

## 信号调制度测量装置

**摘要：**本装置功能为分辨输入被测信号的调制类型，并输出解调波形以及输入信号调制度。本设计采用前后两次混频、低通滤波、插值实现对输入信号的频谱搬移，以减小采样频率。通过对两次混频、低通滤波、插值处理后的输出 I、Q 两路计算包络以区分调制方式，并分别调用不同解调模块进行调制度计算并进行解调波形输出。AM 解调通过包络的极值得到调幅度和解调波形；FM 解调通过计算相位差分得到调频度和解调波形。

**关键词：**调制度；DDC；basy3；FFT

## 1. 设计方案工作原理

### 1.1 预期目标实现定位与系统原理

调幅系数在调制技术中，指的是衡量调制深度的参数。

在调幅（AM）技术中，调制系数指调制信号与载波信号幅度比。

由 AM 的调制原理可得 AM 调制信号的表达式为：

$$U_{AM}(t) = U_c(1 + m_a \cos \Omega t) \cos \omega_c t$$

所以调制度计算的公式可以写为：

$$m_a = [(A - B)/(A + B)]/2$$

其中 A、B 分别表示波形垂直方向上的最大和最小幅度。

在调频（FM）系统中，调频系数为频偏与最大信号带宽的比。

由 FM 的调制原理可得 FM 调制信号的表达式为：

$$U_{FM}(t) = U_c \cos(\omega_c t + km_a \int \cos \Omega \tau * d\tau)$$

经过微分可得：

$$m_f = \frac{\Delta f_m}{f}$$

其中  $\Delta f_m = 2\pi km_a$  为最大频偏，f 为信号最大带宽。

本系统期望实现识别并显示被测信号的调制方式，完成信号调制度的测量并在示波器上输出解调信号。测量装置的主要原理是将调理后的电路通过前后两次下变频至零频，再对信号进行调制方式的判断并进行调制度的计算。

### 1.2 技术方案分析比较

测量信号调幅度的方法大致可分为两类：模拟法和数字化方法。

模拟法是指直接应用模拟电路对信号进行处理，实现调幅度测量。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；另使用带阻滤波器而使频率范围较窄，一般为 5Hz~200kHz，无法完全满足需要。

数字化方法是指通过数据采集将被测信号量化，再对测量数据处理，判断调制方法并计算出调幅度，由于本题中输入信号幅值较小，考虑先对信号进行预处理（即调理），包括信号的放大、偏移等，如图 1 所示。



图 1 数字化信号调制度测量仪原理框图

由于载波信号较高，且与调制波信号频率差距过大，考虑采用混频器将输入信号下变频至低频，并生成 I、Q 两路正交信号，以便后续电路的处理和操作。对于前两个要求，信号源输入的 AM 调幅信号和 FM 调频信号的调制载波为定值 10MHz，可直接利用 DDS 产生 10MHz 的本振信号，与输入信号混频，将输入信号搬移至零中频。对于第三个要求，我们通过两次混频将信号搬移至零中频，第一次将信号频谱搬移至低频频段，通过 FFT 寻找第二次混频所需的本振信号的频率，从而再次混频将信号搬移至零中频。将信号降至零频附近后，利用 I、Q 两路正交信号进行取模计算信号的包络，通过判断包络变化区分信号调制方式，从而选择相应的解调方式，计算调制度并在示波器上出。

调幅系数  $m_a$  测量方法是双重检波法，它实质上是一个外差式接收机，已调波在经过下混频、低通滤波、抽取后，可根据 I、Q 两路正交信号计算得到去掉载波信息的包络信号，从而寻找包络的最值对  $m_a$  进行求解计算。

调频指数  $m_f$  的测量方法是  $m_f = \Delta f_m / f$ ，其中  $\Delta f$  为频偏， $f_m$  为信号最大带宽。

① 频谱幅度比较法：调频波各谱线幅度比与  $f_m$  有对应的关系，在  $f_m < 2.4$  范围内，利用频谱仪测出二根谱线幅度比，查表求出  $f_m$ 。此法适用于测小  $f_m$  的频偏。

② 频谱分析法：利用边频谱线（根）数  $n$  与  $m_f$  有对应关系： $n = 2(m_f + 1)$ ，按边频谱线的（根）数确定  $m_f$ 。此法适用于  $m_f < 30$  的场合， $m_f$  太大时，边频谱线根数不易数清。

③ 差分方法求解：由于第二级混频输出 I、Q 两路信号，根据  $\arctan(Q/I)$  计算信号相位值  $\varphi$ ，对数字信号做差分得  $\varphi(n) - \varphi(n - 1) = \Delta f_m * m(n) + f_c$ ，其中  $\Delta f_m$  是最大频偏， $m(n)$  是基带信号， $f_c$  是载波频率。根据公式  $m_f = \Delta f_m / F$ ，其中  $F$  为调制信号的频率，可以计算出调频度  $m_f$  的值。

求解出解调波形与调制系数后，分别从示波器和串口屏输出。



## （2）AD 采样量化模块

ATK\_DUAL\_HA\_AD 模块与改装后的 basys3 相连,配置好 basys3 上的管脚,由于题目中载波范围在 10MHz-30MHz,将采样频率设置为 80MHz。考虑到 AD 芯片最高可提供采样频率为 40MHz、有双通道,所以将两路采样时钟分开分别对输入信号进行,利用 80MHz 时钟频率,在每次该时钟上升沿到来时刻交替依次将采样值存入信号,作为采样得到的 10 位数字信号,其中两路采样时钟反向效果最理想。

## （3）下变频、滤波、抽取

上述模块通过高速 ADC 接收到一个很高频的信号,而我们要用的信号以某种复杂的方式调制在这个高频信号中。假如直接采样,则处理器的采样频率需要和 ADC 相匹配;但假如先用数字下变频(DDC)对信号下变频,则可以大大降低采样率,同时得到有用的信号。

第三问输入已调信号载波频率范围位 10MHz-30MHz,所以将输入信号与中心频率 20MHz 混频。由 DDS 核产生的 8 位的 20MHz 正弦信号进行混频,混频后输出信号通过 FIR 低通滤波器,可以通过 matlab 工具窗生成导出 FIR 核中的系数 coe 文件,导入 IP 核后,进行低通滤波后得到频率范围在 10MHz 以内的 16 位下变频信号。而低通滤波器的输出在零中频附近,可通过 CIC 核实现抽取将采样频率从 80MHz 降低为 40MHz。

## （4）自适应再次混频

由于第三问输入已调信号载波频率存在范围,所以上述处理后实际输入信号的中心频率可能仍不在零频。做快速傅里叶变化(FFT)对上一步输出信号进行频谱分析,进而做第二次混频,将信号搬移至零频。FFT 后,寻找频谱最大值处对应数字频率值,再利用 DDS 核生成该频率的正弦信号用于与 FFT 前信号混频,以实现信号的二次搬移。这一次搬移具有自适应,使输出信号频率范围控制在 10kHz 以内。

## （5）判断调制类型

上述均为输入信号解调核求调制度的预处理,在完成预处理后,对二次混频后的输出求包络并求包络最值,可以通过最大值与最小值是否相等进而判断信号的 AM 调制还是 FM 调制。

## （6）AM 解调,并计算调幅度

考虑到 AM 调幅信号的调制度  $m_a$  为小数，由于 Verilog 语言对小数表示的局限性，我们采用了 Vivado 软件的 IP 核 cordic 进行除法运算，设置输出数据的小数位数为三位，并对输出数据进行截取获得相应小数位数的输出 8 位数据调幅度  $m_a$ （后三位为小数）。

当得到包络信号后去掉直流分量即为解调输出波形，输入到 DA 前需根据 DA 对端口输入数据的要求进行调整（即 10 位无符号输入）。

#### （7）FM 解调，并计算调频度

由第二级混频输出 I、Q 两路信号，利用 cordic 核计算  $\arctan(Q/I)$  得到信号相位值  $\varphi$ ，利用阻塞赋值实现差分运算。对数字信号做差分得  $\varphi(n) - \varphi(n-1) = \Delta f_m * m(n) + f_c$ ，其中  $\Delta f_m$  是最大频偏， $m(n)$  是基带信号， $f_c$  是载波频率。根据公式  $m_f = \Delta f_m / F$ ，其中  $F$  为调制信号的频率，设置输出数据的小数位数为三位，并对输出数据进行截取获得相应小数位数的输出 8 位数据调频度  $m_f$  的值（后三位为小数）。

并将  $m(n)$  为解调输出波形，输入到 DA 前需根据 DA 对端口输入数据的要求进行调整（即 10 位无符号输入）。

#### （8）DA 输出、串口屏输出

ATK\_DUAL\_HA\_DA 模块与改装后的 basys3 相连，配置好 basys3 上的管脚，将输出值截位成 10 位对应到无符号数 0-1024，当输入数据等于 0 时，3PD5651E 输出的电压值为 5V；当输入数据等于 10'h3ff 时，3PD5651E 输出的电压值为 -5V。数据在时钟的上升沿锁存，因此可以在时钟的下降沿发送数据，这样使 DA 芯片在数据的中央采样，保证数据采样的准确性。

3PD5651E 内部没有集成 DDS 的功能，但是可以通过控制 3PD5651E 的输入数据，使其模拟 DDS 的功能。使用 3PD5651E 输出一个正弦波模拟电压信号，那么我们只需要将 3PD5651E 的输入数据按照正弦波的波形变化即可。

#### （9）截位、逻辑位移、算数位移

查看波形时，高位数据可能变化不大，且下一级输入位宽受限，可以考虑截位以实现精度和空间的平衡；

与截位原因类似，需要对无符号数据进行处理，需要考虑逻辑位移；

与截位原因类似，需要对无符号数据进行处理，需要考虑算术位移。

### 3. 作品成效总结分析

#### 3.1 系统测试与成效分析

调制度测量仪的测试步骤如下：

(1) 设置函数/任意波形发生器，使其输出载波频率为 10M-30MHz，频率步进 0.5MHz，峰峰值的电压范围在 30-600mV 之间的任意谐波，用数字示波器测量该信号，确认信号的参数与设定值相同后，将函数/任意波形发生器的输出信号接入调理电路的信号输入端；

(2) 连续记录 5 次数字化调幅度测量仪的测量结果及与标称值的绝对误差；

① 信号 1：（AM 调制的调幅度测量和解调）

表 1 信号 1 的相关参数和测试结果

项目	数值
调制信号频率	2KHz
$m_a$ 理论值	80%
$m_a$ 实际值	87.5%

② 信号 2：（FM 调制的调幅度测量和解调）

表 2 信号 2 的相关参数和测试结果

项目	数值
调制信号频率	4KHz
$m_f$ 理论值	4
$m_f$ 实际值	3.5

③ 信号 3：（判断调制类型和解调）

表 3 信号 3 的相关参数和测试结果

项目	数值
载波频率	20MHz
调制信号频率	8KHz
设置调制类型	AM
判断调制类型	未识别
$m_a/m_f$ 理论值	90%
$m_a/m_f$ 实际值	\

### 3.2 测试结果分析与总结展望

在本次实验中，实际测量值与理论值相比存在一定误差，在 AM 调制信号的调幅度计算中，其计算精度符合要求，但 FM 的调频指数计算超出了误差允许的范围。

经过分析，误差的可能来源主要是以下几点：

- 1) AD 采样的过程中，因为时钟频率的限制，导致采样频率较低，一个周期内采得的点数过少，输入波形有一定失真，会影响其实际频率，进而影响最终的计算结果。
- 2) 在 FFT 计算过程中，为满足时序逻辑，同时满足题目中的运算速度要求，FFT 计算的点数仅为 128 位，频率分辨率较低，也会影响最终的结果。

## 4. 参考资料及文献

- [1] 曾兴雯.高频电子线路[M].北京:高等教育出版社，2016:192.
- [2] 钱玲.数字信号处理[M].北京:电子工业出版社，2018:135.
- [3] 陈祝明.软件无线电技术基础[M].北京:高等教育出版社，2007:63.