

## 一、 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 $\Delta t$ 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 $\Delta t$ 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 $\Delta t$ 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  $\eta$  会略大于 2，此时将 2.5 作为特征参数  $\eta$  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  $\eta$  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。

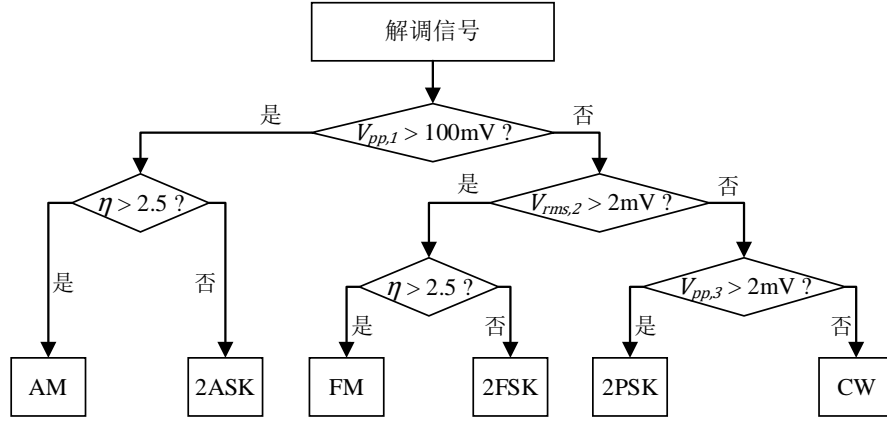


图 1 调制方式识别逻辑框图

### 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 $\Delta f_{max}$ 估计

由(3)式及其推论可知,FM 解调信号的 $V_{pp}$ 与 $\Delta f_{max}$ 成正比,因此可根据测试得到的 $V_{pp}$ 与 $\Delta f_{max}$ 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 $\Delta f$ 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 $\Delta f$ ，再结合测得的二进制码速率 $R_C$ 计算频移键控系数 $h = \Delta f / R_C$ 。