

# 信号调制度测量装置

## 摘 要

本信号调制度测量装置采用 Artix-7 的 FPGA 作为主控芯片，通过高速 AD 模块采集放大滤波后的信号，经过数字下变频、低通滤波、FFT、DDS 等算法，既实现了调制方式的识别，也完成了调频度和调幅度的计算，误差符合题目要求，解调波形无明显失真，并将结果数据传输到串口屏进行显示。

**关键词：**FPGA、数字下变频、低通滤波、FFT、调制与解调

## 1 方案设计与论证

### 1.1 预期目标实现与系统原理

信号的调制与解调是信号处理中一项处理手段，通过具体的方法从已调信号的参量变化中将恢复原始的基带信号可以有效避免信号失真。

其中，定义普通单音调幅(AM)在波形垂直方向上的最大和最小长度的差和比为 AM 信号调幅度；定义单音调频（FM）频偏与最大信号带宽的比为调频度。

本系统利用 Basys3 开发板自主识别信号的调制方式，显示调幅度（AM），调频度和最大频偏（FM），将解调信号输出至示波器观察，保证信号最大程度不失真，将处理后的数据通过串口传到 STM32 进行进一步计算，最后将结果发送到串口屏进行显示。

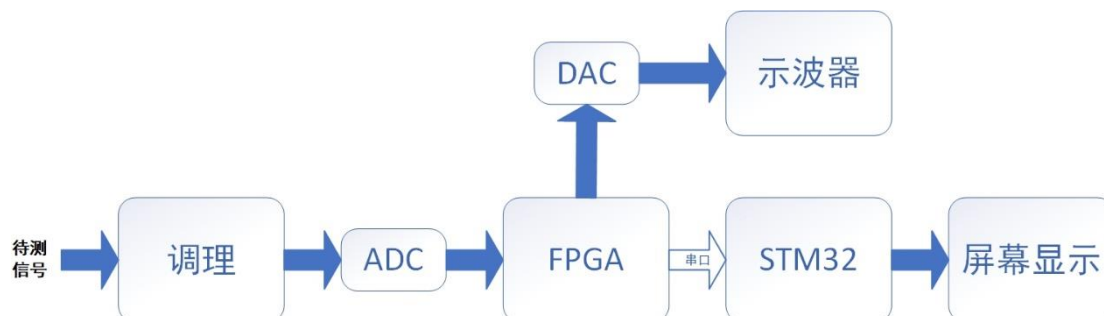


图 1-1 信号调制度测量系统构成框图

## 1.2 技术方案分析与比较

### 1.2.1 主控芯片方案的选择

方案 1：采用可编程逻辑器件 CPLD，具有并行输入输出方式。它在系统处理的速度上较快，但是规模大、结构复杂，而系统不需要复杂的逻辑功能，对数据处理速度的要求也不是非常高。

方案 2：采用 STM32F103RC。单片机。STM32 单片机构造简略，工具易用，功能强大。但是其采样频率最高只能达到 1MHz，无法满足题目要求。并且，其针对多路的信号处理需要很多片 DSP 来并行处理。

方案 3：采用 FPGA 作为系统的控制器。FPGA 可以实现各种复杂的逻辑功能，规模大，密度高，灵活性强。其具有强大的逻辑资源和寄存器资源，可以应对设计中大量的高速电子线路设计需求。本题中的载波频率可达 30MHz，FPGA 可满足高频信号的解调与处理。

综上所述，选择方案 3。

### 1.2.2 数字滤波器的选择

方案 1：IIR 滤波器，冲激响应理论上应会无限持续，其输出不仅取决于当前和过去的输入信号值，也取决于过去的信号输出值，具有相位非线性，不容易设计的缺点。

方案 2：对于 FIR 滤波器，冲激响应在有限时间内衰减为零，其输出仅取决于当前和过去的输入信号值。线性相位、容易设计。

考虑到设计的简便性，选择方案 2。

### 1.2.3 AM 解调方案的选择

方案 1：相干解调，也叫同步检波，它把已调信号的频谱通过混频搬到基带。相干解调时，为了无失真地恢复原基带信号，接收端必须提供一个与接收的已调载波严格同步的本地载波，它与接收的已调信号相乘后通过低通滤波器取出低频分量，得到原始的基带调制信号。但相干解调电路的结构比较复杂。

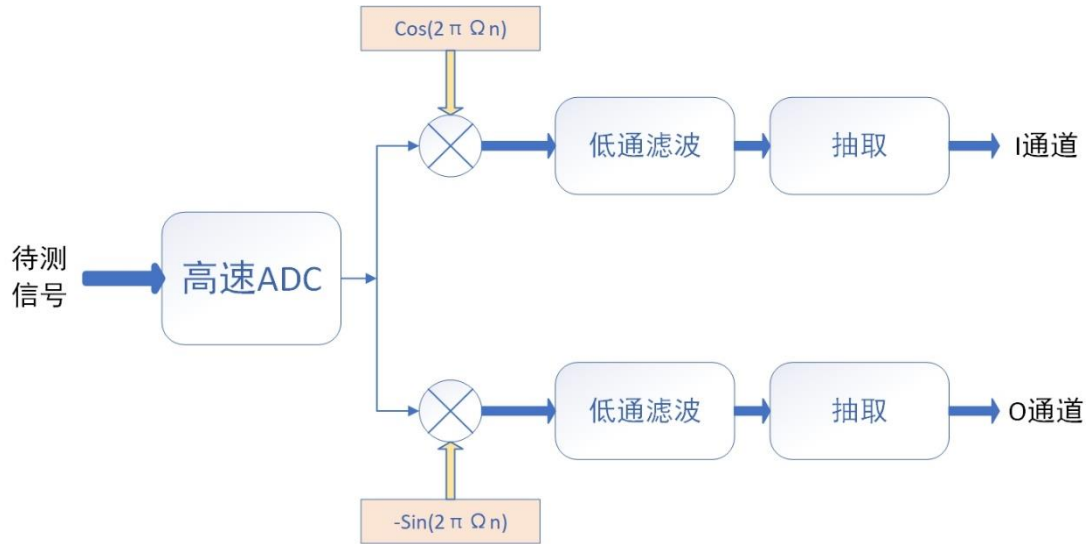
方案 2：包络检波，属于非相干解调，通常由半波或全波整流器和低通滤波器组成。包络检波是直接从已调波的幅度中提取原调制信号，结构简单，且解调输出是相干解调输出的两倍。

考虑方案的结构复杂性与可实现程度，选择方案 2。

## 2 理论分析与计算

### 2.1 信号下变频原理

数字下变频可以将射频或中频信号转换为基带信号，先用 FPGA 内部 DDS 核对信号下变频，则以大大降低采样率，在提高分辨率的同时得到有用的信号。所以使用 DDC 可以较少的采样率得到有用的信号。下变频的流程图如下



所示；

图 2-1 数字下变频原理图

正交数字下变频包括两个部分：一是乘法器，二是数控振荡器。正交数字下变频是将数字化后的实信号分为两路：分别乘以  $\cos(\omega n)$  和  $\sin(\omega n)$ ，下变频到零中频，分别形成与原始信号同向和正交的信号。

经过正交数字下变频之后，得到了零中频的基带复信号，再由 FFT 控制的可变频 DDS 进行第二次下变频，此时信号的采样率仍然是 ADC 采样频率，数据率很高，信号的带宽远小于采样频率，所以下面进行的滤波抽取，即是从信号中除去高频信息，降低抽样频率而不导致频谱混叠。

### 2.2 调幅度计算原理

设载波电压为： $u_c = U_c \cos \omega_c t$ ，调制电压为： $u_\Omega = U_\Omega \cos \Omega t$ ，通常满足  $\omega_c \gg \Omega$ 。根据振幅调制信号的定义，已调信号的振幅随调制信号  $u_\Omega$  线性变化，由此可得振幅调制信号振幅  $U_m(t)$  为：

$$\begin{aligned}
U_m(t) &= U_c + \Delta U_c(t) \\
&= U_c + k_a U_\Omega \cos \Omega t \\
&= U_c (1 + m_a \cos \Omega t)
\end{aligned}$$

式中， $\Delta U_c(t)$ 与调制电压 $u_\Omega$ 成正比，其振幅 $\Delta U_c = k_a U_\Omega$ 与载波振幅之比称为调幅度

$$m_a = \frac{\Delta U_c}{U_c} = \frac{k_a U_\Omega}{U_c}$$

式中， $k_a$ 为比例系数，一般由调制电路确定，故又称为调制灵敏度。

## 2.3 调频度计算原理

根据频率调制的定义，高频载波信号的频率与调制信号呈线性关系，即其瞬时角频率为

$$\begin{aligned}
\omega(t) &= \omega_c + \Delta\omega(t) \\
&= \omega_c + k_f U_\Omega \cos \Omega t \\
&= \omega_c + \Delta\omega_m \cos \Omega t
\end{aligned}$$

式中： $\Delta\omega(t) = k_f u_\Omega$ 为角频偏； $k_f$ 为调频系数，也称为调频灵敏度； $\Delta\omega_m = k_f U_\Omega$ 为最大角频偏，由此可得调频信号的瞬时相位

$$\begin{aligned}
\varphi(t) &= \int_0^t \omega(t) dt = \omega_c t + \Delta\varphi(t) \\
&= \omega_c t + k_f \int_0^t U_\Omega \cos \Omega t dt \\
&= \omega_c t + \frac{k_f U_\Omega}{\Omega} \sin \Omega t \\
&= \omega_c t + \frac{\Delta\omega_m}{\Omega} \sin \Omega t
\end{aligned}$$

式中： $\Delta\varphi = \frac{\Delta\omega_m}{\Omega} \sin \Omega t$ 为瞬时频偏，定义 $m_f = \frac{\Delta\omega_m}{\Omega}$ 为调频指数。有此可得，在单一频率调制信号情况下的调频信号的表达式为

$$u_{FM} = U_c \cos(\omega_c t + m_f \sin \Omega t)$$

上式中， $\omega_c$ 为载波角频率， $\Omega$ 是调制信号的角频率， $\Delta\omega_m$ 是相对载频的最大角频偏，与之对应的 $\Delta f_m = \Delta\omega_m / 2\pi$ 称为最大频偏。

## 2.4 调制方式识别原理

区分信号是调幅、调频还是未调制的方法如下：

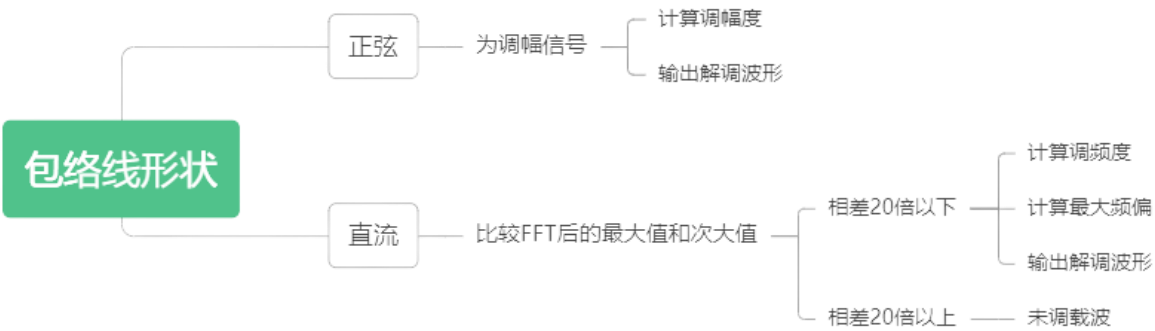


图 2-4 调制方式识别原理示意图

## 3 电路与程序设计

### 3.1 调理电路部分

信号在进行采样之前首先需要调理，即放大和滤波，电路图如下图所示：

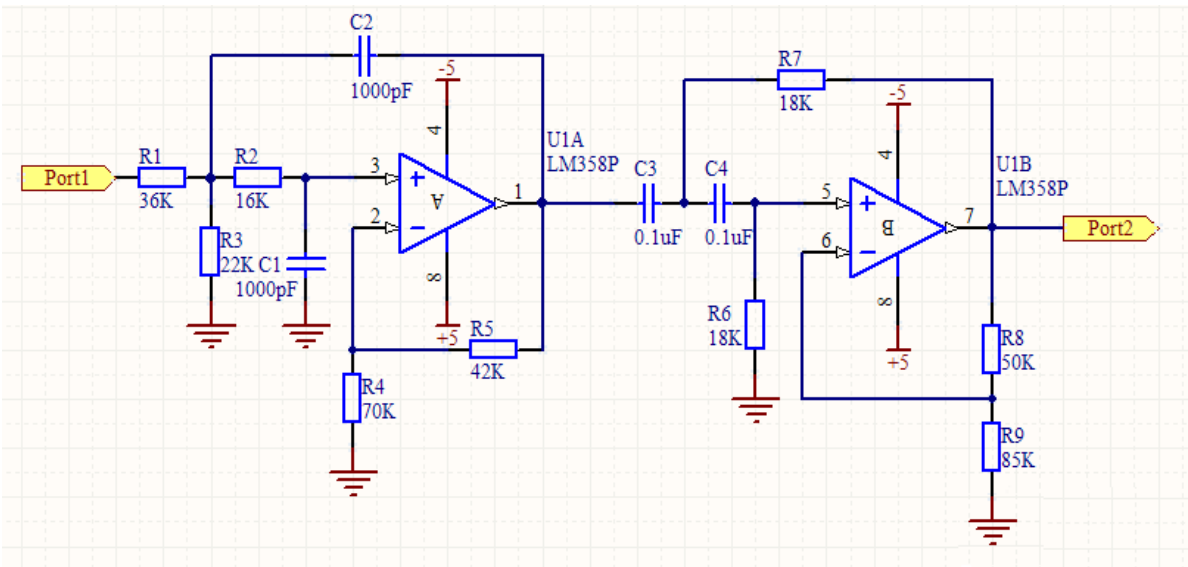


图 3-1 调理部分电路图示意图

### 3.2 AD/DA 部分

高速 AD/DA 模块电路如下图所示

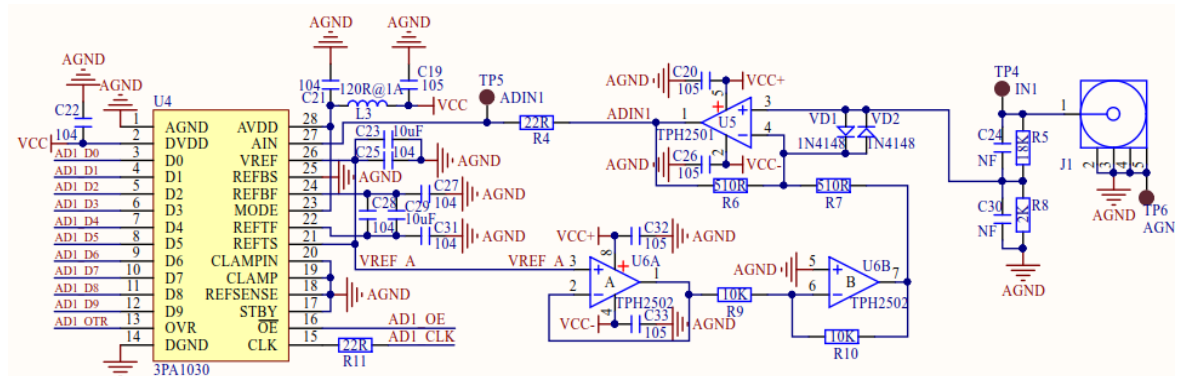


图 3-2 AD/DA 电路图

### 3.3 总体程序框架

根据任务要求设计如图 3-3 所示的程序框架。

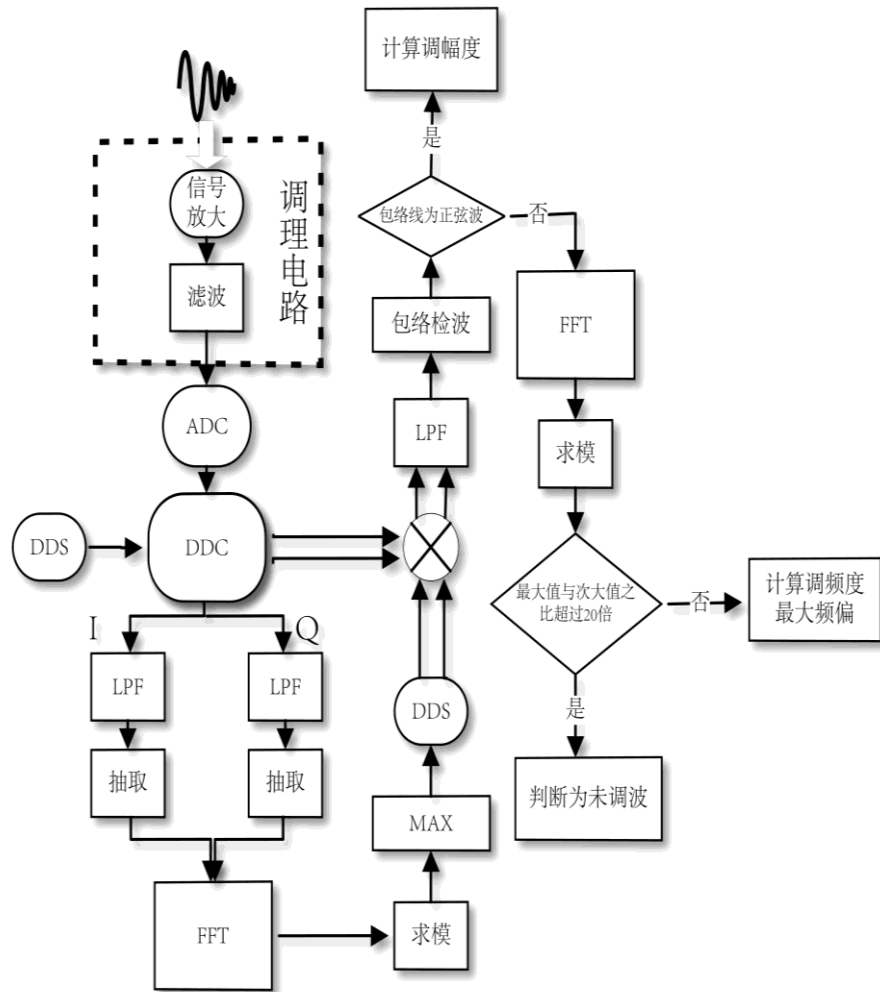


图 3-3 总体程序框架图

- (1) 信号在进行放大和滤波去噪音之后，采样进入系统，此时的数据处于高频带，经过多次数字下变频 DDC 搬移到零中频带。之后经过低通滤波和抽取滤掉高频信号。
- (2) 对复信号进行快速傅里叶变换，之后根据  $M = \sqrt{I^2 + Q^2}$  求模，找最大值对应的频率，以此作为频率控制字进行 DDS，再进行低通滤波，从而将信号进一步搬移到零中频。
- (3) 对信号进行包络检波，如果波形为正弦波，则进行 AM 解调，计算  $m_a$ ；否则，FFT 的频谱图判断其频率分量，如果最大值和次大值之比大于 20，说明载波信号不含调制信号；反之，则进行 FM 解调。

## 4 系统测试

### 4.1 测试结果

AM 调制方式的测试结果如下：

表 4-1 AM 调制方式测试结果

信号调制方式	调制信号频率	标准调幅度	输出调幅度	绝对误差	解调波形是否失真
AM	1kHz	0.3	0.357	0.057	无明显失真
AM	1kHz	0.5	0.551	0.051	无明显失真
AM	1kHz	1	0.939	0.061	无明显失真
AM	1.5kHz	0.3	0.356	0.056	无明显失真
AM	1.5kHz	0.5	0.469	0.031	无明显失真
AM	1.5kHz	1	0.945	0.055	无明显失真
AM	2kHz	0.3	0.353	0.053	无明显失真
AM	2kHz	0.5	0.542	0.042	无明显失真
AM	2kHz	1	0.95	0.05	无明显失真
AM	2.5kHz	0.3	0.35	0.05	无明显失真
AM	2.5kHz	0.5	0.533	0.033	无明显失真
AM	2.5kHz	1	0.955	0.045	无明显失真
AM	3kHz	0.3	0.348	0.048	无明显失真
AM	3kHz	0.5	0.489	0.011	无明显失真
AM	3kHz	1	0.967	0.033	无明显失真

FM 调制方式的测试结果如下:

表 4-2 FM 调制方式测试结果

信号调制方式	调制信号频率	标准调频度	最大频偏	输出调频度	输出最大频偏	误差	解调波形是否失真
FM	3kHz	1.5	4.5kHz	1.322	8.561kHz	0.178	无明显失真
FM	3kHz	3	9kHz	2.854	8.561kHz	0.146	无明显失真
FM	3kHz	6	18kHz	5.896	17.688kHz	0.104	无明显失真
FM	3.5kHz	1.5	5.1kHz	1.667	10.897kHz	0.167	无明显失真
FM	3.5kHz	3	10.5kHz	3.144	10.898kHz	0.144	无明显失真
FM	3.5kHz	6	21kHz	5.916	20.556kHz	0.084	无明显失真
FM	4kHz	1.5	6kHz	1.366	12.562kHz	0.134	无明显失真
FM	4kHz	3	12kHz	3.112	12.563kHz	0.112	无明显失真
FM	4kHz	6	24kHz	5.913	23.640kHz	0.087	无明显失真
FM	4.5kHz	1.5	6.75kHz	1.578	13.230kHz	0.078	无明显失真
FM	4.5kHz	3	13.5kHz	2.94	13.231kHz	0.06	无明显失真
FM	4.5kHz	6	27kHz	5.926	26.667kHz	0.074	无明显失真
FM	5kHz	1.5	7.5kHz	1.556	14.831kHz	0.056	无明显失真
FM	5kHz	3	15kHz	2.967	14.832kHz	0.033	无明显失真
FM	5kHz	6	30kHz	5.945	29.445kHz	0.055	无明显失真

## 4.2 结果分析

- (1) 在其他条件不变的情况下, 调制信号频率越高, 误差越小;
- (2) 在其他条件不变的情况下, 标准调频度越大, 误差越小;

## 参考文献

- [1] 华成英, 童诗白. 模拟电子技术基础(第四版) [M]. 北京: 清华大学出版社, 2006
- [2] 全国大学生电子设计竞赛组委会. 全国大学生电子设计竞赛获奖作品选编 [M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2008
- [3] 康华光, 陈大钦. 电子技术基础模拟部分(第四版) [M]. 北京: 高等教育出版社, 2003. 4
- [4] 康华光, 邹寿彬. 电子技术基础数字部分(第四版) [M]. 北京: 高等教育出版社, 2000. 7
- [5] 黄志伟. 全国大学生电子设计竞赛培训教程 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2005
- [6] 康华光. 电子技术基础(模拟部分)(第五版) [M]. 北京: 高等教育出版社, 2005