

## 数字带通传输

### 二进制数字调制原理

#### 二进制振幅键控(2ASK)

#### 二进制频移键控(2FSK)

#### 二进制相移键控(2PSK)

#### 二进制差分相移键控(2DPSK)

### 数字调制系统的抗噪声性能

#### 2ASK

#### 2FSK

#### 2PSK

#### 2DPSK

### 二进制数字调制系统的比较

### 多进制振幅键控 (MASK) (不考)

### 例题

# 数字带通传输

- 调制系统

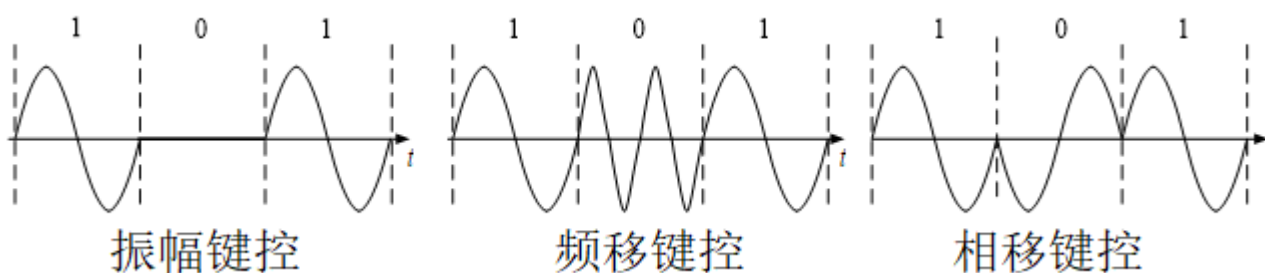
$$\text{调制信号} : s(t) = \sum_n a_k g(t - nT_b) \quad (1)$$

$$\text{载波信号} : c(t) = A \cos(\omega_c t + \varphi)$$

- 仅调制信号与之前不同，同样具有调幅 (ASK)、调相 (PSK)、调频(FSK)

- 调制技术

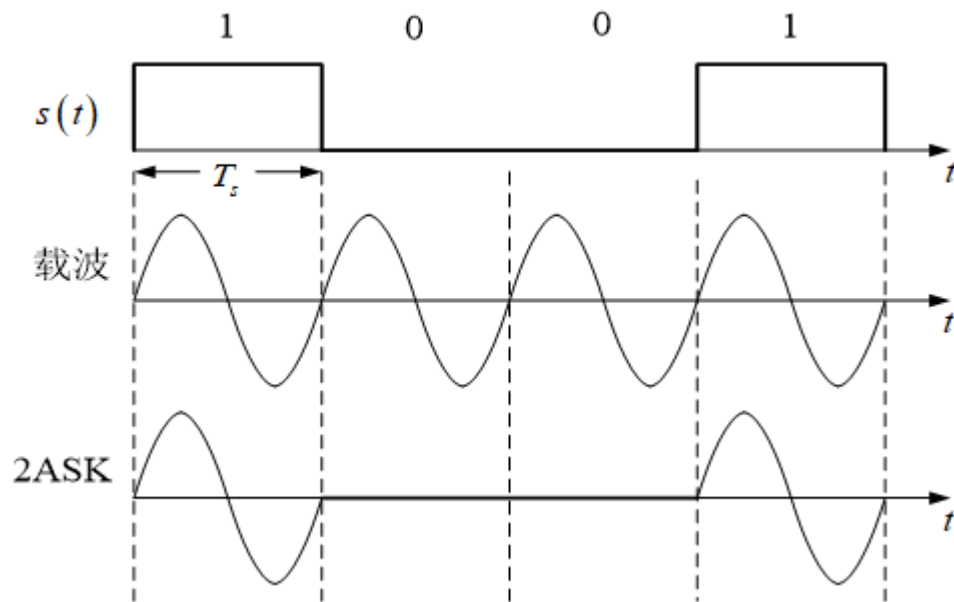
- 模拟调制实现数字式调制
- 键控法：振幅、频移、相移键控



- 相位波以正弦波为标准

## 二进制数字调制原理

### 二进制振幅键控(2ASK)

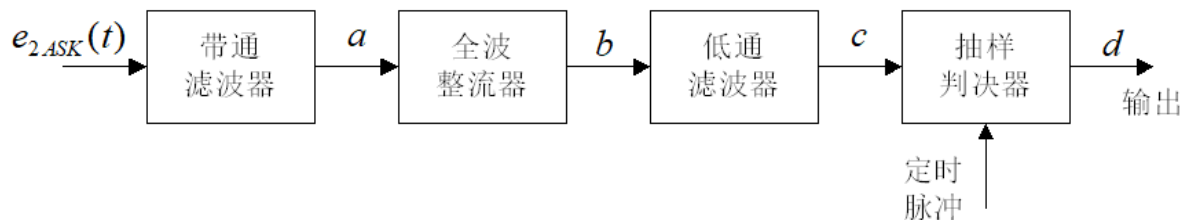


- 知识点1：已调信号的时域表达式&波形

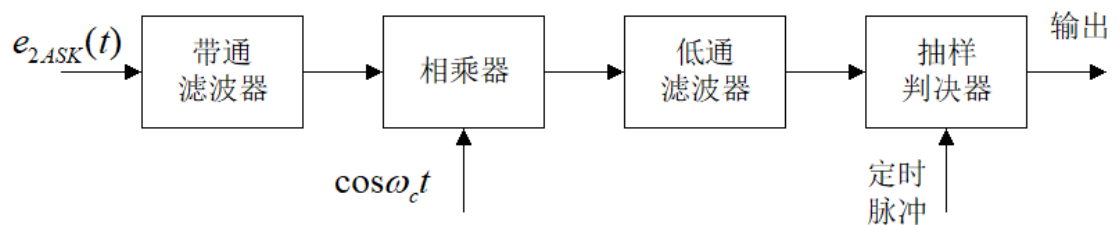
$$e_{2ASK}(t) = s(t)\cos\omega_c t \quad (2)$$

- 其中s(t)是单极性不归零信号
- 注意如何画波形，调幅直接载波-信号波相乘
- s(t) 是一个单极性不归零信号( $\tau/T_b = 1$ )
- 一个 $T_b$  内画波数  $f_c/R_B = f_c \cdot T_b$
- 知识点2：信号产生的方法（左侧为模拟调制-乘法器、右侧为键控法）
- 知识点3：信号解调方法

- 非相干解调（包络检波:全波整流器+低通）



- 相干解调（同步检测：相乘器+低通）



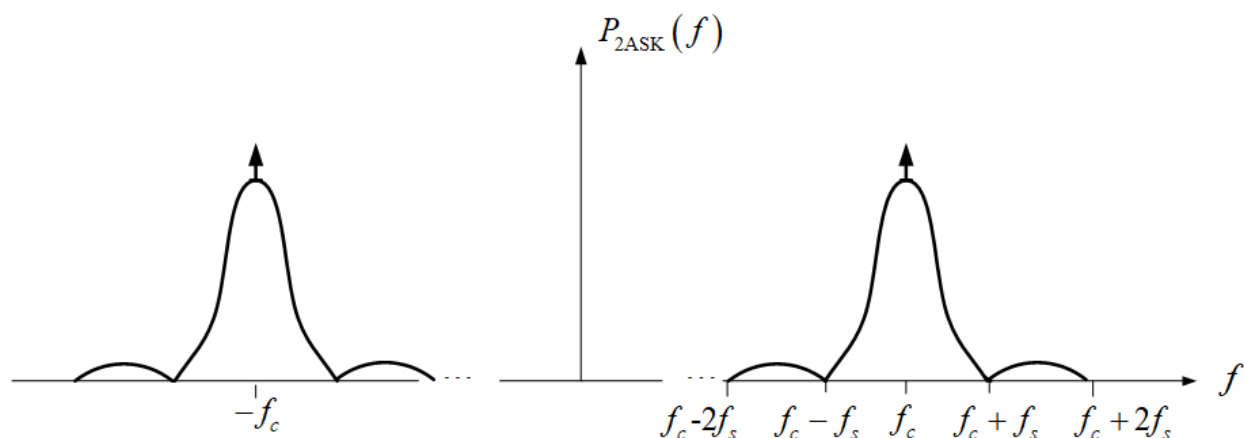
- （重点）知识点4：功率谱密度

$$P_{2ASK}(f) = \frac{1}{4}[P_s(f + f_c) + P_s(f - f_c)] \quad (3)$$

- 大小下降了1/4,频谱主要看,SA函数的第一个零点永远是 $1/\tau$

$$B_{2ASK} = 2B_{\text{基}} = 2R_B \quad (4)$$

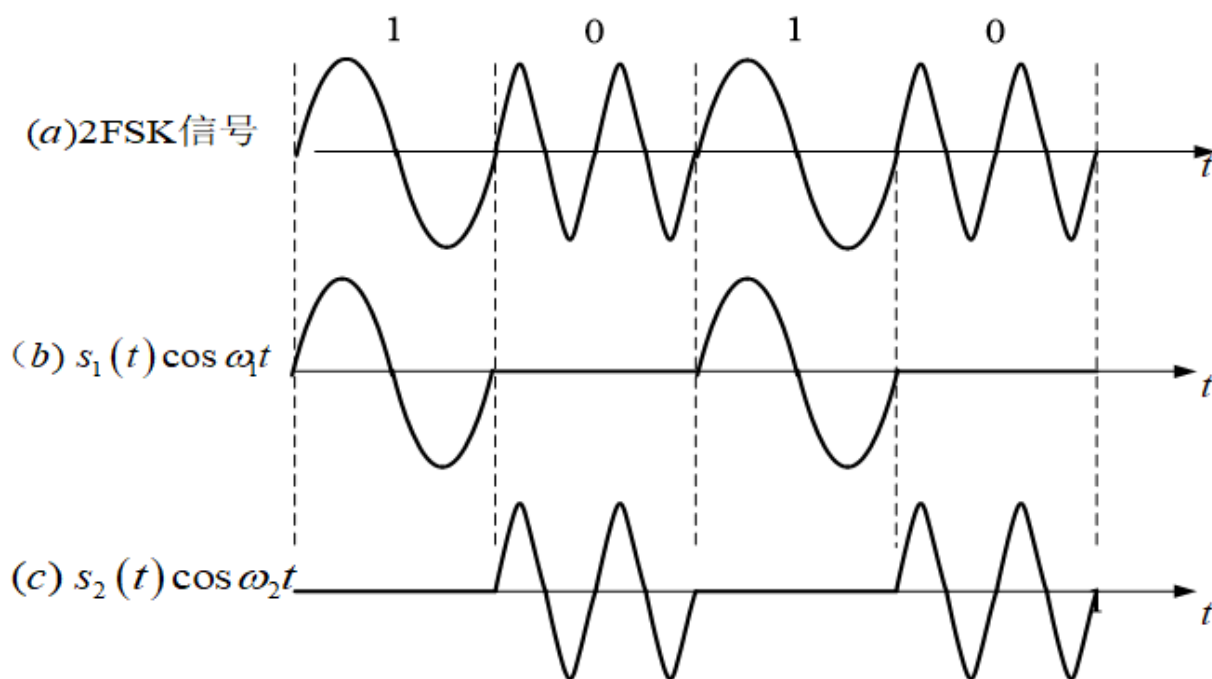
•



## 二进制频移键控(2FSK)

- 基本原理：基带信号在两个频率点间变化

$$e_{2FSK}(t) = \begin{cases} A \cos(\omega_1 t + \varphi_n) & , \text{发送 "0"} \\ A \cos(\omega_2 t + \varphi_n) & , \text{发送 "1"} \end{cases}$$



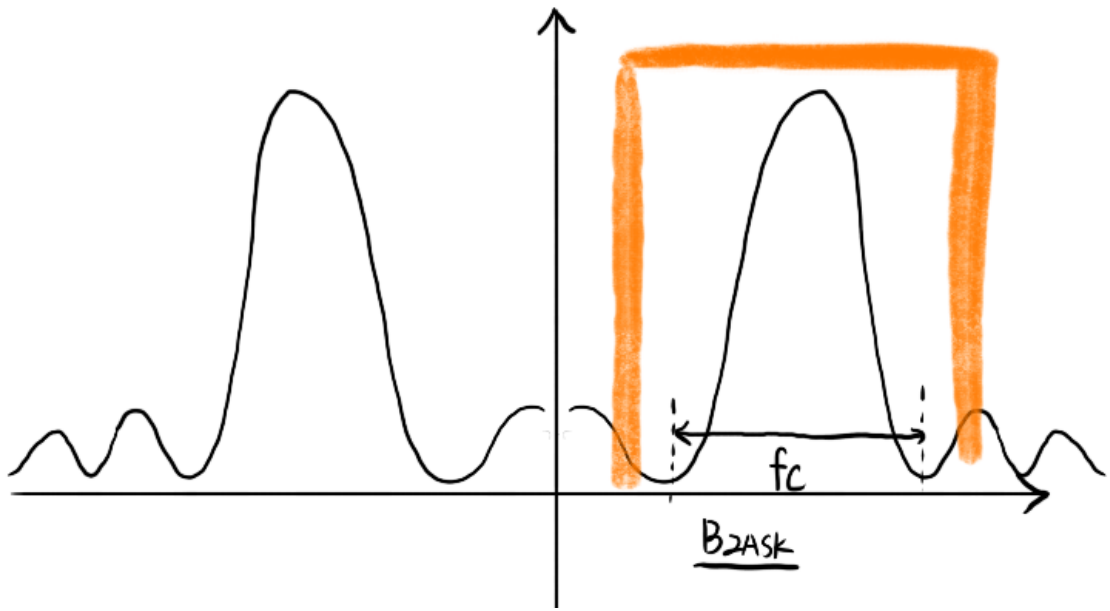
- 我们可以将2FSK看成两个ASK的叠加,可以通过键控法实现, 简化表达式如下:

$$\begin{aligned} e_{2FSK}(t) &= s_1(t) \cos \omega_1 t + s_2(t) \cos \omega_2 t \\ s_1(t) &= \sum a_n g(t - nT_s) \quad s_2(t) = \sum_n \bar{a}_n g(t - nT_s) \end{aligned} \quad (5)$$

对应的功率谱密度表达式:

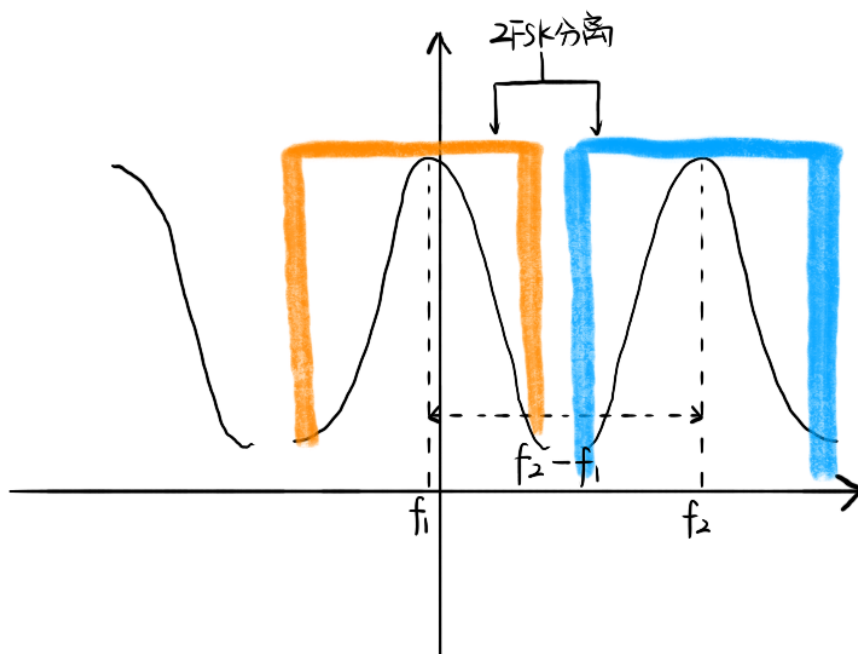
$$P_{2FSK}(f) = \frac{1}{4} [P_{s_1}(f - f_1) + P_{s_1}(f + f_1)] + \frac{1}{4} [P_{s_2}(f - f_2) + P_{s_2}(f + f_2)] \quad (6)$$

- 调幅



$$B_{2ASK} = 2B_{\text{基}} = 2\frac{1}{\tau} = 2\frac{1}{T_B} = 2R_B \quad (7)$$

- 调频



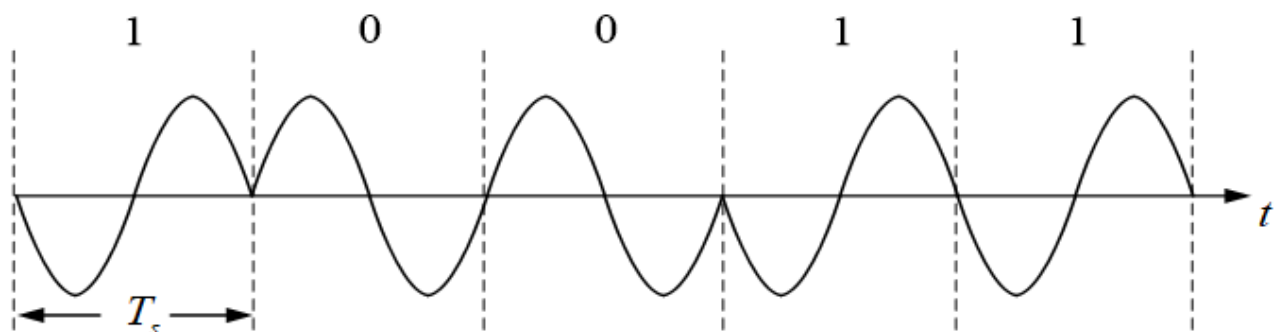
$$B_{2FSK} = |f_2 - f_1| + 2R_B \quad (8)$$

## 二进制相移键控(2PSK)

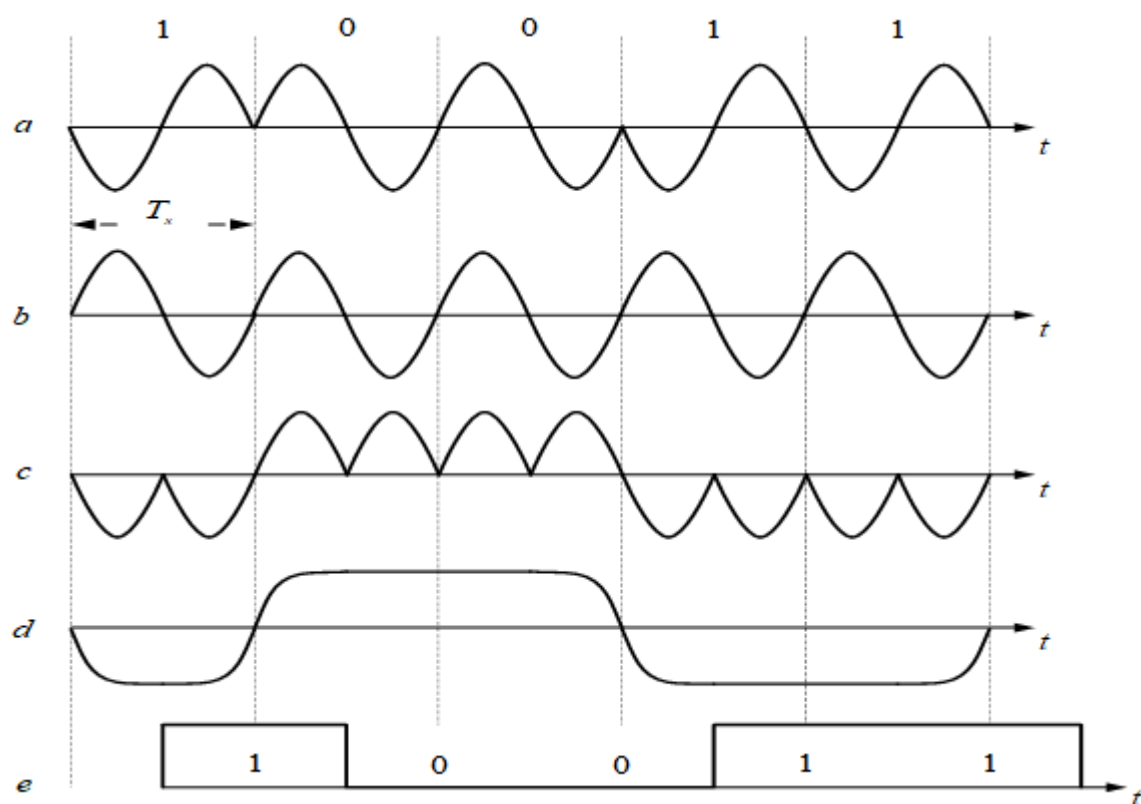
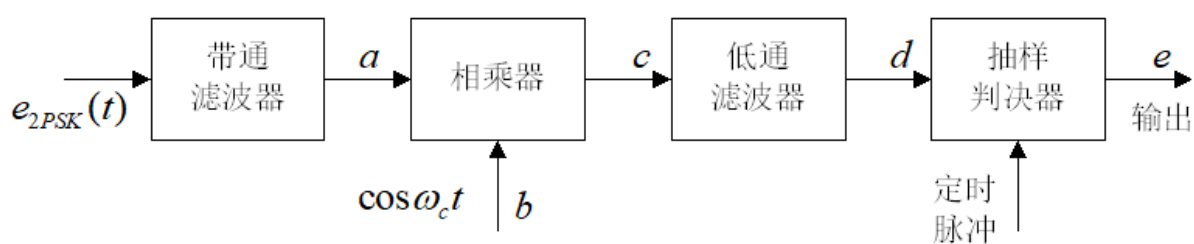
2PSK信号可以表示成双极性不归零信号与正弦载波相乘

$$\begin{aligned} e_{2psk}(t) &= s(t) \cos \omega_c t \\ s(t) &= \sum_n a_n g(t - nT_s) \end{aligned} \quad (9)$$

可以通过模拟调制、键控法实现，原理图如下所示：



• 解调原理图



○ 对应波形：sinx

- 1 对应180°
- 0对应0°

○ 没有判决门限，正判为0，负判为1，容易存在倒π现象/反相工作

○ 功率谱密度

$$P_{2PSK}(f) = \frac{1}{4} [P_s(f + f_c) + P_s(f - f_c)] \quad (10)$$

## 二进制差分相移键控(2DPSK)

- 能够有效解决倒 $\pi$ 现象，2DSK的相位差与信号对应关系：

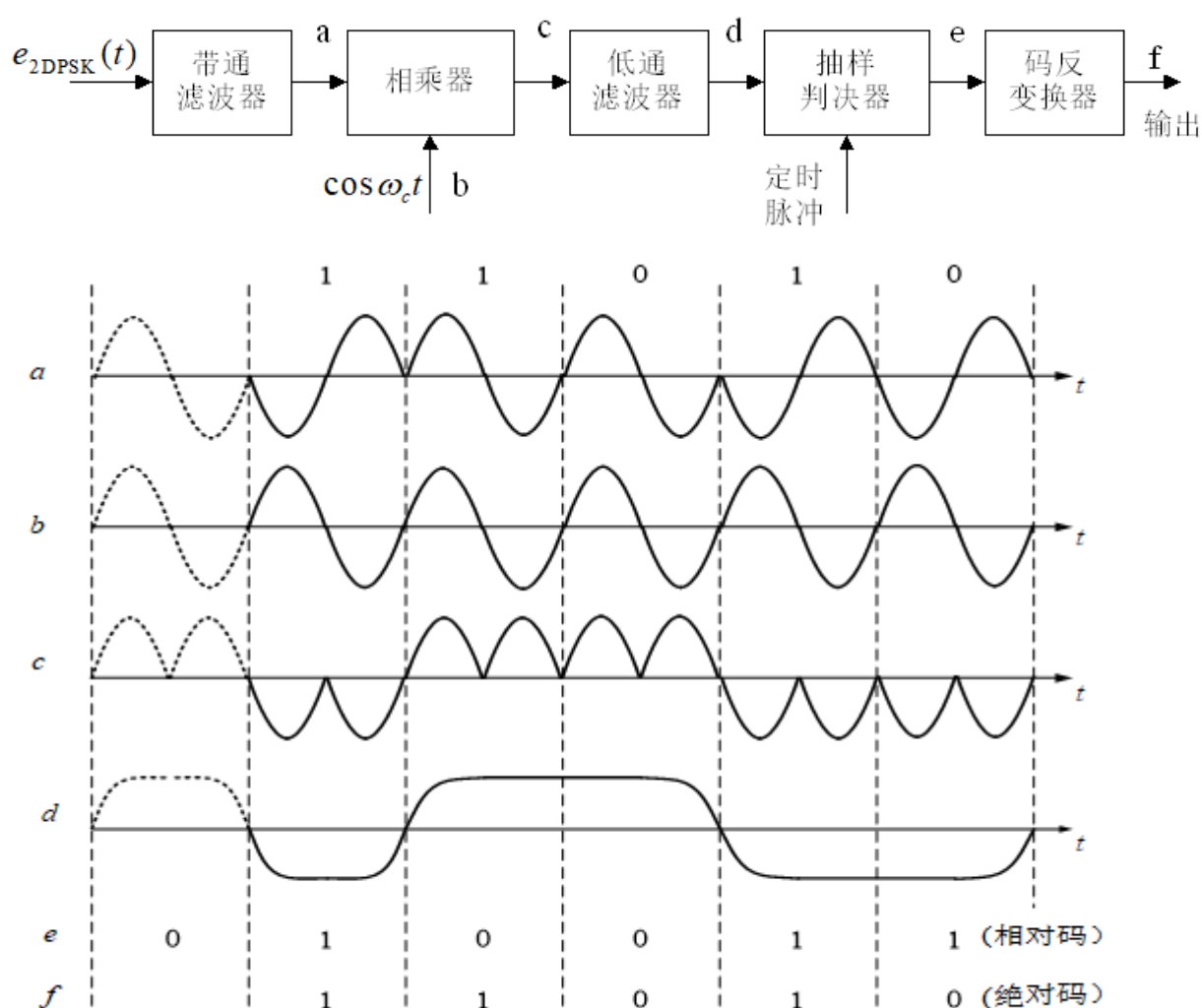
$$\Delta\varphi = \varphi_{\text{后}} - \varphi_{\text{前}} = \begin{cases} 0 & , \quad \text{信号 "0"} \\ \pi & , \quad \text{信号 "1"} \end{cases}$$

- 功率谱密度、信号带宽与2PSK一致

- 相对码画法

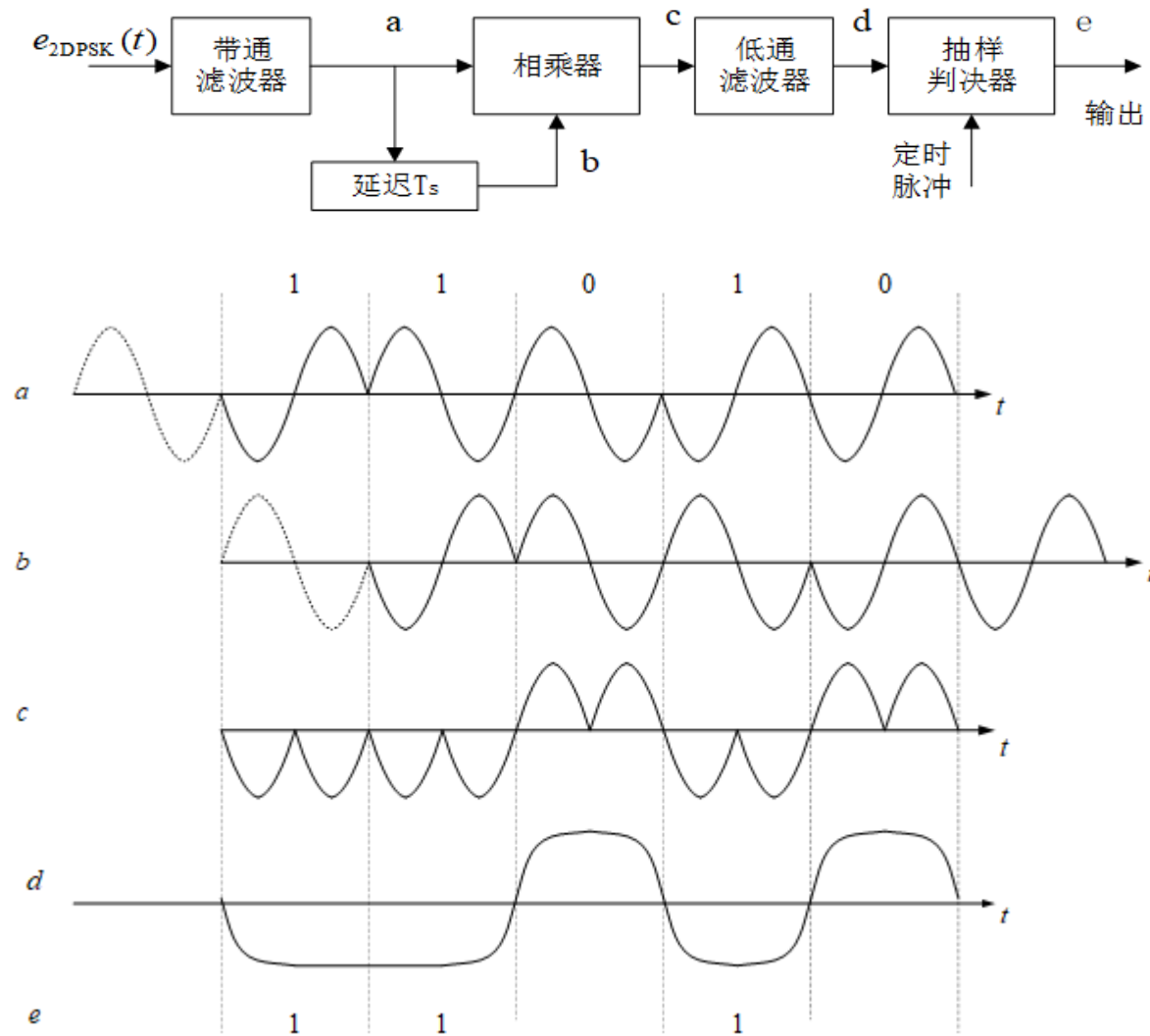
- 1.  $b_k = a_k \oplus b_{k-1}$
- 2. 二进制：一变零不变
- 3.  $\varphi_{\text{后}} = \varphi_{\text{前}} + \Delta\varphi$

- [相干解调] 原理图-波形图 (重点)



- [差分相干解调] 原理图、波形

- 可以直接还原出原始数字信息，不需要码反，按照相位判决



## 数字调制系统的抗噪声性能

### 2ASK

- 信噪比

$$r = \frac{S_i}{N_i} = \frac{a^2/2}{n_0 \cdot 2R_B} \quad (11)$$

- 同步检测（相干解调）误码率

$$P_e \approx \frac{1}{\sqrt{\pi r}} e^{-r/4} \quad (12)$$

- 包络检波解调误码率

$$P_e \approx \frac{1}{2} e^{-r/4} \quad (13)$$

### 2FSK

- 信道宽度

$$B = |f_2 - f_1| + 2R_B \tag{14}$$

- 相干解调的误码率

$$P_e \approx \frac{1}{\sqrt{2\pi r}} e^{-\frac{r}{2}} \tag{15}$$

- 包络检波的误码率

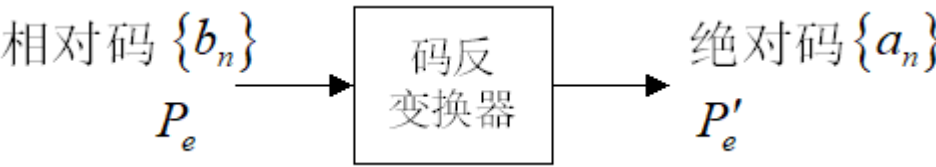
$$P_e = \frac{1}{2} e^{-r/2} \tag{16}$$

### 2PSK

- 相干解调总误码率

$$P_e \approx \frac{1}{2\sqrt{\pi r}} e^{-r} \tag{17}$$

### 2DPSK



- 相干解调总误码率计算

$$P'_e = 2(1 - P_e) P_e \tag{18}$$

- 反变换器总是使误码率增加，增加的系数在1~2范围内
- 差分相干解调总误码率

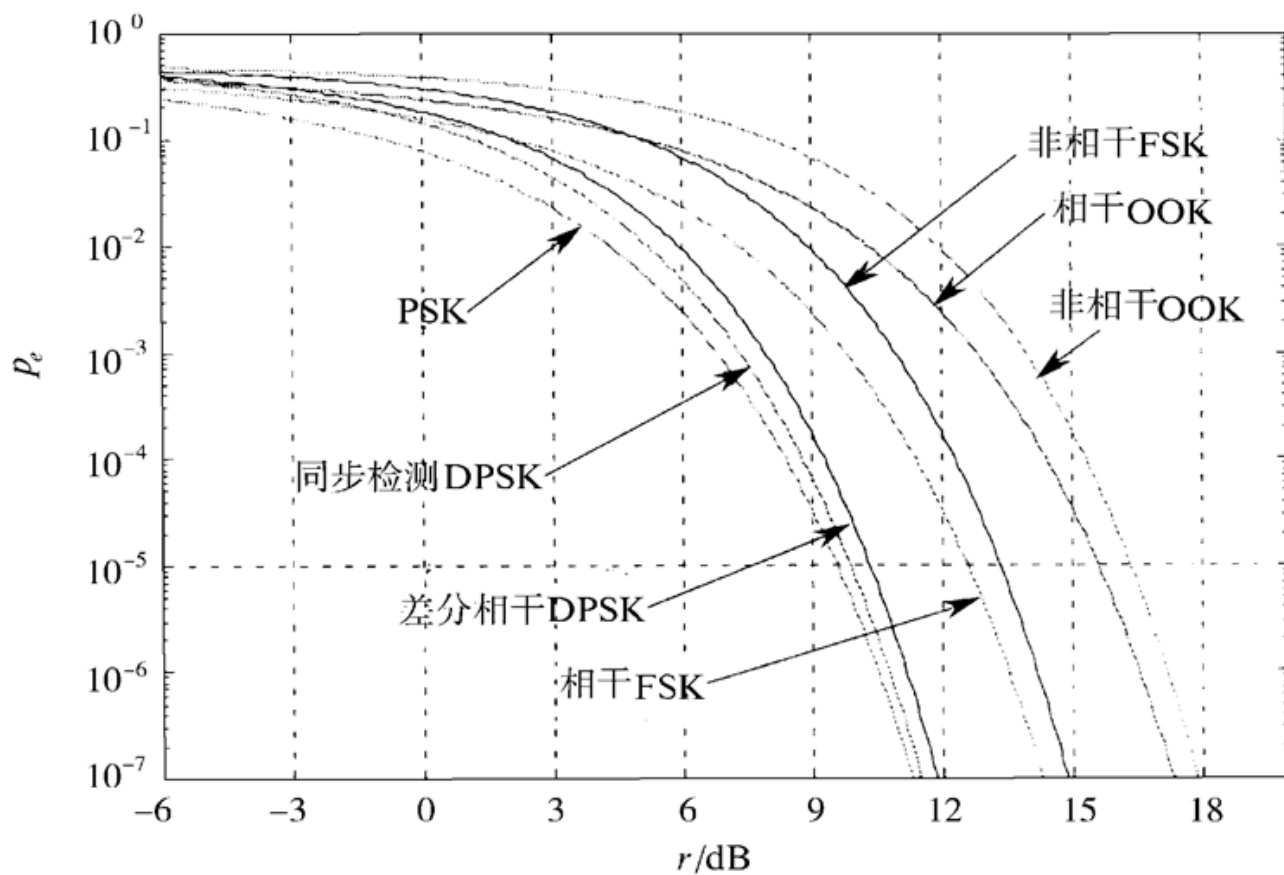
$$P_e = \frac{1}{2} e^{-r} \tag{19}$$

## 二进制数字调制系统的比较

系统类型	带宽	相干解调	近似公式	非相干解调
2ASK	$2R_B$	$\frac{1}{2} \operatorname{erfc}(\sqrt{\frac{r}{4}})$	$\frac{1}{\sqrt{\pi r}} e^{-r/4}$	$\frac{1}{2} e^{-r/4}$
2FSK	$2R_B +  f_2 - f_1 $	$\frac{1}{2} \operatorname{erfc}(\sqrt{\frac{r}{2}})$	$\frac{1}{\sqrt{2\pi r}} e^{-\frac{r}{2}}$	$\frac{1}{2} e^{-r/2}$
2PSK	$2R_B$	$\frac{1}{2} \operatorname{erfc}(\sqrt{r})$	$\frac{1}{2\sqrt{\pi r}} e^{-r}$	— —
2DPSK	$2R_B$	$P'_e = 2(1 - P_e) P_e$	同左侧公式	$\frac{1}{2} e^{-r}$

- 误码率曲线





#### • 结论

- 相干解调下,  $r$ 相同时, 满足

$$P_{e2PSK} < P_{e2DPSK} < P_{eFSK} < P_{eASK} \quad (20)$$

- $r$ 相同时

$$P_{e\text{相干}} < P_{e\text{非相干}} \quad (21)$$

#### • 信道变化的敏感性

- 2FSK系统对信道变化不敏感
- 2ASK对信道变化敏感, 性能最差

## 多进制振幅键控 (MASK) (不考)

- 公式参考二进制的公式
- 信道

$$B_{MASK} = B_{MDSK} = B_{MDPSK} = 2R_{BM} \quad (22)$$

## 例题

- 例1: 2ASK信号

**[例7.2.1]** 设有一2ASK信号传输系统，其码元速率为 $R_B = 4.8 \times 10^6$ 波特，发“1”和发“0”的概率相等，接收端分别采用同步检测法和包络检波法解调。已知接收端输入信号的幅度 $a = 1$  mV，信道中加性高斯白噪声的单边功率谱密度 $n_0 = 2 \times 10^{-15}$  W/Hz。试求

(1) 同步检测法解调时系统的误码率；

(2) 包络检波法解调时系统的误码率。

**【解】** (1) 根据2ASK信号的频谱分析可知，2ASK信号所需的传输带宽近似为码元速率的两倍，所以接收端带通滤波器带宽为

$$B = 2R_B = 9.6 \times 10^6 \text{ Hz}$$

带通滤波器输出噪声平均功率为

$$\sigma_n^2 = n_0 B = 1.92 \times 10^{-8} \text{ W}$$

$$\text{信噪比为 } r = \frac{a^2}{2\sigma_n^2} = \frac{1 \times 10^{-6}}{2 \times 1.92 \times 10^{-8}} \approx 26 \gg 1$$

63

于是，同步检测法解调时系统的误码率为

$$P_e \approx \frac{1}{\sqrt{\pi r}} e^{-r/4} = \frac{1}{\sqrt{3.1416 \times 26}} \times e^{-6.5} = 1.66 \times 10^{-4}$$

包络检波法解调时系统的误码率为

$$P_e = \frac{1}{2} e^{-r/4} = \frac{1}{2} e^{-6.5} = 7.5 \times 10^{-4}$$

可见，在大信噪比的情况下，包络检波法解调性能接近同步检测法解调性能。

- [例7.2.2] 采用2FSK方式在等效带宽为2400Hz的传输信道上传输二进制数字。2FSK信号的频率分别为 $f_1 = 980 \text{ Hz}$ ,  $f_2 = 1580 \text{ Hz}$ , 码元速率 $R_B = 300 \text{ B}$ 。接收端输入（即信道输出端）的信噪比为6dB。试求：

$$R_B = f_s$$

- (1) 2FSK信号的带宽；
- (2) 包络检波法解调时系统的误码率；
- (3) 同步检测法解调时系统的误码率。

【解】 (1) 根据式(7.1-22), 该2FSK信号的带宽为

$$B_{2\text{FSK}} = |f_2 - f_1| + 2f_s = 1580 - 980 + 2 \times 300 = 1200 \text{ Hz}$$

(2) 由于误码率取决于带通滤波器输出端的信噪比。由于FSK接收系统中上、下支路带通滤波器的带宽近似为

$$B = 2f_s = 2R_B = 600 \text{ Hz}$$

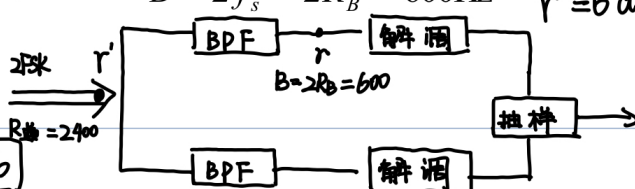
$$r' = 6 \text{ dB} \rightarrow 10^{0.6} = 4$$

77

$$\begin{aligned} r' &= 4 = \frac{S'}{N'} \\ &= \frac{a^2/2}{n_0 \cdot B_{\text{道}}} \end{aligned}$$

$$r = \frac{S}{N} = \frac{a^2/2}{n_0 \cdot 2R_B}$$

$$B_{\text{道}} = 4(2R_B) \Rightarrow r = 4, r' = 16$$



它仅是信道等效带宽 (2400Hz) 的1/4, 故噪声功率也减小了1/4, 因而带通滤波器输出端的信噪比比输入信噪比提高了4倍。又由于接收端输入信噪比为6dB, 即4倍, 故带通滤波器输出端的信噪比应为

$$r = 4 \times 4 = 16$$

将此信噪比值代入误码率公式, 可得包络检波法解调时系统的误码率

$$P_e = \frac{1}{2} e^{-r/2} = \frac{1}{2} e^{-8} = 1.7 \times 10^{-4}$$

(3) 同理可得同步检测法解调时系统的误码率

$$P_e \approx \frac{1}{\sqrt{2\pi r}} e^{-\frac{r}{2}} = \frac{1}{\sqrt{32\pi}} e^{-8} = 3.39 \times 10^{-5}$$

□ [例7.2.3] 假设采用2DPSK方式在微波线路上传送二进制数字信息。已知码元速率 $R_B = 10^6$  B, 信道中加性高斯白噪声的单边功率谱密度 $n_0 = 2 \times 10^{-10}$  W/Hz。

今要求误码率不大于 $10^{-4}$ 。试求

- (1) 采用差分相干解调时, 接收机输入端所需的信号功率;
- (2) 采用相干解调-码反变换时, 接收机输入端所需的信号功率。

【解】 (1) 接收端带通滤波器的带宽为

$$B = 2R_B = 2 \times 10^6 \text{ Hz}$$

其输出的噪声功率为

$$\sigma_n^2 = n_0 B = 2 \times 10^{-10} \times 2 \times 10^6 = 4 \times 10^{-4} \text{ W}$$

所以, 2DPSK采用差分相干接收的误码率为

$$P_e = \frac{1}{2} e^{-r} \leq 10^{-4}$$

94

求解可得  $r \geq 8.52$

又因为  $r = a^2 / 2\sigma_n^2$

所以, 接收机输入端所需的信号功率为

$$\frac{a^2}{2} \geq 8.52 \times \sigma_n^2 = 8.52 \times 4 \times 10^{-4} = 3.4 \times 10^{-3} \text{ W}$$

(2) 对于相干解调-码反变换的2DPSK系统,

$$P'_e \approx 2P_e = 1 - \text{erf}(\sqrt{r})$$

根据题意有  $P'_e \leq 10^{-4}$

因而  $1 - \text{erf}(\sqrt{r}) \leq 10^{-4}$

即  $\text{erf}(\sqrt{r}) \geq 1 - 10^{-4} = 0.9999$

查误差函数表, 可得  $\sqrt{r} \geq 2.75$   $r \geq 7.56$

由 $r = a^2 / 2\sigma_n^2$ , 可得接收机输入端所需的信号功率为

$$\frac{a^2}{2} \geq 7.56 \times \sigma_n^2 = 7.56 \times 4 \times 10^{-4} = 3.02 \times 10^{-3} \text{ W}$$

95