

国二【E 题-哈工大】BY2HIT 队—数字-模拟信号混合传输 收发机

(2021 全国电赛真题 (E) —— 数字-模拟信号混合传输收发机)

摘要

本文提出了一种 FM、AM 混合的模拟信号和数字信号的同时传输方案。调制时先将数字信号进行 FSK-FM 基带编码，再与模拟信号相乘，实现模拟信号与数字信号的合路，最后通过 IQ 调制器调制到射频发送。接收时，利用 FM 解调器的限幅特性和 AM 解调器对频率不敏感的特性，实现模拟信号与数字信号的分离。分离后的模拟信号使用示波器观测，Arduino 读取数字信号并显示至四位数码管。测试结果表明，能够实现模拟与数字信号传输的功能，满足题目要求。

一、方案论证

对于本赛题来说，最大的技术难点是模拟信号和数字信号的同时传输。

方案一：最常见的方法是使用频分方式，是一种将多路基带信号调制到不同频率载波上再进行叠加形成一个复合信号的多路复用技术，原理图如图 1 所示。

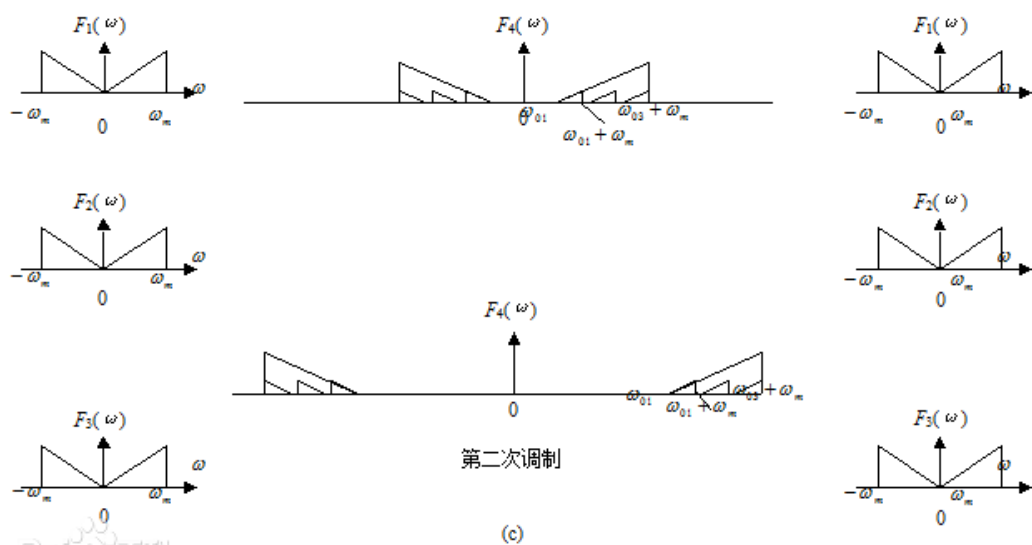
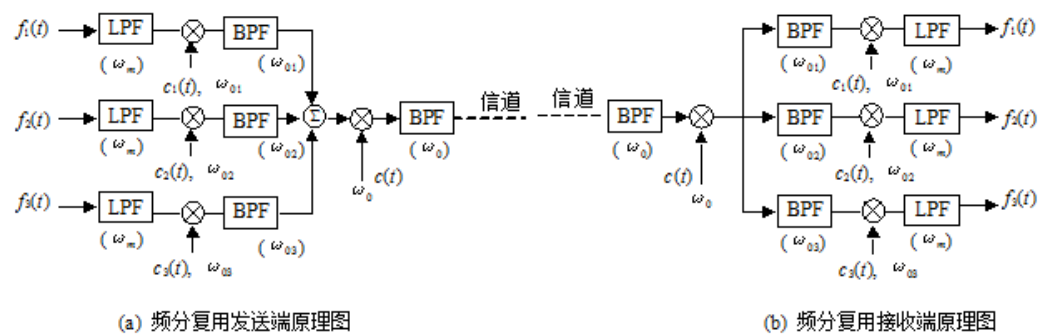


图 1 三路信号图。

图 1 频分方案原理图

频分方式需要将模拟信号或数字信号通过变频方式搬移到不同频率上，需要多次上变频下变频等操作，系统较为复杂且频分复用要求总频率宽度大于各个子信道频率之和，同时为了保证各子信道中所传输的信号互不干扰，应在各子信道之间设立隔离带，这就导致了频带利用率低从而造成信道带宽过大。

为此，我们提出了方案二：一种 FM、AM 混合的模拟信号和数字信号的同时传输方案。调制发射时先将数字信号进行 FSK-FM 基带编码，再与模拟信号相乘，实现模拟信号与数字信号的合路，最后通过 IQ 调制器调制到射频发

送，如图 2 所示。接收时，利用 FM 解调器的限幅特性和 AM 解调器对频率不敏感的特性，实现模拟信号与数字信号的分离，如图 3 所示。

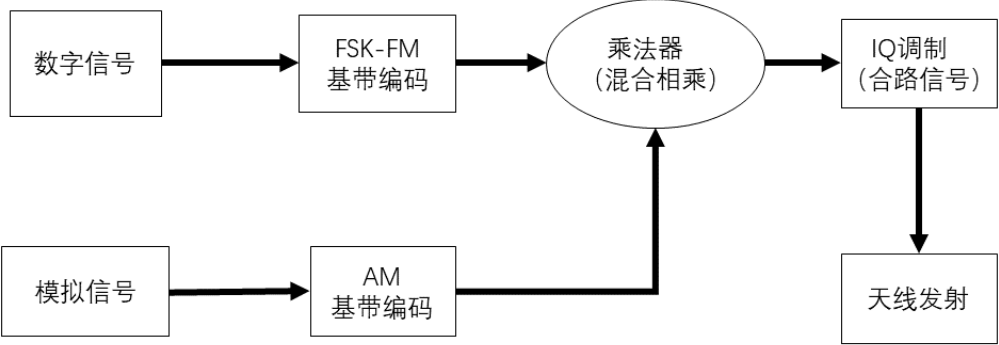


图 2 方案二发射原理图

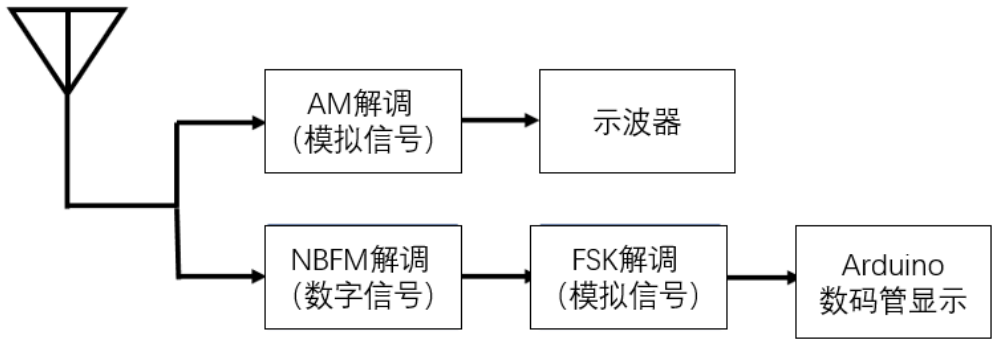


图 3 方案二接收原理图

二、理论分析与计算

2.1 AM 调制原理：

AM 是指对信号进行幅度调制。一般做法就是先在原信号上叠加一个直流信号，以保证信号

$$f(t) + A > 0$$

然后乘上一个高频的余弦信号，即得到调制后的信号

$$G(t) = [f(t) + A]\cos\omega t$$

在频域上的效果就是将原信号的频谱移动到 ω 处，以适合信道传输的最佳频率范围。 $g(t)$ 的包络线即 $f(t) + A$ ，用包络检测电路就可以接收并还原信号了。调幅可以采用相干解调，将已调信号乘以载波后通过低通滤波器并在幅度上做一定调整即可以恢复出原来的调制信号。在对模拟信号进行调制解调程序中应避免出现过调幅。

2.2 FSK 基带编码原理：

按数字数据的值（0 或 1）调制载波的频率。例如对应二进制 0 的载波频率为 F_1 ，而对应二进制 1 的载波频率为 F_2 。该技术抗干扰性能好。

2.3 NBFM 调制原理：

如果 FM 信号的瞬时相位偏移满足如下公式：

$$|k_{FM} \int f(z) dz| \ll \frac{\pi}{6}$$

此时 FM 信号的频谱宽度比较窄。有窄带频移的一般表达式：

$$S_{NBFM}(t) = A \cos \omega_c t + [A k_{FM} \int f(\Sigma) dz] \sin \omega_c t$$

2.4 IQ 射频调制原理：

调制信号可以使用幅度和相位（矢量）的极坐标来表示。IQ 调制由于频谱效率较高，因而在数字通信中得到广泛采用。IQ 调制使用了两个载波，一个是同相 (I) 分量，另一个是正交 (Q) 分量，两者之间有 90° 的相移(见图 4)。

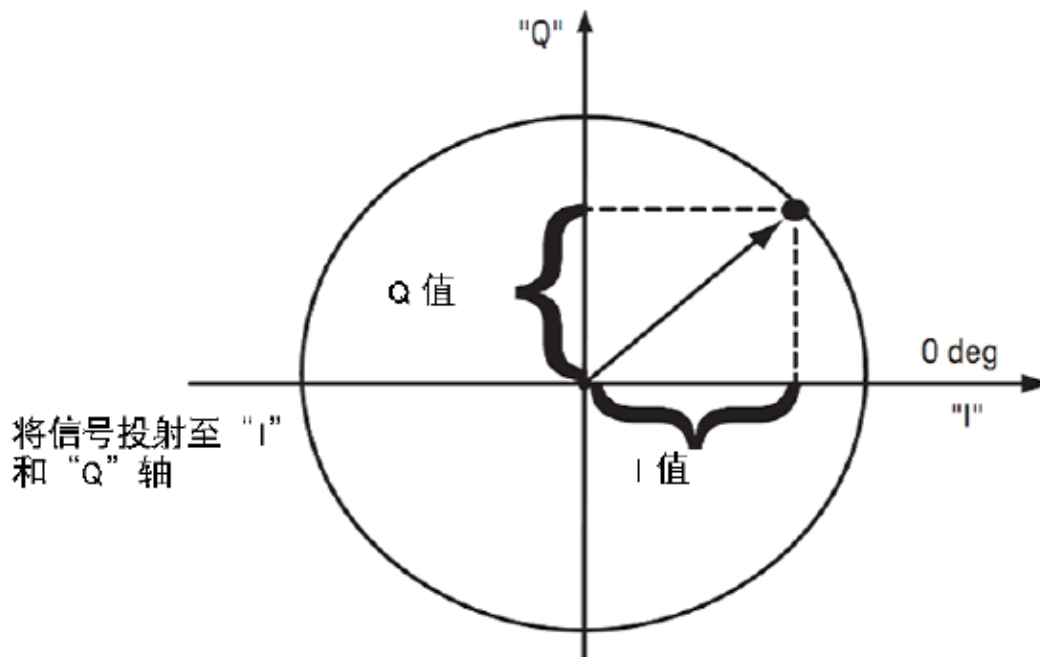


图 4 I/Q 相量图

IQ 调制是矢量的方向问题，正交分量就是两个信号矢量正交。因为 I 和 Q 是在相位上面正交的（不相干），可以作为两路信号看待。所以频谱利用率比单相调制提高一倍。但是 IQ 对解调要求高于单相（必须严格与 I 相差 90° 的整数倍，否则 Q 信号会混进 I，I 也会混进 Q）。IQ 调制的主要优势是能够非常轻松地将独立的信号分量合成到一个复合信号中然后再将复合信号分解为独立的信号分量。

2.5 IQ 带宽分析：

模拟信号为 AM 基带调制，其频率带宽为 $2 * f_h$ ，即调制信号频率的两倍。数字信号为 FSK-FM 基带调制，其带宽为 $2*(mf+1)*f_m$ (其中 “mf” 是调频指数，“f_m” 是调制信号的频率)。又因为射频调制为 IQ 调制，故合路信号带宽为模拟信号带宽与数字信号带宽之和，因为模拟信号中 f_h 最大值为 5kHz，故模拟信号带宽最大值为 10kHz，而数字信号中 f_m 为 2.8kHz，mf 为 0.25kHz，所以数字信号带宽为 12.6kHz。综上，总带宽为 22.6kHz，满足题目不大于 25kHz 带宽的需求。

三、电路设计与程序设计

3.1 发射部分

发射硬件连接流程图如下图 5 所示。

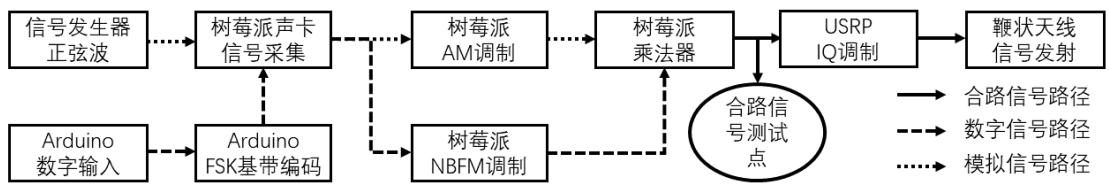


图 5 发射流程图

模拟信号为信号发生器产生的一定频率且峰峰值为 60mV 左右的正弦波信号，进入声卡 hw2.0；数字信号首先在一块 Arduino（编号为 1）上通过按钮产生一组 4 位数字并在四位 7 段位数码管上显示，之后 Arduino_1 将该 4 位数字以 HEX 的文件格式经过一定程度编码后通过串口发送至另一块 Arduino（编号为 2），Arduino_2 接收到数据包后通过 FSK 基带编码将其转为模拟信号，进入声卡 hw1.0。Arduino_2 外围电路原理图如下图 6 所示。

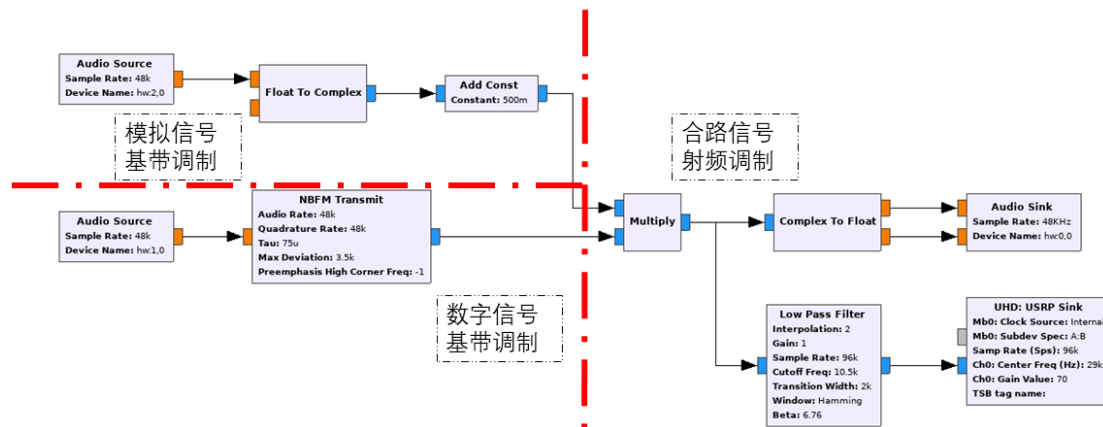


图 7 GNU Radio 发射流程图

发射端 Arduino_1 首先判断按下的是哪个按钮，按下按钮时一是要消抖二是要仍保持数码管显示，之后完成相应按钮的执行任务，在发射状态下通过串口发送相应的数据包，之后进入下一次循环。其程序流程图如图 8 所示。

发射端 Arduino_2 首先从串口读进来自 Arduino_1 的数据，对其进行 aprs 格式的编码形成数据帧，然后对数据帧进行 1bit 的遍历，当数据位是 1 的时候对一个计数器加一个值；当数据位是 0 的时候对一个计数器加另一个值，之后这个计数器去查正弦表，正弦表的输出经过一个电阻网络组成的 dac 后输出 FSK 信号。其程序流程图如图 9 所示。

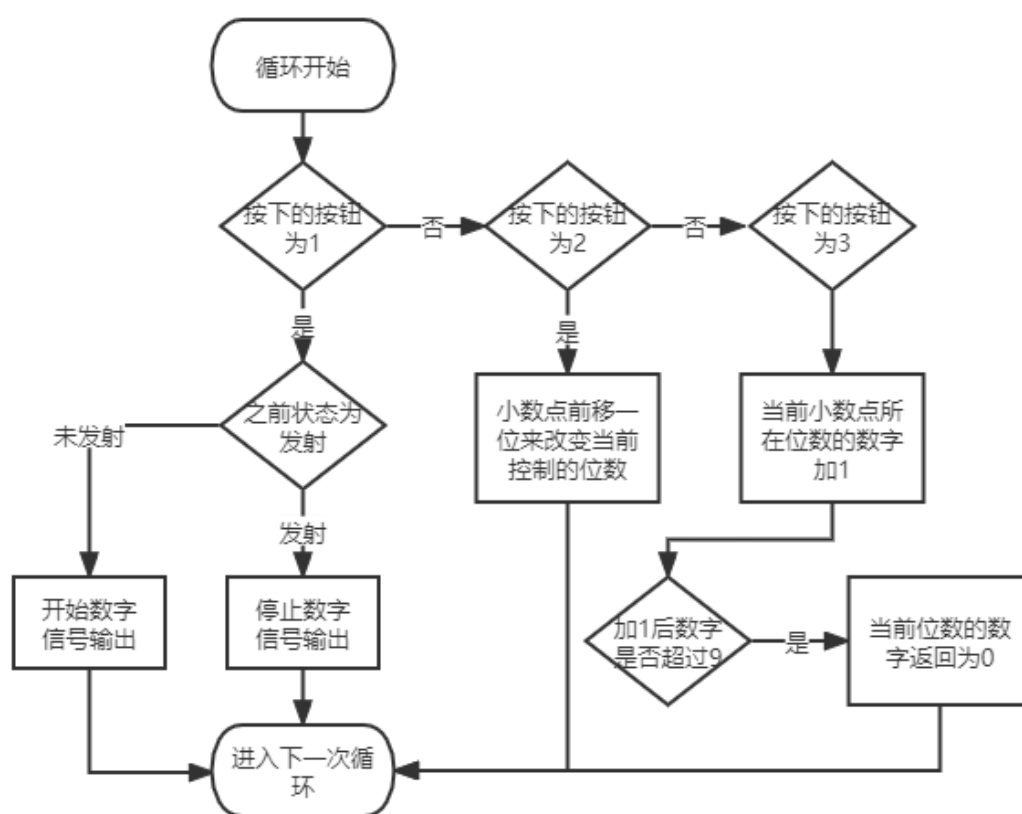


图 8 发射端 Arduino_1 程序流程图

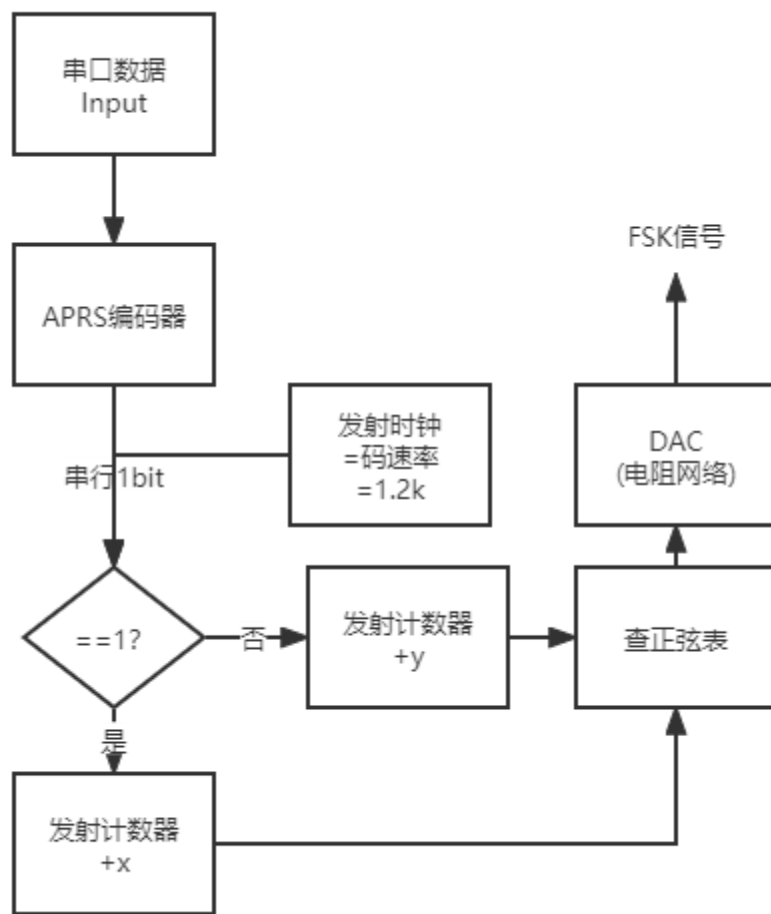


图 9 发射端 Arduino_2 程序流程图

3.2 接收部分

接收硬件连接流程图如下图 10 所示。

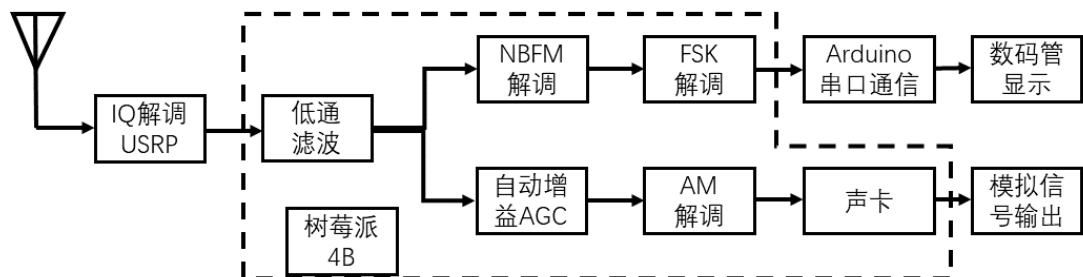


图 10 接收流程图

射频信号通过接收端的鞭状天线进入 USRP，经过 IQ 解调后实现下变频，之后基带低频信号进入树莓派 4B。实现模拟信号与数字信号的分离与解调部分采用 SDR 架构，利用 GNU Radio 完成在树莓派 4B 中完成，GNU Radio 流程图如图 11 所示。首先基带信号经过一个低通滤波器后，一路经过 NBFM 解调后隔离掉直流成分后再进行 AFSK 解调还原出原始数字信号的二进制序列，通过串口发送至接收端 Arduino，Arduino 识别处理数据包后将对应 4 位数字显示在数码管上，完成数字信号的传输流程；另一路先经过 AGC 模块后进行 AM 解调，最后通过声卡输出至接收端的模拟信号观测点。

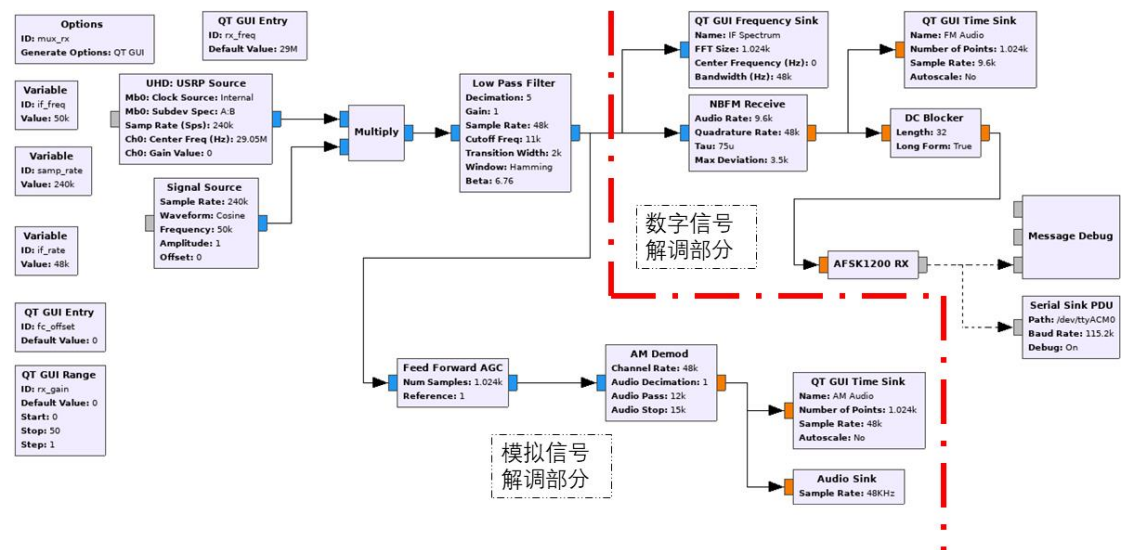


图 11 GNU Radio 接收流程图

接收端 Arduino 每隔 2ms 会进入一次中断，如果接收标志存在且计时标志未被重置（接收到新数据时会设置接收标志并重置计时标志）则计时标志减 1 直

至为 0，如果为零则将接受标志置为 2 并熄灭数码管，从而达到时延效果，其程序流程图如图 12 所示。

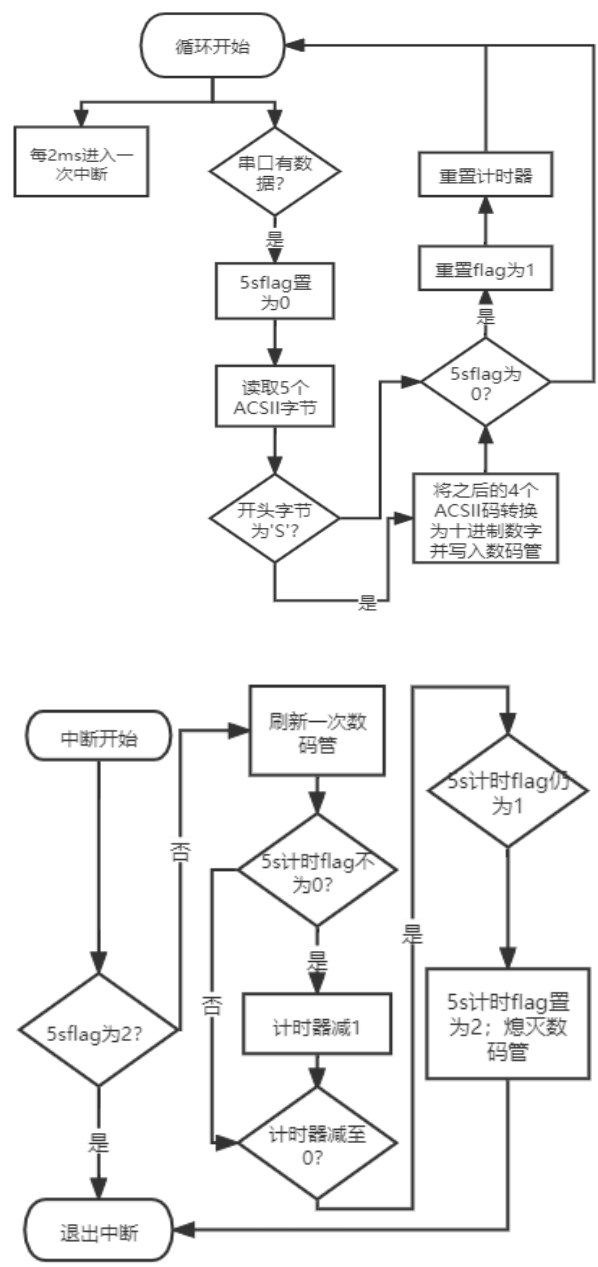


图 12 Arduino 接收端程序流程图

四、测试方案与实验测试结果

4.1 测试方案

(1) 模拟信号测试：用信号发生器产生 50Hz~10kHz 的峰峰值 60mV 左右的正弦波输入至发射端的模拟信号端口，在接收端用示波器在声卡测试点进行观测。

(2) 数字信号测试：用发射端的控制模块上的第一个按钮开启发射，用第二个按钮选择变换的位数，用第三个按钮控制输出的数字，在接收端的数码管观察接收到的数字，更换输出数字，观测接收端的数码管数字变化，之后关闭发射，观测接收端数码管显示数字是否保持 5 秒钟后熄灭。

(3) 合路信号观测：在发射端的树莓派音频输出口上接上测试线，用示波器连接测试线进行观测。此时可以测量功率，分别测量电压与电流，二者相乘即可。

4.2 测试结果

(1) 模拟信号统计结果如下表 1 所示

发射端模拟信号		接收端结果		
频率(Hz)	峰峰值(mV)	频率(Hz)	峰峰值(mV)	对应图片
4.79K	60	4.620k	160	图 13
3K	60	3.32k	140	图 14
1K	60	1.03k	160	图 15
100	60	106.3	160	图 16

表 1 模拟信号结果测试表



图 13 施加 4.79kHz 模拟信号

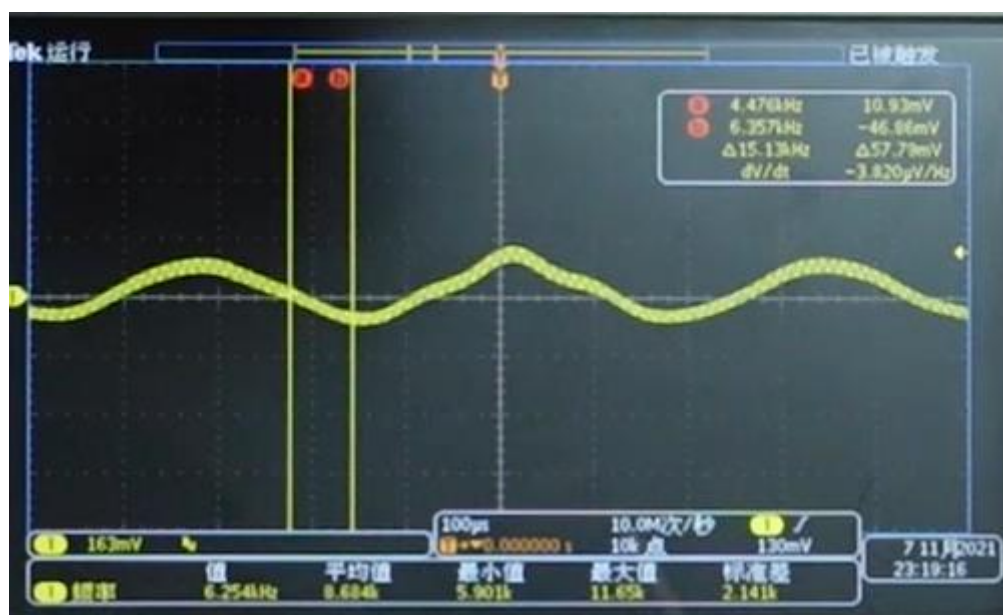


图 14 施加 3kHz 模拟信号

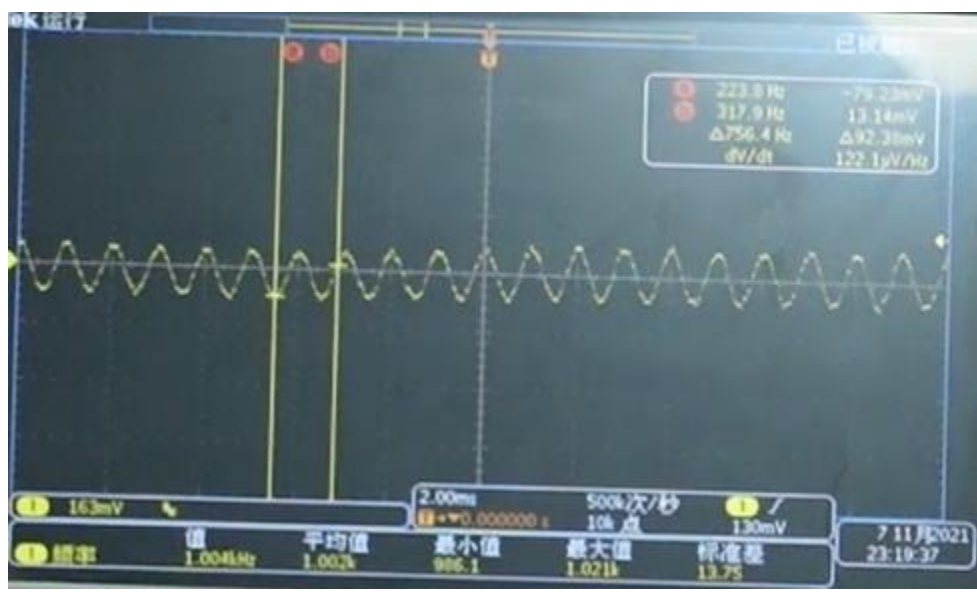


图 15 施加 1kHz 模拟信号

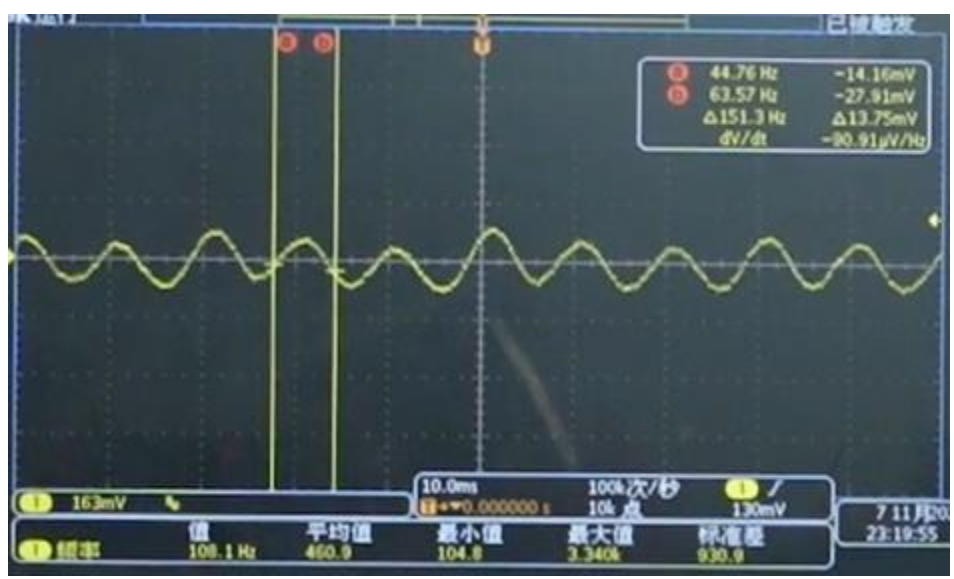


图 16 施加 100Hz 模拟信号

分析认为波形失真或不稳定原因有：ADC 位数有限，采样精度不够；噪声干扰；人体对电磁波传播的干扰。

(2) 数字信号结果如下图 17、18 所示



图 17 数字信号发射端



图 18 数字信号接收端

在停止发送数字信号后，接收端约 5 秒后熄灭显示数码管。

(3) 合路信号观测结果如下图 19、20、21、22、23 所示



图 19 混合传输时模拟信号



图 20 混合传输时频谱显示



图 21 混合传输时数字信号

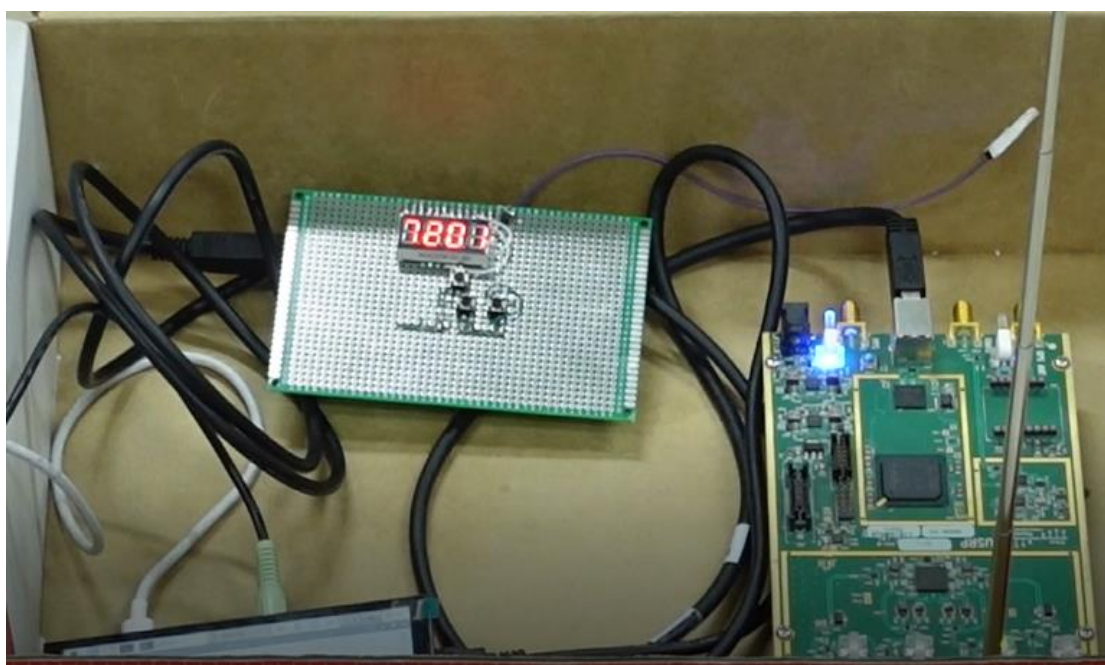


图 22 混合传输时数字信号显示



图 23 混合传输时合路信号

(4) 功率测量结果：电压测量为 5.02V，电流测量为 936mA。功率约为 4.7W。

五、结论

进行了方案论证、理论分析、电路设计、程序设计与测试，测试结果表明，能够实现模拟与数字信号传输的功能，满足题目要求。