

《现代通信原理》

课程归纳与总结

各章要点

第1章 绪论

第3章 随机过程

第4章 信道

第5章 模拟调制系统

第6章 数字基带传输系统

第10章 信源编码

第8章 数字带通传输系统

第9章 数字信号的最佳接收

第11章 差错控制编码

第12章 正交编码与伪随机序列

第13章 同步原理

重点的、基本的

了解

Chp1绪论

■ 基本概念

- 点对点通信系统模型
- 模拟、数字基带、数字频带系统的系统模型
- 通信方式（单工/双工/半双工，串行/并行）
- 信源熵及其最大熵
- 比特率和波特率的概念和区别；多进制与二进制比特率和波特率的关系

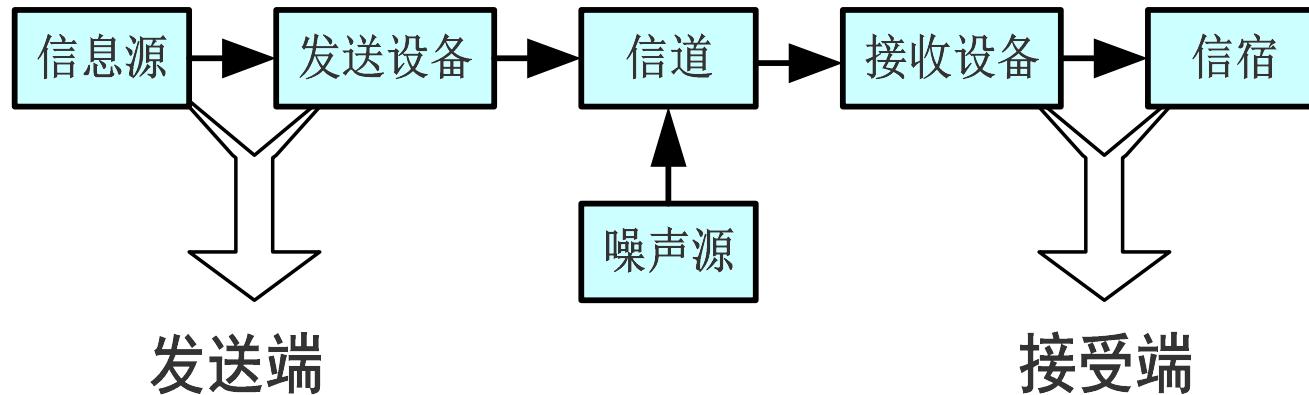
■ 基本计算

- 信息量的计算 (I)
- 离散系统平均信息量计算 (H)
- 多进制系统比特率和波特率的计算及换算
- 误码率和误信率的计算

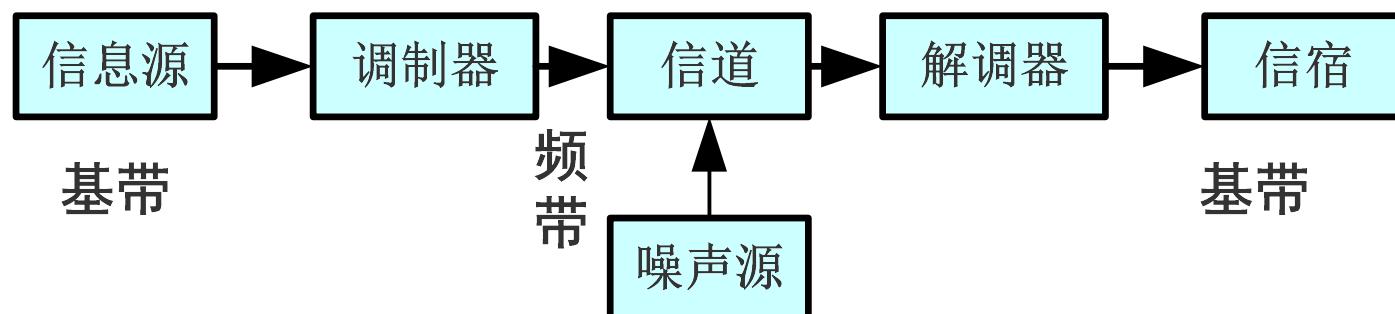
■ 典型习题

- 思考题1-4, 1-5, 1-7, 1-8;
- 作业：1-2; 1-4; 1-6; 1-8

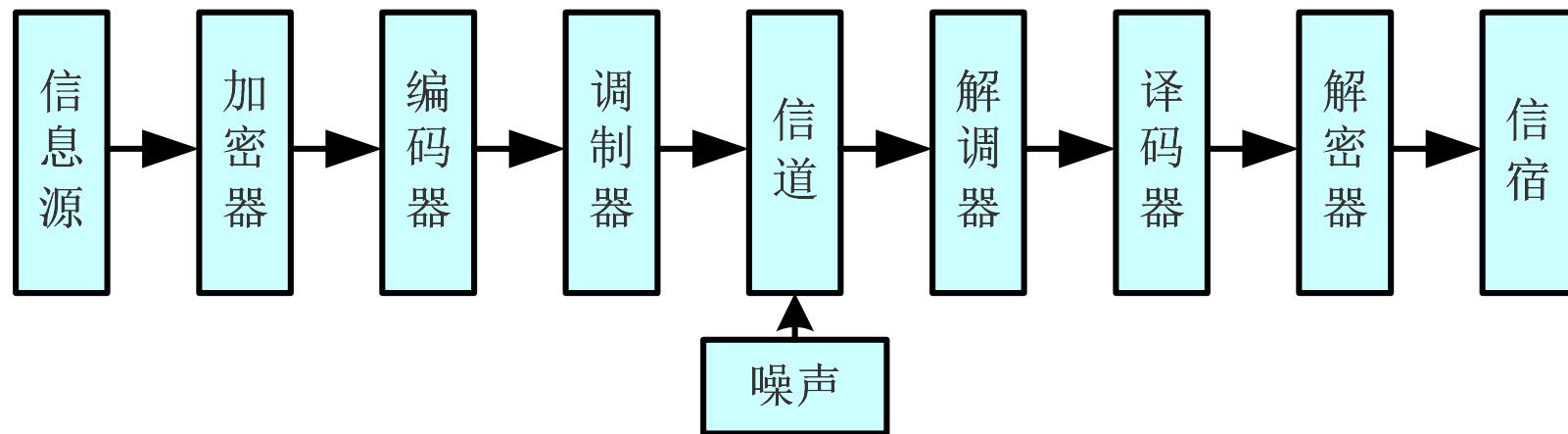
“点一点”通信系统模型



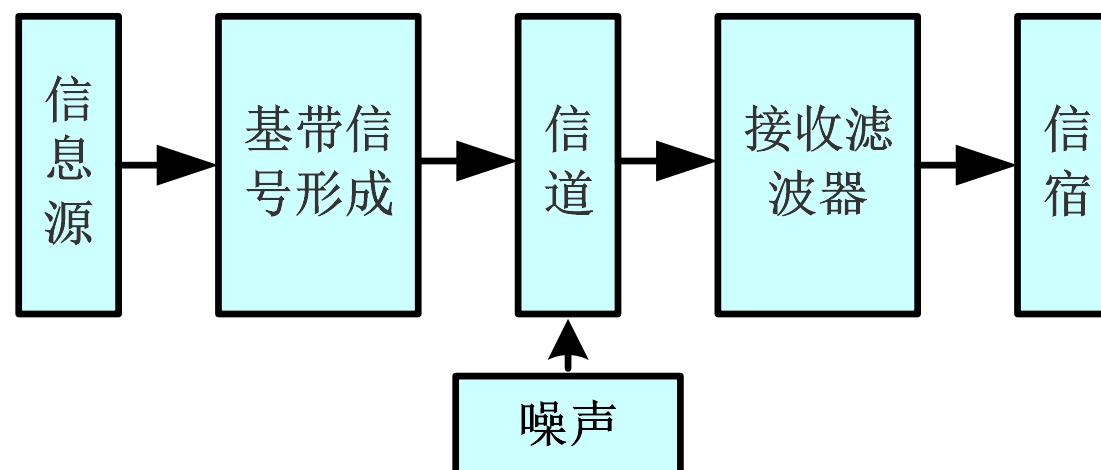
模拟通信系统框图



数字频带通信系统框图



数字基带通信系统框图



调制方式分类及用途

调制方式	用途举例	
连续波调制	常规双边带调幅(AM)	广播
	单边带调制(SSB)	载波通信、短波无线电通信
	双边带调制(DSB)	立体声广播
	残留边带调制(VSB)	电视广播、传真
	频率调制(FM)	微波中继、卫星通信、广播
	相位调制(PM)	中间调制方式
数字调制	振幅键控(ASK)	数据传输
	移频键控(FSK)	数据传输
	相移键控(PSK;DPSK)	数据传输
	其它高效数字调制(QAM;MSK....)	数字微波、空间通信

调制方式分类及用途（续）

调制方式		用途举例	
脉冲调制	脉冲模拟调制	脉幅调制(PAM)	中间调制方式、遥测
		脉宽调制(PDM)	中间调制方式
		脉位调制(PPM)	遥测、光纤传输
	脉冲数字调制	脉冲编码调制(PCM)	市话中继线、卫星、空间通信
		增量调制(DM)	军用、民用数字电话
		差分脉码调制(DPCM)	电视电话、图像编码
		其它编码方式(ADPCM等)	中速数字电话

通信方式分类

■ 按消息传递的方向和时间分

- ---双工通信、半双工通信、单工通信

■ 按数字信号码元排列方法分

- ---串行传输、并行传输

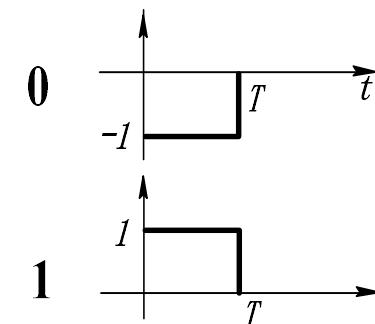
信息量的计算

- 信息及其度量： $I = \log_2 \frac{1}{P(x)} = -\log_2 P(x) \text{ bit}$
- 离散独立等概消息的信息量： $I = \log_2 M \text{ bit}$
- 离散独立非等概消息的信息量 $\sum_{i=1}^M P(x_i) = 1$
 - 熵（统计平均信息量）：
 $H(x) = -\sum_{i=1}^M P(x_i) \log_2 P(x_i) \text{ bit/符号}$
 - 等概时熵最大： $H_{\max} = \log_2 M \text{ bit/符号}$
 - 统计平均和算术平均存在一定误差

数字通信系统有效性指标---传输速率

■ 码元速率 R_B (传码率、波特率) :

- 每秒传送的码元个数
- 单位：波特 Baud， 简写 Bd
- 若码元宽度为 T , 则 $R_B = 1/T$



■ 信息速率 R_b (传信率、比特率) :

- 每秒传送的信息量
- 单位：bit/s (bps, 比特/秒)

■ 频带利用率：单位频带提供的码元传输速率或信息传输速率

$$\eta_B = R_B / B \quad (\text{Bd} / \text{Hz}) \text{ 或 } \eta_b = R_b / B \quad (\text{bit} / \text{s} \cdot \text{Hz})$$

- 意义：把带宽与传输速率相联系，以便更好地考察有效性

码元速率与信息传输速率的关系

- 若码元速率为 R_B , 信息速率为 R_b , 每个符号有M种可能状态, 则:

$$R_b = R_B \cdot H \text{ bit/s}$$

等概时: $H = \log_2 M \text{ bit/符号}$

不等概时: $H(x) = -\sum_{i=1}^M P(x_i) \log_2 P(x_i) \text{ bit/符号}$

- 如: 四进制, 每码元2bits信息

$$R_B = 1200 \text{ Baud 时}, \quad R_b = 2400 \text{ bit/s}$$

- 特例: $M=2$, 码元速率等于信息速率 (数值相同, 单位不同)

数字通信系统的可靠性指标——差错率

- **误比特率（误信率）**：码元在传输过程中，其信息量丢失的概率

$$P_b = \frac{\text{错误比特数}}{\text{传输总的比特数}}$$

- **误码率（误符号率）**：码元在传输过程中被错传（码元丢失）的概率

$$P_e = \frac{\text{错误码元数}}{\text{传输总的码元数}}$$

■ 误比特率与误码率的关系

- 对于二进制： $P_b = P_e$ ；
- 对于M进制： $P_b \leq P_e$

模拟通信系统的主要性能指标

- **有效性：**用传输频带宽度 B_w
频带宽度越小，有效性越高 (定性关系)
- **可靠性：**收端最终的输出信噪比：
输出信噪比越大，可靠性越大 (定性关系)

Chp3随机信号分析

■ 基本概念

- 随机过程的基本概念及其统计特性的定义
- 平稳随机过程
 - 狹义/广义平稳的概念、各态历经性的意义
 - 自相关相关函数的特性
 - 平稳随机过程通过线性系统
- 高斯随机过程
 - 概念及其重要性质
 - 高斯白噪声和带限白噪声
- 窄带随机过程概念、表达式、包络和相位分布特性
- 理解白噪声对通信系统的影响和作用

■ 基本计算

- 均值、方差、自相关函数
- 功率谱和平均功率

■ 典型习题

思考题：3-1；3-4；3-7；作业3-2

平稳随机过程----狭义(严格)平稳

- 一般概念：统计特性与时间起点无关的随机过程
- 狹义（严格）平稳：（任何n维）分布特性 与时间起点无关

平稳随机过程----广义(宽)平稳

■ 广义(宽)平稳：数字特征 与时间起点无关

{ 数学期望与 t 无关 : $a(t) = a$
自相关函数只与时间间隔 t 有关 : $R(t_1, t_2) = R(t)$

注意：由式3.2-3和3.2-4、5可知

狭义平稳 $\xrightleftharpoons[\text{未必}]{\text{必}} \rightarrow$ 广义平稳

随机过程的各态历经性（遍历性）

设 $x(t)$ 是平稳过程的任一个实现，它的时间平均值为：

$$a = \bar{a}$$
$$R(\tau) = \overline{R(\tau)}$$

遍历

$$\bar{a} = \overline{x(t)} = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} x(t) dt$$
$$\overline{R(\tau)} = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} x(t)x(t + \tau) dt$$

意义：

统计平均值=时间平均值

替代

使计算大为简化

注意：

遍历过程 $\xrightleftharpoons[\text{未必}]{\text{必是}}$ 平稳过程

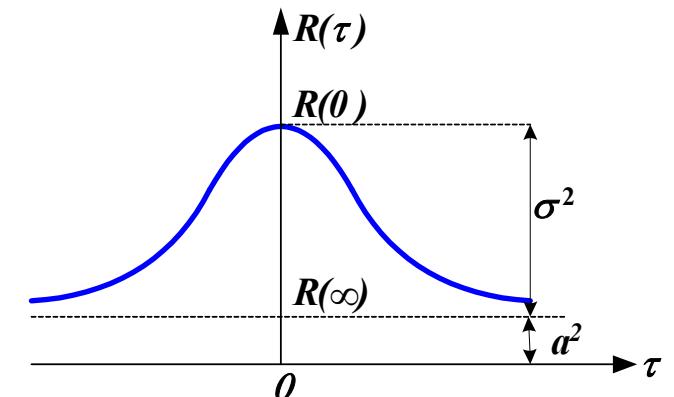
含义：任一样本经历了平稳过程的所有可能状态。

平稳随机过程自相关函数的性质

- **自相关函数的重要性：**可描述平稳随机过程的统计特性，如数字特征等；与平稳随机过程的谱特性有内在联系
- 设 $\xi(t)$ 为实平稳随机过程（电压或电流），它的自相关函数为：

$$R(\tau) = E[\xi(t)\xi(t+\tau)]$$

- 1) $R(0) = E[\xi^2(t)] = s$ [$\xi(t)$ 的平均功率]
- 2) $R(\infty) = E^2[\xi(t)] = a^2$ [$\xi(t)$ 的直流功率]
- 3) $R(0) - R(\infty) = \sigma^2$ [方差, $\xi(t)$ 的交流功率]
- 4) $R(-\tau) = R(\tau)$ [$R(\tau)$ 是偶函数]
- 5) $|R(\tau)| \leq R(0)$ [$R(\tau)$ 有上界]



自相关函数大致图形

- **维纳-辛钦定理** (联系时域与频域的桥梁)

$$P_\xi(\omega) \Leftrightarrow R(\tau)$$

关于随机过程的功率谱

■ 为什么引入功率谱密度 (PSD) ?

- 由于其不确定性，没有确定的频谱函数，用功率谱密度描述其**频域特性**
- 任何平稳随机过程都存在自相关函数及其傅里叶变换（功率谱密度）

窄带随机过程概念

■ 条件

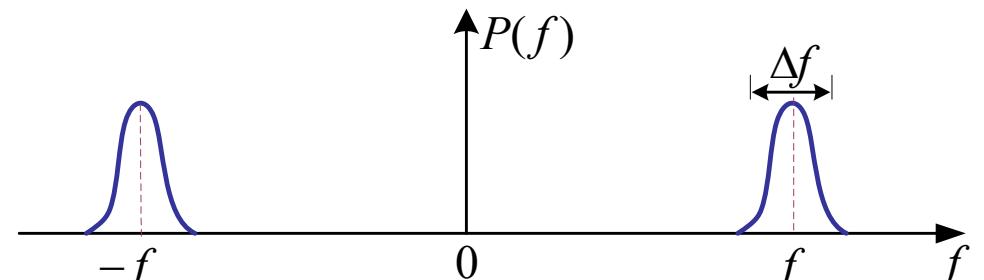
$$\Delta f \ll f_c;$$

$f_c >> 0$; Δf 为信号带宽;

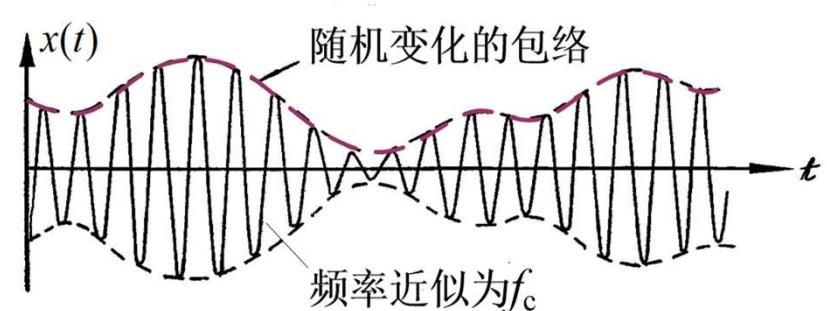
f_c 为信号载频

■ 波形和频谱示意：

■ 物理含义：包络和相位相对于载频均为缓慢变化



(a) 窄带过程的功率谱密度

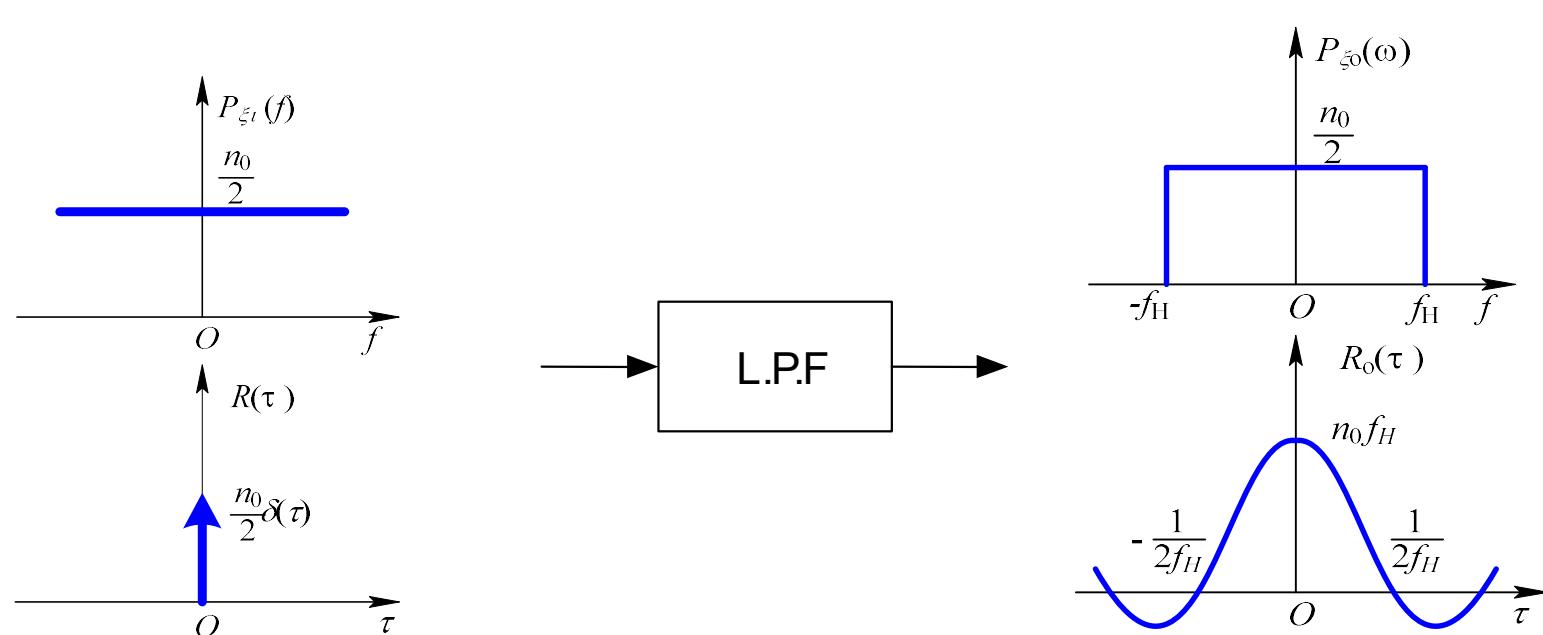


(b) 窄带过程的样本波形

低通白噪声（带限白噪声）

■ 理想白噪声经理想低通滤波器后的输出

$$P_{\xi}(f) = \begin{cases} n_0/2, & |f| \leq f_H, \\ 0, & |f| > f_H \end{cases} \Leftrightarrow R(\tau) = f_H n_0 \text{Sa}(2\pi f_H \tau)$$



Chp4 信道与噪声

■ 基本概念

- 信道的定义与分类
- 信道的模型
 - 加性噪声、乘性干扰的概念
- 恒参/随参信道的概念及其对所传信号的影响
 - 关于随参信道的概念、多径效应、衰落特性
- 连续信道的信道容量

■ 基本计算

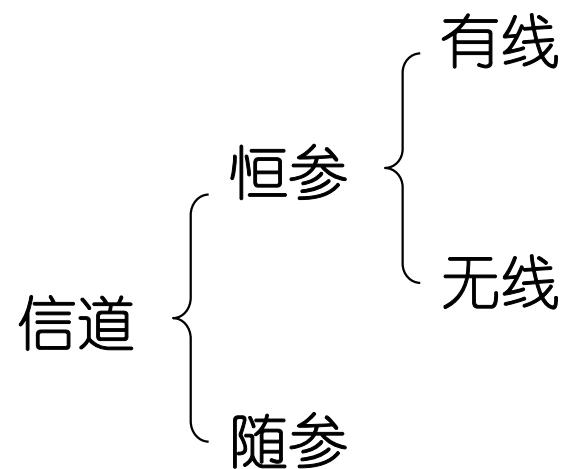
- 香农公式的应用与计算

■ 典型题目

- 思考题4-6；4-7；4-8；4-17 作业：4-8

狭义信道的定义和分类

- 狹义信道：指信号的传输媒质（习惯上说的信道）



衰落：信号包络因传播有了起伏的现象

快衰落：由多径效应引起，包络为瑞利型

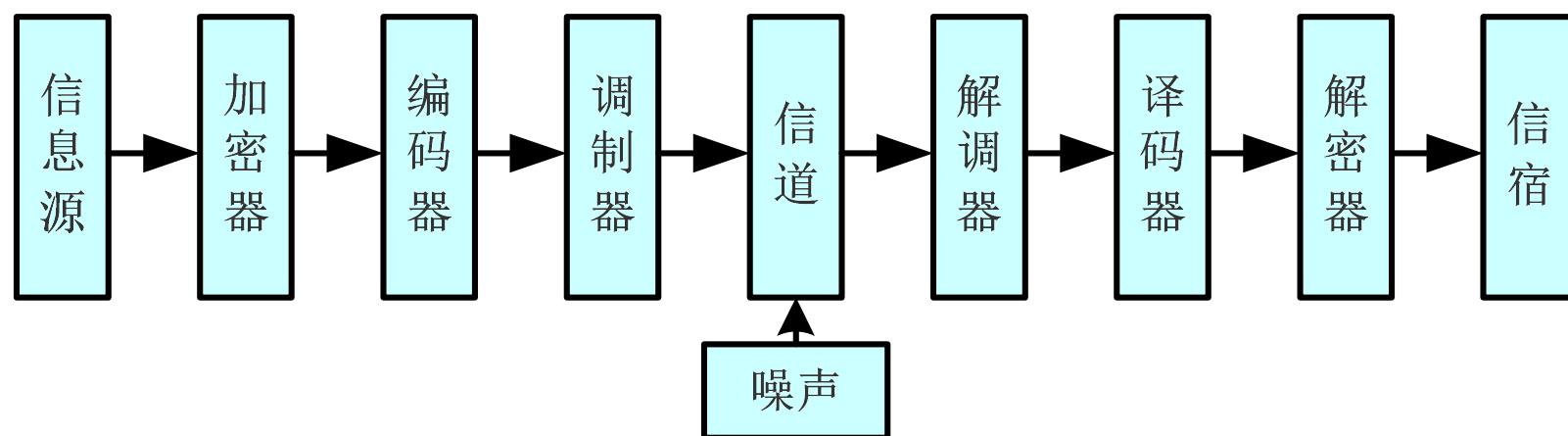
慢衰落：由阴影效应等引起

广义信道的定义和分类

■ 广义信道

调制信道： 调制器输出端至解调器输入端

编码信道： 编码器输出端至编码器输入端



噪声对传输信号的影响

- 模拟信号波形失真
- 数字信号误码
- 影响信道容量（香农定理）

$$C = B \log_2 \left(1 + \frac{S}{N} \right) \text{ bit / s}$$



信道容量C是实现无差错
传输时的最高信息速率

噪声对传输信号的影响

- 模拟信号波形失真
- 数字信号误码
- 影响信道容量（香农定理）

$$C = B \log_2 \left(1 + \frac{S}{N} \right) \text{ bit / s}$$



信道容量C是实现无差错
传输时的最高信息速率

$X_{(\text{dB})} = 10 * \log_{10}(X)$ dB 也称为分贝

$X = 10^{(X_{(\text{dB})}/10)}$

Chp4 模拟调制系统

■ 基本概念

- 幅度调制 (AM、DSB-SC、SSB) 的概念、表达式和带宽计算；
- 幅度调制信号 (AM、DSB) 的调制和解调方法框图、抗噪声性能、调制制度增益
- 非线性调制 (FM) 的概念、表达式、带宽、调频指数、最大频偏的概念与计算
- AM、DSB、SSB、FM的性能比较，AM、FM广播系统的分析与评价

■ 基本计算

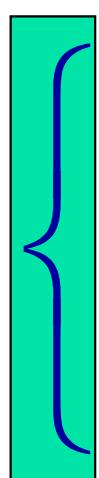
- 幅度调制 (AM、DSB) 频谱和带宽计算
- FM的带宽和参数计算
- 幅度调制系统 (AM、SSB、DSB-SC) 输入、输出信噪比的相关计算

■ 典型习题

- 思考题：5-1；5-2, 5-3, 5-9, 5-18
- 作业：5-2；5-7；5-13

比较的前提

所有系统在“同等条件”下进行比较：

- 
- 解调器输入信号功率为 S_i
 - 信道噪声均值为0，单边功率谱密度为 n_0
 - 基带信号带宽为 f_m
 - 其中AM的调幅度为 100%，正弦型调制信号

各种模拟调制系统的性能比较

调制方式	信号带宽	制度增益	$\frac{S_o}{N_o}$	设备复杂度	主要应用
DSB	$2B_b$	2	$\frac{S_i}{n_o B_b}$	中等	较少应用
SSB	B_b	1	$\frac{S_i}{n_o B_b}$	复杂	短波无线电广播，话音频分多路
VSB	略大于 B_b	近似SSB	近似SSB	复杂	商用电视广播
AM	$2B_b$	2/3	$\frac{1}{3} \cdot \frac{S_i}{n_o B_b}$	简单	中短波无线电广播
FM	$2(m_f+1)B_b$	$3m_f^2(m_f+1)$	$\frac{3}{2} m_f^2 \cdot \frac{S_i}{n_o B_b}$	中等	超短波小功率电台 (窄带FM) 微波中继，调频立体声广播 (宽带FM)

2025/11/11 $m(t)$ 为正弦型信号, 且 $\overline{m(t)} = 0$, $\overline{m^2(t)} = 1/2$, $|m(t)|_{\max} = 1$

Chp6 数字基带传输系统

■ 基本概念

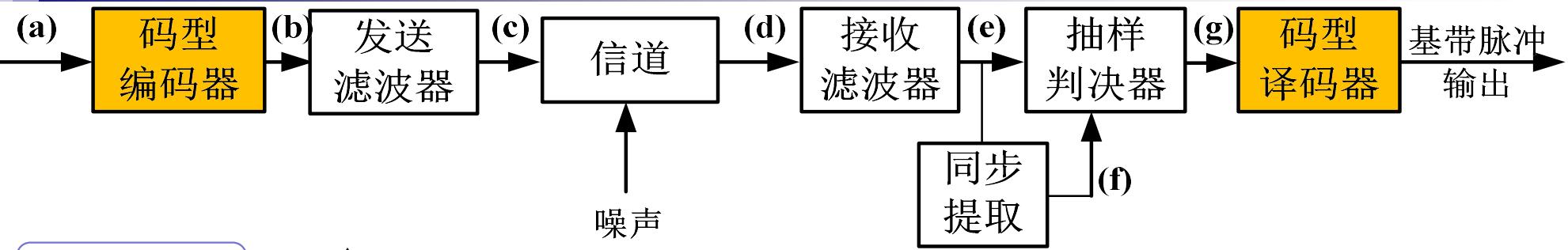
- 数字基带系统的概念、组成框图
- 传输码的概念和编码规则
- 码间串扰的概念和消除码间串扰的条件及其理解
- 二进制单/双极性系统的最佳判决门限
- 眼图的概念和作用

■ 基本计算

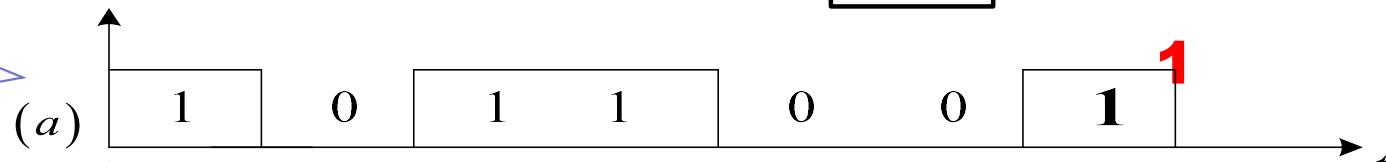
- 差分、AMI、HDB3的编译码与译码
- 频带利用率的计算
- 滚降滤波器的带宽和频带利用率分析
- 奈奎斯特第一准则的应用分析

■ 典型习题

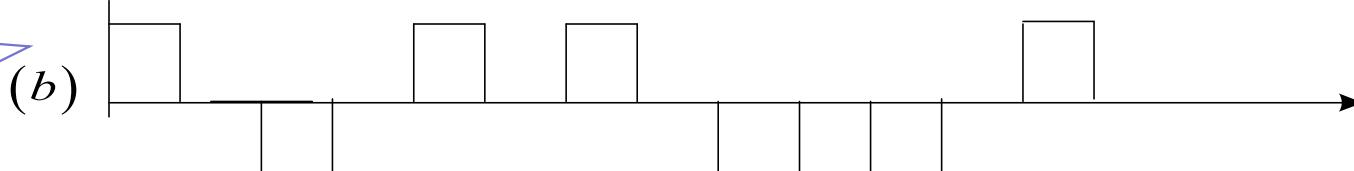
- 思考题：6-1, 6-2, 6-4, 6-6, 6-8, 6-13
- 作业：6-1, 6-7, 6-11, 6-14



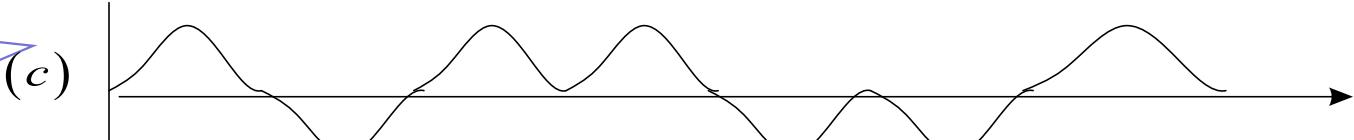
输入信号



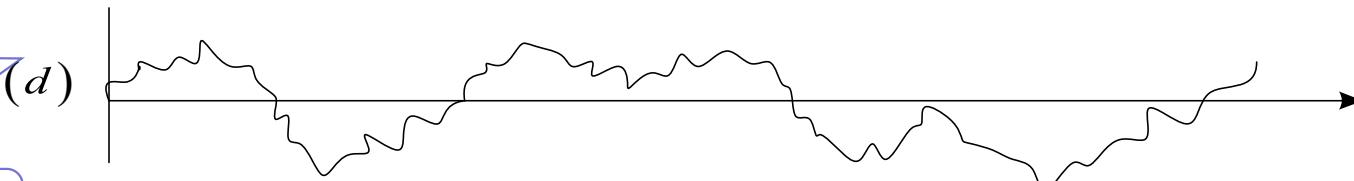
码型变换



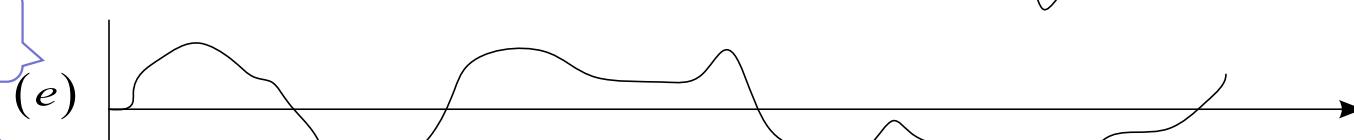
传输波形



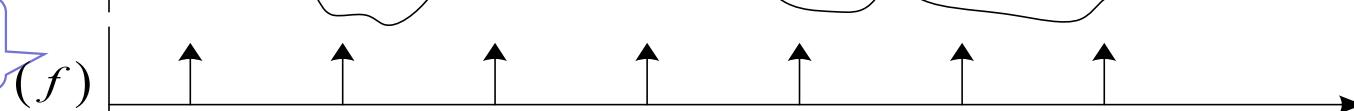
信道输出



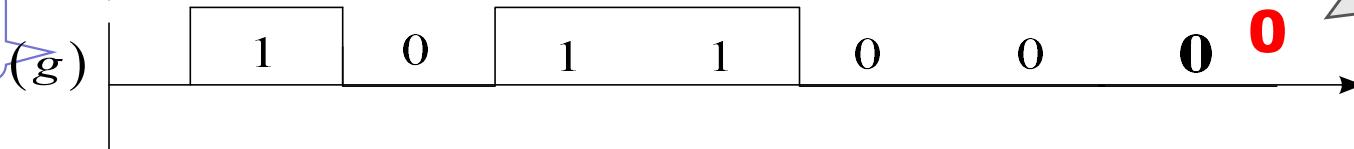
接收滤波输出



位定时脉冲



恢复的信息



错误码元

1 AMI 码 ——传号极性交替码

编码规则：“1” —— +1、 -1交替

“0” —— 0

译码规则：所有+1、 -1均改为1， 即可恢复信码

2 HDB₃码——3阶高密度双极性码

编码规则：

- ◆ 连“0”个数不超过3个时，遵循AMI的编码规则；
- ◆ 连“0”个数超过3个时，将第4个“0”改为非“0”脉冲，记为V₊或V₋，称为破坏脉冲。
- ◆ 相邻V码的极性必须交替出现（确保无直流）；
- ◆ V码的极性应与前一个非“0”脉冲的极性相同，否则，将0000更改为B₊00V₊或B₋00V₋。B称为调节脉冲。
- ◆ V码之后的传号码极性也要交替(B码和“1”码一起作极性交题)

译码规则：

- ◆ 寻找两个相邻的同极性码，后者即为V码；
- ◆ 把V码连同其前3位码均改为0；
- ◆ 所有±1均改为1，即恢复信码

3 差分码——用相邻码元电平跳变/不变表示信息码元

差分编码

$$b_n = a_n \oplus b_{n-1}$$

差分译码

$$a_n = b_n \oplus b_{n-1}$$

无ISI传输的条件

■ 时域条件：

$$h(kT_s) = \begin{cases} C & k = 0 \\ 0 & k \text{ 为其它整数} \end{cases}$$

■ 频域条件：

$$\sum_{n=-\infty}^{\infty} H\left(\omega + \frac{2\pi i}{T_s}\right) = C \quad |\omega| \leq \frac{\pi}{T_s}$$

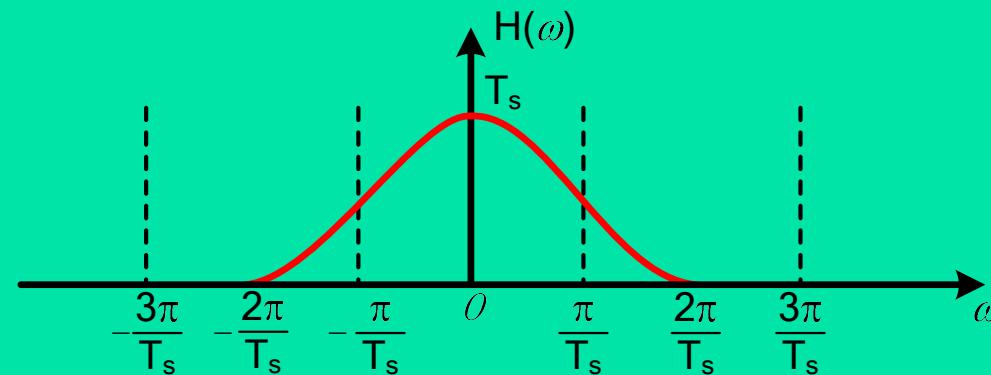
$$\sum_{n=-\infty}^{\infty} H\left(f + if_s\right) = C \quad |f| \leq \frac{f_s}{2}$$

$$i = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$$

示例

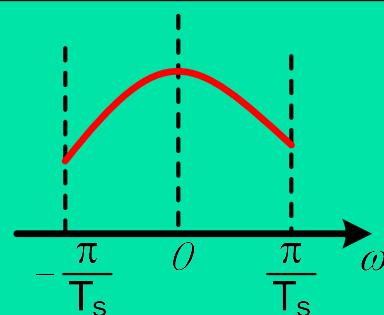
:

(a)



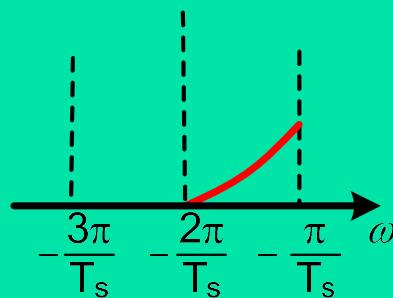
(b)

$i=0$



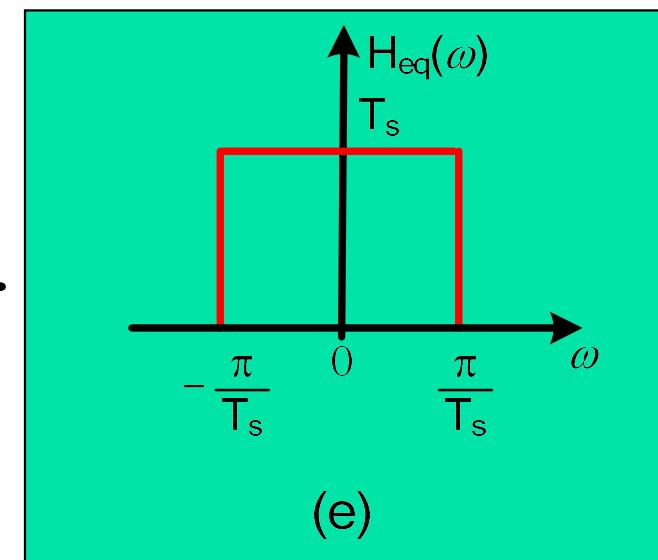
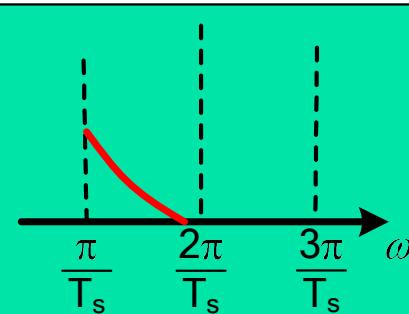
(c)

$i=-1$



(d)

$i=1$



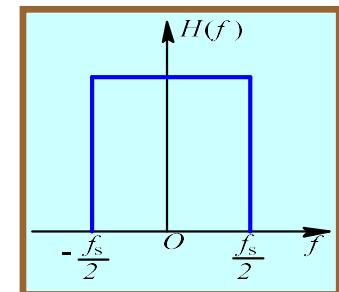
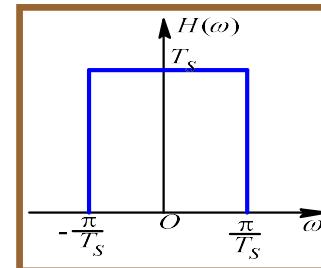
(e)

注: $T_s \rightarrow T_B$

无ISI系统---理想低通

■ 满足该条件的：

- 码元间隔 T_s --- 奈奎斯特间隔；
- 码元速率 $R_B = 1/T_s$ --- 奈奎斯特速率；
- 低通滤波器上限频率 $f_N = f_s/2 = 1/2T_s$ --- 奈奎斯特带宽
($\omega_N = \pi/T_s$)

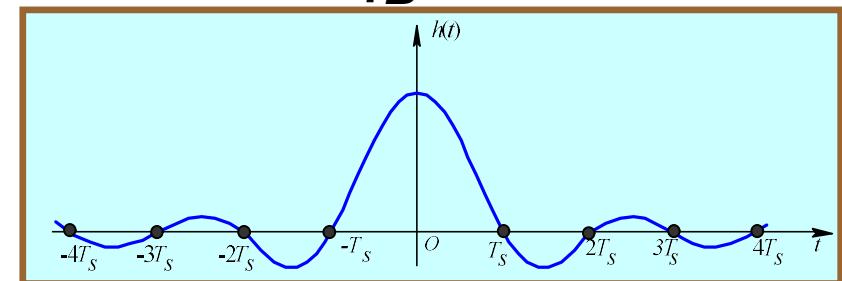


■ 频带利用率： $\eta_B = \frac{R_B}{B} = \frac{R_B}{f_N} = \frac{1/T_s}{1/2T_s} = 2 \text{ Bd / Hz}$

- 这是无ISI条件下所能达到的最大值；
- 当抽样率为 kT_s 时，亦不会产生ISI，但 η_B 将会减小：

■ 评价： $\eta_B = \frac{2}{K} \text{ Bd / Hz}$

- 优点： η_B 高；
- 缺点： $h(t)$ “尾巴”长，对位定时要求高，不可实现



无ISI系统---滚降系统

■ 滚降系数： $\alpha = \frac{\omega_\Delta}{\omega_N} = \frac{f_\Delta}{f_N} \quad 0 \leq \alpha \leq 1$

■ 对于 $0 \leq \alpha \leq 1$, 有如下结论：

□ 滚降特性亦可消除ISI, 其条件与理想低通滤波器相同($\alpha=0$), ω_N 是滚降段中心频率;

□ 带宽: $B = f_N + f_\Delta = (1+\alpha)f_N$

ω_N 为对应理想低通的截止频率,
又称奈奎斯特带宽

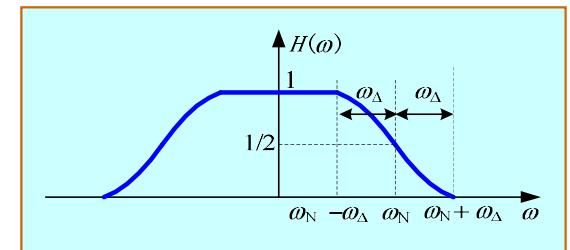
□ 频带利用率: $\eta_B = \frac{R_B}{B} = \frac{2f_N}{(1+\alpha)f_N} = \frac{2}{(1+\alpha)} Bd/Hz$

■ 评价:

□ 优点: 可实现, 且对位定时的精度要求降低

□ 缺点: 带宽加大, 因而频带利用率降低

■ 滚降系统有多种: 直线滚降、三角形特性、余弦滚降等



Chp7-8 数字调制系统

■ 基本概念

- 二进制数字调制的基本概念、波形、功率谱、带宽
- 二进制数字调制系统的调制器框图、解调器（相干、非相干）框图及各点波形
- 二进制数字调制系统的抗噪声性能比较、影响误码率的因素
- 多进制调制系统的概念、频带利用率计算

■ 基本计算

- 二进制数字调制的带宽计算
- 2FSK、2PSK、2DPSK调制解调框图和波形分析
- 多进制系统带宽和频带利用率的计算

■ 典型习题

- 思考题：7-1, 7-2, 7-4, 7-7, 7-10
- 作业：7-1; 7-2; 7-4; 7-16

二进制数字调制系统比较 (1/2)

类型	载波受控参量	对应的模拟调制	表达式	功率谱
2ASK (OOK)	振幅	AM	$s(t) \cdot \cos \omega_c t$ $s(t)$: 单极性NRZ	连续谱 离散谱($\pm f_c$)
2FSK	频率	FM	$s(t) \cos \omega_1 t + \overline{s(t)} \cos \omega_2 t$ $s(t)$: 单极性NRZ	连续谱 离散谱($\pm f_1, \pm f_2$)
2PSK	绝对相位	DSB-SC	$s(t) \cdot \cos \omega_c t$ $s(t)$: 双极性NRZ	连续谱
2DPSK	相对相位	DSB-SC	$s(t) \cdot \cos \omega_c t$ $s(t)$: 双极性NRZ	连续谱

注：要以2ASK信号为基础来理解2FSK、2PSK信号的表达式、功率谱、带宽及产生和解调的方法

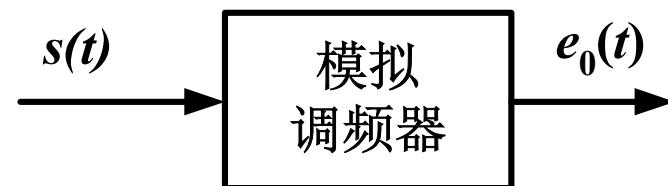
二进制数字调制系统比较 (2/2)

类型	带宽	频带利用率	产生方法	解调方法	
2ASK (OOK)	$2f_s$	0.5	1.模拟调幅 2.键控	相干解调	
				非相干解调	
2FSK	$ f_2-f_1 +2f_s$	$\frac{2f_s}{ f_2-f_1 +2f_s}$	1.模拟调频 2.键控	相干解调	
				非相干解调	
2PSK	$2f_s$	0.5	1.模拟调幅 2.键控	相干解调	
2DPSK	$2f_s$	0.5	差分编码 +2PSK	相干解调 (同步检测)	
				差分相干解调	

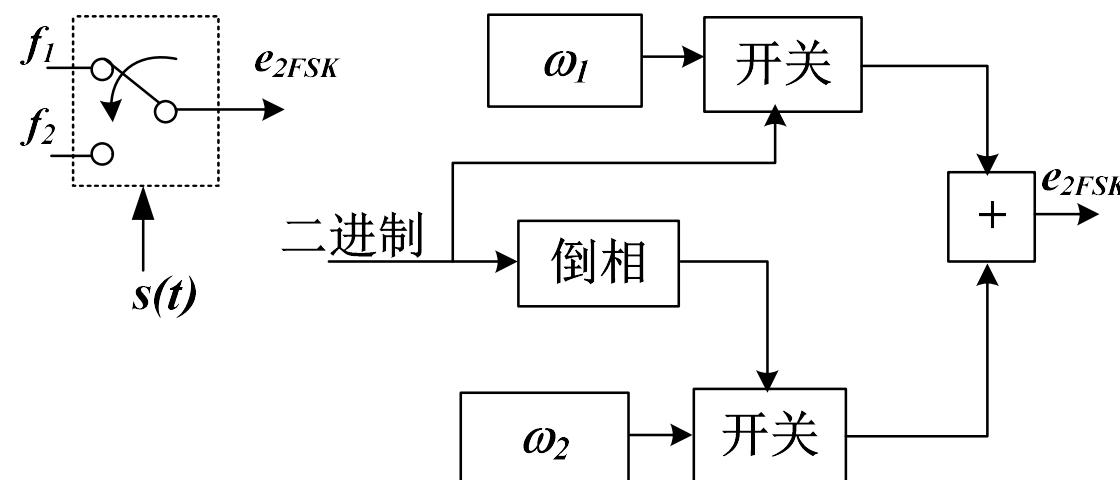
2FSK信号的产生

■ 调制器

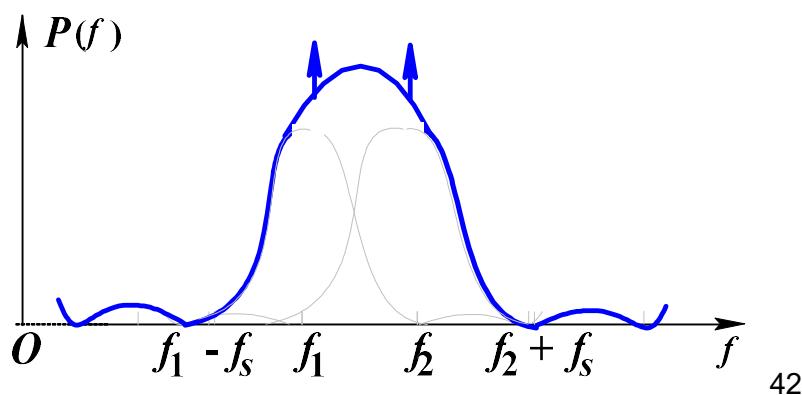
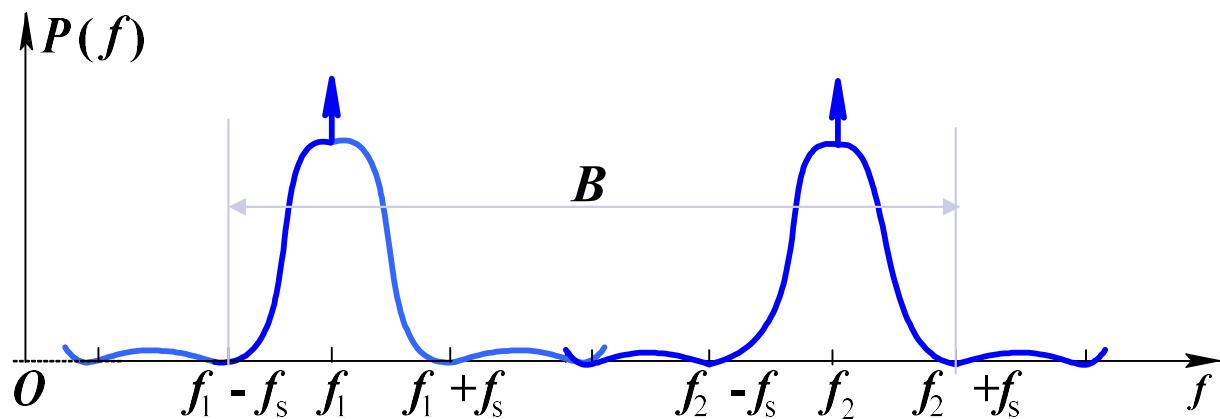
1) 模拟调频法：产生相位连续的2FSK信号，亦称为CPFSK



2) 键控法：产生相位不连续的2FSK信号



2FSK信号的功率谱



$$B_{2FSK} = |f_2 - f_1| + 2f_s, \quad f_s = \frac{1}{T_s}$$

2FSK信号的解调

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

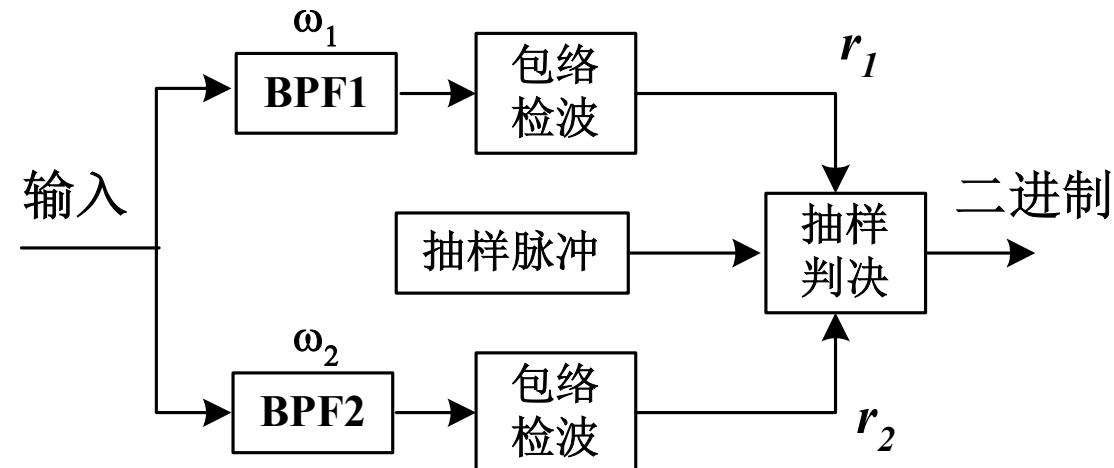
■ 非相干解调器

$r_1 > r_2$ —— 判 “1”

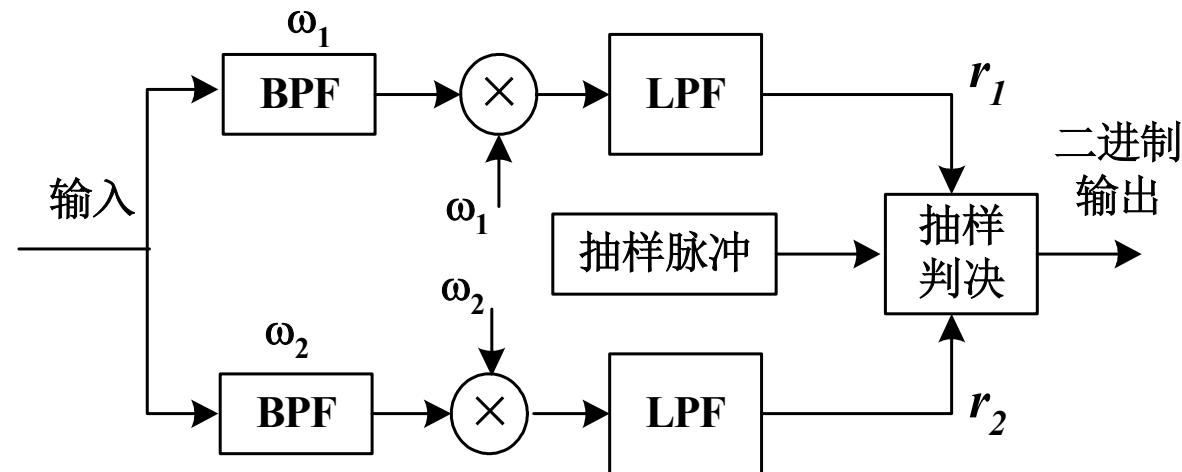
$r_1 < r_2$ —— 判 “0”

谁大就取谁！

无需判决电平！



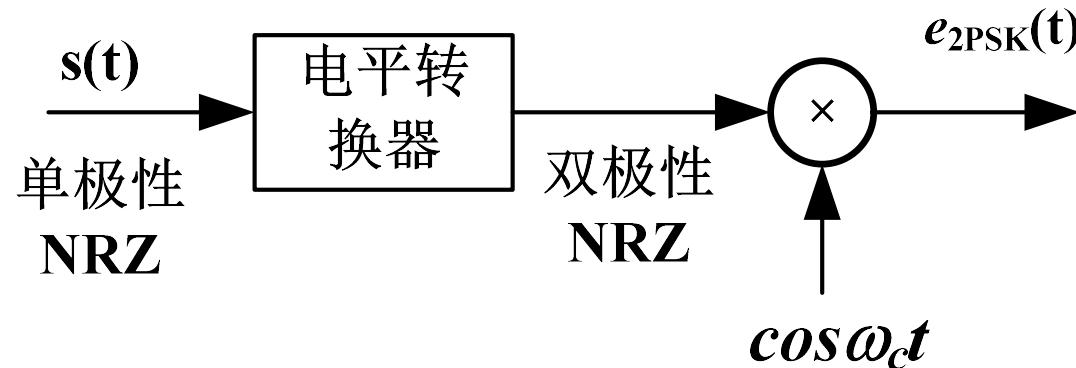
■ 相干解调器



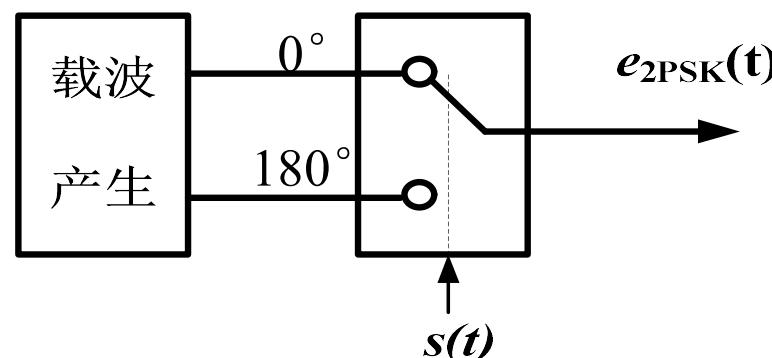
2PSK信号的产生

■ 调制器

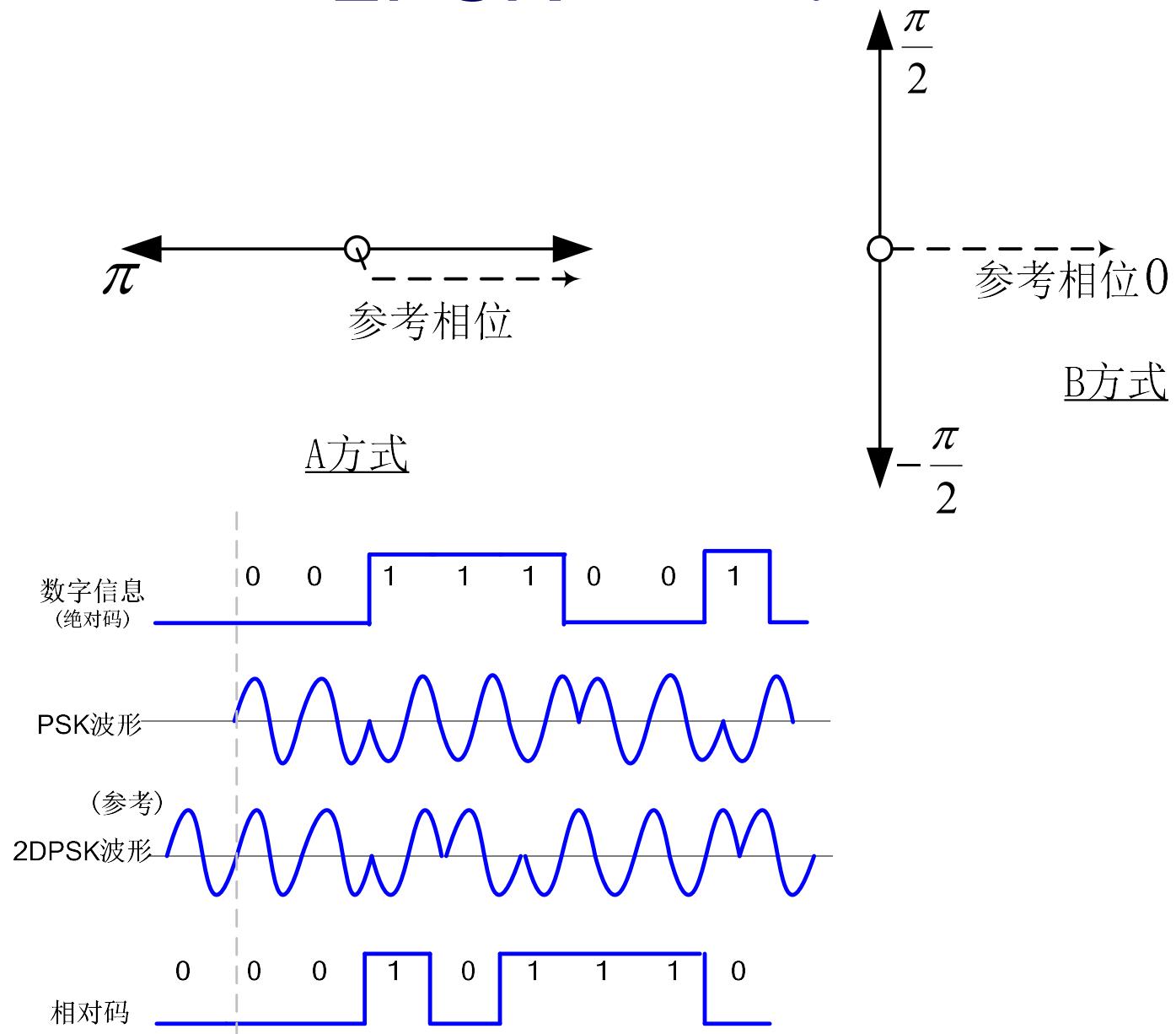
➤ 模拟调制法（相乘法）：



➤ 键控法：

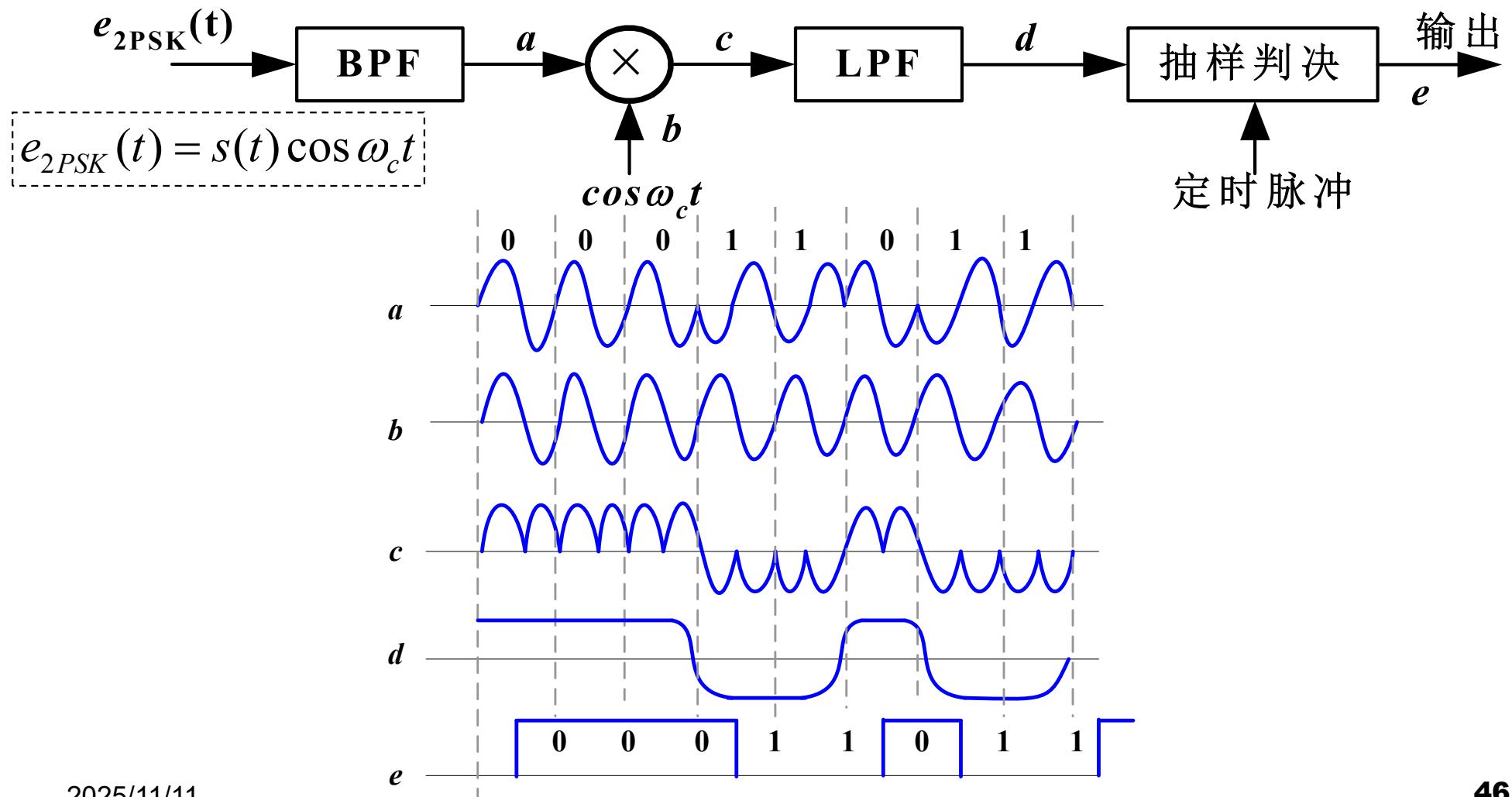


2PSK信号波形与相位



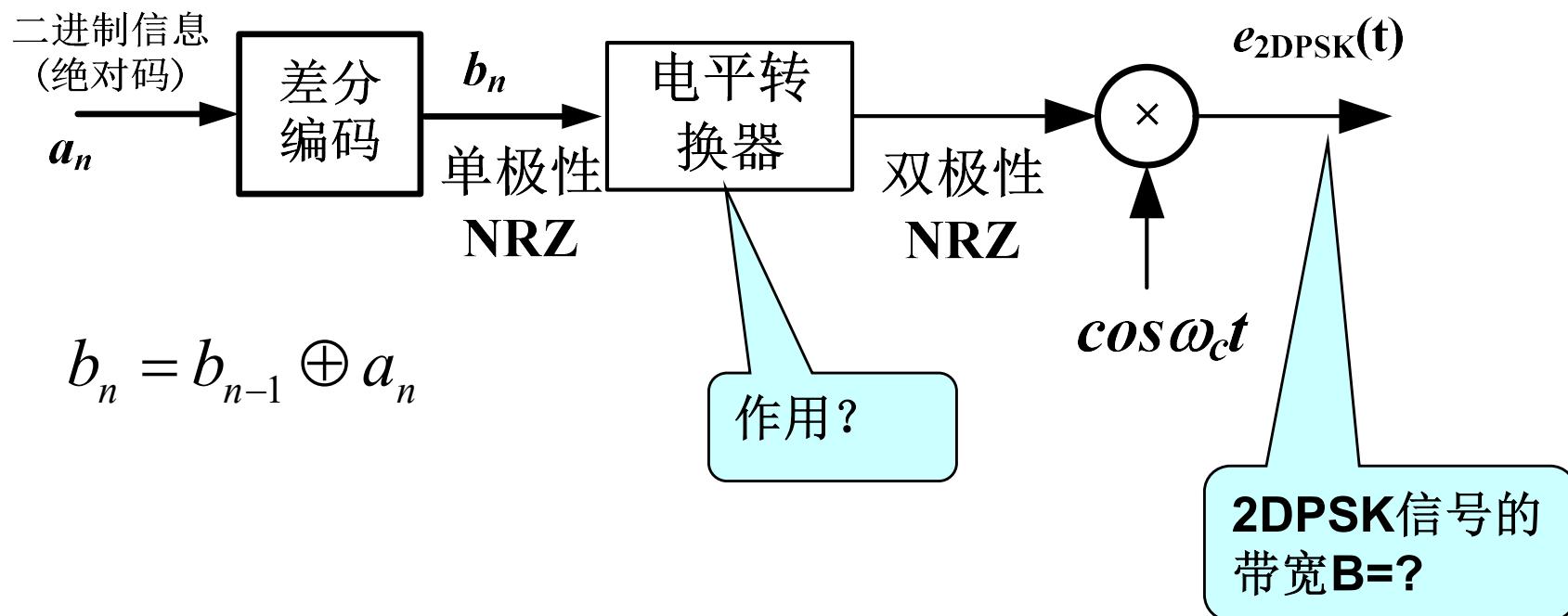
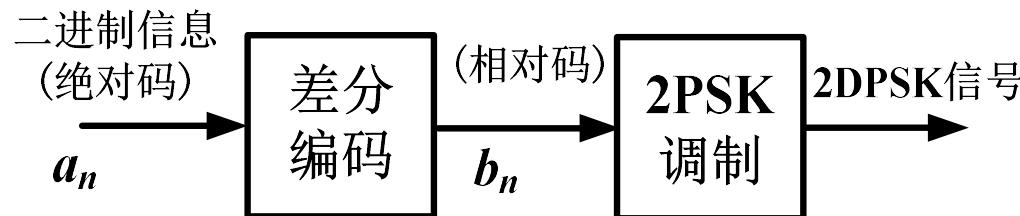
2PSK信号的解调

- 解调器：2PSK信号振幅、频率恒定，只能采用相干解调
 - 相干解调（同步检测）：与2ASK信号的相干解调一致



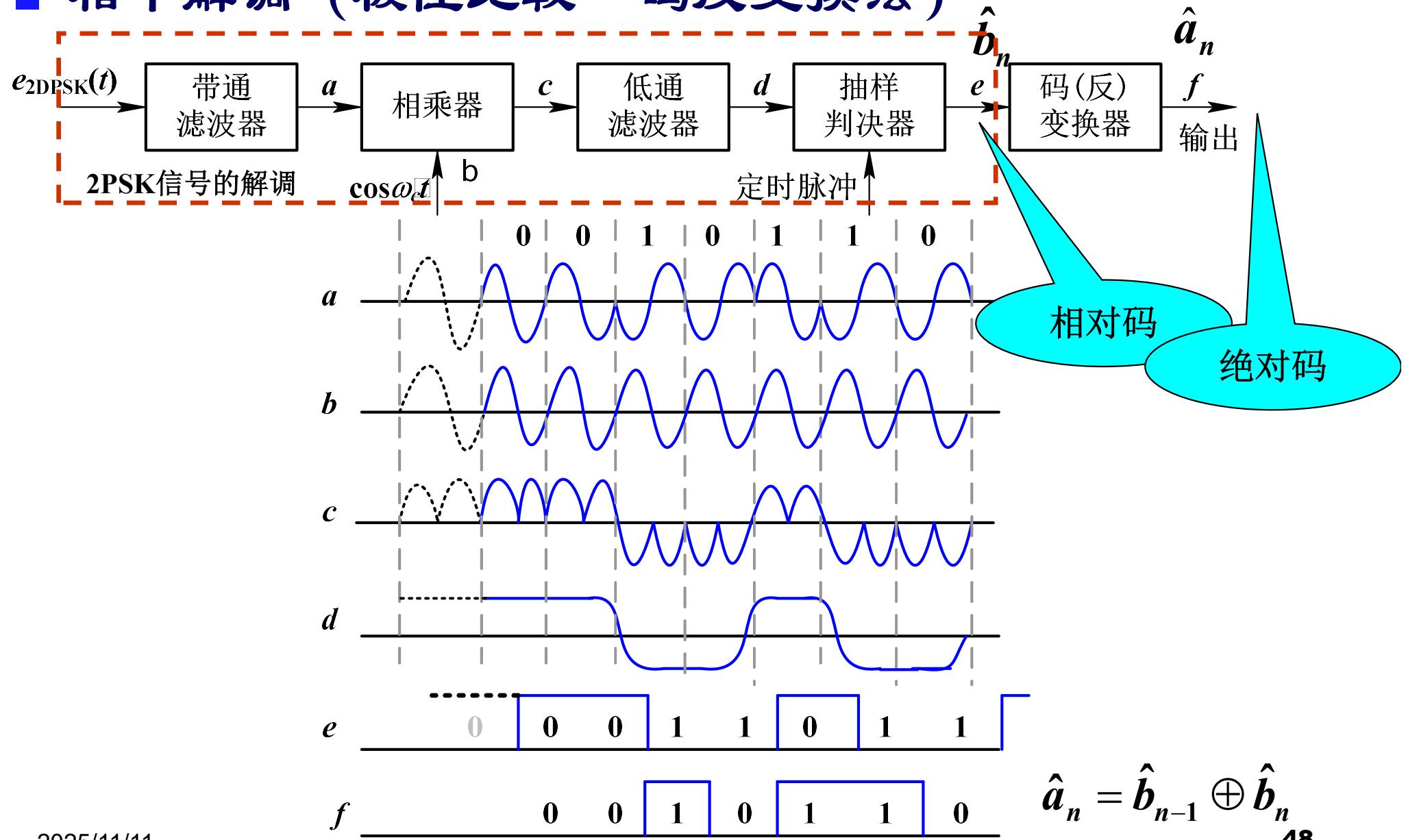
2DPSK信号的产生

■ 产生：



2DPSK信号的解调

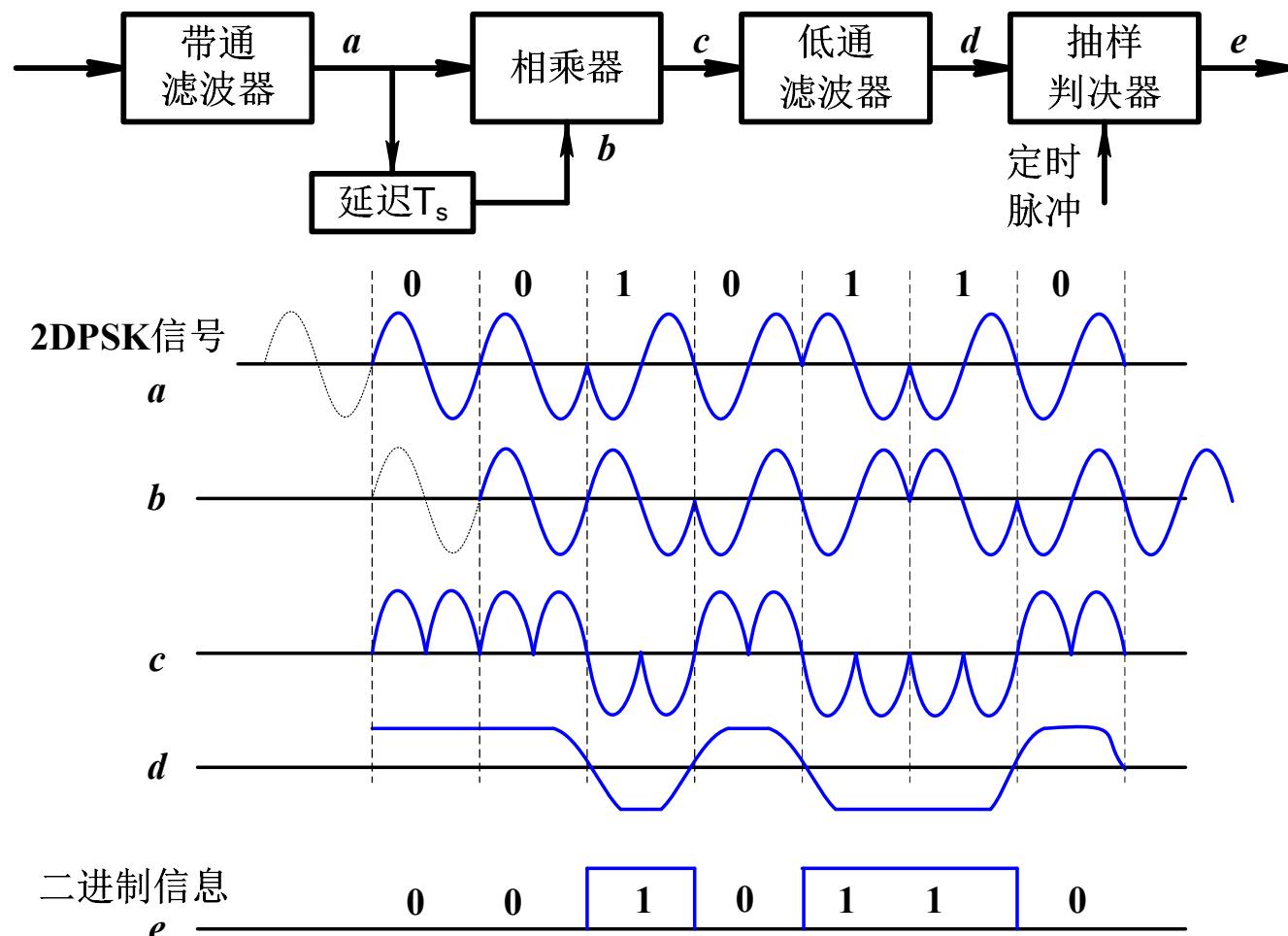
■ 相干解调（极性比较—码反变换法）



■ 差分相干解调器：通过延迟器 T_s 直接比较前后码元之间的相位差，故又称相位比较法。相乘器的作用相当于鉴相。

□ 无需相干载波和码变换器解调的同时已完成码变换器的作用

□ 需增加延迟设备，误码率比2PSK高



Chp10 信源编码

■ 基本概念

- 低通抽样定理的概念
- 均匀量化和非均匀量化的原理及特性
- PCM线性和非线性编码（A律13折线PCM、12位线性PCM）的概念和编码方法
- TDM原理(类似的FDM原理？)
- 信源编码的作用？与信道编码作用对比

■ 基本计算

- 抽样频率、抽样频谱的分析
- 根据实际电平值进行PCM编码及误差分析
- PCM的速率及带宽分析与计算
- TDM系统的速率、带宽分析与计算

■ 典型习题

- 思考题：10-1, 10-3, 10-4, 10-5, 10-15
- 作业：10-1, 10-2, 10-10, 10-18

其它

■ 最佳接收

■ 二进制确知信号接收机

- 最佳接收准则：误码率最小准则
- 也叫相关接收机：比较输入信号与本地确知信号相关性

■ 匹配滤波器接收机

- 最佳接收准则：信噪比最大准则

□ 信道编码

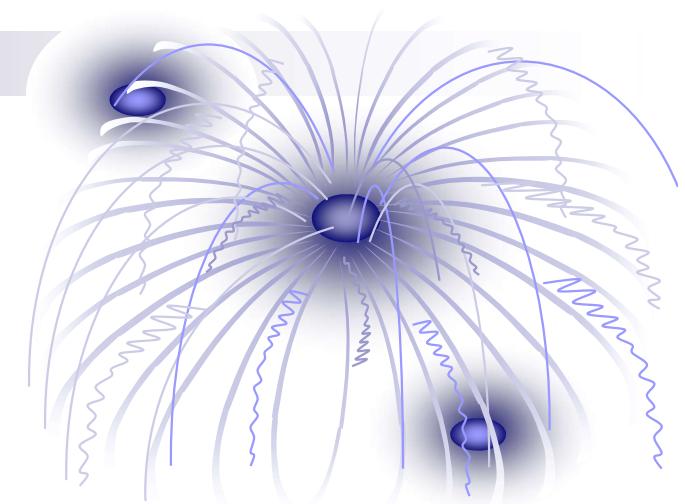
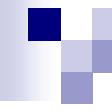
- ARQ、FEC，码距与码重，最小码距与纠检错的关系

□ 伪随机序列

- m序列周期

□ 同步

- 基本同步类型



祝大家取得好成绩！

