

第六章

思考题:

6-1 什么是数字调制?它与模拟调制相比有哪些异同点?

答: 相同点: 调制原理相同, 调制目的相同, 载波(正弦波)相同;

不同点: 调制信号不同(前者为数字基带信号;后者为模拟基带信号), 已调载波的参量取值不同(前者离散取值, 后者连续取值)。

6-2 在 2ASK 已调信号的功率谱中, 能否提取出想干解调所需的同步载波信息?

答: 可以, 应在 2ASK 已调信号的功率谱中含有离散谱和连续谱, 其中离散谱中含有相干解调所需载波的频率信息, 因此离散谱可作为导频信号, 有助于接收端方便地提取载波信号, 实现相干解调。

6-3 对相位连续的 2FSK 信号为什么要求数字基带信号 $s(t)$ 为双极性非归零序列。

答: 数字基带信号 $s(t)$ 控制压控振荡器的振荡频率产生移频键控信号。压控振荡器的中心振荡频率 $f_c = \frac{1}{2}(f_1 + f_2)$, 要求以 f_c 为中心频率产生对应的 f_1 、 f_2 , 所以数字基带信号 $s(t)$ 应为双极性非归零序列。

6-4 引入差分移相键控信号 2DPSK 的目的是什么?

答: 因为 2PSK 信号采用相干解调时, 接收机内由锁相环产生的本地载波初相与 2PSK 信号携带的的发端载波初相可能相同、也可能相差 π , 状态随机, 这种特性称作相位模糊。若本地载波初相与发端载波初相相同时, 经解调运算, 判决输出与发送基带信号 $s(t)$ 一致; 若本地载波初相与发端载波初相相差 π 时, 判决输出为 $s(t)$ 的反码, 产生错判, 这是不允许的。为了解决此问题, 引入差分移相键控信号 2DPSK。

6-5 什么是相移键控? 什么是相对相移键控? 它们有何区别?

答: 相移键控就是用载波的相位直接表示码元; 相对移相就是用邻码元的相对载波相位值表示数字信息。相对移相信号可以看作是是把数字信息序列绝对码变换成相对码, 然后根据相对码进行绝对移相而成。

6-6 什么是频移键控? 2FSK 信号的解调方法有哪些?

答: 频移键控是利用载波的频率变化来传递数字信息。在 2FSK 中, 载波的频率随二进制基带信号在 f_1 和 f_2 两个频率点变化。2FSK 信号的解调方法有非相干解调、相干解调和匹配滤波器三种。常用的 2FSK 信号非相干解调方法有包络检波法、过零检测法。

6-7 2PSK 信号和 2DPSK 信号的功率谱及传输带宽有何特点? 它们与 2ASK 的有何异同?

答: 2PSK 信号和 2DPSK 信号的功率谱完全相同, 频谱特性与 2ASK 的十分相似, 功率谱密度同样有离散谱和连续谱组成, 区别仅在于当 $P=0.5$ 时, 其谱中无离散谱。带宽也是

基带信号带宽的 2 倍。

6-8 2DPSK 与 2PSK 相比有哪些优势？

答：在相同的信噪比情况下，采用相干解调方式，2DPSK 与 2PSK 的误码率减少一半，而且 2DPSK 还可以采用非相干解调方式。

6-9 在电话信道中传输数据，当数据速率比较高的时候，一般采用相位调制而不采用振幅调制或频率调制，为什么？

答：因为相位调制系统的抗噪性能优于频率调制系统和振幅调制系统。当数据速率比较高的时候，占用的信道带宽大，接收机信噪比小，必须采用抗噪性能好的相位调制方式才能满足误码率要求。另外，当数据速率高时，电话信道不可能提供足够宽的信道传输 2FSK 信号，因此，采用频率调制时，电话信道只能传输低速率数据。

6-10 什么是最佳接收机？什么是匹配滤波器？

答：根据数字信号自身特点和环境噪声的统计变化规律，寻找与信号匹配的接收系统结构，保证还原信号在输出时刻抵抗噪声信号的能力最强，从而达到最佳的还原性能。这种接收机称为最佳接收机，匹配滤波器是实现方法之一，也称为最佳线性滤波器，是一种在输出时刻保证输出信噪比最大的线性滤波器。

6-11 二进制数字调制系统的误码率与哪些因素有关？

答：与其调制方式、解调方式和信噪比有关。

6-12 什么是多进制数字调制？与二进制数字调制相比，多进制数字调制有哪些优缺点？

答：采用多种基带波形的数字调制称为多进制数字调制，优缺点为：1，在相同传码率时，多进制比二进制传输的信息量大；2，在相同传信率时，多进制比二进制所需要的码率低，带宽窄；3，在相同噪声情况下，多进制的抗噪声性能不如二进制好。

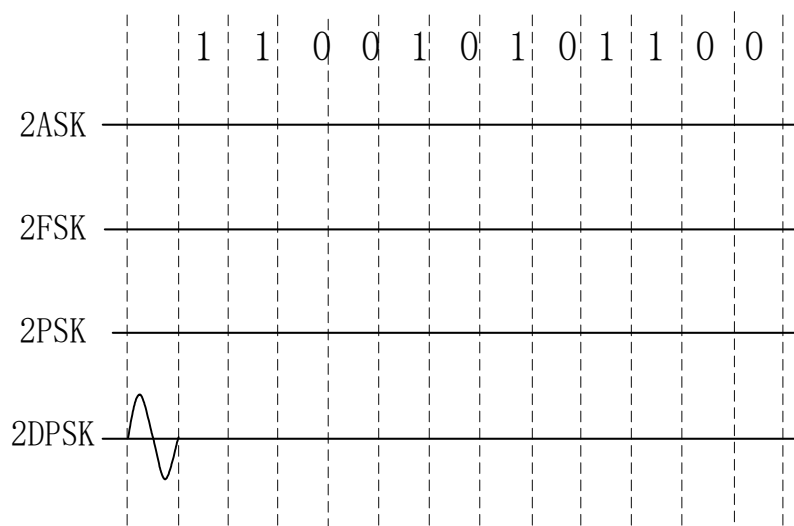
6-13 四进制调制是如何做到减小已调波信号带宽，提高频带利用率的？

答：四进制调制实质上是针对一路快速二进制信号，将其转换成两路低速二进制信号，以并行方式同时调制再叠加，达到减小已调波信号带宽，提高频带利用率的目的。

习题：

6-1 设发送数字信息为 110010101100，试分别画出 2ASK、2FSK、2PSK 及 2DPSK 信号的波形示意图。

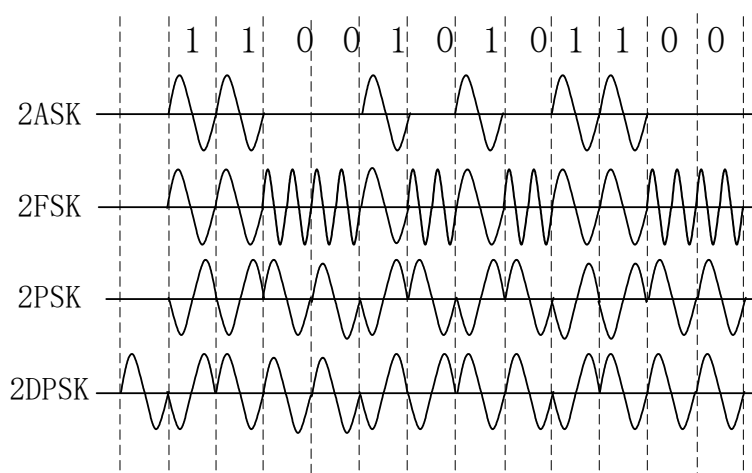
(对 2FSK 信号，“0”对应 $T_s=2T_c$ ，“1”对应 $T_s=T_c$ ；其余信号 $T_s=T_c$ ，其中 T_s 为码元周期， T_c 为载波周期；对 2DPSK 信号， $\Delta\varphi=0$ 代表“0”、 $\Delta\varphi=180^\circ$ 代表“1”，参考相位为 0；对 2PSK 信号， $\varphi=0$ 代表“0”、 $\varphi=180^\circ$ 代表“1”。)



题图 6-1

解：

2ASK、2FSK、2PSK 及 2DPSK 信号的波形示意图如解图 6-1 所示。



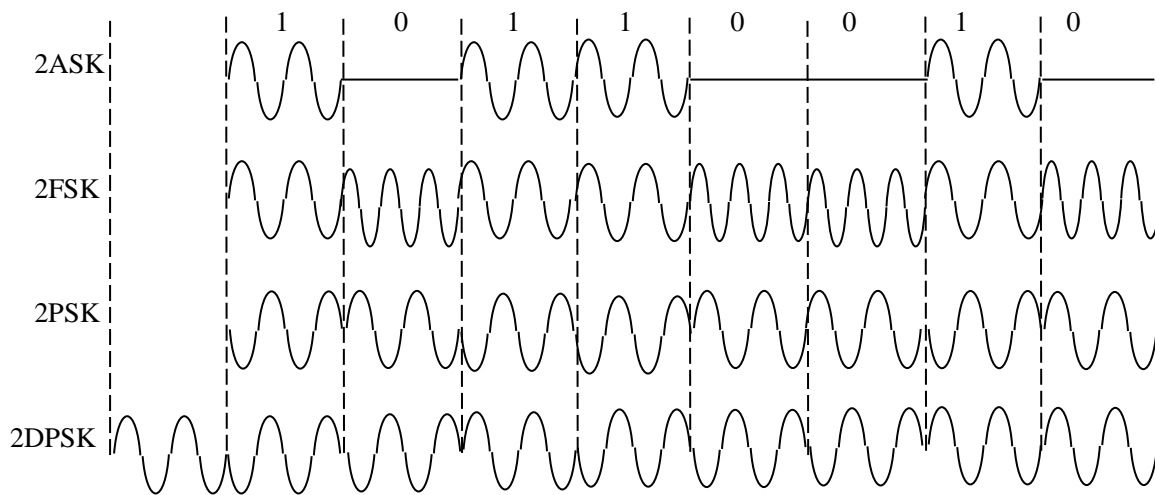
解图 6-1

6-2 已知二进制序列为 10110010，画出以下情况的 2ASK、2FSK、2PSK 和 2DPSK 波形：

- (1) 载频为码元速率的 2 倍；
- (2) 载频为码元速率的 1.5 倍。

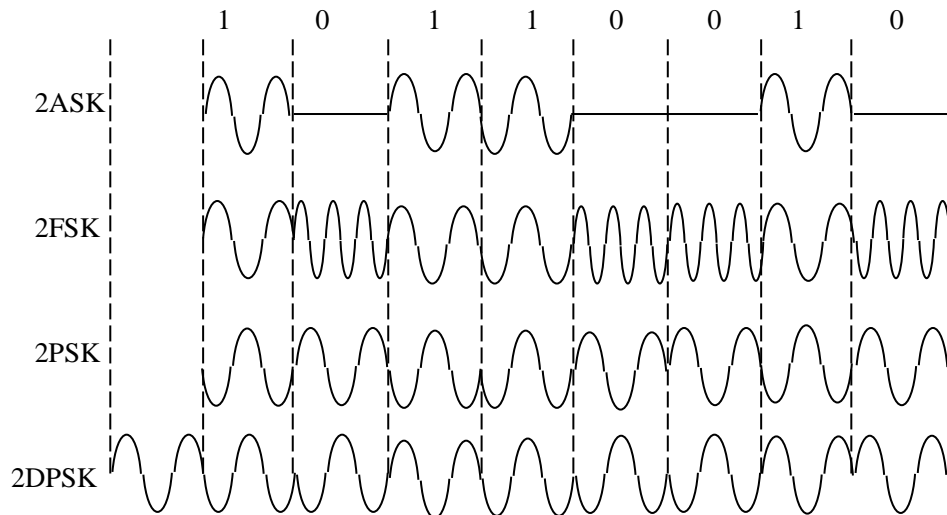
解：对 2DPSK 信号，设 $\Delta\varphi = 0$ 代表“0”、 $\Delta\varphi = 180^\circ$ 代表“1”，参考相位为 0；对 2PSK 信号， $\varphi = 0$ 代表“0”、 $\varphi = 180^\circ$ 代表“1”。)

(1) 因为载频为码元速率的 2 倍，所以码元宽度是载波周期的 2 倍。见解图 6-2 (a)



解图 6-2 (a)

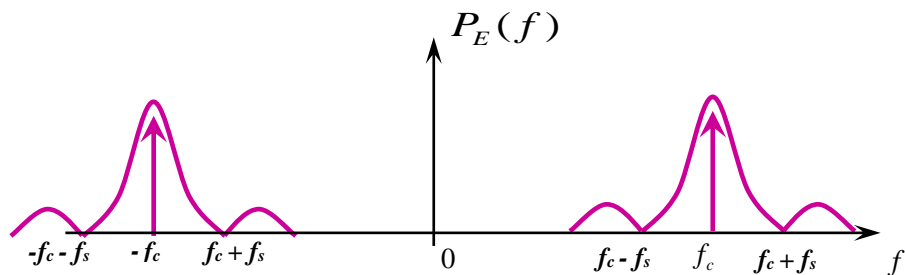
(2) 因为载频为码元速率的 1.5 倍，所以码元宽度是载波周期的 1.5 倍。解图 6-2 (b)



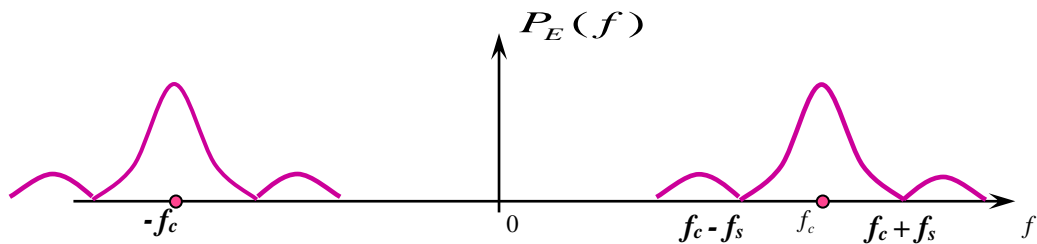
解图 6-2 (b)

6-3 设二进制序列的 0、1 等概率出现，且相互独立，画出载频为 f_c 的 2ASK 和 2PSK 信号频谱，比较两种信号的特性。

解：载频为 f_c 的 2ASK 和 2PSK 信号频谱见解图 6-3(a)和 (b)



解图 6-3(a)



解图 6-3(b)

比较:

不同---2ASK 信号频谱的频谱中包含有离散谱和连续谱, 而 2PSK 信号频谱中只包含有连续谱, 原因在于 2ASK 基带信号采用的是单极性非归零码, 而 2PSK 基带信号采用的是双极性非归零码。

相同---两种已调信号的带宽均为基带信号带宽的 2 倍, 二者均为线性调制。

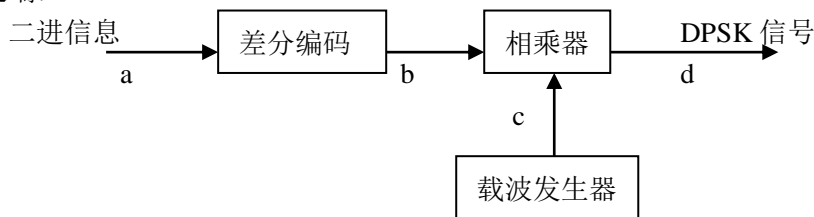
6.4 已知二进制序列为 1100100010, 采用 2DPSK 调制:

(1) 采用相对码调制方案, 设计发送端方框图, 列出序列变换过程及码元相位, 画出已调信号波形 (载频和码元速率相同);

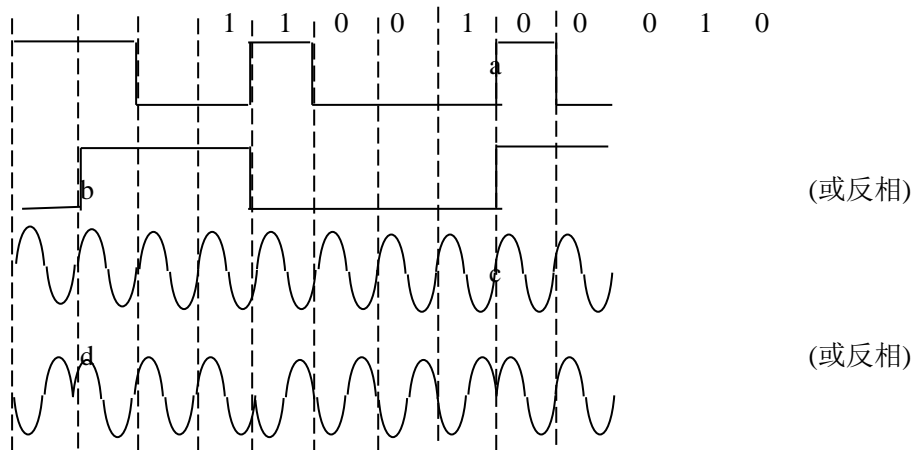
(2) 采用差分相干接收方案, 画出接收机各模块的输出波形 (假设信道不限带)。

解: (1) 发送端方框图见解图 6-4 (a), 序列变换过程、码元相位以及波形图见解图 6-4 (b):

发送端:

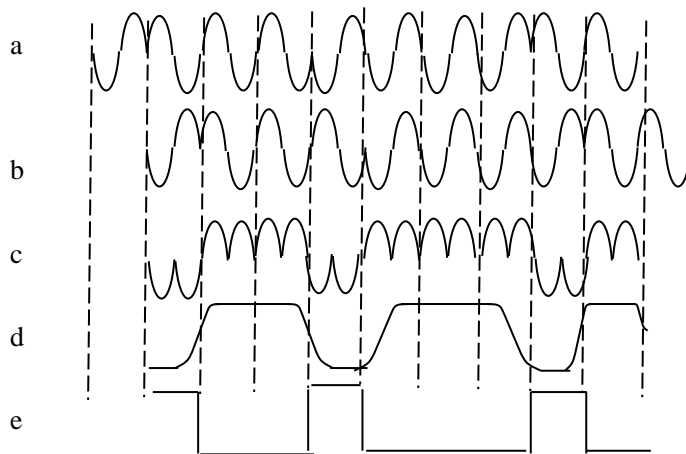
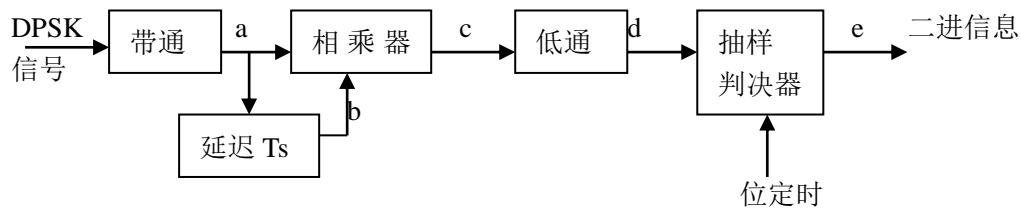


解图 6-4 (a)



解图 6-4 (b)

(2) 差分相干解调框图及各模块的输出波形见解图 6-4 (c):



解图 6-4 (c)

6-5 设 2ASK 系统的码元传输速率为 1000B, 载波信号为 $A\cos(4\pi \times 10^6 t)$;

(1) 试问每个码元中包含多少个载波周期?

(2) 求 2ASK 信号的第一零点带宽。

解: (1) 由题意知 $f_s = (4\pi \times 10^6) / 2\pi = 2 \times 10^6 \text{ (Hz)}$

$$R_B = 1000\text{B}$$

故每个码元中包含 2000 个载波周期。

(2) 2ASK 信号的第一零点带宽为

$$B = 2/T_s = 2R_B = 2000 \text{ (Hz)}$$

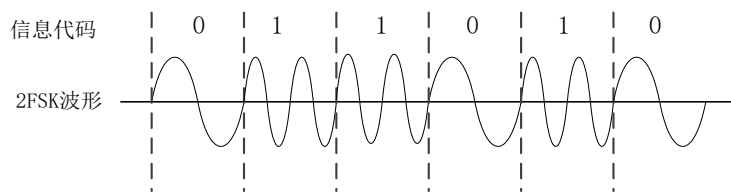
6-6 设某 2FSK 调制系统的码元传输速率为 1000Bd, 已调信号的载波为 1000Hz 或 2000Hz。

(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概的, 试画出它的功率谱密度草图。

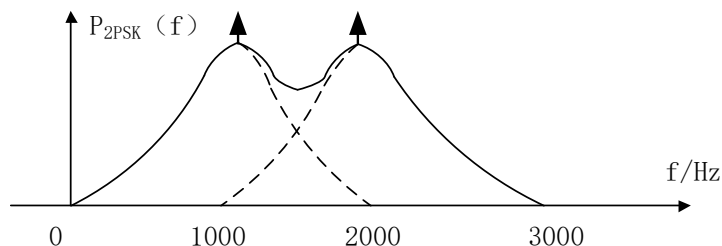
(3) 试讨论这时的 2FSK 信号应选择怎样的解调器解调。

解 (1) 2FSK 信号波形图见解图 6-5 (a):



解图 6-5 (a)

(2) FSK 信号的功率谱密度草图见解图 6-5 (b):



解图 6-5 (b)

(3) 不能采用非相干解调器解调, 因为 $f_2 - f_1 = 1000$ Hz, 与信息速率相等, 两个 2ASK 信号的频谱重叠。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。上下两个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法。还可以采用最佳接收机解调此 2FSK 信号。

6-7 已知 2FSK 信号的两个频率 $f_1=980$ Hz, $f_2=2180$ Hz, 码元速率 $R_b=300$ Bd, 信道有效带宽为 3000 Hz, 信道输出端的信噪比为 6 dB。试求:

- (1) 2FSK 信号的带宽;
- (2) 非相干解调时的误比特率;
- (3) 相干解调时的误比特率。

解: (1) 2FSK 信号的带宽为

$$B_s = |f_2 - f_1| + 2R_b = (2180 - 980 + 2 \times 300) \text{ Hz} = 1800 \text{ Hz}$$

- (2) 设非相干接收机中带通滤波器 BPF_1 和 BPF_2 的频率特性为理想矩形, 且带宽为

$$B_F = 2R_B = 600 \text{ Hz}$$

信道带宽为 3000 Hz, 是接收机带通滤波器带宽的 5 倍, 所以接收机带通滤波器输出信噪比是信道输出信噪比的 5 倍。当信道输出信噪比为 6 dB 时, 带通滤波器输出信噪比为

$$r = 5 \times 10^{0.6} = 5 \times 4 = 20$$

2FSK 非相干接收机的误比特率为

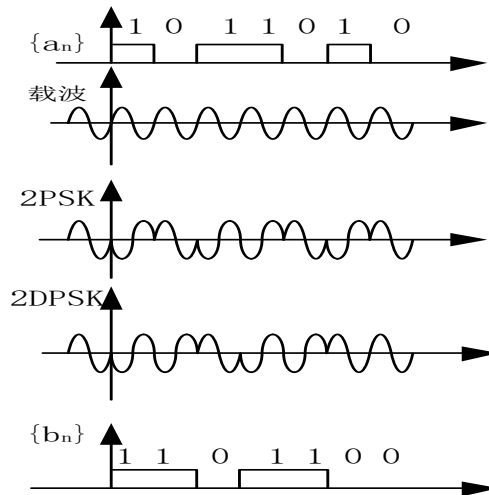
$$P_b = \frac{1}{2} e^{-r/2} = \frac{1}{2} e^{-10} = 2.27 \times 10^{-5}$$

- (3) 同理可得 2FSK 相干接收机的误比特率为

$$P_b = Q(\sqrt{r}) = Q(\sqrt{20}) = Q(4.47) = 3.93 \times 10^{-6}$$

6-8 已知数字信息 $\{a_n\}=1011010$ ，码元速率为 1200 波特，载波频率为 1200Hz，请分别画出 2PSK、2DPSK 和相对码 $\{b_n\}$ 的波形。

解：各波形见解图 6-6：



解图 6-6

6-9 用 2ASK 传送二进制数字信息，已知传码率为 $R_s=2 \times 10^6$ Baud，接收端输入信号的振幅 $a=20 \mu V$ ，输入高斯白噪声的单边功率谱密度为 $n_0=2 \times 10^{-18} W/Hz$ ，试求相干解调和非相干解调时系统的误码率。

$$\text{解： } r = \frac{a^2}{2\sigma_n^2} = \frac{a^2}{2n_0B} = \frac{a^2}{4n_0R_s} = \frac{(20 \times 10^{-6})^2}{4 \times 2 \times 10^{-18} \times 2 \times 10^6} = 25$$

相干解调：

$$P_e = \frac{1}{2} \operatorname{erfc}(\sqrt{r}/2) = \frac{1}{2} \operatorname{erfc}(2.5) = 2.05 \times 10^{-4}$$

非相干解调：

$$P_e \approx \frac{1}{2} \exp(-r/4) \approx 9.65 \times 10^{-4}$$

6-10 有一 2FSK 系统，传码率为 2×10^6 Baud，已知 $f_1=10MHz$ ， $f_2=14MHz$ ，接收端输入信号的振幅 $a=20 \mu V$ ，输入高斯白噪声的单边功率谱密度 $n_0=2 \times 10^{-18} W/Hz$ ，试求：

- (1) 2FSK 信号的带宽。
- (2) 系统相干解调和非相干解调时的误码率。

$$\text{解 (1) } B_{2FSK} = |f_2 - f_1| + 2f_s = 8MHz$$

$$(2) \quad r = \frac{a^2}{2\sigma_n^2} = \frac{a^2}{4n_0R_s} = \frac{(20 \times 10^{-6})^2}{4 \times 2 \times 10^{-18} \times 2 \times 10^6} = 25$$

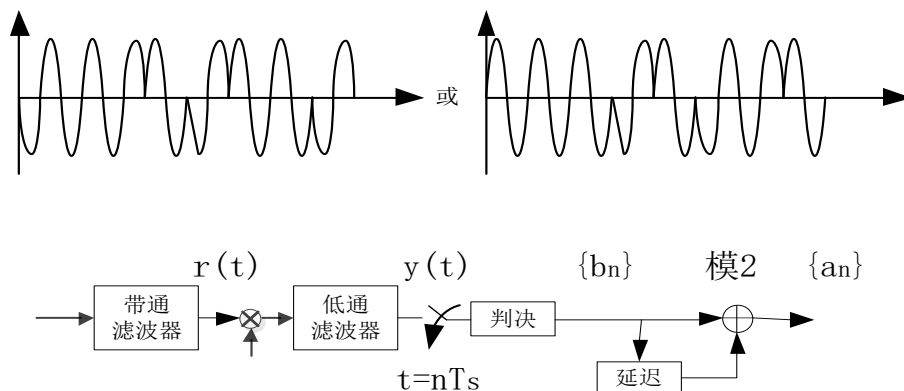
相干解调: $P_e = \frac{1}{2} \operatorname{erfc}\left(\sqrt{\frac{r}{2}}\right) \approx 3.5 \times 10^{-7}$

非相干解调: $P_e \approx \frac{1}{2} \exp\left(-\frac{r}{2}\right) \approx 1.86 \times 10^{-6}$

6-11 二进制绝对码元序列 10011101, 码元速率为 1200Baud, 载频 $f_c = 1200 \text{ Hz}$, 画出该信号 2DPSK 已调信号波形, 若采用差分相干接收, 试画出其原理框图。

解: 相对码为: 00010110 或 11101001

2DPSK 的信号波形及原理框图见解图 6-7:



解图 6-7

6-12 按接收机难易程度及误比特率为 10^{-4} 时所需的最低峰值信号功率将 2ASK、2FSK 和 2PSK 进行比较、排序。

解:

按接收机难易程度分:

易 2ASK > 2FSK > 2PSK 难

按误比特率为 10^{-4} 时所需的最低峰值信号功率

小 2PSK < 2FSK = 2ASK 大

6-13 在二进制移相键控系统中, 已知传码率为 $2 \times 10^6 \text{ Baud}$, 解调器输入信号的振幅 $a = 20 \mu \text{ V}$, 高斯白噪声的单边功率谱密度 $n_0 = 2 \times 10^{-18} \text{ W/Hz}$ 。试分别求出相干解调 2PSK、相干解调一码变换和差分相干解调 2DPSK 信号时的系统误码率。

解: $r = \frac{a^2}{2\sigma_n^2} = \frac{a^2}{4n_0R_s} = \frac{(20 \times 10^{-6})^2}{4 \times 2 \times 10^{-18} \times 2 \times 10^6} = 25$

2PSK 相干解调: $P_e = \frac{1}{2} \operatorname{erfc}(\sqrt{r}) = \frac{1}{2} \operatorname{erfc}(5) = 7.5 \times 10^{-13}$

相干解调 2DPSK: $P_e = \operatorname{erfc}(\sqrt{r}) = \operatorname{erfc}(5) = 1.5 \times 10^{-12}$

差分相干解调 2DPSK: $P_e = \frac{1}{2} \exp(-r) = \frac{1}{2} \exp(-25) \approx 6.94 \times 10^{-12}$

6-14 已知码元传输速率 $R_s=10^3$ Baud, 接收机输入噪声的双边功率谱密度 $n_0/2=10^{-10}$ W/Hz, 今要求误码率 $P_e=5 \times 10^{-5}$ 。试分别计算出相干 2ASK、非相干 2FSK、差分相干 2DPSK 以及 2PSK 系统所要求的解调器输入端的信号功率。

解: 1) 相干 2ASK, 由 $P_e = \frac{1}{2} \operatorname{erfc}\left(\sqrt{\frac{r}{4}}\right) = 5 \times 10^{-5}$

求得 $r = 30.25$

再由 $r = \frac{a^2}{2\sigma_n^2} = \frac{P_i}{n_0 B_{\text{ASK}}} = \frac{P_i}{n_0 2R_s}$

求得

$$\begin{aligned} P_i &= rn_0 2R_s \\ &= 30.25 \times 2 \times 10^{-10} \times 2 \times 10^3 = 12.1 \text{ } (\mu\text{W}) \end{aligned}$$

2) 非相干 2FSK, 由 $P_e = \frac{1}{2} \exp(-r/2) = 5 \times 10^{-5}$

求得 $r = 18.42$

再由 $r = \frac{a^2}{2\sigma_n^2} = \frac{P_i}{n_0 2R_s}$

求得

$$\begin{aligned} P_i &= rn_0 2R_s \\ &= 18.42 \times 2 \times 10^{-10} \times 2 \times 10^3 = 7.37 \text{ } (\mu\text{W}) \end{aligned}$$

3) 差分相干 2DPSK, 由 $P_e = \frac{1}{2} \exp(-r) = 5 \times 10^{-5}$

求得 $r = 9.21$

再由 $r = \frac{a^2}{2\sigma_n^2} = \frac{P_i}{n_0 2R_s}$

求得

$$\begin{aligned} P_i &= rn_0 2R_s \\ &= 9.21 \times 2 \times 10^{-10} \times 2 \times 10^3 = 3.68 \text{ } (\mu\text{W}) \end{aligned}$$

4) 2PSK, 由 $P_e = \frac{1}{2} \operatorname{erfc}(\sqrt{r}) = 5 \times 10^{-5}$

求得 $r = 7.56$

再由 $r = \frac{a^2}{2\sigma_n^2} = \frac{P_i}{n_0 2R_s}$

求得

$$P_i = r n_0 2 R_s$$

$$= 7.56 \times 2 \times 10^{-10} \times 2 \times 10^3 = 3.03 (\mu W)$$

6-15 已知电话信道可用的信号传输频带为 600~3000 Hz，取载频为 1800 Hz，试说明：

- (1) 采用 $\alpha=1$ 升余弦滚降基带信号时，QPSK 调制可以传输 2400 bit/s 数据；
- (2) 采用 $\alpha=0.5$ 升余弦滚降基带信号时，8PSK 调制可以传输 4800 bit/s 数据；
- (3) 画出(1)和(2)传输系统的频率特性草图。

解：(1) 信道带宽为

$$B_c = (3000 - 600) \text{ Hz} = 2400 \text{ Hz}$$

$\alpha=1$ 时 QPSK 系统的频带利用率

$$\eta_b = \frac{\log M}{1+\alpha} = \frac{\log 4}{1+1} \text{ bps/Hz} = 1 \text{ bps/Hz}$$

数据传输速率

$$R_b = B_c \cdot \eta_b = 2400 \times 1 \text{ bit/s} = 2400 \text{ bit/s}$$

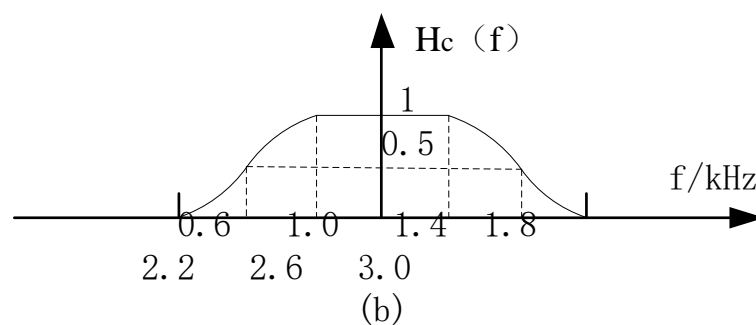
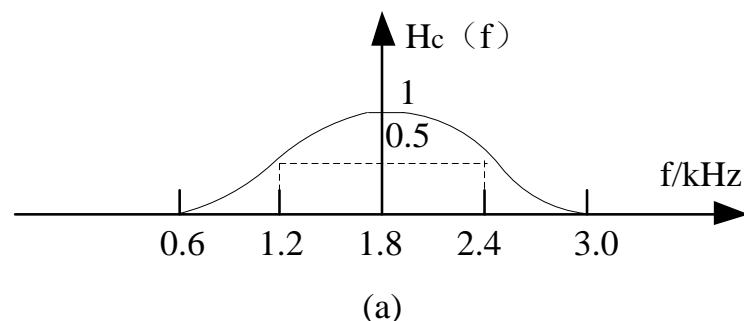
(2) $\alpha=0.5$ 时 8PSK 系统的频带利用率

$$\eta_b = \frac{\log_2 8}{1+0.5} = 2 \text{ bps/Hz}$$

数据传输速率

$$R_b = B_c \cdot \eta_b = 2400 \times 2 \text{ bit/s} = 4800 \text{ bit/s}$$

(3) (1) 和 (2) 传输系统的频率特性草图如解图 6-8(a) 和 (b) 所示。



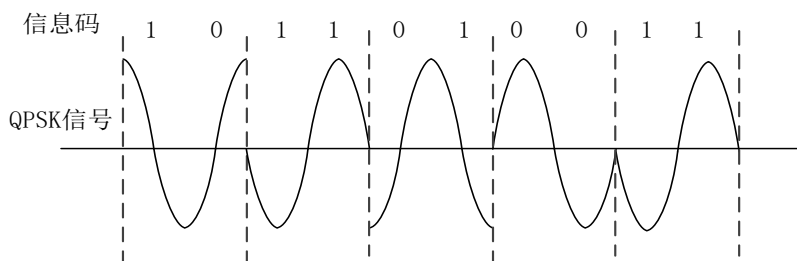
解图 6-8

6-16 待传送二元数字序列 $\{a_k\} = 1011010011$ ：

(1) 试画出 QPSK 信号波形。假定 $f_c=R_b=1/T_s$ ，4 种双比特码 00, 10, 11, 01 分别用相位偏移 $0, \pi/2, \pi, 3\pi/2$ 的振荡波形表示；

(2) 给出 QPSK 信号表达式和调制器原理方框图。

解：(1) QPSK 信号波形如解图 6-9(a) 所示。

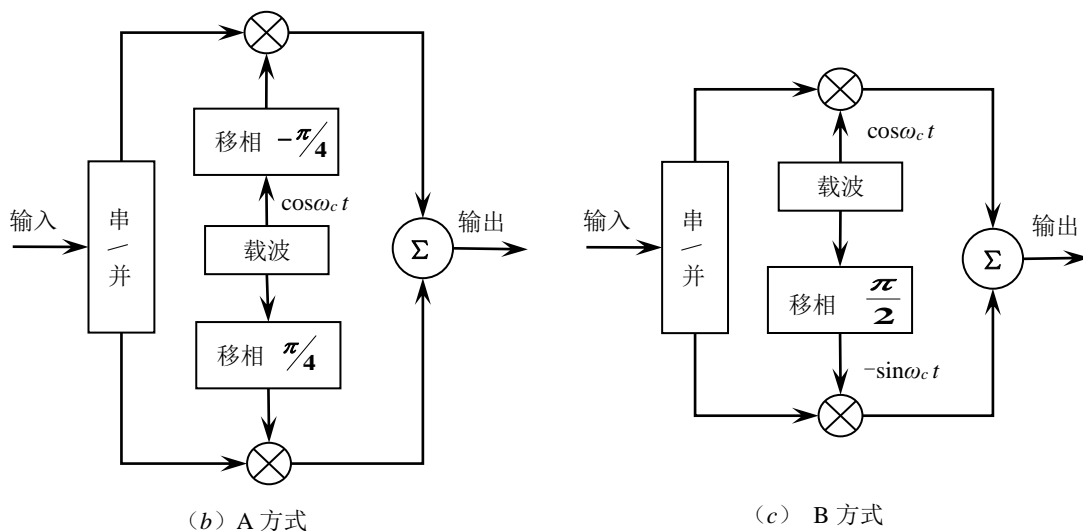


解图 6-9(a)

(2) QPSK 信号的表达式为

$$e_{\text{QPSK}}(t) = \cos\varphi_k \cos\omega_c t + \sin\varphi_k \sin\omega_c t = \cos(\omega_c t - \varphi_k)$$

QPSK 调制器原理方框图如解图 6-9(b) 和 (c) 所示：



解图 6-9

6-17 采用 QPSK 调制传输 4800bit/s 数据：

(1) 最小理论带宽是多少？

(2) 若传输带宽不变，而数据率加倍，则调制方式应作如何改变？

解：(1) 4PSK 系统的最大频带利用率为

$$\eta_b = \log_2 M = (\log_2 4) \text{bps/Hz} = 2 \text{bps/Hz}$$

所以传输 4800bit/s 数据时最小理论带宽为

$$B_c = \frac{R_b}{\eta_b} = \frac{4800}{2} \text{ Hz} = 2400 \text{ Hz}$$

(2) 若传输带宽不变，而数据速率加倍，则系统的频带利用率 η_b 也应加倍，即

$$\eta_b = \log_2 M = 4 \text{ bps/Hz}$$

由此可得 $M = 2^4 = 16$ ，即应采取 16 进制的线性调制方式。

第七章

思考题:

7-1 什么是 QAM? 如何进行调制和解调?

答: QAM 即正交振幅调制, 是一种频谱利用率很高的调制方式。

调制原理: 输入的二进制序列经过串/并变换为输出速率减半的两路并行序列, 再分别经过 2 电平到 L 电平的变换, 形成 L 电平 (L 进制) 的基带信号。为了抑制已调信号的带外辐射, 该 L 电平的基带信号还要经过预调制低通滤波器, 形成 $X(t)$ 和 $Y(t)$, 再分别对同相载波和正交载波相乘。最后将两路信号相加即可得到 QAM 信号。

解调原理: 解调器输入信号与本地提取的两个正交载波相乘后, 经过低通滤波输出两路多电平基带信号 $X(t)$ 和 $Y(t)$ 。多电平判决器对多电平基带信号进行判决和检测, 再经 L 电平到 2 电平转换和并/串变换器最终输出二进制数据。

7-2 为什么 16QAM 系统的抗干扰能力优于 16PSK?

答: 当 $M=16$ 时, $d_{16QAM}=0.47$, 而 $d_{16PSK}=0.39$, $d_{16PSK} < d_{16QAM}$, 这表明, 16QAM 系统的抗干扰能力优于 16PSK。

7-3 试讨论 MQAM 和 MPSK 的抗噪性能孰优孰劣。

答: 当 $M=4$ 是, QAM 和 PSK 的误码率相同, 但是当 $M>4$ 时, QAM 调制系统的误码率要好于 PSK 调制系统。

7-4 试讨论不同滚降系数 α 和进制数对频带利用率的影响。

答: α 的值越小, 即越接近理想低通特性, 则 η_B 越大; 进制数越大, 则 η_B 值越大。其中 16QAM 的频带利用率最高

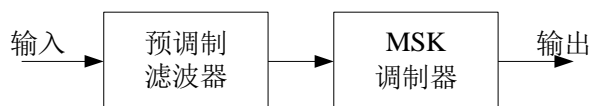
7-5 MSK 是什么? 其信号有何特点?

答: MSK 即最小频移键控, 是恒定包络连续相位频率调制。MSK 信号具有以下特点:

- (1) MSK 信号是恒定包络信号;
- (2) 在码元转换时刻, 信号的相位是连续的, 以载波相位为基准的信号相位在一个码元期间内线性地变化 $\pm \frac{\pi}{2}$;
- (3) 在一个码元期间内, 信号应包括四分之一载波周期的整数倍, 信号的频率偏移等于 $\frac{1}{4T_s}$, 相应的调制指数 $h=0.5$ 。

7-6 GMSK 是什么? 它的提出目的是什么? 如何实现 GMSK?

解: GMSK 即高斯最小频移键控, 因为在移动通信中对信号带外辐射功率的限制十分严格, 一般要求必须衰减 70 dB 以上, MSK 信号不能满足这样的要求, GMSK 就是针对上述要求提出来的。GMSK 调制方式能满足移动通信环境下对邻道干扰的严格要求。其调制原理图如思考题解图 7-1。



思考题解图 7-1

7-7 OFDM 是什么？在频域有何特点？如何实现 OFDM？

解：OFDM 即正交频分复用；

特点：（1）与一般的频分复用（FDM）技术不同，在 OFDM 系统中各子信道在时间上互相正交，在频率上互相重叠。采用这种方式，OFDM 系统比 FDM 节省很多的带宽；

（2）各路子载波的调制制度可以不同，按照各个子载波所处频段的信道特性采用不同的调制制度，并且可以随信道特性的变化而改变，具有很大的灵活性。

OFDM 技术的主要思想是将指配的信道分成许多正交子信道，在每个子信道上进行窄带调制和传输，信号带宽小于信道的相关带宽。OFDM 单个用户的信息流串 / 并转化为多个低速率码流（100Hz ~ 50kHz），每个码流用一个载波发送。

7-8 试说明 OFDM 子载频正交的条件是什么。

答：要求最小子载频间隔为 $\Delta f_{\min} = 1/T_B$ ，其中 T_B 为码元持续时间。

7-9 简述扩频通信的特点

答：（1）很强的抗干扰能力；（2）可进行多址通信；（3）由于扩频系统将传送的信息扩展到很宽的频带上去，其功率谱密度随频谱的展宽而降低，甚至可以将信号淹没在噪声中。因此，其保密性很强；（4）利用扩频所用的扩频码的相关特性来达到抗多径干扰的目标，从而具有很强的抗多径能力；（5）具有低功率密度谱的特点；（6）适合数字话音和数据传输。

7-10 扩频序列的捕捉过程是怎样的？

答：扩频序列的捕捉是指接收机在开始接收发送来的扩频信号时，调整 and 选择接收机的本地扩频序列相位，使它与发送过来的扩频序列相位保持一致。扩频序列的捕捉过程也就是接收机捕捉发送过来的扩频序列相位的过程，又叫扩频序列的初始同步。

7-11 简述跳频扩频的基本特征。

答：跳频扩频的基本特征是通信信号的载频在预定的频率集上改变或者跳转。

7-12 一个 n 级的线性移存器可能产生的最长周期为多少？给定一个 n 级的移存器，能否产生周期最长的移存器序列与什么因素有关？

答：一个 n 级的线性移存器可能产生的最长周期为 $2^n - 1$ 。给定一个 n 级的移存器，能否产生周期最长的移存器序列，与反馈线的抽头系数 $\{c_i\}$ 的位置有关。

7-13 什么样的多项式 $f(x)$ 称为本原多项式？

答：若一个 n 次的多项式 $f(x)$ 满足下列条件：

- (1) $f(x)$ 为既约多项式。
- (2) $f(x)$ 可整除 $(x^m + 1)$ ， $m = 2^n - 1$ 。
- (3) $f(x)$ 除不尽 $(x^q + 1)$ ， $q < m$ 。

则称 $f(x)$ 为本原多项式。

7-14 简述如何构成 Gold 序列。

答：Gold 序列是在 m 序列基础上提出并分析的一种特性较好的伪随机序列，它是由两个码长相等、码时钟速率相同的 m 序列优选对通过模 2 相加而构成的。

习题：

7-1 试证明在等概率出现条件下 16 信号的最大功率和平均功率之比为 1.8，即 2.55 dB。

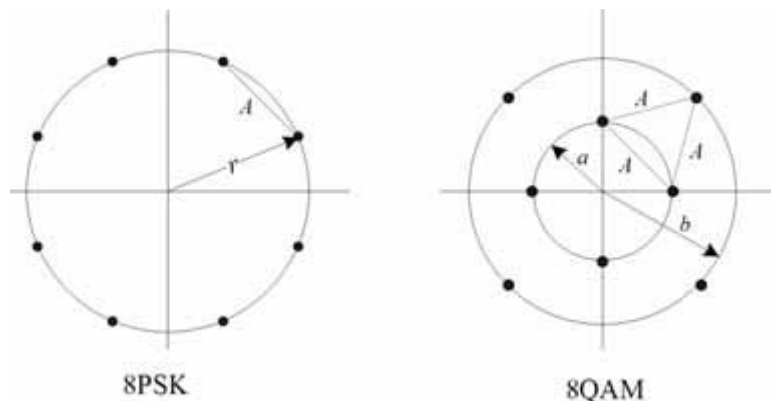
证明：设最大振幅为 $3A$ ，则相邻点的最小距离为 $\sqrt{2}A$ ，

故 16QAM 的最大功率和平均功率之比为：

$$\frac{4 \times (3A)^2}{A^2 + (3A)^2 + 2 \times (\sqrt{5}A)^2} = 1.8 = 2.55 \text{ dB}$$

得证。

7-2 8PSK 及 8QAM 的星座图如题图 7-1 所示



题图 7-1

(1) 给定 A ，求 8PSK 和 8QAM 星座图中圆的半径 r 、 a 、 b ；

(2) 给定 A ，假设星座点等概出现，求 8PSK 和 8QAM 各自的平均发送功率。

解：(1) 对于 8PSK， $A = 2r \sin \frac{\pi}{8}$ ，因此 $r = \frac{A}{2 \sin \frac{\pi}{8}} = 1.3066A$

于 8QAM，可列出方程：

$$\begin{cases} A^2 = a^2 + a^2 \\ A^2 = a^2 + b^2 - 2ab \cos \frac{\pi}{4} \end{cases}$$

解得

$$\begin{cases} a = \frac{A}{\sqrt{2}} = 0.7071A \\ b = \frac{\sqrt{3}+1}{2} A = 1.366A \end{cases}$$

(2) 8PSK 的平均符号能量为：

$$E_{8PSK} = r^2 = \frac{A^2}{\left(2 \sin \frac{\pi}{8}\right)^2} = \frac{A^2}{2 - \sqrt{2}} = 1.7071 A^2$$

$$P_{8PSK} = \frac{E_{8PSK}}{T_s} = 1.7071 \frac{A^2}{T_s}$$

因此平均发送功率为：

$$E_{8QAM} = \frac{a^2 + b^2}{2} = \frac{3 + \sqrt{3}}{4} A^2 = 1.1830 A^2$$

8QAM的平均符号能量为：

$$P_{8QAM} = \frac{E_{8QAM}}{T_s} = 1.1830 \frac{A^2}{T_s}。$$

因此平均发送功率为：

7-3 采用8PSK 调制传输4800b/s数据，最小理论带宽是多少？

解：在理想情况下，MPSK 的最高频带利用率可以达到 $\log_2 M$ Mb/s/Hz

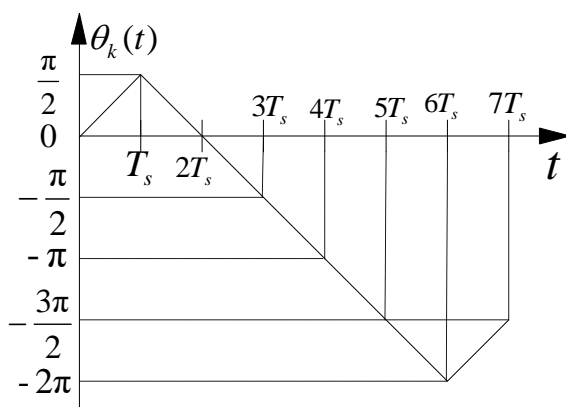
则采用 8PSK 调制传输 4800b/s 数据时，最小理论带宽为 $B = 4800 / \log_2 8 = 1600 \text{Hz}$

7-4 某 8QAM 调制器输入的信息速率为 $R_b = 90 \text{Mbps}$ ，求符号速率 R_s 。

$$\text{解： } R_s = \frac{R_b}{\log_2 8} = 30 \text{M 符号/秒}$$

7-5 设发送数字序列为：+1, -1, -1, -1, -1, -1, +1.试画出用其调制后的 MSK 信号的相位变化图。若码元速率为 1000Bd，载频为 3000Hz，试画出此 MSK 信号的波形。

解：MSK 信号附加相位函数路径图如解图 7-1（a）所示。



解图 7-1 （a）

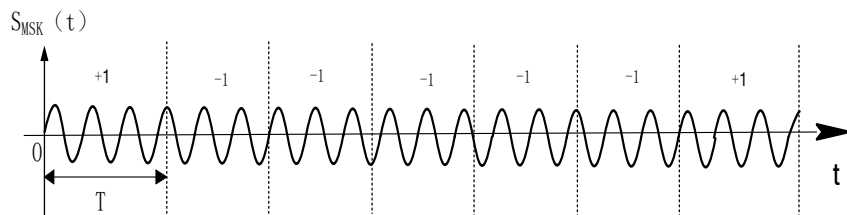
由已知，载波频率 $f_c = 3000 \text{Hz}$ ，传输速率 $f_s = \frac{1}{T_s} = 1000 \text{Bd}$ ，因此“-1”符号所对应的

频率为 $f_{-1} = f_c - \frac{1}{4T_s} = 3000 \text{ Hz} - 250 \text{ Hz} = 2750 \text{ Hz} = \frac{11}{4} f_s$

“+1”符号对应的频率为

$$f_1 = f_c + \frac{1}{4T_s} = 3000 \text{ Hz} + 250 \text{ Hz} = 3250 \text{ Hz} = \frac{13}{4} f_s$$

因此，MSK 信号的时间波形如解图 7-1 (b) 所示。



解图 7-1 (b)

7-6 设有一个 MSK 信号，其码元速率为 **1000Bb**，分别用频率 f_1 和 f_0 表示码元“1”和“0”。

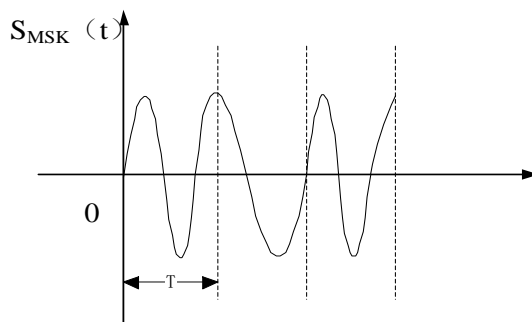
若 f_1 等于 **1250Hz**，试求 f_0 ，并画出“101”的波形。

解：设载波频率为 f_c ，已知码元速率为 $f_s = 1000 \text{ Bd}$ ，又

$$f_1 = f_c + \frac{1}{4T_s} = f_c + \frac{f_s}{4} = 1250 \text{ Hz}$$

因此可求得 $f_c = 1000 \text{ Hz}$ 。所以 $f_0 = f_c - \frac{f_s}{4} = 1000 \text{ Hz} - \frac{1000}{4} \text{ Hz} = 750 \text{ Hz}$

三个码元“101”的波形如解图 7-2 所示。



解图 7-2

7-7 已知载波频率 $f_c = 1.75/T_s$ ，初始相位 $\varphi_0 = 0$ 。

(1) 当数字基带信号 $a_k = \pm 1$ 时，MSK 信号的两个频率 f_1 和 f_2 分别是多少？

(2) 对应的最小频差及调制指数是多少？

解：(1) 当 $a_k = -1$ 时，信号频率 f_1 为

$$f_1 = f_c - \frac{1}{4T_s} = \frac{1.75}{T_s} - \frac{1}{4T_s} = \frac{1.5}{T_s}$$

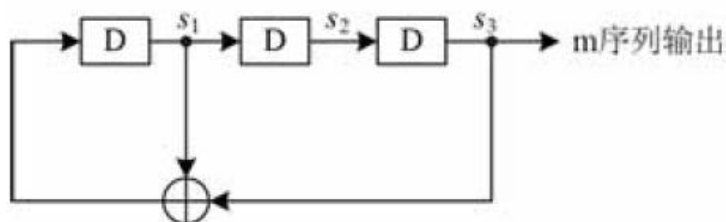
当 $a_k = +1$ 时, 信号频率 f_2 为

$$f_2 = f_c + \frac{1}{4T_s} = \frac{1.75}{T_s} + \frac{1}{4T_s} = \frac{2}{T_s}$$

(2) 最小频差 $\Delta f = f_2 - f_1 = \frac{2}{T_s} - \frac{1.5}{T_s} = \frac{1}{2T_s}$, 它等于码元传递速率的一半。

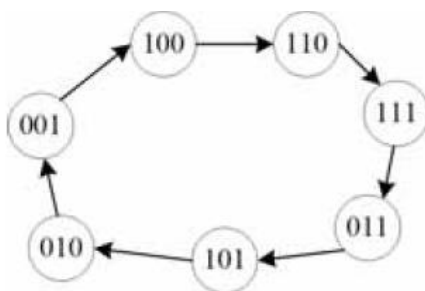
7-8 已知线性反馈移存器序列的特征多项式为 $f(x) = x^3 + x + 1$, 求此序列的状态转移图, 并说明它是否是m序列。

解: 该序列的发生器逻辑框图如解图 7-3 (a) :



解图 7-3(a)

定义状态为向量 $s = (s_1, s_2, s_3)$, 假设起始状态是 100, 则状态转移图如解图 7-3(b):



解图 7-3(b)

由于其周期为 $2^3 - 1 = 7$, 所以此序列是 m 序列。

7-9 已知m序列的特征多项式为 $f(x) = x^4 + x + 1$, 写出此序列一个周期中的所有游程。

解: 该m序列的周期为15, 一个周期为100011110101100, 共有8个游程:

1 000 1111 0 1 0 11 00

其中长度为 1 的游程有 4 个; 长度为 2 的游程有 2 个; 长度为 3 的游程有 1 个; 长度为 4 的游程有 1 个。

7-10 已知优选对 m_1 、 m_2 的特征多项式分别为 $f_1(x) = x^3 + x + 1$ 和 $f_2(x) = x^3 + x^2 + 1$ ，写出由此优选对产生的所有 Gold 码，并求其中两个的周期互相关函数。

解：特征多项式为 $f_1(x) = x^3 + x + 1$ 的 m 序列的一个周期为 1110100。特征多项式

$f_2(x) = x^3 + x^2 + 1$ 的 m 序列的一个周期为 1110010。由此生成的 Gold 码为：

$$G1: 1110100 \oplus 1110010 = 0000110$$

$$G2: 1110100 \oplus 0111001 = 1001101$$

$$G3: 1110100 \oplus 1011100 = 0101000$$

$$G4: 1110100 \oplus 0101110 = 1011010$$

$$G5: 1110100 \oplus 0010111 = 1100011$$

$$G6: 1110100 \oplus 1001011 = 0111111$$

$$G7: 1110100 \oplus 1100101 = 0010001$$

再加上原有的两个 m 序列：

$$G8: 1110100$$

$$G9: 1110010$$

一共有 9 个。

考虑 G1 和 G2 的互相关。将这两个码的双极性形式为：

$$g_1: 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ -1 \ -1 \ 1$$

$$g_2: -1 \ 1 \ 1 \ -1 \ -1 \ 1 \ -1$$

其互相关函数为：

$$R_{12}(k) = \sum_{i=0}^6 g_1(i)g_2(i+k), \quad k \in \{0, 1, 2, \dots, 6\}$$

其中 $i+k$ 按 mod 7 计算。通过具体计算可得：

$$R_{12}(k) = \begin{cases} -1 & k \in \{0, 1, 3, 5\} \\ 3 & k = 2 \\ -5 & k = 4 \end{cases}$$

第八章

思考题：

8-1 按错码分布规律的不同，错码可分哪几类？

答：可以分为三类：（1）随机性错码；（2）突发性错码；（3）混合性错码。既有随机错码又有突发错码。

8-2 通信系统中采用信道编码的目的是什么？其基本原理是怎样的？

答：信道编码的目的是提高信号传输的可靠性。信道编码的基本原理其可归结为两条：
（1）利用冗余度：在信号码元序列中增加监督码元，并利用监督码元去发现或纠正传输中发生的错误。
（2）噪声均化（随机化）：就是设法把集中出现的突发性差错分摊开来，变成随机性差错。

8-3 常用的差错控制方法有哪些？试比较其优缺点。

答：常用的差错控制方法有以下几种：

（1）检错重发：接收端在收到的信码中检测出错误码时，即通知发送端重发，直到正确收到为止。所谓检测出错误码，是指在若干接收码元中知道有错码，但不知道错码的位置。采用这种差错控制方法需要具备双向信道。

（2）检错删除：接收端发现错码，就将错码删除。这种办法只适用于有大量冗余码元的场合，删除部分码元不影响接收信息的使用。

（3）前向纠错：接收端不仅能在收到的信码中发现有错码，还能够纠正错码。对于二进制系统，如果能够确定错码的位置，就能够纠正它。这种方法不需要反向信道（传递重发指令），也不存在由于反复重发而延误时间，实时性好。但是纠错设备要比检错设备复杂。

（4）混合纠错：把检错和纠错结合使用，当错码较少并有能力纠正时，采用 FEC；当错码较多而没有能力纠正时，采用 ARQ。

（5）反馈校验：接收端将收到的信码原封不动地转发回发送端，并与原发送信码相比较。如果发现错误；则发送端再进行重发。这种方法原理和设备都较简单，但需要有双向信道。因为每个信码至少要发送两次，所以传输效率较低。

8-4 简述最小码距与纠错检错能力之间的关系。

答：（1）若要在一个码组内检测出 e 个错码，要求最小码距： $d_0 \geq e + 1$ ；

（2）若要纠正 t 个错码，则要求最小码距为： $d_0 \geq 2t + 1$ ；

（3）若要纠正 t 个错码，同时能检测 e ($e > t$) 个错码，则要求最小码距为： $d_0 \geq e + t + 1$ 。

8-5 什么是分组码？什么是线性分组码？线性分组码具有哪些性质？

答：分组码是将信息位和监督位分组，为每组信息码附加若干监督码的编码称为分组码。在分组码中，监督码元仅监督本码组中的信息码元。

线性分组码中信息位和监督位的关系可用一组线性方程来表示。

线性分组码具有如下性质：

（1）封闭性。任意两个码组的模 2 和仍是这种编码中的一个许用码组。

（2）两个码组间的距离必是另一码组的重量，编码的最小距离等于非零码的最小码重。这一条可由第 1 条推出。

（3）编码中必存在一个全“0”码组。

8-6 设一个线性分组码码长为 n ，信息位数为 k ，监督位数 r ，如果要构造出能纠正一位错码的线性分组码，试讨论 n ， k ， r 三者应满足的关系。

答：若码长为 n ，信息位数为 k ，则监督位数 $r = n - k$ 。如果要构造出能纠正一位错码的线性分组码，那么 r 个监督关系式就必须指示出一位错码的 n 种可能位置，则要求：

$$2^r - 1 \geq n \text{ 或 } 2^r \geq k + r + 1$$

8-7 典型的监督矩阵的各行是否线性无关？非典型的监督矩阵满足什么条件可以化成典型阵形式？

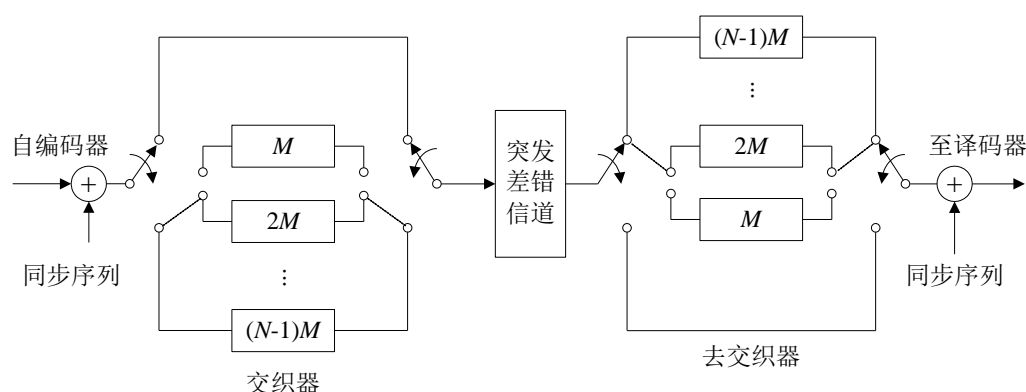
答：由线形代数理论可知，典型的监督矩阵的各行一定是线性无关的，因为 $[I_r]$ 的各行是线性无关的。非典型的监督矩阵如果各行是线性无关的，就一定可化成典型阵形式。

8-8 什么是系统码？

答：由典型生成矩阵得出的码组 A 中，信息位不变，监督位附加于其后，这种码称为系统码。

8-9 简述卷积交织的原理。

答：卷积交织的原理如思考题解图 8-1 所示，该交织器的交织长度 $L = M \times N$ ，称之为 (M, N) 交织器。它将来自编码器的信息码序列，经同步序列模 2 加后送到一组级数逐级增加的 N 个并行移存器群，每当移入一个新的码元，旋转开关旋转一步与下一个移存器相连。移入一个新的码元并使最早存在该移存器的码元移出并送入突发信道，通过突发信道输出的码元通过旋转开关同步输入去交织器，去交织器通过相反的操作，再通过旋转开关同步输出，并与同步序列模 2 加，然后送至译码器。



思考题解图 8-1

8-10 什么是循环码？它具有什么特性？

答：循环码是线性分组码中一个重要的子类，它除了具有线性码的一般性质外，还具有循环性，所谓循环性，即是循环码中任一码组循环一位（将最右端的码元移至左端或反之）以后，仍为该码中的一个许用码组。

8-11 循环码的生成多项式 $g(x)$ 如何确定？

答：循环码的生成多项式 $g(x)$ 应满足如下几个特性：

- (1) 是一个常数项不为“0”的多项式；
- (2) 是一个 $(n-k)$ 次多项式；
- (3) 是 $(x^n + 1)$ 的一个因式。

8-12 简述循环码的编码步骤。

答：编码步骤归纳如下：

- (1) 用 x^{n-k} 乘 $m(x)$ ， $m(x)$ 为信息码多项式
- (2) 用 $g(x)$ 除 $x^{n-k}m(x)$ ，得到商 $Q(x)$ 和余式 $r(x)$ ，
- (3) 编出的码组 $C(x)$ 为： $C(x) = x^{n-k}m(x) + r(x)$ 。

8-13 简述循环码的纠错译码过程。

答：循环码的纠错译码可以按下列步骤进行：

- (1) 用接收到的码多项式 $R(x)$ 除以生成多项式 $g(x)$ 所得的余式就是校正子 $S(x)$ ，即

$$\frac{B(x)}{g(x)} = Q(x) \cdots S(x)$$

- (2) 由校正子 $S(x)$ 通过查表或通过某种计算得到错误图样 $E(x)$ ；
- (3) 从 $B(x)$ 中减去错误图样 $E(x)$ ，即可纠正错误。

8-14 简述本原 BCH 和非本原 BCH 码的区别。

答：本原 BCH 码的码长为 $n = 2^m - 1$ ，（ m 是 ≥ 3 的任意正整数），它的生成多项式 $g(x)$ 中含有最高次数为 m 次的本原多项式；非本原 BCH 码的码长 n 是 $2^m - 1$ 的一个因子，它的生成多项式 $g(x)$ 中含有最高次数为 m 的本原多项式。

8-15 什么是 RS 码？可纠正的错误图样有哪些？

答：RS 码是一种多进制的 BCH 码，每个符号由 m 个比特组成。一个能纠正 t 个错码的 RS 码码长为 $n = 2^m - 1$ ，监督位码长 $2t$ 。特别适于纠正突发性错码，可纠正的错误图样有：

- 总长度 $b_1 = (t-1)m + 1$ 的单个突发错码
- 总长度 $b_2 = (t-3)m + 3$ 的两个突发错码
-
- 总长度 $b_i = (t-2i+1)m + 2i - 1$ 的 i 个突发错码

8-16 简述 Fire 码的纠错能力。

答：Fire 码的纠错能力为

- (1) 当 $l \geq b_t + b_e - 1$ ， $m \geq b_t$ 时，能纠正长度 $\leq b_t$ 的单个突发错码，并能发现长度 $\geq b_t$ 而 $\leq b_e$ 的突发错码；
- (2) 若用于检错，能发现长度 $\leq l + m$ 的单个突发错码，或两个突发错码的组合，两个突发错码长度之和 $\leq l + 1$ ，其中一个长度 $\leq b_e$ 。

8-17 简述卷积码与线性分组码相的差别。

答：与线性分组码相比存在着许多差别，大体表现在以下几个方面：

(1) 线性分组码的编码是将信息序列明确地分组，每个码组中校验码仅与本码组中的信息码有关，编码后形成固定长度、互不相关的码组序列，这种编码无记忆性。卷积码每个码组中的监督码不但与本码组的信息码有关，还与前边 $(N-1)$ 个码组中的信息码有关，卷积码是具有记忆性。

(2) 为了兼顾纠错能力与编码效率，线性分组码的码组长度 n 一般都较大。随着 n 增大，编、译码电路复杂度迅速增加，并带来较大的译码延时。卷积码则将信息码与校验码之间的相关性分布在 N 个码组之间。这样卷积码的 k 和 n 值可以为比较小的值，编、译码延时小，特别适合以串行方式传输信息的应用场合。因此在相同的传信率（信息速率）和设备

复杂度的条件下，卷积码的性能一般优于线性分组码。

(3) 线性分组码多采用系统码，而卷积码则不然。当 N 值确定后，非系统卷积码可获得更大的自由距，更易达到最佳编码效果。对卷积码的译码而言，系统码和非系统码的译码难度是一样的，故卷积码常采用非系统码。

(4) 线性分组码有严格的代数结构，而卷积码的纠错能力与编码结构之间缺乏明确的数学关系。在构造许用的卷积码（也称为好码）时，只能是依码距性能，采用计算机对大量的码进行搜索得到的。

(5) 线性分组码的编码器可视为一个有 k 个输入变量、 n 个输出变量的线性网络。卷积码可视为输入信息序列与编码器的特定结构所决定的另一个序列的卷积，卷积码也就由此得名。

8-18 什么是卷积码的最小距离 d_0 和自由距离 d_{free} ?

答：最小距离 d_0 定义为由零状态零时刻分叉、长度为 nN 的两个编码序列间的最小距离。

也就是在零状态零时刻输入非零信息码、长度为 nN 的编码序列的最小码重。自由距离 d_{free} 定义为由零状态零时刻分叉、任意长的两个编码序列间的最小距离。也就是在零状态零时刻输入非零信息码、然后又回到零状态的所有编码序列中的最小码重。

8-19 什么是 TCM 编码?

答：TCM (Trellis Coded Modulation) 编码是将卷积码与调制相结合的网格编码调制。能提高编码序列的自由距离。

8-20 LDPC 全称是什么? LDPC 码的校验矩阵有什么特点?

答：LDPC 码，全称低密度奇偶校验码 (Low Density Parity Check Code) LDPC 码的校验矩阵 H 是一个稀疏矩阵，相对于行与列的长度 (N, M) ，校验矩阵每行、列中非零元素的数目（称作行重、列重）非常小，这也是 LDPC 码之所以称为低密度码的原因。并且任意两行（列）最多只有 1 个相同位置上是 1。

习题：

8-1 已知一汉明码的监督位数 $r = 4$ ，求码长 n 和编码效率 R 各为多少?

解：

$$n = 2^r - 1 = 15$$

$$k = n - r = 15 - 4 = 11$$

$$R = \frac{k}{n} = \frac{11}{15} \approx 73.3\%$$

8-2 若两个重复码字 1000，0111，分别只纠错、检错能力如何？若同时用于检错和纠错，其纠错性能又怎样？

解： $d=4$ ，故可检出 3 个错，纠正 1 个错；可同时检出 2 个错、纠正 1 个错。

8-3 已知某线性分组码的 8 个码字为：000000、001110、010101、011011、100011、101101、110110、111000，求该码的最小码距，并判断其纠错能力。

解：由于线性分组码的封闭性和码距的定义可得知：线性分组码的最小码距等于非全零码的最小码重。故有：

$$d_0 = \min_{i \neq j} \{d(A_i, A_j)\} = \min \{W(A_l), l \neq 0\}$$

故由观察法即可得出

$$d_0 = \min \{W(A_l), l \neq 0\} = 3$$

由纠错编码定理

$$d_0 \geq e + 1$$

$$d_0 \geq 2t + 1$$

$$d_0 \geq t + e + 1 (e > t)$$

可得其检纠错能力如下：

(1)能发现 2 个错误码元

(2)能纠正 1 个错误码。

8-4 写出 n=7 时一维偶校验码的监督矩阵[H]和生成矩阵[G]，并讨论其纠、检错能力。

解：n=7，k=6，r=1。只有一个监督关系 $c_6 \oplus c_5 \oplus c_4 \oplus c_3 \oplus c_2 \oplus c_1 \oplus c_0 = 0$ ，故

$$[111111 | 1] \begin{bmatrix} c_6 \\ c_5 \\ c_4 \\ c_3 \\ c_2 \\ c_1 \\ c_0 \end{bmatrix} = [0]。因此 H_{1 \times 7} = [111111 | 1], Q = P^T = \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix}。$$

$$故 G = [I_k | Q] = \begin{bmatrix} 100000 | 1 \\ 010000 | 1 \\ 001000 | 1 \\ 000100 | 1 \\ 000010 | 1 \\ 000001 | 1 \end{bmatrix}$$

②可检出 $2^r - 1 = 1$ 个错，不能纠错。

8-5 已知一个 (6, 3) 线性分组码的全部码字为：

```

1 1 0 1 0 0
1 1 0 0 1 1
0 1 1 0 1 0

```

$$\begin{array}{cccccc}
0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 1 \\
1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 \\
0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 \\
1 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 \\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0
\end{array}$$

求该码的生成矩阵和监督矩阵，并讨论其纠检错能力。

解：n=6，k=3，r=3。

观察所给码字，设从左至右码元依次为 $a_5a_4a_3a_2a_1a_0$ ，信息位为 $a_4a_3a_2$ ，则监督关系为：

$$a_5 = k_{11}a_4 \oplus k_{12}a_3 \oplus k_{13}a_2$$

$$a_1 = k_{21}a_4 \oplus k_{22}a_3 \oplus k_{23}a_2,$$

$$a_0 = k_{31}a_4 \oplus k_{32}a_3 \oplus k_{33}a_2。$$

把前三个码字分别代到这3个式子里去，则可解得这九个k值：

$$k_{11}=1, k_{12}=1, k_{13}=0; k_{21}=1, k_{22}=0, k_{23}=1; k_{31}=1, k_{32}=1, k_{33}=1。$$

故监督关系为：

$$a_5 = a_4 \oplus a_3, \quad a_1 = a_4 \oplus a_2, \quad a_0 = a_4 \oplus a_3 \oplus a_2。$$

$$\text{由此写出生成矩阵和监督分别为： } G = \begin{bmatrix} 110011 \\ 101001 \\ 000111 \end{bmatrix}, \quad H = \begin{bmatrix} 111000 \\ 010110 \\ 011101 \end{bmatrix}。$$

由码字知最小码距等于最小码重： $d_{\min} = 3$ ，故可纠一位错。

8-6 已知(7, 3)码的生成矩阵为

$$G = \begin{bmatrix} 1001110 \\ 0100111 \\ 0011101 \end{bmatrix}$$

列出所有许用码组，并求监督矩阵。

解：分别将信息段(000)、(001)、(010)、(011)、(100)、(101)、(110)和(111)代入式 $A = mG$ ，得到许用码组如下

0000000
0011101
0100111
0111010
1001110
1010011

1101001

1110100

生成矩阵 G 为典型阵，有

$$Q = \begin{bmatrix} 1110 \\ 0111 \\ 1101 \end{bmatrix} \quad \text{所以} \quad P = Q^T = \begin{bmatrix} 101 \\ 111 \\ 110 \\ 011 \end{bmatrix}$$

得监督矩阵

$$H = [P : I_r] = \begin{bmatrix} 1011000 \\ 1110100 \\ 1100010 \\ 0110001 \end{bmatrix}$$

8-7 已知 (6, 3) 分组码的监督码方程组为

$$\begin{cases} c_5 + c_4 + c_1 + c_0 = 0 \\ c_5 + c_3 + c_1 = 0 \\ c_4 + c_3 + c_2 + c_1 = 0 \end{cases}$$

(1) 写出相应的监督矩阵 H;

(2) 变换该矩阵为典型阵。

解：(1) 由题中所给监督方程组可直接写出 H: $H = \begin{bmatrix} 110011 \\ 101010 \\ 011110 \end{bmatrix}$ 。

(2) 对 H 阵做初等行变换即可得 $H_{\text{典型}} = \begin{bmatrix} 110 & | & 100 \\ 101 & | & 010 \\ 011 & | & 001 \end{bmatrix}$

8-8 已知 (7, 3) 线性分组码的生成矩阵为

$$G = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

求其监督矩阵，写出该 (7, 3) 码的系统码，并判断其纠检错能力。

解：先用初等行变换将生成矩阵化成典型阵，如下所示：

$$G = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 1 \end{bmatrix}_{3 \times 7}$$

$$= \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$= \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 1 \end{bmatrix} = [I_k Q_{k \times r}]_{k \times n}$$

$$\therefore H = [Q_{r \times k}^T I_r]_{r \times n}$$

$$= \begin{bmatrix} 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

K=3，所以共有 $2^3=8$ 个系统码字，再根据 $A=MG$ ，即可分别求出各个码字。举例如下：

$$M=[101], \text{ 所以 } A=MG=[101] \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$=[1010011]$$

其它码字分别为：

$$[0000000], [0011101], [0100111], [0111010],$$

$$[1001110], [1101001], [1110100]$$

故由线性分组码的性质可得其最小码距 d_0 为 4，由检纠错编码定理可得：能发现 3 位错误；能纠正 1 位错误；能发现 2 位错误的同时纠正 1 位错误(HEC 混合纠错方式)；

8-9 已知一个 (7, 4) 系统汉明码监督矩阵如下：

$$H = \begin{bmatrix} 1110100 \\ 0111010 \\ 1101001 \end{bmatrix}$$

试求：

(1) 生成矩阵 G；

(2) 当输入信息序列 $m = (1101011010 \ 10)$ 时, 求输出码序列 $A = ?$

解 :

(1)

$$Q = P^T = \begin{bmatrix} 101 \\ 111 \\ 110 \\ 011 \end{bmatrix}$$

$$G = [I_k : Q] = \begin{bmatrix} 1000101 \\ 0100111 \\ 0010110 \\ 0001011 \end{bmatrix}$$

(2) $m_1 = 1101, m_2 = 0110, m_3 = 1010$

$$A_1 = m_1 G = [1101] \begin{bmatrix} 1000101 \\ 0100111 \\ 0010110 \\ 0001011 \end{bmatrix} = (1101001)$$

$$A_2 = m_2 G = (0110001)$$

$$A_3 = m_3 G = (1010011)$$

8-10 设 (7,3) 线性分组码的监督矩阵为

$$H = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

试解答以下问题:

- (1) 监督码元与信息码元之间的关系表达式;
- (2) 列出所有的许用码字;
- (3) 汉明距离 $d_0 = ?$
- (4) 画出编码器电路;
- (5) 校正子的数学表达式;
- (6) 列出错误码位、错误图样和校正子输出之间关系的表格;

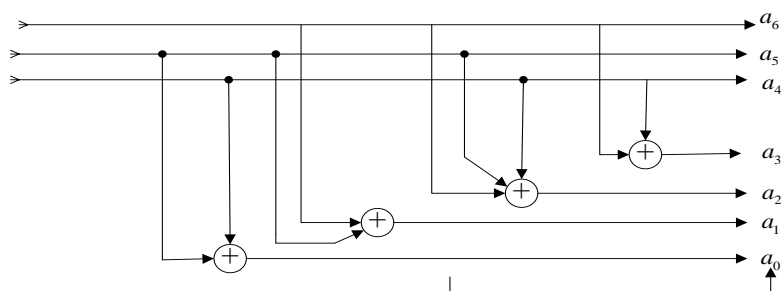
解: (1) 由 $H = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$, 得 $\begin{cases} a_3 = a_4 \oplus a_6 \\ a_2 = a_4 \oplus a_5 \oplus a_6 \\ a_1 = a_5 \oplus a_6 \\ a_0 = a_4 \oplus a_5 \end{cases}$

(2) 所有的许用码字如下

$a_6 a_5 a_4$	$a_3 a_2 a_1 a_0$
000	0000
001	1101
010	0111
011	1010
100	1110
101	0011
110	1001
111	0100

(3) 由上表知汉明距离为 $d_0 = 4$ 。

(4) 画出编码器电路如解图 8-1:



解图 8-1

(5) $S = EH^T \rightarrow \begin{cases} s_4 = e_6 \oplus e_4 \oplus e_3 \\ s_3 = e_6 \oplus e_5 \oplus e_4 \oplus e_2 \\ s_2 = e_6 \oplus e_5 \oplus e_1 \\ s_1 = e_5 \oplus e_4 \oplus e_0 \end{cases}$

(6) 列出错误码位、错误图样和校正子输出之间的关系如下

$S_4 \sim S_1$	$e_6 \sim e_0$	哪位出错	对应 4-16 译码器输出
0000	0000000	无错	Z_0
0001	0000001	b_0	Z_1
0010	0000010	b_1	Z_2
0100	0000100	b_2	Z_4

1000	0001000	b_3	Z_8
1101	0010000	b_4	Z_{13}
0111	0100000	b_5	Z_7
1110	1000000	b_6	Z_{14}

8-11 已知 (7, 4) 循环码的生成多项式为 $x^3 + x + 1$, 输入信息码元为 1001, 求编码后的系统码组。

解 $g(x) = x^3 + x + 1$, $m(x) = x^3 + 1$ 。 首先计算 $x^{n-k}m(x) = x^3(x^3 + 1) = x^6 + x^3$;

然后求 $x^{n-k}m(x)/g(x)$ 的余式, 用长除法:

$$\begin{array}{r}
 x^3 + x \quad \text{(商式)} \\
 x^3 + x + 1 \overline{) x^6 + x^3} \\
 \underline{x^6 + x^4 + x^3} \\
 x^4 \\
 \underline{x^4 + x^2 + x} \\
 x^2 + x \quad \text{(余式)}
 \end{array}$$

编码后, 系统码的码多项式为

$$T(x) = x^{n-k}m(x) + r(x) = x^6 + x^3 + x^2 + x$$

对应的系统码组 $A = (1001110)$ 。

8-12 令 $g(x) = 1 + x + x^2 + x^4 + x^5 + x^8 + x^{10}$ 为 (15, 5) 循环码的码生成多项式。

(1) 求该码的生成矩阵 $[G]$

(2) 当信息多项式 $m(x) = x^4 + x + 1$ 时, 求码多项式及码字。

解:

(1) $n = 15, k = 5, r = 10$

$$G[x] = \begin{bmatrix} x^4 g(x) \\ x^3 g(x) \\ x^2 g(x) \\ x g(x) \\ g(x) \end{bmatrix}, \text{ 所以 } G = \begin{bmatrix} 1000011011 & 10000 \\ 0100001101 & 11000 \\ 0010000110 & 11100 \\ 0001000011 & 01110 \\ 0000100001 & 10111 \end{bmatrix}。$$

$$(2) x^{n-k}m(x) = x^{10}m(x) = x^{14} + x^{11} + x^{10},$$

$$\frac{x^{n-k}m(x)}{g(x)} \text{ 的余式 } r(x) = x^8 + x^7 + x^6 + x^4 + x$$

故码多项式为 $x^{14} + x^{11} + x^{10} + x^8 + x^7 + x^6 + x^4 + x$ ，码字为 100110111010010。

8-13 已知 (15,7) 循环码由 $g(x) = x^8 + x^7 + x^6 + x^4 + 1$ 生成，问接收码字为 $T(x) = x^{14} + x^5 + x + 1$ 是否需要重发？

解：

$$\begin{array}{r} x^6 + x^5 + x^3 \\ x^8 + x^7 + x^6 + x^4 + 1 \overline{) x^{14} + x^5 + x + 1} \\ \underline{x^{14} + x^{13} + x^{12} + x^{10} + x^6} \\ x^{13} + x^{12} + x^{10} + x^6 + x^5 + x + 1 \\ \underline{x^{13} + x^{12} + x^{11} + x^9 + x^5} \\ x^{11} + x^{10} + x^9 + x^6 + x + 1 \\ \underline{x^{11} + x^{10} + x^9 + x^7 + x^3} \\ x^7 + x^6 + x^3 + x + 1 \end{array}$$

由此可得余多项式为 $x^7 + x^6 + x^3 + x + 1$ ，由于余多项式不为 0，所以码字在传输过程中有错，故需要重发。

8-14 设有一 (7, 4) 系统循环码，其生成多项式为 $g(x) = x^3 + x + 1$ 。假设码字自左至右对应码多项式的次数自高至低，假设系统位在左。

(1) 求信息 0111 的编码结果；

(2) 若译码器输入是 0101001，求其码多项式模 $g(x)$ 所得的伴随式，并给出译码结果；

(3) 写出该码的系统码形式的生成矩阵及相应的监督矩阵。

解：(1) 0111010；

(2) $x^2 + 1$ (或写成 101)，1000000 的伴随式也是 101，所以认为最高位有错，译为 1101001。

(3)

$$G(x) = \begin{bmatrix} x^3 g(x) \\ x^2 g(x) \\ x g(x) \\ g(x) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x^6 + x^4 + x^3 \\ x^5 + x^3 + x^2 \\ x^4 + x^2 + x \\ x^3 + x + 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 \end{bmatrix}$$

$$\therefore G = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 \end{bmatrix} = [I_k Q_{k \times r}]_{k \times n}$$

$$\therefore H = [Q_{r \times k}^T I_r]_{r \times n} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

8-15 已知一个(2, 1, 5)卷积码 $g^1 = (11101)$ $g^2 = (10011)$,

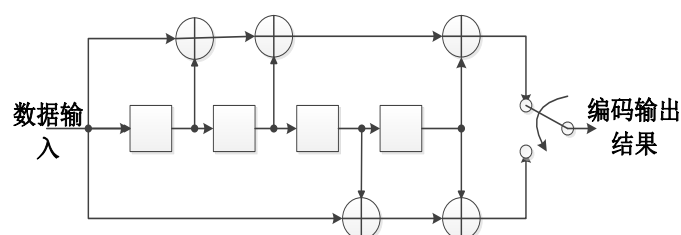
(1)画出编码器框图;

(2)写出该码生成多项式 $g(x)$;

(3)写出该码生成矩阵 G ;

(4)若输入信息序列为 11010001, 求输出码序列 $c = ?$

解: (1) $n = 2, k = 1, m = 4$; 依题意可以画出编码器框图如解图 8-2 所示



解图 8-2

$$(2) \quad g_1(x) = 1 + x + x^2 + x^4; g_2(x) = 1 + x^3 + x^4$$

$$(3) \quad G = \begin{pmatrix} 11 & 10 & 10 & 01 & 11 & & 0 \\ & 11 & 10 & 10 & 01 & 11 & \\ & & 11 & 10 & 10 & 01 & 11 \\ 0 & & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \end{pmatrix}$$

$$(4) \quad c = (11010001), c(x) = 1 + x + x^3 + x^7$$

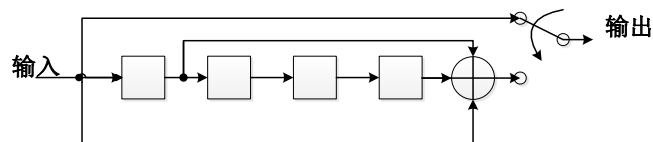
上支路的输出为 $c(x)g_1(x) = 1 + x^8 + x^9 + x^{11}$, 即 100000001101

下支路的输出为 $c(x)g_2(x) = 1 + x + x^5 + x^6 + x^{10} + x^{11}$, 即 110001100011

串并变换后的输出是: 11 01 00 00 00 01 01 00 10 10 01 11

8-16 已知一卷积码编码器结构如题图 8-1 所示，试求：

- (1) $(n, k, K) = ?$
- (2) $g^1 = ?$ $g^2 = ?$ 生成矩阵 $G = ?$
- (3) 若 $x = (10111)$ ，求输出 $c = ?$



题图 8-1

解：(1) $n = 2, k = 1, K = 4$

(2) $g^1 = (1000), g^2 = (1101)$

$$G = \begin{pmatrix} 11 & 01 & 00 & 01 & & 0 \\ & 11 & 01 & 00 & 01 & \\ & & 11 & 01 & 00 & 01 \\ 0 & & \dots & \dots & \dots & \dots \end{pmatrix}$$

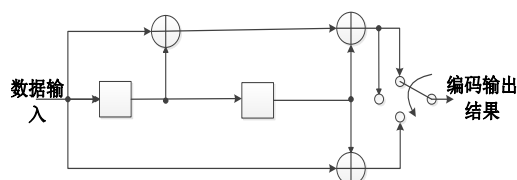
(3) 考虑编码器状态全 0，则上支路的输出是 10111000，下支路的输出是 11110011，串并变换后的输出序列是 (11 01 11 11 10 00 01 01)。

8-17 已知一个 (3,1,3) 卷积码

$$g_1(x) = 1 + x + x^2, g_2(x) = 1 + x + x^2, g_3(x) = 1 + x^2,$$

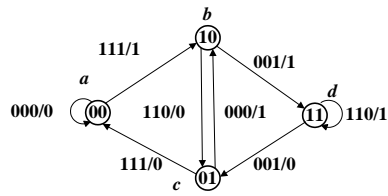
- (1) 画出该码的编码器框图；
- (2) 画出状态图、树图；
- (3) 求该码的自由距离。

解：(1) $n = 3, k = 1, m = 2$ ，依题意画出编码器框图如下解图 8-3 (a) 所示

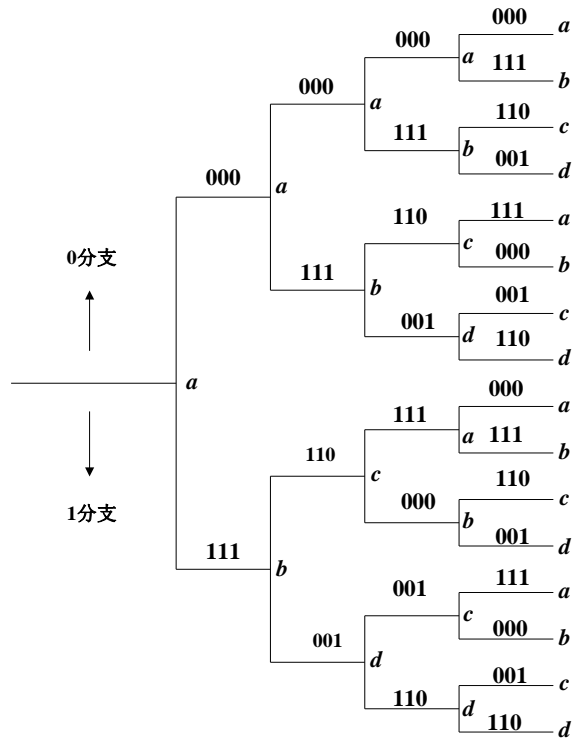


(a)

(2) 状态图和树图分别为解图 8-3 (b)，(c)所示



(b)



(c)

解图 8-3

(3) 通过观察树图可以看出：非 0 路径首次离开 a 必然经过 b，首次回到 a 必然经过 c。因此所有自由路径一定是 $ab...ca$ 的形式。路径 $abca$ 的码重是 8，而其他所有形如 $ab...ca$ 的路径的码重不可能比 $abca$ 更轻。因此自由距为 $d_f = 8$ 。