

2023年全国大学生电子设计竞赛 江苏赛区（TI杯）

题目：信号调制方式识别与参数估计装置

题目编号：D

参赛队编号： NJ056
参赛队学校： 东南大学
参赛队学生： 卞艺杰，李睿刚，常兆骏

二〇二三年八月

信号调制方式识别与参数估计装置（D题）

【本科组】

摘要

本设计是以STM32单片机为核心的信号调制方式识别与参数估计装置，主要通过解调后的波形特征和输入端的有效值进行调制方式区分，通过FFT实现参数估计，使用数字电位器与TI公司的 μ A741实现程控放大电路，使得输出稳幅在1Vpp。对于AM，FM，CW，ASK，FSK，PSK信号可以实现准确识别，识别准确率最高达到100%，最低为96.8%。并且可以保证多数情况下解调输出波形无明显失真，参数估计误差较小。另外，本设计考虑设计成本，使用价格适中的电路组件搭建。

关键词：调制方式识别，参数估计，单片机编程，射频系统

1 系统设计

方案一：采用FPGA直接采样2MHz载频调制后的信号进行直接处理

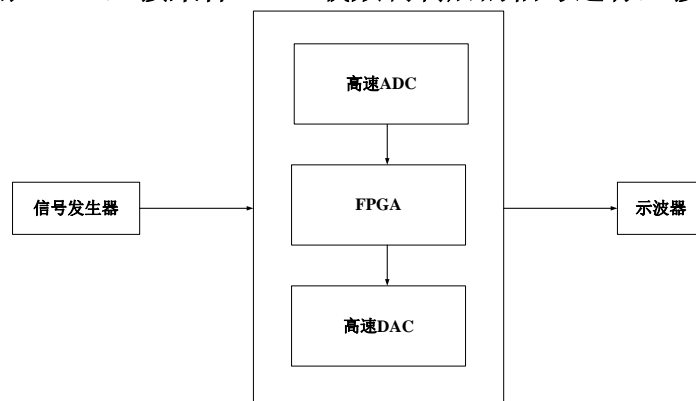


图 1 FPGA实现流程

如图 1所示，FPGA在处理数据时具有很高的速度，特别是当需要处理大量的数据或需要进行实时处理的时候，相对于其他处理器和芯片，FPGA可以更快地完成任务。因此只要选择合适的开发板，2MHz的调制信号可以基本通过FPGA实现。但是，相对于传统的处理器和芯片，FPGA的成本较高，需要进行大量的设计和开发工作，由于FPGA的可重构特性，当设计出现问题时，调试难度较大，需要耗费较多的时间和精力。

方案二：采用硬件电路解调+单片机控制完成

如图 2所示，对于信号源产生的模拟和数字调制信号，首先进行混频，本振采用AD9954产生精确的8.740MHz正弦信号（分辨率可达1Hz）。混频后经过10.7MHz有源带通滤波器进行滤波，采用有源的目的是进行补偿。随后转化为2路，分别接AM和

FM解调。综合考虑题目要求和成本，采用AM和FM模块解调模拟、数字信号。随后经过模拟开关决定输出，由单片机控制。然后经过滤波器进行隔直，滤除高频分量。随后分出两路，一路经过程控放大后接示波器，一路进行信号调理，转化到单片机GPIO可接受的电压范围，进行解调后信号特征的识别，然后通过单片机编程反推信号调制方式，估算响应参数，进而更改模拟开关，实现正确信号输出。

经过前期综合比较，结合现有资源和成本评估，方案一使用Xilinx Artix7 FPGA开发板配套AD，DA，成本约2000元。方案二使用成本约1100元。且FPGA调试时间长，因此选择方案二。

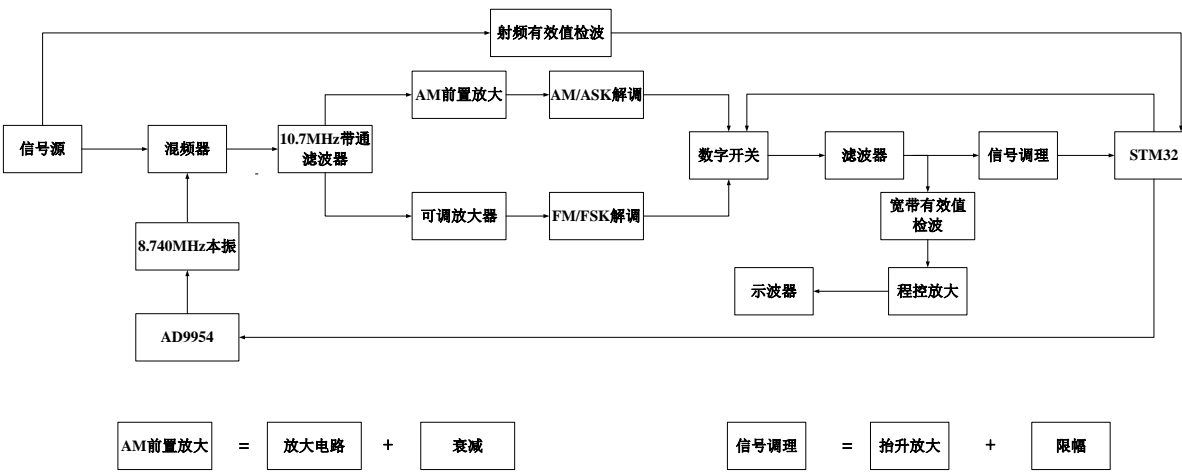


图 2 硬件解调+单片机控制实现

2 方案比较

2.1 10.7MHz中频滤波器选择

方案一：采用无源陶瓷滤波器

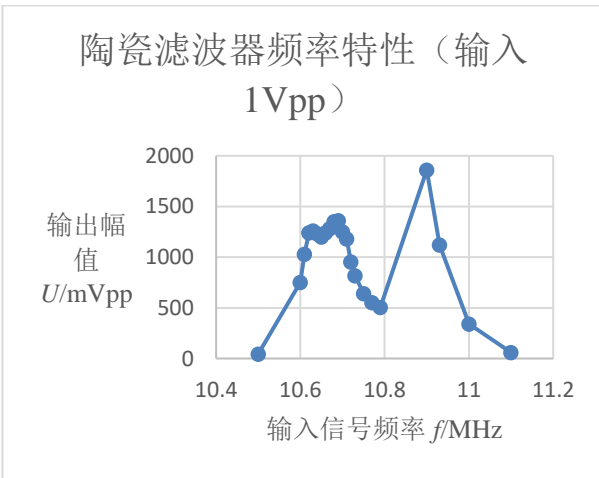


图 3 陶瓷滤波器频率特性

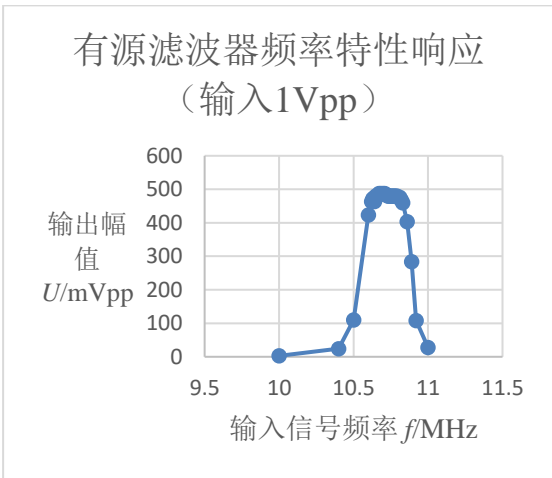


图 4 有源滤波器频率特性响应

经过逐点测量法测量无源陶瓷滤波器（10.7MHz中心频率）如图 3所示，可以发现通道内极不平坦，而且由于自己焊接的缘故，可能产生了谐振，并且产生寄生电容或电感，造成频率特性曲线不理想。

方案二：采用有源补偿滤波器

采用有源10.7MHz带通滤波器，测量频率特性曲线如图 4。可以发现通带内较为平坦，有利于后续解调信号分离，并且衰减程度可以接收，信号无失真。

综上所述，选取有源滤波器较为合适，主要原因是因为通带内较为平缓，并且过渡带陡峭，采用混频器搬移后可以滤除边频。

2.2 输出稳幅电路设计

方案一：采用硬件电路实现AGC

AGC由AD603和运放构成的电压比较器和减法电路实现。把实际电压与理论电压的差值通过适当幅值和极性的处理，作为AD603的控制信号，从而实现放大倍数的自动调整，实现输出电压恒定。该方法理论完善，但是精度不足，通用性低。

方案二：采用单片机实现程控放大

如图 5所示，通过数字电位器X9C104与构建同相放大电路，通过单片机AD采样，程序控制实现稳幅。该方法实现容易，并且使用范围广，符合赛题要求，其中阈值 x 设置为1.13（有效值为0.4 Vrms）。

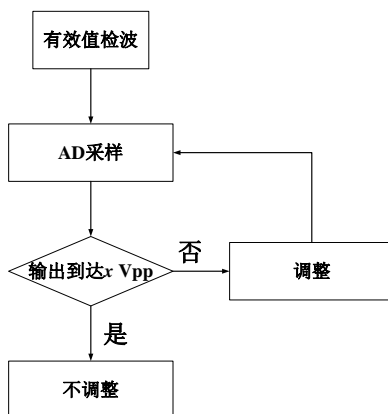


图 5 程控放大设计

综上所述，采用方案二进行实现。

2.3 解调电路选择

方案一：采用基本电路器件搭建

FM解调方法有多种，常用斜率鉴频，相位鉴频等。鉴频器分为两个部分：借助于谐振电路将等幅度的调频波转换成随瞬时频率变化的调幅调频波^{[1][2]}，再用二极管

检波器进行幅度检波，还原出调制信号。但是自己搭建的解调模块稳定性不足。

方案二：采用ADL5511，NE564解调模块

ADL5511 AM解调模块，最大包络带宽可达130MHz，输入信号频率从直流到6GHz均可工作，工作电压范围宽，为6V-20V，解调后信号噪声小。NE564 FM解调模块FM输入最大频偏可达1MHz，输入信号频率从10MHz-90MHz均可工作。

综合上述分析，选择方案二。

3 理论分析与计算

3.1 输出端滤波器设计

在实际测试中，模拟信号和方波信号输出均有一定的失真，查看示波器FFT后主要原因是出现了高频分量，并且因为解调输出的信号出现直流分量，因此需要进行滤除，综上设计带通滤波器^[3]。

利用Filterpro设计有源滤波器对衰减进行补偿以保证通带内较为平坦，并且有一定的增益，选取多路反馈的有源滤波器。设计电路图与频率响应曲线如图 6，图 7所示。值得说明的是，为了保证解调出的方波信号不失真，需要保证保留至少到四次谐波，因此截止频率在100kHz附近，并且阻带从1MHz左右开始，以滤除干扰。

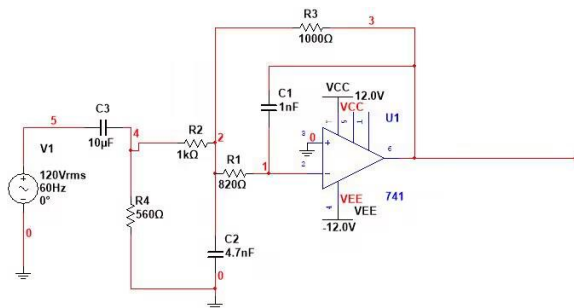


图 6 输出端带通滤波器设计

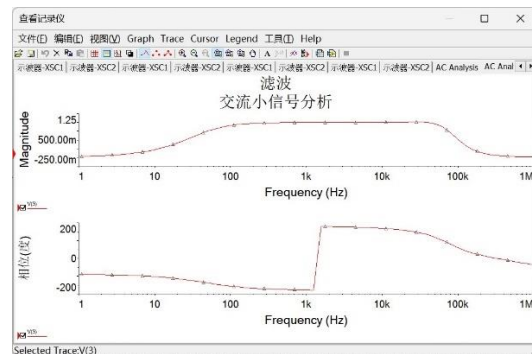


图 7 仿真结果

3.2 信号调理电路设计

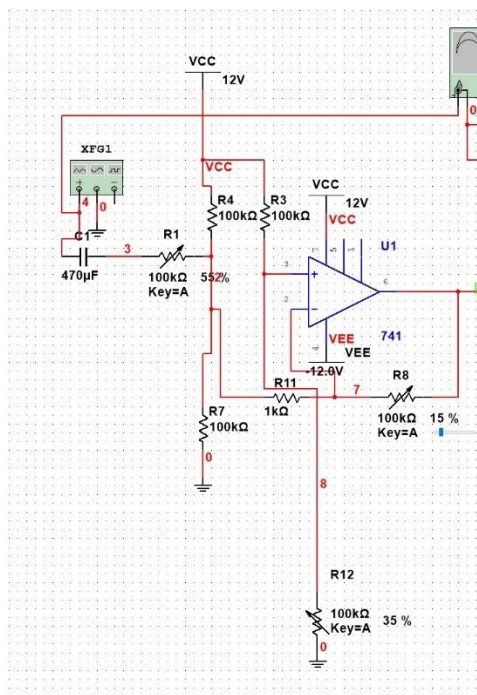


图 8 抬升放大电路

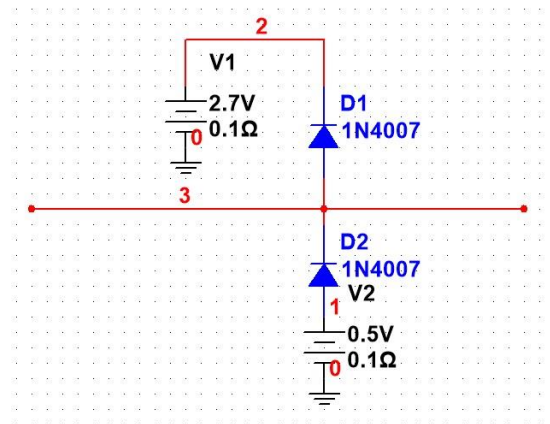


图 9 限幅电路

信号调理电路的目的主要是对输出端解调信号进行抬升和放大，以达到单片机 GPIO 的承受范围 0-3.3V。如图 8 所示，抬升放大电路使用 $\mu A741$ 运算放大器制作。如图 9 所示，限幅电路利用二极管的正向导通和反向截止与可调电压模块制作。经过实测经过单片机的所有电压均可在 -160mV-3.3V 之间，保证了电路的安全。

3.3 调制信号识别依据

由于本题涉及到 AM, FM, ASK, FSK, PSK, CW 信号，因此可以采用解调后特征比较及排除法进行信号识别，AM, FM, ASK, FSK, CW 信号均可通过解调后的信号特征（频谱，峰峰值）得到，则所有特征不满足的信号为 PSK 信号。下列分析是结合理论与模块实验现象的分析。

AM 调制后的公式为：

$$E(t) = (A + e(t)) \cos \omega_c t \quad (3.1)$$

其中 $e(t)$ 是基频信号， ω_c 为载波频率， A 为直流偏置

FM 调制后的公式为：

$$E(t) = A \cos(\omega_c t + k \int_0^t e(t) dt) \quad (3.2)$$

其中 k 是跳频灵敏度， $e(t)$ 是基频信号， A 为载频信号幅度， ω_c 为载波频率。因此理论上 FM 的调制信号作为 AM 解调的输出，幅值应该不变，即直流。

ASK调制后的公式为：

$$E(t) = \left[\sum_{k=-\infty}^{\infty} a_k g(t-kT) \right] \cos \omega_c t \quad (3.3)$$

$$a_k = \begin{cases} 0 & P_1 = 0.5 \\ 1 & P_2 = 0.5 \end{cases}$$

$g(t-kT)$ 是矩形脉冲， ω_c 为载波频率。

FSK调制后的公式为：

$$E(t) = Am_1(t) \cos \omega_{c1}t + Am_2(t) \cos \omega_{c2}t \quad (3.4)$$

$$m_1(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} b_n g(t-nT), m_2(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} \overline{b_n} g(t-nT)$$

A 为载频信号幅度， ω_{c1} 为载波1频率， ω_{c2} 为载波2频率。因此理论上FSK的调制信号作为ASK解调的输出，幅值应该不变，即直流。并且在载波幅度相同的情况下，ASK解调的有效值小于FSK解调的有效值。但在实际实验中，ASK和FSK仅通过解调波形难以区分，具体结果见表 1 解调结果对比表 1所示，因此需要对理论判断方案做出调整。调整依据见附录中图 11。

表 1 解调结果对比

输入	AM解调	FM解调
AM	基频正弦波，存在直流分量，存在较少高次谐波	无信号或错误解调杂波信号
FM	直流，杂波小	基频正弦波，无直流分量，有较少高次谐波
ASK	方波，幅值较大	标准方波
FSK	方波，幅值较小	标准方波
PSK	频谱杂乱，幅值小	频谱杂乱

3.4 调制信号参数估计

调制深度估计：

调制深度定义为：

$$m = \frac{e_{\max}}{A} \quad (3.5)$$

其中， e_{\max} 是调制信号的幅度， A 是载波的幅值，因此在题设载波幅度100mV的情况下，解调出的AM波基频幅度应该与100mV呈现某种较强线性关系。经过实际测量，得到1kHz，5kHz调制信号下，调制度与FFT基频的关系，其余基频对应的斜率 k 和截距 b 采用线性估计的方法，然后将拟合的一次函数存入程序中等待调用。拟合曲线及数据见附录图 12。

调制信号频率估计：

采用FFT算法进行频率测量，频谱分析。FFT原理如下：

$$\begin{aligned}X(k) &= X_1(k) + W_N^k X_2(k) \\X\left(k + \frac{N}{2}\right) &= X_1(k) - W_N^k X_2(k) \\k &= 0, 1, \dots, \frac{N}{2} - 1 \\W_N^k &= e^{-j\frac{2\pi}{N}k}\end{aligned}\tag{3.6}$$

采用单片机STM32ZET6实现FFT功能，提取基频信号以获取调制信号的频率估计。

最大频偏估计：

同样通过一次函数对最大频偏与FFT基频幅度关系进行拟合，得到具体的数据点与拟合曲线，见附录图 13所示。

4 程序设计

如附录图 10所示，由于程控放大模块实现较为简单，所以不整合在图中，而且程控放大采用单独的STM32F103C8T6最小系统板进行调整，不占用STM32F103ZET6板子资源。

因为需要进行方波的判断，而进行方波的判断至少需要进行3，4次谐波的判断，因此需要减小FFT的精度来换取更大的频率检测范围，但是这样频率间隔增大，对频率的估计误差增大。所以，本设计综合考虑了单片机资源情况，在识别时适当减小FFT精度，识别后重新配置FFT相关参数，提高测量精度。

5 测试方案与结果

结果如下表所示。

AM输入调制度从10%-100%，调制信号从1kHz-5kHz进行测量。

FM输入频偏从1kHz-25kHz，调制信号从1kHz-5kHz进行测量。

FSK输入跳频从6kHz-25kHz，调制信号从3kHz-5kHz进行测量。

ASK输入调制信号从3kHz-5kHz进行测量。

PSK输入调制信号从3kHz-5kHz进行测量。

表 2 识别及稳幅时间测量

项目	时间
识别时间	远小于1 s
稳幅时间	最长1 s

表 3 识别准确率

信号输入	总次数	正确次数	正确率/%
AM	50	50	100
FM	125	121	96.8
FSK	60	60	100
ASK	20	20	100
PSK	20	20	100

表 4 峰峰值大于1Vpp且信号不失真次数

信号输入	总次数	大于1Vpp且不失真次数	合格率/%
AM	50	46	92
FM	120	116	96.7
FSK	50	50	100
ASK	50	50	100

表 5 参数估计准确率

信号输入	指标及准确率/%（在赛题范围内均判断为准确，每项测量40次）				
	频率或码率	调幅系数	调频系数	最大频偏	移频键控系数
AM	100	100	/	/	/
FM	100	/	95	95	/
ASK	100	/	/	/	/
FSK	100	/	/	/	/
PSK	95	/	/	/	/

7 参考文献

- [1]文光俊,谢甫珍,李建.无线通信射频电路技术与设计[M].北京:电子工业出版社
- [2]张玉兴,杨玉梅,敬守钊,陈瑜,射频模拟电路与系统[M].成都:电子科技大学出版社
- [3]华成英,童诗白.模拟电子技术基础（第四版）[M].北京:高等教育出版社

附录：

附录A：

附录A包含器件清单和相关数据支撑图表等。

表 6 模块名称及供电电压

模块名称	供电
OPA847可调放大器	$\pm 5V$
ADL5330可调放大器	5V
AD9954信号源发生器	5V
AD605可调放大器	5V
有源滤波器	$\pm 5V$
NE564解调模块	5V
ADL5511解调模块	6-20V
混频器AD831	9-11V
20dB射频衰减器	/
X9C104数字电位器	3.3V
射频有效值检波	$\pm 5V$
宽带有效值检波	5V

表 7 仪器清单

仪器	型号
信号源	DG4202
示波器	MDO-2202ES
万用表	SDM3065X

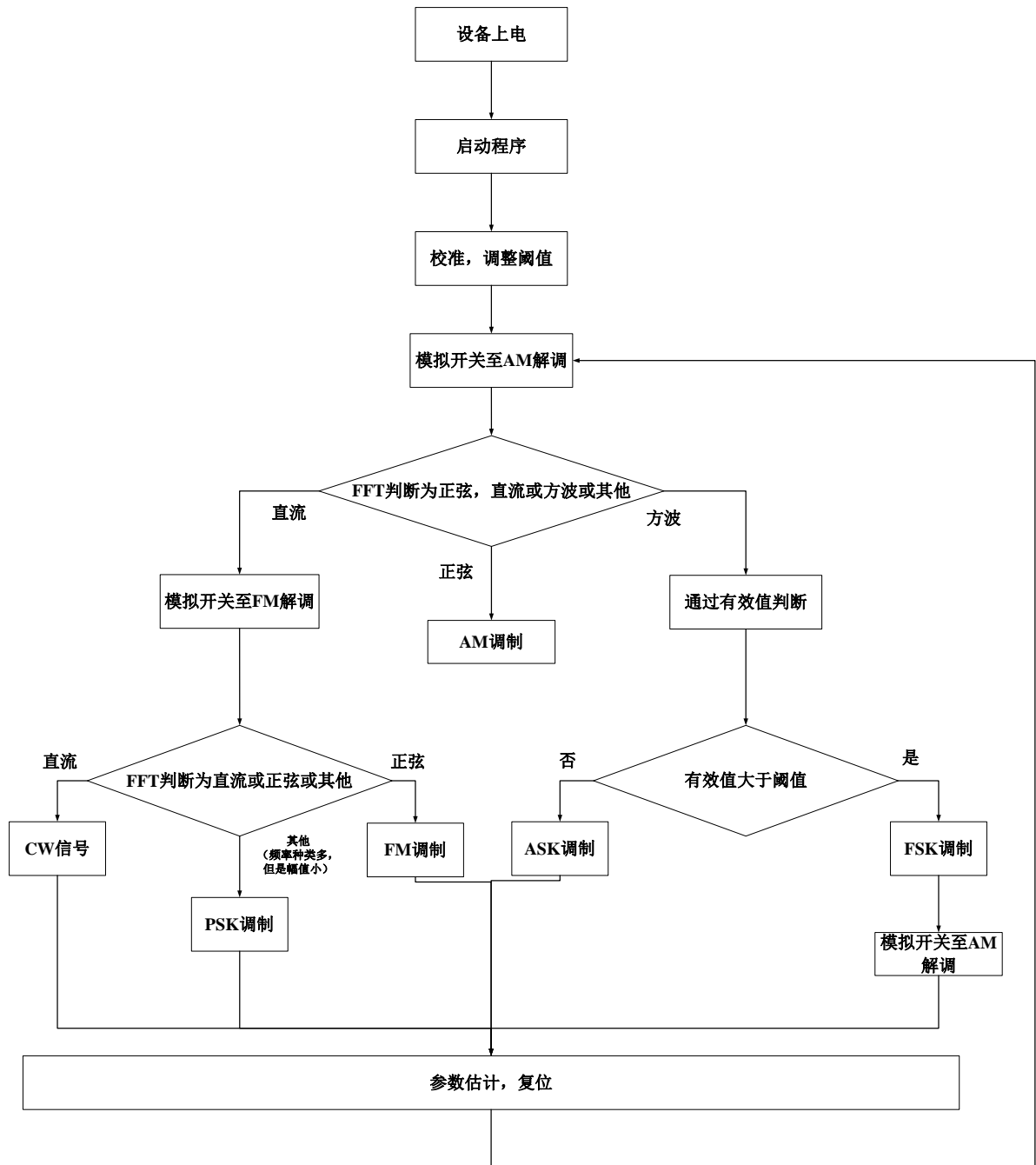


图 10 程序整体框架设计

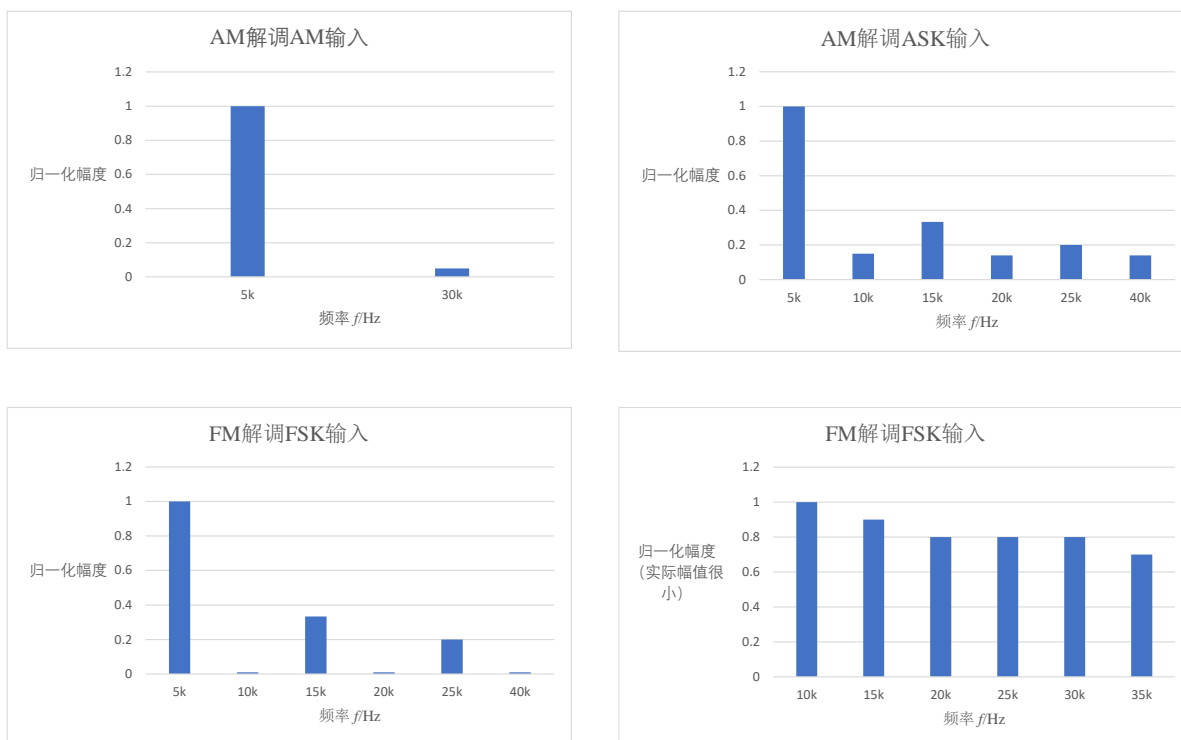


图 11 实验信号输入与解调频谱示意图

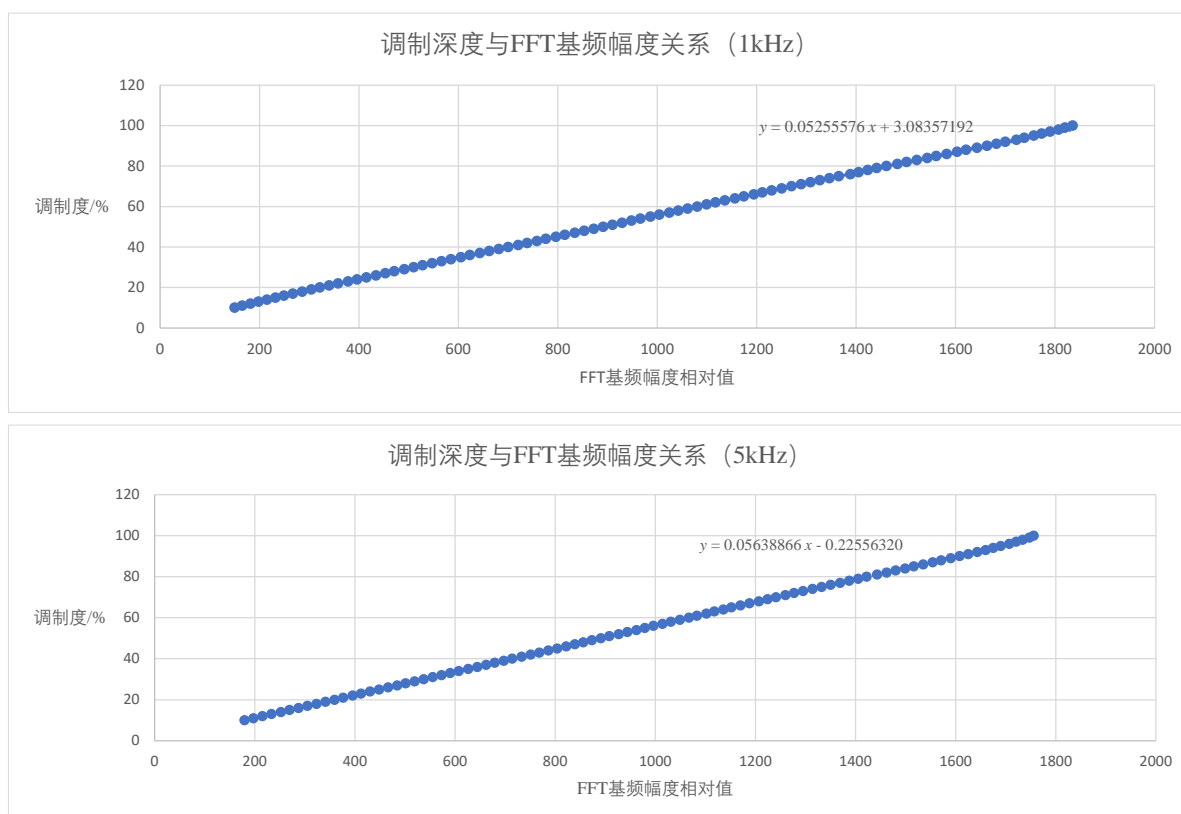


图 12 调制深度与FFT基频幅度关系

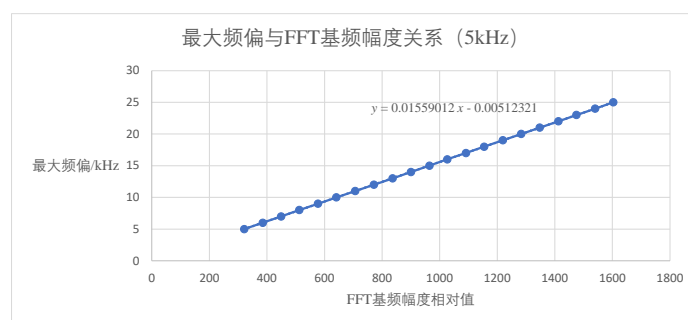
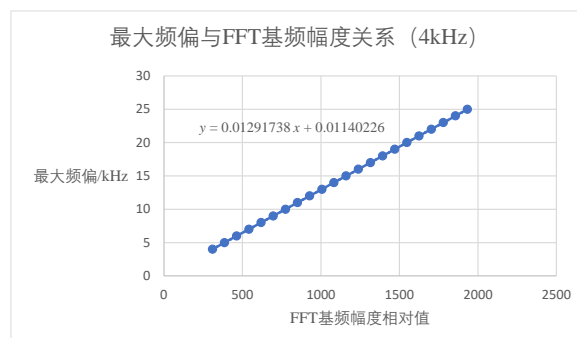
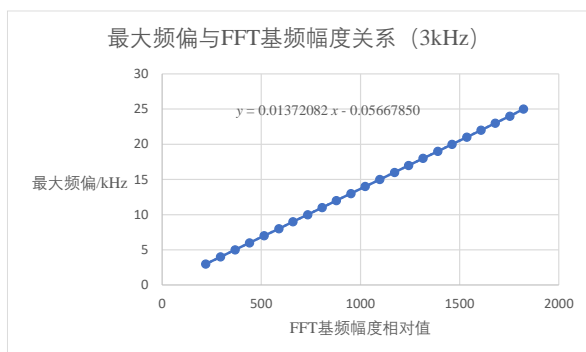
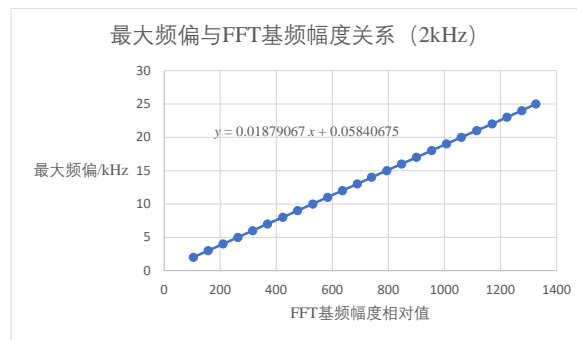
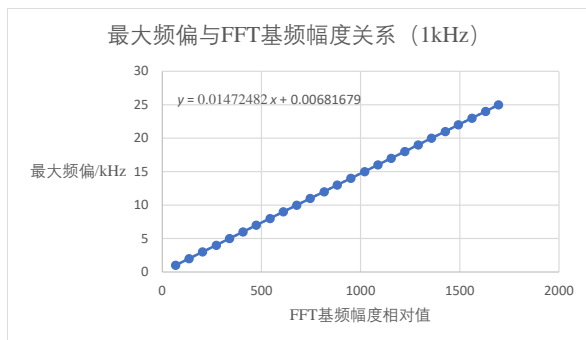


图 13 最大频偏和FFT基频幅度相对值

附录B:

附录B包含部分核心代码。

```
1. void averageFFT(u8 times){
2.     for(u16 i=0;i<NPT/2;i++) buffer[i] = 0;
3.     for(u8 i = 0; i<times; i++){
4.         flag = 0;
5.         TIM_Cmd(TIM2, ENABLE);
6.         while(!flag); // 等待ADC、DMA 完成
7.         for(u16 j=0;j<NPT;j++) InBufArray[j] = ((signed short)InBufArray[j]) << 16;
8.         cr4_fft_1024_stm32(lBufOutArray, InBufArray, NPT);
9.         GetPowerMag();
10.        for(u16 j = 0; j<NPT/2; j++) buffer[j]+=lBufOutArray[j];
11.    }
12.    flag = 0;
13.    for(u16 j = 0; j<NPT/2; j++) {
14.        lBufOutArray[j] = buffer[j]/times;
15.    }
16. }

1. void judge(){ // 得到频谱之后判断
2.     changeFFT(75000); // 选大范围
3.     selectChannel(0); // 选AM 解调
4.     averageFFT(4);
5.     weakHigh();
6.     statistics();
7.
8.     if(ifSingle()){ // AM 结果频谱单一，则为AM
9.         mode = AM;
10.    }else if(ifFlat()){ // AM 结果频谱平坦，可能为FM CW PSK(?)
11.        selectChannel(1);
12.        averageFFT(4);
```

```
13.     weakHigh();
14.     statistics();
15.     if(ifSingle()){ // FM 结果频谱单一，则为 FM
16.         mode = FM;
17.     }else if(ifFlat()){ // FM 结果频谱平坦，则为 CW
18.         mode = CW;
19.     }else{
20.         mode = PSK;
21.     }
22. }else{
23.     if(lBufOutArray[maxAT]<200){
24.         mode = PSK;
25.     }else{
26.         if(RMS()<ASKFSKthreshold){
27.             mode = ASK;
28.         }else{
29.             mode = FSK;
30.         }
31.     }
32. }
33. }
```