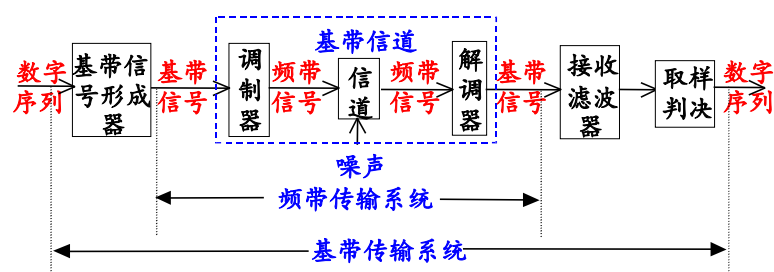


## 第七章

### 数字带通传输系统

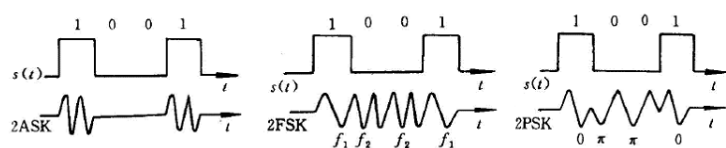
#### 7.1 引言

##### ■ 数字传输系统



##### ■ 数字调制

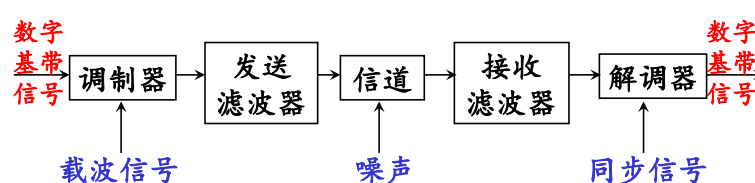
- 数字基带信号调制到正弦载波上，使载波的某个参量（振幅、频率、相位）载有基带信号的信息



## 主要内容

- 二进制数字调制/解调原理
- 二进制数字调制系统的抗噪性能
- 多进制数字调制原理及抗噪性能
- 要解决的问题
  - 调制解调方法
  - 抗噪性能分析

##### ■ 数字调制系统



## 7.2 二进制数字调制原理

- 二进制振幅键控2ASK (OOK - 通断键控)
- 二进制移频键控2FSK
- 二进制移相键控2PSK
- 二进制差分移相键控2DPSK

## 二进制振幅键控 (2ASK)

### 假设

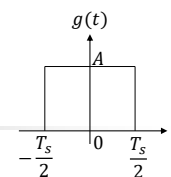
- $\{a_n\}$  表示一个二元码的随机序列

$$a_n = \begin{cases} 1 & p \\ 0 & 1-p \end{cases}$$

- $g(t)$  为基带信号波形，是一个持续时间为  $T_s$  的矩形脉冲，幅度为  $A$

- 由此构成一个 **单极性不归零** 的随机脉冲序列，作为 **数字基带信号**，记作：

$$s(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} a_n g(t - nT_s)$$



### 调制原理

- 2ASK 是利用载波振幅的有无表示 1 和 0

- 数字基带信号  $s(t) = \sum_n a_n g(t - nT_s)$

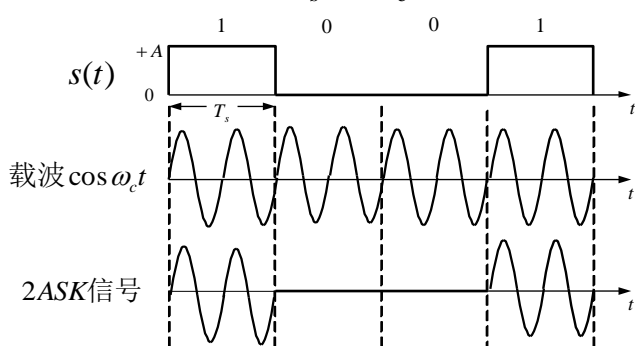
- 载波  $\cos \omega_c t$

- 2ASK 信号：

$$e_o(t) = s(t) \cos \omega_c t$$

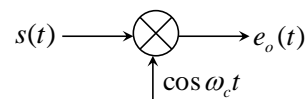
$$= \begin{cases} A \cos \omega_c t & p \text{ ( "1" )} \\ 0 & 1-p \text{ ( "0" )} \end{cases} \quad 0 \leq t \leq T_s$$

### 波形 (设 $T_s = 2T_c$ )

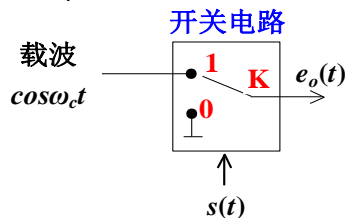


## 2ASK 信号产生

### 模拟调制法



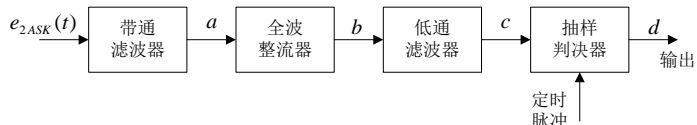
### 数字键控法



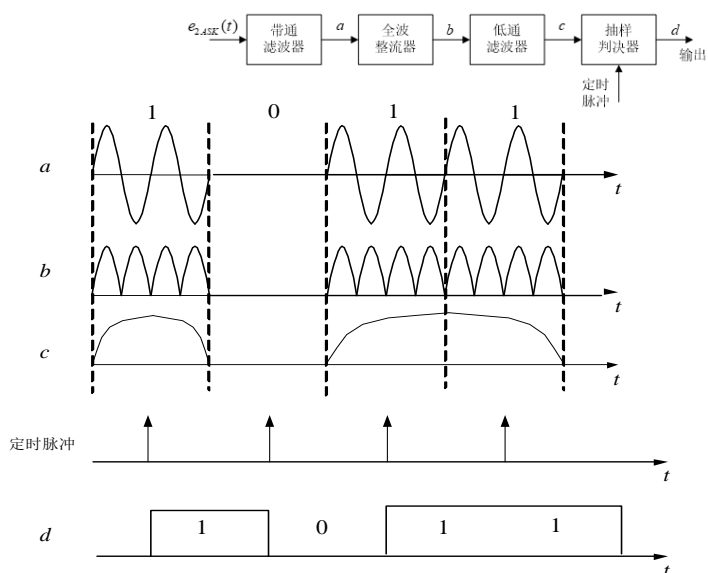
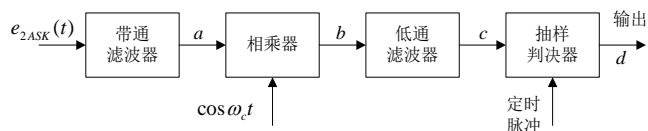
2ASK 也称 OOK, 即通断键控

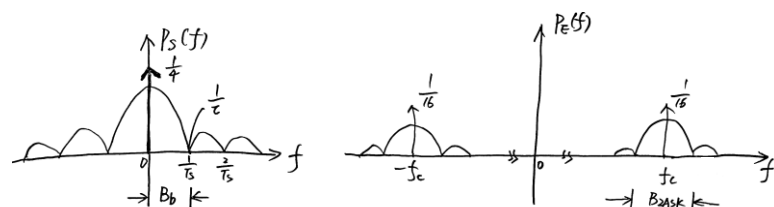
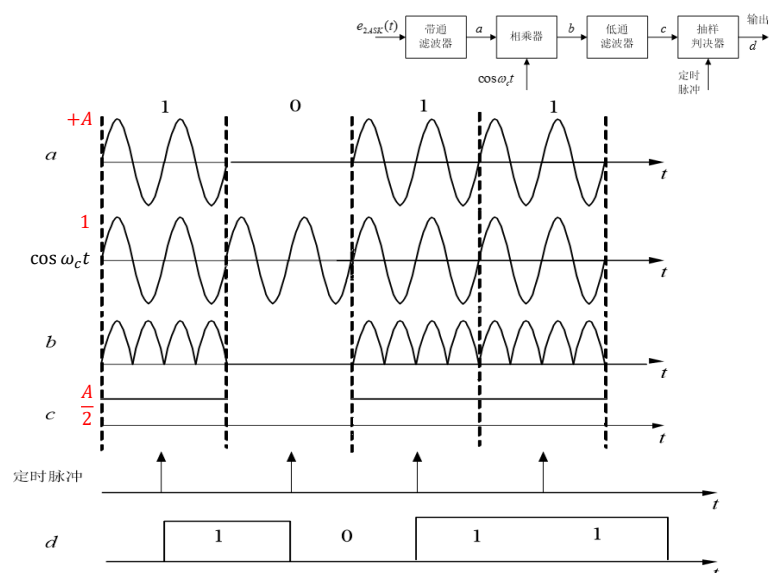
## 2ASK 解调

### 非相干解调 (包络检波)



### 相干解调 (同步检测)





$\eta_{2ASK} = \frac{R_b}{B_{2ASK}}$  取决于基带信号波形,  $R_b = \frac{1}{T_s}$  与基带信号相同.

基带波形: 单极性不归零.  $B_{2ASK} = 2B_b = 2 \cdot \frac{1}{T_s} = 2 \cdot \frac{1}{T_s}$ ,  $\eta_{2ASK} = \frac{1}{2}$

半占空单极性归零,  $B_{2ASK} = 2B_b = 2 \cdot \frac{1}{2T_s} = \frac{1}{T_s}$ ,  $\eta_{2ASK} = \frac{1}{4}$

理想抽样,  $B_{2ASK} = 2B_b = 2 \cdot \frac{1}{2T_s} = \frac{1}{T_s}$ ,  $\eta_{2ASK} = 1$

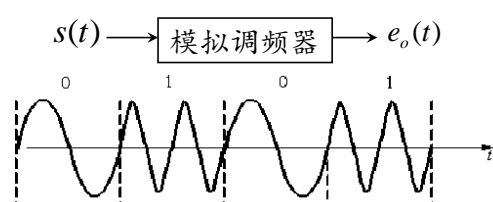
(alpha=1) 升余弦,  $B_{2ASK} = 2B_b = 2 \cdot \frac{1}{T_s} = \frac{2}{T_s}$ ,  $\eta_{2ASK} = \frac{1}{2}$

## 二进制移频键控 (2FSK)

- 利用载波的不同频率表示0和1

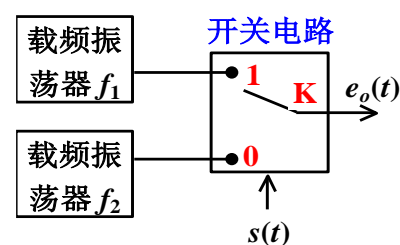
### 2FSK信号产生

- 基带信号  $s(t)$  为单极性不归零码序列
- 模拟调频法



### 键控法

$$e_o(t) = \begin{cases} A \cos(\omega_1 t + \phi_1) & \text{发送 "1"} \\ A \cos(\omega_2 t + \phi_2) & \text{发送 "0"} \end{cases}$$



- 2FSK信号的相位在相邻码元之间不一定连续

## 2ASK信号功率谱

$$e_o(t) = s(t) \cos \omega_c t$$

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

- 当基带信号  $s(t)$  为单极性不归零码序列, 0、1等概时,  $s(t)$  的功率谱

$$P_s(f) = \frac{1}{4} T_s S_a^2(\pi f T_s) + \frac{1}{4} \delta(f)$$

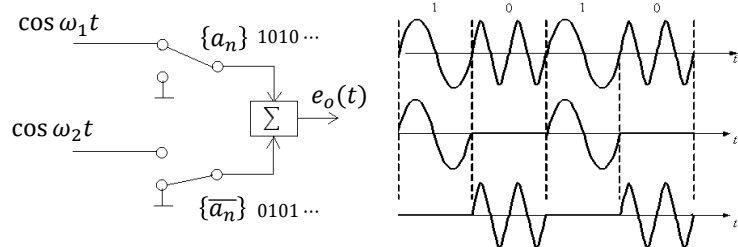
- $e_o(t)$  的功率谱

$$P_E(f) = \frac{T_s}{16} \{ S_a^2[\pi(f + f_c)T_s] + S_a^2[\pi(f - f_c)T_s] \} + \frac{1}{16} [\delta(f + f_c) + \delta(f - f_c)]$$

## 结论

- 2ASK功率谱做线性搬移, 形成双边带谱
- 2ASK信号带宽为基带信号带宽的2倍  
 $s(t)$  取谱零点带宽为  $B_b = 1/\tau$ ,  $B_{2ASK} = 2B_b$
- 有较大载频分量, 调制效率低
- 2ASK码元速率 = 基带信号码元速率
- 频带利用率取决于基带信号波形

## ■ 2FSK信号可以看作是两个2ASK信号的叠加



## ■ 功率谱

- 2FSK信号可以看作是两个2ASK信号的叠加
- 设载波初始相位均为0，载频分别为 $f_1$ 和 $f_2$

$$e_o(t) = \sum_n a_n g(t - nT_s) \cos \omega_1 t + \sum_n \bar{a}_n g(t - nT_s) \cos \omega_2 t$$

$$a_n = \begin{cases} 1 & p \\ 0 & 1-p \end{cases}$$

$$\bar{a}_n = \begin{cases} 0 & p \\ 1 & 1-p \end{cases} \quad \bar{a}_n \text{ 是 } a_n \text{ 的反码}$$

## ■ 2FSK信号功率谱

$$P_E(f) = \frac{1}{4} [P_{S1}(f + f_1) + P_{S1}(f - f_1)] + \frac{1}{4} [P_{S2}(f + f_2) + P_{S2}(f - f_2)]$$

- 基带信号为0、1等概单极性不归零码时

$$P_E(f) = \frac{T_s}{16} \{ Sa^2[\pi(f + f_1)T_s] + Sa^2[\pi(f - f_1)T_s] + Sa^2[\pi(f + f_2)T_s] + Sa^2[\pi(f - f_2)T_s] \} + \frac{1}{16} [\delta(f + f_1) + \delta(f - f_1) + \delta(f + f_2) + \delta(f - f_2)]$$

## ■ 结论

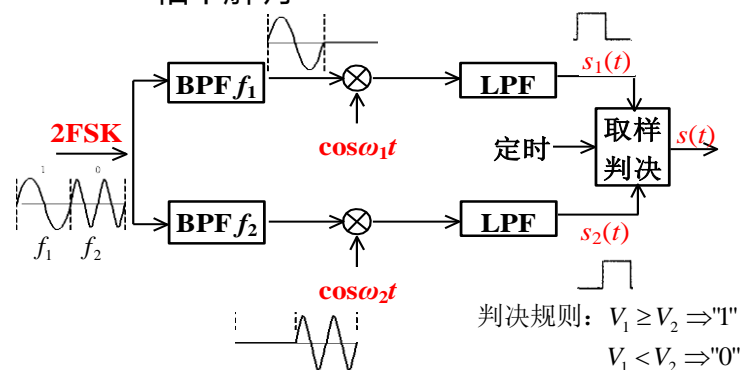
- 2FSK信号的功率谱由连续谱和离散谱组成，连续谱由两个中心位于 $f_1$ 和 $f_2$ 处的双边谱叠加，离散谱位于两个载频 $f_1$ 和 $f_2$ 处
- 连续谱的形状随着两个载频之差的大小而变：
  - 当 $|f_2 - f_1| \geq 2B_b$ ，连续谱无交叠
  - 当 $|f_2 - f_1| < 2B_b$ ，连续谱有交叠
- 2FSK信号带宽： $B_{2FSK} = |f_2 - f_1| + 2B_b$

## ■ 2FSK解调

- 相干解调法
- 非相干解调法
  - 包络检波法
  - 过零检测法
  - \*差分检测法
  - \*模拟鉴频法

## ■ 相干解调

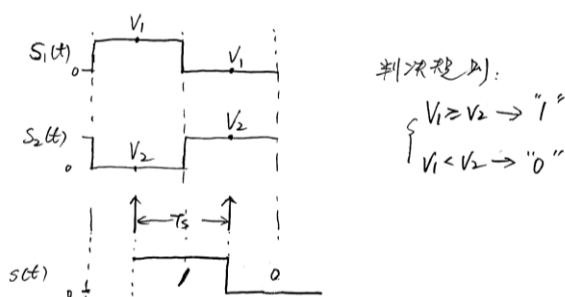
抽样判决时不设置门限值，比较两路信号抽样值大小



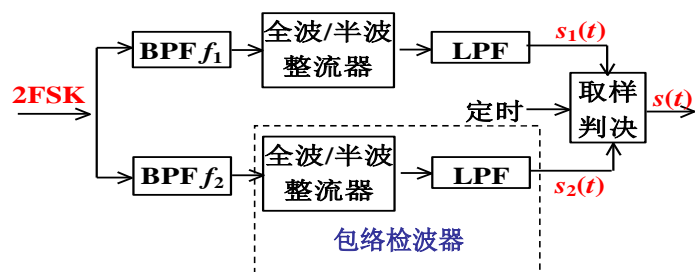
在一个码元周期内,  $\begin{cases} A \cos \omega_c t & "1" \\ 0 & "0" \end{cases}$  上边路 2ASK

(X):  $A \cos \omega_c t \cdot \cos \omega_c t = A \cos^2 \omega_c t = \frac{A}{2} (1 + \cos 2\omega_c t)$   
 LPF:  $\frac{A}{2}$

判决时上下支路波形交替:



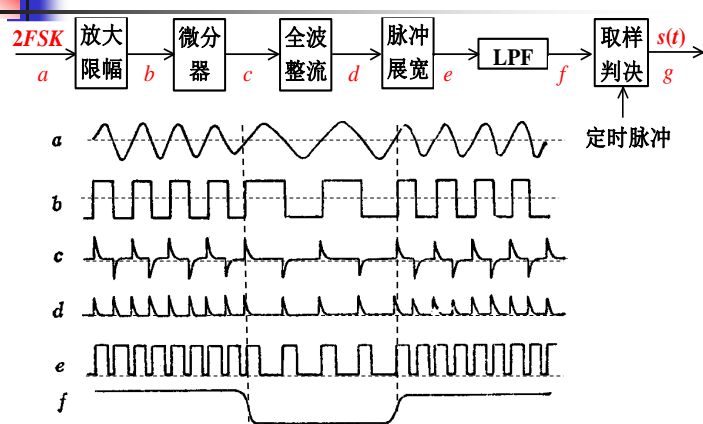
■ 包络检波  
 抽样判决时不设置门限值, 比较两路信号抽样值大小



判决规则:  $V_1 \geq V_2 \Rightarrow "1"$   
 $V_1 < V_2 \Rightarrow "0"$

$\cos(\omega_c t + \varphi_n)$

## ■ 过零检测



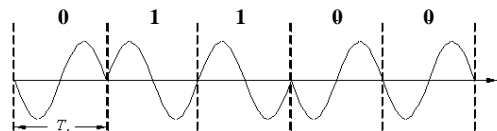
## ■ 二进制移相键控 (2PSK)

■ 利用载波的不同相位表示0和1, 2PSK也称  
 绝对移相键控

### ■ 调制原理

■  $\varphi_n$  表示第n个码元的绝对相位

$$\varphi_n = \begin{cases} 0 & \text{发送 "1"} \\ \pi & \text{发送 "0"} \end{cases}$$



\* 每个码元周期必须包含整数个载波周期, 即: 每个码元的起始相位与其结束相位相同

■ 设基带信号  $s(t)$  为双极性不归零码序列

$$s(t) = \sum_n a_n g(t - nT_s)$$

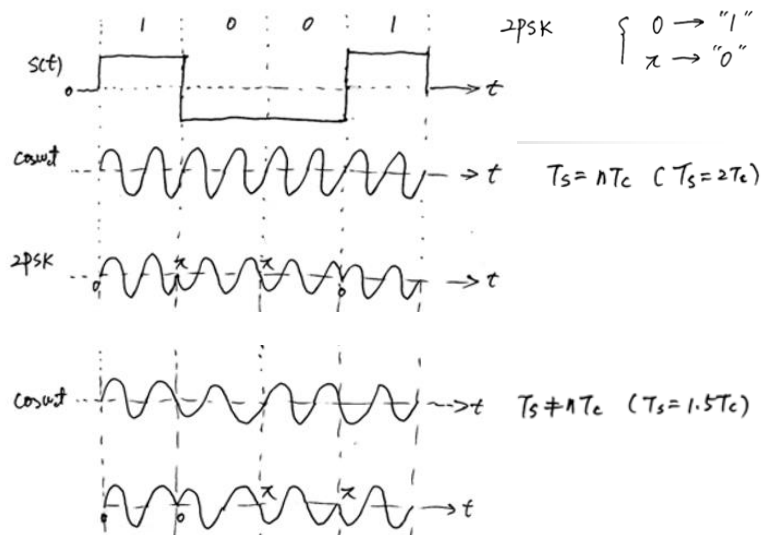
$$a_n = \begin{cases} +A & p, \text{ 发 "1"} \\ -A & 1-p, \text{ 发 "0"} \end{cases}$$

■ 载波  $\cos \omega_c t$ , 设初始相位为0

■ 2PSK信号  $e_o(t) = s(t) \cos \omega_c t$

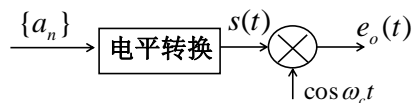
$$= \begin{cases} A \cos \omega_c t & \text{发 "1"} \\ A \cos(\omega_c t + \pi) & \text{发 "0"} \end{cases}$$
  

$$= -A \cos \omega_c t$$

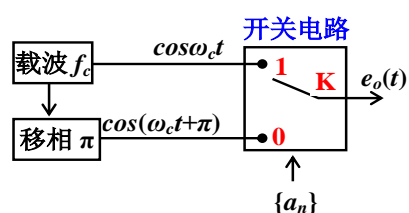


## 2PSK信号产生

### ■ 模拟调制法

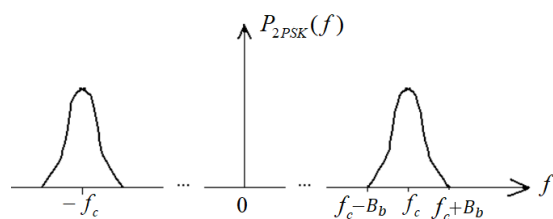


### ■ 键控法



## 结论

- 2PSK可看作是双极性不归零的基带信号进行双边带抑制载波调制
- 带宽为基带信号的2倍，即：  $B_{2PSK} = 2B_b$



## 功率谱

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

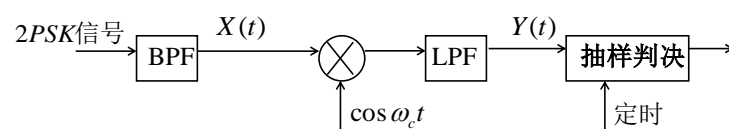
- $s(t)$ 为双极性不归零矩形脉冲序列，0、1等概时， $s(t)$ 的功率谱  $P_s(f) = T_s S_a^2(\pi f T_s)$

### ■ 2PSK的功率谱

$$P_E(f) = \frac{T_s}{4} \{ S_a^2[\pi(f + f_c)T_s] + S_a^2[\pi(f - f_c)T_s] \}$$

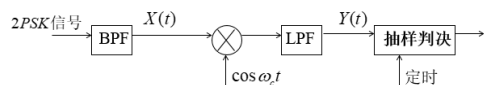
## 2PSK解调

### ■ 相干解调法



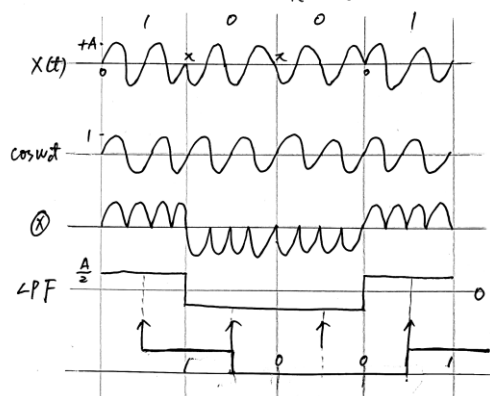
判决门限为0

- 存在相位模糊问题



2PSK解调

$\varphi_n = \begin{cases} 0 & \text{"1"} \\ \pi & \text{"0"} \end{cases}$



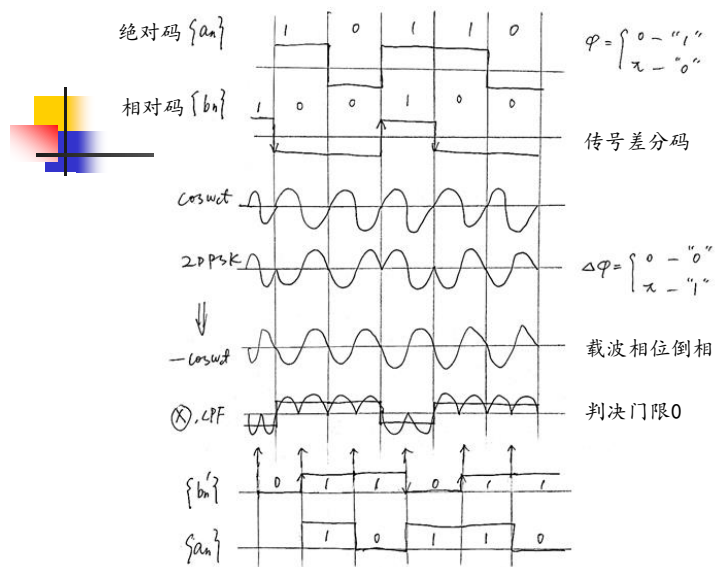
## 二进制差分移相键控 (2DPSK)

- 利用前后码元相位的相对变化表示0和1，与载波的初始相位无关，也称**相对移相键控**

### ■ 调制原理

$$\Delta\varphi = \begin{cases} 0 & \text{发送 "0", 同相} \\ \pi & \text{发送 "1", 倒相} \end{cases}$$

- 用前后码元的相位差表示0和1，以前一码元的末相位作为参考相位



参考相位：对于2PSK指载波相位；  
对于2DPSK指前一码元相位

## 2DPSK信号矢量图



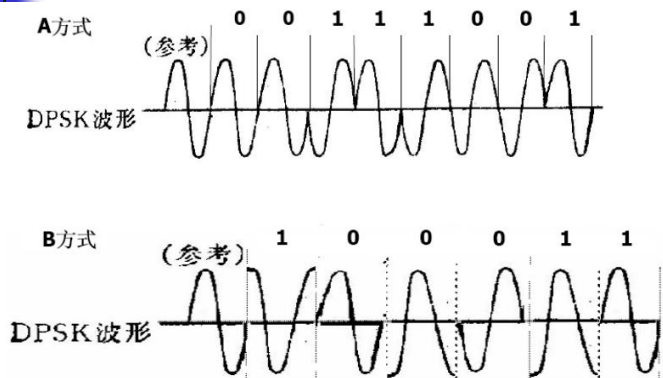
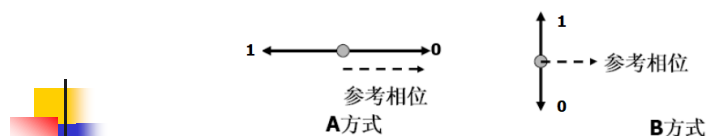
■ 设参考相位（前一码元）均为0

A方式：

$$\Delta \varphi = \begin{cases} 0 & \text{发 "0" 同相} \\ \pi & \text{发 "1" 倒相} \end{cases}$$

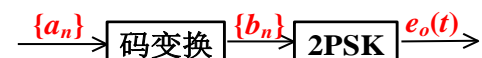
B方式：

$$\Delta \varphi = \begin{cases} -\pi/2 & \text{发 "0" 后移} \\ \pi/2 & \text{发 "1" 前移} \end{cases}$$



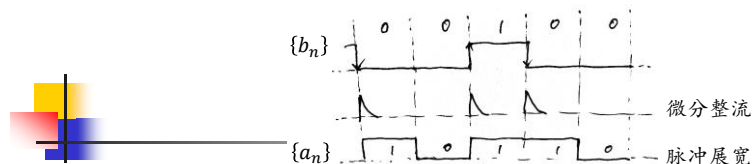
## 2DPSK信号产生

■ 码变换+2PSK移相键控



## 功率谱

■ 与2PSK完全相同， $B_{2DPSK} = 2B_b$

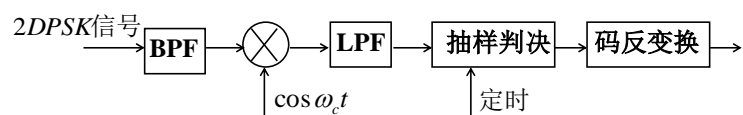


## 2DPSK解调

■ 相干解调法

■ 2PSK相干解调+码反变换

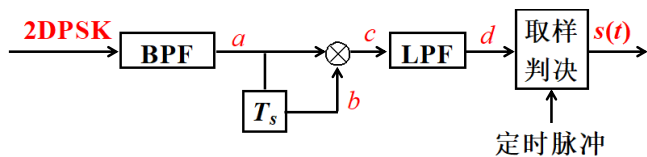
■ 码反变换：微分器→全波整流→脉冲展宽



判决门限为0

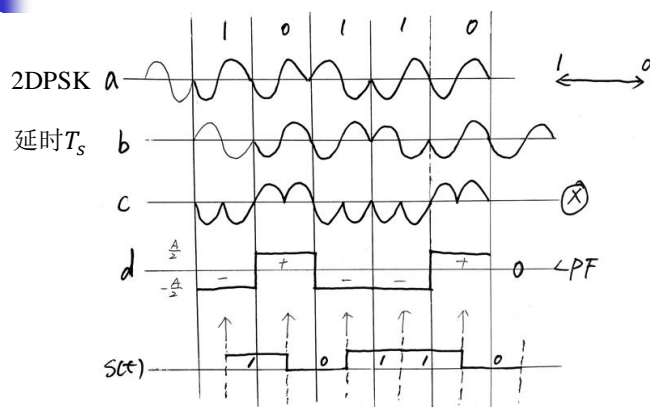
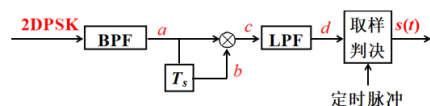
## 相位比较法

■ 差分相干解调



■ 判决：+ → 0，- → 1 判决门限为0





## 7.3 二进制数字调制系统抗噪性能

### ■ 指标：误码率

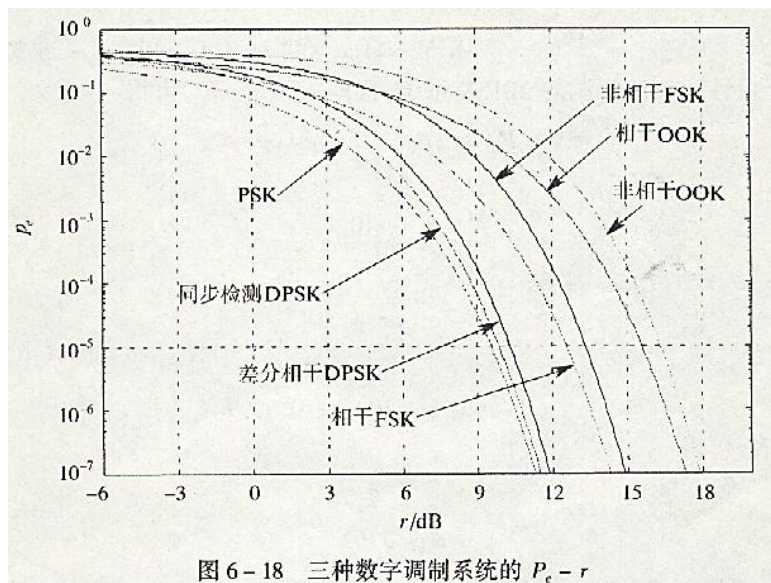
#### ■ 误码率与信噪比的关系

- 系统信噪比越高，误码率越低
- 对同一系统，相干解调比包络检波误码率略低，抗噪性稍好

发"1"码的信噪比

$$\frac{S_i}{N_i} = \frac{a^2}{2\sigma_n^2} = r$$

- 从带宽和频带利用率上来看，2ASK、2PSK、2DPSK的有效性相同，2FSK最低



## 7.5 多进制数字调制系统

### ■ 目的：提高频带利用率

- 若以  $\eta_b = R_b / B$  表示频带利用率， $R_b = R_B \log_2 M$  当  $R_B$  不变，带宽  $B$  相同时，通过增加进制数  $M$ ，可以增大  $R_b$ ，从而在相同带宽内传输多个比特的信息，因而  $\eta_b$  高
- 当  $R_b$  相同时，通过增加进制数  $M$ ，可以降低  $R_B$ ，从而减小信号带宽，节约频带资源
- 代价：相同信噪比时，多进制调制系统抗噪性低于二进制系统；要保持与二进制系统相同的抗噪性能，需要更大的发射信号功率

## 一. 多电平调制MASK

### ■ 原理

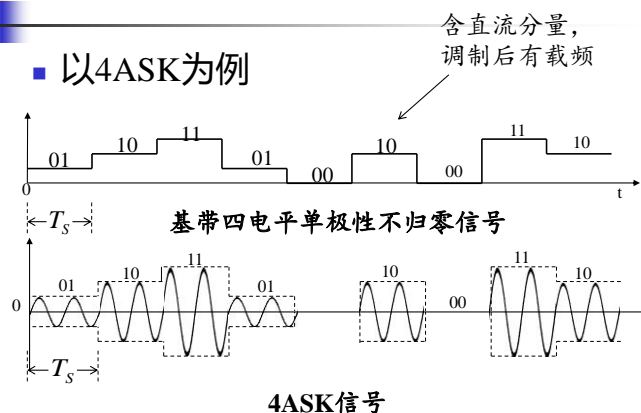
- 设  $M$  电平信号的码元宽度为  $T_s$ ，基带波形为  $g(t)$ ，则MASK信号可以表示为

$$e_o(t) = \left[ \sum_n b_n g(t - nT_s) \right] \cos \omega_c t$$

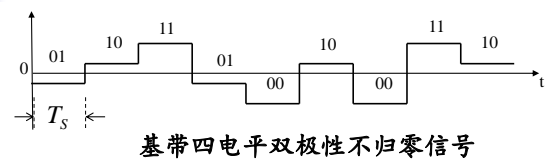
矩形脉冲  
不归零波

$$b_n = \begin{cases} d_1 & P_1 \\ d_2 & P_2 \\ \vdots & \vdots \\ d_M & P_M \end{cases} \quad \sum_{i=1}^M P_i = 1$$

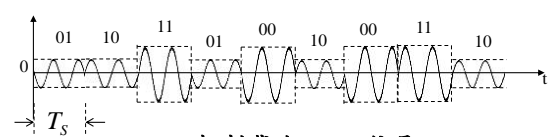
### ■ 以4ASK为例







基带四电平双极性不归零信号



抑制载波4ASK信号

(调制效率高，不能用包络检波解调，只能用相干解调)

## 频域特性

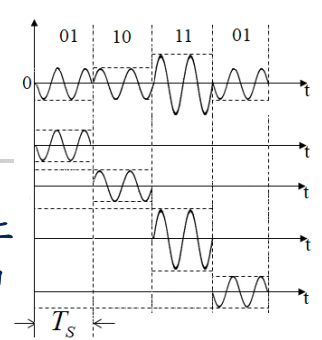
- MASK可以看成是时间上不重叠的M个不同幅度的2ASK信号叠加

- 基带信号s(t)为M进制不归零矩形波

$$e_{MASK}(t) = s(t) \cos \omega_c t$$

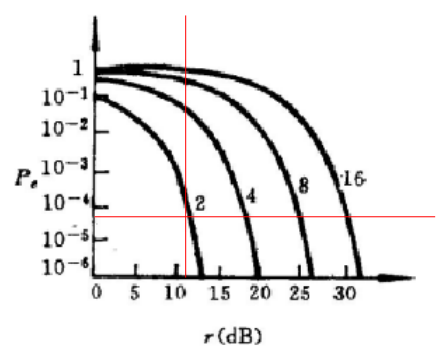
$$P_{MASK}(f) = \frac{1}{4} [P_s(f + f_c) + P_s(f - f_c)]$$

$$B_{MASK} = B_{2ASK} = 2B_b \quad \text{码元速率相同时}$$



## MASK抗噪性能

- 误码率 $P_e$ 与进制数M和信噪比r的关系



## 结论

- 优点：若MASK信号的带宽和2ASK信号的带宽相同，则单位频带的信息传输速率(bps)高，即频带利用率高
- 缺点：判决门限多，抗噪性能差
- MASK系统牺牲可靠性换取有效性

## 二. 多相调制MPSK/MDPSK

- 设M进制信号码元宽度为 $T_s$ ，M种码元用M种相位值 $\varphi_k$ 表示，则在一个码元持续期间 $T_s$ 内，多相调制信号可表示为：

$$\begin{aligned} e_o(t) &= \cos(\omega_c t + \varphi_k) \quad k = 1 \cdots M \\ &= \cos \varphi_k \cos \omega_c t - \sin \varphi_k \sin \omega_c t \\ &= I_k \cos \omega_c t - Q_k \sin \omega_c t \end{aligned}$$

- MPSK可看作是2个MASK信号之和，其带宽应与MASK相同，是多电平基带信号的2倍

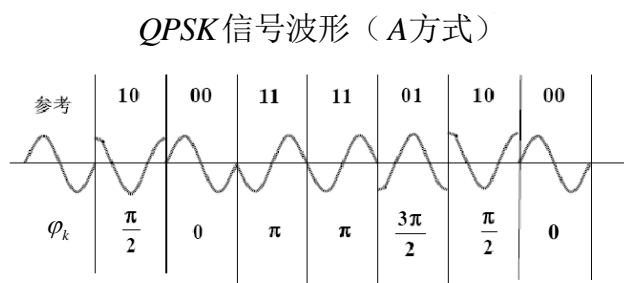
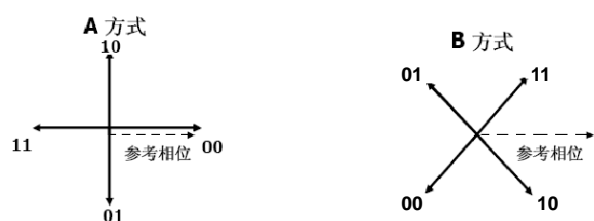
## 1. 四相绝对移相键控4PSK (QPSK)

- 用载波的4种不同相位表示四进制码元，每一种相位可表示2bit信息

- QPSK两种编码方式及矢量图

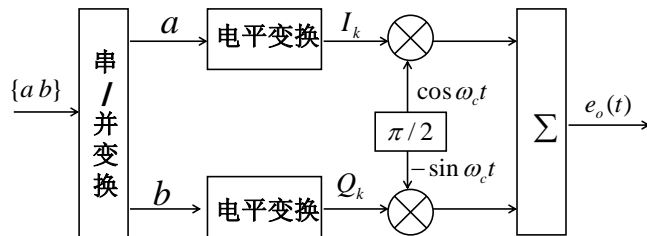
双比特码元		相位差 $\varphi_k$			
a	b	A方式		B方式	
0	0	0°	0	225°	-3π/4
1	0	90°	π/2	315°	-π/4
1	1	180°	π	45°	π/4
0	1	270°	-π/2	135°	3π/4

- 以载波相位为参考相位



## QPSK信号产生 (B方式)

### ■ 调相法 (QPSK正交调制)



- QPSK可看作两个正交的2PSK调制合成
- QPSK带宽为四电平基带信号带宽的2倍



## ■ 电平变换

- 二进制码元“1”→双极性不归零脉冲“+1”
- 二进制码元“0”→双极性不归零脉冲“-1”

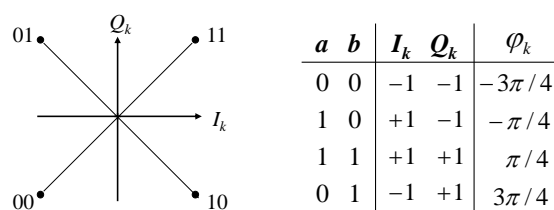
$$e_o(t) = I_k \cos \omega_c t - Q_k \sin \omega_c t$$

$$= \sqrt{I_k^2 + Q_k^2} \cos(\omega_c t + \varphi_k)$$

## ■ 此正交载波实现B方式调相



## ■ 正交调制合成矢量



正交调制基本原理:

① 4PSK信号在码元持续时间  $T_s$  内:  
(双比特码元)

$$e_o(t) = I_k \cos \omega_c t - Q_k \sin \omega_c t$$

$$= \sqrt{I_k^2 + Q_k^2} \cos(\omega_c t + \varphi_k)$$

② 电平变换

设  $\begin{cases} "1" \rightarrow "+1" & \text{双极性不归零脉冲} \\ "0" \rightarrow "-1" & \end{cases}$

ab	$I_k$	$Q_k$
00	-1	-1
10	+1	-1
11	+1	+1
01	-1	+1

③ 计算  $\varphi_k$  值

利用公式  $\begin{cases} \sin \omega_c t = \cos(\omega_c t - \frac{\pi}{2}) \\ -\sin \omega_c t = \cos(\omega_c t + \frac{\pi}{2}) \end{cases}$

$$e_o(t) = I_k \cos \omega_c t - Q_k \sin \omega_c t$$

当  $ab=11$  时  $I_k=+1, Q_k=+1$

$$e_o(t) = \cos \omega_c t - \sin \omega_c t$$

$$= \cos \omega_c t + \cos(\omega_c t + \frac{\pi}{2})$$

$$= \sqrt{2} \cos(\omega_c t + \frac{\pi}{4})$$

$$\therefore \varphi_k = \frac{\pi}{4}$$

ab	$I_k$	$Q_k$
00	-1	-1
10	+1	-1
11	+1	+1
01	-1	+1

同理:

当  $ab=01, I_k=-1, Q_k=+1$

$$\varphi_k = \frac{3\pi}{4}$$

$ab=00$

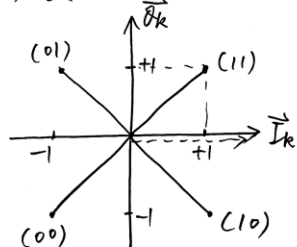
$$\varphi_k = -\frac{3\pi}{4}$$

$ab=10$

$$\varphi_k = -\frac{\pi}{4}$$

#### ④ 正交合成

$$e_o(t) = I_k \cos \omega t - Q_k \sin \omega t$$

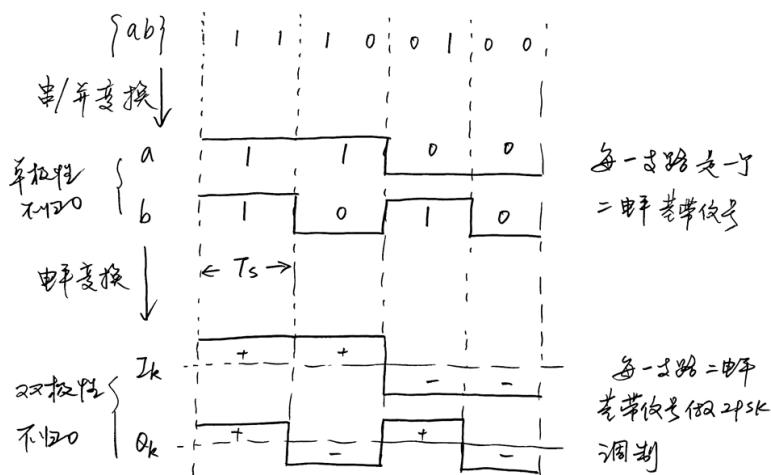


当正弦波为  $\cos \omega t$  和  $-\sin \omega t$  时, 实现B方式调制。  
 $\cos(\omega t + \frac{3}{2}\pi)$

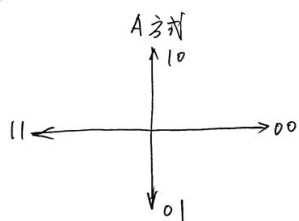
$ab$	$I_k Q_k$	$\phi_k$
00	-1 -1	$-\frac{3}{4}\pi$
10	+1 -1	$-\frac{\pi}{4}$
11	+1 +1	$\frac{\pi}{4}$
01	-1 +1	$\frac{3}{4}\pi$

#### ⑤ 正交调制波形

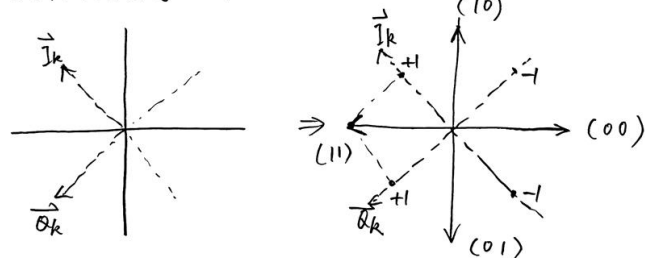
$$e_o(t) = I_k \cos \omega t - Q_k \sin \omega t$$



#### ⑥ A方式调制



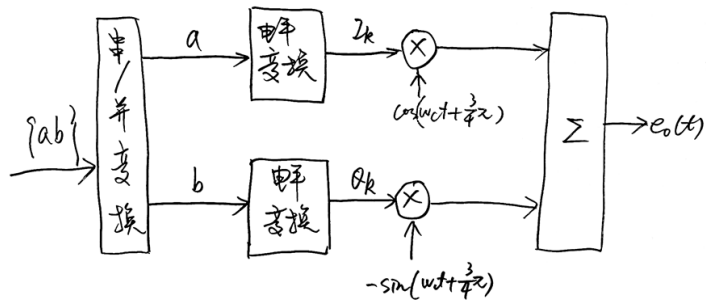
B方式矢量图逆时针转135°



#### ⑦ A方式 QPSK 调制原理图

$$I_k \cos(\omega t + \frac{3}{4}\pi) + Q_k \cos(\omega t - \frac{3}{4}\pi)$$

$$= I_k \cos(\omega t + \frac{3}{4}\pi) - Q_k \sin(\omega t + \frac{3}{4}\pi)$$

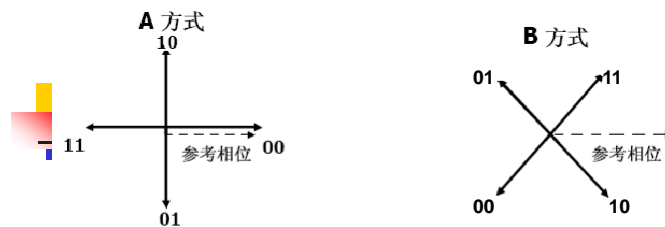


## 2. 四相相对移相键控 4DPSK (QDPSK)

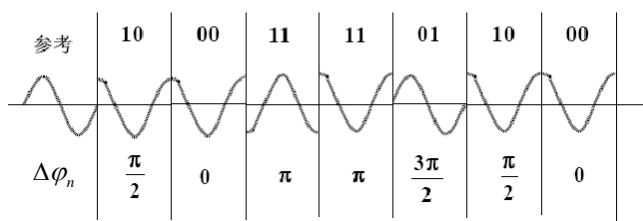
- 解决QPSK的相位模糊
- 利用前后码元相位差表示码元的值
- QDPSK两种编码方式

双比特码元		相位差 $\Delta\phi_n$	
$a$	$b$	A方式	B方式
0	0	$0^\circ$	$0$
1	0	$90^\circ$	$\pi/2$
1	1	$180^\circ$	$\pi$
0	1	$270^\circ$	$-\pi/2$

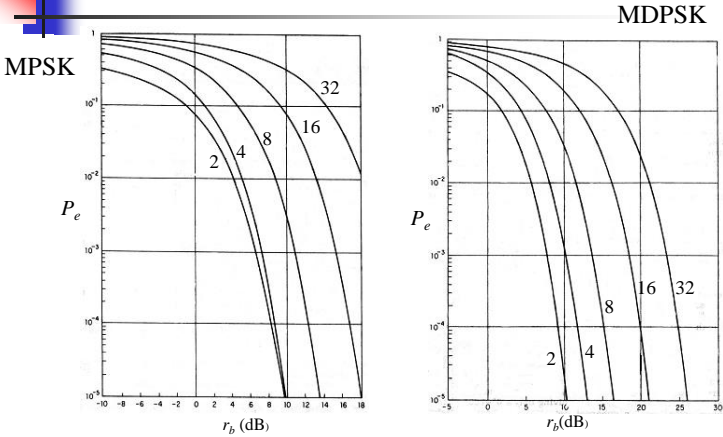
- 以前一码元相位为参考相位



QDPSK 信号波形 (A方式)



3. 多相调制抗噪性能



- 例：设信息码为01011000110100，设信息速率等于载波频率，画A方式的QPSK和QDPSK信号波形，参考相位为0°

双比特码元		$\varphi_k$ 或 $\Delta\varphi_k$
<i>a</i>	<i>b</i>	A方式
0	1	0°
0	0	90°
1	0	180°
1	1	270°

本章小结

- 数字调制系统的模型，及主要解决的问题
- 二进制调制系统的调制和解调原理、已调信号频域特性
- 二进制调制系统抗噪声性能结论
- 多进制调制的基本概念
- MASK调制基本概念
- QPSK正交调制原理，QPSK/QDPSK波形
- 多进制调制的抗噪性能结论

作业

- 结合PPT，阅读教材第七章内容
- 第七章习题
  - 1、2、3、13