

第六章 基本的数字调制系统

思考题

- 6-1 什么是数字调制？它和模拟调制有哪些异同点？
- 6-2 什么是振幅键控？2ASK 信号的波形有什么特点？
- 6-3 OOK 信号的产生及解调方法如何？
- 6-4 OOK 信号的功率谱密度有何特点？
- 6-5 什么是移频键控？2FSK 信号的波形有何特点？
- 6-6 2FSK 信号的产生及解调方法如何？
- 6-7 相位不连续的 2FSK 信号的功率谱密度有何特点？
- 6-8 什么是绝对移相？什么是相对移相？它们有何区别？
- 6-9 2PSK 信号和 2DPSK 信号可以用哪些方法产生和解调？它们是否可以采用包络检波法解调？为什么？
- 6-10 2PSK 信号及 2DPSK 信号的功率谱密度有何特点？试将它们与 OOK 信号的功率谱密度加以比较。
- 6-11 试比较 OOK 系统、2FSK 系统、2PSK 系统以及 2DPSK 系统的抗信道加性噪声的性能。
- 6-12 试述多进制数字调制的特点。
- 6-13 什么是最小移频键控？MSK 信号具有哪些特点？
- 6-14 何谓 GMSK 调制？它与 MSK 调制有何不同？
- 6-15 什么是时频调制？时频调制信号有何特点？

习题

6-1 设某 2FSK 调制系统的码元传输速率为 1000Bd ，已调信号的载频为 1000Hz 或 2000Hz ：

- (1) 若发送数字信息为 011010，试画出相应 2FSK 信号波形；
- (2) 若发送数字信息是等可能的，试画出它的功率谱密度草图；
- (3) 试讨论这时的 2FSK 信号应选择怎样的解调器解调。

6-2 假设在 2DPSK 系统中，载波频率为 2400Hz ，码元速率为 1200Bd ，已知相对码序列为 1100010111，若发送信息符号 0 和 1 的概率分别为 0.6 和 0.4，试求 2DPSK 信号的功能率谱密度。

6-3 若相干 2PSK 和差分相干 2DPSK 系统的输入噪声功率相同，系统工作在大信噪比条件下，试计算它们达到同样误码率所需的相对功率电平 ($k = r_{\text{DPSK}} / r_{\text{PSK}}$)；若要求输入信噪比一样，则系统性能相对比 ($P_{e\text{PSK}} / P_{e\text{DPSK}}$) 为多大。并讨论以上结果。

6-4 已知码元传输速率 $R_b = 10^3\text{Bd}$ ，接收机输入噪声的双边功率谱密度 $n_0/2 = 10^{-10}\text{W/Hz}$ ，今要求误码率 $P_e = 10^{-5}$ ，试分别计算出相干 OOK、非相干 2FSK、差分相干 2DPSK 以及 2PSK 等系统所要求的输入信号功率。

6-5 设时频调制信号为四进制的四频四时的调制结构，试以传送二进制信息符号序列 11100100 为例画出波形示意图。

6-6 在二进制移相键控系统中，已知解调器输入端的信噪比 $r = 10\text{dB}$ ，试分别求出相干解调 2PSK、相干解调和差分相干解调 2DPSK 接收机的误码率。

6-7 已知数字信息为“1”时，发送信号的功率为 1kW ，信道衰减为 60dB ，接收端解调器输入的噪声功率为 10^{-4}W 。试求非相干 OOK 系统及相干 2PSK 系统的误码率。

部分习题参考答案

6-1 解：(1) 2FSK 信号波形如图 J6-1(a)所示。

(2) 2FSK 信号的功率谱密度草图如图 J6-1(b)所示。

(3) 不能采用非相干解调器解调此 2FSK 信号。因为 $f_2 - f_1 = 1000\text{Hz}$ ，与信号速率相等，两个 2ASK 信号的频谱（如图 J6-1(b)虚线所示）重叠。2FSK 非相干解调器上、下两个支路的带通滤波器不可能将两个 2ASK 信号分开。

可以用相干解调器解调此 2FSK 信号。因为此解调器上、下两支路中的低通滤波器的带宽可以小于码速率，差频 $f_2 - f_1$ 可被低通滤波器滤掉，对抽样判决无影响。

也可以采用过零检测解调器解调此 2FSK 信号。

还可以采用最佳接受机解调此 2FSK 信号，因为频率为 1000Hz 和 2000Hz 的两个正弦信号是正交的。

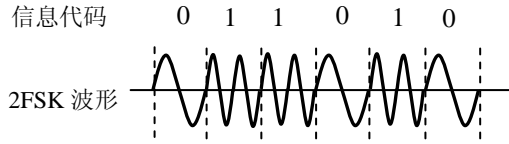


图 J6-1(a) 2FSK 信号波形

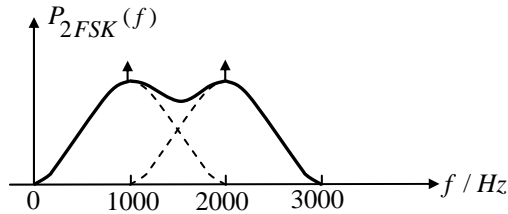


图 J6-1(b) 2FSK 信号的功率谱密度

6-2 解： 极性归零码的功率谱密度为

$$P_s(f) = f_s P(1-P)(a_1 - a_2)^2 G^2(f) + f_s^2 \sum_{m=-\infty}^{\infty} |Pa_1 + (1-p)a_2|^2 G^2(mf_s) \delta(f - mf_s) \quad (\text{公式 J6-2(a)})$$

依题意知

$$P = 0.4, \quad a_1 = 1, \quad a_2 = -1, \quad R_B = 1200 \text{ Bd}, \quad T_s = 1/1200, \quad f_c = 2400 \text{ Hz}, \quad G(f) = T_s \text{Sa}(\pi f T_s)$$

$$P_s(f) = 0.96 T_s \text{Sa}^2(\pi f T_s) + 0.04 \sum_{m=-\infty}^{\infty} \text{Sa}^2(m\pi) \delta(f - mf_s) \quad (\text{公式 J6-2(b)})$$

所以

$$= 1152 \left| \frac{\sin(\pi f / 1200)}{\pi f} \right|^2 + 0.04 \delta(f)$$

2DPSK 的功率谱密度为

$$P_e(f) = \frac{1}{4} [P_s(f + f_c) + P_s(f - f_c)]$$

$$= \frac{288}{\pi^2} \left\{ \left| \frac{\sin \left[\frac{\pi}{1200} (f + 2400) \right]}{f + 2400} \right|^2 + \left| \frac{\sin \left[\frac{\pi}{1200} (f - 2400) \right]}{f - 2400} \right|^2 \right\} + 10^{-2} [\delta(f + 2400) + \delta(f - 2400)] \quad (\text{公式 J6-2(c)})$$

6-3 解： (1) 在大信噪比下，可以用近似公式计算 2PSK 系统的误码率，即

$$P_{e2PSK} = Q(\sqrt{2r_{2PSK}}) \approx \frac{1}{2\sqrt{\pi r_{2PSK}}} e^{-r_{2PSK}} \quad (\text{公式 J6-3(a)})$$

差分相干 2DPSK 系统的误码率为

$$P_{e2DPSK} = \frac{1}{2} e^{-r_{2DPSK}} \quad (\text{公式 J6-3(b)})$$

令 $P_{e2PSK} = P_{e2DPSK}$ (公式 J6-3(c))

得 $\frac{1}{2\sqrt{\pi r_{2PSK}}} e^{-r_{2PSK}} = \frac{1}{2} e^{-r_{2DPSK}}$ (公式 J6-3(d))

解此方程, 得 $k = \frac{r_{2DPSK}}{r_{2PSK}} = \frac{\ln(\pi r_{2PSK})}{2r_{2PSK}} + 1 > 1$ (公式 J6-3(e))

(2) 当输入信噪比相同时 $P_{e2PSK} = \frac{1}{2\sqrt{\pi r}} e^{-r}$ (公式 J6-3(f))

$$P_{e2DPSK} = \frac{1}{2} e^{-r} \quad (\text{公式 J6-3(g)})$$

由此得 $\frac{P_{e2PSK}}{P_{e2DPSK}} = \frac{1}{\sqrt{\pi r}} < 1$ (公式 J6-3(h))

讨论 (1) 说明: 要达到相同的误码率, 差分相干 2DPSK 系统所需信噪比大于相干 2PSK 系统。

(2) 说明: 当信噪比相同时, 差分相干 2DPSK 系统的误码率大于相干 2PSK 系统。

6-4 解: 设 OOK、差分相干 2DPSK 以及 2PSK 的收滤波器的频率特性是带宽为 2000Hz 的理想矩形, 非相干 2FSK 接收机的两个支路带通滤波器的频率特性也是带宽为 2000Hz 的理想矩形。在此条件下, 接收机输入噪声功率为

$$N = (10^{-10} \times 2 \times 2000)W = 4 \times 10^{-7}W \quad (\text{公式 J6-4(a)})$$

(1) 相干 OOK (2ASK) 系统

由误码率公式 $P_e = Q\left[\sqrt{\frac{r}{2}}\right] = 10^{-5}$ (公式 J6-4(b))

得 $r = \frac{S}{N} = 36.13$ (公式 J6-4(c))

$$S = (36.13 \times 4 \times 10^{-7})W = 1.45 \times 10^{-5}W \quad (\text{公式 J6-4(d)})$$

(2) 非相干 2FSK 系统

由误码率公式 $P_e = \frac{1}{2} e^{-\frac{r}{2}} = 10^{-5}$ (公式 J6-4(e))

得 $r = 21.6$ (公式 J6-4(f))

$$S = (21.6 \times 4 \times 10^{-7})W = 0.86 \times 10^{-5}W \quad (\text{公式 J6-4(g)})$$

(3) 差分相干 2DPSK 系统

$$\text{由误码率公式 } P_e = \frac{1}{2} e^{-r} = 10^{-5} \quad (\text{公式 J6-4(h)})$$

$$\text{得 } r = 10.8 \quad (\text{公式 J6-4(i)})$$

$$S = (10.8 \times 4 \times 10^{-7}) W = 0.43 \times 10^{-5} W \quad (\text{公式 J6-4(j)})$$

(4) 相干 2PSK 系统

$$\text{由误码率公式 } P_e = Q(\sqrt{2r}) = 10^{-5} \quad (\text{公式 J6-4(k)})$$

$$\text{得 } r = 9.03 \quad (\text{公式 J6-4(l)})$$

$$S = (9.03 \times 4 \times 10^{-7}) W = 0.36 \times 10^{-5} W \quad (\text{公式 J6-4(m)})$$

6-5 解：在四进制的四频四时调制方式中，一个双比特代码用四个时隙、四个频率来表示，四个双比特代码 00、01、10、11 所对应的四个频率分别按如下规则编排： $f_1 f_2 f_3 f_4$ 、 $f_2 f_3 f_4 f_1$ 、 $f_3 f_4 f_1 f_2$ 、 $f_4 f_1 f_2 f_3$ 。二进制信号及四频四时已调信号波形如图 J6-5 所示，图中设 $f_1 = R_b$ 、 $f_2 = 2R_b$ 、 $f_3 = 3R_b$ 、 $f_4 = 4R_b$ 。

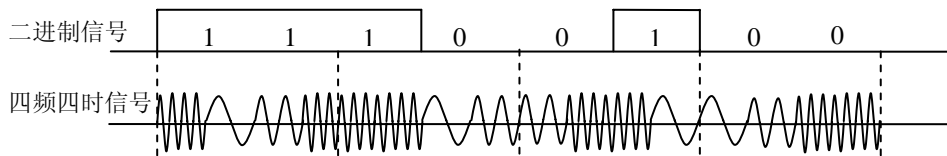


图 J6-5 二进制信号及四频四时已调信号波形

6-6 解：相干解调 2PSK 接收机的误码率为

$$P_e = Q(\sqrt{2r}) \approx \frac{1}{\sqrt{4\pi r}} e^{-r} = \frac{1}{\sqrt{4 \times 3.14 \times 10}} e^{-10} = 4.04 \times 10^{-6} \quad (\text{公式 J6-6(a)})$$

相干解调 2DPSK 接收机误码率为

$$P_e = 2Q(\sqrt{2r}) = 8.08 \times 10^{-6} \quad (\text{公式 J6-6(b)})$$

差分相干解调 2DPSK 接收机误码率为

$$P_e = \frac{1}{2} e^{-r} = \frac{1}{2} e^{-10} = 2.27 \times 10^{-5} \quad (\text{公式 J6-6(c)})$$

6-7 解：接收机解调器输入的信号功率为

$$S = \frac{1000}{10^6} W = 10^{-3} W \quad (\text{公式 J6-7(a)})$$

解调器输入信噪比为

$$r = \frac{10^{-3}}{10^{-4}} = 10 \quad (\text{公式 J6-7(b)})$$

OOK 系统的误码率为

$$P_e = \frac{1}{2}e^{-r/4} = \frac{1}{2}e^{-2.5} = 4.10 \times 10^{-2} \quad (\text{公式 J6-7(c)})$$

2PSK 系统的误码率为

$$P_e = Q(\sqrt{2r}) \approx \frac{1}{\sqrt{4\pi r}}e^{-r} = \frac{1}{\sqrt{4 \times 3.14 \times 10}}e^{-10} = 4.04 \times 10^{-6} \quad (\text{公式 J6-7(d)})$$