



南方科技大学
SOUTHERN UNIVERSITY OF SCIENCE AND TECHNOLOGY

全国大学生电子设计竞赛设计报告

数字-模拟信号混合传输收发机

题 目：	数字-模拟信号混合传输收发机
成 员：	陈天阳 潘心仪 王明希
系 别：	电子与电气工程系
指导老师：	张利君

数字-模拟信号混合传输收发机

陈天阳 潘心仪 王明希

南方科技大学

摘要: 全国大学生电子设计竞赛题目要求设计能够实现模拟-数字信号混合传输的无线收发机。报告介绍了项目组构建通信系统的诸多方案并选择了幅度调制精确适应带宽要求。项目组基于STM32与模拟信号运算电路完成了频分复用无线信号的发射，依据包络检波与带通滤波实现了信号分离并实现了后续解调。项目组构建了实物作品并验证了电路功能。

关键词: 无线通信，模数混合，频分复用，幅度调制，STM32。

Design of a Digital-Analog Signal Mixed Transmission Transceiver

Tianyang Chen, Xinyi Pan, Mingxi Wang

Southern University of Science and Technology

Abstract: This report presents the design of a wireless transceiver capable of transmitting and receiving mixed analog and digital signals, which was required for the National College Electronic Design Competition. The project team proposed various communication system designs and selected amplitude modulation as a suitable modulation scheme to meet the bandwidth requirements. The team utilized an STM32 microcontroller and analog signal processing circuits to transmit frequency-division multiplexed wireless signals. Envelope detection and bandpass filtering were employed for signal separation and subsequent demodulation. The team constructed a prototype and verified the functionality of the circuit.

Key Words: wireless communication, analog-digital mixing, frequency-division multiplexing, conventional amplitude modulation, STM32.

目录

目录已引入超链接，支持点击跳转

1 方案论证

1.1 比较与选择

1.1.1 AM的频分复用

1.1.2 AM的时分复用

1.1.3 相位调制

1.1.4 最终选择

1.2 方案描述

1.2.1 发射机方案

1.2.2 接收机方案

2 理论分析与计算

2.1 数字-模拟信号合路

2.2 调制方式

2.3 信道带宽设计策略

3 电路与程序设计

3.1 数字-模拟信号合路

3.2 调制发送

3.3 接收解调与分离电路设计

3.4 控制程序流程

3.4.1 发射机程序

3.4.2 接收机程序

4 测试与结果

4.1 基本要求

4.1.1 实现模拟信号传播

4.1.2 实现数字信号传播

4.1.3 实现数字模拟混合传播

4.1.4 频谱宽度

4.2 发挥部分

4.2.1 数码管五秒后自动熄灭

4.2.2 功耗

4.2.3 信号频谱拓展

1 方案论证

1.1 比较与选择

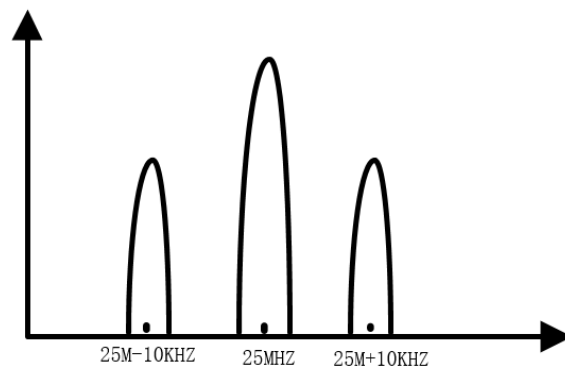
1.1.1 AM的频分复用

优点：数字信号和模拟信号在频率上进行分离，互不干扰，容易实现。

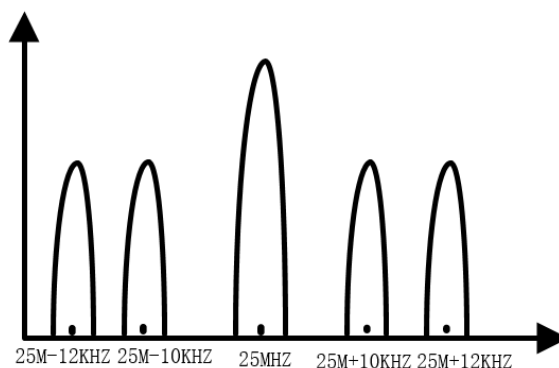
缺点：需要较宽的带宽，且对信道的保护比要求较高。

如果选择使用AM的频分复用，即模拟信号为50-10kHz,数字信号选用其他频率直接叠加，输出部分使用不同的滤波器区分出来。

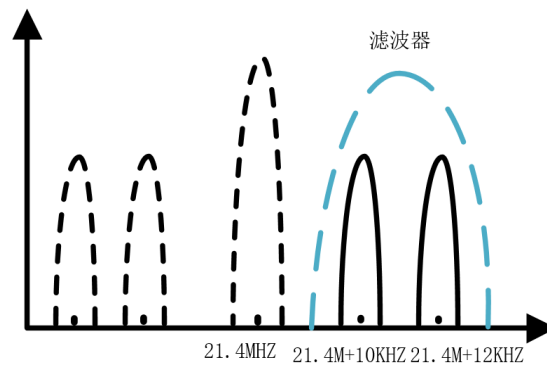
此方案的难点在数字信号的频率选择。以25MHz为载波则正常来说AM调制频谱如下图所示，频谱带宽已经达到20KHz,而题目要求带宽不超过25KHz。那么数字信号频率理论上最大只能小于12.5KHz。



但是数字信号发送方波，会有很多谐波，如果全部滤除会丢失数字信息成为标准正弦波。如果不滤除，谐波的频率为基波倍数，一定会超过题目标准。此外10K和12K相差很小，后级做区分的高低通滤波器也不便于设计。所以这种方法不可行，需要设计其他方法。



可以在AM调制基础上加滤波器构成SSB调制只保留单边带（如图中保留上边带）



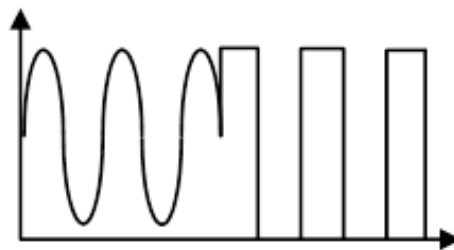
这里用窄带滤波器（常用晶体滤波器）由于晶体有一般常用的频率，所以选21.4MHZ做载波。但是数字的谐波也有一定影响，三次以上谐波必须小才能保证25KHZ带宽。而且同上面两个频段离得近，后期也不便于区分。

1.1.2 AM的时分复用

优点：有效利用信道资源，在同一信道上同时传输数字信号和模拟信号。

缺点：需要精确的同步，对时钟稳定性要求较高，且实现相对复杂。

解调复杂，需要判断模拟信号和数字信号并恢复出来模拟。对于10KHZ的模拟如果单纯正弦波测频率的话，单片机可以实现，之后直接DDS输出对应频率。但是题目中语音信号当时不确定是否含有多个频率，如果多个频率则需要用高速ADC采样在高速DAC输出，需要用FPGA,耗时长且对编程能力要求高，所以不采用这个方案。



1.1.3 相位调制

优点：具有较好的抗噪声性能，能提高信号的传输质量。

缺点：实现相对复杂，且对信号处理能力要求较高。

如16QAM，发射机需要用DDS和乘法器做信号相位变化，需要乘法器很多，电路复杂，解调用相干解调也很复杂。效果预计很好但是耗时长，因此不采用。

1.1.4 最终选择

综上所述，数字信号频率高过模拟带宽不好控制，由于模拟信号50-10KHZ，我们最后选择了20HZ（每一个电平40HZ）的数字信号，直接AM调制。

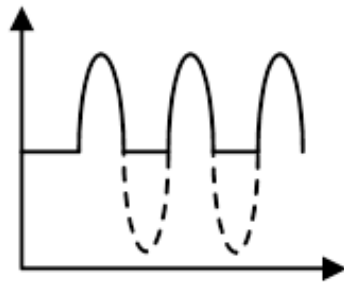
优点是频谱一定容易满足，而且省去很多滤波器实现简单。

缺点有两个：

1. 数字收发慢。用BCD编码的话4位十进制编码为16位二进制，还要插入定位帧，发一遍就接近半秒，如果接收机难以一次检测成功则很容易超过两秒。不过我们认为数字信号传输质量应该还是可以保证的，最后事实确实如此，数字收发很准反应也很快。
2. 模拟信号低频段50-100HZ很容易受到数字谐波干扰。对20HZ数字信号（假定为占空比为50%的方波）的三次和五次谐波分别为基波的1/3和1/5，频率为60HZ和100HZ，对扩展要求中50-100HZ语音有影响。

方案设想的优化方式有两种：

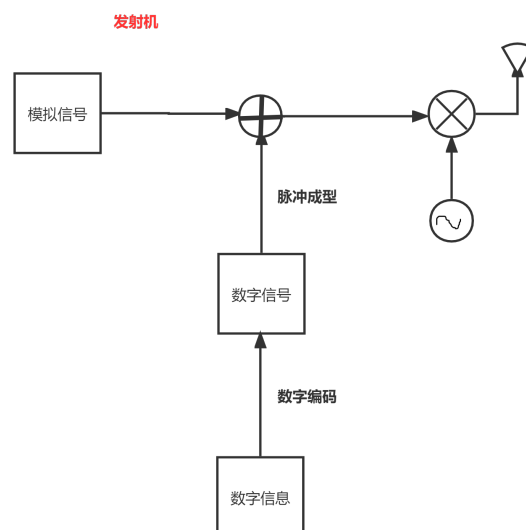
1. 数字信号频率改为15HZ左右，三次谐波则为45HZ左右，五次谐波幅度较小，且在输出时RC滤波有一定衰减，基本可忽略。但语音信号高通滤波需要避免三次谐波影响，过渡带很窄，阶数很高。
2. 数字信号改为DAC产生半（或整）个正弦，如下图，或者数字经过ASK调制（可以直接使用DDS一开一停来实现），从根本上减少谐波产生。



1.2 方案描述

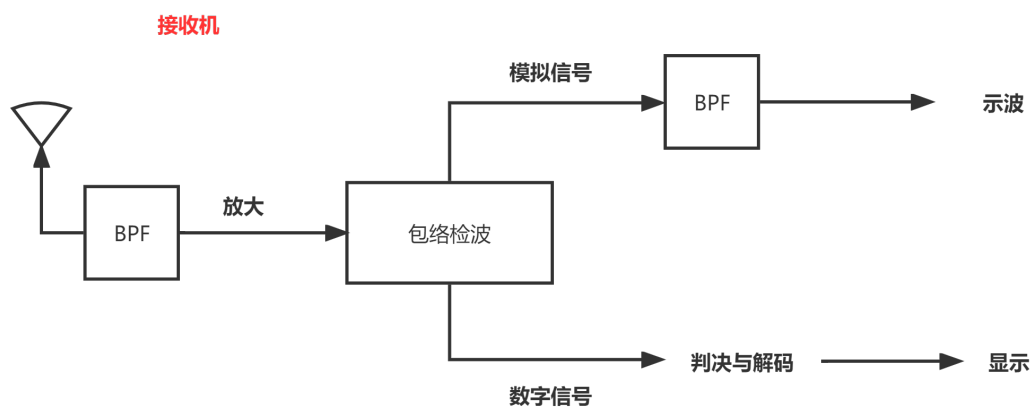
1.2.1 发射机方案

如下图所示，通过对数字信息进行数字编码产生数字信号，经过低通滤波器脉冲成型后，使用加法器将模拟信号与数字信号相叠加，再利用载波信号进行调制后通过天线发射信号。



1.2.2 接收机方案

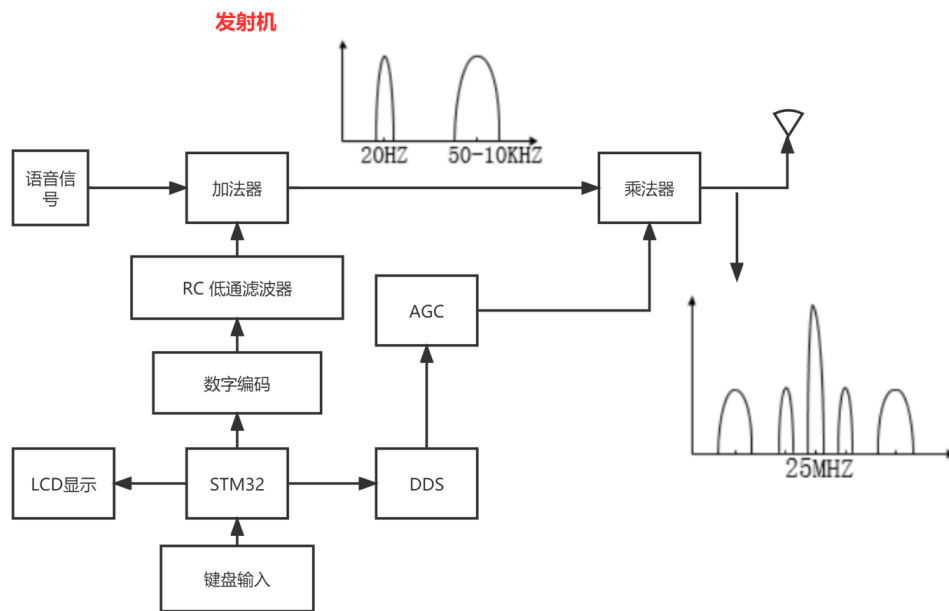
如下图所示，通过天线接收到的信号通过带通滤波器后再进入低噪声放大器进行放大，经过包络检波后被分为数字信号和模拟信号两部分。模拟信号经过带通滤波器处理后在示波器检测，数字信号经过判决与解码以后在显示屏显示。



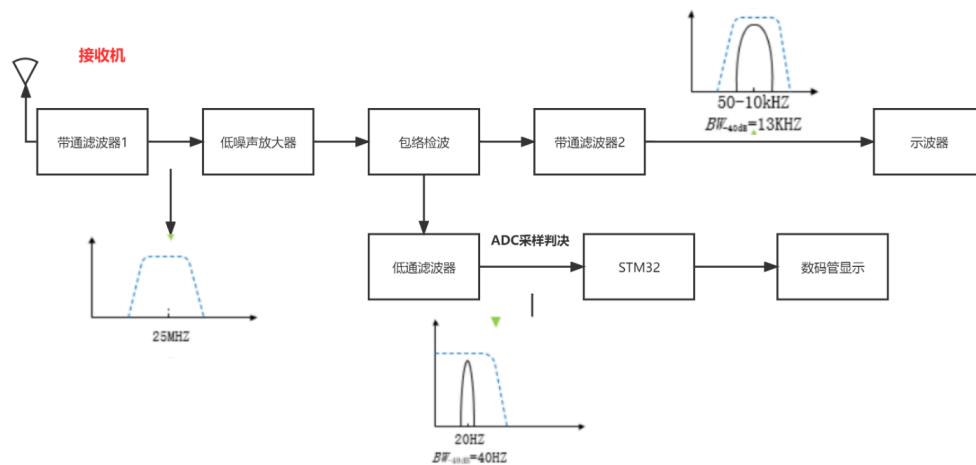
2 理论分析与计算

根据方案设计，现进行电路理论分析与计算。

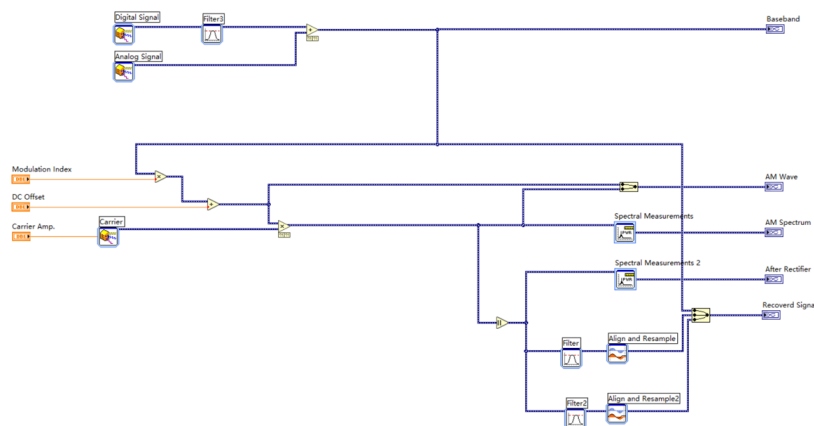
发射机的理论原理图如下图所示：



接收机的理论原理图如下图所示：



为进一步论证实验设计可行性，项目组利用LabVIEW进行了仿真运算，LabVIEW虚拟收发机程序框图如下所示：



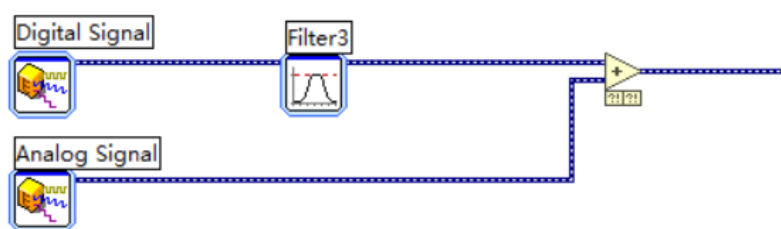
2.1 数字-模拟信号合路

模拟信号产生于信号发生器，直接输入电路。

数字信号由STM32产生。根据STM32键盘输入的数字，设计程序一方面直接显示输入，另一方面进行编码，编码结果为高低电平信号。

在仿真过程中，项目组观察到电平信号直接与模拟信号进行加法将会导致解调产生的模拟信号中包含尖峰，出现较为明显的失真，项目组决定在数字信号进入加法器之前先通过RC低通滤波。经过仿真实验，低通滤波的截止频率在100Hz时效果较为良好，在实际的电路实现中，可以使用100nF的电容器与20k Ω 的可变电阻串联，将输出端口接在电容两侧实现低通滤波。

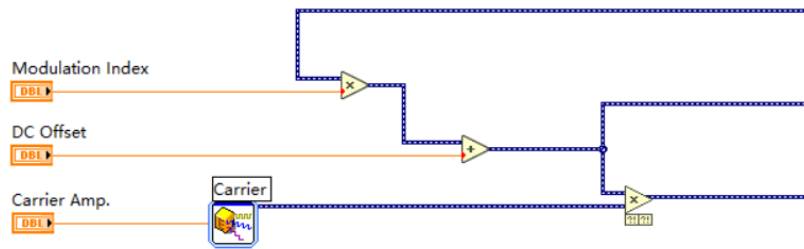
虚拟发射机中模拟数字信号合路的实现框图如下所示：



2.2 调制方式

依照设计方案，本次项目采用非同步的幅度调制（Conventional Amplitude Modulation）。完成数字模拟信号合路后，设计程序使用STM32控制正弦信号发生器（DDS）产生载波信号，载波信号通过高频放大器（AGC）后进入乘法器与加法器运算结果相乘，所得信号通过天线进行发射。

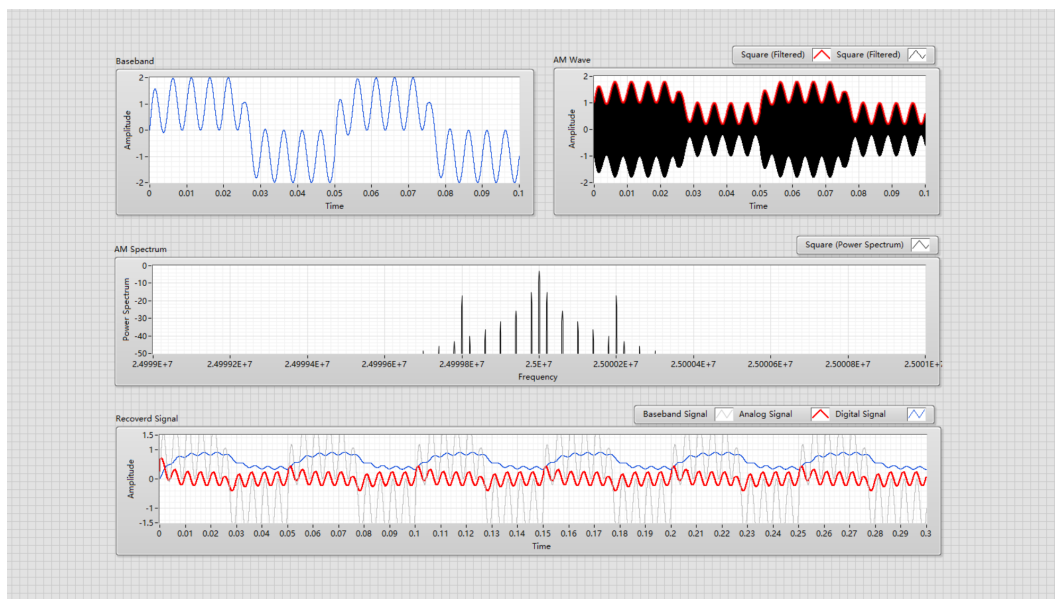
虚拟发射机中调制信号的过程如下图所示：



2.3 信道带宽设计策略

为确保LabVIEW仿真结果进一步接近实际实验结果，数值计算过程中将载波频率直接规定为实验中的载波频率，并选择与载波幅度相同的直流偏置。为确保信噪比并避免过调制，仿真实验将数字与模拟信号的幅度控制在近似相等的情况，并将调制因数控制在0.35左右。

为保证数值运算结果的精确性，依据奈奎斯特（Nyquist）采样定律，实验选取了2.4倍最高频率作为采样率。此时的数值运算量极大，为确保仿真程序的稳定性，实验计算了0.3秒以内的时域信号，并对于时域信号做快速傅里叶变换（IFFT）对其进行频谱分析，其基带信号，调制信号的时域波形，已调信号的频谱，恢复信号的时域波形如下图所示：

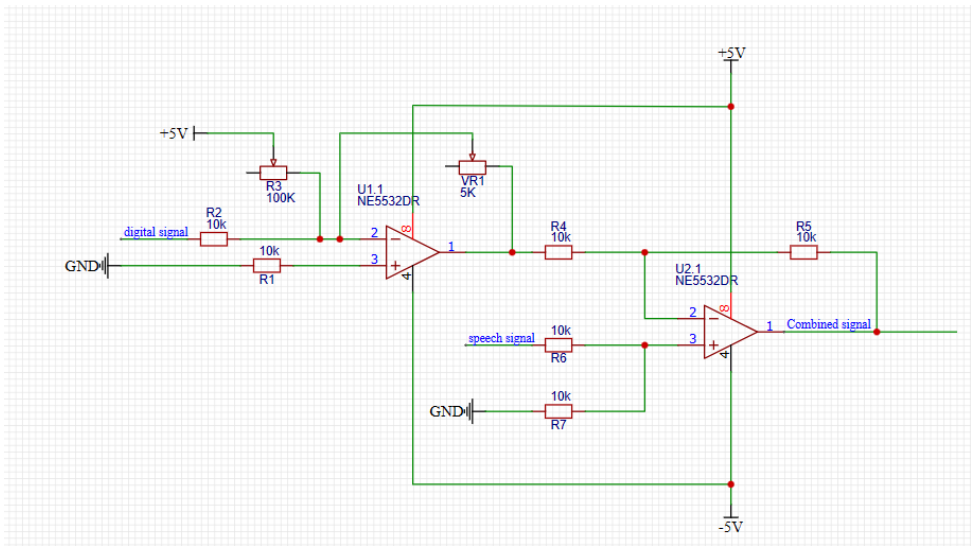


根据仿真计算结果，信号的-40dB带宽为调制信号频率 $\pm 2\text{kHz}$ ，根据幅度调制理论：幅度调制的过程只是基于载波做频率平移，计算得本次设计项目设计系统在发挥部分输入条件下的传输带宽为24kHz，低于项目要求的25kHz限制。

综上所述：经计算，项目的理论设计能够实现项目基本要求与发挥部分，同时满足题目规定的项目要求。

3 电路与程序设计

3.1 数字-模拟信号合路



数字模拟混合加法电路

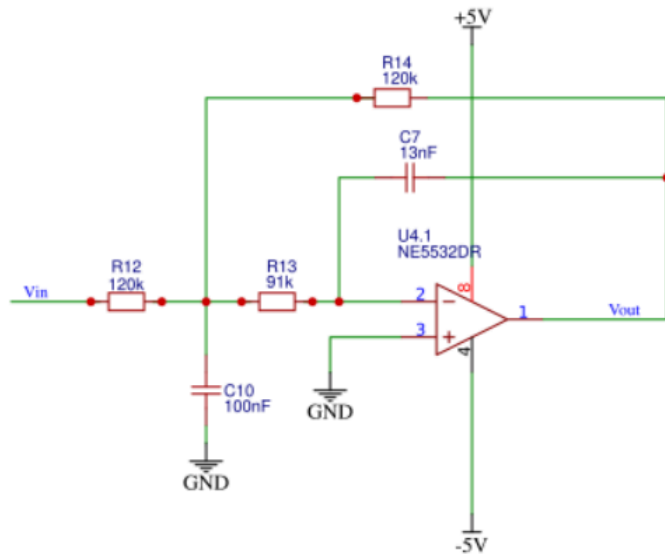
注：设计中部分电阻采用滑动变阻器以便于控制运放电路的增益。

数字信号：通过STM32F103实现数字信号存储与传输。STM32F103把键入4个0~9的一组数字编码成脉冲信号，之后通过一阶RC低通滤波电路减少高次谐波成分使脉冲成型。图中的digital signal为脉冲成型后的数字信号。

产生的数字信号的幅度为 $\pm 3.3\text{V}$ ，而在调制部分使用的乘法器有一定的输入幅度限制（所使用的AD835乘法器为 $\pm 1\text{V}$ ），故需要对数字信号进行缩放。这里通过设计的反向放大器U1.1实现。经过缩放后的数字信号通过加法器和模拟信号进行叠加，产生数模混合信号。

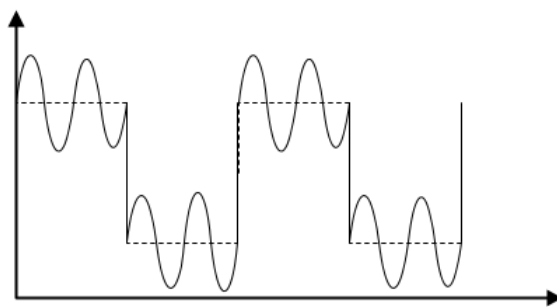
对混合信号进行调制时，采用AM异步解调。需要注意的是，在AM异步调制中，由于调制信号的幅度不受载波信号的影响，因此调制后的信号幅度可能存在负值。因此，在设计电路时需要保证模拟信号幅度不超过载波信号的幅度，以避免信号失真和抖动。解决方案为对数字信号 $x(t)$ 添加一定的直流偏置量 A ，确保 $A+x(t)$ 为正。电路设计中通过在U1.1增加一个直流电压输入实现。

但是，由于数字信号存在尖锐的上升下降沿，其频谱宽度超过数字信号的传输频带从而干扰模拟信号的传输，在仿真中，这一现象体现为模拟波形的失真。为此，我们设计了一个低通滤波器，以解决数字信号高次谐波干扰模拟信号的问题。



模拟信号：通过信号发生器产生，即图中的speech signal。

最后产生的数模混合信号波形大致为：



注：这里把数字信号理想化成方波处理，实际波形应该避免尖锐部分对模拟信号解调产生影响。

3.2 调制发送

载波信号：通过AD9959生成DDS信号。

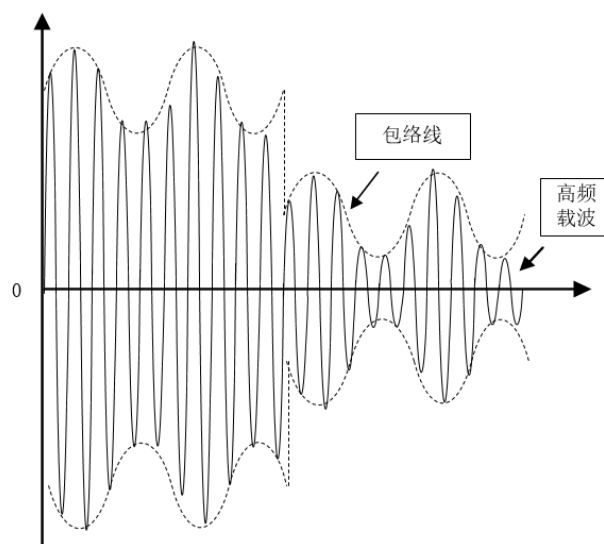
注意其幅度需要大于调制信号，否则无法正常调制(待解释)。

通过AD603—AGC模块对DDS信号进行放大，注意控制幅度不超过乘法器AD835的输入范围限制 ($\pm 1V$) 。

调制信号：加法电路输出的混合信号。

信号发送：选用27MHz短波天线进行发送调制后的数模混合信号。

之后经过模拟模拟乘法器AD835后输出波形如下图，外围包络线波形和加法电路输出波形类似，这里可以看到如果调制信号有负，包络线会越过零刻度线相交，解调容易发生失真。



3.3 接收解调与分离电路设计

信号接收：选用27MHz短波天线进行信号接收。

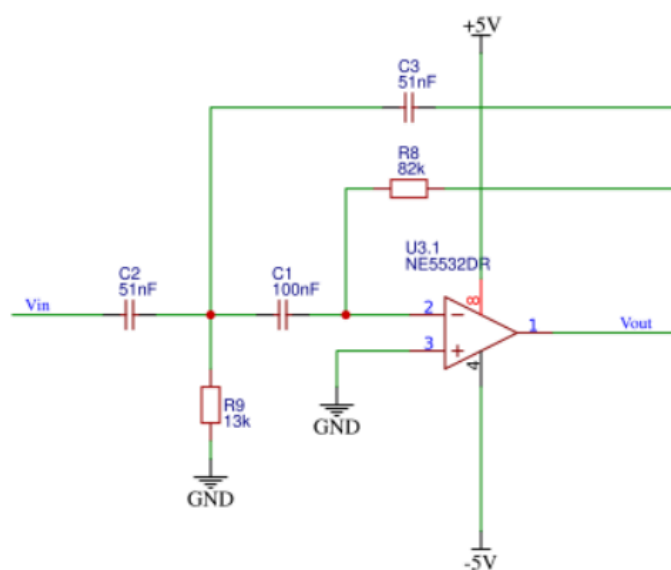
预处理：接收到的混合信号首先RC选频网络确定中心频段，之后通过VCA821_AGC模块进行低噪声放大，通过射频包络检波器形成包络线，

电路分离：在面包板上将包络信号分为两路，之后使用带通和低通区分模拟和数字信号，实现电路分离。

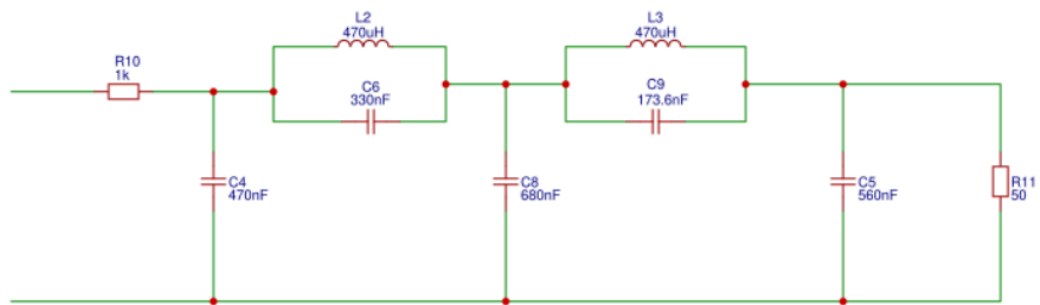
信号解调：

第一路：提取模拟信号。使用10KHz低通+70Hz高通组成的带通滤波器

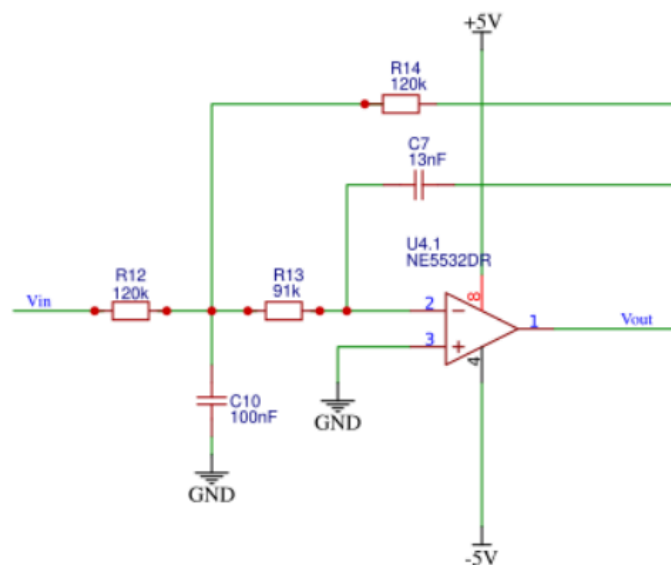
1. 信号通过有源高通滤波器（70Hz高通）



2. 处理后的信号通过无源低通滤波器（10kHz低通）

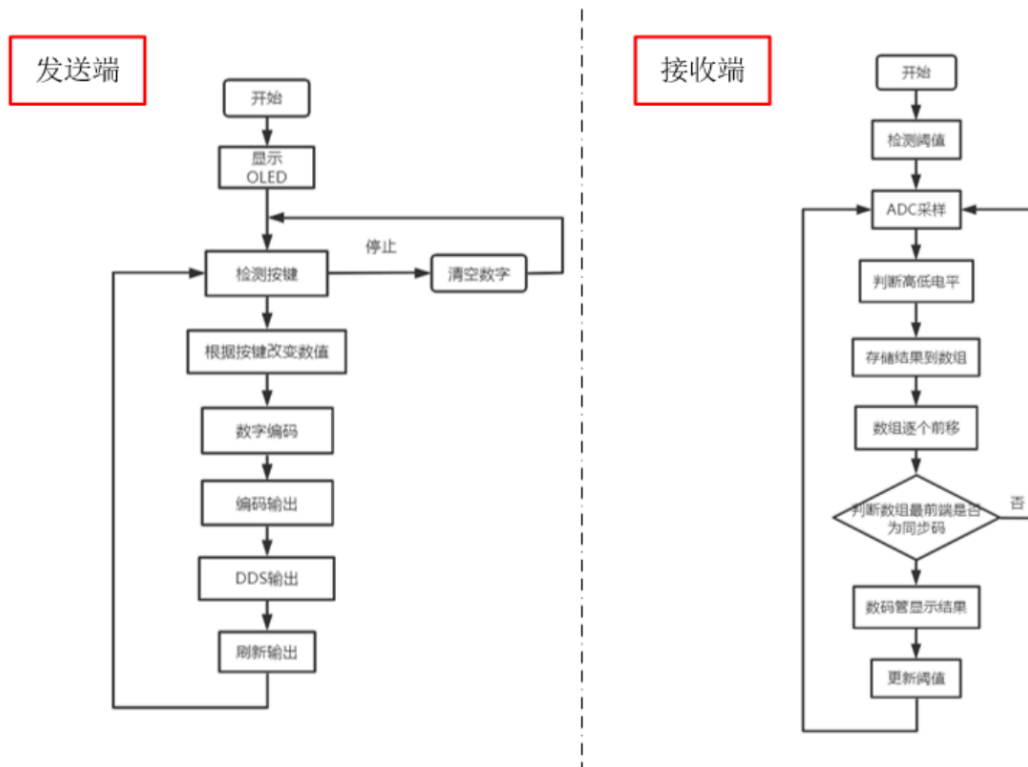


第二路：提取数字信号。使用40Hz低通滤波器，经过STM32的ADC采样判别，解码后在输出端串联的数码管上显示四位数字。



3.4 控制程序流程

本次实验的程序设计框图如下图所示：



3.4.1 发射机程序

在项目中，我们使用STM32控制无线通信系统的发射机。我们基于AD9959的DDS控制程序进行修改，并进行了页面的优化，添加了数字键入和BCD编码的显示。最终，我们使用IO口高低电平输出数字信号。为了保证数字信号发送频率稳定不受其他程序干扰，我们将数字信号发送功能放入高优先级的定时器中断中，可以通过开关中断来开启和关闭数字发送。

我们使用DDS控制板STM32F1，接AD9959作为DDS输出为DDS的CH1通道。数字信号发射引脚为DATA_OUT，使用I/O高低电平输出，也可以改为DAC输出。发射机开机后默认发生0101循环，之后按中间键进入编辑数码页面，自动关闭发送。选定数字后再按中间按键发送之前编辑的数码（数码前面会加上00001111的定位码方便接收端检测）。发送时蓝灯会亮且可继续其他操作（发送使用定时器中断）。按中间键再次循环到编辑数码时，向下按则可以关闭发送。发送频率为20HZ，具体在代码开始处都有宏定义Code_Freq可以更改。

3.4.2 接收机程序

接收机程序的设计思路是采用ADC对接收信号进行抽样，并进行高低电平检测、解码和显示。采用带有TM1367的数码管模块进行数码显示，通过IIC通信控制，使用四个管脚，具有自动刷新和简单的控制。

然而，在实际应用中，会存在两个问题。首先，随着模拟频率的变化，数字信号幅度也会略微变化。如果检测阈值不变，就容易导致抽样结果错误。为了解决这个问题，我们添加了一个阈值检测和更新程序。该程序可以快速进行ADC检测并计算出最大和最小数据，剔除偏差较大的数据，并分别求出平均值，从而获得新的阈值。其次，在ADC采样过程中可能会遇到波形毛刺或不同步的情况，从而导致结果错误。为了解决这个问题，我们添加了小于10的解码结果判断，并将采样函数

放入高优先级的定时器中断中，以保证间隔时间稳定。

我们使用了STM32F1迷你版和精英版实现LCD显示功能。如果不需要LCD显示，可以使用其他F103开发板替代。数码管采用带有TM1637的IIC显示模块，具有方便的操作。引脚设置为VCC-PC4、CLK-PA4和DIO-PC5。如果需要修改DIO引脚，需要同时修改其下方DIO方向语句。ADC检测引脚设置为PA1，GET_Range()函数可以进行自动检测阈值，只需要在启动时调用一次。需要注意的是，DDS必须先启动（默认发射0101循环以便检测阈值）。

4 测试与结果

4.1 基本要求

4.1.1 实现模拟信号传播

1. 模拟信号可以成功调制：
 - (a) 可以调制方波；
 - (b) 可以调制正弦波。
2. 模拟信号可以成功解调：
 - (a) 全部通频带的解调视频；

4.1.2 实现数字信号传播

1. 数字信号可以成功调制；
2. 数字信号可以成功解调；
3. STM32可以正常进入接收模式：
 - (a) 引脚声明与链接：VCC，CLK，DIO（串行），GND；
 - (b) 初始化：显示1234。

4.1.3 实现数字模拟混合传播

1. 刚刚的模拟信号解调就是混合传输过程中的解调；
2. 数字信号可以在混合后解调。

4.1.4 频谱宽度

1. 仿真结果符合要求

4.2 发挥部分

4.2.1 数码管五秒后自动熄灭

1. 在程序中实现了五秒自动熄灭功能

4.2.2 功耗

1. 发射机功耗控制在3w以内
2. 接收机功耗控制在3w以内

4.2.3 信号频谱拓展

1. 模拟信号传输已经符合要求