

信号调制度测量装置

摘要：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。本设计采用下变频和 LPF 低通滤波，将采样后的被测信号分成相互正交的两路，并将其载波频率逐次降低。再经过 FFT 进行频谱分析，以指导 DDS 合成同频率正弦波，与处理后的载波相作用，应用积化和差原理再经低通滤波，最终达到去除载波、解调信号的目的。通过示波器输出解调后的信号，并根据其幅值计算出调幅度和调频度，将计算结果显示在串口屏上。

关键词：调制度测量；下变频；LPF；FFT；DDS

1. 设计方案工作原理

1.1 预期目标实现与装置原理

信号传输过程中，调制（Modulate）的目的是将基带信号转换为适合于信道传输的数字调制信号；解调（Demodulate）的目的是将接收端接收到的数字调制信号还原成基带信号，调制度（degree of modulation）则可以反映载波的幅度、频率。

本测量装置期望实现对于来自信号发生器所生成的调制载波进行处理，采集，分析，然后自主识别其调制方式，即判断载波为调幅（AM）调频（PM）或者未调制；并能显示信号的调制度，并将结果显示在串口屏上。

测量装置的主要原理是使用下变频的混频方式得到 IQ 信号，再使用 FFT 分析得到解调信号参数，进而测量计算出信号的调制度，使其在串口屏显示，最后通过 DDS 技术还原输出解调信号的波形。

1.2 技术方案分析比较

调制样式识别装置包括三个模块：信号预处理模块、特征提取模块和调制样式识别模块，如图 1 所示：

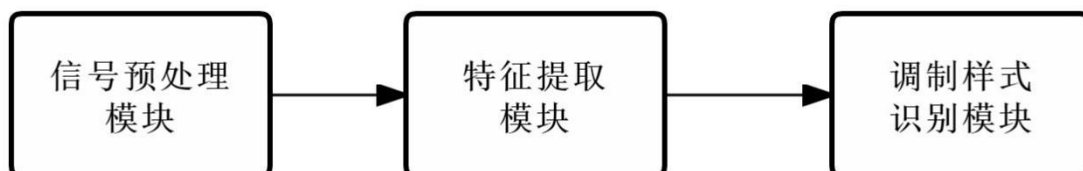


图 1 调制样式识别装置框图

信号预处理模块功能是通过一系列处理，便于后续提取信号的特征数据。测量装

置中主要包括了 A/D 转换、频率下变频、同相和正交分量分解、载频估计和载频分量的消除等。

特征提取模块是从输入的信号序列中提取对调制识别有用的信息，主要是从数据中提取信号的时域特征或频域特征。

识别信号调制方式的方法主要分为两类：基于特征提取的统计模式识别方法和基于决策理论的最大似然假设检验方法。统计模式识别方法首先要从接收的信号中提取出特征参数，然后通过模式识别系统来确定信号调制类型。而决策论方法从概率论和假设检验角度出发，采用贝叶斯理论，解决信号的识别问题；它根据信号的统计特性，通过理论分析与推导，得到检验统计量，从而进行比较判定。

与统计模式识别方法相比，决策理论的最大似然检验方法在本次信号调制方式识别过程中有以下局限性：

1) 似然函数推导复杂，未知变量较多时既难以处理，计算量还大；如果简化处理会丢失分类信息导致分类性能下降;适用性差；

2) 由于似然函数的参数均是由特定条件下特定信号推导得到的，因而只适用于特定环境的调制识别问题；

3) 在信噪比较高的情况下，统计模式更容易提取信号特征，且在识别对象调制方式小的情况下，算法不具有简洁性，高效性。

综合上述分析，决定在调制样式识别模块中采用统计模式识别方法，根据特征参数，判断调制方式。经使用，发现这种方式具有理论分析简单，预处理简单易实现，识别性能较好的特点。

2. 软件设计分析

2.1 总体工作流程

本设计采用基于 FPGA 的开发板作为被测信号采集和处理的主控制器，采用下变频、LPF 低通滤波对信号进行降频处理，然后进行 FFT 频谱分析，以指导 DDS 信号发生器合成同频率正弦波，与被测信号相作用后再经低通滤波，最终达到去除载波、解调信号的目的。基本的信号处理流程如图 2 所示：

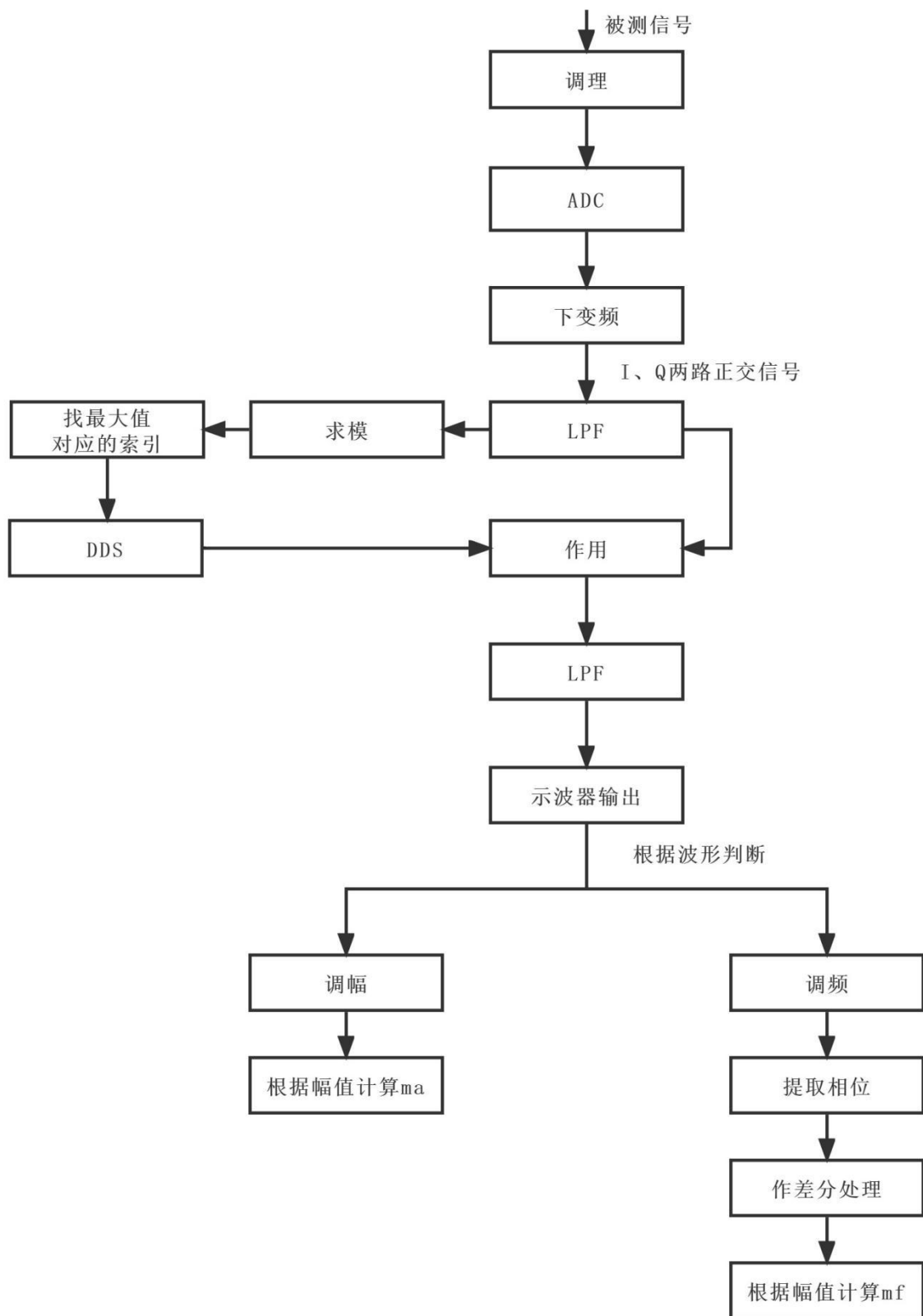


图 2 信号处理流程图

2.2 主要模块程序设计

本设计主要分为以下六个模块：

(1) 调理和 ADC 采样模块

通过外设 ADC 采样，配置寄存器值，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。

(2) 下变频和 LPF 低通滤波器降频模块

为了逐步降低被测信号的载波频率以达到滤波解调的目的，采用下变频的方法，将接收到的信号与本地振荡器产生的本振信号相乘，本地载频设置为 20MHz，处理后得到相互正交的两路信号：I 和 Q，作为被测信号的实部和虚部，以便于后续的信号变频处理：

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

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

然后，选择其中的 I 路信号进入 LPF 低通滤波器，根据两个正弦信号相乘的积化和差公式，进一步滤除高频分量，以达到降频目的。经过这一步的处理后，被测信号载频将下降 20MHz。整个处理过程的流程如图 3 所示：

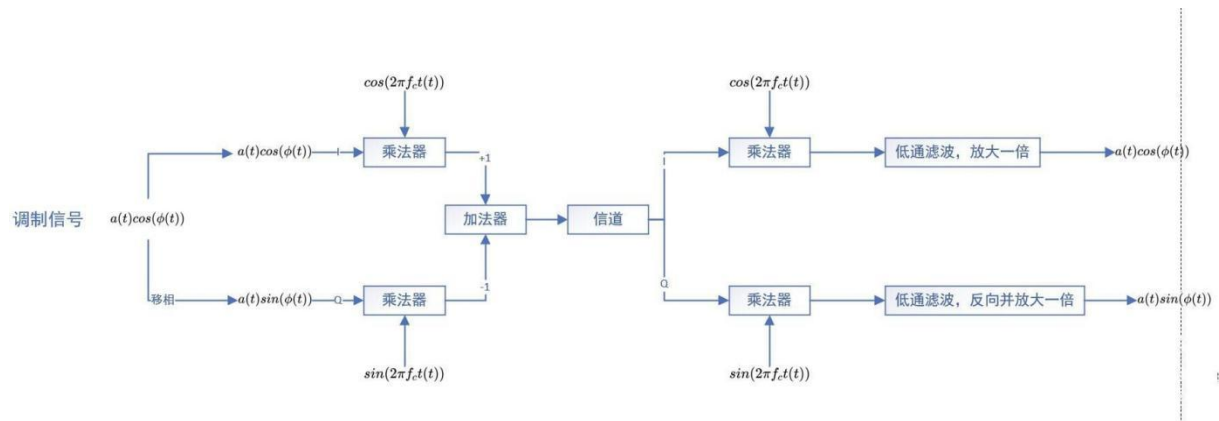


图 3 下变频和 LPF 低通滤波器处理流程

(3) 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。

(4) 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 ：

$$F = n \cdot F_s / N$$

其中， F_s 为采样频率，设置为 100MHz； N 为 FFT 采样点数，设置为 1024。

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，从而实现高频载波的去除。此模块的实现流程如下图 4 所示：

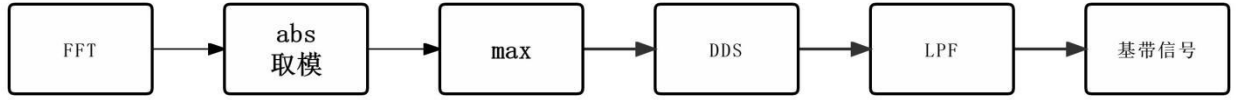


图 4 FFT 数据处理和指引 DDS 信号合成处理流程

(5) 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 STM32 单片机接收来自上行端口发送的调制度数据，并由 STM32 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 模块测试与成效分析

调制度测量与显示，识别并显示被测信号的调制方式以及解调信号输出的步骤如下：

(1) 设置信号源，使其依次输出电压峰峰值 100mV 的普通单音调幅 (AM) 电压 u_{AM} ，其载频设置为 10MHz、调制信号频率设置为 1~3kHz；电压峰峰值 100mV 的单音调频 (FM) 电压 u_{FM} ，其载频设置为 10MHz、调制信号频率设置为 3~5kHz；以及载波电压峰峰值 100mV 的高频电压 u_m ，其载频范围为 10MHz~30MHz。确认信号的参数与题目要求的设定值相同后，将信号源输出信号接入 FPGA 开发板的 ADC 通道。

(2) 分别记录三次被测信号通过信号调制度测量装置后的解调信号波形，并将三次测得的调制度结果显示在串口屏上。

3.2 测量装置成品展示

本设计最终使各个功能的模块在一块 FPGA 开发板上得到实现，得到的实物作品如下图 5 所示：



图 5 测量装置成品

3.3 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，能耗低等优点。巧妙应用下变频，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，根据两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波形。其主要创新点有以下三个：

①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。

②采用 FFT 进行信号的频谱分析、求模、取最大值索引，作为指导 DDS 信号发生器，合成与处理过后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。

③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) 设计总结及应用场景展望

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 $|\Delta| \leq 0.1$ ；对调频度的测量误差 $|\Delta| \leq 0.3$ ，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，并能根据输出波形判断信号调制类型。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，因而具有良好的应用前景。

4. 参考文献及资料

- [1] 曾创展, 贾鑫, 朱卫纲. 通信信号调制方式识别方法综述[J]. 通信技术, 2015(03): 252-257.
- [2] 程磊, 葛临东, 彭华. 通信信号调制识别现状与发展动态[J]. 微计算机信息, 2005, 021(10S): 154-156.

- [3] 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
- [4] 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
- [5] 钱玲. 数字信号处理[M]. 北京: 电子工业出版社, 2018
- [6] 杨志俊, 范海波, 曹志刚. 基于谱分析的通信信号调制方式自动识别[J]. 无线通信技术, 2003, 12(2): 30-33.
- [7] 冯晓东, 曾军. 基于决策论的数字调制信号识别方法[J]. 电子科技, 2015, 28(4): 124-127.
- [8] 高立辉, 吴楚, 付文祥. 通信信号数字调制方式自动识别的特征矢量研究[J]. 信息工程大学学报, 2003, 4(2): 65-67.