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、100mVpp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

1. 系统方案
2. 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

1. 方案选择与比较
   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。

* 1. 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。

* 1. 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。

1. 理论分析与计算
2. 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

对其进行的延时后，将其与原信号相乘并进行幅值归一化后得到

其中第一项为载波二倍频分量，第二项为低频分量，记作。将乘积信号进行低通滤波，只保留其低频分量，且令即进行载波周期四分之一的延时，并且注意到远小于信号周期，且，可以对进行如下近似

上式表明即为基带信号。

对于单音FM信号，，其归一化幅值为，其中为最大频偏。由于延时为常数，解调信号幅值正比于最大频偏。

对于2FSK信号， 为01交替的方波，此时频差，且由可得解调信号幅值正比于，其中为二进制码速率。

1. 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，对于的AM信号，经过包络检波滤波后得到的解调信号为

在放大后载波峰峰值恒定为的情况下，解调信号的峰峰值，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；而2ASK的解调信号为方波，其理论，由于系统的低通特性会使方波产生少量失真，其会略大于2，此时将2.5作为特征参数的判决门限可以有效区分AM和2ASK。

若通过确定输入信号不是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，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作为特征参数，并以同样的门限进行判决。

若通过和确定输入信号既非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

1. 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。

* 1. 调制频率或二进制码速率估计

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和，FPGA主频为，则信号频率为

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，故在测出方波频率后可计算得二进制码速率。

* 1. AM调幅系数估计

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

* 1. FM调频系数与最大频偏估计

由（3）式及其推论可知，FM解调信号的与成正比，因此可根据测试得到的与进行线性拟合，得到的线性方程，便可通过测量解调信号峰峰值计算最大频偏。再根据，结合测得的调制信号频率即可计算得到调频系数。

* 1. 2FSK频移键控系数估计

由（3）式及其推论可知，2FSK解调信号的与频差成正比，因此可根据测试得到的与进行线性拟合，得到的线性方程，便可通过测量峰峰值计算，再结合测得的二进制码速率计算频移键控系数。

1. 电路与程序设计
2. 电路设计
   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，为100mV时，要在ADC输入端产生的信号，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. 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。

1. 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。

1. 测试方案与测试结果
2. 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

1. 测试方案及结果
   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 | \ |

* 1. 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 | \ | \ |  | \ |

1. 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。

1. 参考文献
2. 奥本海姆.信号与系统（第二版）[M].北京:电子工业出版社.2020.8.
3. 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.
4. 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.
5. 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.
6. 王贞炎.FPGA应用开发和仿真[M].北京:机械工业出版社.2017.