

摘要

为实现信号调制度的测量，本装置通过放大电路对信号源信号进行调理放大，通过高采样率 AD 模块进行八位采样，将采样信号进行正交下变频、抽样滤波处理后进行信号解调。通过对信号 I、Q 两路信号进行幅值相位分析，即可判断信号类型，进行调制度的计算显示，将识别出的 AM 信号其包络输入，将识别出的信号的解调输出；将识别出的 FM 调制信号经过通过求出瞬时相位、差分处理，将 FM 信号解调出。将数字信号通过 DA 模块进行模拟输出，即可在示波器上得出相应波形。再通过串口将数字信号传输至串口屏显示模块，进行展示。经测试，该系统能够完成对相应波的识别和解调，解调信号无明显失真，调制度误差较小，符合设计要求。

关键字 数字正交下变频 抽取滤波 正交解调

1 方案论证

1.1 问题重述

问题 1：被测信号为峰峰值 100mv 单载波信号，调制方式为 AM 调制，载频为 10MHz，调制信号频率范围为 1-3kHz，需完成信号的解调以及调幅度 m_a 的测量与显示。

问题 2：被测信号为峰峰值 100mv 单载波信号，调制方式为 FM 调制，载频为 10MHz，调制信号频率范围为 1-3kHz，需完成信号的解调以及调幅度 m_f ，最大频偏 Δf 的测量与显示。

问题 3：被测信号为峰峰值 100mv 调制方式未知信号，载频范围为 10MHz-30MHz，若调制波为已调波，其频率范围为 5kHz-10kHz，测量装置需完成自主识别调制方式，完成信号的解调以及调制度测量与显示。

1.2 方案分析

硬件选择：供选择的硬件为单片机或 FPGA，选择单片机，可以通过希尔伯特变换快速对信号进行解调，但是单片机的采样频率有一定限制，无法进行高速率采样，因此选择 FPGA 作为主控开发板。

对于问题 1，处理高频调制信号，采用正交下变频，进行解调，分两路得出同向分量与正交分量，将已知载频 AM 的频率搬移至零频后，进行低通滤波移除高次载波分量。对高频率采样的信号进行抽取滤波，将信号从高频降到低频，便于信号的解调恢复。将抽取滤波后的两路信号 I 路，Q 路进行合并，得到的复信号为调制波加上直流偏置的时域信号，对于 AM 调制信号，其包络应呈具有直流偏置的正弦信号 $y(n) = A(1 + m\cos\omega_0 n)$ 测出其峰峰值和直流偏置后，即可求出调制度 m_a ，将数字信号通过 DA 模块即可将数字信号转化为模拟信号，显示在示波器上。将输出数字信号通过串口模块传输至显示模块显示调制度。

对于问题 2，按照上述步骤，对信号采用正交下变频，进行解调，分两路得出同向分量与正交分量，将载波进行频谱搬移后，进行抽取滤波，将抽取滤波后的两路信号 I 路，Q 路进行合并，得到的复信号，该信号的瞬时相位为

$$\varphi[n] = \arctan \frac{I[n]}{Q[n]}$$

求出瞬时相位后进行差分运算可得最大频偏。

$$\varphi[n] - \varphi[n-1] = DC + ku_0 \cos \omega_0 n$$

对复信号进行 FFT 快速傅里叶变换得出频谱，找到相邻频谱之前的频率差 Ω 即为调制波调制频率，两者相除即为调制指数 m_f 。差分的结果即为调制波。数字信号通过 DA 模块即可将数字信号转化为模拟信号，显示在示波器上。将输出数字信号通过串口模块传输至显示模块显示调制度。

$$m_f = ku_0 / \Omega$$

对于问题三，输入的载波频率为 10MHz-30MHz，由于输入载波频率未知，输入带宽不确定，需要选取较大的采样频率。在处理时，进行免混频符号修正，减少资源利用，将频带范围降至-10MHz-10MHz，通过低通滤波器将高频分量除去，再进行抽取，减少采样频率，随后进行粗 FFT，寻找谱线最大值，找到载波频率大致位置，再次进行频谱搬移，将信号搬移至零附近。随后进行抽取滤波，降采样频率降至 2MHz，将两路信号合为一路，进行调制方式识别。对于识别模块，先从包络幅值判断，根据调幅信号幅值会变化，可以将调幅信号区分。若幅值保持不变，则进行 FFT 频谱分析，对比最大值与次大值的比例，可以区分出单音非调制波和 FM 调制波。将解调信号输出至示波器即可。判断出波的类型后直接进行计算相应参数即可。

1.3 方案比较

在处理问题 1、2 过程中，可以使用带通采样定理使用较小的采样频率，节省频谱资源，通过低通滤波器后直接保留所需要的频带，即可进行解调。但是在问题三中，由于载波频率不确定，故带通采用定理的采样频率无法确定，若问题 1、2 采用带通采用定理，则第三问信号需要重新采样，额外占用资源。由此可见，将任意信号均视作未知调制波，进行判断其调制类型，求出相应的波形和调制度。可见，通过该系统可以直接解决三个问题，不需要进行多次采样，计算的出对应的调制度，完成解调并显示。

1.4 方案选择

为了增加系统的适应性，对任意进入波均进行相同处理方式，采用变频、降频、判断、输出、显示的流程进行处理。

2 理论分析与计算

2.1 信号放大模块

输入信号峰峰值较小，需将信号进行放大，在 A/D 接收前端设计信号放大模块进行信号放大。采用可调增益放大器进行信号放大。

2.2 AD 采样模块

选取采样频率最高可达 80MHz 的采样模块，采样为双通道采样，采样位数为 8 位。

2.3 免混频下变频

采样频率与所降频率设输入信号为 $x_s(t) = a_s(t) \cos 2\pi f_0 t + \theta(t)$ 采样频率满足：

$$f_s = \frac{4f_0}{2M-1} \quad M=1, 2, \dots, N \quad f_s \geq 2B$$

则采样序列 $x(n)$ 为： $x(n) = a(n) \cos(\frac{2\pi f_0}{f_s} n + \theta(n))$ ，所以，计算数字本振可得：

$$\cos(\pi n/2) = \{1, 0, -1, 0, 1, 0, -1, \dots\}$$

$$\sin(\pi n/2) = \{0, -1, 0, 1, 0, -1, 0, \dots\}$$

可见，数字下变频并不需要已不需要乘法器，只需要进行符号修正。

2.4 频率抽取

对采样频率进行降低，可以采用时域抽取的方法，为了防止抽取后出现频谱混叠，需要先进行滤波，通常采取 cic 梳状滤波器，其冲激响应具有如下形式：

$$h(n) = \begin{cases} 1, & 0 \leq n \leq D-1 \\ 0, & \text{其他} \end{cases}$$

由于该滤波器的频率响应中，主瓣电平与旁瓣电平的差值为 13.46dB，故该滤波器需要采取多级级联的方式，在本设计中，采用 3 级级联，增加主瓣和旁瓣的差值，提高滤波器的性能。采用三级级联后，能够将采样频率从 40MHz 降低至 2MHz，完成抽取。

2.5 调制波判断

对经过处理的波进行包络判断，包络为非恒定包络时，为 AM 调制波。区分单音信号与 FM 调频信号时，通过 FFT 找到最大谱线与次大谱线，通过比较最大谱线与次大谱线的高度比 R ，当 $R > th$ 时，可以判定为单载波未调制信号，根据经验公式，取 $th=20$ ，能够最大限度的区分单载波未调制信号和 FM 调制波。

3 电路与程序设计

3.1 系统组成

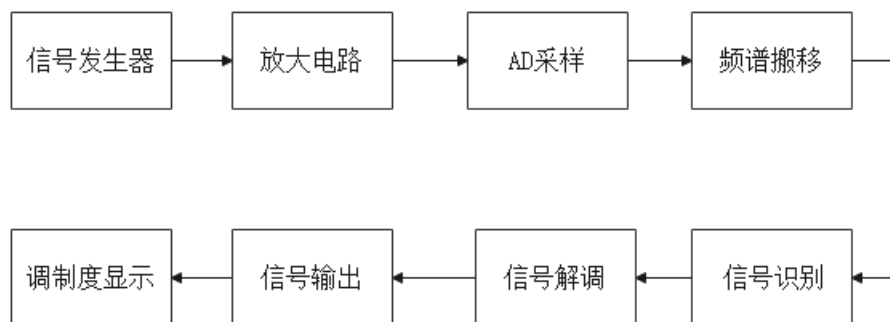


图 3.1 系统整体框图

3.2 重点模块原理

3.2.1 频谱搬移模块

对输入信号进行正交免混频下变频，将载波进行降频处理，通过下述模块后，采样频率降至 40MHz。

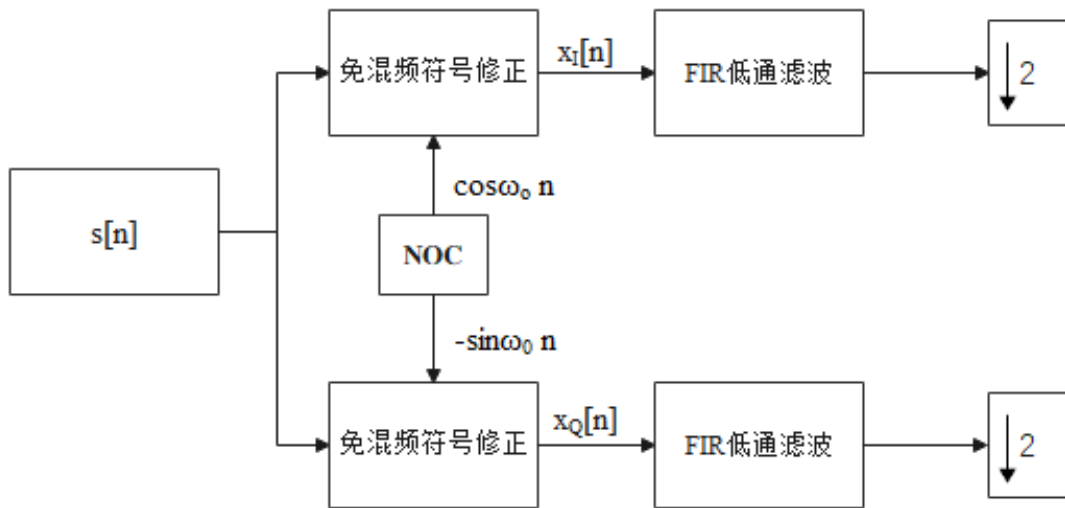


图 3.2 频谱搬移模块示意图

对上次降采样率后的信号进行粗 FFT，得到需要再次搬移频率 f_c ，通过 DDS 产生该频率的信号，用作频谱搬移的信号，采用 cic 抽取滤波器，能够将频率进行抽取，采样频率能降至 2MHz，其原理图如下图所示：

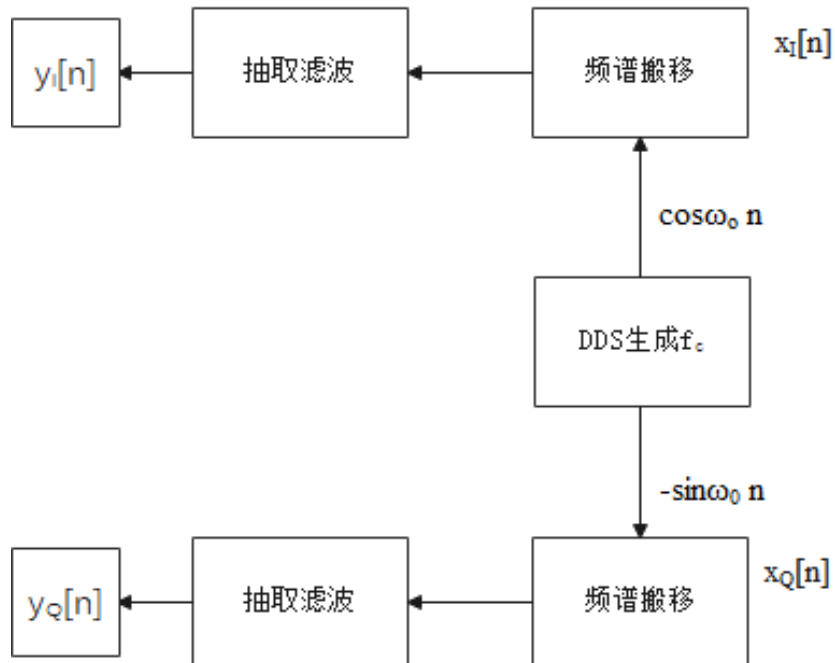


图 3.3 抽取原理图

3.2.2 输入波形识别模块

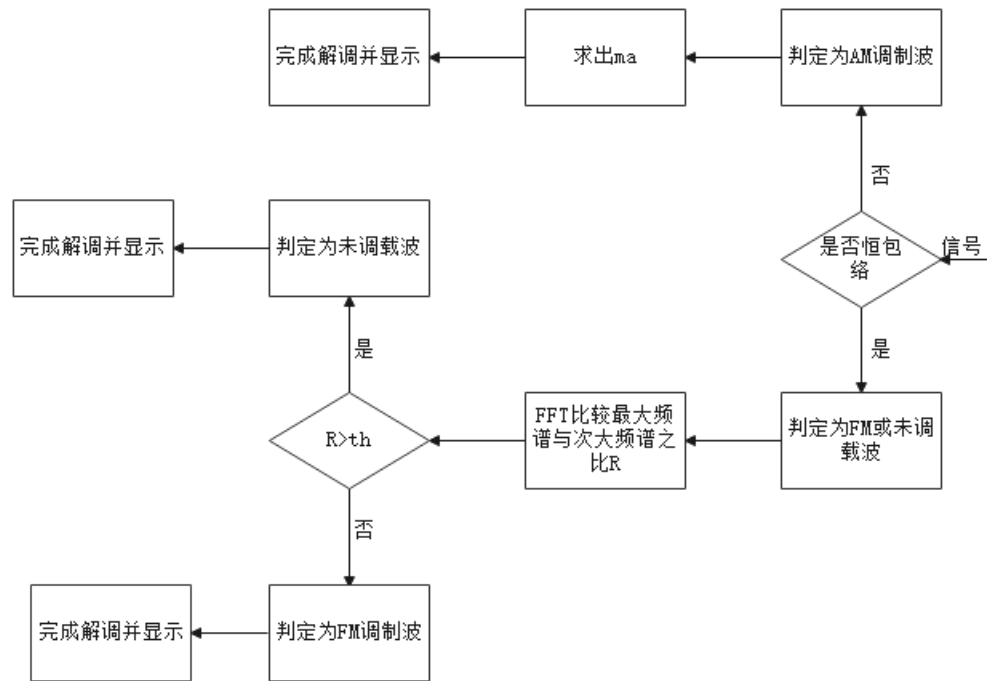


图 3.4 输入波识别原理图

如上图所示，将输入信号经处理后的波进入上述流程识别，即可分析出输入波的类型。对于非恒包络信号，直接可以识别其为 AM 调制波，对于非恒包络波，进行 FFT 变换求出其频谱

4 测试方案与测试结果

4.1 问题一测试方案与结果

测试在 10MHz 载波频率下，调幅信号频率为 1kHz 以步幅 0.5kHz 增长到 3kHz，调幅度 m_a 分别从 0.2 以步幅 0.1 增到到 0.6，得到结果如下

表 4.1 问题一测试结果

输入信号频率（khz）	输入信号 m_a	解调信号频率（khz）	测试值 m_a *
1	0.2	1	0.22
1.5	0.3	1.5	0.33
2	0.4	2	0.42
2.5	0.5	2.5	0.55

3	0.6	3	0.61
---	-----	---	------

误差分析：计算可得，每个频率所对应的误差 Δ 均小于 0.1, 满足设计要求，性能较好。

4.2 问题二测试方案与结果

测试在 10MHz 载波频率下，调幅信号频率为 3kHz 以步幅 0.5kHz 增长到 5kHz，调幅度 m_f 分别从 2 以步幅 1 增到到 6，得到结果如下表所示

表 4.2 问题二测试结果

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

误差分析：计算可得，每个频率所对应的误差 Δ 均小于 0.3, 满足设计要求，性能较好。

4.3 问题三测试方案与结果

测试三种波在不同频率下输入，测试是否能完成识别并解调，得到部分结果如下：

表 4.3 问题二测试结果

输入波类型	载波频率 (MHz)	调制频率 (kHz)	调制度	识别类型	解调频率 (kHz)	调制度测试值
AM	15	5	0.8	AM 信号	5.04	0.78
FM	20	8	4	FM 信号	8.02	3.89
未调制	25	10	无	为调制	10.04	无

误差分析：计算可得，每个频率所对应的误差 Δ 均满足题设要求，性能较好。