

## 信号调制度测量装置

**摘要：**信号的解调方法一般分为模拟解调法和数字解调法，模拟解调法能够进行输出解调信号，但其缺点是无法识别并显示被测信号的调制方式，调制度，最大频偏等参数。本设计采用数字解调法，将输入的信号经 AD 采样后变为数字信号，通过正交下变频，低通滤波和抽取，FFT 分析等方法在 FPGA 中进行数字信号处理，经 DA 输出解调信号。同时，FPGA 向 MCU 发送调制方式，调制度等参数，在 MCU 中进行数据处理后发送给串口屏，在串口屏中显示调制方式，调制度，最大频偏三项参数。本设计具有测量稳定，速度快等特点，在给定范围内具有测量准确，误差小的特点。

**关键词：**数字解调 正交下变频 FFT 分析 串口屏显示

## 一、 设计方案工作原理

### 1.1 预期实现目标与系统原理

信号的调制方式主要分为 AM 调制，FM 调制以及 PM 调制。本次方案主要是对 AM 调制波和 FM 调制波进行解调。

当调制波为 AM 波时，AM 调制时调制波的表达式为：

$$U_{AM} = U_C (1 + m \cos \Omega t) \cos w_c t$$

其中  $U_C$  为载波电压的最大幅度值， $\Omega$ ， $w_c$  分别为载波的频率和被调制信号的频率， $m$  为调制度，其中  $m = K_a U_\Omega / U_c$ ， $U_\Omega$  为载波电压的最大幅度值。

本次预期实现的目标是信号发生器输入 AM，FM 调制波，经 AD 模块采样后进行 FPGA 解调，经 DA 模块输出解调信号至示波器中。同时进行 FPGA 与 MCU 的串口通信，将数据发送到 MCU 上进行处理，MCU 将处理后的数据发送到串口屏，通过串口屏进行显示调制类型，调制度，最大频偏。

本次方案的主要原理是双路 AD 模块采样，经下变频，抽取以及滤波后，数字检波后进行 AM 和 FM 解调，输出解调后的信号以及最终的数据处理结果。

### 1.2 方案论证与比较

AM 解调和 FM 的解调主要分为两大类：模拟解调和数字解调。

信号调制度测量装置要求我们解调出波形并且对调制度进行  $m_a, m_f$  进行显示，同时也要判断并显示输入波形是调幅波，调频波以及未调载波。当采用模拟解调方式时，能够解调出信号波形，主要是采用电容，电阻，二极管，三极管等电子元器件搭出模拟电路进行解调，但无法进行显示调制度以及调制类型。而且，题目中问题三要求能够自主识别  $u_m$  的解调方式，因此要用到数字解调才能准确处理这些数据，这是模拟解调不能达到的。

数字解调主要是采用可编程逻辑器件 FPGA，通过数字信号处理算法，对采样的信号进行处理和分析。

数字解调的主要流程图如下：



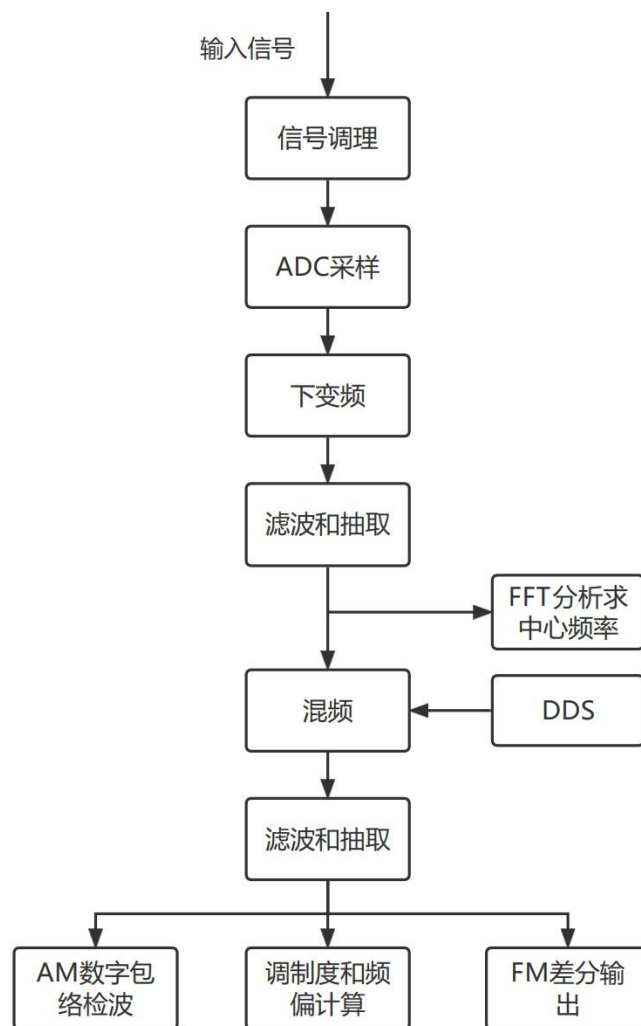
数字解调算法我们主要采取正交下变频以及 FFT，当 ADC 采样后的数据送入 FPGA 后，然后经滤波和抽取，接着采用 FFT 算法对滤波和抽取后的数据进行分析，找到调制信号的载波频率；接着用对处理后的信号进行混频，最后求解信号的包络输出即可输出 AM 调制信号，FM 的调制信号则需要进行差分处理，差分处理后滤除直流信号经 DA 的输出即可。调制度，最大频偏，调制类型经 FPGA 处理后的发送给 MCU，MCU 将处理后的数据发送给串口屏显示即可。

## 二、系统软件分析与计算

### 2.1 系统电路与程序设计

### 2.2 系统总体方案设计流程图

首先确定系统总体方案设计的流程图如下：



## 2.3 主要电路，程序模块设计和理论分析和计算

### 2.3.1 第一级下变频模块

实现要求中需要能够自动识别 10-30MHz 是频率，以 20MHz 为中心频率，在 FPGA 中采用 DDS IP 核对采样后的信号进行处理，即将采样后的信号分为两路，一路与正弦信号相乘，一路与余弦信号相乘，得到 IQ 两路信号即将输入信号进行下变频，下变频后有利于后续的信号处理。

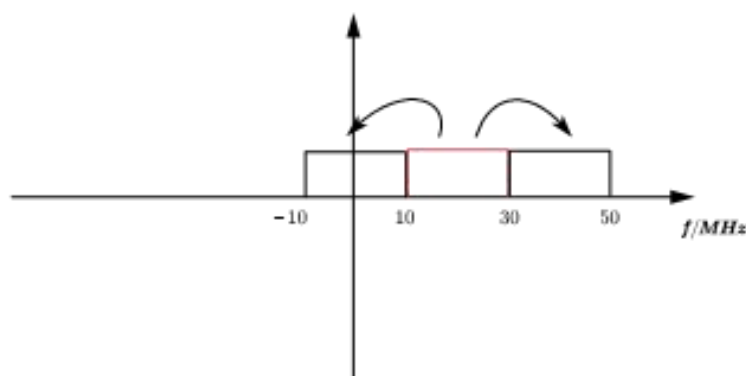
其次，下变频后又经过滤波和抽取，经 FFT 分析后找到实际载波频率，再一次采用 DDS IP 核进行混频。

### 2.3.2 滤波以及抽取模块

输入的调制信号经混频后会产生许多高频信号，因此需要采用滤波器对信号进行滤波，滤波器采用 FIR IP 核进行配置，通带和阻带频率通过 MATLAB 仿真确定；滤波器的参数设置非常重要，应当合理的设置通带和阻带频率，保证高频分量能够被准确滤掉，同时又能保证低频信号后频率能够保留。

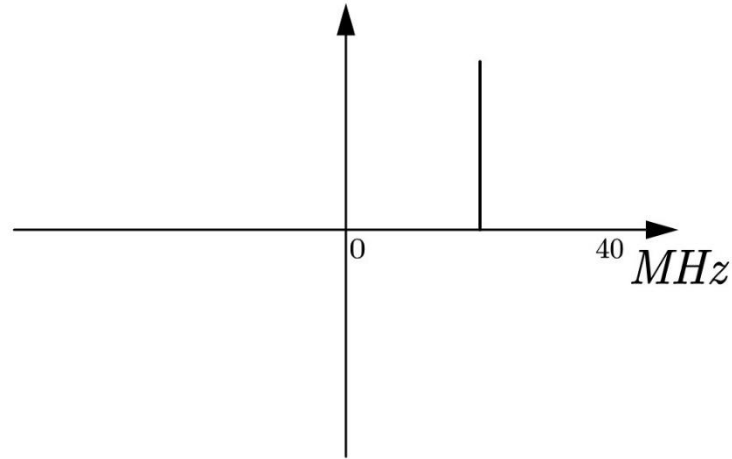
抽取主要采用 CIC 滤波器，CIC 滤波器具有抽取和滤波的功能，在进行滤波的同时能够降低采样率，这对后续进行数字信号处理具有非常重要的作用。

经 DC 采样后的信号经下变频后将 10-30MHz 的中心频率搬移到零中频，混频会产生两个信号，一个是零中频信号，另外一个信号是 30-50MHz 的频率，因此设置 FIR 滤波器的参数要将 30MHz 以上的高频信号去掉，设置 FIR 滤波器的参数为：通带频率为 10MHz,阻带频率为 15MHz，为等波纹设计。第一级正交下变频后的频谱搬移图为：



### 2.3.3 FFT 分析模块

对采样后的信号截取有限长的序列，对有限长序列进行 FFT 处理分析，FFT 处理分析需要用到 FPGA 中的 IP 核，FFT 对序列进行离散傅里叶变换后，可以根据 ILA 中的频谱形状确定调制信号的载波频率，对 FFT 分析后的频谱形状为：



### 2.3.4 第二级正交下变频模块

通过 FFT 分析后找出实际的载波频率后，接着采用 DDS IP 核生成两路正交信号对信号进行第二次正交下变频处理，第二次正交下变频后，若此时为 AM 信号，若此时 AM 信号的表达式为  $U_{AM} = U_C(1 + m \cos \Omega t) \cos w_c t$ ，DDS IP 核要产生一个  $w_c$  信号的频率进行正交下变频，假设此时 I 路信号的表达式为  $U_I = A \cos w_c t$ （A 不为常数），与产生的一路信号  $U = U_1 \cos(w_c t + \varphi)$  相乘后，即可得到混频后的信号为：

$$U_{\text{混}I} = \frac{AU_1}{2} [\cos(2w_c t + \varphi) + \cos \varphi]$$

然后经过 FIR 滤波器以及 CIC 滤波器进行抽取和滤波后，即可得到滤除高频信号的信号为：

$$U_{\text{混}I} = \frac{AU_1}{2} \cos \varphi$$

其中 A 为一个信号的表达式，并不为常数。此时我们采用 CIC 滤波器抽取 20 倍，将采样率降到 2MHz。

### 2.3.5 数字包络检波模块

若调制信号为 AM 信号，经过第二次正交下变频后，得到的两路 I,Q 信号进行平方开根号，即进行数字包络检波，经过数字包络检波后，即可得到 AM 调制信号的解调信号。

### 2.3.6 FM 求解最大频偏模块

第二级正交下变频后得到的 I,Q 两路信号，假设 I,Q 两路信号的表达式分别为：

$$I(n) = A \cos\left(k_f \times \sum m(n)\right)$$

$$Q(n) = A \sin\left(k_f \times \sum m(n)\right)$$

所以  $\frac{Q(n)}{I(n)} = \tan\left(k_f \times \sum m(n)\right)$ ，最终求解  $\arctan \frac{Q(n)}{I(n)}$  反正切即可得到最

大频偏。

## 三、 测试方案以及结果分析

### 3.1 系统测试及结果分析

信号调制度的主要测量步骤如下：

(1) 打开信号发生器，将信号发生器依次调成 AM 调幅波，FM 调频波，将 AD 模块接入到信号发生器的输出端，DA 模块接入到示波器，FPGA 和 MCU 采用杜邦线相连进行通信，并将 MCU 与串口屏进行相连，接着信号发生器打开输出，即可得到在示波器上输出解调后的正弦波，在串口屏上即可显示出调制类型，调制深度以及最大频偏。

(2) 对测量装置测量五次，载频固定时 AM 调制测量一次，载频固定时 FM 测量一次，载频步进时 AM 调制测量一次，载频步进时 FM 测量一次，未调制时测量一次，即测量五次。五次测量时的调制信号设置参数以及实测结果如下：

表 1 调制情形 1 相关参数和测量结果

设定调制信号类型	AM 调制
设定载波频率	10MHz
设定调制信号频率	2KHz

设定调幅度 $m_a$	0.3
输出解调信号	2KHz 正弦信号
实测调制类型	AM 调制
实测调幅度 $m_a$	0..3059
误差绝对值 $ \Delta $	0.0059

表 2 调制情形 2 相关参数和测量结果

设定调制信号类型	FM 调制
设定载波频率	10MHz
设定调制信号频率	5KHz
设定调频度 $m_f$	2.5
输出解调信号	5KHz 正弦信号
实测调制类型	FM 调制
实测调频度 $m_f$	2.5102
实测最大频偏	30KHz
误差绝对值 $ \Delta $	0.0102

表 3 调制情形 3 相关参数和测量结果

设定调制信号类型	AM 调制
设定载波频率	25MHz
设定调制信号频率	7KHz
设定调幅度 $m_a$	0.5
输出解调信号	7KHz 正弦信号
实测调制类型	AM 调制
实测调幅度 $m_a$	0..5089
误差绝对值 $ \Delta $	0.0089

表 4 调制情形 4 相关参数和测量结果

设定调制信号类型	FM 调制
设定载波频率	23MHz
设定调制信号频率	8KHz
设定调频度 $m_f$	5
输出解调信号	8KHz 正弦信号
实测调制类型	FM 调制

实测调频度 $m_f$	4.9808
实测最大频偏	40KHz
误差绝对值 $ \Delta $	0.0192

表 5 调制情形 5 相关参数和测量结果

设定调制信号类型	未调制
设定载波频率	10MHz
设定调制信号频率	0
设定调频度 $m_f$	0
实测调制类型	未调制
实测最大频偏	0

(3) 实验装置实现的功能能够实现解调载波频率固定时的 AM 调幅波信号以及 FM 调频波信号，同时，对发挥部分我们也能实现载波步进频率为 0.5MHz，调制信号频率为 5-10KHz 的准确识别，同时能够在串口屏上准确显示出调制类型，调制度以及最大频偏，调幅度满足误差绝对值小于 0.1，调频度满足误差绝对值小于 0.3，同时实验装置还将调制信号的频率扩展为 1-100KHz 的范围，因此对于范围更大的频率信号，我们也能做到精准识别，同时，解调装置的波形也无明显失真。

#### 四、 参考文献

- [1]高亚军. 基于 FPGA 的数字信号处理[M]. 电子工业出版社, 2012.
- [2]曾兴雯. 高频电子线路(第 2 版) [M]. 高等教育出版社, 2009.
- [3]胡广书. 数字信号处理:理论、算法与实现[M]. 清华大学出版社, 1997.