

摘要 本信号调制度测量装置以 FPGA 为主要控制器件,能够识别调制频率范围在 1KHz~10KHz,载波频率在 10MHz~30MHz 内某一频率的载波调频方式,并且计算出相应调制度及最大频偏。信号输入后,首先由放大电路模块放大信号到合适的 ADC 采样范围大小。传入 FPGA 控制板,由 ADC 进行信号的采集,接着复数相乘得到复信号。两路信号均通过低通滤波及降采样后进行 FFT 变换到频域,由峰值搜索得到信号频率大小后传入 DDS 产生相同频率的正、余弦波,求得信号模值。最后传入识别调制方式模块得到所调信号调制方式及调制度,差分鉴频得出最大频偏,通过串口与单片机 STM32 连接,由 LCD 显示结果,示波器显示解调信号。

关键词: 信号调制度测量, 信号调制方式识别, FFT, 差分鉴频

1、方案设计与论证

1.1 主控方案选择

方案一:采用单片机 STM32 处理信号,受信号频率限制,难以处理。

方案二:采用 FPGA 控制板进行信号处理分析,抗干扰性强,运行快速且稳定,符合要求。

综上分析,选择方案二,使用 FPGA 控制板。

1.2 显示方案选择

方案一:串口屏显示。串口屏价格低廉,串口屏直接接入 FPGA 串口进行开发,开发周期较长,上手难度高;FPGA 串口接单片机,将所得数据传入单片机,由单片机接串口屏开发,上手难度低,串口相接繁琐。

方案二:LCD 显示。FPGA 串口接单片机,将所得数据传入单片机,在 LCD 屏显示,上手难度高,但有相关经验,相对简单。

综上方案分析,选择 FPGA 接单片机后,由 LCD 屏显示,系统简单,软件开

发熟练。

1.3 系统总体分析

外接调制信号作为系统的输入信号，输入信号经过调理电路模块放大后达到适合 ADC 输入端信号幅值大小，传入 FPGA 控制板，由 ADC 模块进行信号的采集，上下两路与 DDS 信号发生器产生的 20MHz 大小的余弦、正弦信号复数相乘得到实信号、复信号。

两路信号均通过低通滤波及降采样后进行 FFT 变换到频域，由峰值搜索得到信号频率大小后传入 DDS 产生相同频率的正余弦波，与原信号分别相乘，经过低通滤波和降采样信号处理后，求得信号模值。最后传入识别调制方式模块得到所调信号调制方式及调制度，由 LCD 显示结果，示波器显示解调信号。系统原理图如下。

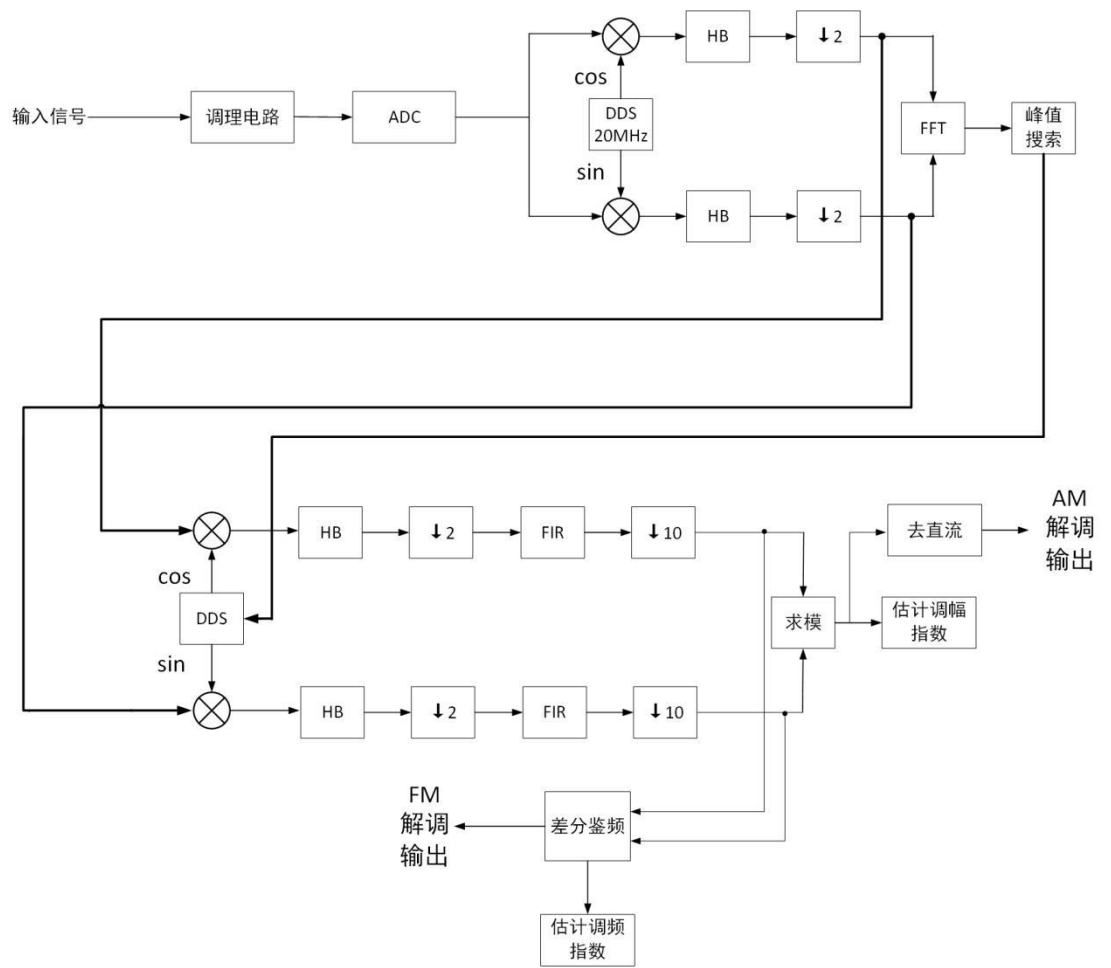


图 1 系统原理图

2、理论分析与计算

2.1 调理电路的放大倍数计算

题给被测信号电压幅值为 100mv，与 ADC 参考电压 5V 相差较大，利用调理电路放大输入信号，设置放大后电压为 5V，放大系数 $\beta = \frac{5000}{100} = 50$ 。

2.2 识别调制方式的原理分析

输入信号为三种情况：AM 调幅信号、FM 调频信号、未调制信号。

2.2.1 AM 调幅信号及调幅度计算

调幅信号经过 ADC 采集等信号处理后，函数表达式如下

$$s(t) = (1 + \alpha \cos \omega_a t) \cos \omega_c t$$

其中 α 即为调幅度， ω_a 为调幅信号频率， ω_c 为载波频率，直流偏移为 1。

DDS 生成实信号 $\cos(\omega_c t + \varphi)$ 和复信号 $j \sin(\omega_c t + \varphi)$ 后（ φ 为初相位），与调幅信号复数相乘，经过数学推导得 I 路信号，Q 路信号如下

$$I = (1 + \alpha \cos \omega_a t) \left[\frac{\cos \varphi + \cos(2\omega_c t + \varphi)}{2} \right]$$
$$Q = j(1 + \alpha \cos \omega_a t) \left[\frac{\sin \varphi + \sin(2\omega_c t + \varphi)}{2} \right]$$

低通滤波，降采样滤去高频信号，I 路、Q 路信号如下

$$I = (1 + \alpha \cos \omega_a t) \cdot \frac{\cos \varphi}{2}$$
$$Q = j(1 + \alpha \cos \omega_a t) \cdot \frac{\sin \varphi}{2}$$

由 FFT，峰值搜索得到初相位 φ ，传入 DDS 生成相应频率大小的实信号与复信号，共轭相乘求模，函数表达式如下

$$\sqrt{I^2 + Q^2} = \frac{1 + \alpha \cos \omega_a t}{2}$$

模随调幅度变化。

调制度参数估计：对解调出来的 AM 信号求平均可得到直流分量，对去直流后一段时间内的 AM 信号求平方和的平均值，可计算调制载波功率 $\frac{\alpha^2}{2}$ ，进而开根号可计算调制度。

2.2.1 FM 调频信号及调频度、最大频偏计算

调频信号经过 ADC 采集等信号处理后，函数表达式如下

$$s(t) = \cos(\omega_c t + m_f \sin \omega_{fm} t)$$

同理 DDS 生成实信号 $\cos(\omega_c t + \varphi)$ 和复信号 $j \sin(\omega_c t + \varphi)$ 后（ φ 为初相位），与调频信号复数相乘，滤波抽取，得 I 路信号，Q 路信号如下

$$I = \frac{\cos(m_f \sin \omega_{fm} t)}{2}$$

$$Q = j \frac{\sin(m_f \sin \omega_{fm} t)}{2}$$

峰值搜索，求模， $\sqrt{I^2 + Q^2} = \frac{1}{2}$ 为定值。

调频度计算采用差分鉴频，一般可将调频或者调相的信号表示为：

$$x(n) = e^{j2\pi\Delta f n T + \varphi(n)}$$

上式中， Δf 为多普勒频偏， T 为采样周期， $\varphi(n)$ 为当前采样时刻相位。则上一采样时刻的信号可表示为：

$$x(n-1) = e^{j2\pi\Delta f (n-1)T + \varphi(n-1)}$$

将当前时刻和前一时刻信号进行共轭相乘：

$$x(n) \cdot x^*(n-1) = e^{j2\pi\Delta f T + \varphi(n) - \varphi(n-1)}$$

当采样率较高的时候，两个采样点之间的相位基本相等，即 $\varphi(n) = \varphi(n-1)$ ，则上式可表示为：

$$x(n) \cdot x^*(n-1) = e^{j2\pi\Delta f T} = \cos(2\pi\Delta f T) + j \sin(2\pi\Delta f T)$$

$$2\pi\Delta f T = \arctan[x(n) \cdot x^*(n-1)]$$

根据反正切函数的取值范围可以得到：

$$|2\pi\Delta f T| < \frac{\pi}{2}$$

$$|\Delta f| < \frac{f}{4}$$

为减少硬件资源的消耗，将其简化

$$\text{Im}(x(n) \cdot x^*(n-1)) = \sin(2\pi\Delta f T) \approx 2\pi\Delta f T$$

鉴频器接收到的经过数字下变频（DDC）之后的复信号为 $I + j \cdot Q$ ，则鉴频器的输出结果 $z(k)$ 可表示为：

$$Z(n) = \text{Im}(x(n) \cdot x^*(n-1)) = I(n-1) \cdot Q(n) - I(n) \cdot Q(n-1)$$

$Z(k)$ 与频偏成正比。

2.2.1 未调制信号

载波信号直接与 DDS 生成信号复数相乘，经过信号处理后，同理求得 I 路、Q 路信号如下

$$I = \frac{\cos \varphi}{2}$$

$$Q = j \frac{\sin \varphi}{2}$$

模 $\sqrt{I^2 + Q^2} = \frac{1}{2}$ 同样为定值。

2.2.4 识别信号判断

综上三种信号特点分析，输入求模后，模值变化，调频度 $m_a > 0.1$ 则 AM 调幅；模值不变，调频度 $m_a < 0.1$ （考虑噪声干扰），则 FM 调频或是未调制，再通过调频度 m_f 是否大于 1 判断信号调频或是未调制。详细流程图如下。

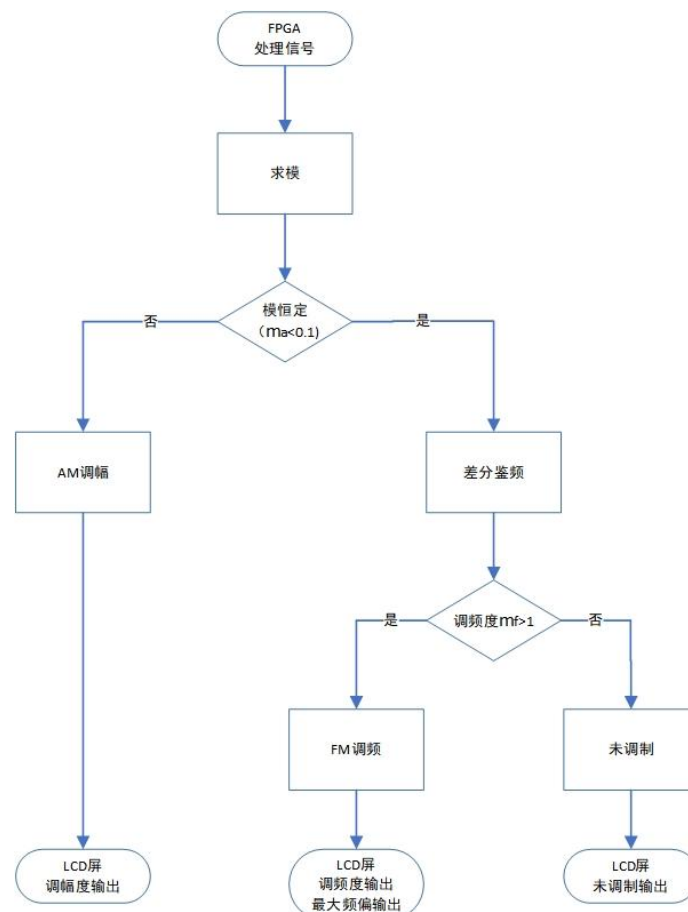


图 2 识别流程图

3、电路与程序设计

系统总体流程如下图所示

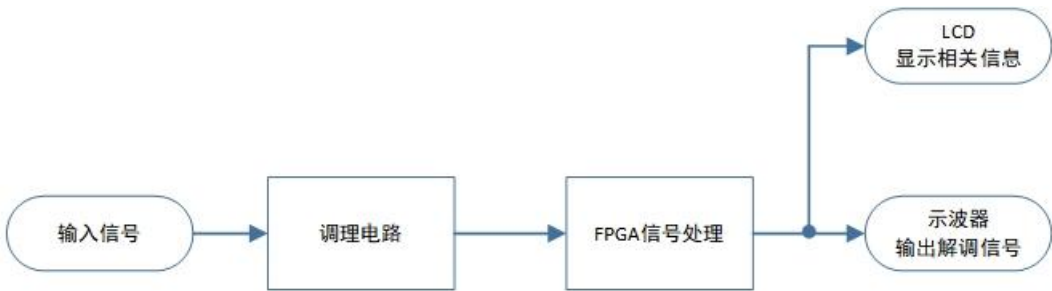


图 3 总体流程图

其中调理电路采用 AD603 压控可调增益放大模块，功能灵活方便，原理图如下

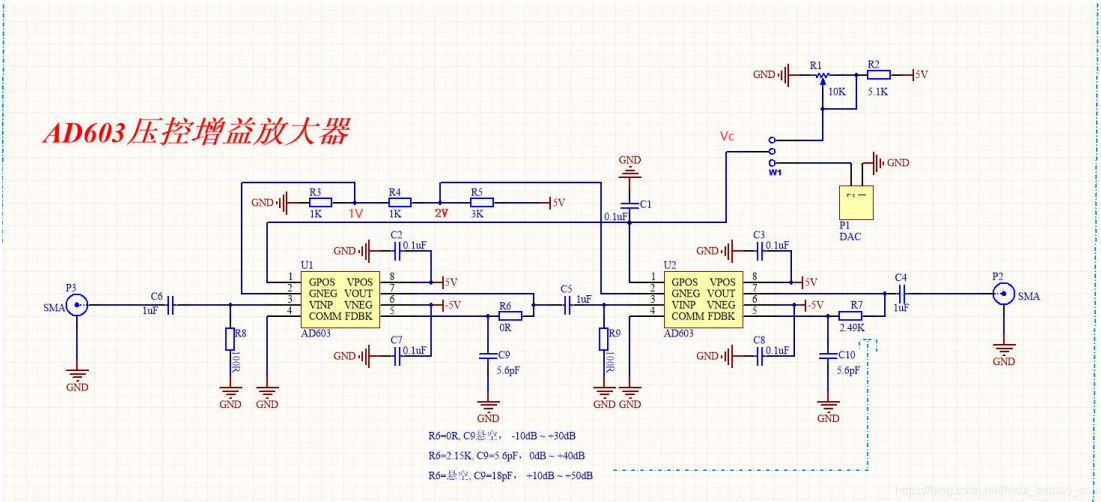


图 4AD603 原理图

FPGA 信号处理流程图具体如下

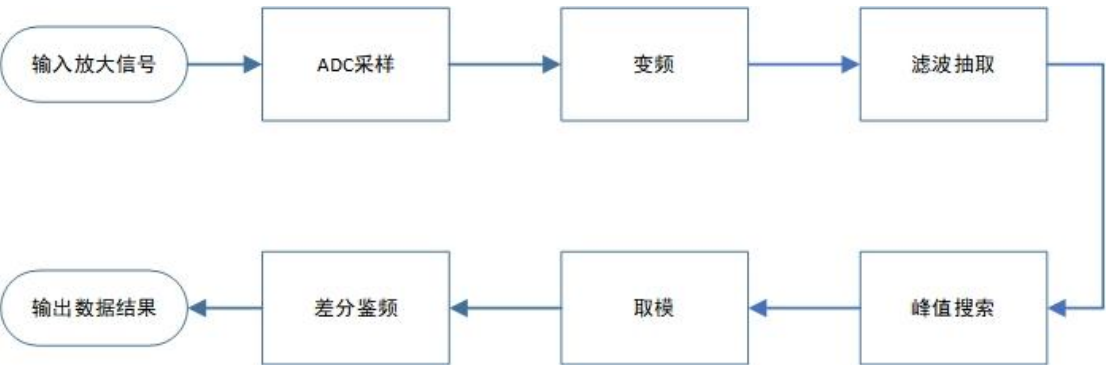


图 5 信号处理流程图

4、测试方案与测试结果

4. 1 测试方案

分别以 AM 调幅，FM 调频，未调制信号作为被测信号，对应 10MHz，20MHz，30MHz 的载波频率，测试不同调制方式的识别以及测量不同频率内调制度、最大频偏，计算误差。

4.2 测试结果

AM 载波频率 (MHz)	调制信号频率 (KHz)	调幅度 ma	测量值 ma	误差绝对值 Δ
10	1	0.2	0.19	0.01
	2.5	0.3	0.30	0
	3	0.5	0.50	0
	5	0.9	0.89	0.01
	10	1.0	0.99	0.01
20	5	0.2	0.18	0.02
	7	0.6	0.59	0.01
	10	1.0	0.99	0.01
25	5	0.2	0.19	0.01
	9	0.7	0.69	0.01
	10	1.0	0.99	0.01

表 1 AM 调幅

FM 载波频率 (MHz)	调制信号频率 (KHz)	调频度 mf	测量值 mf	误差	最大频偏 Δf (KHz)
10	3	1	1.1	0.1	3.3
	4	2	1.9	0.1	8.1

	4.5	3	3.0	0	13.6
	5	5	5.0	0	25
	10	6	6.0	0	60.3
20	5	1	1.1	0.1	5.2
	7	4	4.0	0	28.4
	10	6	5.9	0.1	60.3
30	5	1	1.1	0.1	5.1
	9	4	3.9	0.1	36
	10	6	5.9	0.1	60.2

表 2 FM 调频

三种调制方式均正确识别，并测量出了相应的调制度、最大频偏，误差在最大允许误差范围内，各项测试指标满足要求。

5、结论

本信号调制度测量装置完成了题目所有指标要求，且在测量调制度的同时，测量调制频率，丰富了作品功能。