

信号调制方式识别与参数估计装置

摘 要：本系统实现了信号调制方式识别与参数估计功能。该系统由 FPGA 及其外围电路构成，外围电路包括信号输入放大电路和 ADC，以及信号输出的 DAC 和串口屏。该系统能够在 2MHz、100mV_{pp} 的载波下，对 AM、FM、2ASK、2FSK 或 2PSK 进行解调，并对解调信号进行特征提取，根据不同的特征参数对输入信号的调制方式进行判定，实现了对五种调制方式以及连续载波的自动识别，同时依据解调信号的峰峰值与调制度的线性关系实现了信号的调制参数的估计，并最终显示识别和测量结果、输出解调波形。

关键词：调制方式识别；调制参数测量；FPGA

一、系统方案

1. 总体方案设计

该系统的框图如图 1 所示。输入信号经过前端放大至 $V_{pp} = 2V$ 后由 ADC 采集进入 FPGA，在 FPGA 中，将信号分为三路，第一路是通过包络检波的方式对 AM 和 2ASK 信号进行解调，第二路则通过将信号延时 1/4 载波周期后与原信号相乘的方式解调 FM 和 2FSK 信号，第三路通过将信号延时 1/2 载波周期后与原信号相乘，将 2PSK 转换为脉冲，经过 T' 触发器得到 2PSK 解调信号。三路解调并行处理，同时输出结果，只有与输入信号调制方式相匹配的解调通道产生有效输出，据此可以判断输入信号调制方式并测量调制参数。判决调制类型后选择对应通道的解调信号作为输出信号，经过放大后即可由 DAC 输出；同时将调制方式及参数发送至串口屏显示。

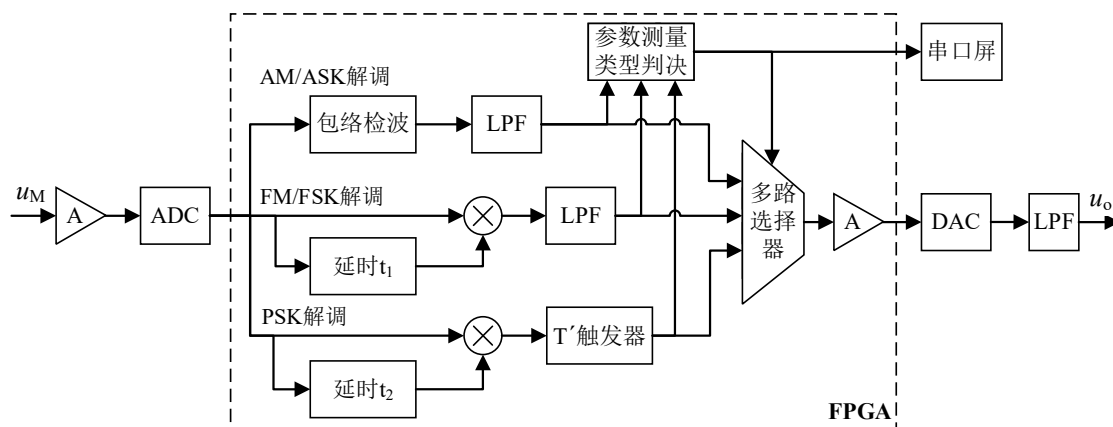


图 1 系统框图

2. 方案选择与比较

2.1 角度调制信号解调方案

方案一：非相干解调。

方案二：相干解调。

方案选择：窄带 FM 非相干解调如鉴频器解调的抗噪声性能与调制度 m_f 的立方成正比^[2]，因此在调制度下降至 1 附近时系统的抗噪声能力迅速下降；而相干解调对噪声抑制能力更强。本题中调制度 m_f 最低为 1，且需要对信号进行精确的测量，对噪声较为敏感，因此 FM 解调选择方案二，且该方案对 2FSK 和 2PSK 具有普适性，故均采用相干解调。

2.2 调制参数测量方案

方案一：通过调制信号测量。

方案二：通过基带信号测量。

方案选择：方案一中 AM 调制度与信号幅值呈线性关系，容易测量，但得到 FM 的调制度和 2FSK 的键控系数需要对信号频谱进行分析，其实现较为复杂，且测量精度受制于频率分辨率。方案二中 AM 解调信号的幅值与调制度呈正比，且 FM 与 2FSK 解调信号的幅值也与其调制度或键控系数成正比（分析计算详见下文），故统一测量解调信号的幅值即可计算出调制参数。方案二线性度好，测量和计算简单，因此选择方案二。

2.3 调制方式识别方案

方案一：提取输入信号特征。

方案二：提取解调信号特征。

方案比较：对于输入的调制信号的识别可以通过若干特征参数来判决^[3]，对于题目中的五种调制方式及连续载波的判决，需要测量并计算幅值、相位、瞬时频率等参数，而相位、瞬时频率等参数测量难度高且精度低。而不同调制方式的信号经过不同的解调后有不同特征，且主要表现在幅值上，通过计算每一种解调输出有效值和峰峰值足以识别这几种调制方式。因此选择方案二。

二、理论分析与计算

1. FM 及 2FSK 解调方案

本系统采用延时后自相干的方式解调 FM 和 2FSK 信号，考虑任意 FM 信号

$$s(t) = A \cos \left[\omega_c t + K_f \int_0^t m(\tau) d\tau \right] \quad (1)$$

对其进行 Δt 的延时后，将其与原信号相乘并进行幅值归一化后得到

$$\begin{aligned} s_p(t) &= \cos \left[\omega_c t + K_f \int_0^t m(\tau) d\tau \right] \cdot \cos \left[\omega_c (t + \Delta t) + K_f \int_0^{t+\Delta t} m(\tau) d\tau \right] \\ &= \frac{1}{2} \cos \left[2\omega_c t + 2K_f \int_0^t m(\tau) d\tau \right] + \frac{1}{2} \cos \left[\omega_c \Delta t + K_f \int_t^{t+\Delta t} m(\tau) d\tau \right] \end{aligned} \quad (2)$$

其中第一项为载波二倍频分量，第二项为低频分量，记作 $s_d(t)$ 。将乘积信号 $s_p(t)$ 进行低通滤波，只保留其低频分量 $s_d(t)$ ，且令 $\omega_c \Delta t = \pi/2$ 即进行载波周期四分之一的延时，并且注意到 Δt 远小于 $m(\tau)$ 信号周期，且 $K_f \Delta t \ll 1$ ，可以对 $s_d(t)$ 进行如下近似

$$\begin{aligned} s_d(t) &= 0.5 \cos \left[\pi/2 + K_f \int_t^{t+\Delta t} m(\tau) d\tau \right] \\ &\approx 0.5 \cos[\pi/2 + K_f m(t) \Delta t] \\ &\approx -0.5 K_f \Delta t \cdot m(t) \end{aligned} \quad (3)$$

上式表明 $s_d(t)$ 即为基带信号。

对于单音 FM 信号， $m(t) = \cos \omega_m t$ ，其归一化幅值为 $V = 0.5 K_f \Delta t = \pi \Delta t \Delta f_{max}$ ，

其中 $\Delta f_{max} = m_f \cdot f_m$ 为最大频偏。由于延时 Δt 为常数，解调信号幅值正比于最大频偏。

对于 2FSK 信号， $m(t)$ 为 01 交替的方波，此时频差 $\Delta f = |f_{c1} - f_{c0}| = K_f$ ，且由 $h = \Delta f / R_c$ 可得解调信号幅值正比于 $h \cdot R_c$ ，其中 R_c 为二进制码速率。

2. 调制方式识别

在本系统中，输入信号将分为三路，分别做调幅信号解调、调频信号解调和 PSK 解调。调幅信号解调采用的是包络检波方案，对于 $s_{AM}(t) = A(1 + m_a \cos \omega_m t) \cos \omega_c t$ 的 AM 信号，经过包络检波滤波后得到的解调信号为

$$s(t) = m_a A \cos \omega_m t \quad (4)$$

在放大后载波峰峰值恒定为 $2A = 2V$ 的情况下，解调信号的峰峰值 $V_{pp,1} = 2m_a A$ ，其与调幅系数成正比，调幅系数最小为 0.3 的情况下仍有 600mV 的峰峰值。对于 2ASK 信号，解调信号的峰峰值恒为 1V。而其他调制类型的信号没有包络的变化，通过包络检波不能得到有效输出，只能得到峰峰值小于 10mV 的噪声。因此将调幅信号解调通道的输出峰峰值 $V_{pp,1}$ 作为第一个特征参数，将判决门限设定为 100mV 即可将 AM、2ASK 与其他调制方式区分开。

至于 AM 和 2ASK，则可根据解调信号的波形特点来区分。AM 的解调信号为正弦信号，其峰峰值与有效值之比 $\eta = V_{pp}/V_{rms} = 2\sqrt{2}$ ；而 2ASK 的解调信号为方波，其理论 $\eta = V_{pp}/V_{rms} = 2$ ，由于系统的低通特性会使方波产生少量失真，其 η 会略大于 2，此时将 2.5 作为特征参数 η 的判决门限可以有效区分 AM 和 2ASK。

若通过 $V_{pp,1}$ 确定输入信号不是 AM 或 2ASK，则再对调频信号解调通道的特征参数进行判决。由（4）式可知 FM 和 2FSK 解调信号的峰峰值为 $V_{pp,2} = \pi \Delta t \Delta f_{max} A$ ，在最大频偏取最小值 1kHz 时产生最小峰峰值，约为 20mV，相应有效值 $V_{rms,2}$ 大于 7mV。而 2PSK 经过这种解调会得到幅值接近的窄脉冲，该窄脉冲信号的有效值很低，与噪声有效值相接近，均小于 0.5mV。因此将调频信号解调通道输出的有效值 $V_{rms,2}$ 作为特征参数，将判决门限设定为 2mV 即可将 FM、2FSK 与 2PSK、CW 区分开。

对于 FM 和 2FSK，也可根据解调信号波形特点来区分，故将峰峰值与有效值之比 η 作为特征参数，并以同样的门限进行判决。

若通过 $V_{pp,1}$ 和 $V_{rms,2}$ 确定输入信号既非 AM 或 2ASK，也非 FM 或 2FSK，则最后对 PSK 解调通道的特征参数进行判决。2PSK 信号经过解调能得到峰峰值 $V_{pp,3}$ 最小约为 10mV 的信号；而 CW 经过 PSK 解调无法得到有效输出，只能得到峰峰值小于 1mV 的噪声。因此将 PSK 解调通道的输出峰峰值 $V_{pp,3}$ 作为特征参数，将判决门限设定为 2mV 即可将 2PSK 与 CW 区分开。

至此，通过上述判决逻辑，能够对五种调制方式以及连续载波进行区分与识别。调制方式识别逻辑框图如图 2 所示。

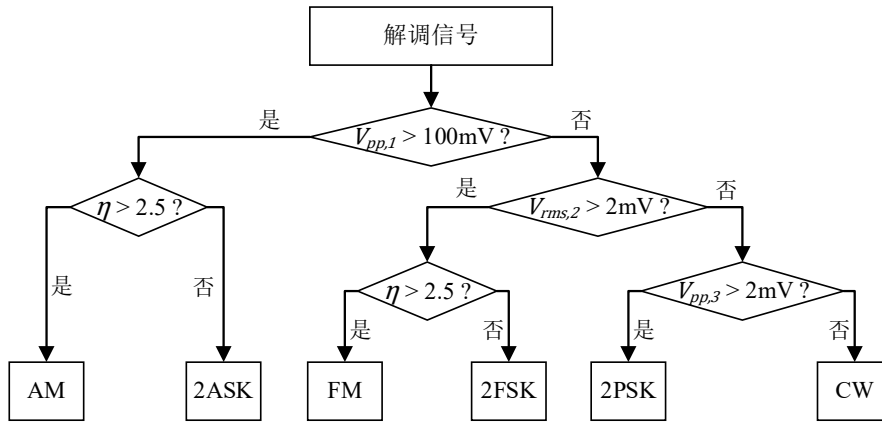


图 2 调制方式识别逻辑框图

3. 调制参数估计原理

在确定调制方式后，对相应的解调输出信号进行测量，可以估计其相关参数。具体测量方式与计算如下。

3.1 调制频率 F 或二进制码速率 R_C 估计

模拟或数字调制的解调信号为正弦波或方波，可对解调信号进行过零迟滞比较整形为方波，再通过等精度频率计对频率进行测量。在一段时间内同时对主频时钟和整形信号进行上升沿计数，若上升沿数量分别为 N_1 和 N_2 ，FPGA 主频为 f_0 ，则信号频率为

$$F = \frac{N_2}{N_1} f_0 \quad (5)$$

由于键控调制信号均为 01 交替序列，表现为频率等于码元速率一半的方波，故在测出方波频率 F 后可计算得二进制码速率 $R_C = 2F$ 。

3.2 AM 调幅系数 m_a 估计

由（4）式可知，在载波大小固定的情况下，AM 解调信号的 V_{pp} 与 m_a 成正比。因此可根据测试得到的 V_{pp} 与 m_a 进行线性拟合，得到 $m_a = a_1 V_{pp} + b_1$ 的线性方程，便可通过测量解调信号峰峰值计算调幅系数。

3.3 FM 调频系数 m_f 与最大频偏 Δf_{max} 估计

由（3）式及其推论可知，FM 解调信号的 V_{pp} 与 Δf_{max} 成正比，因此可根据测试得到的 V_{pp} 与 Δf_{max} 进行线性拟合，得到 $\Delta f_{max} = a_2 V_{pp} + b_2$ 的线性方程，便可通过测量解调信号峰峰值计算最大频偏。再根据 $\Delta f_{max} = m_f \cdot F$ ，结合测得的调制信号频率即可计算得到调频系数 m_f 。

3.4 2FSK 频移键控系数 h 估计

由（3）式及其推论可知，2FSK 解调信号的 V_{pp} 与频差 $\Delta f = |f_{c1} - f_{c0}|$ 成正比，因此可根据测试得到的 V_{pp} 与 Δf 进行线性拟合，得到 $\Delta f = a_3 V_{pp} + b_3$ 的线性方程，便可通过测量峰峰值计算 Δf ，再结合测得的二进制码速率 R_c 计算频移键控系数 $h = \Delta f / R_c$ 。

三、 电路与程序设计

1. 电路设计

1.1 前端信号放大

图 3 为对输入信号进行放大的同相放大电路。

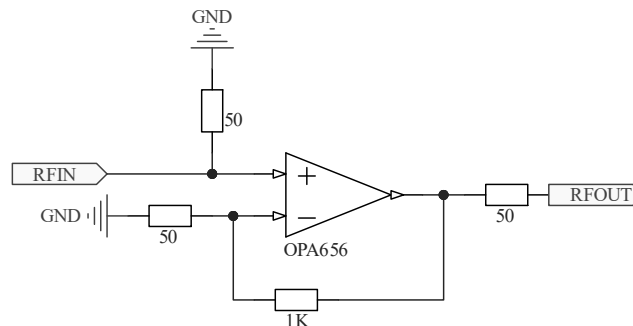


图 3 前端信号放大电路

信号的输入阻抗与输出阻抗均被调整为 50Ω 。当信号源设置为 50Ω 负载， V_{pp} 为 100mV 时，要在 ADC 输入端产生 $V_{pp} = 2V$ 的信号，需要将信号放大至 20 倍；信号频率为 2MHz，因此放大器 GBW 应大于 40MHz，OPA656 可以满足要求。

1.2 DAC 输出重构滤波

图 4 为 DAC 输出端的重构滤波器。

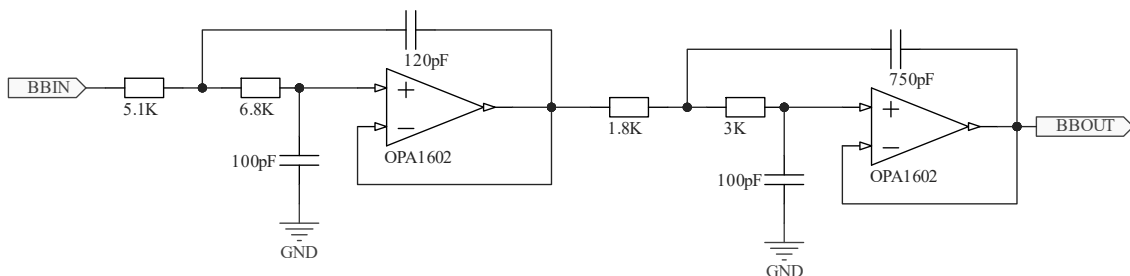


图 4 DAC 输出端重构滤波器电路

基带信号输出的 DAC 采用 DAC8831，在 1MHz 的采样率下工作。DAC 输出端后的重构滤波器截止频率设置为 250kHz，传输函数采用四阶巴特沃斯形式，在 1M 处可以提供 -50dB 的衰减并在通带内提供良好的增益平坦度，能够使输出信号更平滑。

2. FPGA 系统设计

本系统信号的解调、调制方式识别和参数测量均由 FPGA 完成，FPGA 选用的是内部资源较多的 ZYQN XC7Z035 开发板。图 5 为其 PL(Programmable Logic)模块框图，图 6 为 PS(Processing System)程序流程图。

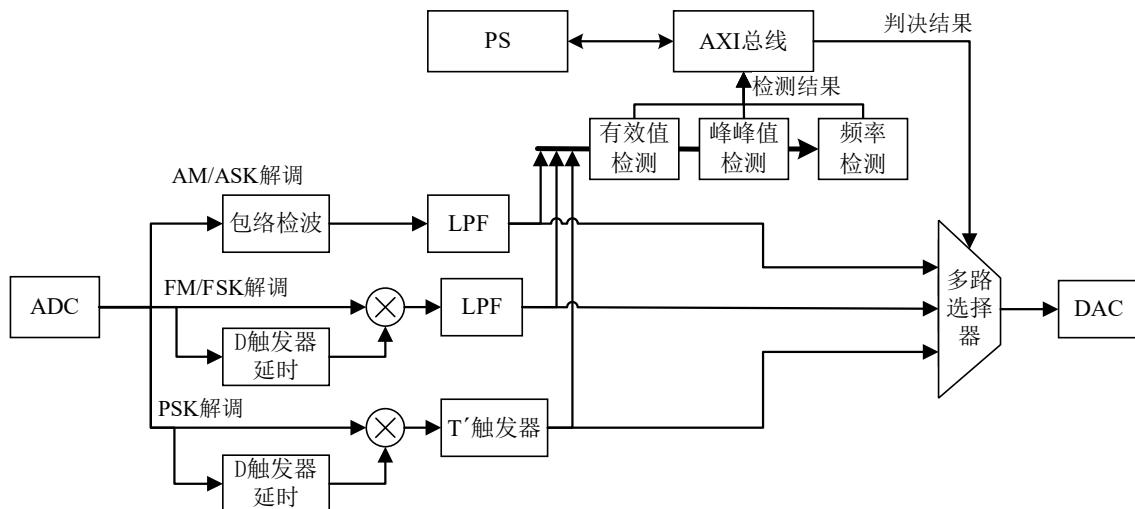


图 5 PL 模块框图

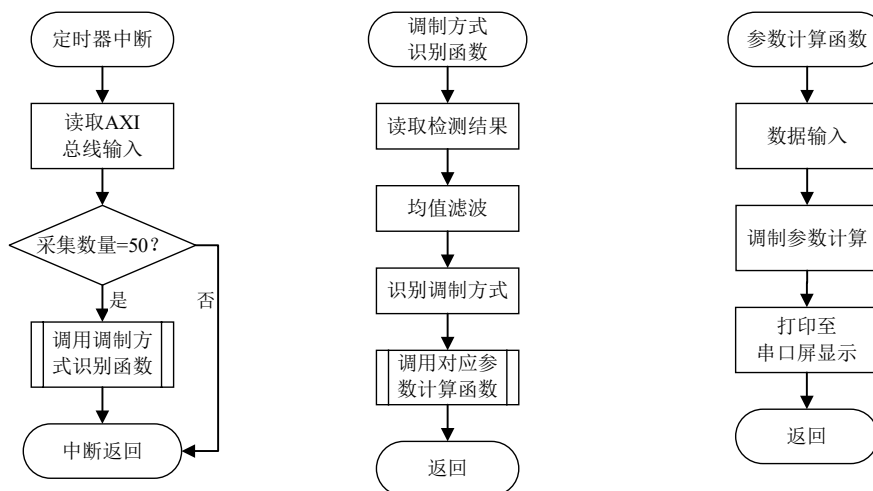


图 6 PS 程序流程图

ADC 采集进入 FPGA 的信号在 PL 端经过三路并行的解调后得到解调结果，将所有解调结果以此进行有效值检测、峰峰值检测和频率检测，检测结果通过 AXI 总线传至 PS 端处理。当 PS 读取到一定数量的数据后便进行一次调制方式识别，识别逻辑详见图 2。在确定调制方式后，继续根据测量数据计算调制参数，并将结果打印至串口屏。同时 PS 将调制方式识别结果传回 PL，用于控制多路选择器将对应解调信号输出。

四、 测试方案与测试结果

1. 测试环境

示波器： SIGLENT SDS6204 H10 Pro 型数字示波器
 直流稳压源： RIGOL DP832 型可编程直流电源
 信号发生器： SIGLENT SDG6032X-E 型任意波形发生器

2. 测试方案及结果

2.1 模拟调制识别与测量测试

将测试系统的输入端接信号发生器，输出端接入示波器，设置信号源载波频率 2MHz，载波峰峰值 100mV。依次产生 AM、FM 和 CW 信号，并在 1kHz~5kHz 范围内改变调制频率，在 0.3~1 之间改变调幅系数，在 1~5 之间改变调频系数。按下“开始测量”键，记录串口屏显示的识别和测量结果，测量从按下按键到稳定输出的响应时间，并观察示波器显示的波形峰峰值是否大于 1V 且无失真。记录测试数据如表 1 所示。

表 1 模拟调制识别与测量测试数据

| 输入调制方式 | 输入调制频率/kHz | 输入调制系数 | 识别调制方式 | 测量载波频率/kHz | 频率误差/kHz | 测量调制参数 | 调制参数误差 | 响应时间 | 波形是否符合要求 |
|--------|------------|--------|--------|------------|----------|--------|--------|------|----------|
| AM | 1.000000 | 0.400 | AM | 1.010 | 0.010 | 0.398 | -0.002 | 1s | 是 |
| AM | 1.000000 | 0.800 | AM | 1.008 | 0.008 | 0.801 | 0.001 | 1s | 是 |
| AM | 2.000000 | 0.500 | AM | 2.005 | 0.005 | 0.497 | -0.003 | 1s | 是 |
| AM | 2.000000 | 0.600 | AM | 2.004 | 0.004 | 0.599 | -0.001 | 1s | 是 |
| AM | 3.000000 | 0.400 | AM | 3.005 | 0.005 | 0.403 | 0.003 | 1s | 是 |
| AM | 3.000000 | 0.900 | AM | 3.002 | 0.002 | 0.900 | 0.000 | 1s | 是 |
| AM | 4.000000 | 0.900 | AM | 4.002 | 0.002 | 0.899 | -0.001 | 1s | 是 |
| AM | 5.000000 | 0.400 | AM | 5.003 | 0.003 | 0.396 | -0.004 | 1s | 是 |
| AM | 5.000000 | 0.700 | AM | 5.001 | 0.001 | 0.701 | 0.001 | 1s | 是 |
| FM | 1.000000 | 1.000 | FM | 0.989 | -0.011 | 1.022 | 0.022 | 1s | 是 |
| FM | 1.000000 | 3.000 | FM | 0.994 | -0.006 | 3.012 | 0.012 | 1s | 是 |
| FM | 2.000000 | 1.000 | FM | 1.998 | -0.002 | 1.011 | 0.011 | 1s | 是 |
| FM | 2.000000 | 4.000 | FM | 1.999 | -0.001 | 3.989 | -0.011 | 1s | 是 |
| FM | 3.000000 | 2.000 | FM | 3.005 | 0.005 | 2.004 | 0.004 | 1s | 是 |
| FM | 3.000000 | 5.000 | FM | 3.003 | 0.003 | 4.994 | -0.006 | 1s | 是 |
| FM | 4.000000 | 2.000 | FM | 4.002 | 0.002 | 2.007 | 0.007 | 1s | 是 |
| FM | 4.000000 | 3.000 | FM | 3.996 | -0.004 | 3.002 | 0.002 | 1s | 是 |
| FM | 5.000000 | 1.000 | FM | 4.998 | -0.002 | 1.013 | 0.013 | 1s | 是 |
| FM | 5.000000 | 5.000 | FM | 5.003 | 0.003 | 4.988 | -0.012 | 1s | 是 |
| CW | \ | \ | CW | \ | \ | \ | \ | 1s | \ |

2.2 数字调制识别与测量测试

载波参数不变，信号源依次输出 2ASK、2FSK、2PSK 和 CW 信号，并在 6kbps~10kbps 范围内改变二进制码速率，在 2~5 之间改变 2FSK 频移键控系数。按下“开始测量”键，记录串口屏显示的识别和测量结果，测量从按下按键到稳定输出的响应时间，并观察示波器显示的波形峰峰值是否大于 1V 且无失真。记录测试数据如表 2 所示。

表 2 数字调制识别与测量测试数据

| 输入调制方式 | 输入二进制码速率/kbps | 输入频移键控系数 | 识别调制方式 | 测量二进制码速率/kHz | 测量频移键控系数 | 响应时间 | 波形是否符合要求 |
|--------|---------------|----------|--------|--------------|----------|------|----------|
| 2ASK | 6.000000 | \ | 2ASK | 5.994 | \ | 1s | 是 |
| 2ASK | 8.000000 | \ | 2ASK | 7.998 | \ | 1s | 是 |
| 2ASK | 10.000000 | \ | 2ASK | 10.007 | \ | 1s | 是 |
| 2FSK | 6.000000 | 2.000 | 2FSK | 5.993 | 1.996 | 1s | 是 |
| 2FSK | 6.000000 | 5.000 | 2FSK | 5.998 | 5.002 | 1s | 是 |
| 2FSK | 8.000000 | 4.000 | 2FSK | 7.997 | 4.000 | 1s | 是 |
| 2FSK | 8.000000 | 5.000 | 2FSK | 8.001 | 5.004 | 1s | 是 |
| 2FSK | 10.000000 | 3.000 | 2FSK | 10.001 | 2.998 | 1s | 是 |
| 2FSK | 10.000000 | 5.000 | 2FSK | 10.003 | 5.003 | 1s | 是 |
| 2PSK | 6.000000 | \ | 2PSK | 5.998 | \ | 1s | 是 |
| 2PSK | 8.000000 | \ | 2PSK | 8.000 | \ | 1s | 是 |
| 2PSK | 10.000000 | \ | 2PSK | 10.003 | \ | 1s | 是 |
| CW | \ | \ | CW | \ | \ | | \ |

3. 测试结果分析

经过测试，该系统能够正确地自动识别 AM、FM、2ASK、2FSK、2PSK 及 CW 信号，并能对信号参数进行估计，频率误差绝对值小于 20Hz，调幅系数误差小于 0.01，调幅系数误差小于 0.03，响应时间约为 1s，能正确输出解调信号。本系统可以实现题目所有要求，整个系统可靠稳定，满足设计要求。

五、 参考文献

- [1]. 奥本海姆.信号与系统（第二版）[M].北京:电子工业出版社.2020.8.
- [2]. 樊昌信,曹丽娜.通信原理（第 7 版）[M].北京:国防工业出版社.2012.11.
- [3]. 张志明.数字和模拟通信信号调制方式的自动识别[J].国防科技大学学报,2010,32(4):88-93.
- [4]. 王贞炎.电子系统设计——基础与测量仪器篇[M].北京:电子工业出版社,2021.5.
- [5]. 王贞炎.FPGA 应用开发和仿真[M].北京:机械工业出版社.2017.