

2022 年江苏省大学生电子设计竞赛 (TI 杯)

题目： 信号调制度测量装置

题目编号： F 题

参赛队编号： NJ358

参赛队学校： 南京理工大学

参赛队学生： 花睿、谢安楠、王萌

二〇二二年七月

信号调制度测量装置

摘要：信号调制是使一种波形的某些特性按另一种波形或信号而变化的过程或处理方法，一般分为调幅(AM), 调频(FM), 和调相 (PM)。在无线电通信中，利用电磁波作为信息的载体。经过调制可以对原始信号进行频谱搬移，已调信号携带有信息且适合在信道中进行传输。本设计通过下变频降低信号频率，并采用FFT对采样和量化后的被测信号进行谱分析，获得基波和各次谐波的幅度，频率，结合多次滤波，通过分析信号包络判断调制类型，成本较低且具有较好的测量速度，在一定频率下具有高精度和高稳定性。

关键词：调制度；FFT；下变频；频谱搬移

1. 设计方案工作原理

1.1 预期目标实现定位与系统原理

调制度（调幅度 m_a 和调频度 m_f ），是已调波的一个重要参数。关系是输出幅度大小与调制度成正比，反映载波的幅度、频率。调制度是已调波的一个重要参数，反映了载波的幅度、频率或相位受低频调制信号控制的程度。

本系统期望实现测量并显示信号源输出的被测信号调制度等参数，识别并显示被测信号的调制方式，输出解调信号，并将结果显示在串口屏上。

测量装置的主要原理是首先使用ADC采样（采样频率为80MHz，采样区间为10MHz到30MHz），在FPGA中通过下变频获得I, Q复信号，再通过滤波（采样率为40MHz），接着进行大范围的FFT获取信号的最大值，找到最大谱值，再次进行下变频，在4MHz的频率水平上进行取包络处理，调幅度 m_a 即为直流分量幅度与交流分量幅度的比值，即为第一问的处理方法。并在公式 $u_{FM}(t) = U_c \cos(\omega_c t + m_f \sin \Omega t)$ 的基础上，通过对相位求差分等方法，降低采样频率最终求出 m_f ，并通过分析包络是否带有直流分量，确定信号的调制类型，然后计算求得并将结果通过串口屏展示。

AM 调制度 $=\max \left[m(f) \right] (信号最大值)/A$ (载波 V_{pp})

FM 调制度 $m_f = \Delta f/f = \left[f_{max} - f_{min} \right] / f_c = kA/f_c$

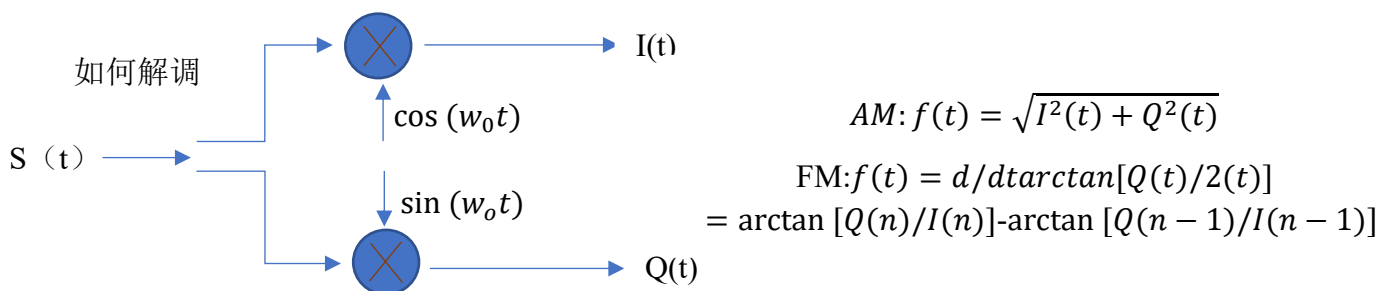


图1 解调原理

1.2 技术方案分析比较

调幅度测量可以使用模拟的方法，也可以使用数字信号处理技术。前者使用的较多，但技术落后；后者技术先进，值得研究。但两者的基本原理是一致的，只是技术手段不同。模拟法是指直接应用模拟电路对信号进行处理，实现失真度测量。主要缺点在于：由于器件的非线性，会产生机内引入失真，因此对小信号的测量不够准确；另外使用带阻滤波器而使频率范围较窄，一般为 $5\text{Hz} \sim 200\text{kHz}$ ，无法完全满足需要，且当信号失真较大时，基波有效值本身的误差较大，也将影响测量准确度。

数字化方法是指首先通过数据采集卡将被测信号量化，再对测量数据处理，最后计算出失真度的测量方法，如图1所示。



图2 数字化调制度测量装置原理框图

根据失真度的计算方法可分为曲线拟合法和FFT法。

从原理上说，曲线拟合法可测量并评价更宽频率范围的正弦信号。但是同时对数据采集部分硬件要求高，实现较为困难，且在曲线拟合的过程中会引入误差。

采用FFT对采样和量化后的待测信号进行分析，获得I, Q复信号，然后在滤波和多次变频后通过取包络的方法处理信号求得调幅度 m_a 。因为真实的数据采集很难做到整周期采样，导致频谱泄漏，进而引入误差；因此采用FFT的方法测量待测信号失真度时，频谱泄露成为了影响测量精度的主要因素。

综合上述分析，选择采用FFT对采样和量化后的被测信号进行处理，在经过滤波和多次变频后通过取包络的方法处理信号求得调幅度 m_a 和调频度 m_f 。

2. 系统软件设计分析

2.1 系统总体工作流程

本设计基于 TI 的型号为 xc7a35tcpg236_2 的 FPGA 芯片作为信号处理的主控制器，通过计算获得输入信号的调制度，并根据分析结果进行解调。基本信号处理流程如图 2 所示。

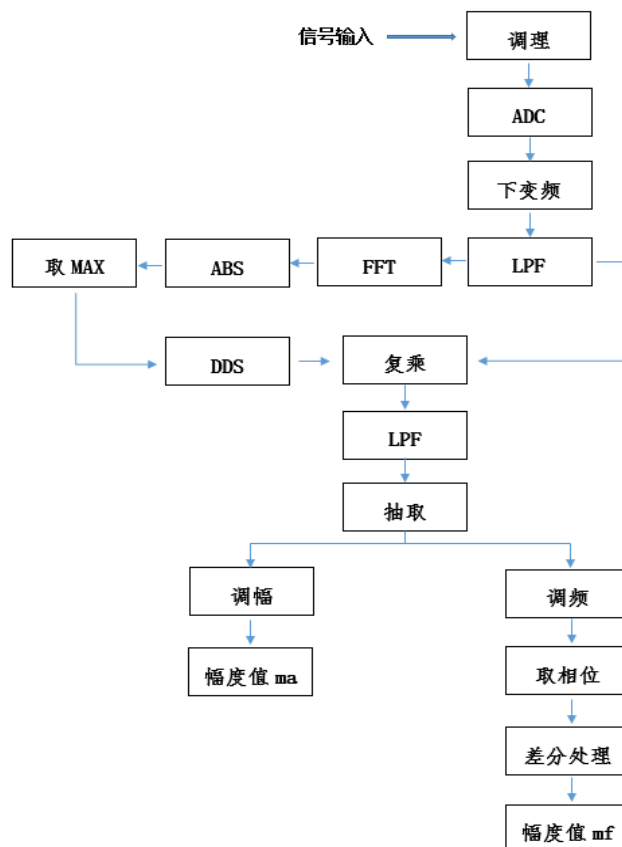


图3 基本信号处理流程框图

2.2 主要模块程序设计

本系统主要分为以下5个模块。

(1) 调理电路

首先将输入信号进行调理，即让的调制正弦信号进入调理电路，把模拟信号变换为用于数据采集、控制过程、执行计算或其他目的的数字信号，由于传感器输出是相当于小的电压，电流或电阻的变化，因此，在变换为数字信号之前必须进行调理，调理就是放大，缓冲或定标模拟信号等，使其适用于数模转换器的输入，然后，ADC 对模拟信号进行数字化，并把数字信号送到 MCU 或其他数字器件，以便用于系统的数据处理。

(2) ADC 模块

ADC 模块即模数转换模块，为了将电压信号转换为相应的数字信号，ADC 模块是嵌入式应用中的重要组成部分，是嵌入式与外界连接的重要纽带。

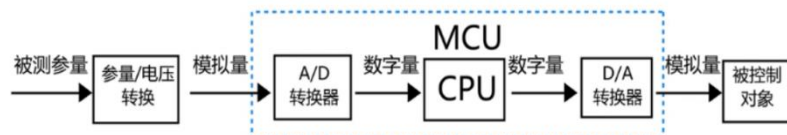


图 4 ADC 模块原理框图

信号通过外设 AD 采样，配置寄存器，选择单通道连续采样模式，在较高的 ADC 时钟频率下确保足够长度采样保持时间，从而获得较为精确的模数转化结果，为后续的一系列降频、解调处理提供有效而准确的数据。

(3) 下变频

为了降低信号的载波频率或是直接去除载波频率得到基带信号，所以需要设计某个系统，将信号频率变低。在接收机中，如果经过混频后得到的中频信号比原始信号低，那么此种混频方式就叫做下变频。

数字下变频 DDC 即在数字系统中对信号进行下变频，实现从射频信号到基带信号的转变，用一个严格同频同相的载波，得到一个高频分量和低频分量，用一个低通滤波器对信号进行滤波即可将信号调节出来。

$$I = u_M(n) * \cos(20Mn)$$

$$Q = u_M(n) * \sin(20Mn)$$

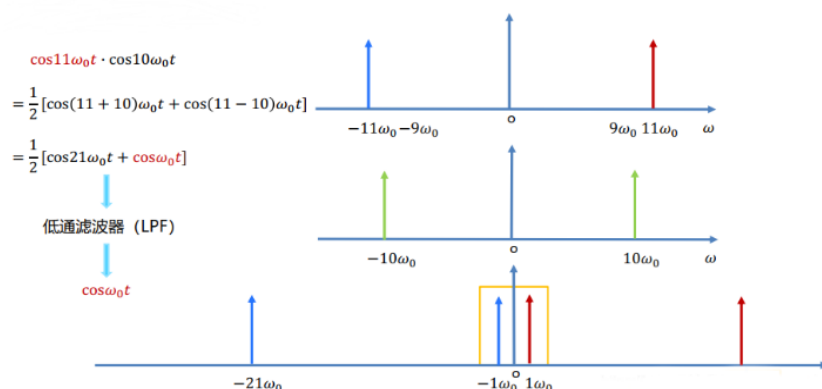


图 5 数字下变频

(4) LPF 低通滤波模块

对于下变频后的信号我们要对它用低通滤波器滤波，将高频段滤除出去，使被测信

号的载频下降到 20MHz

实现 FIR 滤波器的过程其实就是实现卷积的过程，卷积的公式如下，从如下公式

$$y(n) = h(n) * x(n) = \sum_{k=0}^{N-1} h(k) x(n-k)$$

中可以看出， $x(n)$ 是我们的待滤波信号， $h(n)$ 是滤波器系数，卷积的过程其实就是一个乘、累加的过程，所以用 FPGA 实现 FIR 滤波器的主要分成三级流水线，第一级、将输入信号延时，这样才能将信号和滤波器系数相乘。第二级、将输入信号和系数相乘。第三级、将乘积进行累加得到结果。

(5) FFT 频谱分析模块

将经过降频处理的被测信号进行 $N=1024$ 点的 FFT 变换，以便对输入信号进行频谱分析。FFT 的输出波形应为窄带三角波形，其中心幅值最高处频率即为输入信号的频率。

(6) FFT 数据处理和指引 DDS 信号合成模块

为找出处理过后的载波频率以对其进行消除，在进行 FFT 过后，将其采样幅值进行 abs 求模处理，以 $X(k)$ 表示采样序列的频谱值，计算得到每个点对应的模值为：

$$|X(k)| = \sqrt{X_R^2(k) + X_I^2(k)}$$

设计一个模块，遍历 FFT 频谱中的每一个采样值，逐一进行比较，最后输出最大值频率索引 n ；得到最大值索引 n 后，利用如下公式得出基波频率 F ：

$$F = n * F_s / N$$

其中， F_s 为采样频率， N 为 FFT 采样点数

得到的基波频率 F 即作为指引，让 DDS 信号发生器合成与之同频率的正弦波，与被测信号相乘，再次根据积化和差的原理，在理想条件下将分别得到一个高频信号和一个直流信号。并再次通过 LPF 低通滤波器滤除其中的高频信号，得到一个直流基带信号，从而实现高频载波去除。此模块的实现流程如下图



图6 FFT 数据处理和指引 DDS 信号合成模块实现流程

(7) 调幅度和调频度计算模块

若被测信号为单音调幅 (AM) 电压信号 $u_{AM}(n)$ ，其表达式应为：

$$u_{AM}(n) = (1 + u_C(n)) \cos \Omega n$$

其中， $u_C(n) = m_a \cos \Omega n$ 。

若被测信号为单音调频（FM）电压信号 $u_{FM}(n)$,其表达式应为:

$$u_{FM}(n) = u_c \cos(\omega_c n + f_a(n))$$

其中, $f_a(n) = m_f \sin \Omega n$ 。

当需要进行调幅度测量时,滤除载频后的被测信号变为:

$$u_{AM}(n) = 1 + m_a \cos \Omega n$$

将上一模块输出的波形显示在示波器上,观测其幅值即为所求调幅度 m_a 。

当需要进行调频度测量时,滤除载频后的被测信号变为:

$$u_{FM}(n) = u_c \cos(m_f \sin \Omega n)$$

此后对其进行相位提取处理,得到包含误差值的 $\varphi(n) = \omega_i + m_f \sin \Omega n$;为去除误差,再对其进行差分处理,最终得到:

$$\omega(n) = \varphi(n) - \varphi(n-1) = \Delta\varphi + m_f(\sin \Omega n - \sin \Omega(n-1))$$

其中 $\Delta\varphi$ 为一常数。将此波形输入示波器进行显示,观测其幅值即为所求的调频度 m_f

(6) 串口屏显示模块

为将测得调幅度与调频度数据进行显示,采用FPGA接收来自上行端口发送的调制度数据,并由FPGA控制串口屏将测量数据进行显示。

3. 作品成效总结分析

3.1 系统测试与成效分析

信号调制度装置的测试步骤如下:

(1) 问题一: 设置信号发生器,使之发出电压峰峰值 100mV 的普通单音调幅(AM)电压 u_{AM} ,其载频为 10MHz、调制信号为频率 1~3kHz 的正弦信号。测试理论值、测量值、误差绝对值如下:

载频/MHz	调制频率/kHz	实际调幅度	测试调幅度	调幅度误差
10	2	0.4	0.40	0
10	2.5	0.5	0.55	0.1

(2) 问题二: 设置信号发生器,使之发出电压峰峰值 100mV 的单音调频(FM)电 u_{FM} ,其载频为 10MHz、调制信号为频率 3~5kHz 的正弦信号。测试结果如下:

输入信号频率 (kHz)	输入信号 m_f	解调信号频率 (kHz)	测试值 m_f^*
-----------------	------------	-----------------	-------------

3	2	3.01	2.15
3.5	3	3.52	3.22
4	4	4.02	4.17
4.5	5	4.51	5.05
5	6	5.05	6.21

(2) 设置信号发生器。载波电压峰峰值 100mV 的高频电压 u_m ，其载频范围为 10MHz~30MHz（频率步进间隔 0.5MHz）。发出信号可能为调幅、调频或未调载波。经多次测试，装置可正确识别三种不同信号。并将误差值控制在要求范围内。

载频 /MHz	调制 频率 /kHz	实际 调制 方式	显示 调制 方式	实际 调制 度	测试 调制 度	调制 度误 差	实际 最大 频偏 /kHz	测试最 大 频偏 /kHz
25	8	AM	AM	0.4	0.40	0	\	\
25	8	AM	AM	0.6	0.60	0	\	\
25	8	FM	FM	3	3.18	0.18	24	25.75
25	8	FM	FM	5	5.20	0.20	40	41.64
25	8	未 调 制	未 调 制	\	\	\	\	\
15	6	AM	AM	0.5	0.50	0	\	\
15	6	FM	FM	4	4.25	0.25	24	24.98
15	6	未 调 制	未 调 制	\	\	\	\	\

3.2 创新特色与总结展望

基于FPGA开发板的MCU进行信号调制度测量装置的制作，其具有体积小，一键启

动，，测量方便，运算速度快，能耗低等特点。巧妙运用下变频，将高频载波分解为I, Q两路正交信号以便于后续处理，同时获得解调信号的包络和相位。再通过低通滤波作用，根据双路正弦信号相乘的积化和差原理，并应用FFT频谱分析以及DDS信号发生器进行指定频率信号的合成，从而逐步实现高频载波信号的滤除。同时，通过观测输出波形来进行被测信号种类的鉴别以及调制度的计算，其具有简单直观的优点。

(1) 设计创新点

本设计具有很强的普适性，可根据不同的被测信号类型进行载波滤除，并测量调制度以及输出解调信号的波形。其主要创新点有以下三个：

其一，采用下变频将被测信号分为I, Q两路正交信号，不仅减少了后续进行信号处理的工作量，而且便于同时提取出信号的包络和相位，从而同时满足调幅度、调频度的测量需要。并且后续的低通滤波处理应用简单的积化和差原理，滤除作用后信号的高频分量，直接得到频率降低数值为本地载频值的正弦信号。

其二，采用FFT进行信号的频谱分析、求模、求最大值索引，作为指导DDS信号发生器，合成与处理狗惠普的载频同频率的正弦信号，同样依据积化和差原理，再次通过低通滤波器，即可得到消除载波的直流信号。

其三，整个测量装置基于一套处理程序，可通过波形检索出被测信号类型，极大地简化了测量流程。

(2) 设计总结及场景展望

经过测试，对被测信号调制度的测量误差可以达到题目要求，对调幅度的测量误差；对调频度的测量误差，经过串口屏显示数据完整，并且输出的解调信号波形无明显失真。

本设计可应用于各种调制信号的滤波解调，并能依据输出波形判断信号解调类型。调制与解调在信号处理领域起着很大的作用，本装置可方便地测量出信号的调制度及输出其解调波形，因而有着良好的应用前景。

4. 参考资料及资料

- [1] 黄根春. 全国大学生电子设计竞赛教程——基于TI 器件的设计方法[M]. 北京：电子工业出版社，2011
- [2] 张永瑞. 电子测量技术测量[M]. 西安：西安电子科技大学出版社，2009
- [3] 钱玲. 数字信号处理[M]. 北京：电子工业出版社，2018