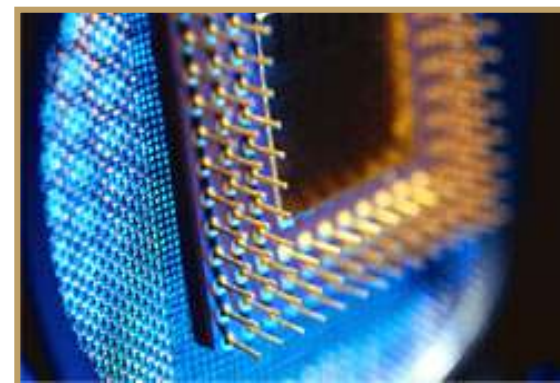
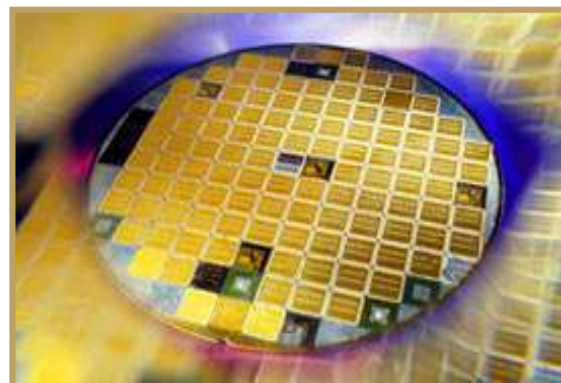




《VLSI数字通信原理与设计》课程

主讲人 贺光辉

# 第十一章：带通调制与解调



## ■ 多径衰落

多个子径信号所合成的信号，在不同的时间、地点上会时大时小

## ■ 多径衰落的影响

是产生码间串扰的根源，引起“地板效应”

## ■ 平衰落与频率选择性衰落的判断

基于多径时延扩展

平衰落  
信号带宽 < 相干带宽

频率选择性衰落  
信号带宽 > 相干带宽

## 码间串扰

- 有限的频谱资源，导致前后码元畸变产生拖尾
- 引起“地板效应”

## 满足无码间串扰的均衡器

$$\text{ISI} = \sum_{\substack{n=-\infty \\ n \neq k}}^{\infty} a_n h[(k-n)T_B] = 0$$

- 通过横向滤波器使得信号在抽样判决时刻取最大值，同时对临近脉冲影响最小
- 迫零法确定滤波器抽头系数
- 均衡器性能和复杂度需要权衡

## 无线信道的多普勒效应

波源和观察者之间的相对运动，使观察者感到频率发生变化

## 多普勒频移

$$f_d = \frac{v}{\lambda} \cos\theta$$

## 快衰落与慢衰落的判断

快衰落  
多普勒频移大  
相干时间 < 码元周期

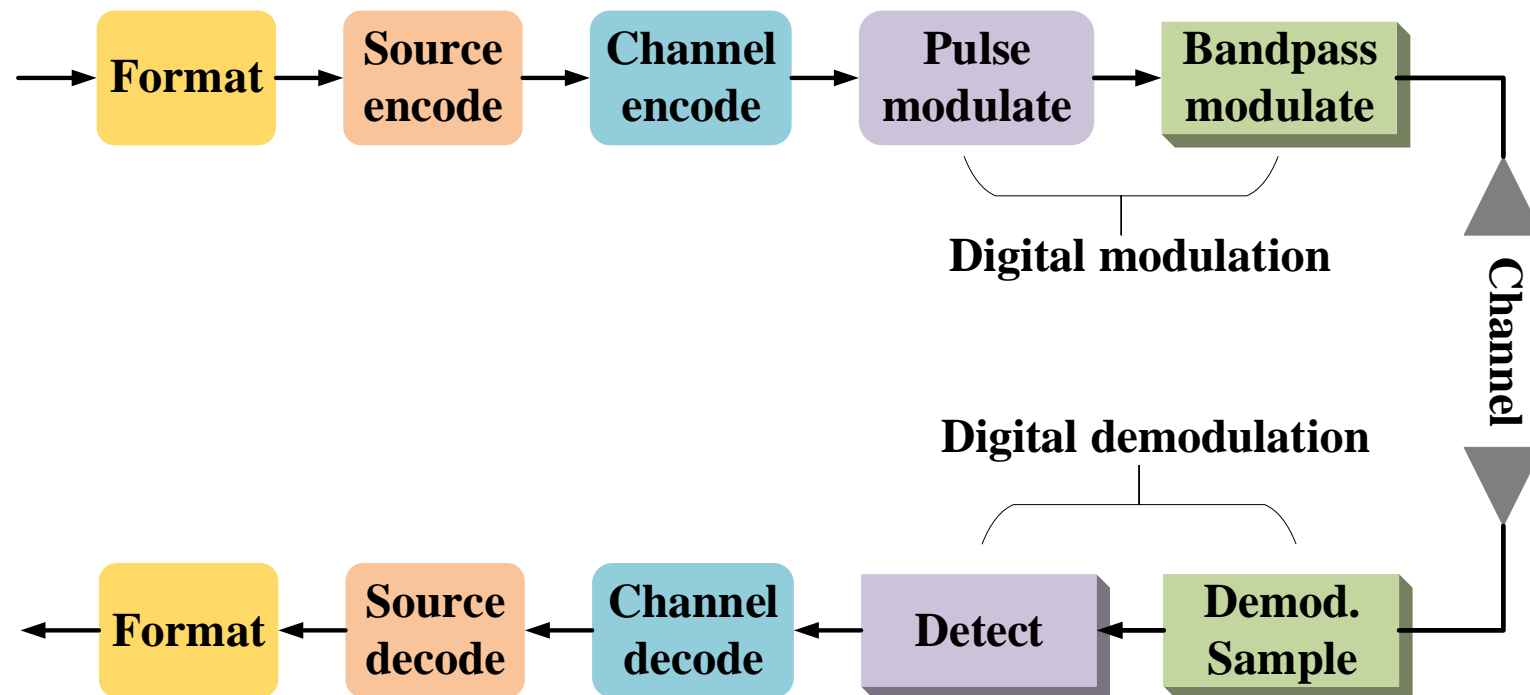
基于多普勒频移

慢衰落  
多普勒频移小  
相干时间 > 码元周期

## 快衰落的解决办法

频偏估计后校正

# 带通调制与解调



带通调制是根据消息信号改变正弦波形的一些特性的过程

调制将基带信号的频谱移位到某个高频

解调器能将波形恢复到基带



# 目 录

## 01 基本概念

---

- ## 02 数字带通调制技术

---

- ## 03 相干解调与非相干解调

---

## 04 M进制信号及其性能

---

## 05 总结

---

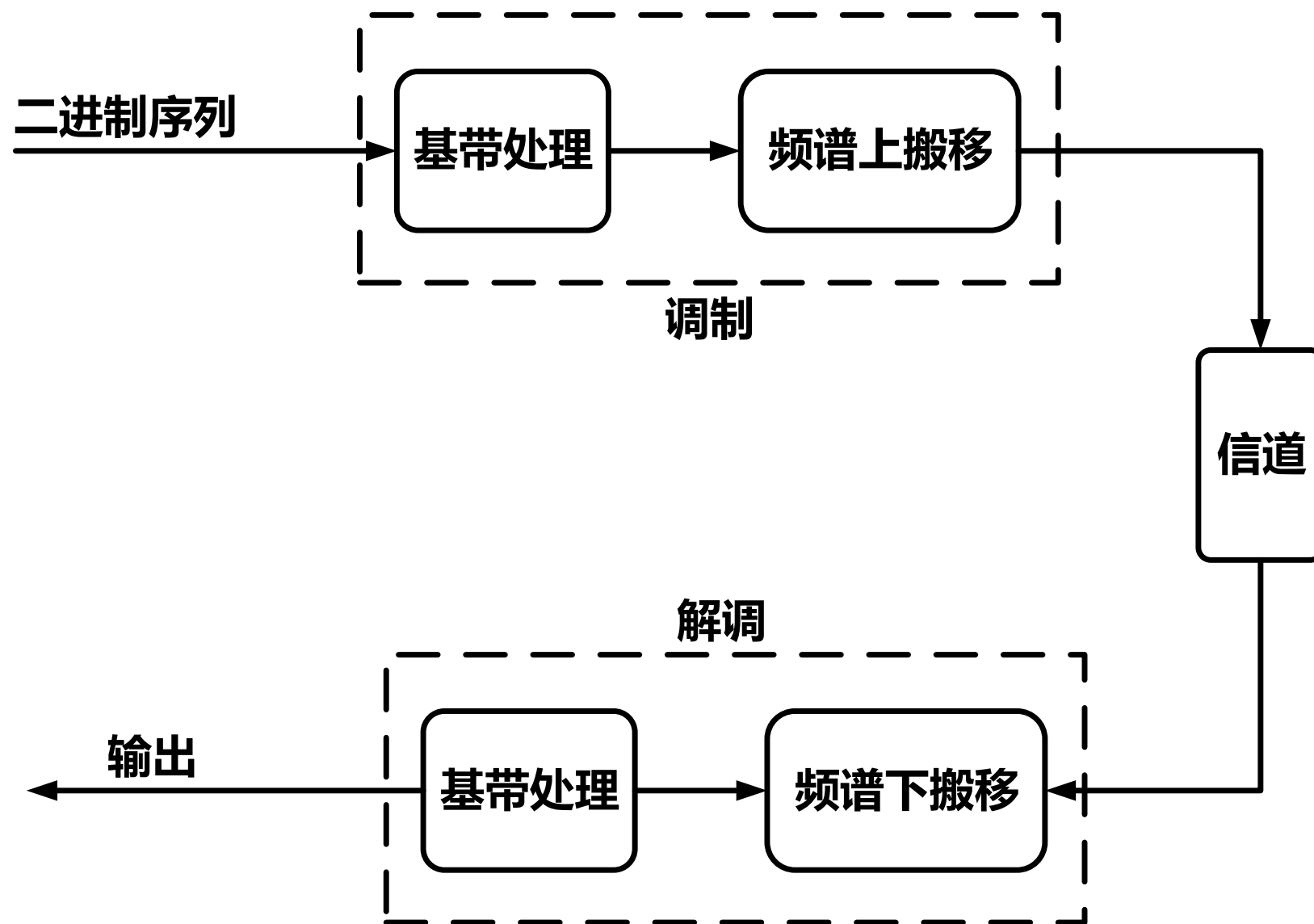
## 01. 背景知识

**调制：就是对信号源的编码信息进行处理，使其变为适合传输的形式  
的过程**

- 一般来说，就是把基带信号(信源)转变为一个相对基带频率非常高的带通信号。
- 通信系统中的调制有模拟调制和数字调制，模拟调制主要用于第一代移动通信系统，而数字调制技术用于现在和未来系统中。
- 如无线信道，信号频率必须足够高才能使天线的尺寸在合理大小的水平( $\lambda/4$ )。

**在现代通信中，随着大容量和远距离数字通信技术的发展，出现了一些新的问题，频谱资源日益紧张。**

## 01. 线性调制解调模型





# 01. 调制方法介绍

**数字调制：用数字基带信号控制载波某个参数的过程**

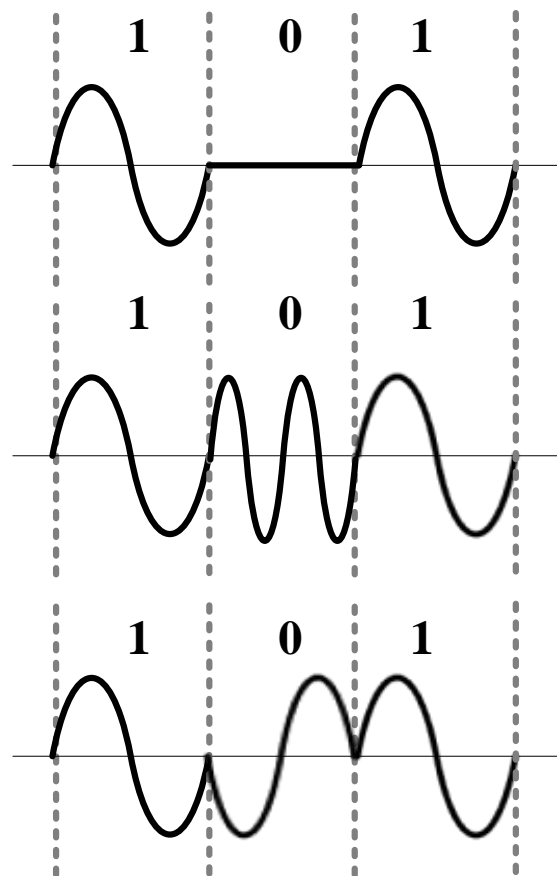
**数字带通传输系统：包括调制/解调过程的数字传输系统**

## 方法

模拟调制法  
数字键控法

## 分类

二进制与多进制调制  
基本调制和新型调制



振幅键控

ASK

Amplitude Shift Keying

频移键控

FSK

Frequency Shift Keying

相移键控

PSK

Phase Shift Keying

## 01. 调制方法 —— 研究现状

**传统的数字调制方式，ASK、PSK和FSK因传输效率低而无法满足移动通信的要求，需要采用新的数字调制方式以减小信道对所传信号的影响，以便在有限的带宽资源条件下获得更高的传输速率。**

**这些技术的研究，主要是围绕充分节省频谱和高效率的利用频带展开的。多进制调制，是提高频谱利用率的有效方法。**

- 数字调制技术可以大致分为线性和非线性的**
- 线性调制技术带宽效率高，所以非常适合用于有限频带内要求容纳越来越多用户的无线通信系统**

# 01. 数字调制和解调器的技术要求

■ 无论我们研究出什么调制方式其目的都是一样的，即为了满足移动通信的数字调制和解调器技术的要求。对移动通信的数字调制和解调器技术有以下的要求：

- 在信道衰落条件下，误码率要尽可能低
- 高效率的解调，以降低移动台功耗，进一步缩小体积和成本
- 能提供较高的传输速率
- 易于集成



# 目 录

## 01 基本概念

- ## 02 数字带通调制技术

- ## 03 相干解调与非相干解调

## 04 M进制信号及其性能

## 05 总结

## 02. 数字带通调制

### 载波的一般表达式

$$s(t) = A(t) \cos[\omega_0 t + \Phi(t)]$$

### 波形振幅系数

- 振幅系数利用了正弦信号振幅A与其码元能量E的和码元周期T间的如下关系：因为平均功率： $P = A^2 / 2 = E / T$   
所以有：

$$A = \sqrt{\frac{2E}{T}}$$

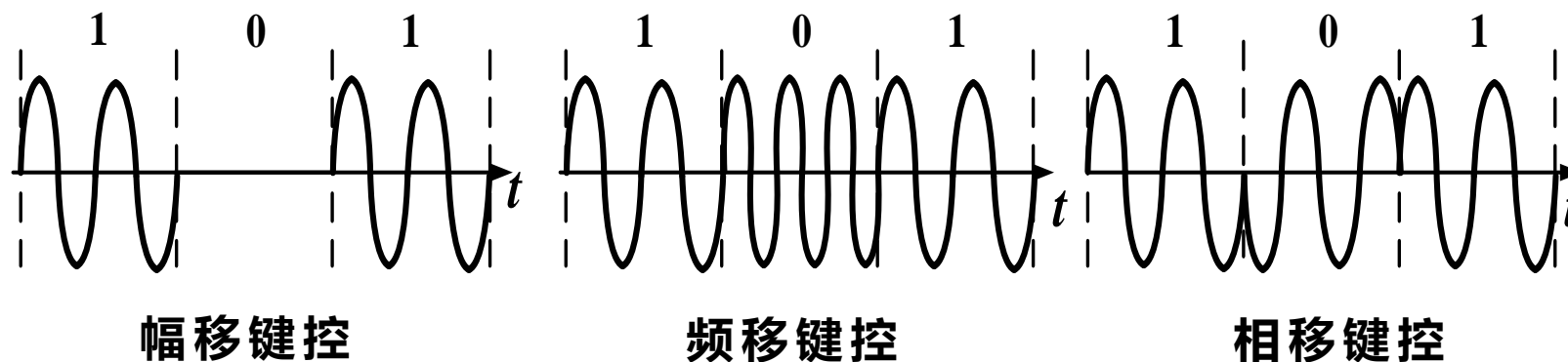
## 02. 数字调制

实现数字调制的两种基本方法：

1. 利用模拟调制的方法去实现数字调制
2. 通过开关键控载波，通常称为键控法。

基本键控方式：

- 幅移键控(ASK)、频移键控(FSK)、相移键控(PSK)



数字调制可分为二进制调制和多进制调制。

## 02. 多进制数字调制 —— 概述

### 定义

- 在码元间隔  $0 \leq t \leq T_s$  内，可能发送的码元有  $M$  种：

$s_i(t), i = 1, 2, \dots, M$ , 通常  $M$  为 2 的整数幂。则称为 **M 进制数字调制**。

根据前面的分析，误码率决定于信噪比  $r$ ：

$$r = A^2 / 2 \sigma_n^2$$

信噪比  $r$  还可以改写为码元能量  $E$  和噪声单边功率谱密度  $n_0$  之比：

$$r = E / n_0$$

## 02. 多进制数字调制 —— 概述

■ 设多进制码元的进制数为  $M$ ，码元能量为  $E$ ，一个码元中包含信息  $k$  比特，则有  $k = \log_2 M$ 。

■ 若码元能量  $E$  平均分配给每个比特，则每比特的能量  $E_b$  等于  $E/k$ 。  
故有

$$\frac{E_b}{n_0} = \frac{E}{kn_0} = r_b$$

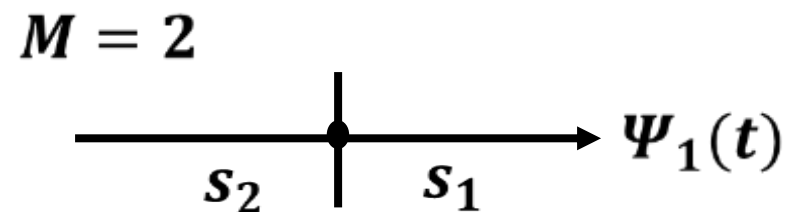
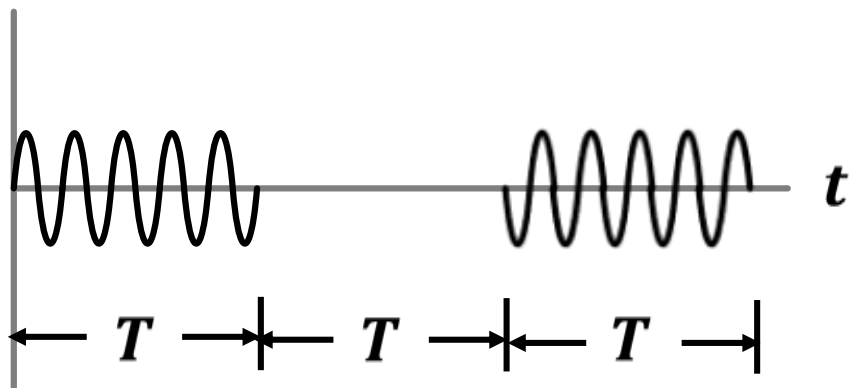
■ 在研究不同  $M$  值下的错误概率时，适合用  $r_b$  为单位来比较不同体制的性能优劣。



## 02. 振幅键控(ASK) —— 例1

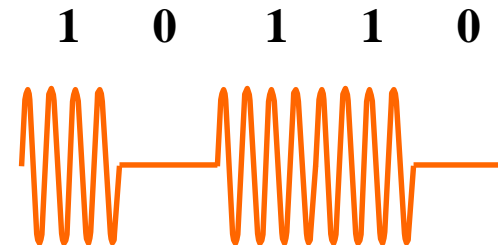
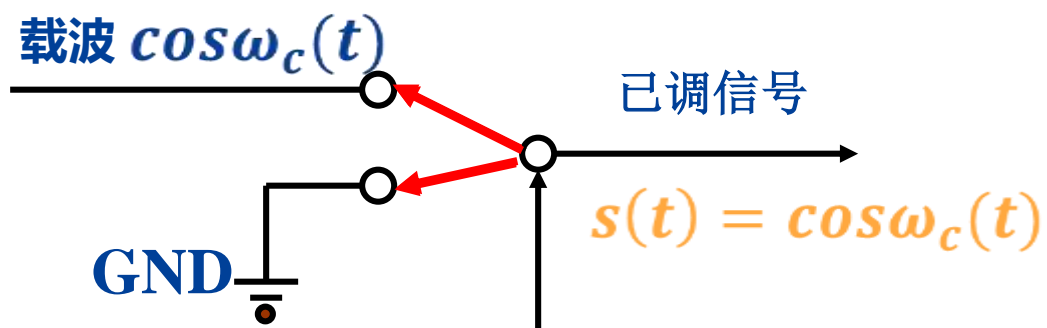
$$s_i(t) = \sqrt{\frac{2E_i(t)}{T}} \cos(\omega_0 t + \Phi) \quad \begin{matrix} 0 \leq t \leq T \\ i = 1, \dots, M \end{matrix}$$

例1：M = 2 的幅移键控 2ASK



## 02. 二进制振幅键控 (2ASK) —— 基本原理

$$s_i(t) = \sqrt{\frac{2E_i(t)}{T}} \cos(\omega_0 t + \Phi) \quad \begin{matrix} 0 \leq t \leq T \\ i = 1, \dots, M \end{matrix}$$



数字基带信号

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

## 02. 二进制振幅键控 (2ASK) —— 一般表达式

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

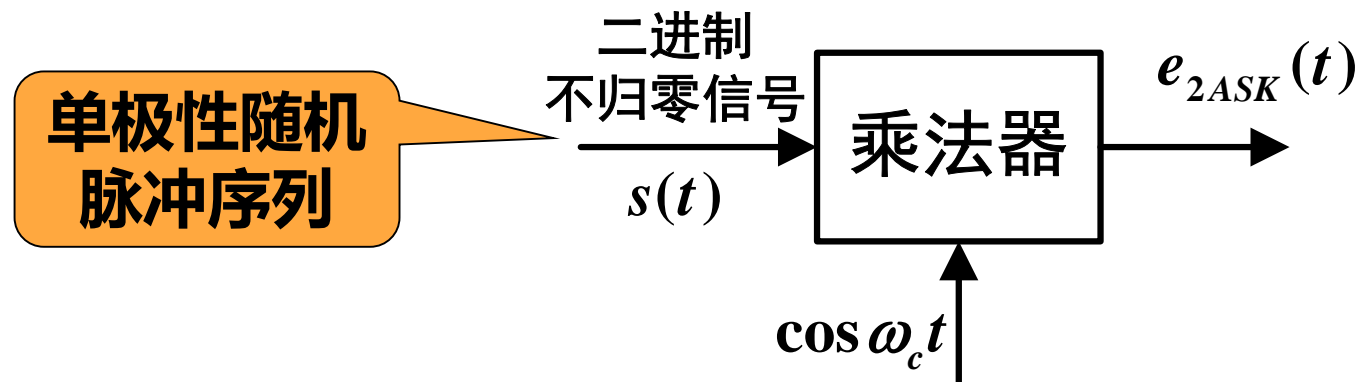
$$s(t) = \sum_n a_n g(t - nT_s)$$

- $T_s$ ——码元持续时间；
- $g(t)$  ——持续时间为 $T_s$ 的基带脉冲波形
- $a_n$ ——第 $n$ 个符号的电平取值，若取

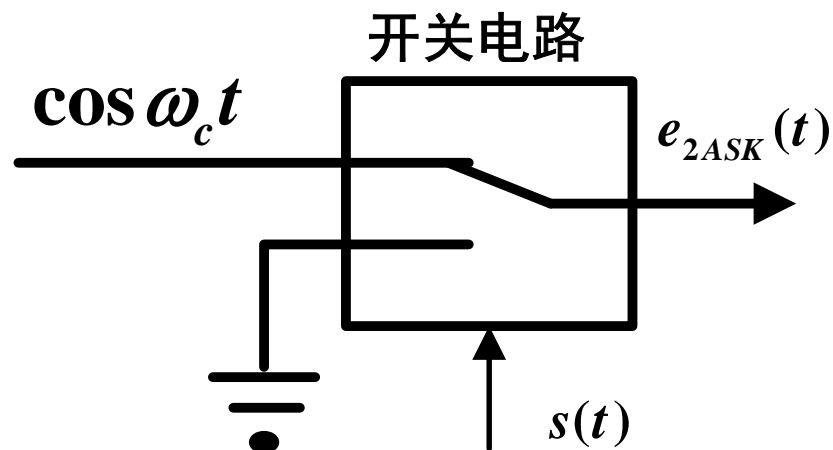
$$a_n = \begin{cases} 1, & \text{概率为 } P \\ 0, & \text{概率为 } 1-P \end{cases}$$

## 02. 二进制振幅键控 (2ASK) —— 信号产生办法

### 模拟调制法（相乘法法）



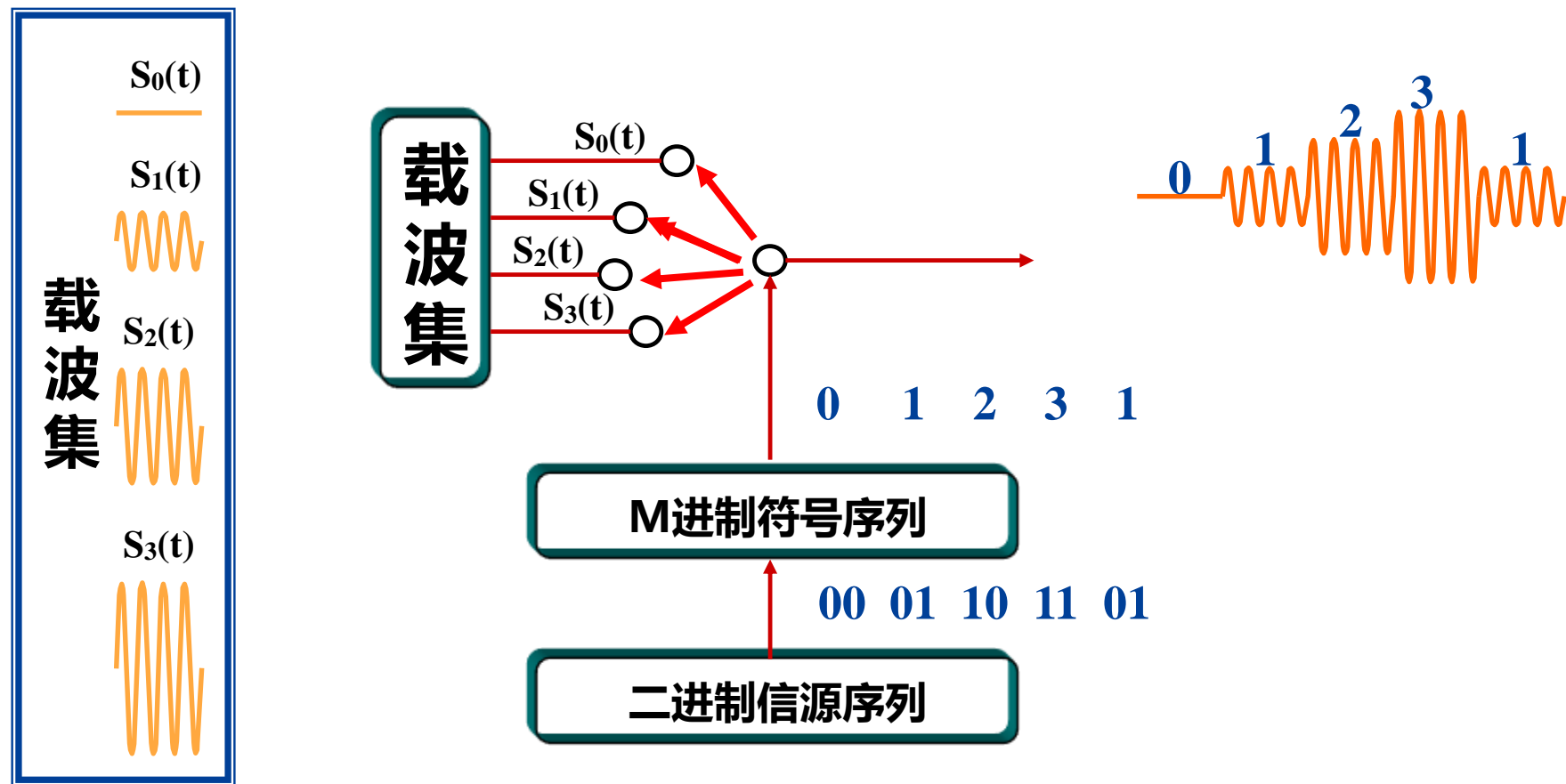
### 键控法



## 02. 多进制振幅键控(MASK) —— 例2

多进制振幅键控又称多电平调制

例2： 四进制振幅调制



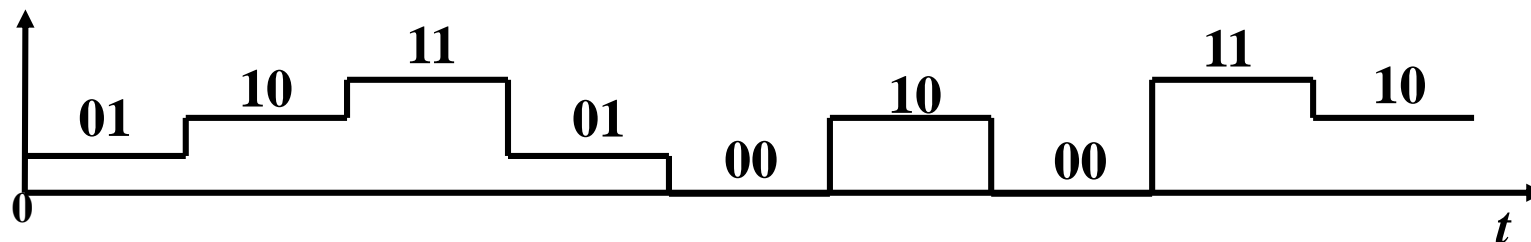
## 02. 多进制振幅键控(MASK) —— 时域表达式

$$s_{MASK} = \sum_n a_n g(t - nT_s) \cos \omega_c t$$

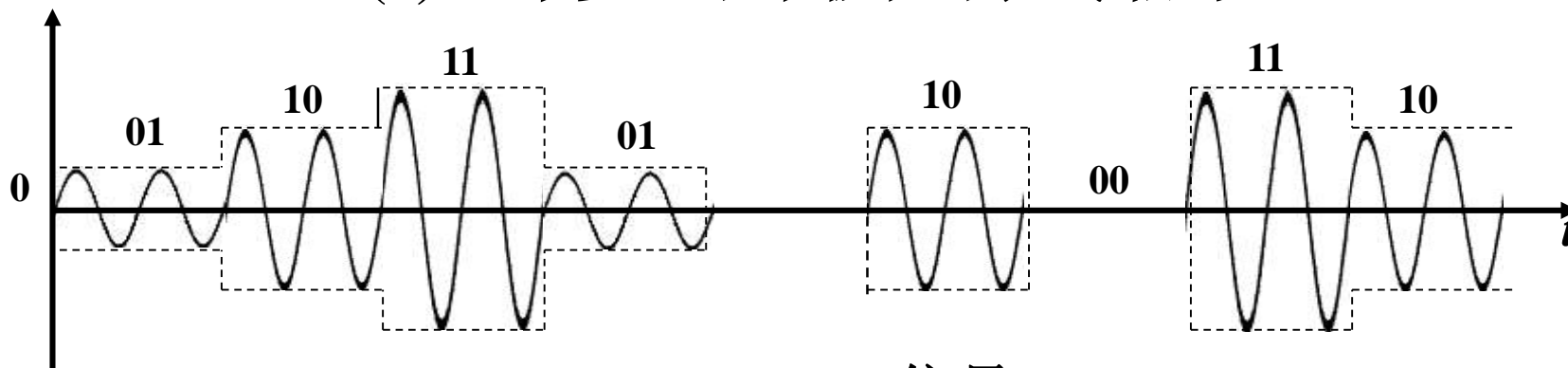
$$a_n = \begin{cases} A_1, & \text{发送概率为 } P_1 \\ A_2, & \text{发送概率为 } P_2 \\ \vdots & \text{发送概率为 } \vdots \\ A_M, & \text{发送概率为 } P_M \end{cases} \quad \sum_{i=1}^M P_i = 1$$

## 02. 多进制振幅键控(MASK) —— 例3

基带信号是多进制单极性不归零脉冲



(a) 基带多电平单极性不归零信号



(b) MASK信号

特点

- 码元速率相同的情况下，MASK信号的带宽和2ASK信号的带宽相同；
- 单位频带的信息传输速率高，即频带利用率高。

## 02. 频移键控(FSK) —— 一般表达式

$$s_i(t) = \sqrt{\frac{2E}{T}} \cos(\omega_i t + \Phi) \quad \begin{matrix} 0 \leq t \leq T \\ i = 1, \dots, M \end{matrix}$$

2FSK信号的表达式可简化为:

$$e_{2\text{FSK}}(t) = s_1(t) \cos \omega_1 t + s_2(t) \cos \omega_2 t$$

$$s_1(t) = \sum_n a_n g(t - nT_s)$$

$$s_2(t) = \sum_n \bar{a}_n g(t - nT_s)$$

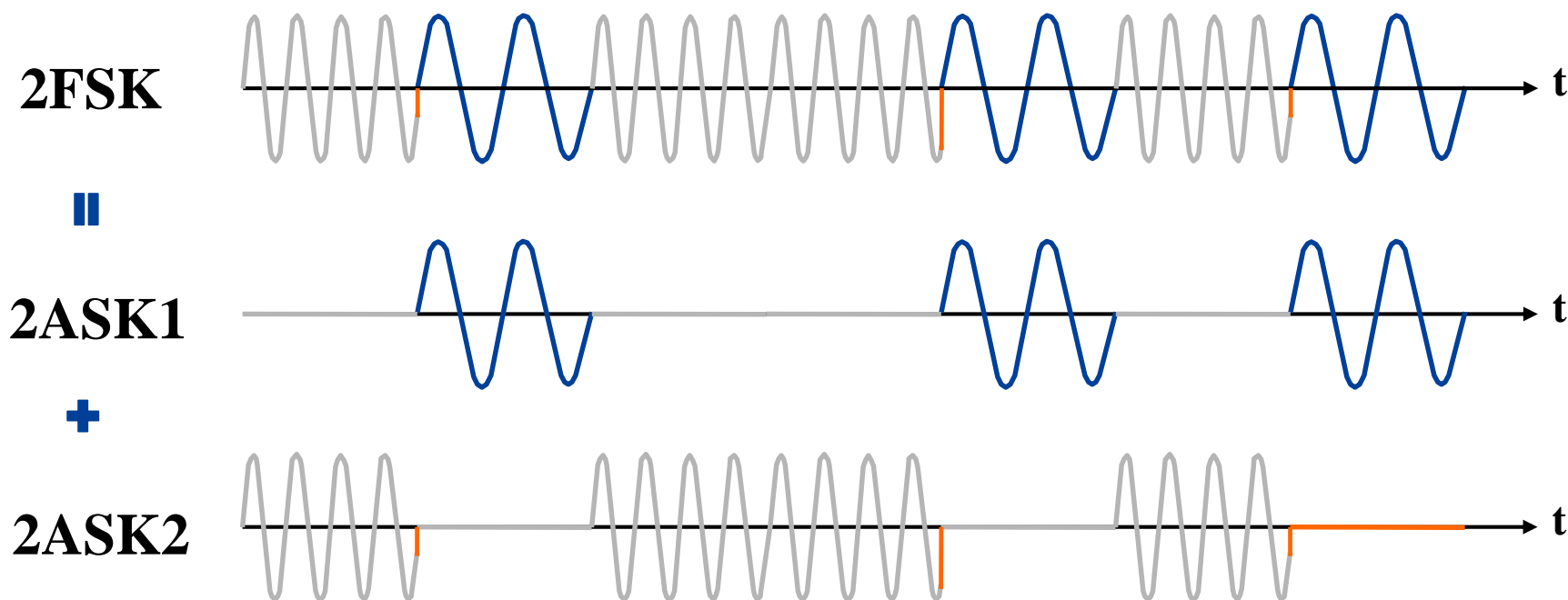
$$a_n = \begin{cases} 1, & \text{概率 } P \\ 0, & \text{概率 } 1-P \end{cases}$$

$$\bar{a}_n = \begin{cases} 1, & \text{概率 } 1-P \\ 0, & \text{概率 } P \end{cases}$$



## 02.二进制频移键控 (2FSK)——典型波形

2FSK信号可以看成是两个不同载频的2ASK信号的叠加。



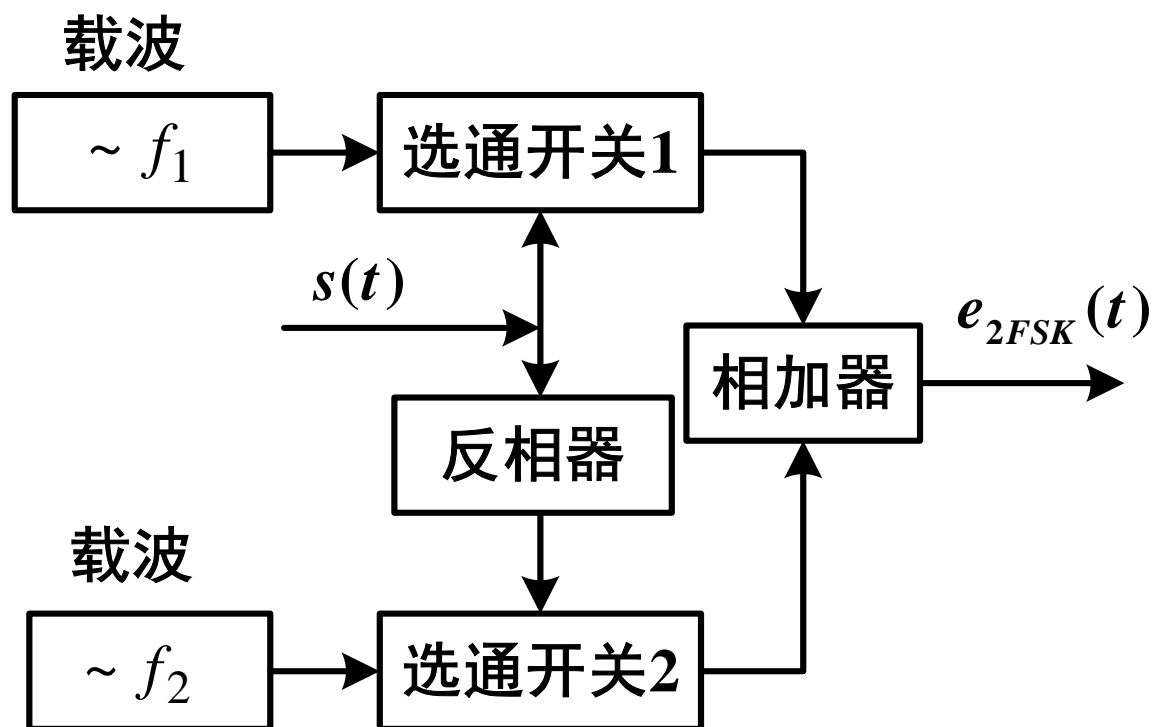
## 02.二进制频移键控 (2FSK)——信号产生办法

采用模拟调频电路来实现：信号在相邻码元之间的相位是连续变化的。



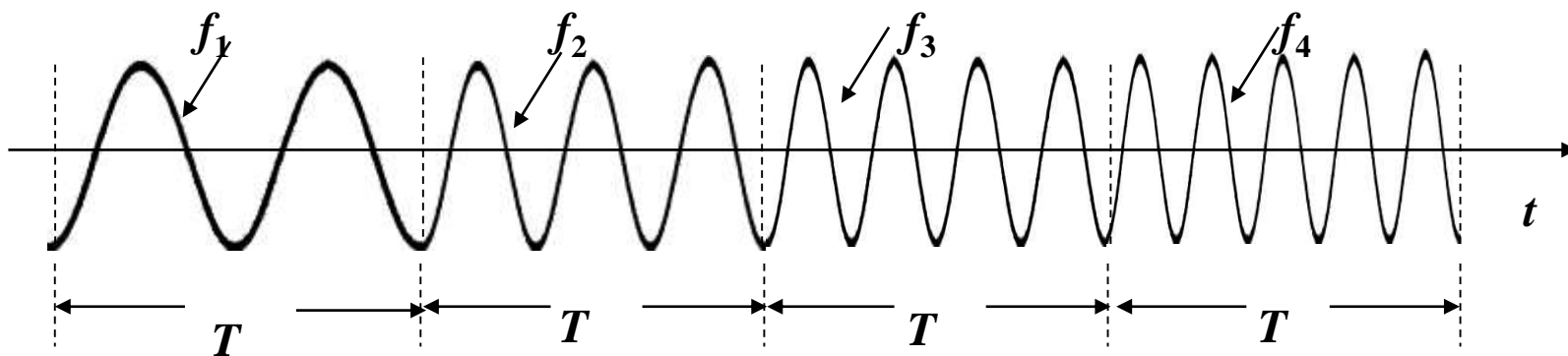
采用键控法来实现：相邻码元之间的相位不一定连续。

键控法原理



## 02. 多进制频移键控(MFSK)—— 例4

### 例4：4FSK信号波形



(a) 4FSK信号波形

$f_1$	$f_2$	$f_3$	$f_4$
00	01	10	11

(b) 4FSK信号的取值

## 02. 多进制频移键控(MFSK)

MFSK中，M种发送信号可表示为：

$$s_i(t) = \sqrt{\frac{2E_s}{T_s}} \cos(2\pi f_i t), \quad 0 \leq t \leq T_s, \quad i = 1, 2, \dots, M$$

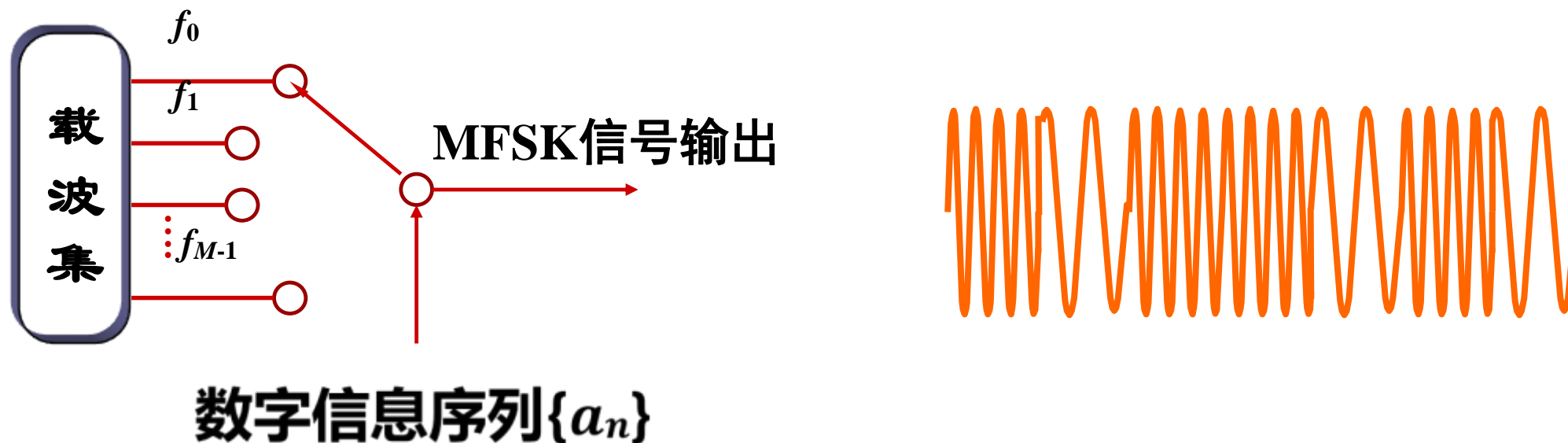
通常令M种发送信号互相正交：

$$\int_0^{T_s} s_i(t) s_j(t) dt = 0, i \neq j$$

信号之间的频率间隔为时，  
 $\frac{n}{2T_s}$ 信号间彼此正交。

## 02. 多进制频移键控(MFSK)—— 信号的产生

用不同频率的载波代表不同数字信源符号



频率选择法

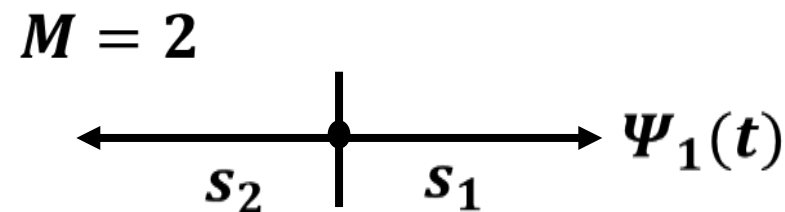
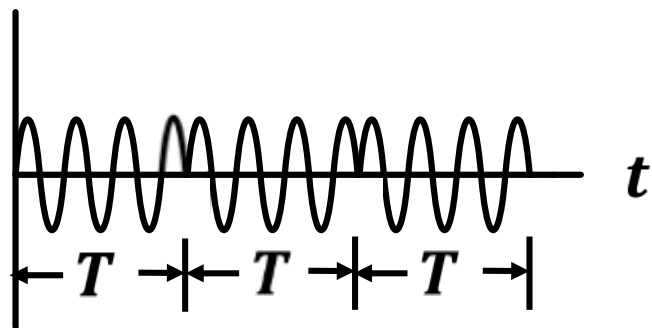
## 02.相移键控(PSK) —— 例5

$$s_i(t) = \sqrt{\frac{2E}{T}} \cos[\omega_0 t + \Phi_i(t)] \quad \begin{matrix} 0 \leq t \leq T \\ i = 1, \dots, M \end{matrix}$$

其中：

$$\Phi_i(t) = \frac{2\pi i}{M}, \quad i = 1, \dots, M$$

例5：  $M = 2$ ，二相相移键控2PSK (BPSK)



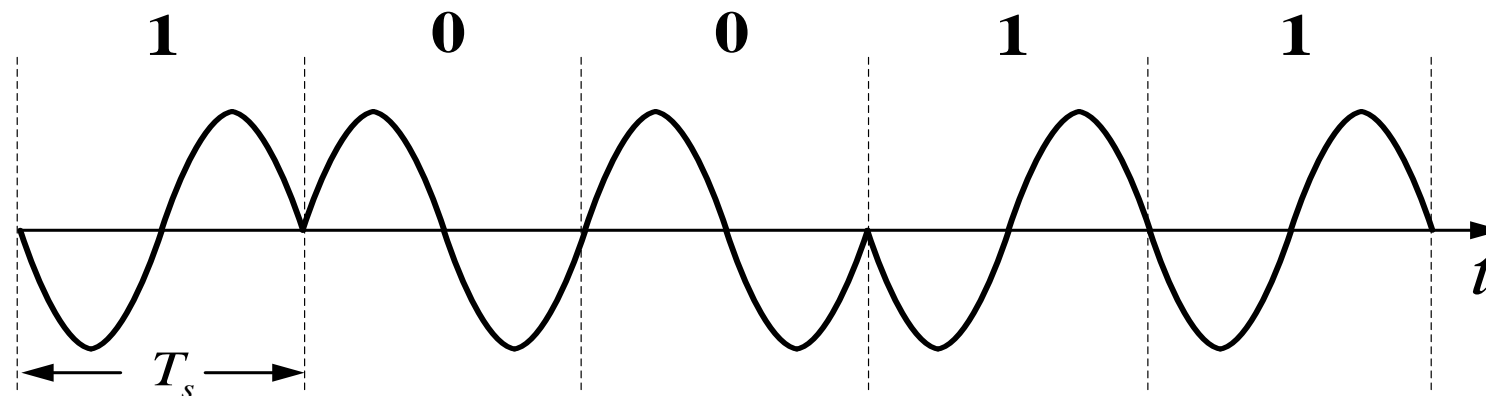
## 02. 二进制相移键控 (BPSK)

这种以载波的不同相位直接去表示相应二进制数字信号的调制方式，称为二进制绝对相移方式。

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

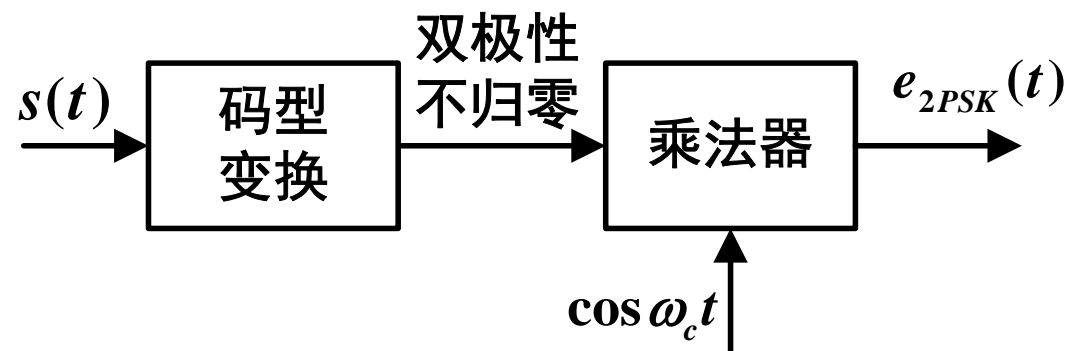
$$\left\{ \begin{array}{l} s(t) = \sum_n a_n g(t - nT_s) \\ a_n = \begin{cases} 1, & \text{概率 } P \\ -1, & \text{概率 } 1-P \end{cases} \end{array} \right.$$

典型波形

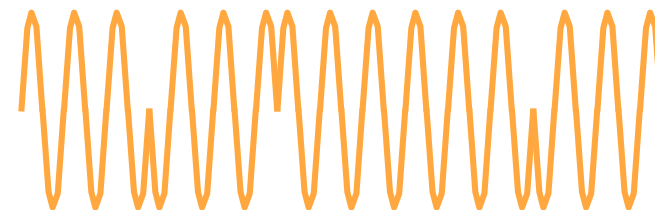
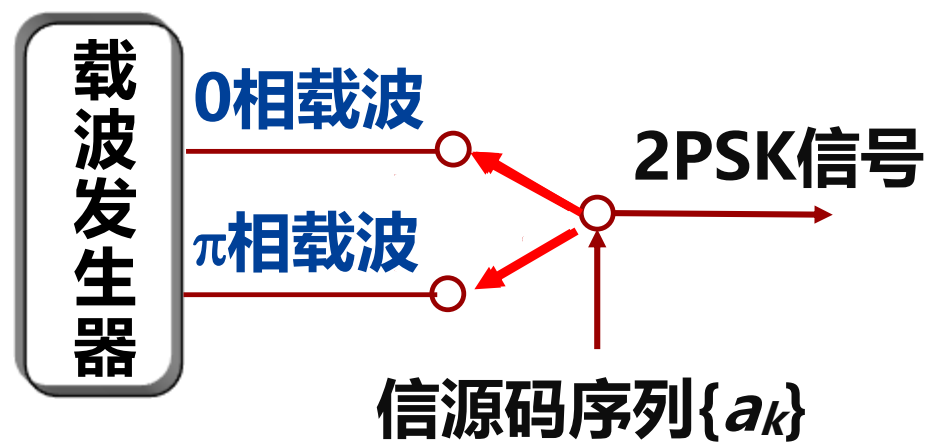


## 02. 二进制相移键控 (BPSK) —— 调制原理

### 模拟调制的方法



### 键控法





## 02. 多进制相移键控(MPSK)—— 时域表达式

$$s_{MPSK}(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} g(t - nT_s) \cos(\omega_c t + \varphi_n)$$

$$\varphi_n = \frac{2\pi}{M}(i - 1) + \theta, \quad i = 1, 2, \dots, M$$

$$M = 2^k, \quad k = \text{正整数}$$

## 02. 多进制相移键控(MPSK)—— 时域表达式

$$s_{MPSK}(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} g(t - nT_s) \cos(\omega_c t + \varphi_n) \quad \left\{ \begin{array}{l} \varphi_n = \frac{2\pi}{M}(i-1) + \theta, \quad i = 1, 2, \dots, M \\ M = 2^k, \quad k = \text{正整数} \end{array} \right.$$



$$= \sum_n [\cos \varphi_n \cos \omega_c t - \sin \varphi_n \sin \omega_c t] g(t - nT_s)$$

$$\text{令 } a_n = \cos \varphi_n, \quad b_n = \sin \varphi_n$$

$$s_{MPSK}(t) = \left[ \sum_n a_n \cdot g(t - nT_s) \right] \cos \omega_c t - \left[ \sum_n b_n \cdot g(t - nT_s) \right] \sin \omega_c t$$

## 02. 多进制相移键控(MPSK)

$$s_{MPSK}(t) = \left[ \sum_n a_n \cdot g(t - nT_s) \right] \cos \omega_c t - \left[ \sum_n b_n \cdot g(t - nT_s) \right] \sin \omega_c t$$

■ MPSK信号可以看成是对两个正交载波进行多电平双边带调制后所得到的两路MASK信号的叠加。

$$s_{MPSK}(t) = I(t) \cos(\omega_c t) - Q(t) \sin(\omega_c t)$$

## 02. 多进制相移键控(MPSK)

$$s_{MPSK}(t) = I(t) \cos(\omega_c t) - Q(t) \sin(\omega_c t)$$

$$I(t) = \sum_n a_n g(t - nT_s) : \text{同相分量}$$

$$Q(t) = \sum_n b_n g(t - nT_s) : \text{正交分量}$$

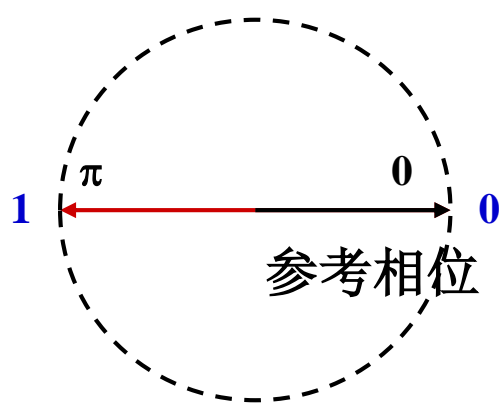
$$s_{MPSK}(t) = \sqrt{I^2(t) + Q^2(t)} \cos(\omega_c t + \varphi(t))$$

$$\varphi(t) = \tan^{-1} \left[ \frac{Q(t)}{I(t)} \right]$$

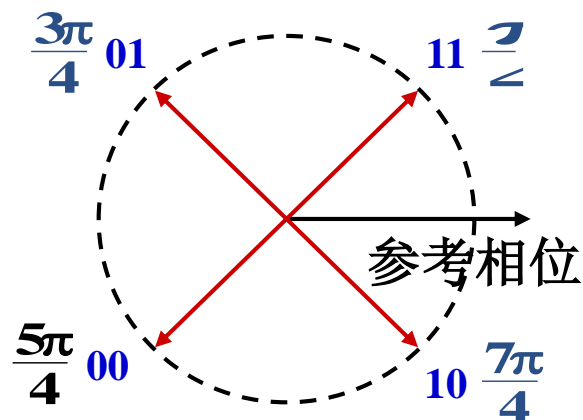
## 02. 多进制相移键控(MPSK)—— 信号的描述

### MPSK信号的描述—矢量图

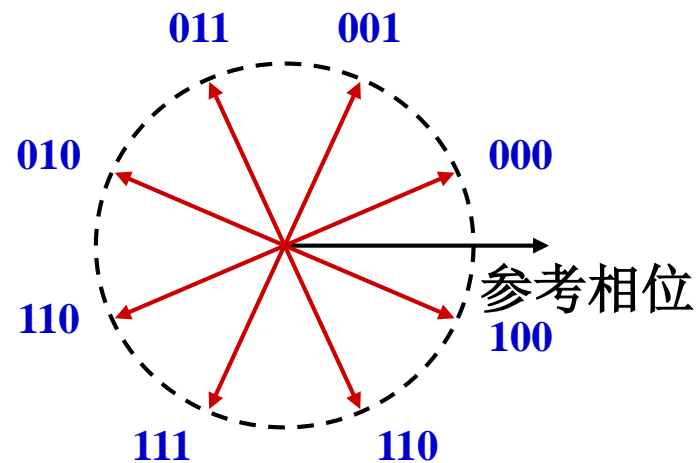
$$\varphi_n = \frac{2\pi}{M}(i-1) + \theta, \quad i = 1, 2, \dots, M$$



$$M = 2, \theta = 0$$



$$M = 4, \theta = \frac{\pi}{4}$$



$$M = 8, \theta = \frac{\pi}{8}$$

## 02. 多进制相移键控(MPSK)—— 正交相移键控 (QPSK)

### 4PSK常称为正交相移键控 (QPSK)

- 4PSK信号每个码元含有2 比特的信息，现用 $a$  $b$ 代表这两个比特。
- 两个比特有4种组合，即00、01、10和11。它们和相位 $\varphi_n$ 之间的关系通常都按格雷码的规律安排。

### QPSK信号的编码

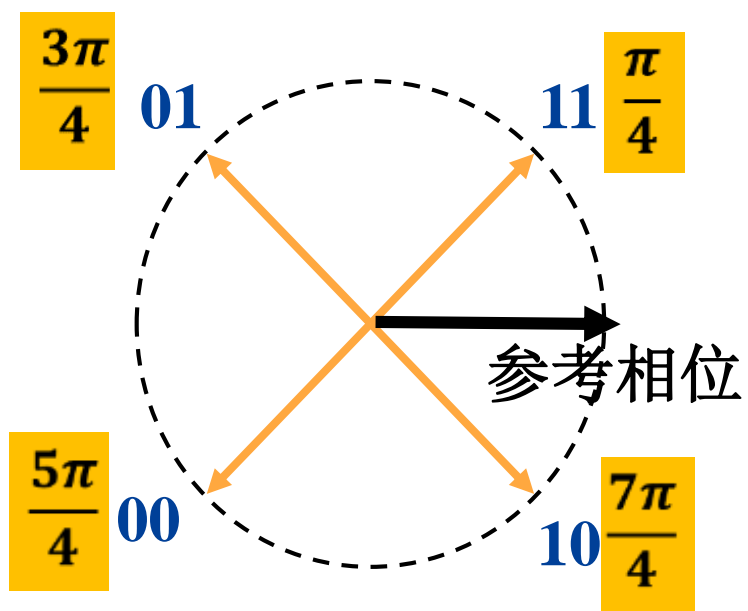
$a$	$b$	$\varphi_n$
0	0	$0^\circ$
0	1	$270^\circ$
1	1	$180^\circ$
1	0	$90^\circ$

### 格雷码的好处

- 相邻相位所代表的两个比特只有一位不同。由于因相位误差造成错判至相邻相位上的概率最大，故这样编码使之仅造成一个比特错误的概率最大。

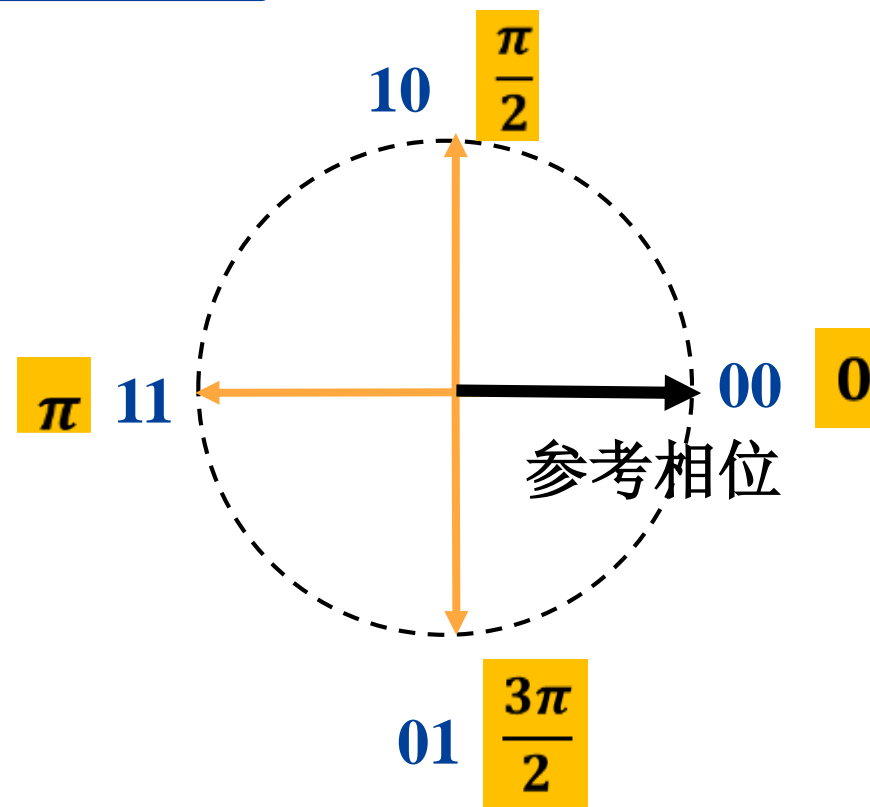
## 02. 多进制相移键控(MPSK)—— 信号矢量图

$\frac{\pi}{4}$ 系统



$$M = 4, \theta = \frac{\pi}{4}$$

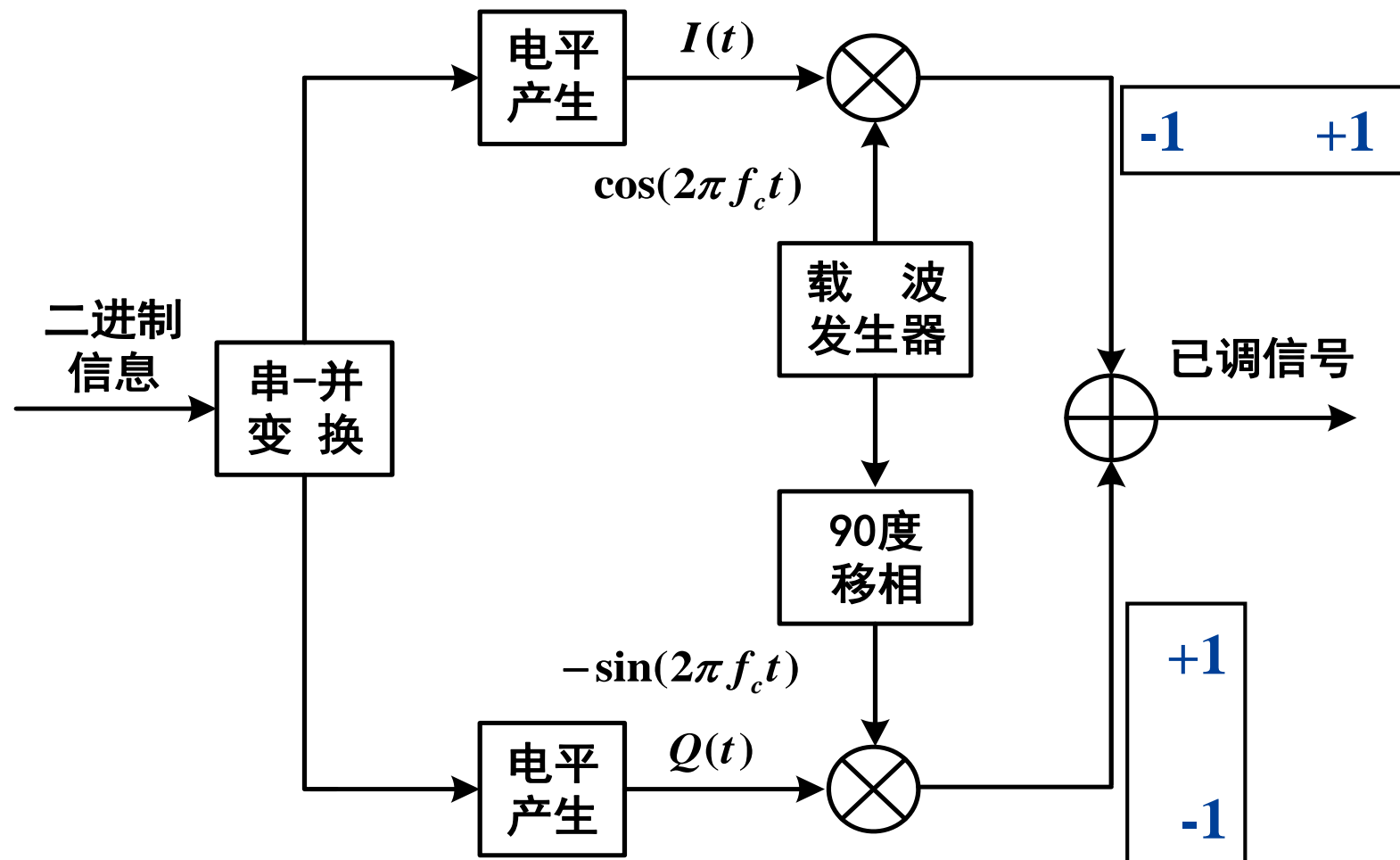
$\frac{\pi}{2}$ 系统



$$M = 4, \theta = 0$$

## 02. 多进制相移键控(MPSK)—— QPSK调制

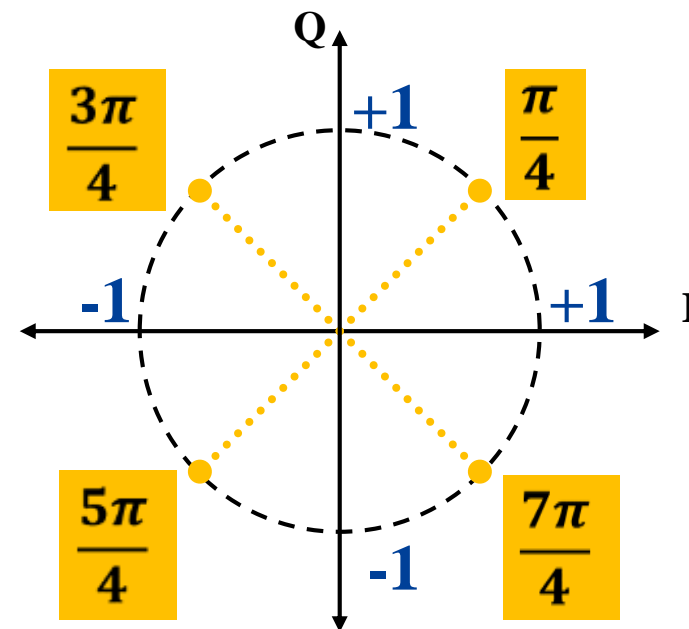
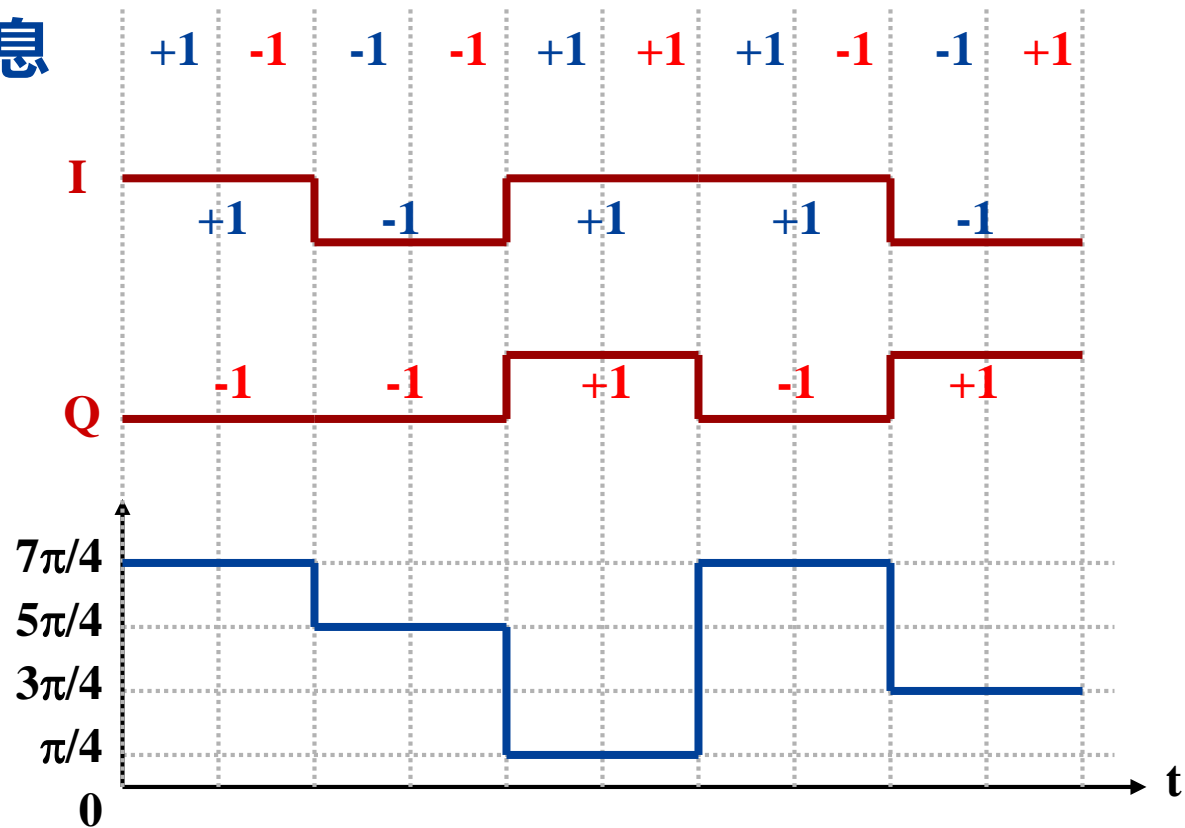
### 正交调制器



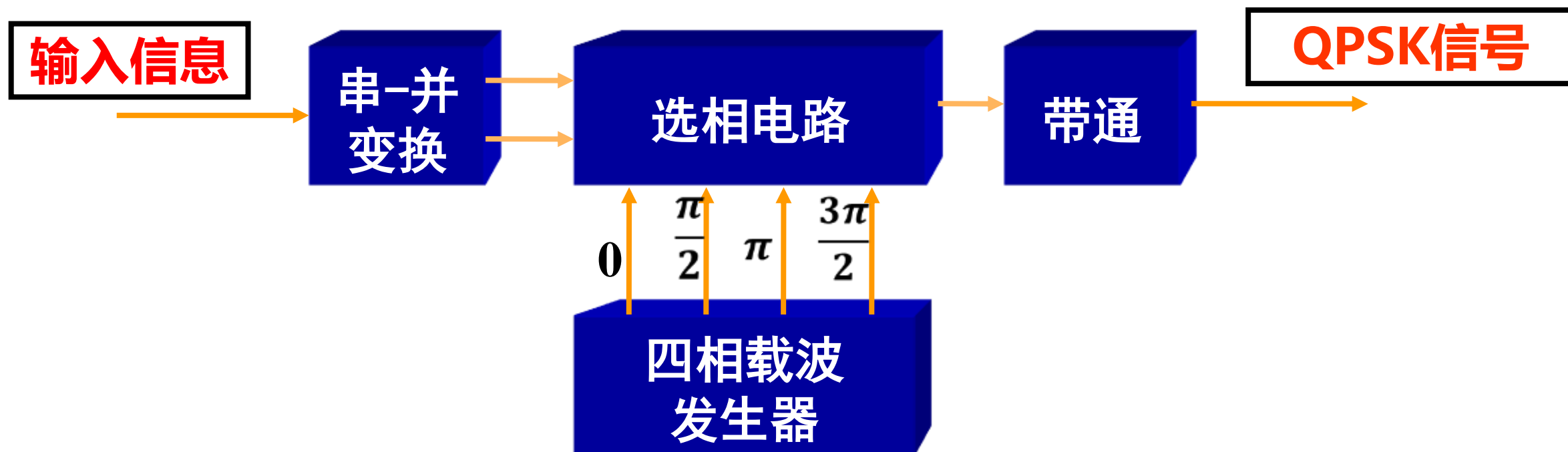


## 02. 多进制相移键控(MPSK)—— 正交调制过程

### 二进制信息



## 02. 多进制相移键控(MPSK)—— 相位选择法





# 目 录

## 01 基本概念

## 02 数字带通调制技术



## 03 相干解调与非相干解调



## 04 M进制信号及其性能

## 05 总结

### 03. 相干与非相干检测(解调)

**连续波数字调制信号的相干解调需要在接收端恢复载波的频率与相位信息，把带通信号相干地搬移到基带。**

**这种相干搬移不损失已调信号的任何信息，所以能够达到最佳的性能。**

**非相干解调一般利用已调信号的包络特性，在解调中不需要恢复载波的相位信息，在实现结构上比较简单，但性能明显不如相干解调。**

## 03. 信号解调类型

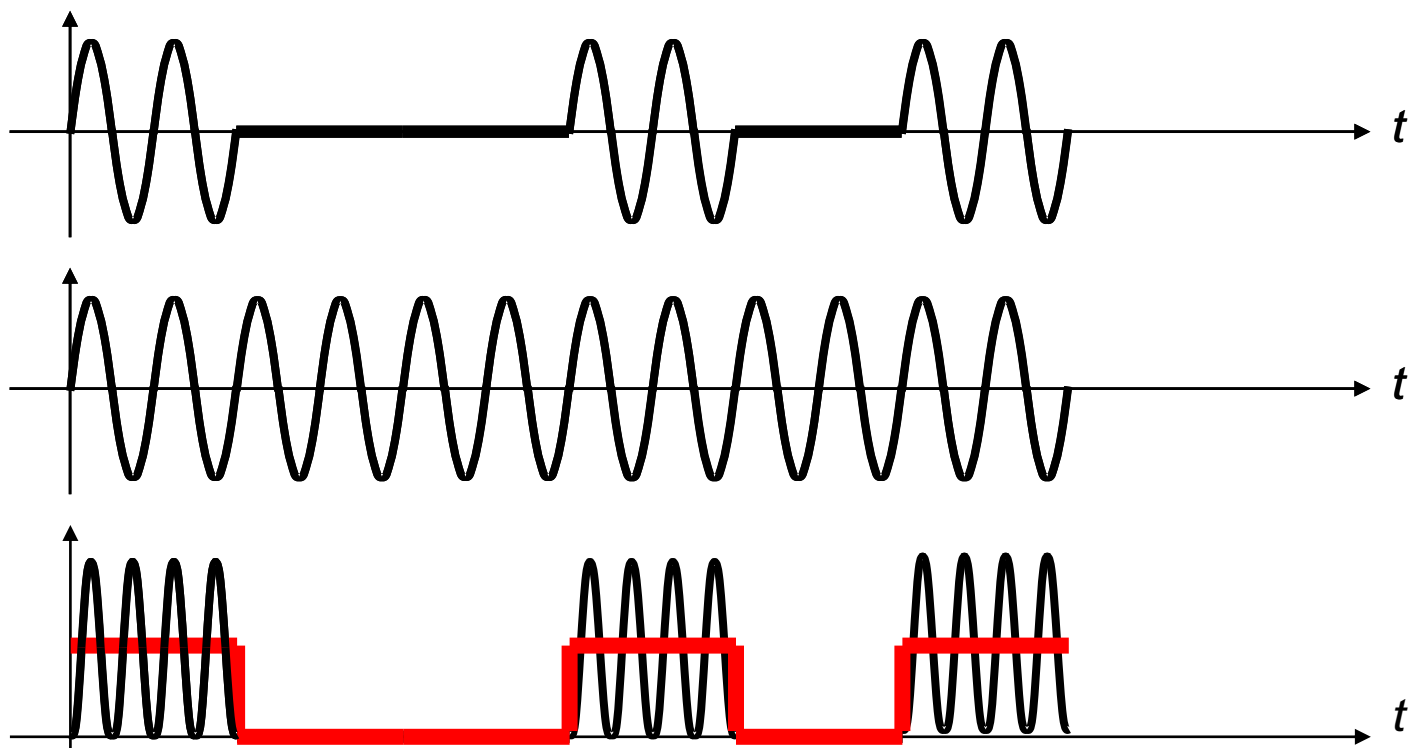
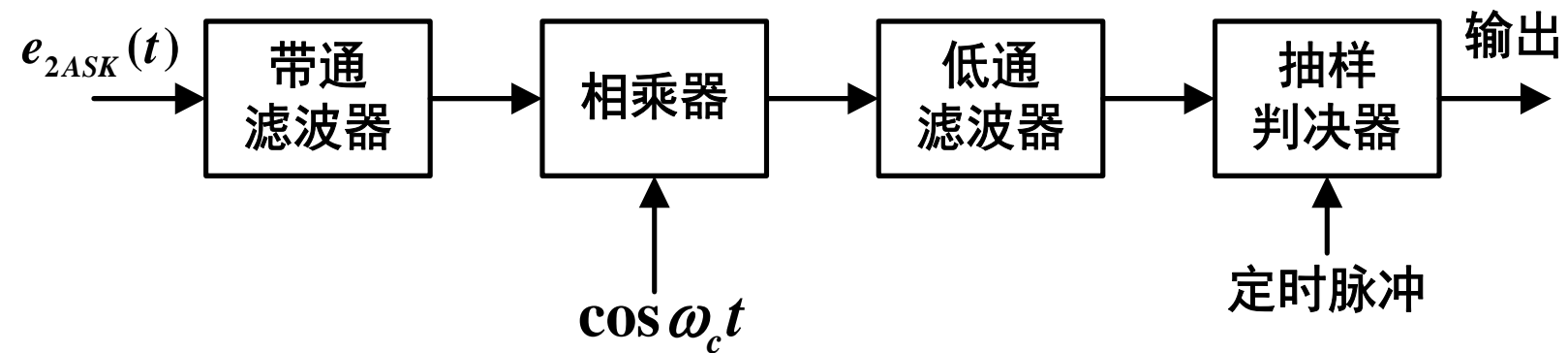
### ■ 相干解调：利用载波相位信息来检测信号

- Phase shift keying (PSK)
- Frequency shift keying (FSK)
- Amplitude shift keying (ASK)
- Hybrids

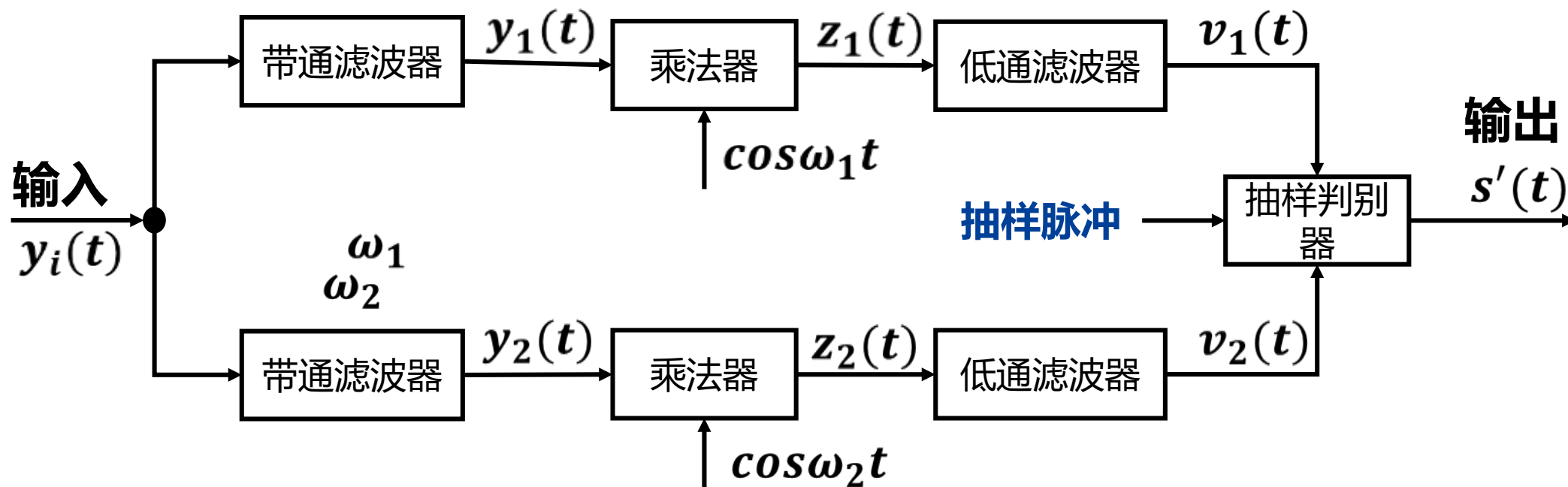
### ■ 非相干解调：不需利用载波相位信息来检测信号

- Differential phase shift keying (DPSK)
- Amplitude shift keying (ASK)
- Frequency shift keying (FSK)
- Hybrids

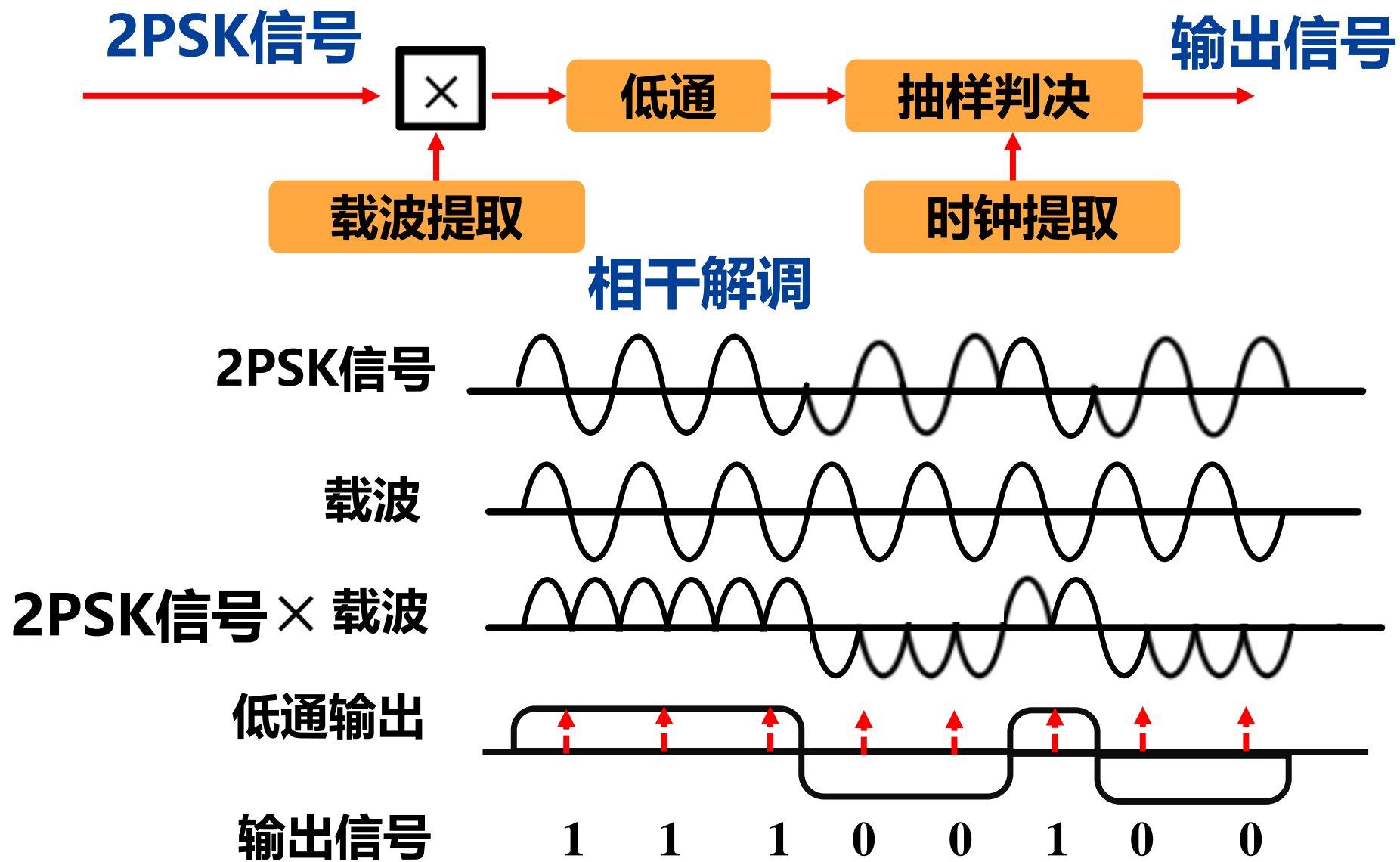
### 03. 2ASK的相干解调



### 03. 2FSK相干解调法

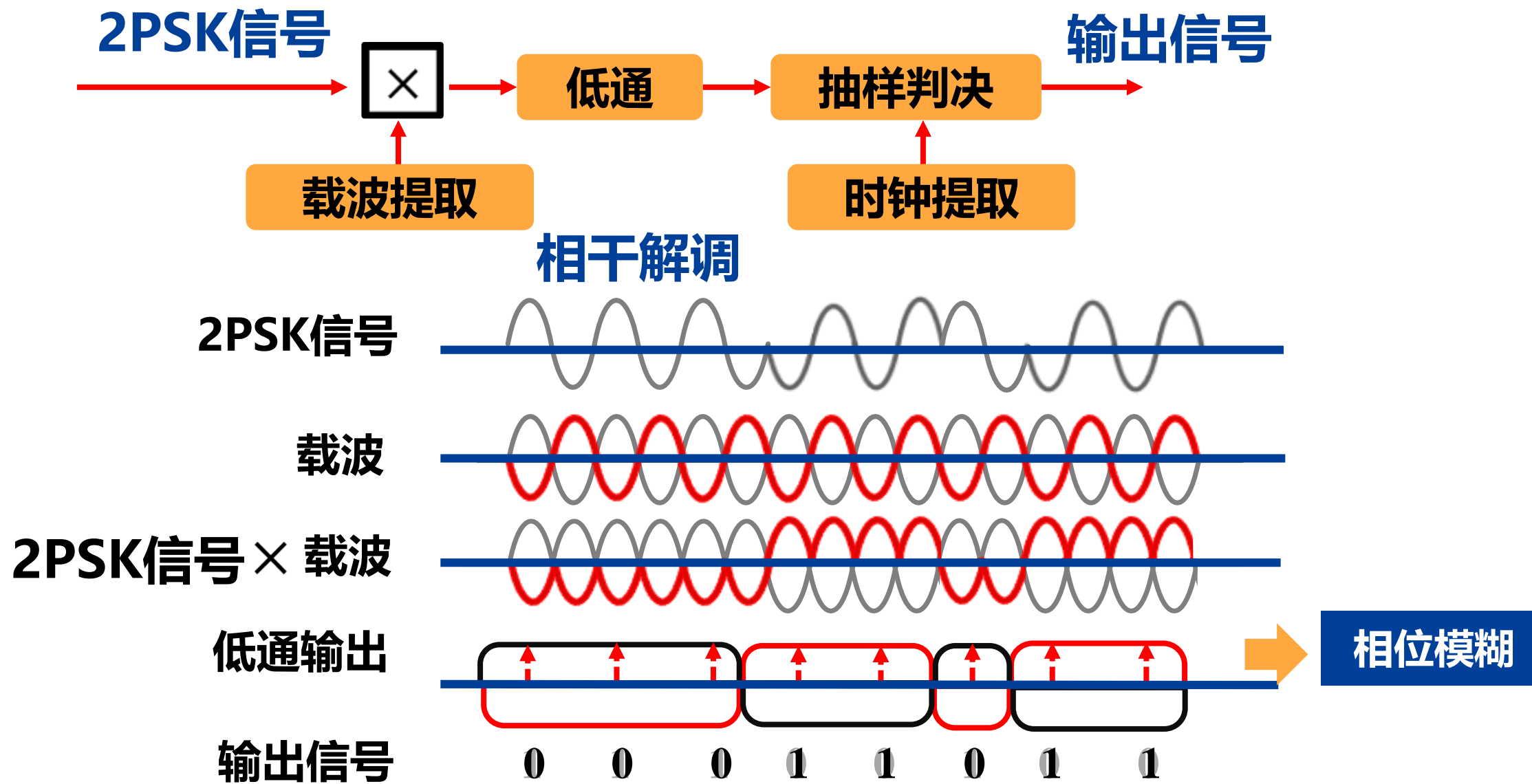


### 03. BPSK相干解调法





### 03. BPSK相干解调法



### 03. BPSK相干解调法

■ BPSK只能采用相干解调,因为发“0”或发“1”时,采用相位变化携带信息。

■ 具体地说:

- 其振幅不变(无法提取不同的包络)
- 频率也不变(无法用滤波器分开)

### 03. 多相相移键控 (MPSK) 的相干解调

MPSK信号:

$$s_i(t) = \sqrt{\frac{2E}{T}} \cos\left(\omega_0 t - \frac{2\pi i}{M}\right) \quad \begin{matrix} 0 \leq t \leq T \\ i = 1, \dots, M \end{matrix}$$

MPSK信号本质上是在相幅平面的圆周上取值的信号,

取基函数:

$$\psi_1(t) = \sqrt{\frac{2}{T}} \cos \omega_0 t, \quad \psi_2(t) = \sqrt{\frac{2}{T}} \sin \omega_0 t$$

则一般地有:



$$\begin{aligned} s_i(t) &= a_{i1} \psi_1(t) + a_{i2} \psi_2(t) & \begin{matrix} 0 \leq t \leq T \\ i = 1, \dots, M \end{matrix} \\ &= \sqrt{E} \cos\left(\frac{2\pi i}{M}\right) \psi_1(t) + \sqrt{E} \sin\left(\frac{2\pi i}{M}\right) \psi_2(t) \end{aligned}$$

### 03. 多相相移键控 (MPSK) 的相干解调

受AWGN干扰的MPSK信号：

$$r(t) = \sqrt{\frac{2E}{T}} (\cos\phi_i \cos\omega_0 t + \sin\phi_i \sin\omega_0 t + n(t)) \quad \begin{matrix} 0 \leq t \leq T \\ i = 1, \dots, M \end{matrix}$$

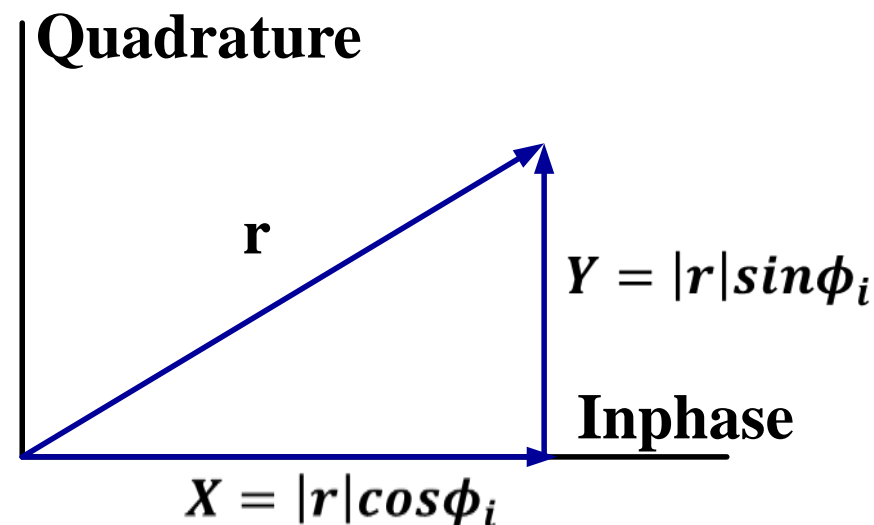
MPSK信号的检测：

$$X = \int_0^T r(t) \psi_1(t) dt, \quad Y = \int_0^T r(t) \psi_2(t) dt$$



$$\hat{\phi} = \arctan \frac{Y}{X}$$

根据  $|\phi_i - \hat{\phi}|, i = 1, 2, \dots, M$   
最小作出判决。

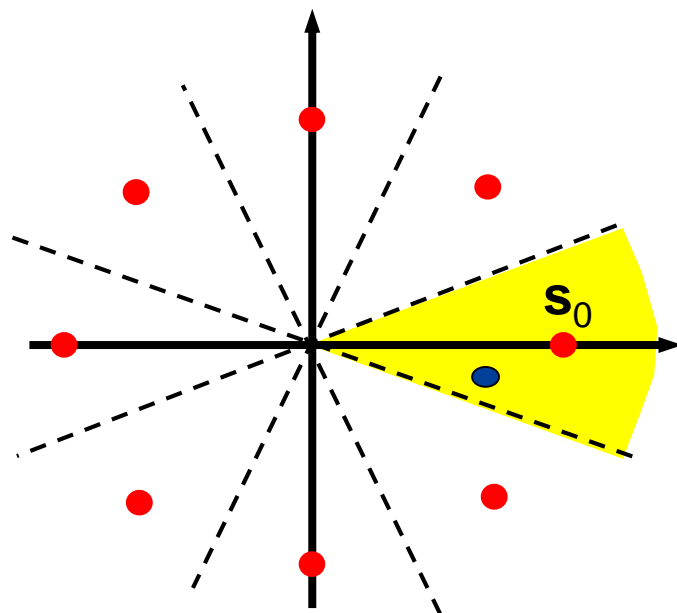


$$\hat{\phi} = \arctan(Y/X) \left\{ \begin{array}{l} \text{Noisy estimate} \\ \text{of transmitted } \phi_i \end{array} \right. \quad 52$$

### 03. 多相相移键控 (MPSK) 的相干解调

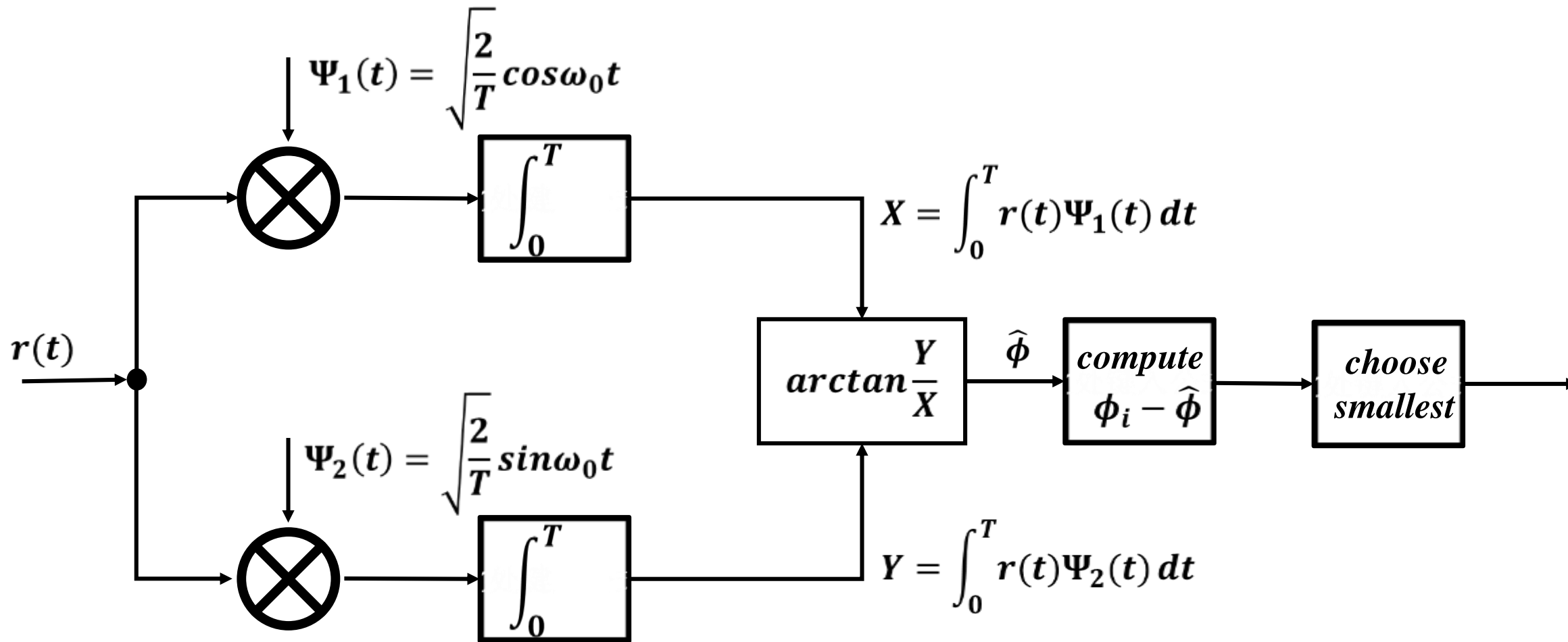
**M个信号矢量点均匀分布在半径为 $\sqrt{E}$ 的圆周上**

- 在等概发送信号码元情况下，最大似然接收相当于按最近距离作判决。
- 在信号空间中作M个对称扇区，每个扇区中包含一个信号点。如接收矢量点落在某扇区内，则判定发送信号是扇区所含的那个信号点。



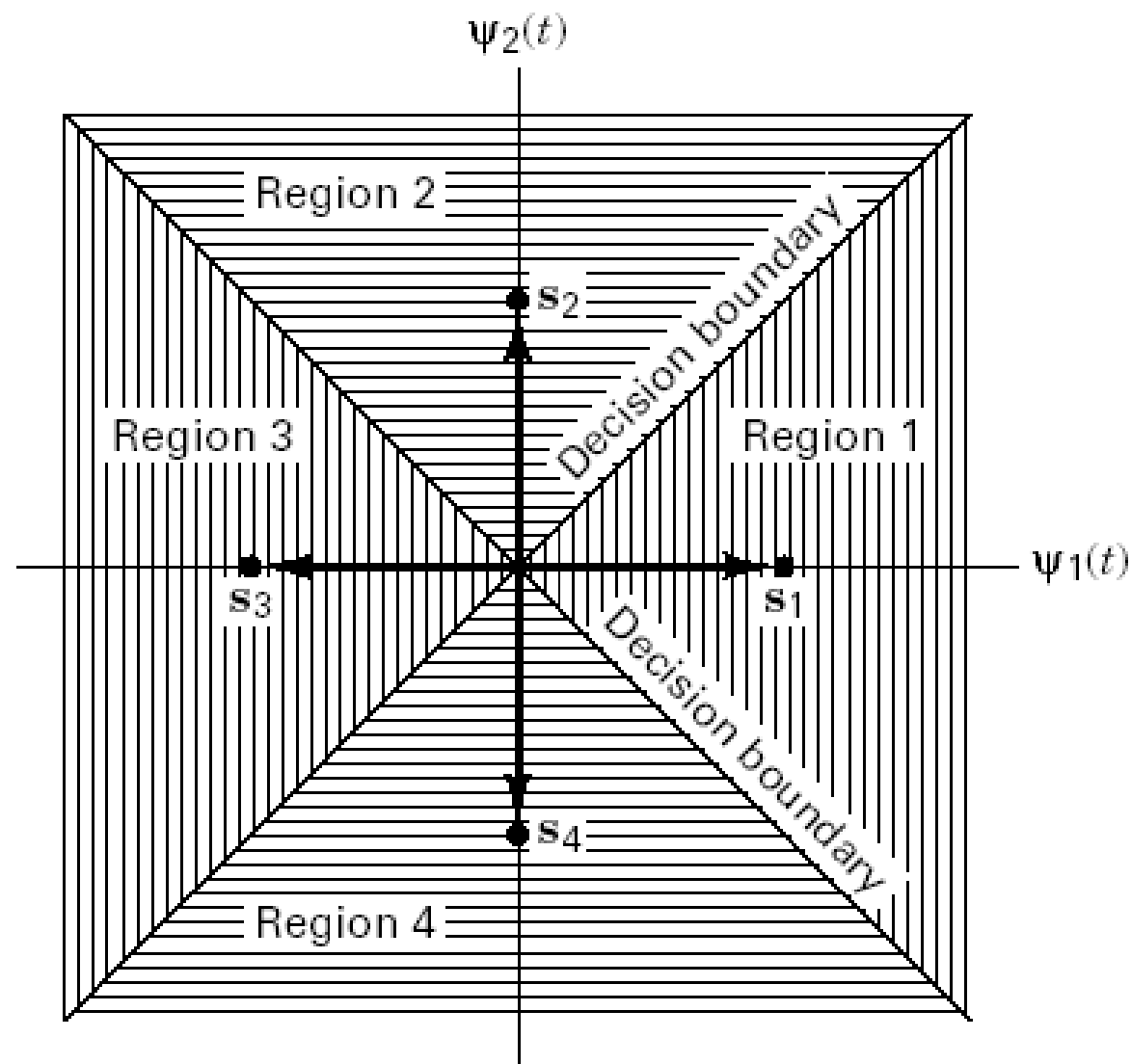
### 03. 多相相移键控 (MPSK) 的相干解调

#### MPSK信号解调器结构

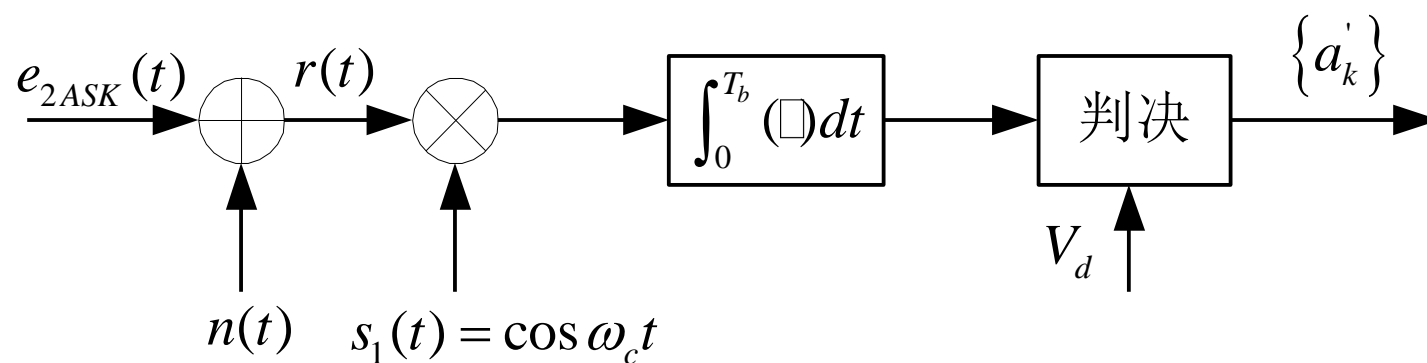


### 03. 多相相移键控 (MPSK) 的相干解调 —— 例6

$M = 4$ , 4PSK/QPSK信号信号分布及判决区域



### 03. 相干解调系统的抗噪声性能 —— 2ASK



#### 1、0等概不等能量

$$\begin{aligned} S_1(t) &= \cos \omega_c t \\ S_0(t) &= 0 \end{aligned}$$

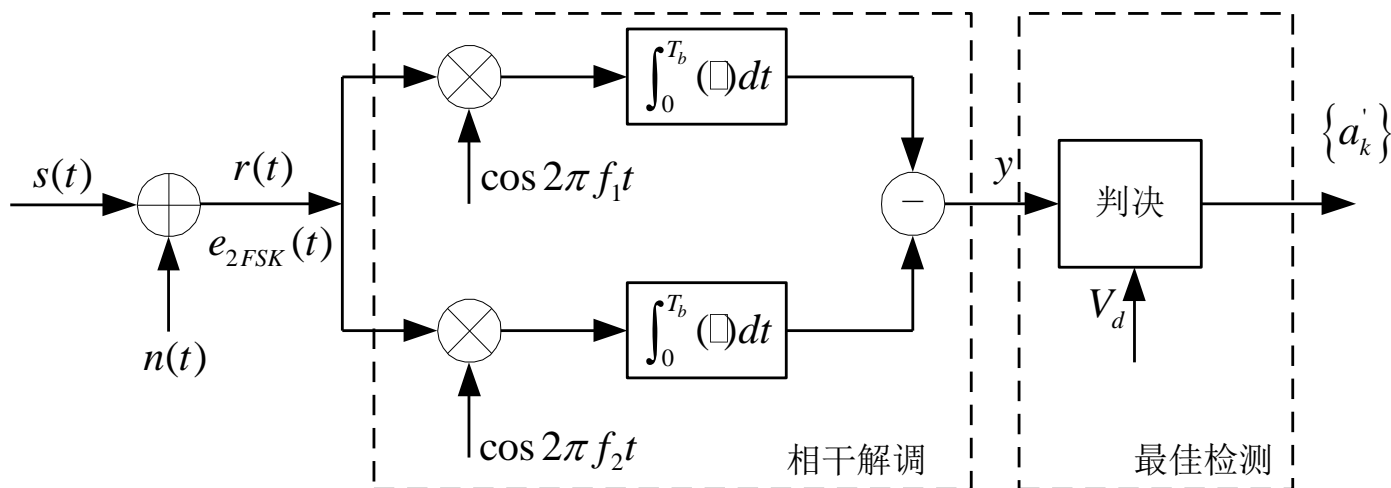
$$V_d^* = \frac{E_b(1-\rho)}{2} + n_0 \ln \frac{p(H_0)}{p(H_1)} \xrightarrow{\rho=0} V_d^* = \frac{E_b}{2} + n_0 \ln \frac{p(H_0)}{p(H_1)} \xrightarrow{\text{等概}} V_d^* = \frac{E_b}{2}$$

#### 2ASK的误码率

$$p_e = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left[ \sqrt{\frac{E_b}{4n_0}} \right] = Q \left[ \sqrt{\frac{E_b}{2n_0}} \right]$$



### 03. 相干解调系统的抗噪声性能 —— 2FSK



$$s_0(t) = \cos 2\pi f_1 t$$

$$s_1(t) = \cos 2\pi f_2 t$$

1、0等能量

一般选择两频率正交，即满足  $\rho = 0$

$$p_e = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left[ \sqrt{\frac{E_b(1-\rho)}{2n_0}} \right]$$

$\rho = 0$

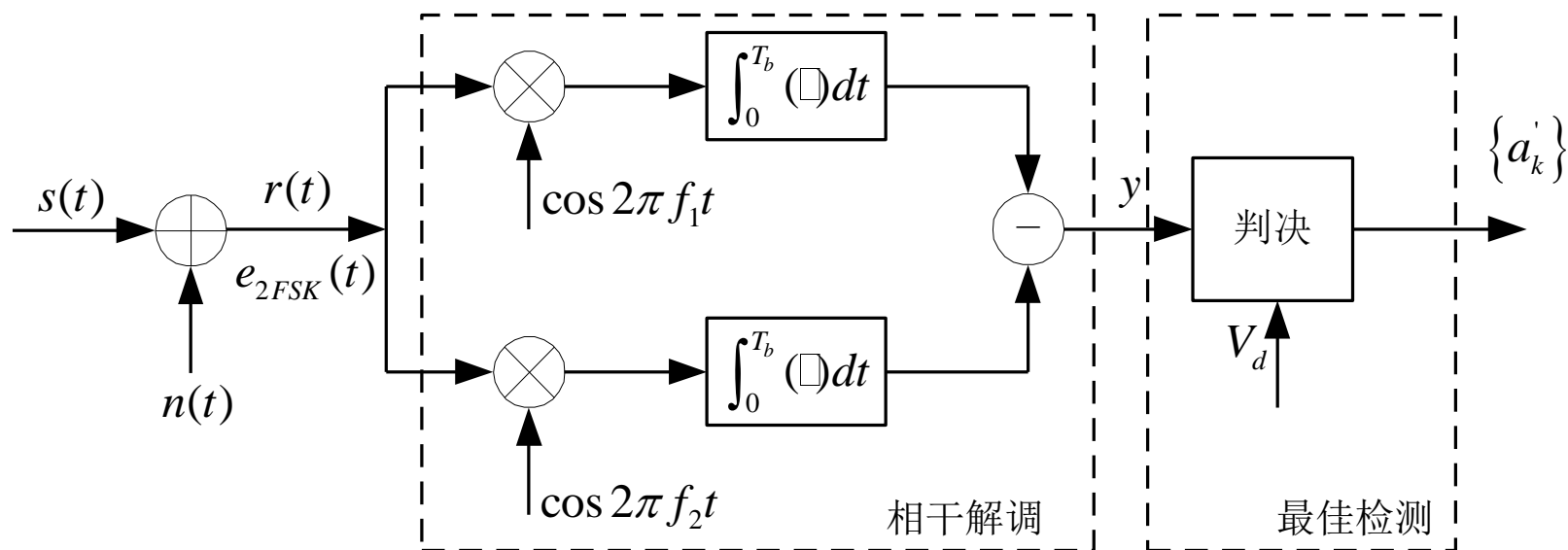
$$p_e = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left[ \sqrt{\frac{E_b}{2n_0}} \right] = Q \left[ \sqrt{\frac{E_b}{n_0}} \right]$$

$$V_d^* = (n_0 / 2) \ln(p(H_0) / p(H_1))$$

1、0等概

$$V_d^* = 0$$

### 03. 相干解调系统的抗噪声性能 —— 2PSK



$$\begin{aligned} s_1(t) &= \cos 2\pi f_c t \\ s_2(t) &= -\cos 2\pi f_c t \end{aligned}$$

$$p_e = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left[ \sqrt{\frac{E_b(1-\rho)}{2n_0}} \right]$$

↓  $\rho = -1$

$$V_d^* = 0$$

1、0等概等能量

$$p_e = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left[ \sqrt{\frac{E_b}{n_0}} \right] = Q \left[ \sqrt{\frac{2E_b}{n_0}} \right]$$

### 03. 相干解调系统的抗噪声性能 —— 结论

在信号能量相同的情况下，二进制调制信号采用相干解调方式时

- 2PSK信号的抗噪声性能最好
- 2FSK信号其次(差3dB)
- 2ASK信号最差(比2FSK差3dB)

$$p_{e2ASK} = Q\left[\sqrt{\frac{E_b}{2n_0}}\right]$$

2ASK

$$p_{e2FSK} = Q\left[\sqrt{\frac{E_b}{n_0}}\right]$$

2FSK

$$p_{e2PSK} = Q\left[\sqrt{\frac{2E_b}{n_0}}\right]$$

2PSK

## 03. 非相干解调

在许多实际应用中，接收到的信噪比可能足够高，即使采用非最佳的非相干解调也能获得令人满意的误码性能。这时就没有必要采用复杂的相干解调。

在非相干解调中接收机没有关于接收到信号载波的相位信息，但我们可以合理地假定非相干解调系统所提供的本地振荡信号频率与接收到信号一样，相位差是一个  $(0, 2\pi)$  上均匀分布随机变量  $\theta$ ，同时可以合理地认为在一个符号间隔中相位差  $\theta$  几乎不变。

### 03. 复包络 —— 概念

引入复包络概念，可使两路正交信号有更简洁的表达形式。

一般地，两路正交带通信号可表达为：

$$s(t) = \text{Re}\{g(t)e^{j\omega_0 t}\}$$

信号包络：

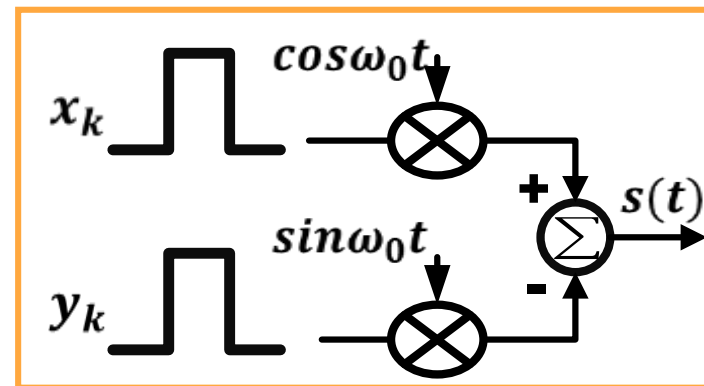
$$g(t) = x(t) + jy(t) = |g(t)|e^{j\theta(t)} = R(t)e^{j\theta(t)}$$

式中：

$$R(t) = |g(t)| = \sqrt{x^2(t) + y^2(t)} \quad \left| \quad \theta(t) = \tan^{-1} \frac{y(t)}{x(t)}\right.$$

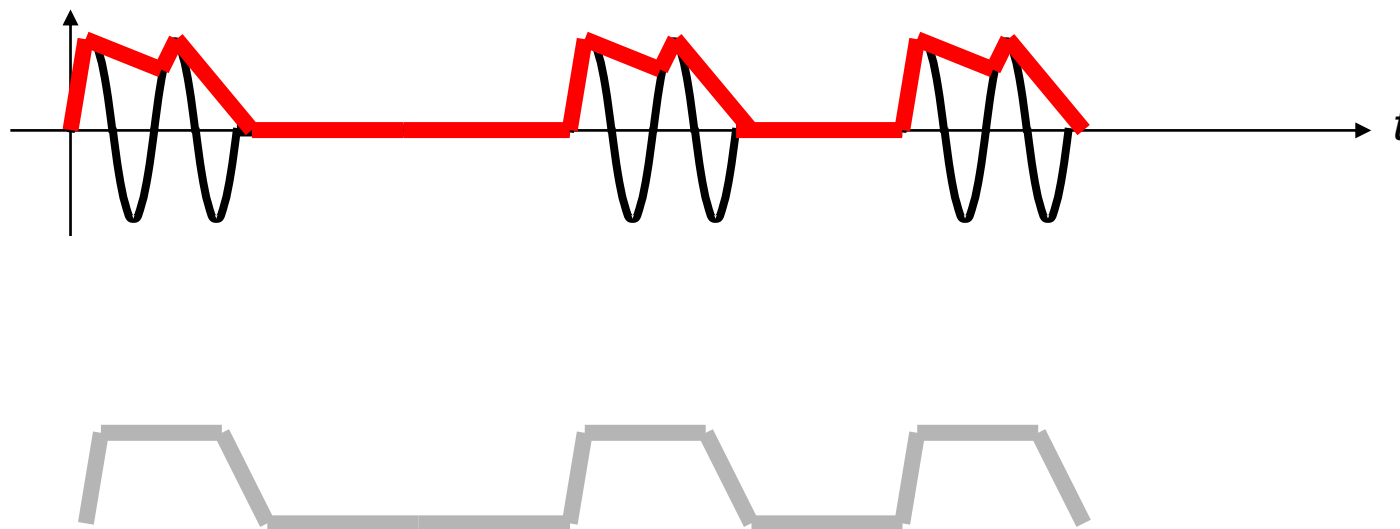
带通信号又可表示为：

$$\begin{aligned} s(t) &= \text{Re}\{[x(t) + jy(t)][\cos\omega_0 t + j\sin\omega_0 t]\} \\ &= x(t)\cos\omega_0 t - y(t)\sin\omega_0 t \end{aligned}$$

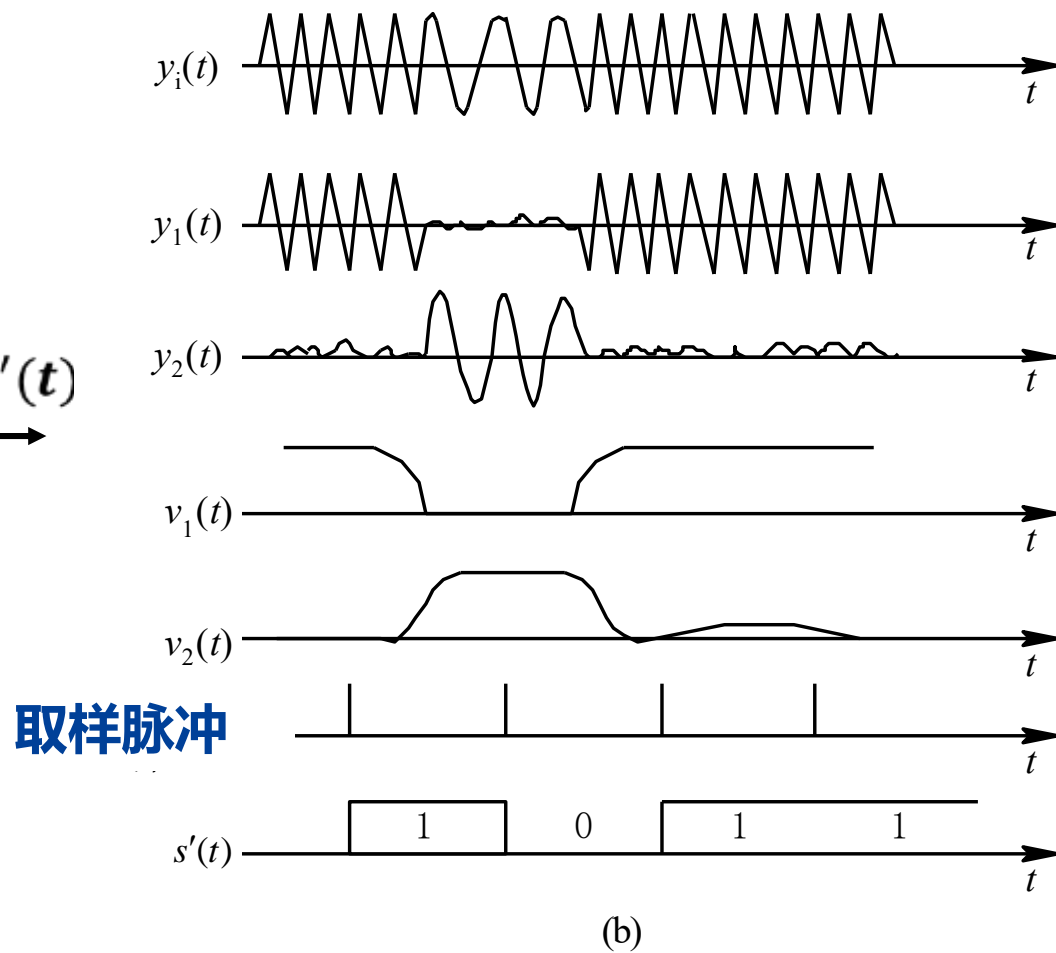
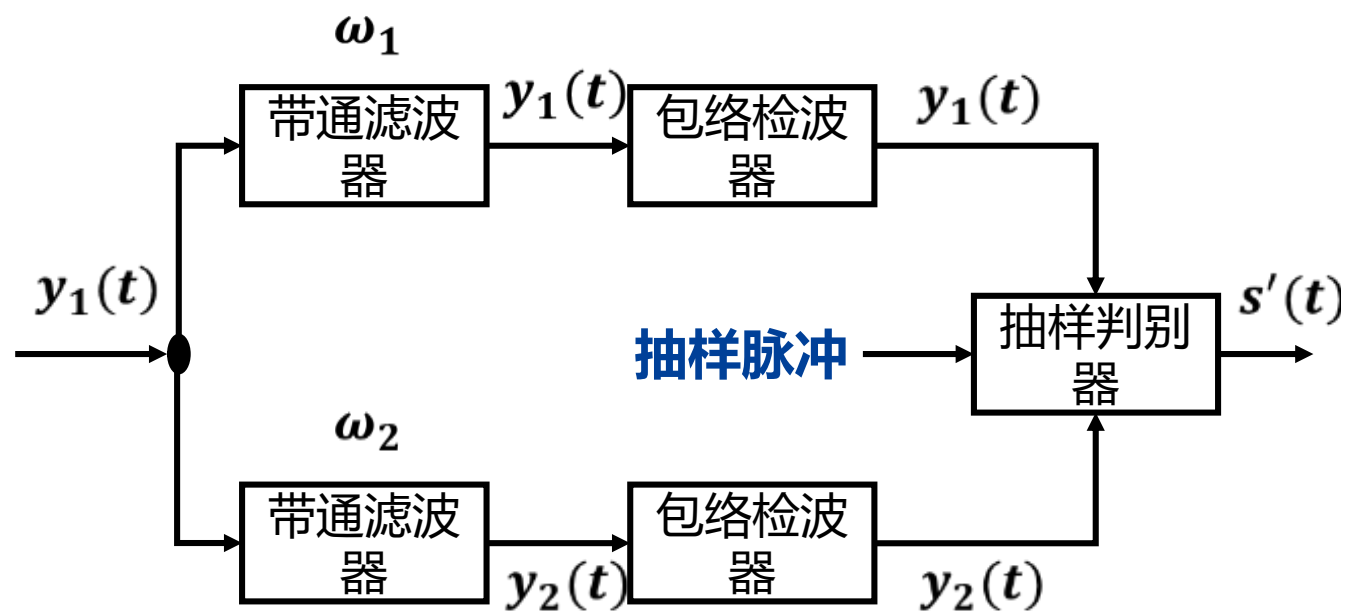


即两路基带信号正交调制的带通信号。

### 03. 非相干解调 —— 2ASK

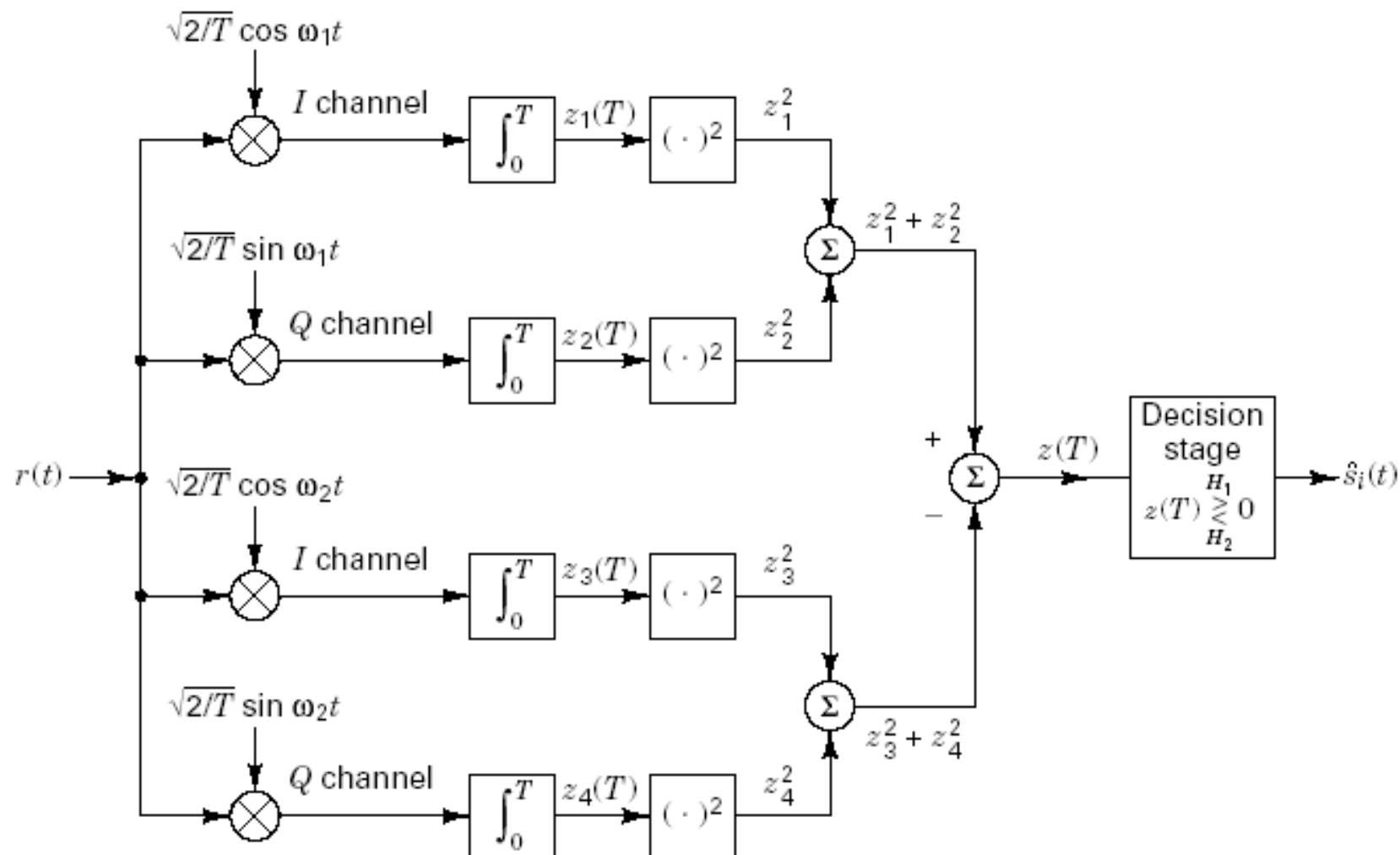


### 03. 非相干解调 —— 2FSK包络检波法



### 03. 非相干解调 —— 2FSK

**正交接收方式：利用两对非相干的正交信号进行解调。**





### 03. FSK信号非相干解调 —— 正交接收方式

**正交接收方式:** 假定  $|\omega_2 - \omega_1|$  是  $2\pi/T$  的整数倍, 则由前面的分析或可知  $\cos\omega_1 t, \sin\omega_1 t, \cos\omega_2 t, \sin\omega_2 t$  是正交函数集



$$\int_0^T \cos \omega_i t \cos \omega_j t dt = \begin{cases} T/2 & i = j \\ 0 & i \neq j \end{cases}$$

$$\int_0^T \sin \omega_i t \cos \omega_j t dt = 0$$

$$\int_0^T \sin \omega_i t \sin \omega_j t dt = \begin{cases} T/2 & i = j \\ 0 & i \neq j \end{cases}$$

### 03. FSK信号非相干解调—— 正交接收方式

■ 正交接收方式:接收信号一般地可以表示为:

$$\begin{aligned} r(t) &= A \cos(\omega_i t + \phi) + n(t) \\ &= A \cos \phi \cos \omega_i t - A \sin \phi \sin \omega_i t + n(t) \end{aligned}$$

■ 在非相干检测的条件下, 一般 $\phi$ 是一个缓慢变化的量, 因此

当发 $\omega_1$ 时, 有

$$z_1^2 + z_2^2 > 0, z_3^2 + z_4^2 \approx 0$$

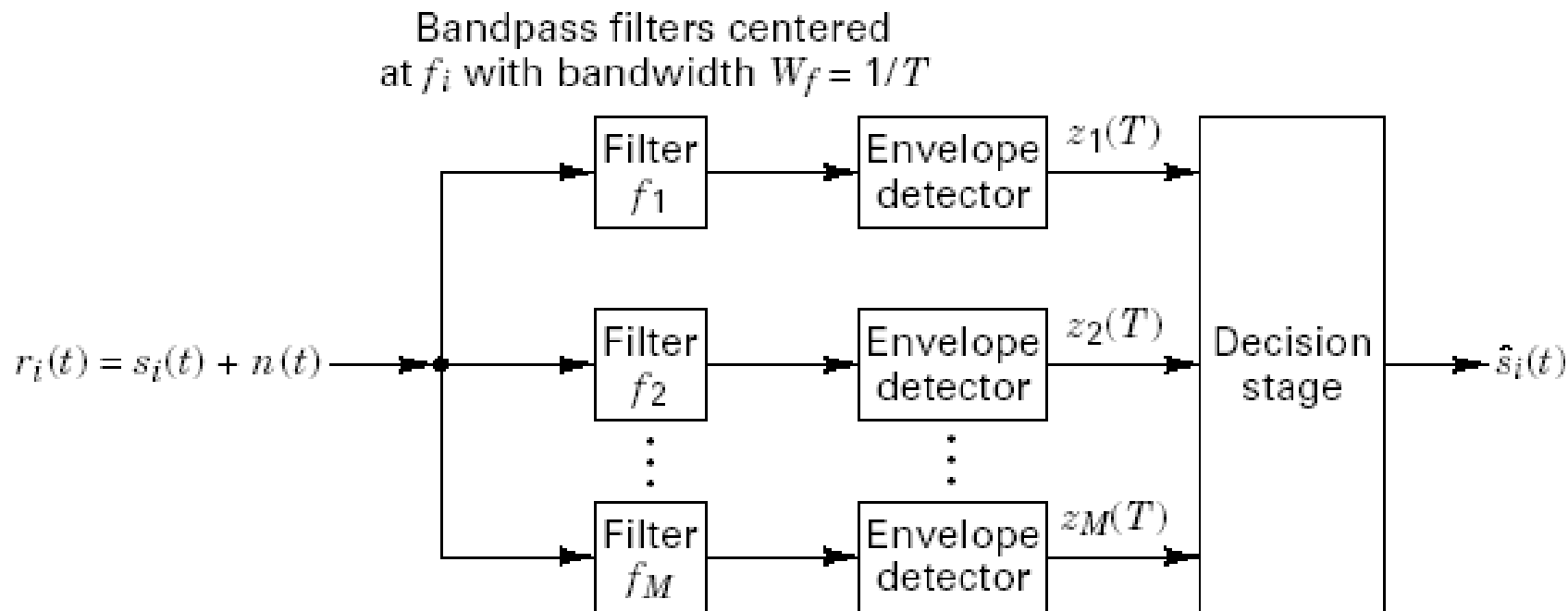
当发 $\omega_2$ 时, 有

$$z_3^2 + z_4^2 > 0, z_1^2 + z_2^2 \approx 0$$

由此可作出判决。该方法同样适合于MFSK的信号检测。

### 03. FSK信号非相干解调——包络检测接收方式

**包络检测接收方式：利用包络检测器判断信号的有无。**



**信号的检测可采样简单的择大判决法。**

- 理论上，FSK信号的非相干检测也可以在频域中进行，先对信号作傅立叶变化，然后判断频率所在的位置。



# 目 录

## 01 基本概念

---

- ## 02 数字带通调制技术

---

- ## 03 相干解调与非相干解调

---

## 04 M进制信号及其性能

---

## 05 总结

---

## 04. 二进制数字调制系统的性能比较 —— 误码率

二进制数字调制系统的误码率公式一览表

调制方式	误码率	
	相干解调	非相干解调
2ASK	$Q \left[ \sqrt{\frac{E_b}{2n_0}} \right]$	$\frac{1}{2} e^{-\frac{E_b}{4n_0}}$ (高信噪比)
2FSK	$Q \left[ \sqrt{\frac{E_b}{n_0}} \right]$	$\frac{1}{2} e^{-\frac{E_b}{2n_0}}$
2PSK/2DPSK	$Q \left[ \sqrt{\frac{2E_b}{n_0}} \right]$	$\frac{1}{2} e^{-\frac{E_b}{n_0}}$

误码率一定的情况下，2PSK, 2FSK, 2ASK系统所需的信噪比关系为

$$r_{2ASK} = 2r_{2FSK} = 4r_{2PSK}$$

## 04. 二进制数字调制系统的性能比较 —— 误码率

$$r_{2ASK} = 2r_{2FSK} = 4r_{2PSK}$$



转换为分贝表示为

$$(r_{2ASK})_{dB} = 3dB + (r_{2FSK})_{dB} = 6dB + (r_{2PSK})_{dB}$$

$P_e=10^{-5}$ 时2ASK、2FSK和2PSK所需要的信噪比		
方式	信噪比 $r$	
	倍	分贝
2ASK	36.4	15.6 (= 12.6+3)
2FSK	18.2	12.6 (= 9.6+3)
2PSK	9.1	9.6

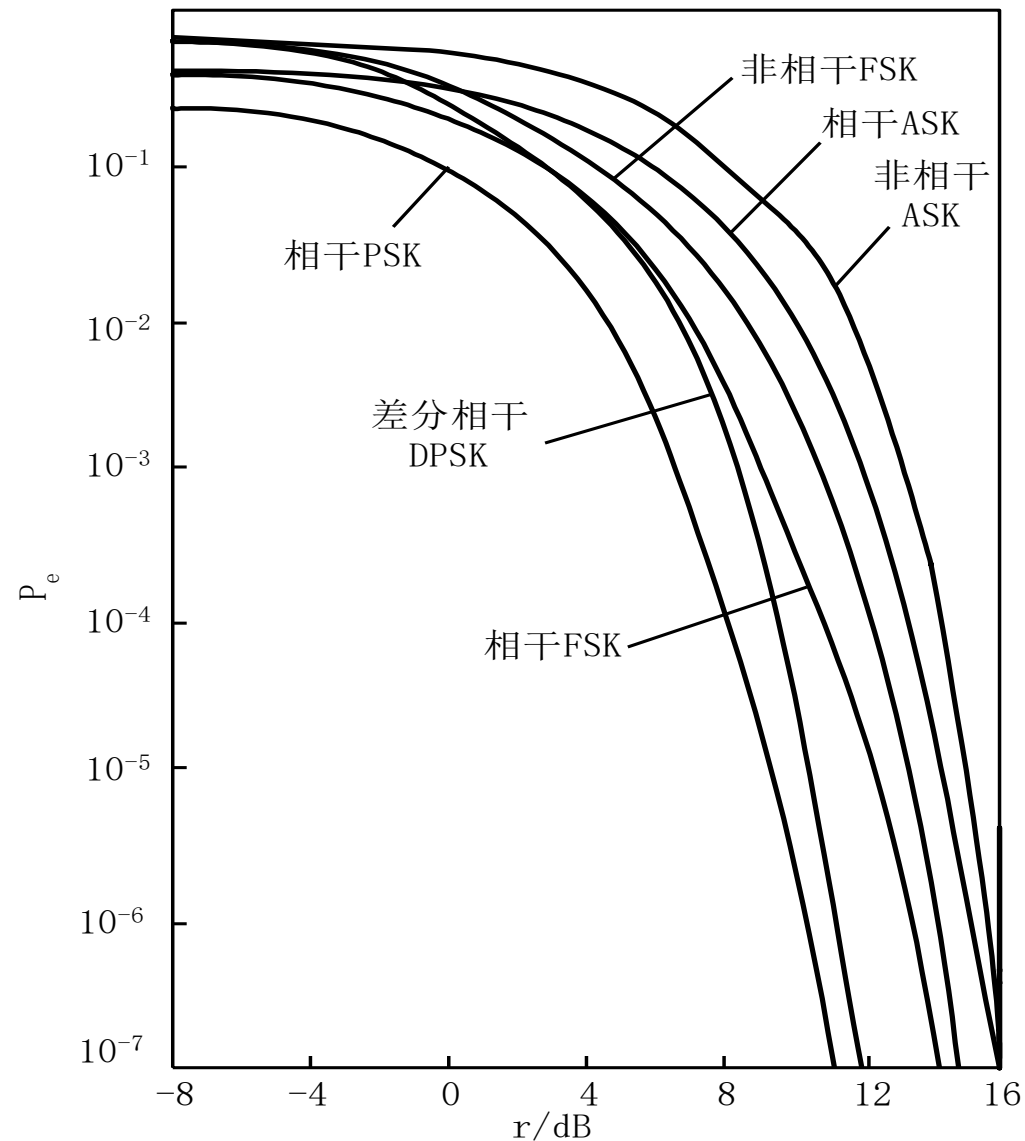
## 04. 二进制数字调制系统的性能比较 —— 误码率

$E_b/n_0=10$ 时2ASK、2FSK和2PSK/2DPSK的误码率

方式	误码率 $P_e$	
	相干解调	非相干解调
2ASK	$1.26 \times 10^{-2}$	$4.1 \times 10^{-2}$
2FSK	$7.9 \times 10^{-4}$	$3.37 \times 10^{-3}$
2PSK/2DPSK	$3.9 \times 10^{-6}$	$2.27 \times 10^{-5}$

## 04. 二进制数字调制系统的性能比较

■ 误码率  $P_e$  与信噪比  $r$  的关系曲线



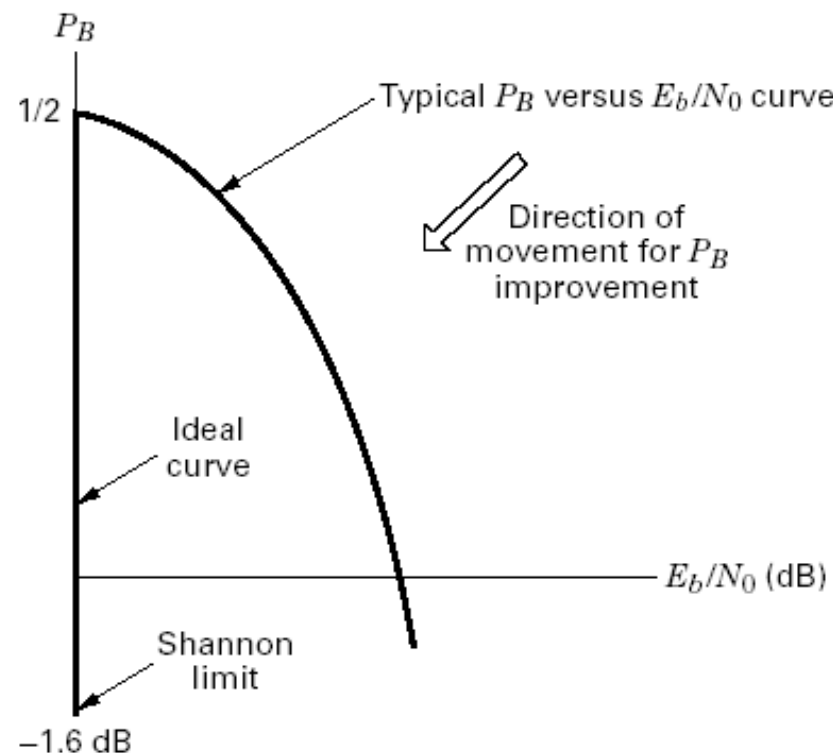


## 04. M进制信号及其性能——误比特率特性曲线

随着  $E_b/N_0$  的增大，误比特率  $P_B$  下降；

$P_B$  最不利的取值为  $1/2$ ；

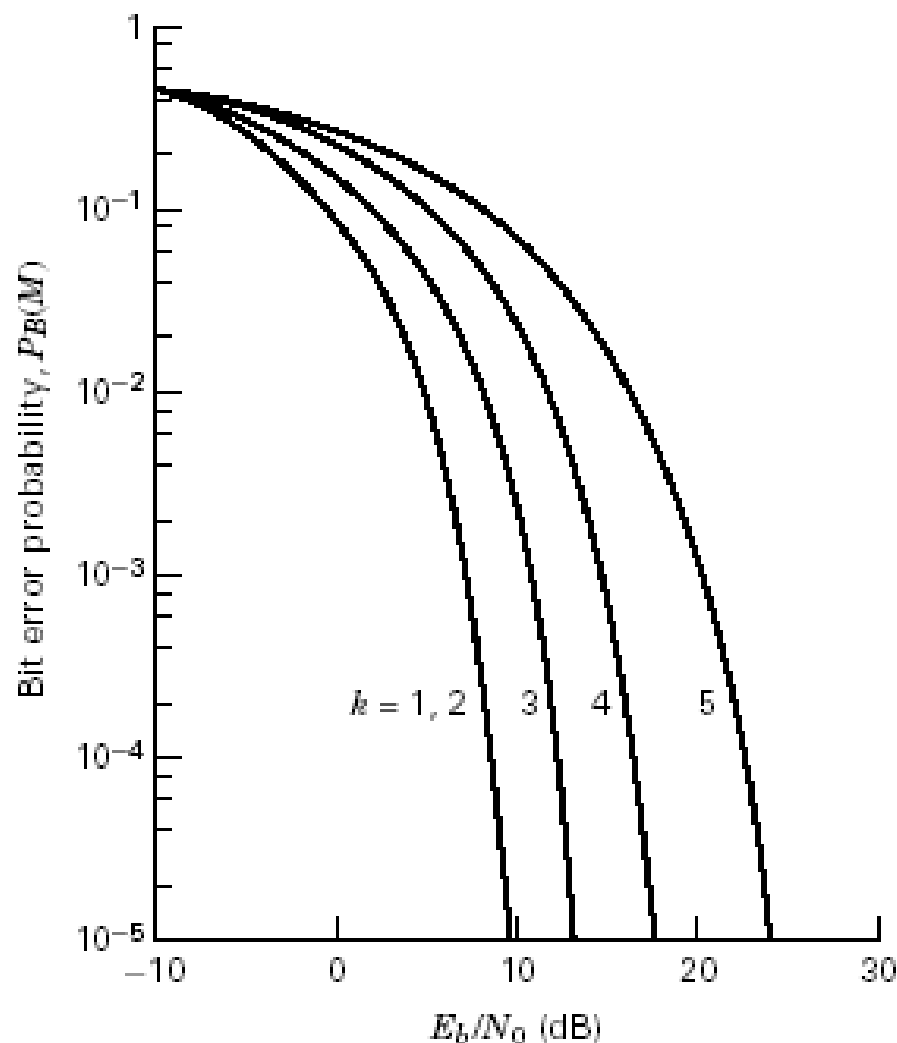
- 当  $P_B > 1/2$  时，可对检测结果进行相反的判决： $0 \rightarrow 1, 1 \rightarrow 0$ ，可使最终的  $P_B < 1/2$



理想曲线由香农定理决定，当  $E_b/N_0 < -1.6$  dB 时，不可能实现无差错的传输。

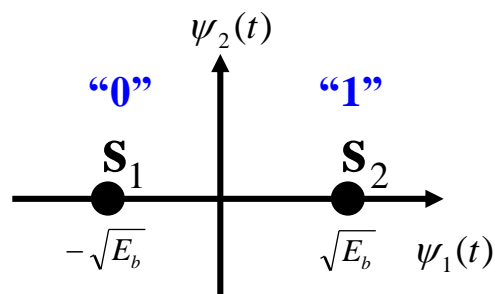
## 04. M进制信号及其性能 —— M进制信号相干检测的误比特率

■ 多相信号可用性能降低换取  
带宽利用率的提高根据  
 $R_b, R_s, T, W, r$ 间的关系

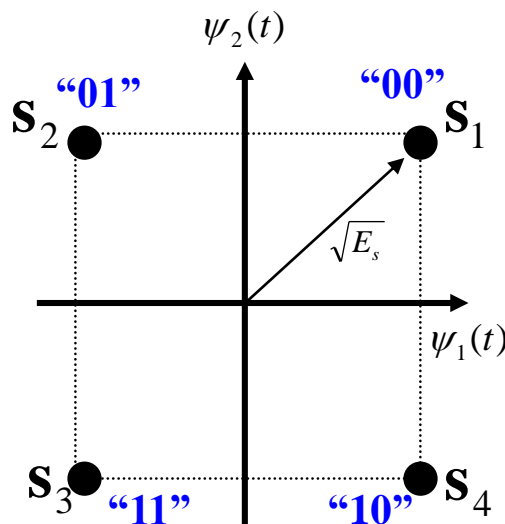


## 04. MPSK信号

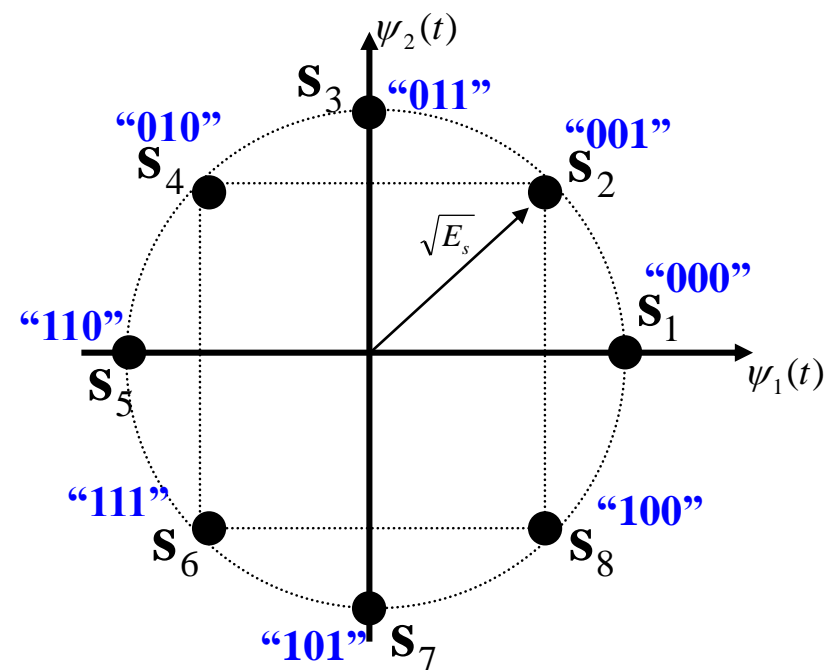
BPSK (M=2)



QPSK (M=4)



8PSK (M=8)



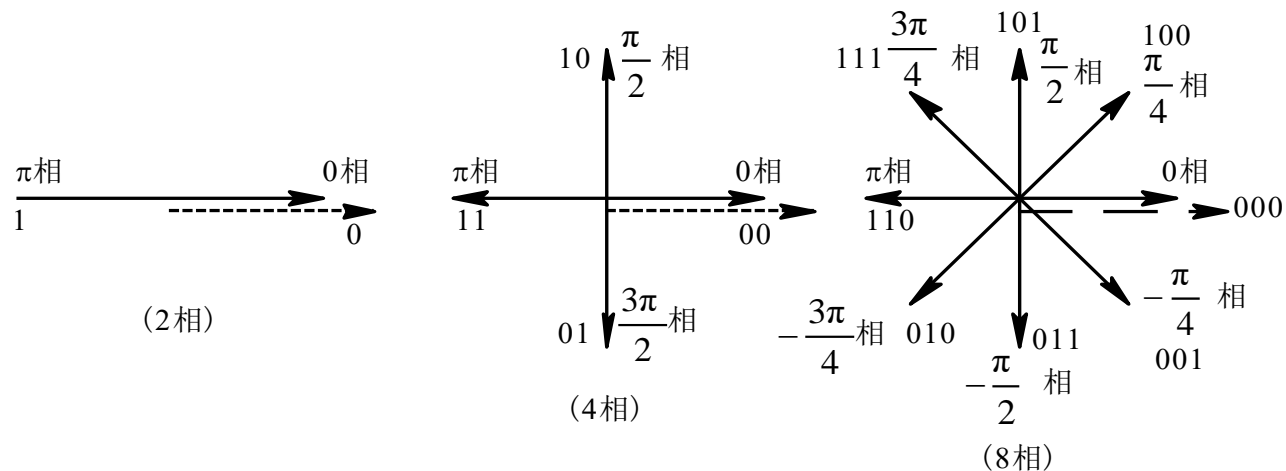
当  $R_b$  不变时,  $M$  增大,  $R_s$  降低,  $1/T$  减少, 所需带宽减少;

若信号幅度不变, 噪声容限下降, 误码上升;

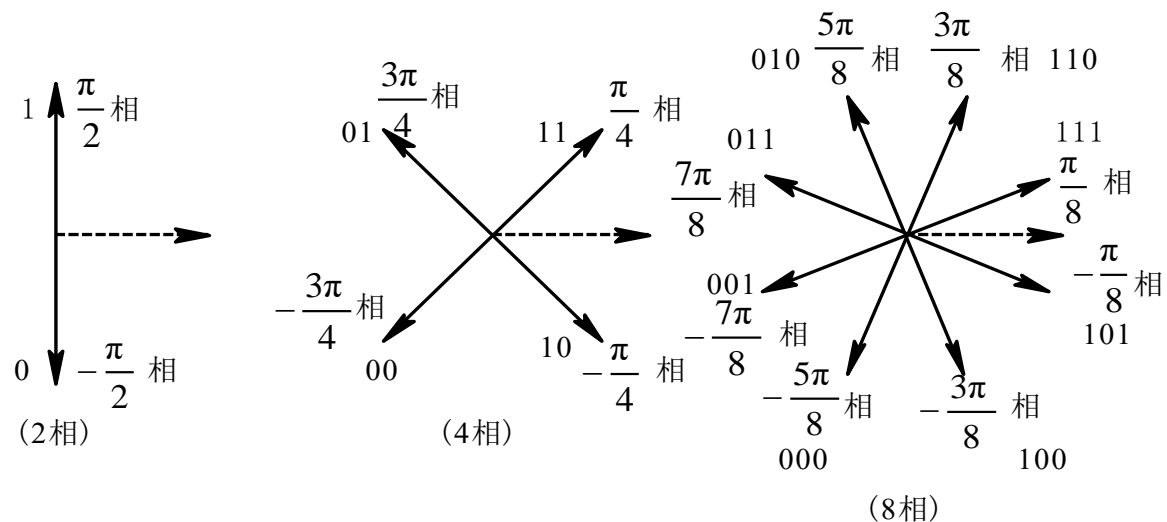
$M$  增大时, 要保持相同的噪声容限, 要提高信号功率。

## 04. 各种MPSK星座图举例

形式1  
 $\frac{\pi}{2}$  体系



形式2  
 $\frac{\pi}{4}$  体系



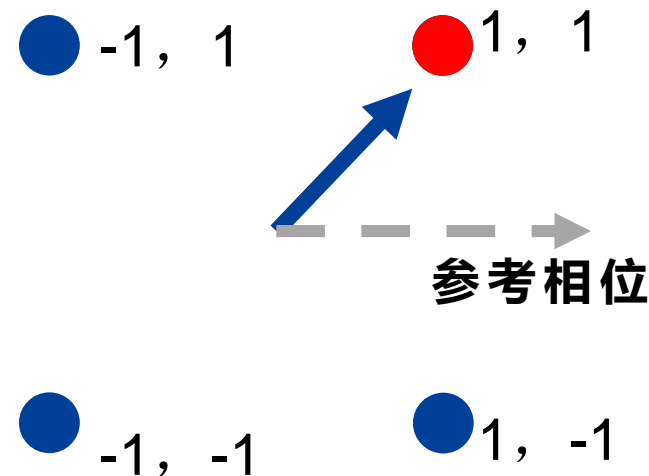
## 04. QPSK调制 —— 例7

把星座图的数据改称双极性就容易理解了

例7：发“11”（记为ab）时，发送波形应为

$$\begin{aligned}\cos(\omega t + \frac{\pi}{4}) &= \cos \omega t \bullet \cos \frac{\pi}{4} - \sin \omega t \bullet \sin \frac{\pi}{4} \\ &= \frac{\sqrt{2}}{2} \cos \omega t - \frac{\sqrt{2}}{2} \sin \omega t \\ &= \frac{\sqrt{2}}{2} a \cos \omega t - \frac{\sqrt{2}}{2} b \sin \omega t\end{aligned}$$

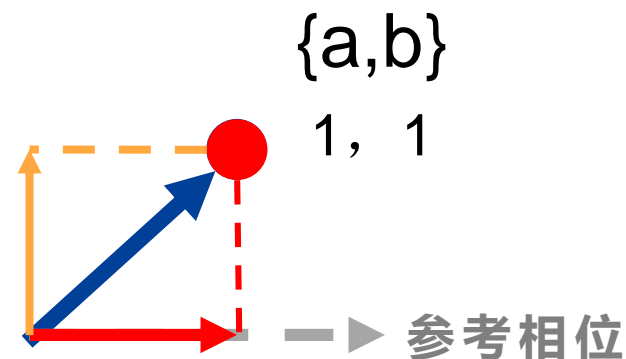
当发其他数据时同样有这个规律



## 04. QPSK调制 —— 例7

参考相位（即载波）的正交分量，为+1，即b位

$\{a,b\}$   
-1, 1 ●



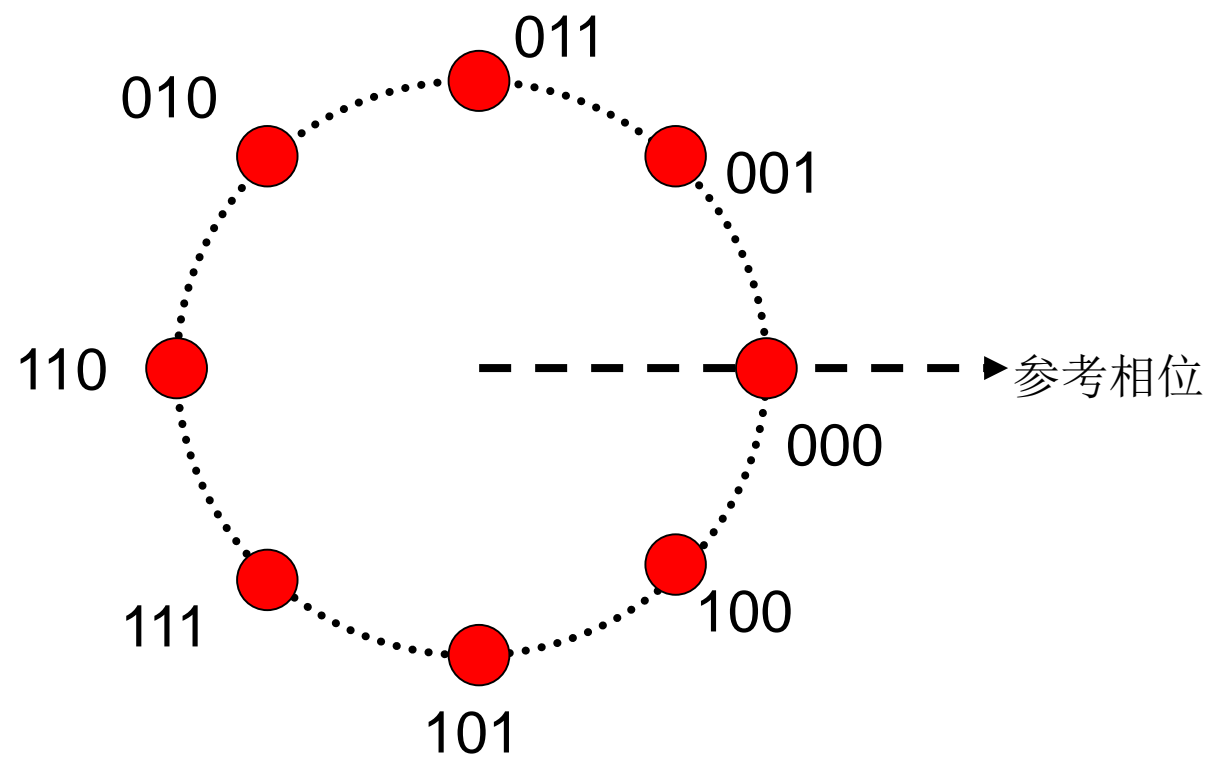
参考相位（即载波）的同相分量，为+1，即a位

-1, -1  
 $\{a,b\}$  ●

1, -1  
 $\{a,b\}$  ●

可见任意一个星座点都可以用同相分量+正交分量得到，而这两个分量的系数由 $\{a,b\}$ 来确定

## 04. 8PSK简介 —— 简介

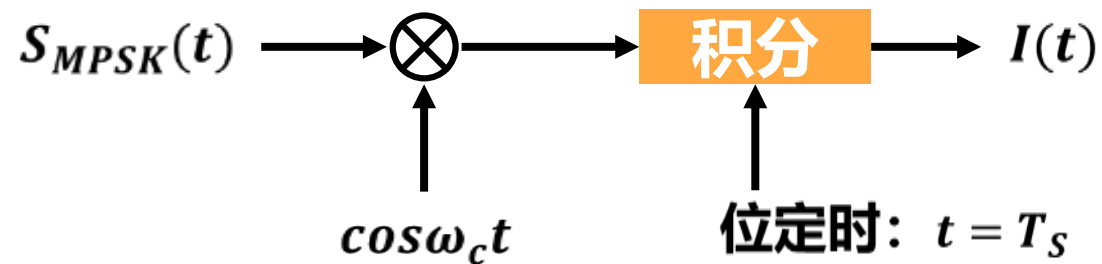


## 04. MPSK信号的误码率

### 输入信号

$$\begin{aligned} S_{MPSK}(t) &= A \cos\left(\omega_0 t + \frac{2\pi i}{M} + \theta\right) = \\ &= A \cos\left(\frac{2\pi i}{M} + \theta\right) \cos \omega_0 t - A \sin\left(\frac{2\pi i}{M} + \theta\right) \sin \omega_0 t \end{aligned}$$

### 解调相关器





## 04. MPSK信号的误码率

当 $E_s/N_0$ 足够大时, 由随机过程理论, 近似地有

$$f(\theta) \approx \sqrt{\frac{E_s}{\pi N_0}} \cos \theta \exp\left(-\frac{E_s}{N_0} \sin^2 \theta\right), \quad |\theta| < \frac{\pi}{2}$$

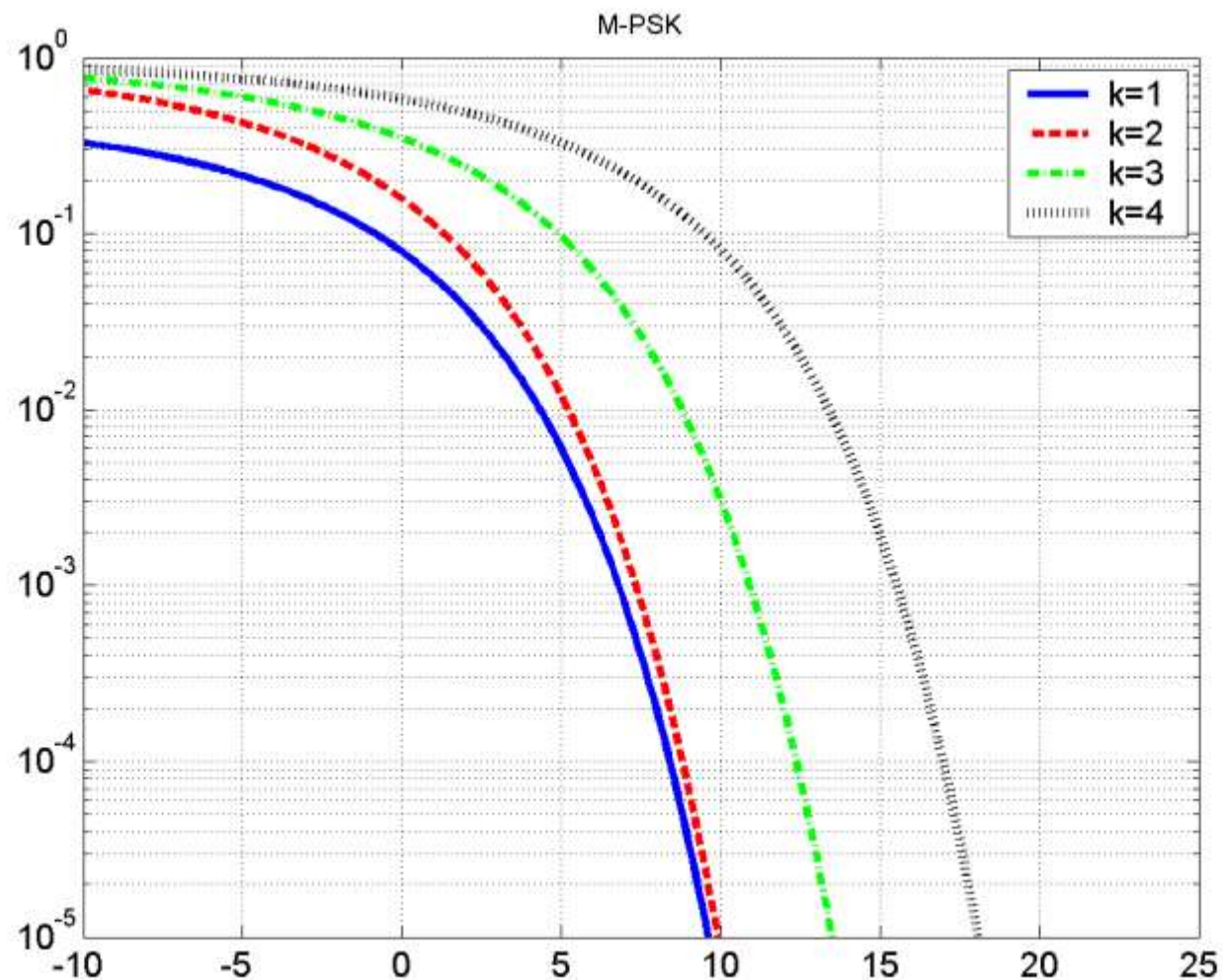


$$P_{E,MPSK} = 1 - \int_{-\frac{\pi}{M}}^{\frac{\pi}{M}} f(\theta) d\theta \approx 2Q\left[\sqrt{\frac{2E_s}{N_0}} \sin\left(\frac{\pi}{M}\right)\right]$$

对MDPSK信号可以导出误码率公式

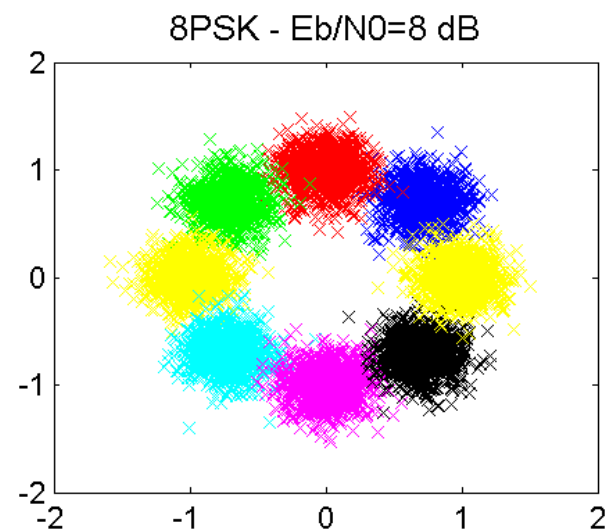
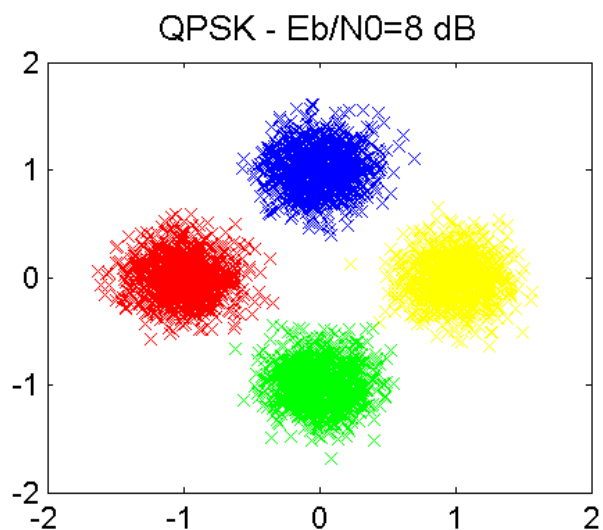
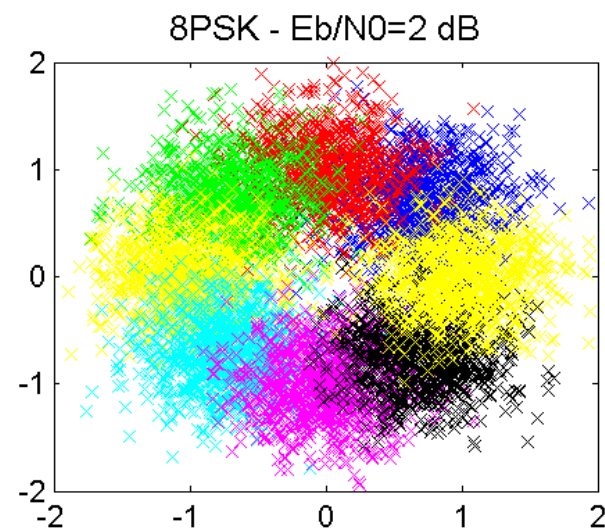
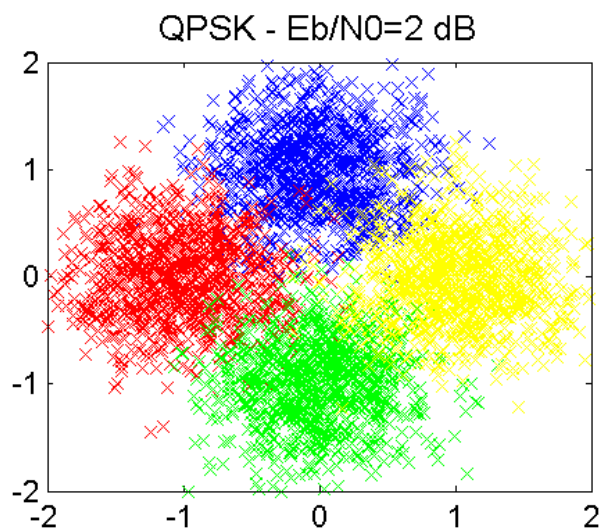
$$P_{E,MDPSK} \approx 2Q\left[\sqrt{\frac{2E_s}{N_0}} \sin\left(\frac{\pi}{\sqrt{2}M}\right)\right]$$

## 04. MPSK信号的误码率



“The same average symbol energy for different sizes of signal space”

## 04. MPSK调制信号输出





# 目 录

## 01 基本概念

---

- ## 02 数字带通调制技术

---

- ## 03 相干解调与非相干解调

---

## 04 M进制信号及其性能

---

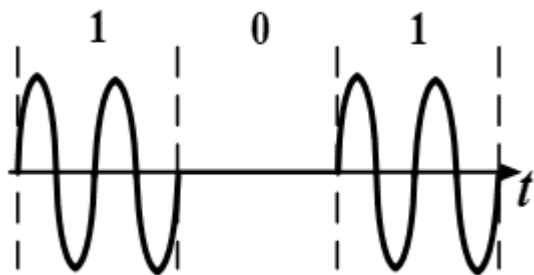
## 05 总结

---

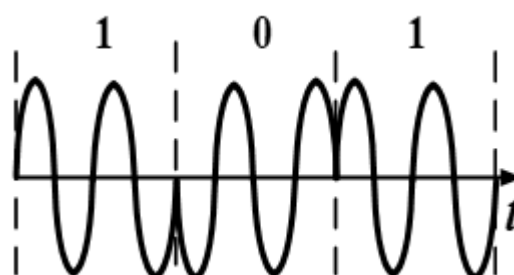
### 数字带通调制技术

- **数字调制**：将数字符号转换成适合信道特性的波形的过程
- **基本的带通调制方式**：

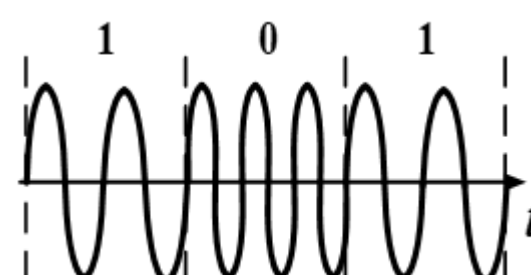
- **幅移键控 (ASK)**



- **频移键控 (FSK)**



- **相移键控 (PSK)**



- **多进制键控调制 (MASK, MFSK, MPSK)**

相同传输条件下： 传输速率  $\uparrow$  噪声容限  $\downarrow$  误码率  $\uparrow$

### ■ 数字带通解调技术

- **相干解调**：利用与发射端同频同相的载波信号进行检测

**优点**：能准确恢复调制信号，检测性能好

**缺点**：复杂度高，难以获得精确的载波信号

- **非相干解调**：无需发射端载波信息进行信号检测

**优点**：结构简单，易于实现

**缺点**：较相干解调有明显性能损失，适合高信噪比环境

## 05. 总结

### M进制信号与性能

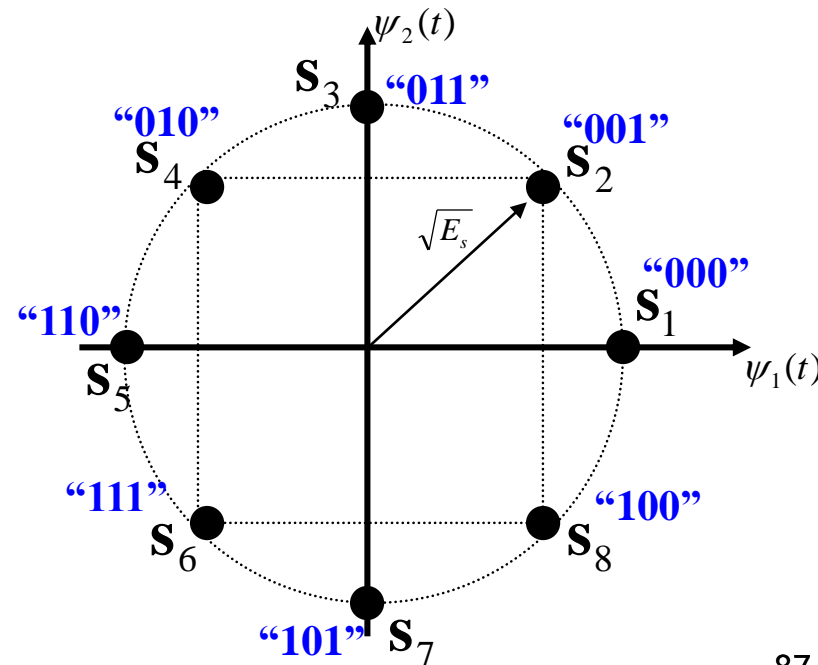
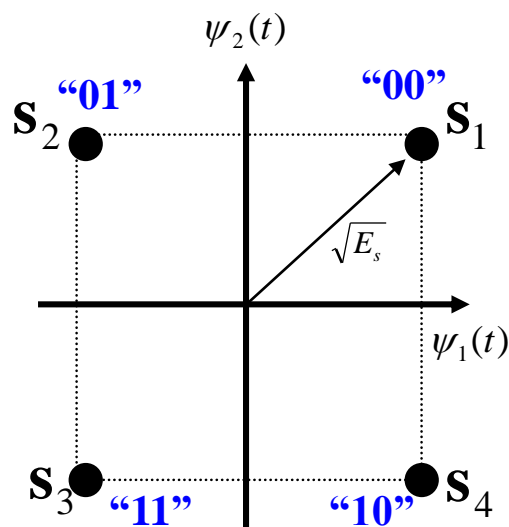
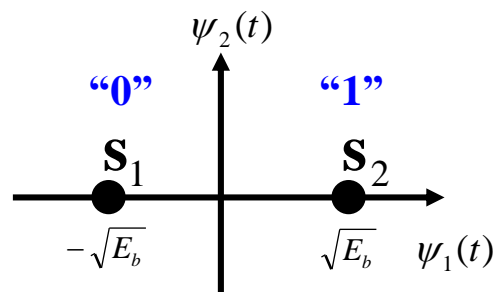
- 误码率一定时，2PSK, 2FSK, 2ASK系统所需的信噪比关系为

$$r_{2ASK} = 2r_{2FSK} = 4r_{2PSK}$$

dB

$$(r_{2ASK})_{dB} = 3dB + (r_{2FSK})_{dB} = 6dB + (r_{2PSK})_{dB}$$

- MPSK星座图



■ 采用相干MPSK调制方式在AWGN信道上以100kbits/s的速率传送数据。系统误比特率  $P_B = 10^{-3}$ ，系统带宽50kHz。假设系统频域传输函数是滚降因子  $r = 1$  的升余弦函数，并采用格雷码格雷码指定码元各比特位。

a) 已知  $P_B$ ，求所需的  $E_S/N_0$ 。

b) 求所需的  $E_b/N_0$ 。



# 课堂练习解答

滚降因子  $r = 1$  , 则  $W_{DSB} = (1 + r) R_S$

$$50kHz = 2R_S, R_S = 25 \text{ ksymbol/s} \quad \Rightarrow \quad k = \log_2 M = \frac{R}{R_S} = \frac{100kbits/s}{25ksymbol/s} = 4$$

当使用格雷码时,  $P_B \approx \frac{P_E}{\log_2 M}$   $\Rightarrow$   $P_E = (\log_2 M)P_B = kP_B = 4 \times 10^{-3}$

$$\because P_E = 2Q \left[ \left( \sqrt{\frac{2E_S}{N_0}} \right) \sin\left(\frac{\pi}{M}\right) \right] = 4 \times 10^{-3} \quad \Rightarrow \quad Q(x) = 2 \times 10^{-3}$$

根据表格B.1,  $x = 2.88$ , 有  $\left( \sqrt{\frac{2E_S}{N_0}} \right) \sin\left(\frac{\pi}{M}\right) = 2.88$   $\Rightarrow$   $\sqrt{\frac{2E_S}{N_0}} = \frac{2.88}{\sin(\frac{\pi}{16})} = 14.76$

$$\frac{E_b}{N_0} = \frac{108.96}{k} = 27.24 \quad \leftarrow \quad \frac{E_S}{N_0} = 108.96$$

# 谢谢!

