屏蔽	完全屏蔽

表 3 识别效果

6 结论

实验数据表明，本作品的屏蔽效果与功率相关，当超声波探头输出功率越大，则其屏蔽距离越远、屏蔽角度越大，故可通过增加载波幅度大小、载波频率、超声波探头数量达到增加超声波输出功率的目的，其屏蔽距离明显增加。由于超声波探头的载波幅度衰减率与角度有关，角度越大，衰减越明显，故通过添加两块超声波副阵列，其屏蔽角度将有效增加。超声波探头具有正负极，应当事先测试其正极位置，避免超声波在传播中不同相消波。超声波阵列可采用多种组合方式，包括矩阵型、蜂窝型等，实验发现，矩阵型可扩大传播面、分散传播能量，而蜂窝型可聚集传播能量、减小传播面。