

## 信号调制方式识别与参数估计装置

**摘要：**本设计实现的信号调制方式识别与参数估计装置，可以对信号发生器输出的信号进行调制方式识别与相关参数的估计，实现调制方式识别与显示、调制信号相关参数估计以及输出解调信号等功能。系统由前端信号放大电路、ADC、FPGA、串口屏、DAC 和后端滤波器等部分组成。使用信号发生器输出调制信号，按下装置的启动键，装置可自动识别信号的调制类型并将相关的参数显示在屏幕上，并且输出解调信号。装置可识别调幅信号(AM)、调频信号(FM)、连续波信号(CW)、二进制幅度键控(2ASK)、移相键控(2PSK)、移频键控(2FSK)共六种信号调制方式。

**关键词：**调制方式识别；调制参数估计；调制系数；数字码率

## 一、 系统方案

### 1. 方案描述

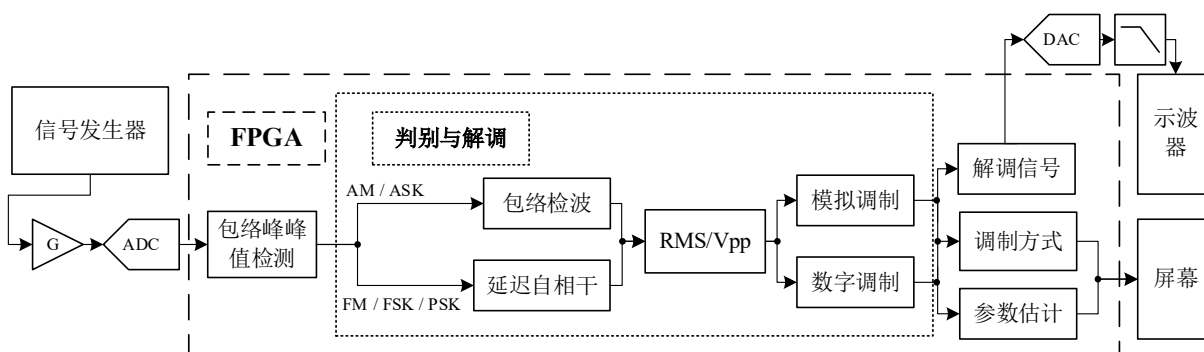


图 1 系统框图

系统框图如图 1 所示。信号发生器输出的调制信号经过模拟前端放大后由 FPGA 控制 ADC 采集。在 FPGA 中，首先由包络检波判别信号为幅度调制还是角度调制，然后用包络检波和延迟自相干分别对两类信号进行解调。有效值与峰峰值之比用于判别信号调制方式是模拟调制还是数字调制。系统识别并解调出各类调制信号后对相应的参数进行计算，并将调制方式与参数估计值显示在串口显示屏上，将解调信号接入示波器观测。

### 2. 比较与选择

#### 2.1 调制方式识别方案

方案一：基于人工神经网络(ANN)的调制方式识别。<sup>[4]</sup>

方案二：通过信号包络判断调幅还是调频，通过信号的有效值(均方根值 RMS)与幅值之间的关系判断是模拟调制还是数字调制。

方案选择：方案一，人工神经网络需要不断训练和学习，计算量大，实时性差，占用计算资源且不利于信号的实时分析与解调；方案二，判断过程计算量小，判别速度更快。综合考虑，使用方案二。

#### 2.2 幅度调制信号(AM/ASK)处理方案

方案一：使用正交解调。

方案二：使用包络检波解调。

方案选择：方案一，正交解调需要使用平方和、开方等运算，运算量大，系统复杂；方案二，对于信号源输出的信号，信噪比高，包络检波解调能够达到与正交解调相似的性能效果，而包络检波解调更加简单可靠，能够节省系统计算资源。综合考虑，使用方案二。

#### 2.3 角度调制信号(FM/FSK/PSK)处理方案

方案一：使用正交解调。

方案二：使用延迟自相干解调。

方案选择：方案一，正交解调需要计算反正切，计算量较大，更占用系统资源系统复杂，且对正交信号的相位噪声敏感；方案二，延迟自相干解调计算简便，对噪声敏感程度小。综合考虑，使用方案二。

## 二、 理论分析与计算

### 1. 调制方式识别分析与计算

本题要求对信号发生器输出信号 $u_M$ 的调制方式进行识别与显示，调制方式包括：AM、FM、CW、2ASK、2PSK、2FSK 共六种。

连续载波信号 CW 即为未调制的正弦载波信号。数学表达式为：

$$s(t) = A \cos(\omega_c t) \quad (1)$$

对于固定频率正弦载波调制的信号，上述六种调制方式可统一表示成下式：

$$s(t) = a(t) \cos[\omega_c t + \phi(t)] \quad (2)$$

其中， $\omega_c$ 表示载波的角频率。 $a(t)$ 为信号的瞬时幅度， $\phi(t)$ 为瞬时相位， $f(t) = d\phi(t)/dt$ 为瞬时频率。对于不同的调制信号，主要就表现在这三个量的不同，调制信号可分别被调制在已调信号的振幅 $a(t)$ 、频率 $f(t)$ 、相位 $\phi(t)$ 中，因此分析调制信号的瞬时幅度、相位、频率，即可对信号的调制方式进行识别和判断。

#### 1.1 幅度调制(AM/ASK)方式识别

AM 就是使载波信号的振幅随调制信号的变化而变化。数学表达式为：

$$s(t) = A(1 + m_a m(t)) \cos(\omega_c t) \quad (3)$$

其中， $\omega_c$ 为载波角频率， $m(t)$ 为调制信号， $m_a$ 为调幅系数，A 为信号幅值。

2ASK 信号可以表示为一个单极性脉冲与一个正弦载波相乘，即：

$$s(t) = \sum_n a_n g\left(t - \frac{n}{R_c}\right) \cos(\omega_c t) \quad (4)$$

其中， $a_n$ 为输入二进制码元 0, 1， $g(t)$ 是持续时间为 $1/R_c$ 的矩形脉冲， $R_c$ 为码速率。

使用包络检波的方法，通过对输入信号做绝对值和基带滤波，可以得到载波信号的包络 $a(t)$ ，对于幅度调制信号， $a(t)$ 即为基带调制信号，对于角度调制信号， $a(t)$ 为常量。该方法可以识别信号是否为幅度调制类型的信号。

#### 1.2 角度调制(FM/FSK/PSK)方式识别

调频(FM)是载波的瞬时频率随调制信号成线性变化的一种调制方式。数学表达式为：

$$s(t) = A \left[ \cos \left( \omega_c t + k_m \int_0^t m(t) dt \right) \right] \quad (5)$$

其中， $\omega_c$ 为载波角频率， $m(t)$ 为调制信号， $k_m$ 为调制角频偏， $A$ 为信号幅度。

2FSK 信号是码元 0 对应载波角频率为 $\omega_1$ ，码元 1 对应载波角频率 $\omega_2$ 的已调波形。它可以用一个矩形脉冲对一个载波进行调频实现。其表达式为：

$$\begin{aligned} s(t) &= \sum_n a_n g\left(t - \frac{n}{R_c}\right) \cos(\omega_1 t) + \sum_n \bar{a}_n g\left(t - \frac{n}{R_c}\right) \cos(\omega_2 t) \\ &= \sum_n g\left(t - \frac{n}{R_c}\right) \cos[(\omega_c + a_n \Delta\omega)t] \end{aligned} \quad (6)$$

其中 $a_n$ 为输入的码元 0、1， $\bar{a}_n$ 是 $a_n$ 的反码， $g(t)$ 是矩形脉冲， $R_c$ 为码速率， $\Delta\omega$ 为载波角频率间隔， $\omega_1 = \omega_c + \Delta\omega$ ， $\omega_2 = \omega_c$ 。

2PSK 方式是键控的载波相位按基带脉冲序列的规律而改变的数字调制方式。其表达式为：

$$\begin{aligned} s(t) &= \sum_n a_n g\left(t - \frac{n}{R_c}\right) \cos(\omega_c t) \\ &= \sum_n g\left(t - \frac{n}{R_c}\right) \cos(\omega_c t + \phi_m) \end{aligned} \quad (7)$$

其中， $a_n$ 取值为-1, 1，二进制码 0 对应 $a_n = 1(\phi_m = 0)$ ，二进制码 1 对应 $a_n = -1(\phi_m = \pi)$ ， $g(t)$ 是矩形脉冲， $R_c$ 为码速率。

使用延迟自相干的方法，将信号延时 $\Delta t$ 时间后与原信号相乘，我们可以得到：

$$\begin{aligned} s(t) \cdot s(t + \Delta t) &= A^2 \cos[\omega_c t + \phi(t)] \cos[\omega_c(t + \Delta t) + \phi(t + \Delta t)] \\ &= \frac{1}{2} A^2 [\cos(-\omega_c \Delta t + \phi(t) - \phi(t + \Delta t)) + \cos(2\omega_c t + \omega_c \Delta t + \phi(t) + \phi(t + \Delta t))] \end{aligned} \quad (8)$$

滤除和频分量，并忽略幅值信息，得到

$$\begin{aligned} [\cos(-\omega_c \Delta t + \phi(t) - \phi(t + \Delta t))] &= \cos(\omega_c \Delta t + f(t) \Delta t) \\ \sim \left(1 - \frac{(\omega_c + f(t))^2 \Delta t^2}{2}\right) &= 1 - \frac{(\omega_c \Delta t)^2}{2} - \frac{(f(t) \Delta t)^2}{2} - \omega_c f(t) \Delta t^2 \end{aligned} \quad (9)$$

其中， $\phi(t) - \phi(t + \Delta t) = f(t) \Delta t$ ，视 $\Delta t$ 为等价无穷小量。信号经过带通滤波器，即可得到 $f(t)$ ，即 FM/FSK 的基带调制信号。对于 PSK，其相位在 0 和  $\pi$  二者之间跳变，因此 $f(t)$ 为脉冲信号，脉冲代表载波相位即码元变化。将脉冲信号经过触发器即可恢复出二进制码元信息。

## 2. 参数估计分析与计算

本装置需要估计并显示的有关参数为：AM 信号的调制信号频率  $F$ 、调幅系数 $m_a$ ；FM

信号的调制信号频率  $F$ 、调频系数  $m_f$ 、最大频偏  $\Delta f_m$ ；2ASK、2PSK、2FSK 信号传输的二进制码速率  $R_c$  以及 2FSK 信号的移频键控系数  $h$ 。下文给出如何由解调得到的振幅  $a(t)$ 、频率  $f(t)$ 、相位  $\phi(t)$  信息计算相关的参数。

## 2.1 幅度调制信号(AM/ASK)相关参数

对于 AM 信号，根据式(2)、式(3)，有：

$$a(t) = A(1 + m_a m(t)) \quad (10)$$

由上式即可得到调制信号  $m(t)$  和调幅系数  $m_a$ 。

对于 2ASK 信号，与 AM 信号处理方法类似，由式(2)(4)可得，瞬时幅度  $a(t)$ ：

$$a(t) = \sum_n a_n g\left(t - \frac{n}{R_c}\right) \quad (11)$$

计算出  $a(t)$  后，再对  $a(t)$  进行抽样判决，就可以恢复出调制的码元信号以及码速率  $R_c$ 。

## 2.2 角度调制信号(FM/FSK/PSK)相关参数

对于 FM 信号，根据式(2)、式(5)，有：

$$\phi(t) = k_m \int_0^t m(t) dt \quad (12)$$

对相位微分，即可求得瞬时频率：

$$f(t) = \frac{d\phi(t)}{dt} = k_m m(t) \quad (13)$$

由上式即可得到调制信号  $m(t)$  和调制角频偏  $k_m$ 。调频系数  $m_f$  定义为：

$$m_f = \frac{k_m}{\omega_m} = \frac{\Delta f_m}{F} \quad (14)$$

其中， $\omega_m$  为调制信号角频率， $\Delta f_m$  和  $F$  分别为频偏和调制频率

对于 2PSK 信号，由式(2)(7)可得，瞬时相位  $\phi(t)$ ：

$$\phi(t) = \sum_n g\left(t - \frac{n}{R_c}\right) \phi(t) \quad (15)$$

对于 2FSK 信号，与 FM 信号类似，由式(2)(6)可得，瞬时频率  $f(t)$ ：

$$f(t) = \frac{d\phi(t)}{dt} = \sum_n g\left(t - \frac{n}{R_c}\right) a_n \Delta\omega \quad (16)$$

同样地，进行抽样判决后，就可以恢复出调制的码元信号并计算码速率  $R_c$ 。

另外，2FSK 信号的移频键控系数  $h$  由下式给出：

$$h = \frac{\Delta f}{R_c} \quad (17)$$

其中， $\Delta f = \Delta\omega/2\pi$  为载波频率间隔。

### 三、 电路与程序设计

#### 1. 硬件电路设计

前端信号放大电路如图 2 所示。该电路实现对信号源输出信号进行放大的功能。信号源输出调制信号的载波电压峰峰值恒定为100mVpp，ADC 输入满幅值为1Vpp，因此需要将信号放大约 10 倍。使用运放搭建同相放大电路，考虑输出阻抗匹配衰减，运放放大倍数应约为 20。如下图所示，放大倍数为 $1 + 51/2.7 = 19.9$ ，能够将信号源输出信号放大到接近 ADC 满量程幅值。

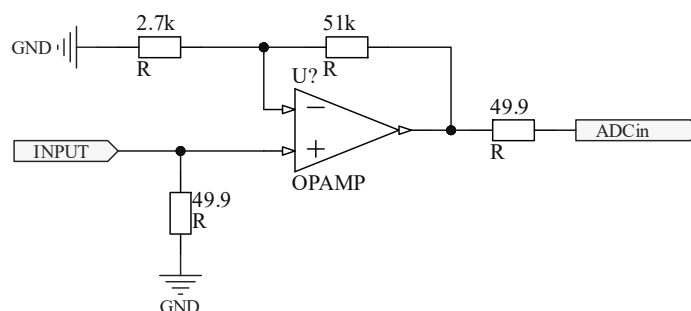


图 2 前端放大电路

后端滤波器电路如图 3 所示。该电路实现 DAC 输出重构滤波并滤除载波频段噪声。对于输出的基带解调信号，模拟正弦信号和数字方波信号频率均在5kHz以下，而载波频率为2MHz。因此设定输出滤波器阻带为1MHz，阻带衰减大于40dB。为避免数字解调信号失真，需尽量保留方波信号的谐波分量，因此设定-3dB截止频率为100kHz。使用运放搭建满足要求的单路正反馈(Sallen-Key)低通滤波器如下图所示。

前后端信号处理电路的运放均选择高速宽带运放 LT1363，高容性负载稳定，低失调，适合用于数据采集系统信号调理和有源滤波器。

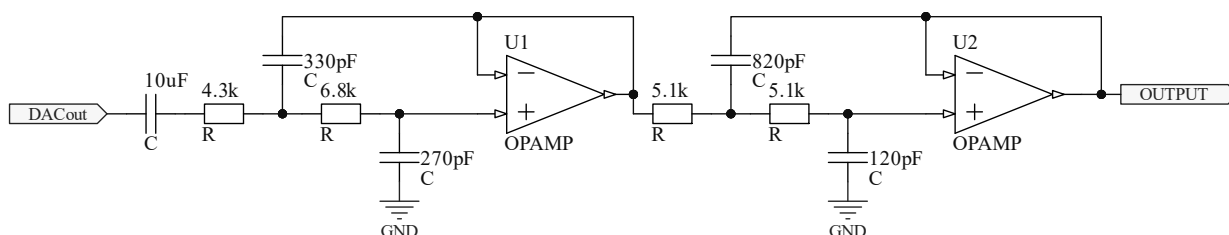


图 3 后端滤波电路

#### 2. 软件程序设计

FPGA 控制 ADC 采集输入调制信号之后，首先判断信号为角度调制还是幅度调制，再根据其调制类型使用对应的解调方式将信号进行解调。信号解调流程图如图 4 所示。使用包络检波解调幅度调制信号(AM/ASK)，使用延迟自相干解调角度调制信号(FM/FSK/PSK)，其中，PSK 信号经过延迟自相干处理后转变为脉冲波，需再经过触发器才能将其恢复为二

进制码。

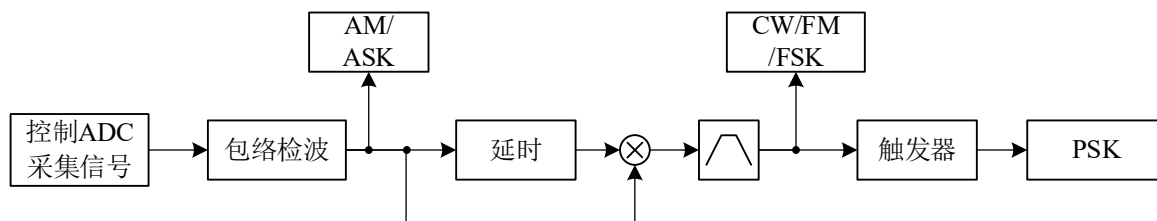


图 4 信号解调流程

对解调的信号进行具体的调制方式判断与参数计算。调制方式识别流程图如图 5 所示。首先测量解调信号的幅值、均值、有效值等参数，然后计算调幅系数 $m_a$ ，通过 $m_a$ 判断信号是否为幅度调制信号；若不为幅度调制信号，再通过 $V_{pp}$ 大小判断是否为连续波 CW 信号；最后利用 $V_{pp}/V_{rms}$ 判断信号调制类型为数字调制还是模拟调制。经过一系列判别后，再由识别的信号类型输出显示相应的参数估计值，控制串口屏显示调制方式与参数估计。

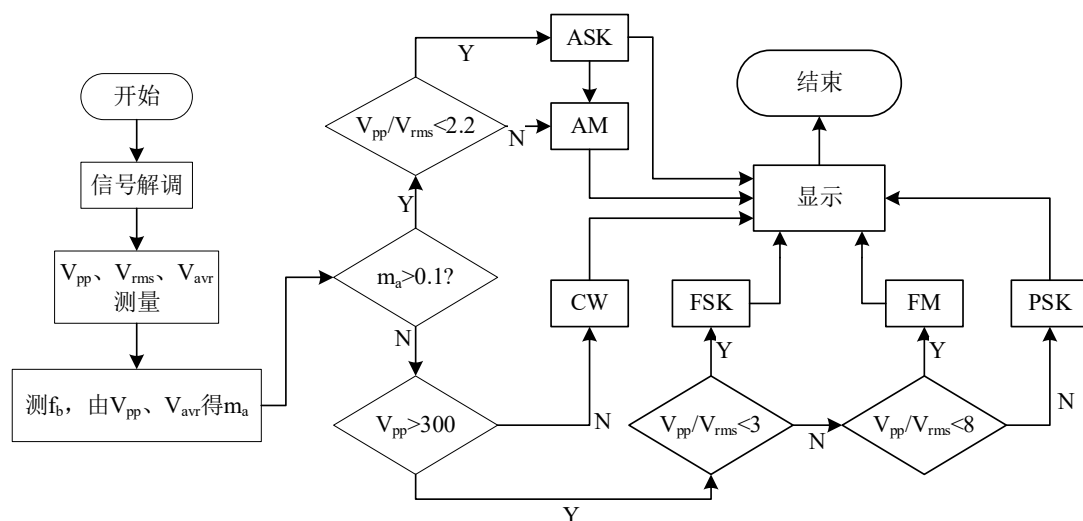


图 5 调制方式识别流程图

## 四、 测试方案与测试结果

### 1. 测试环境

示波器:	SIGLENT	SDS2504X Plus 型 500M、2GSa/s 数字示波器;
信号发生器:	SIGLENT	SDG6032X-E 型 350MHz、2.4GSa/s 函数/任意波形发生器;
电源:	RIGOL	DP832 型稳压源;

### 2. 测试方案

#### 2.1 模拟调制信号测试方案

设置信号发生器载波峰峰值 100mVpp，载频 2MHz，直接输出载波信号(CW)，观察屏

幕显示。调制类型设置为 AM, 调制频率设置为 1kHz, 在 30%~100%范围内改变调制深度, 观测屏幕显示的调制方式、调幅系数 $m_a$ 和示波器显示的解调波形; 更改调制频率 1~5kHz, 重复上述步骤。调制类型更改为 FM, 调制频率设置为 5kHz, 频偏范围为 1~5 倍调制频率, 观测屏幕显示的调制方式、调频系数 $m_f$ 、峰值频偏 $\Delta f_{max}$ 和示波器显示的解调波形; 更改调制频率 1~5kHz, 重复上述步骤。

2.2 数字调制信号测试方案

同样设置信号发生器载波峰峰值 100mVpp, 载频 2MHz。调制类型设置为 ASK, 键控频率设置为 5kHz, 观测屏幕显示的调制方式、二进制码速率 $R_c$ 和示波器显示的解调信号; 更改键控频率为 4kHz、3kHz, 重复上述步骤; 更改调制类型为 PSK, 重复前述步骤。

调制类型更改为 FSK, 键控频率设置为 5kHz, 跳频为 2~5 倍键控频率, 观测屏幕显示的调制方式、移频键控系数  $h$ 、二进制码速率 $R_c$ 和示波器显示的解调信号; 更改键控频率为 4kHz、3kHz, 重复上述步骤。

3. 测试结果与数据

3.1 模拟调制信号测试

调制类型为 AM、FM 时, 测试结果分别如表 1、表 2 所示。调制类型为 CW 时, 屏幕显示字符 “CW”。根据测试结果可以看出, 信号调制方式识别正确, 调幅系数 $m_a$ 估计值误差绝对值小于 0.02; 调频系数 $m_f$ 误差绝对值小于 0.1; 峰值频偏 $\Delta f_{max}$ 误差绝对值小于 100Hz; 调制频率  $F$  误差绝对值小于 1Hz。

表 1 AM 信号测试表

输入信号		调制方式	参数估计		解调信号	
调制频率	调幅系数	识别	调制频率	调幅系数	频率	峰峰值
1.000kHz	0.50	AM	1.000kHz	0.49	1.00kHz	2.21Vpp
1.000kHz	0.80	AM	1.000kHz	0.78	1.00kHz	3.54Vpp
3.000kHz	0.60	AM	3.000kHz	0.61	3.00kHz	2.78Vpp
5.000kHz	0.95	AM	5.000kHz	0.96	4.99kHz	2.18Vpp
5.000kHz	0.40	AM	5.000kHz	0.41	5.00kHz	3.60Vpp

表 2 FM 信号测试表

输入信号		调制方式	参数估计			解调信号	
调制频率	峰值频偏	识别	调制频率	峰值频偏	调频系数	频率	峰峰值
1.000kHz	1.000kHz	FM	1.000kHz	1.02kHz	1.0	1.00kHz	1.80Vpp
1.000kHz	3.000kHz	FM	1.000kHz	3.00kHz	3.0	1.01kHz	2.40Vpp
2.000kHz	10.000kHz	FM	2.000kHz	9.90kHz	4.9	2.00kHz	3.60Vpp
5.000kHz	10.000kHz	FM	5.000kHz	9.97kHz	2.0	5.00kHz	3.65Vpp
5.000kHz	20.000kHz	FM	5.000kHz	20.06kHz	4.0	5.00kHz	3.58Vpp



3.2 数字调制信号测试

调制类型为 ASK、PSK 时，测试结果如表 3 所示。调制类型为 FSK 时，测试结果如表 4 所示。调制方式识别正确，二进制码速率 $R_c$ 估计值绝对误差小于 10bps，移频键控系数  $h$  绝对误差小于 0.1。

表 3 ASK/PSK 测试表

信号类型	输入信号		调制方式		解调信号	
	码速率	键控频率	识别	码速率估计值	频率	峰峰值
ASK	6.000kbps	3.000kHz	2ASK	6.00kbps	3.00kHz	1.96Vpp
ASK	8.000kbps	4.000kHz	2ASK	8.00kbps	4.00kHz	1.95Vpp
ASK	10.000kbps	5.000kHz	2ASK	10.00kbps	5.00kHz	1.95Vpp
PSK	6.000kbps	3.000kHz	2PSK	6.00kbps	3.00kHz	1.95Vpp
PSK	8.000kbps	4.000kHz	2PSK	8.00kbps	4.00kHz	1.95Vpp
PSK	10.000kbps	5.000kHz	2PSK	10.00kbps	5.00kHz	1.95Vpp

表 4 FSK 测试表

码速率	输入信号		调制方式识别	参数估计		解调信号	
	键控频率	跳频		移频键控系数 $h$	码速率	频率	峰峰值
6.000kbps	3.000kHz	24.000kHz	2FSK	4.0	6.00kbps	3.00kHz	1.95Vpp
6.000kbps	3.000kHz	12.000kHz	2FSK	2.0	6.00kbps	3.00kHz	1.95Vpp
8.000kbps	4.000kHz	16.000kHz	2FSK	2.0	8.00kbps	4.00kHz	1.95Vpp
10.000kbps	5.000kHz	20.000kHz	2FSK	4.1	10.00kbps	4.99kHz	1.95Vpp
10.000kbps	5.000kHz	50.000kHz	2FSK	5.1	10.00kbps	4.99kHz	1.95Vpp

4. 测试结果分析

- 4.1 模拟调制信号测试分析：由数据结果知，调制方式与相关参数显示正确，在题目要求范围内调幅系数和调频系数误差绝对值均小于 0.1，解调信号频率准确，幅值大于 1Vpp。满足题目要求。误差主要来源于采样精度和量化噪声等。
- 4.2 数字调制信号测试分析：由数据结果知，调制类型与相关参数显示正确，解调数字信号频率准确，满足题目要求。误差主要来源于数字系统采样精度和量化噪声等。

五、 参考文献

[1]. 王贞炎.电子系统设计——基础与测量仪器篇.2021.中国工信出版集团,电子工业出版社.

[2]. 王贞炎.FPGA 应用开发和仿真.2017.机械工业出版社.

[3]. 楼才义,徐建良,杨小牛.软件无线电原理与应用(第 2 版).2014.电子工业出版社.

[4]. 付卫红,杨小牛,曾兴雯等.一种基于时频分析神经网络的通信信号盲识别新方法[J].信号处理,2007(05):775-778.