

## 信号调制度测量装置

**摘要：**本设计实现的信号调制度测量装置，可以识别并显示信号源输出的被测信号的调制方式。系统由低噪声放大器、乘法器、电压比较器、滤波器、分频器、DDS 信号源、ESP8266 模块构成。通过测试，本设计能实现根据调制信号的类型，测量并显示被测信号调制度等参数，输出准确的解调信号。其中 AM 信号的调幅度测量误差绝对值不超过 0.1，FM 信号调频度测量误差绝对值不超过 0.3，并且可以准确判断出待测信号的类型。

**关键词：**信号识别；信号解调；快速傅里叶变换

## 一、 系统方案

### 1. 比较与选择

#### 1.1 采样设计方案

方案一：通过低采样率 ADC 直接采样窄带宽高频信号

方案二：下变频至中频采样

方案选择：方案一，欠采样与下变频至中频采样相比，在对采样率精度上要求较为严苛，同时需要考虑混频现象，实现较为困难；方案二，下变频至中频采样后，可以较为准确地测量相应信号，同时对 ADC 的采样率和带宽要求相对降低。综合考虑，使用方案二。

#### 1.2 最大频偏测量方案

方案一：通过频谱计算最大频偏

方案二：通过频率计计算最大频偏

方案选择：方案一，在调频度不为整数时，频谱计算最大频偏难以准确测量其实际值，并且对频谱的频谱分辨率有较高要求；方案二，频率计主要通过测量多个上升沿的用时变化测量最大频偏，运算处理量相对较少。综合考虑，使用方案二。

### 2. 方案描述

系统主控制器采用 STM32H743 系列的 MCU，其搭载了一个 ARM Cortex-M7 高性能处理器，测量参数通过串口屏显示，输出波形经 DDS 输出可接入示波器显示。单片机测量经分频后的输入信号得到载波频率，计算得到所需频率（在下变频电路中详述）后经 DDS 输出至乘法器与原信号做下变频处理。经过抗混叠滤波后，由处理器内部高精度 ADC 采样。CPU 控制 DMA 读取 ADC 转换数值至内存以获得稳定的采样率，之后经 FFT 算法先判断调制类型。若为 AM 调制，直接计算其频率及调幅度；若为 FM 调制，通过单片机性能定时器计算最大频偏及其频率；若为无调制，则默认基波频率为 0。最后经 DDS 输出对应频率，通过两路串口分别串口屏与 ESP8266 通信，ESP8266 通过 Wi-Fi 与上位机通信。将调制类型与对应测量值显示在手机与串口屏上。系统框图如图 1 所示。

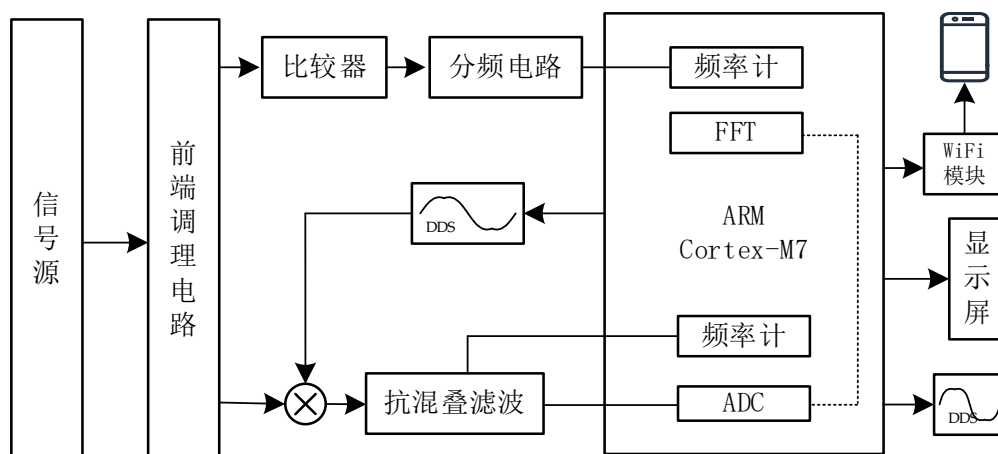


图 1 系统框图

## 二、 理论分析与计算

### 1. 下变频电路设计

下变频电路通过乘法器实现。通过两个信号相乘实现频率的变换，原理公式如下：

$$\cos(\omega_0 t + \varphi) \cos \omega_1 t = \frac{1}{2} [(\omega_0 t + \varphi + \omega_1 t) + \cos(\omega_0 t + \varphi - \omega_1 t)]$$

其中， $\omega_0$  为 DDS 信号频率， $\omega_1$  为输入信号频率，经过混频、滤波后得到  $|\omega_0 t + \varphi - \omega_1 t|$  频率分量。下变频时，输入信号为中心载波频率为 10MHz~30MHz，为了得到一个确定频率的波形，先通过分频计数电路得到信号的载波频率，再用 DDS 输出相应频率的正弦波。

$$|\omega_0 - \omega_1| = 0.5MHz$$

### 2. 最大频偏测量设计

设经过下变频后得输入信号频率为  $f_a$ ，调制信号频率为  $f_s$ 。若需要准确测量出频偏，则每个调制信号周期内测得的输入信号的上升沿个数  $X_T$  应满足：

$$X_T \leq \frac{f_a}{10f_s}$$

同时，按照题目要求，此时频率的分辨率  $f_d$  须达到：

$$f_d \geq 0.3f_s$$

### 3. 调制信号频率测量设计

设 ADC 采样率为 $f_c$ ，采样点数为 $N_1$ 。若为 AM 信号，频谱上两个峰值之间各间隔 $N_2$ 个点，则 AM 信号调制信号的频率 $f_{AM}$ 为：

$$f_{AM} = \frac{N_2}{N_1} * f_c$$

若为 FM 信号，频谱上两个峰值之间间隔 $N_3$ 个点，则 FM 信号调制信号的频率 $f_{FM}$ 为：

$$f_{FM} = \frac{N_3}{N_1} * f_c$$

#### 4. 调幅度测量

设 AM 调制信号为

$$u_{AM}(t) = A_c(m_a * \cos(\omega_s t) + 1)\cos(\omega_z t)$$

载波信号幅度为 P，若 $u_{AM}$ 的峰峰值为 A，则调幅度 $m_f$ 为：

$$m_f = \frac{A}{2P} - 1$$

#### 5. 载波频率测量

设载波经 16 分频后进入定时器的外部触发引脚，每经过 $100\mu S$ 测得输入上升沿数 X 次，则载波频率为：

$$f_z = \frac{16 * X}{50 \times 10^{-6}} = 320000 \times X(Hz)$$

#### 6. 滤波器设计

为了过滤模拟前端中的高频分量，系统使用 Sallen-key 低通滤波器，Sallen-key 拓扑的特点是高输入阻抗、增益容易被配置、运放被配置为电压跟随模式，其优势在后端为输入阻抗较小的电路时较为显著，良好的带负载能力使得波型不会出现明显失真。

模拟前端与单片机之间有两个输入口，均采用滤波器进行滤波，计数器前，为防止高频信号对输出结果造成影响，采用 5MHz 截至频率的低通滤波电路，在 ADC 前端，由于 10MHz 以上的信号是被确认为对信号读取无效的部分，采用 4MHz 截至频率的滤波电路，考虑到小信号板制作时附加的伴生电容，实际滤波截至频率会有程度为 100KHz 级别的误差。滤波器电路如图 2 所示。

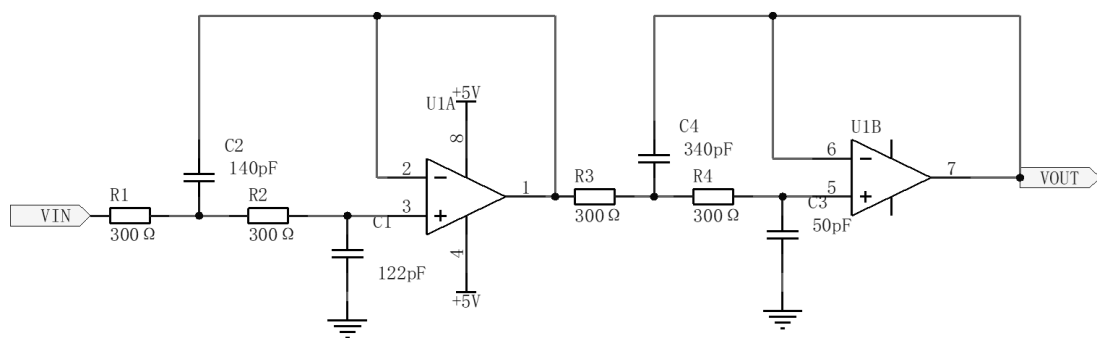


图 2 滤波器电路

### 三、 电路与程序设计

#### 1. 前级调理电路设计

采用单片放大器 OPA847 实现。该放大器具有 3.9GHz 的带宽，最大能够提供 30dB 的增益，失真较小 ( $-105\text{dBc}/5\text{MHz}$ )。用于放大信号源信号，满足电压比较器和乘法器的输入需求，同时加入分频器电路，采用 D 触发器构成的二分频器多级串联，实现对待测信号 16 分频的处理，满足单片机的计频需求。低噪声放大器电路如图 3 所示。

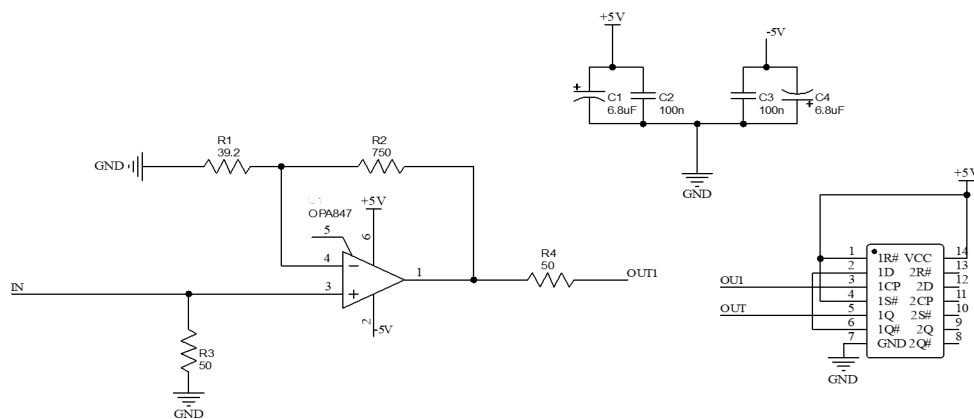


图 3 前级调理电路

#### 2. 后级放大电路设计

采用单片双运放 AD8058 实现。该放大器已内部 50Ω 匹配，具有 325 MHz 的带宽，有 28MHz 的 0.1dB 的增益平坦度，失真较小 ( $-85\text{dBc}/5\text{MHz}$ )。用于对乘法器输出信号再次放大，匹配 ADC 的输出需求。低噪声放大器电路如图 4 所示。

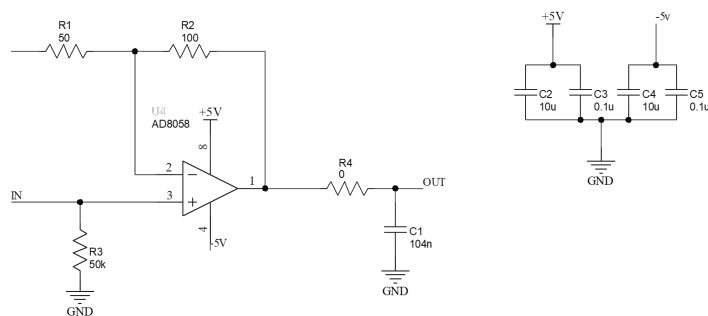


图 4 后级放大电路

### 3. 电压比较器电路设计

采用 TLV3501 轨到轨高速比较器芯片,可以较好的把 10MHz-30MHz 的正弦波转换为方波,用于进入分频器电路实现分频计数。电压比较器如图 5 所示。

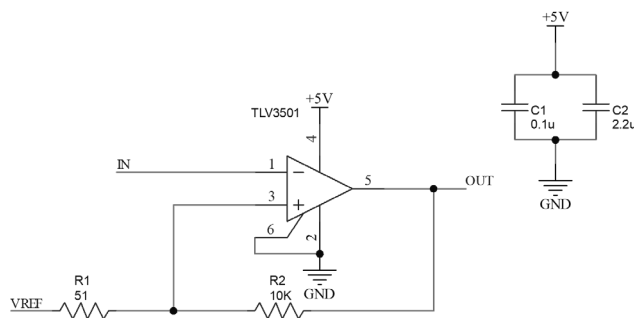


图 5 电压比较器电路

### 4. 软件程序设计

单片机上电后进行初始化,通过串口屏按键进行开始测量。首先测量载波频率。随后,向 DDS 输入指定频率用于实现硬件下变频。随后,通过 ADC 进行采样,做 FFT 变换后分析信号频谱,从而对调制类型进行判断。判断为未调制后,DDS 输出直流。判断为 AM 信号后,首先测量调制信号频率,随后测量计算调制深度,最后 DDS 输出频率为调制信号频率的正弦波。判断为 FM 后,首先测量调制信号频率,随后通过频率计计算最大频偏,最后 DDS 输出频率为调制信号频率的正弦波。最后通过串口屏显示调制类型与对应调制度。程序设计流程图如图 6 所示。

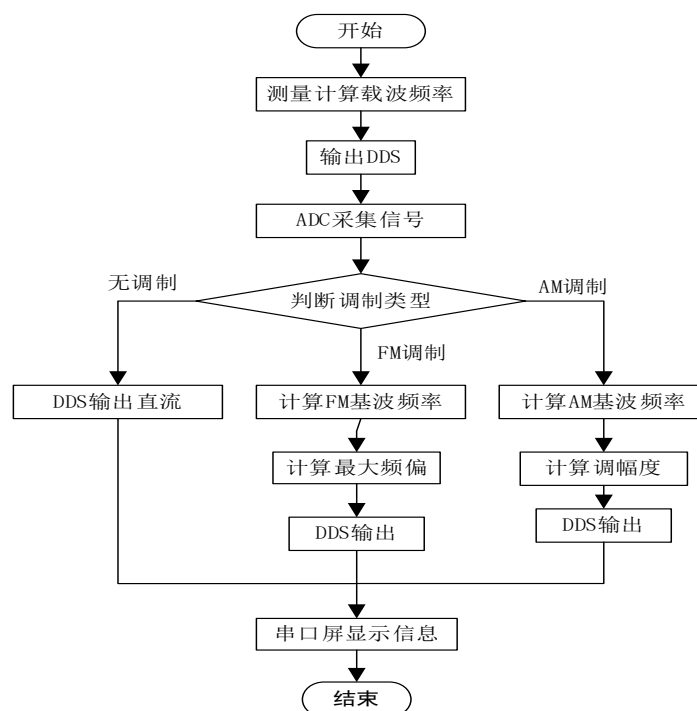


图 6 软件设计流程图

## 四、 测试方案与测试结果

### 1. 测试环境

示波器:	Tektronix	MDO2002B 型数字示波器;
信号发生器:	RIGOL	DG4162 型 160M 任意波形发生器;
电 源:	ZhongCe	DF1743003C 型稳压源。

### 2. 测试方案

#### 2.1 AM 信号解调测试方案

对原有信号放大并添加直流偏置，用电压比较器转换为方波，经过调理后用计数器读出载波频率，使用 DDS 输出比载波频率高出 500KHz 的正弦波与原信号相乘，经过调理后滤去频率为 3MHz 以上的信号，使用 ADC 读取，利用 FFT 变化找出调理信号的频率。理论上为频谱中最高的频率值减去临近峰值对应的频率值。

系统开机，输入频率 10MHz,峰峰值 100mV 的 AM 载波信号，调节调理信号分别为 1KHz、2KHz、3KHz,其调幅度分别为 33%,66%,100%，通过系统的显示屏读出解调输出信号相关参数，测试结果如表 1。

2.2 FM 信号解调测试方案

对原有信号放大并添加直流偏置，用电压比较器转换为方波，经过调理后用计数器读出载波频率，使用 DDS 输出比载波频率高出 500KHz 的正弦波与原信号相乘，经过调理后滤去频率为 3MHz 以上的信号，使用 ADC 读取，利用 FFT 变化找出调理信号的频率。理论上为每个峰值对应频率之间的差值。

系统开机,输入频率 10M,峰峰值 100mV 的 FM 载波信号,调节调理信号分别为 3KHz、4KHz、5KHz,其频率偏差调为 1KHz、2KHz、3KHz，即调频度为 33%、50%、60%。通过系统的显示屏读出解调输出信号相关参数，测试结果如表 2。

2.3 未知信号解调测试方案

系统开机，设置载波频率为 13.5MHz，23MHz，30MHz，分别设置为未调制，FM 调制，AM 调制。AM 调制时输入信号频率为 5KHz，6KHz，8KHz，其调幅度

$m_a$ 为 0.25，0.68，1.00；FM 调制时输入信号频率为 5KHz，8KHz，10KHz，对应调频度 $m_f$ 分别为 3.4，2.7，6。将测量值与理论值进行对比，计算误差绝对值并记录。

3. 测试结果与数据

3.1 AM 信号解调测试结果

表 1 AM 信号解调测试表

测量次数	调制信号频率/kHz	调幅度	测量信号频率/Hz	测量调幅度	调幅度测量误差绝对值
1	1	33%	1.017	35%	0.02
2	2	66%	2.020	62%	0.04
3	3	100%	2.988	99%	0.01

3.2 FM 信号解调测试

表 2 FM 信号解调测试表

测量次数	调制信号频率/kHz	调频度	测量最大频偏/kHz	测量误差绝对值
1	3	33%	1.251	0.087
2	4	50%	2.235	0.058
3	5	60%	3.621	0.124



### 3.3 未知信号解调测试

表 3.3.1 未知信号测试表（输入未调制信号）

$f_{\text{载波}}/\text{MHz}$	调制类型
13.5	未调制
23	未调制
30	未调制

表 3.3.2 未知信号测试表（输入 AM 信号）

$f_{\text{载波}}/\text{MHz}$	$f_{\text{调制}}/\text{kHz}$	$m_a$	调制类型	$f_{\text{调制}}$ 测量值 /KHz	测量 $m_a$	$m_a$ 测量误差绝对值
13.5	5	0.25	AM 调制	5.023	0.27	0.08
23	6	0.68	AM 调制	6.009	0.64	0.06
30	8	1.0	AM 调制	7.898	0.94	0.06

表 3.3.3 未知信号测试表（输入 FM 信号）

$f_{\text{载波}}/\text{MHz}$	$f_{\text{调制}}/\text{kHz}$	$m_f$	调制类型	$f_{\text{调制}}$ 测量值 /KHz	$m_f$ 测量值	$m_f$ 测量误差绝对值
13.5	5	3.4	FM 调制	5.000	3.78	0.11
23	8	2.7	FM 调制	8.009	3.21	0.18
30	10	6.0	FM 调制	10.002	6.47	0.07

## 4. 测试结果分析

4.1 AM 信号解调测试测试分析：由数据结果知，测量误差绝对值最大为 0.04，小于题目要求中的 0.1,调制信号测量误差小于 2%，满足题目要求。误差主要来源于 ADC 输入时噪声的引入。

4.2 FM 信号解调测试分析：由数据结果知，调频度测量绝对误差最大为 0.124，满足题目要求的 0.3；误差主要来源于采样精度不足。

## 五、 参考文献

- [1]. 罗杰,谢自美.电子线路-设计·实验·测试(第五版),2015,电子工业出版社.
- [2]. 康华光.电子技术基础(模拟部分)(第六版).2013,高等教育出版社.
- [3]. [美]Bruce Carter.运算放大器权威指南(第四版)2014,人民邮电出版社.
- [4]. 全国大学生电子设计竞赛组委会.第十一届全国大学生电子设计竞赛获奖作品选编,北京理工大学出版社.