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; basys3; 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 $\Delta f_m = 2\pi k m_a$ 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。

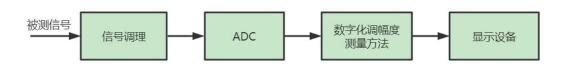


图 1 数字化信号调制度测量仪原理框图

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 Δf 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 φ ,对数字信号做差分得 $\varphi(n)-\varphi(n-1)=\Delta f_m*m(n)+f_c$,其中 Δf_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. 系统软件设计分析

2.1 系统工作总体流程

本设计基于用 ATK_DUAL_HA_AD、ATK_MO5651D 作为 AD、DA 的改装后的 basys3 作为主控制器,通过计算得到输入信号的调制度。基本信号处理流程如图 2 所示。

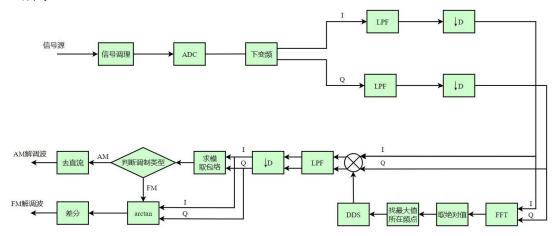


图 2 数字化信号调制度测量仪原理框图

2.2 主要模块程序设计

本系统分为以下 9 个模块。

(1) 信号调理

信号发生器产生的被测信号幅度过小,为了提高模拟信号转换成数字信号时的精度,我们希望输入的模拟信号的最大值刚好等于 A/D 转换设备输入范围。被测信号的输入范围在 mV 级,而 A/D 转换设备输入范围为 V 级,因此我们需要使用信号调理电路对传感器的信号放大,同时信号调理还实现对输入信号的滤波功能。将模拟信号在数字化前进行低通滤波,以消除噪声和防止混叠现象。AD 模块输入信号范围为 0-2V,我们设计调理电路使信号放大并加偏置。

调理电路如图 3 所示。

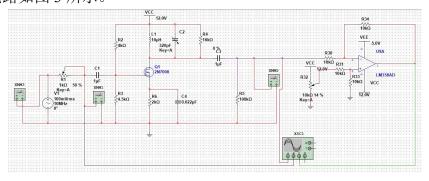


图 3 数字化信号调制度测量仪原理框图

(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 φ ,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 Δf_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

7. 7. 7. 7. 7. 7. 7. 7. 7. 7. 7. 7. 7. 7	
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.