

# 第9章 同步原理

## 本章教学目的与要求

- 1、掌握载波同步、位同步和帧同步的基本概念和原理。
- 2、理解载波同步、位同步的方法、性能指标及不同步对通信效果的影响。
- 3、了解帧同步方法和性能指标。
- 4、自学网同步原理和方法。

# 主要外语词汇

同步 *synchronous*

载波同步 *carrier synchronous*

位同步 *bit synchronous*

帧同步 *frame synchronous*

网同步 *net synchronous*

# 本章主要内容

9.1 概述

9.2 载波同步

9.3 位同步

9.4 帧同步

# 作业题

**P<sub>280</sub>**

**1, 2, 4, 7, 14, 21**

# § 9.1 概述

## 一、什么是同步？

所谓同步是指收发双方在时间上步调一致，故又称定时。

按照同步的功用把同步分为：

载波同步、位同步、帧同步和网同步。

1、**载波同步**：载波同步是指在相干解调时，接收端需要提供一个与接收信号中的调制载波同频同相的相干载波。这个载波的获取称为载波提取或载波同步。

2、**位同步(码元同步)**：接收端的码元定时脉冲序列的重复频率和相位要与发送端码元保持一致。

3、**帧同步(群同步)**：为把若干码元组成的帧加以区分而正确找到每帧的起止时刻的过程称为帧同步。

4、**网同步**：为使数字通信网有一个统一的时间节拍标准而进行的同步。

同步也是一种信息，按照获取和传输同步信息方式的不同，又可分为外同步法和自同步法：

- 1、外同步：由发送端发送专门的同步信息。
- 2、自同步：从接收信号中直接提取同步信息。

## 二、为什么要同步？

为使整个通信系统有序、准确、可靠地工作，收、发必须有一个统一的时间标准，即定时系统。

依靠定时系统去完成收、发双方时间的一致性，即同步。

### 三、怎样同步？

- ❖ 同步是通信中十分重要的问题，也是有一定难度的技术。
- ❖ 虽然设计通信系统时，可以将位于异地的收发两端信号频率，时钟频率设定为一致，但实际上很难以作到完全一致、始终绝对相同。
- ❖ 何况信号经信道传输，不可避免的会产生随机的频移和相移信号。

❖ 因此，同步技术要完成的任务是

① 从接收到的调制（或基带）信号中提取出有关时间的同步信息；

② 在接收端产生出频率尽量一样的相干波（或时间脉冲）；

③ 用同步信息不断调整相干波的频率，相位（时间脉冲的频率和位置），使之始终与接收信号完全同步。

❖ 同频同相不是与发端载波同步，而是与经过传输后已产生频移和相移的收端信号同步。

❖ 可见，同步是一个不断提取同步信息，不断调整的自过程。

❖ 同时，现代通信技术使用的频率越来越高，传码率越来越快，时标精度越来越高，达到微秒，纳秒的量级，所以对同步技术提出了更高的要求。

## § 9.2

# 载波同步

## 一、载波同步的方法

❖ 直接法（自同步法）：

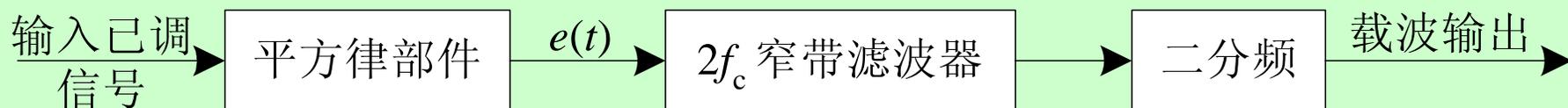
经非线性变换，直接从信号中提取。

❖ 导频法（外同步法）：

在适当频率位置插入导频。

# 1、直接法也称自同步法

## (1) 平方变换法:



设调制信号中无直流分量，则抑制载波的双边带信号为：

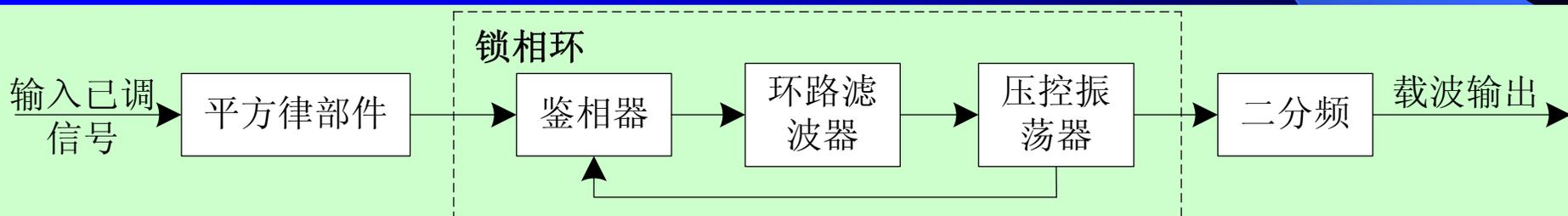
$$S_{DSB}(t) = m(t)\cos\omega_c t$$

经过一个平方律部件后就得到

$$e(t) = m^2(t)\cos^2\omega_c t = \frac{1}{2}m^2(t) + \frac{1}{2}m^2(t)\cos 2\omega_c t$$

## (2) 平方环法

为了改善平方变换的性能，可以在平方变换的基础上，把窄带滤波器改用锁相环，这就变成了平方环法。



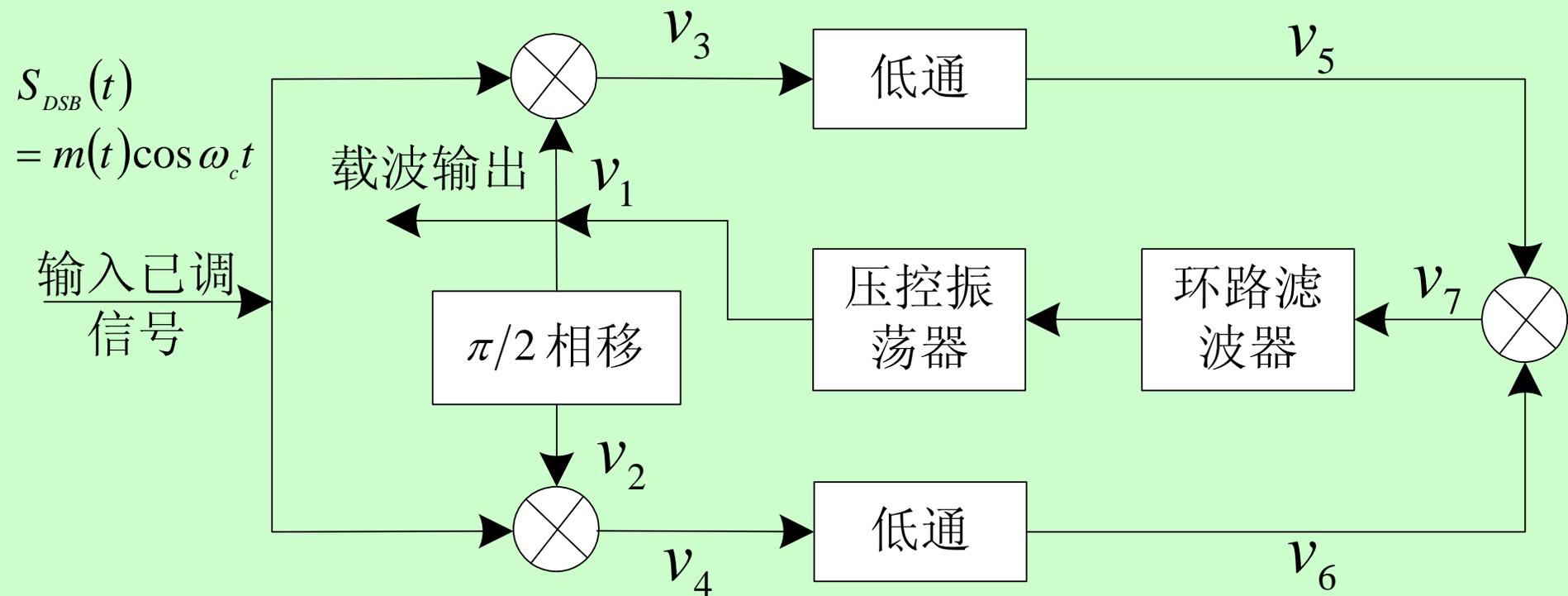
若 $m(t) = \pm 1$ ，则抑制载波的双边带信号就成为二相移相信号（2PSK），这时

$$e(t) = m^2(t) \cos^2 \omega_c t = \cos^2 \omega_c t = \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \cos 2\omega_c t$$

### ❖ 关于相位模糊问题的讨论

$\cos 2\omega_c t$  经过二分频以后得到的可能是  $\cos \omega_c t$ ，也可能是  $\cos(\omega_c t + \pi)$ 。这种相位的不确定性称为相位模糊。（ $0 - \pi$  模糊）

### (3) 同相正交环法(科斯塔斯环)



$$\begin{cases} v_1 = \cos(\omega_c t + \theta) \\ v_2 = \cos(\omega_c t + \theta - 90^\circ) = \sin(\omega_c t + \theta) \end{cases}$$

$$\begin{cases} v_3 = m(t) \cos \omega_c t \cos(\omega_c t + \theta) = \frac{1}{2} m(t) [\cos \theta + \cos(2\omega_c t + \theta)] \\ v_4 = m(t) \cos \omega_c t \sin(\omega_c t + \theta) = \frac{1}{2} m(t) [\sin \theta + \sin(2\omega_c t + \theta)] \end{cases}$$

经低通后的输出分别为：

$$\begin{cases} v_5 = \frac{1}{2} m(t) \cos \theta \\ v_6 = \frac{1}{2} m(t) \sin \theta \end{cases}$$

乘法器的输出为：

$$v_7 = v_5 \cdot v_6 = \frac{1}{4} m^2(t) \sin \theta \cos \theta = \frac{1}{8} m^2(t) \sin 2\theta$$

上式可以近似地表示为：

$$v_7 \approx \frac{1}{4} m^2(t) \theta$$

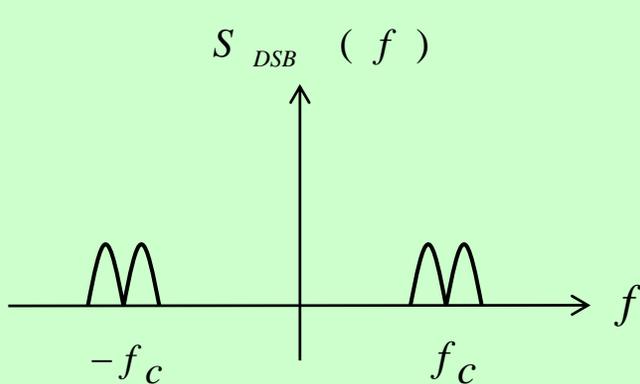
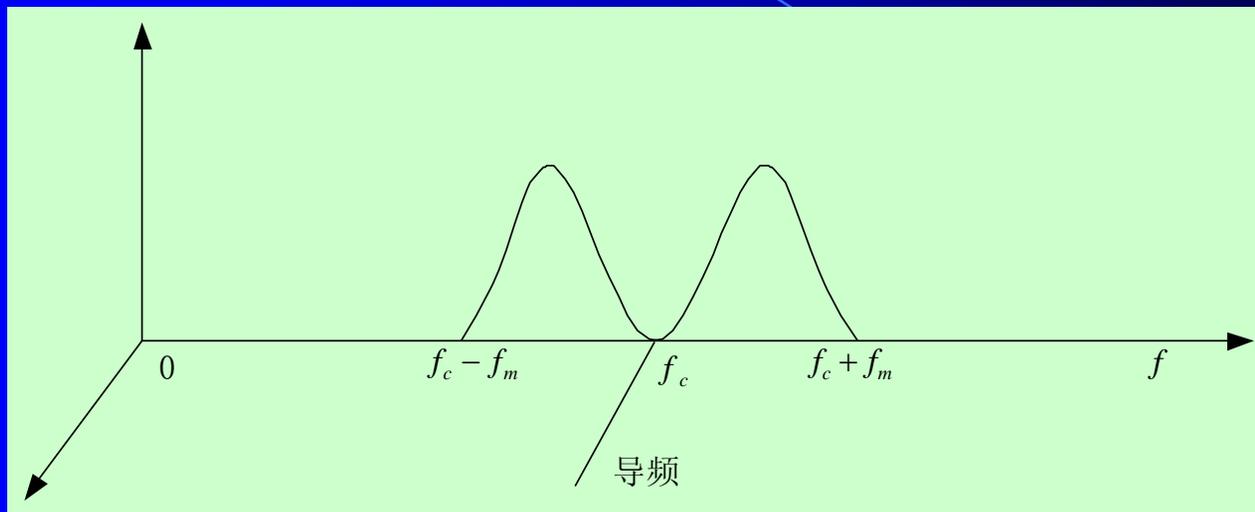
## 2、插入导频法(外同步法)

DSB和SSB调制信号中不存在载波分量；二元数字调相2PSK在二元等概时，也不存在载波分量。为了在接收端能提取同步信息，这些信号在发送之前，都应人为的插入一些导频。

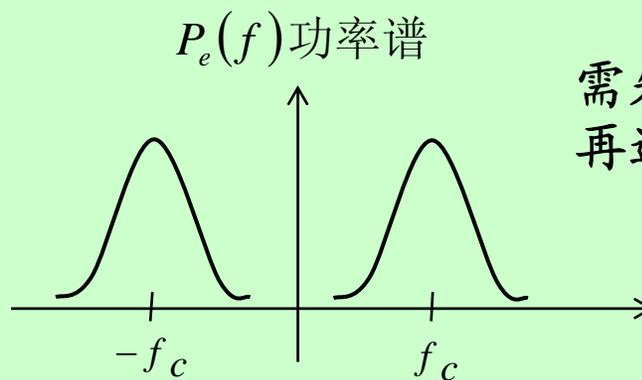
所谓**导频**，就是一些特定频率的单音信号，它们的插入应不影响调制信号，而在接收端又便于从它们身上获取同步信息。

# (1) 在DSB信号中插入导频

插入导频的位置应该在信号频谱为零的位置。

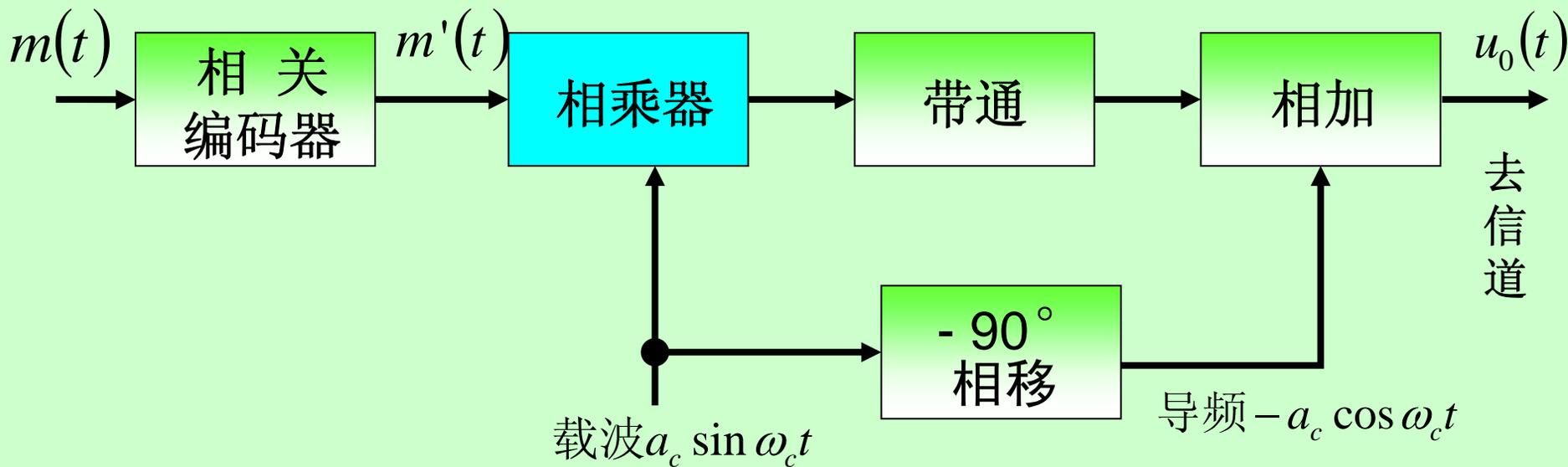


DSB信号频谱

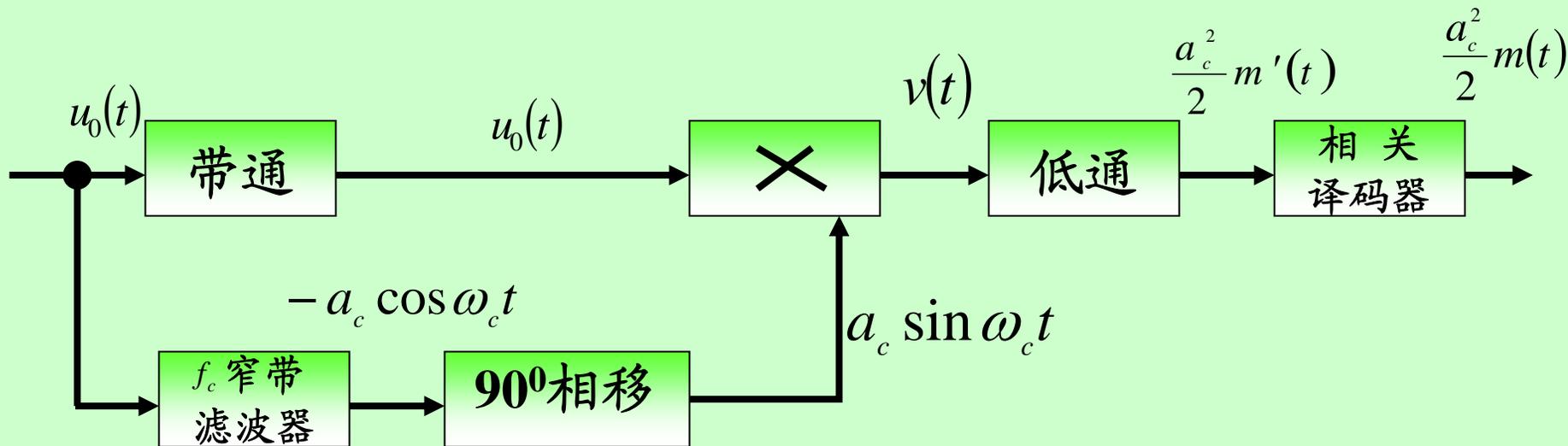


2PSK(2DPSK)信号的功率谱

需先相关编码,  
再进行调制



$$u_0(t) = a_c m'(t) \sin \omega_c t - a_c \cos \omega_c t$$



$$\begin{aligned}v(t) &= [a_c m'(t) \sin \omega_c t - a_c \cos \omega_c t] \cdot a_c \sin \omega_c t \\&= a_c m'(t) \sin^2 \omega_c t - a_c^2 \cos \omega_c t \cdot \sin \omega_c t \\&= \frac{a_c^2 m'(t)}{2} - \frac{a_c^2 m'(t)}{2} \cos 2\omega_c t - \frac{a_c^2}{2} \sin 2\omega_c t\end{aligned}$$

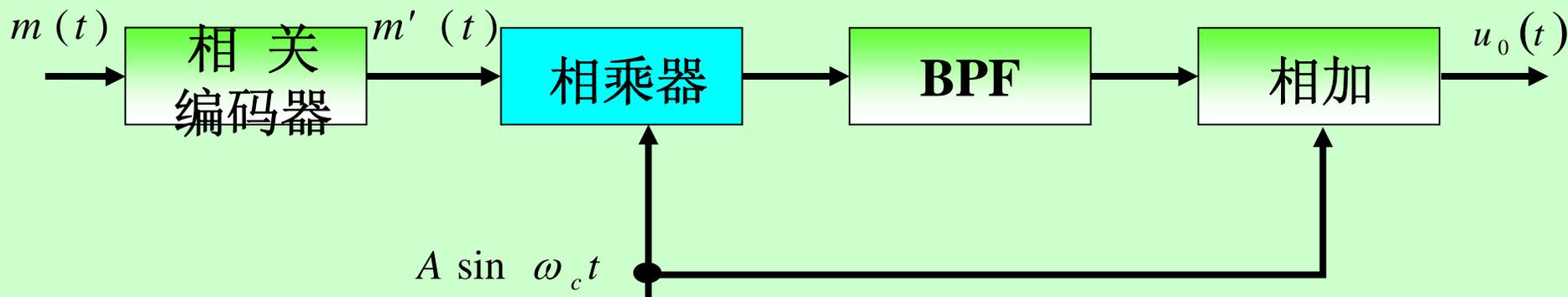
经LPF后得到 $a_c^2 m'(t)/2$ ，经相关译码还原为原基带信号 $m(t)$ 。

**注意：**在上图中插入的导频并不是加于调制器的那个载波，而是将该载波移相 $90^\circ$ 后的所谓“正交载波”。

**讨论：**不采用“正交载波”，直接将 $a_c \sin \omega_c t$ 作为导频，结果如何？

# 思考与练习

9.2 在DSB系统中，发端方框图采用下图所示的插入导频法，即载波  $A \sin \omega_c t$  不经过  $-90^\circ$  相移，直接与已调信号相加后输出，试证明接收端用相干接收法解调DSB信号时，解调器输出中含有直流成分。



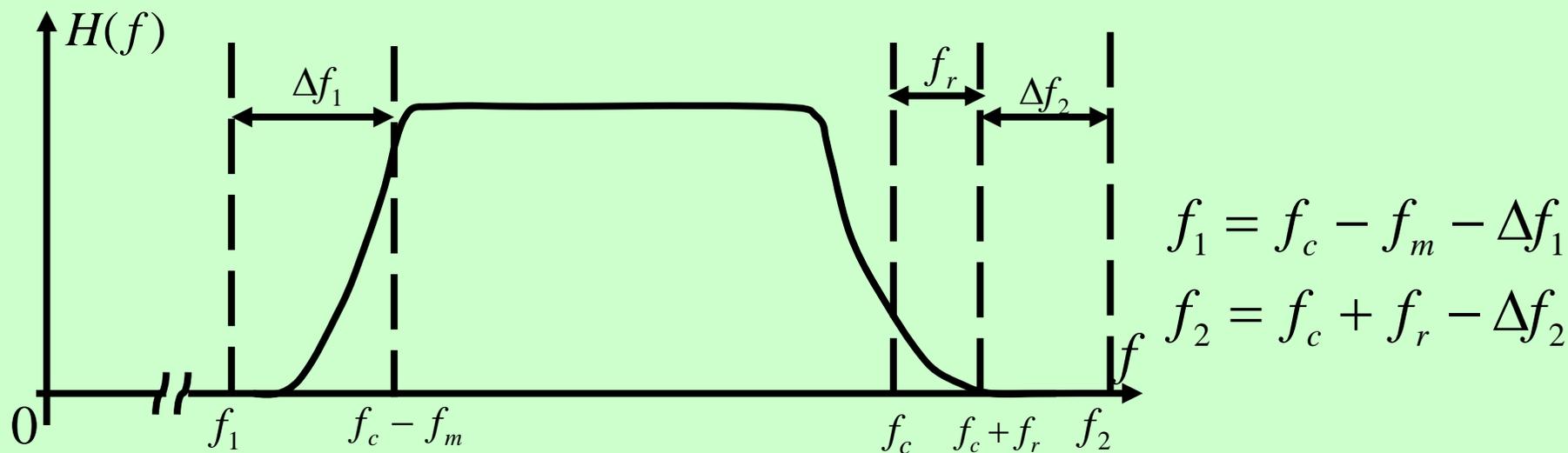
收端解调

$$\begin{aligned} & (Am'(t) \sin \omega_c t + A \sin \omega_c t) \cdot A \sin \omega_c t \\ &= A^2 \sin^2 \omega_c t (m'(t) + 1) = A^2 \left( \frac{1 - \cos 2\omega_c t}{2} \right) (m'(t) + 1) \\ &= \frac{A^2}{2} m'(t) - \frac{A^2}{2} m'(t) \cos 2\omega_c t - \frac{A^2}{2} \cos 2\omega_c t + \frac{A^2}{2} \end{aligned}$$

调制载波作导频

直流分量

## (2) 在VSB信号中插入导频

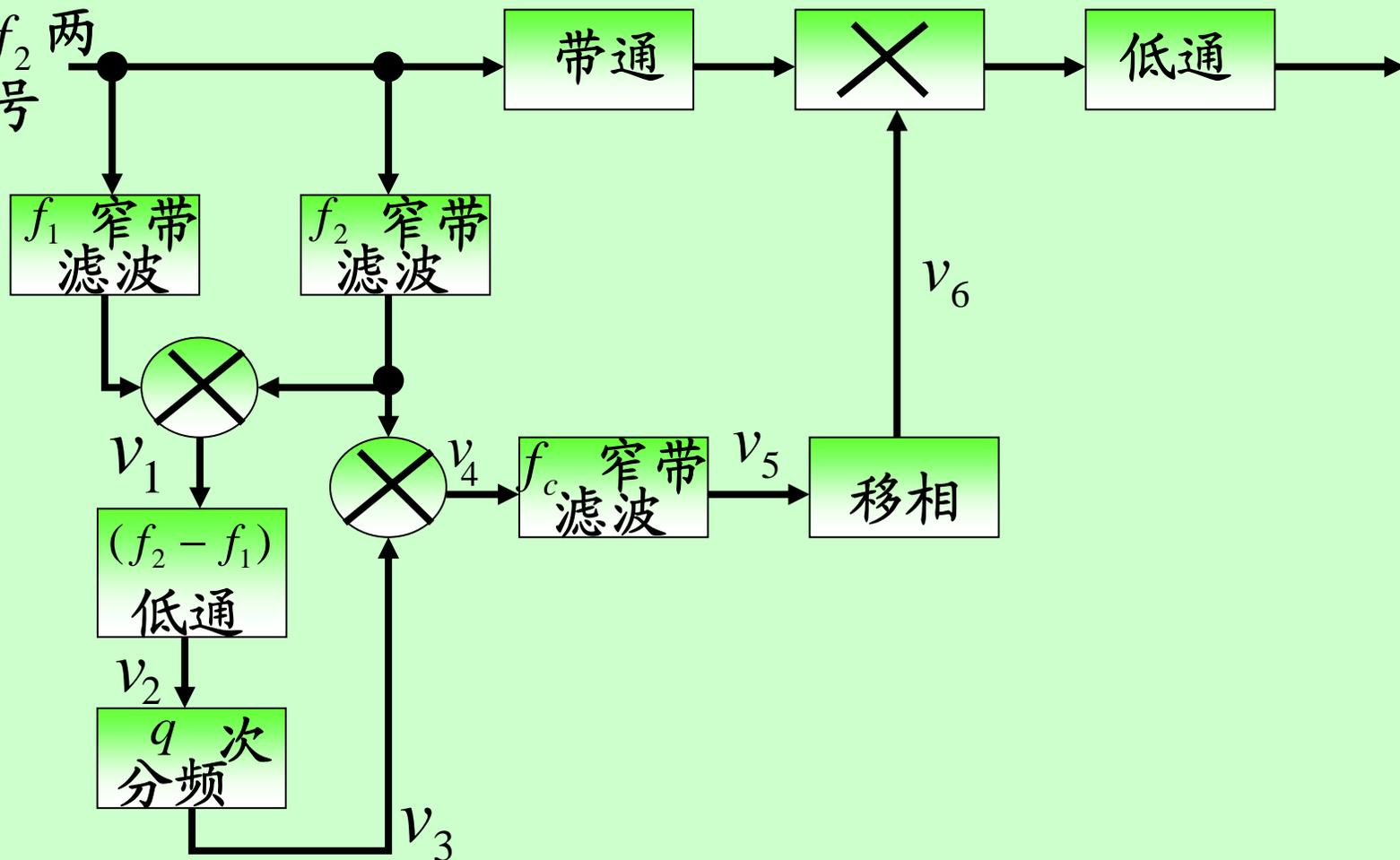


**插入导频  $f_1$ 、 $f_2$  的选择：**可以在残留边带频谱的两侧插入  $f_1$  和  $f_2$ ； $f_1$  和  $f_2$  不能与  $(f_c - f_m)$  和  $(f_c + f_r)$  靠得太近，太近不易滤出  $f_1$  和  $f_2$ ，但也不能太远，太远占用过多频带。

其中  $f_r$  是残留边带信号形成滤波器滚降部分占用带宽的一半，而  $f_m$  为基带信号的最高频率。

接收信号：  
VSB信号  
和  $f_1 f_2$  两  
个信号

让VSB信号通  
过，滤除  $f_1, f_2$



VSB信号提取载波与解调方框图

假设两个导频:

$$f_1 : \cos(\omega_1 t + \theta_1)$$

$\theta_1$  为导频  $f_1$  初相

$$f_2 : \cos(\omega_2 t + \theta_2)$$

$\theta_2$  为导频  $f_2$  初相

考虑实际的信道传输后, 使导频和已调信号的载波均产生了频偏  $\Delta\omega(t)$  和相偏  $\theta(t)$ , 这样接收端要提取的同步载波也应该有相同的频偏和相偏, 才能达到真正相干解调。

由上图可见, 两导频经窄带滤波器滤出, 并经过相乘后得:

$$\begin{aligned} v_1 &= \cos[\omega_1 t + \theta_1 + \Delta\omega(t) + \theta(t)] \cdot \cos[\omega_2 t + \theta_2 + \Delta\omega(t)t + \theta(t)] \\ &= \frac{1}{2} \cos[(\omega_2 - \omega_1)t + (\theta_2 - \theta_1)] + \frac{1}{2} \cos[(\omega_2 + \omega_1)t + 2\Delta\omega(t)t + 2\theta(t) + (\theta_1 + \theta_2)] \end{aligned}$$

$v_1$  经  $f_2 - f_1$  滤波后, 得到  $v_2$

$$\begin{aligned} v_2 &= \frac{1}{2} \cos[(\omega_2 - \omega_1)t + (\theta_2 - \theta_1)] \\ &= \frac{1}{2} \cos[2\pi(f_c + f_r + \Delta f_2 - f_c + f_m + \Delta f_1)t + (\theta_2 - \theta_1)] \end{aligned}$$

$$f_1 = f_c - f_m - \Delta f_1$$

$$f_2 = f_c + f_r - \Delta f_2$$

$$\begin{aligned}
 v_2 &= \frac{1}{2} \cos[2\pi(f_c + f_r + \Delta f_2 - f_c + f_m + \Delta f_1)t + (\theta_2 - \theta_1)] \\
 &= \frac{1}{2} \cos[2\pi(f_r + \Delta f_2 + f_m + \Delta f_1)t + \theta_2 - \theta_1] \\
 &= \frac{1}{2} \cos\left[2\pi(f_r + \Delta f_2)\left(1 + \frac{f_m + \Delta f_1}{f_r + \Delta f_2}\right)t + \theta_2 - \theta_1\right]
 \end{aligned}$$

$$\text{令 } q = 1 + \frac{f_m + \Delta f_1}{f_r + \Delta f_2}$$

$$v_2 = \frac{1}{2} \cos[2\pi(f_r + \Delta f_2)qt + \theta_2 - \theta_1]$$

$v_2$  经  $q$  次分频后得  $v_3$ : 
$$v_3 = a \cos[2\pi(f_r + \Delta f_2)t + \theta_q]$$

上式中,  $a$  为任意常数,  $\theta_q$  为分频初相: 
$$\theta_q = \frac{\theta_2 - \theta_1}{q}$$

把分频器输出的 $v_3$ 与第二导频相乘得 $v_4$ ：

$$\begin{aligned} v_4 &= a \cos[2\pi(f_r + \Delta f_2) + \theta_q] \cdot \cos[\omega_2 t + \Delta\omega(t)t + \theta(t) + \theta_2] \\ &= \frac{a}{2} \left\{ \cos[(\omega_2 + \omega_r + \Delta\omega_2)t + \Delta\omega(t)t + \theta(t) + \theta_q + \theta_2] \right. \\ &\quad \left. + \cos[\omega_c t + \Delta\omega(t)t + \theta(t) + \theta_2 - \theta_q] \right\} \end{aligned}$$

经过窄带滤波器取出  
差额成分得  $v_5$ ：

$$v_5 = \frac{a}{2} \cos[\omega_c t + \Delta\omega(t)t + \theta(t) + \theta_2 - \theta_q]$$

经移相  $\varphi = \theta_c - (\theta_2 - \theta_q)$  后得：

$$v_6 = \frac{a}{2} \cos[\omega_c t + \Delta\omega(t)t + \theta(t) + \theta_c]$$

$v_6$ 就是所需要的同步载波，它与VSB信号（不带 $f_1, f_2$ 导频）相乘后，再低通滤波可检出基带信号。

## ❖ 两种载波同步方法的比较

### 1、直接法的优缺点

- (1) 不占用导频功率，因此信噪功率比可以大一些。
- (2) 可防止插入导频法中导频和信号由于滤波不好引起的互相干扰，也可防止信道不理想引起的导频相位误差。
- (3) 有的调制系统不能用直接法(如SSB系统)。

### 2、插入导频法的优缺点

- (1) 有单独的导频信号，一方面可以提取同步载波，另一方面可以用它作自动增益控制。
- (2) 有些不能用直接法提取同步信息的调制系统只能用插入导频法。
- (3) 要多消耗一部分不带信息的功率，与直接法比较在总功率相同条件下信噪功率比要小一些。

## 二、载波同步系统的性能指标

主要性能指标:

- (1)效率: 为获得同步, 载波信号应尽量少消耗发射功率。
- (2)精度: 指提取的同步载波与需要的载波标准比较, 应有尽量小的相位误差 (稳态相差和随机相差)。
- (3)同步建立时间  $t_s$ : 越短越好, 这样同步建立得快。
- (4)同步保持时间  $t_c$ : 越长越好, 这样同步建立后可以保持较长时间。

## 1、稳态相位误差 $\Delta\varphi$ :

当滤波器谐振频率  $f_0$  与载波频率  $f_c$  不相等时就会使提取的同步载波信号引起一个稳态相位误差  $\Delta\varphi$ 。

### ❖ 对于用窄带滤波器提取同步的方法

$$\Delta\varphi \approx 2Q \frac{\Delta\omega}{\omega_0}$$

$$\Delta\omega = \omega_0 - \omega_c$$

$Q$  为单谐振电路品质因数

### ❖ 对于用锁相环提取同步载波的方法

$$\Delta\varphi = \frac{\Delta\omega}{K_v}$$

$K_v$  为环路直流增益

## 2、随机相位差 $\theta_n$ :

用窄带滤波器提取同步载波时的相位抖动:

$$\overline{\theta_n^2} = 1/2r$$

$$\text{信噪比 } r = \frac{P_s}{n_0 B_n}$$

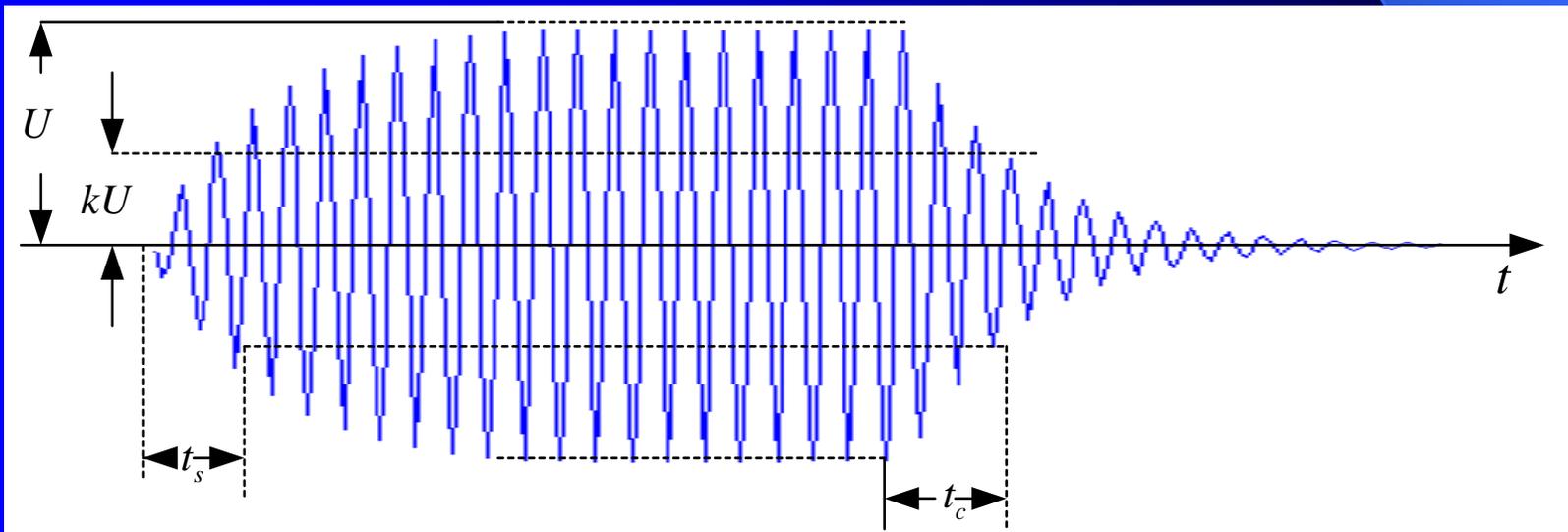
$$B_n = \frac{\pi f_0}{2Q}$$

$$\overline{\theta_n^2} = \frac{n_0 \pi f_0}{4 Q P_s}$$

### 3、同步建立时间和同步保持时间

同步建立时间 $t_s$ 指接入同步信息到建立起同步载波所需的时间。

同步保持时间 $t_c$ 指失去同步信号后系统还能保持同步的时间。



## 用窄带滤波器提取载波时

❖ 同步建立时间 $t_s$ :

$$t_s = \frac{2Q}{\omega_0} \ln \frac{1}{1-k}$$

❖ 同步保持时间 $t_c$ :

$$t_c = \frac{2Q}{\omega_0} \ln \frac{1}{k}$$

### 三、载波不完全同步对解调性能的影响

#### 1、既有 $\Delta\omega$ ，又有 $\Delta\varphi$ 时：

❖ 对DSB信号：

$$\begin{aligned} S_{DSB}(t) \cdot \cos(\omega_c t + \Delta\omega t + \Delta\varphi) \\ &= m(t) \cos \omega_c t \cos(\omega_c t + \Delta\omega t + \Delta\varphi) \\ &= \frac{1}{2} m(t) \{ \cos[(2\omega_c + \Delta\omega)t + \Delta\varphi] + \cos(\Delta\omega t + \Delta\varphi) \} \end{aligned}$$

经LPF后，有

$$S_o(t) = \frac{1}{2} m(t) \cos[\Delta\omega t + \Delta\varphi]$$

❖ 对DSB信号相当于对  $m(t)$  进行了缓慢的幅度调制，使收听到的信号时强时弱，甚至为零。引起双边带解调系统的信噪比下降，误码率增加。

❖ 对SSB信号，解调以后所有角频率都偏 $\Delta\omega$ ，使话音信号频谱偏移 $\Delta\omega$ 。若频率误差小于20Hz，对话音质量影响不大。而相位偏移对话音质量影响较小。

2、 $\Delta\omega=0$ ，只有 $\Delta\varphi$ ：

- ❖ 对DSB信号，解调后输出为 $[m(t) \cos \Delta\varphi] / 2$ ，引起输出信号幅度减小，信噪比下降；
- ❖ 对2PSK信号，解调后由于信噪比下降引起误码率增大。
- ❖ 对VSB信号和SSB信号将引起波形失真。
- ❖ 多频信号时也将引起波形失真。
- ❖ 若用来同步数字信号，将引起码间串扰。

# 思考与练习

9.1 什么是载波同步？实现载波同步有哪些具体方法？载波同步的性能指标有哪些？

9.4 已知DSB信号为 $x_{DSB}(t)=x(t) \cos \omega_c t$ ，接收端采用相干解调法，载波为 $\cos(\omega_c t + \Delta\varphi)$ ，试分析推导解调器的输出表达式。

9.7 单谐振电路作为滤波器提取同步载波，已知同步载波频率为1000kHz，回路 $Q = 100$ ，把达到稳定值40%的时间作为同步建立时间(和同步保持时间)，求载波同步的建立时间和保持时间。

## § 9.3

## 位同步

❖ 位同步与载波同步的区别:

- 模拟通信没有位同步，数字通信一般都有位同步；
- 位同步信号从基带中提取，特殊情况在频带中提取，而载波同步一定在频带中提取。

## ❖ 位同步的作用

- ① 为接收端抽样判决器提供抽样脉冲。
- ② 为解码器、解密器提供脉冲信号。
- ③ 在PCM系统中，提供产生路脉冲信号。
- ④ 提供产生帧同步码的脉冲信号。
- ⑤ 提供产生各种标志信号的脉冲等。

## ❖ 对位同步信号的要求:

(1) 使收端的位同步脉冲频率和发送端的码元速率相同 (同频)。

(2) 使收端最佳判决时对接收码元作抽样判决 (同相)。

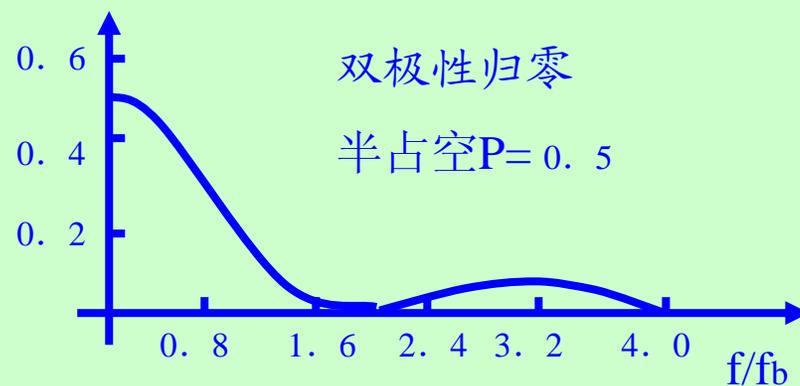
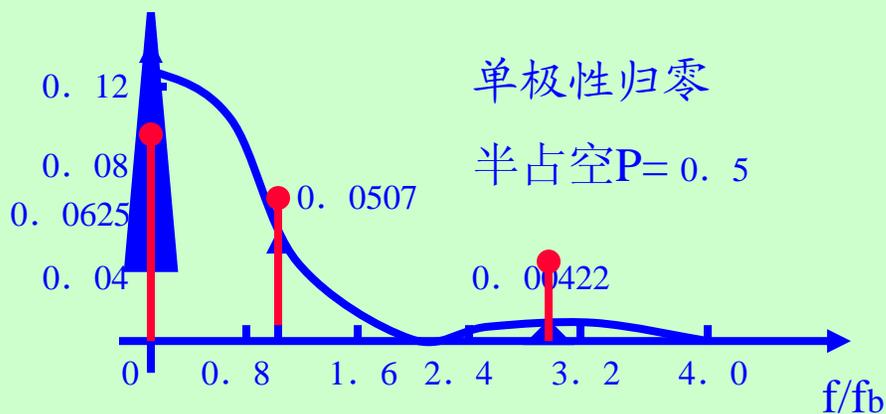
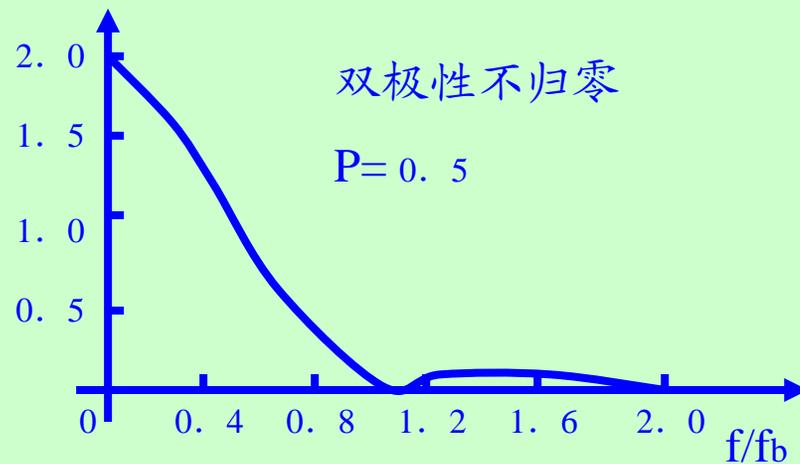
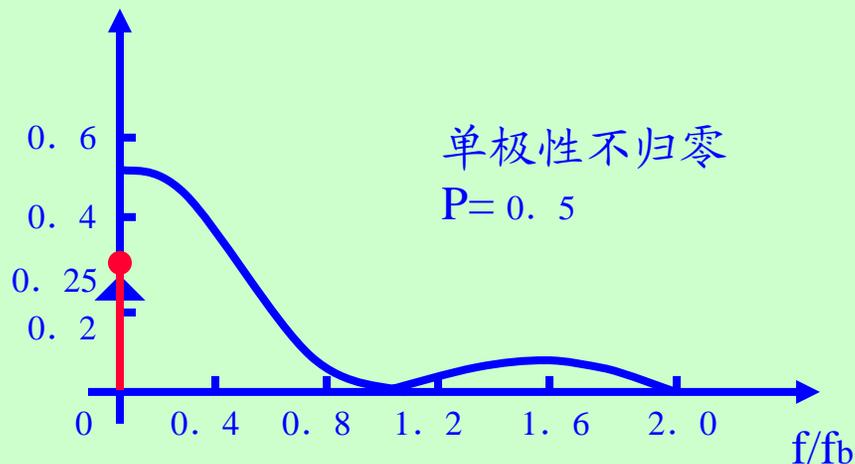
## ❖ 位同步方法的分类:

直接法和插入导频法。

直接法中也分滤波法和锁相法。

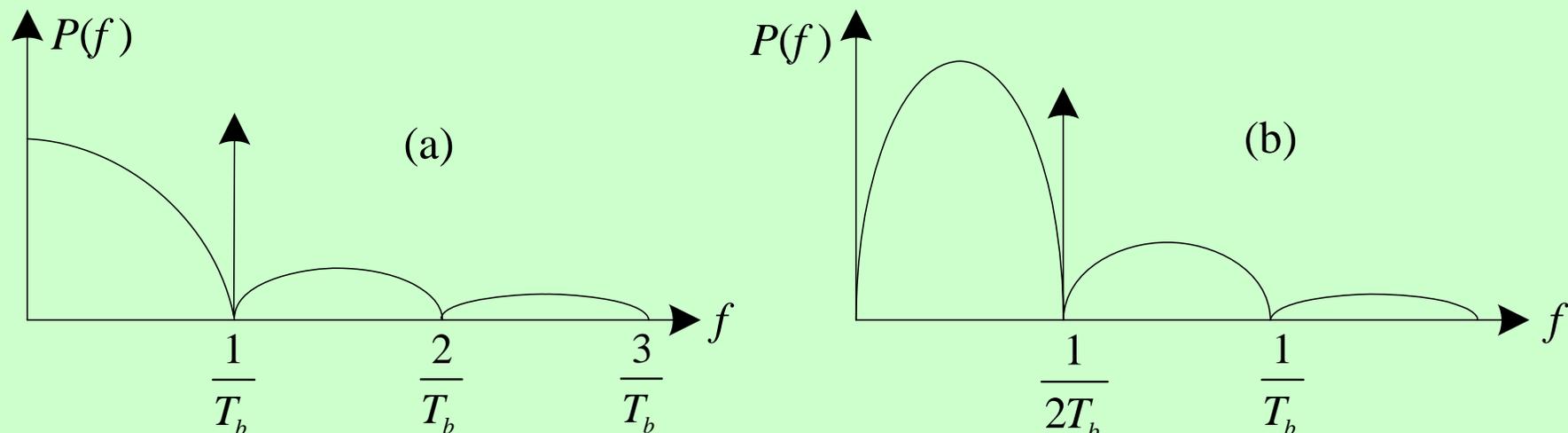
# 一、位同步的方法:

## 1、插入导频法



只有单极性归零码的离散谱中有丰富位定时分量。

## ❖ 位定时导频插入法:



(a) 双极性不归零码功率谱密度

(b) 经相关编码后的双极性不归零码功率谱密度

## ❖ 波形变化法

插入导频法的另一种形式是使数字信号的包络按位同步信号的某种波形变化。

如对2PSK信号进行附加的幅度调制。

$$S_{2PSK} = \cos[\omega_c t + \varphi(t)]$$

$$\varphi(t) = \begin{cases} 0 & \text{1码} \\ \pi & \text{0码} \end{cases}$$

附加调幅为后得

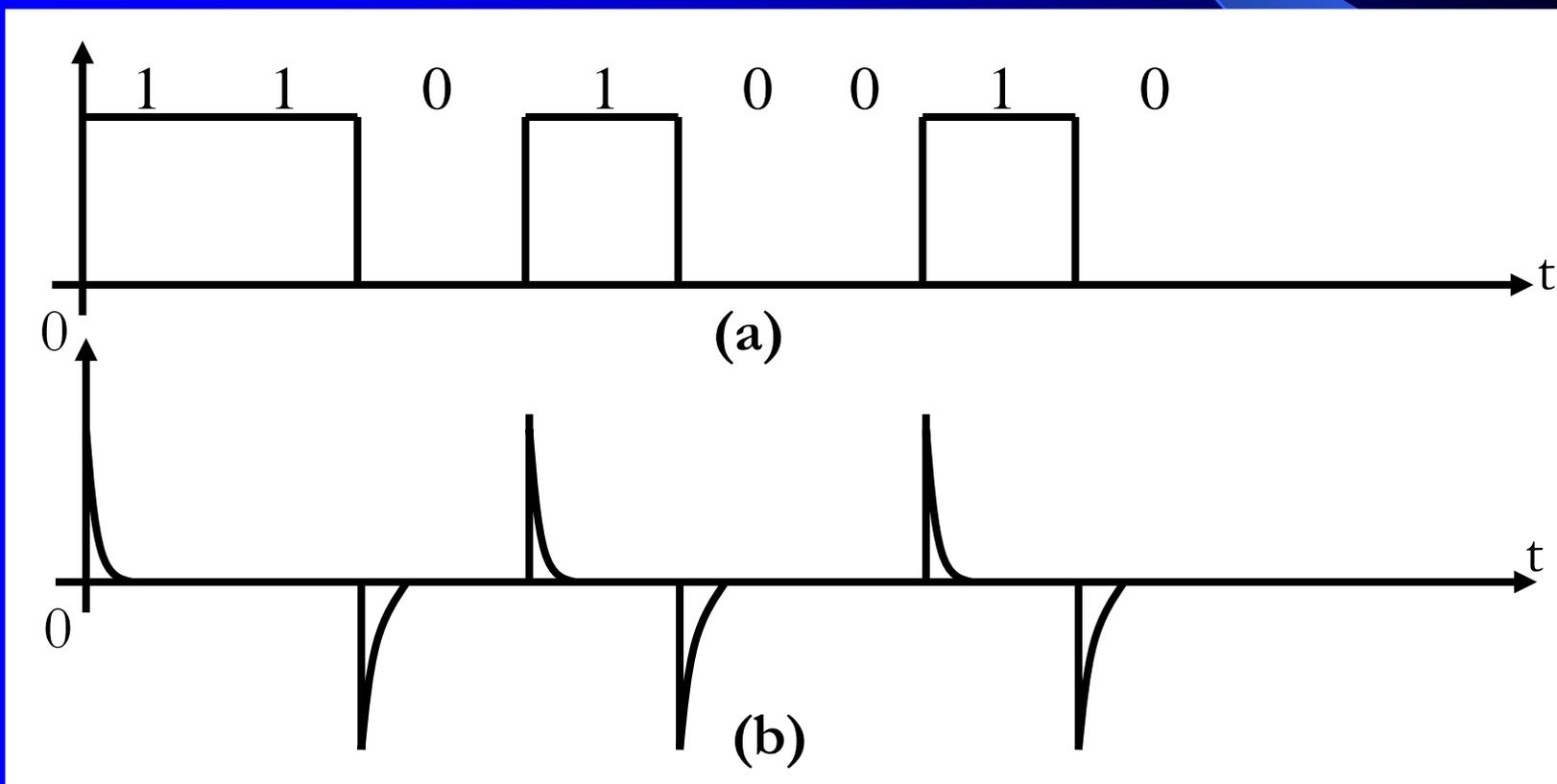
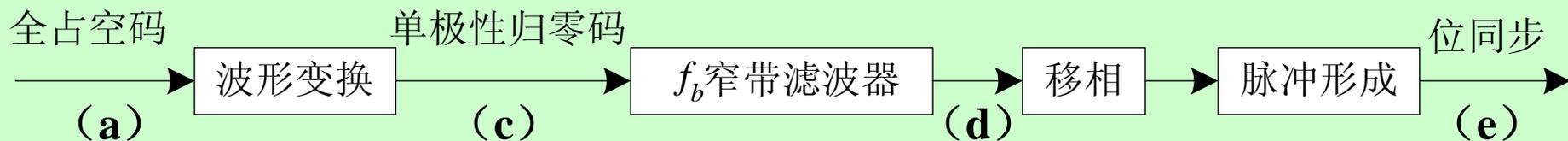
$$(1 + \cos \Omega t) \cos[\omega_c t + \varphi(t)]$$

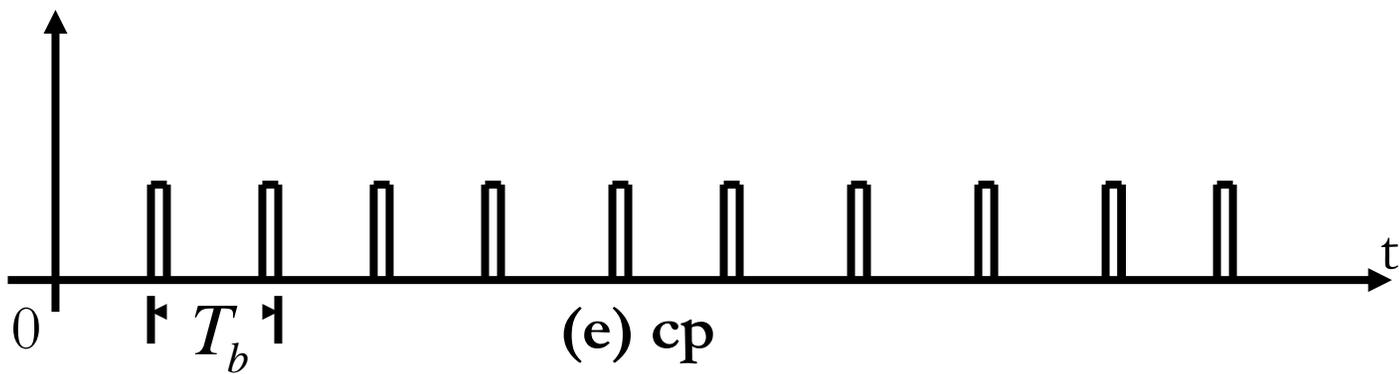
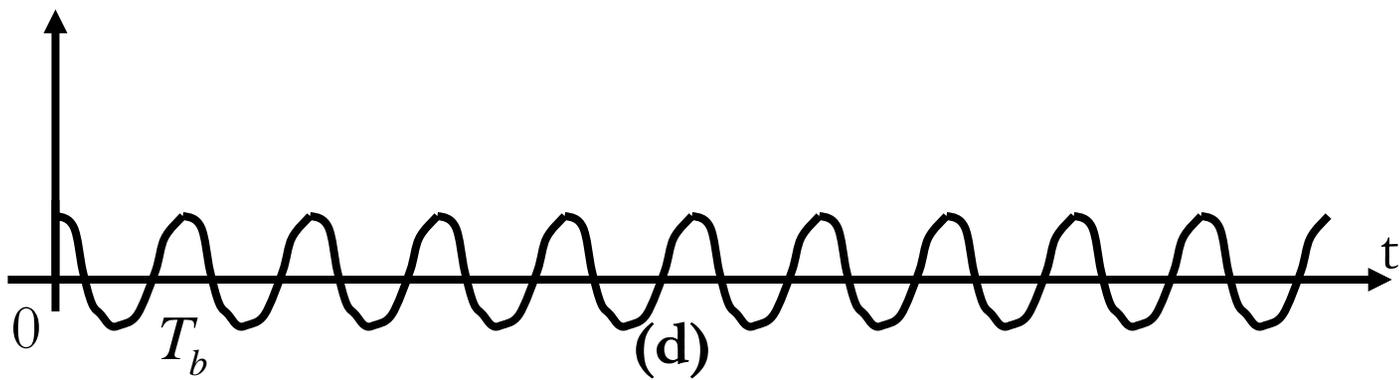
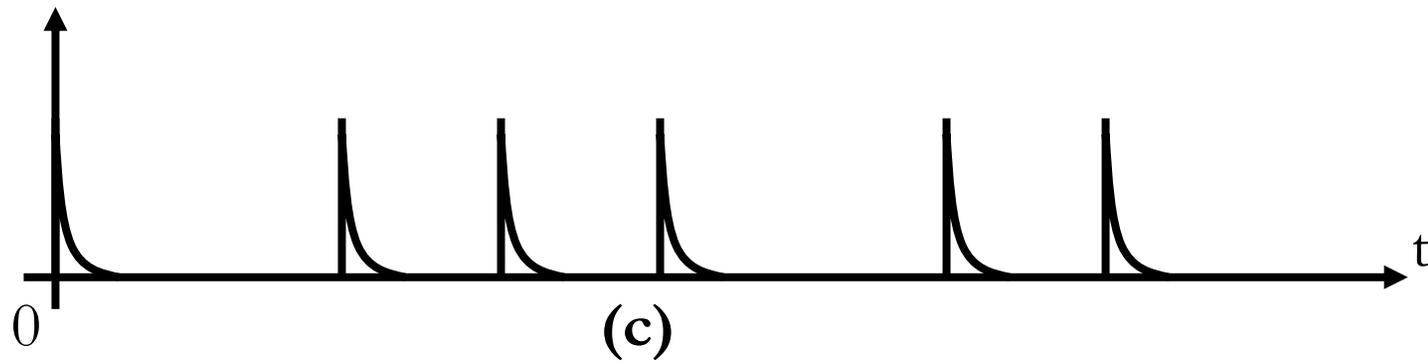
接收后进行包络检波，得到  $1 + \cos \Omega t$

去直流后，得到  $\Omega = 2\pi f_b$  位同步信息。

## 2、直接法:

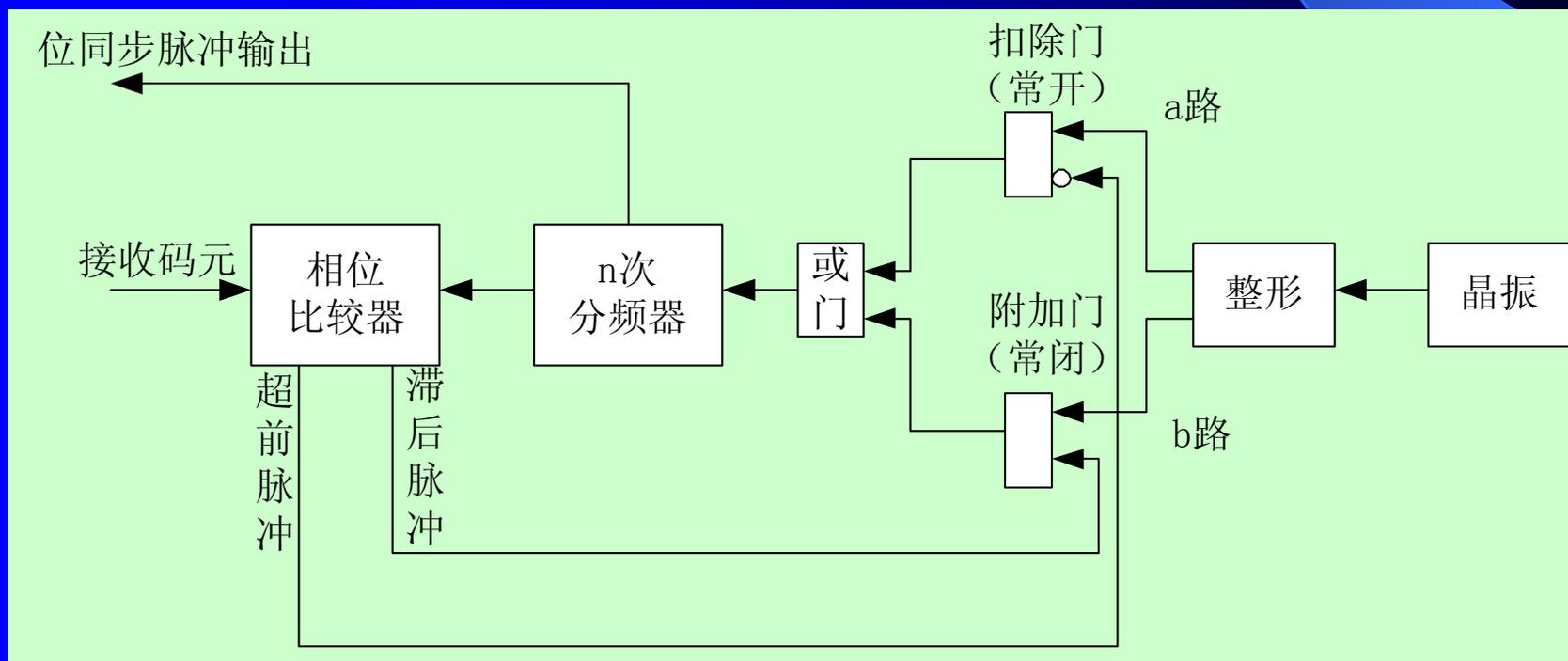
### (1) 滤波法提取数字基带信号的位置信息:



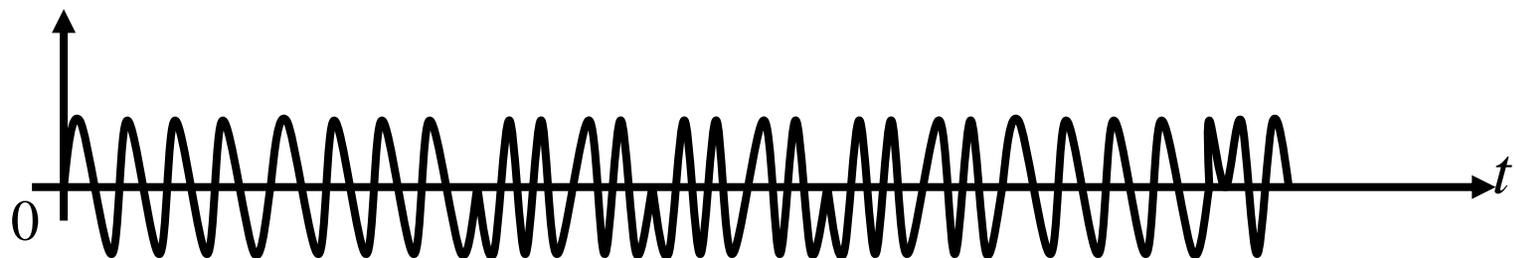


## (2) 锁相环法提取位信息:

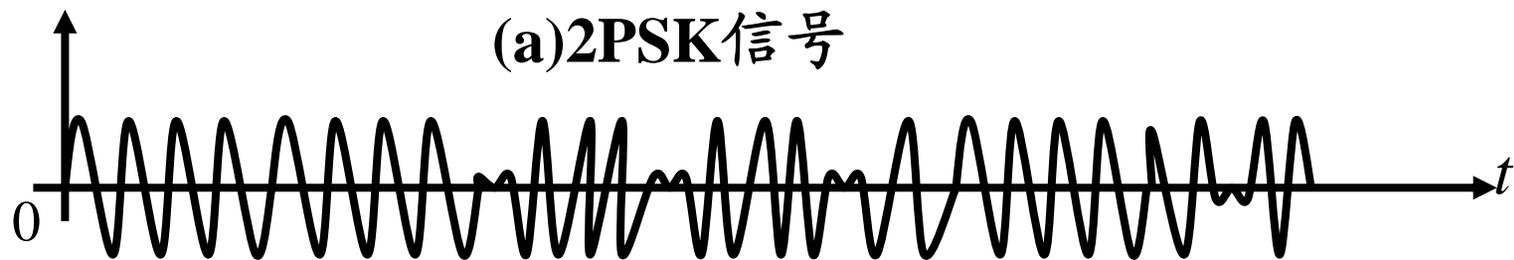
位同步锁相法的基本原理与载波同步的类似，在接收端利用鉴相器比较接收码元和本地产生的位同步信号的相位，若两者相位不一致（超前或滞后），鉴相器就产生误差信号去调整位同步信号的相位，直至获得准确的位同步信号为止。



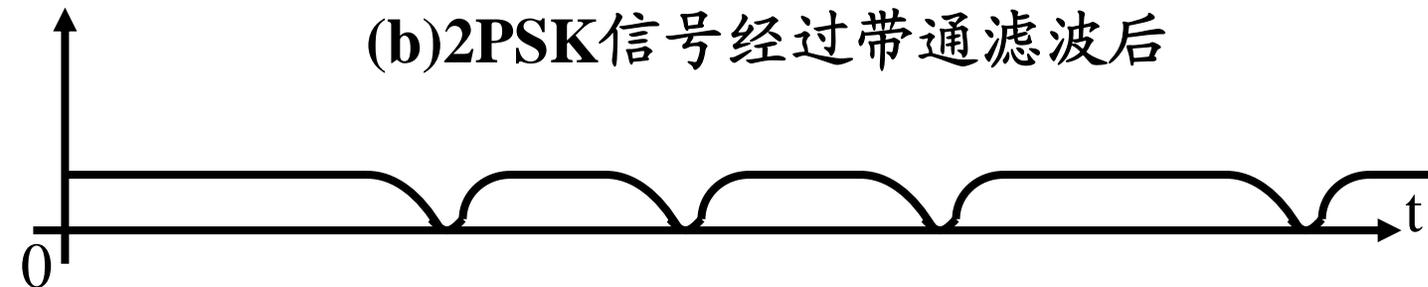
### (3) 滤波法提取数字频带信号的位置信息:



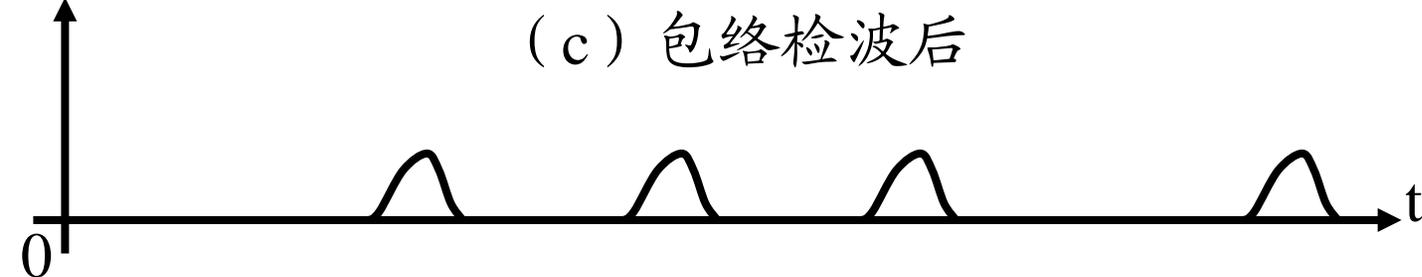
(a) 2PSK信号



(b) 2PSK信号经过带通滤波后



(c) 包络检波后



(d) 滤去直流后的波形

## 二、位同步系统的性能指标（以数字锁相环为例）

1、相位误差：

$$|\theta_e| = 360^\circ/n$$

$n$ 为分频器分频次数。

2、同步建立时间 $t_s$

定义：失去同步后重建同步最所需的最长时间。

故同步建立时间为：

$$t_s = 2T_b \cdot \frac{n}{2} = nT_b$$

### 3、同步保持时间 $t_c$

系统因为没有输入，使得收端位同步信号的相位就会逐渐发生漂移，时间越长，相位漂移量越大，直至漂移量达到某一准许的最大值，就算失步了。

$$|T_1 - T_2| = |1/F_1 - 1/F_2| = \frac{|F_2 - F_1|}{F_1 F_2} = \frac{\Delta F}{F_0^2}$$

$$F_0 \cdot |T_1 - T_2| = \frac{\Delta F}{F_0} = \frac{|T_1 - T_2|}{T_0}$$

$$\frac{T_0/K}{t_c} = \frac{\Delta F}{F_0} \Rightarrow t_c = \frac{1}{\Delta F \cdot K} \text{ 或 } \Delta F = \frac{1}{t_c \cdot K}$$

$$\frac{\Delta F/2}{F_0} = \frac{\Delta F}{2F_0} = \frac{1}{2F_0 \cdot K \cdot t_c} \text{ 或 } t_c = \frac{1}{2F_0 \cdot K \cdot \frac{\Delta F/2}{F_0}}$$

$$(\Delta F/2)/F_0$$

为位同步振荡器的频率  
稳定度

## 4、同步带宽 $\Delta f$

如果输入信号码元的重复频率和收端固有位定时脉冲的重复频率不相等时，每经过 $T_0$ 时间该频差会引起  $|T_1 - T_2|$  的时间漂移。

锁相环每次所能调整的时间为 $T_0/n$ ，则：

$$|T_1 - T_2| = \frac{T_0}{2n} = \frac{1}{2nF_0}$$

$$|T_1 - T_2| = \frac{|\Delta f|}{F_0^2} = \frac{1}{2nF_0} \Rightarrow |\Delta f| = \frac{F_0}{2n}$$

## 5、相位误差对性能的影响

相位误差的大小将直接影响到抽样点的位置，误差越大，越偏离最佳抽样时刻。

这时的误码率可以表示为

$$P_e = \frac{1}{4} \operatorname{erfc} \sqrt{\frac{E}{n_0}} + \frac{1}{4} \operatorname{erfc} \sqrt{\frac{E(1 - 2T_e/T_b)}{n_0}}$$

例：一个数字传输系统，码元速率为50波特，收发端位同步振荡器的频率稳定度 $(\Delta f/2)/f=10^{-4}$ ，采用数字锁相环实现位同步，分频器次数 $n=192$ ，求此系统的性能指标。

解：已知 $f_b=50\text{Hz}$ ， $T_b=1/f_b=20\text{ms}$ ， $n=192$

(1) 系统的相位误差：

$$\theta_e = \frac{360^\circ}{n} = 1.9^\circ$$

(2) 系统的同步建立时间：

$$t_s = nT_b = 192 \times 0.02 = 3.84 \text{ s}$$

(3) 系统的同步保持时间：

(设 $K=10$ )

$$t_c = \frac{T_b}{2K \frac{\Delta f/2}{f}} = \frac{20 \times 10^{-3}}{2 \times 10 \times 10^{-4}} = 10 \text{ s}$$

(4) 系统的同步带宽：

$$\Delta f = \frac{f_0}{2n} = \frac{50}{2 \times 192} \approx 0.125 \text{ Hz}$$

## 思考与练习

9.14 已知某低速数字传输系统的码元速率为50波特，收发端位同步振荡器的频率稳定度 $(\Delta f/2)/f=10^{-4}$ ，采用数字锁相环实现位同步，分频器次数 $n=360$ ，求此系统的性能指标。

- (1) 系统的相位误差  $\theta_e$  ；
- (2) 系统的同步建立时间  $t_s$  ；
- (3) 系统的同步保持时间  $t_c$  (设  $K=10$ ) ；
- (4) 系统的同步带宽  $\Delta f$  。

参见 P<sub>269</sub> 例

## § 9.4 帧（群）同步

帧（群）同步与载波同步、位同步的比较：

- ❖ 载波同步：解决了同步解调问题。
- ❖ 位同步：确定数字通信中各个码元的抽样判决时刻。
- ❖ 群同步：在位同步的基础上识别出数字信息的起始时刻，或者说给出每个群的“开头”和“末尾”时刻。

群同步问题实质上是一个对群同步标志进行检测的问题。对群同步系统的基本要求是：

- (1) 正确建立同步的概率要大，即漏同步概率要小，错误同步或假同步的概率要小。
- (2) 捕获时间要短，即同步建立的时间要短。
- (3) 稳定地保持同步。采取保持措施，使同步保持时间持久稳定。
- (4) 在满足群同步性能要求条件下，群同步码的长度应尽可能短些，这样可以提高信息传输效率。

## 一、帧同步的方法：

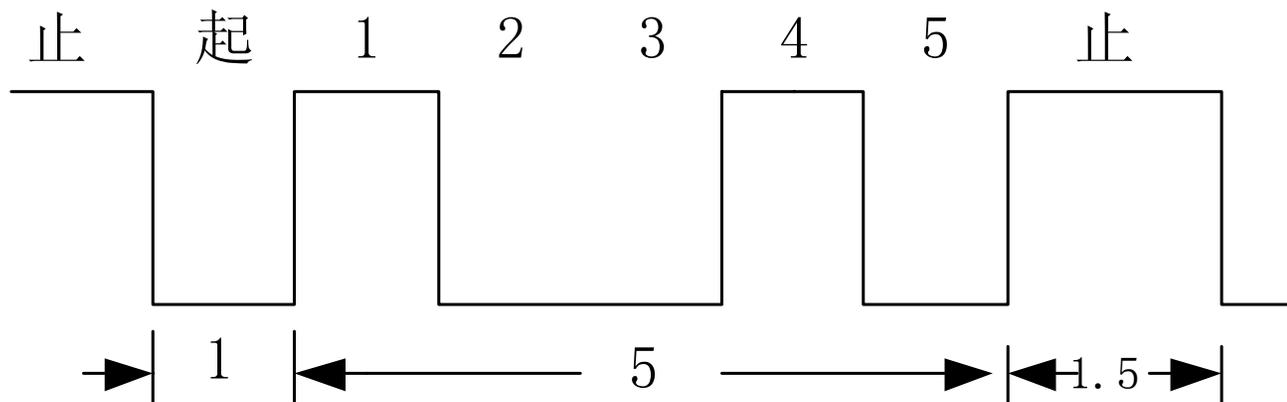
为了实现帧同步，可在数字信息流中插入一些特殊码字作为每个群的头尾标记。

❖实现群同步，通常采用的方法是**起止式同步法**和**插入特殊同步码组**的同步法。

❖而插入特殊同步码组的方法有两种：一种为**连贯式插入法**，另一种为**间隔式插入法**。

# 1、起止式同步法:

- ❖ 在编码信息的开头，先发送一个“起脉冲”（负值），以标识字的开始；
- ❖ 在末尾，再发送一个“止脉冲”。
- ❖ 收端根据高电平第一次转到低电平这一特殊标志来确定一个字的起始位置，从而实现字同步。



## 2、连贯式插入法（集中插入法）：

- ❖ 连贯式插入法：是在每群的开头集中插入作为群同步码的特殊码组；
- ❖ 关键是要找出可作为群同步码的特殊码组。
- ❖ 这个特殊码组要在信息中不易出现；
- ❖ 接收端识别器也要尽量简单；
- ❖ 巴克码是常用的群同步码。

## 巴克码:

❖ 巴克码是具有特殊规律的二进制码组，有尖锐的局部自相关函数；

❖ 巴克码局部自相关函数：一个 $n$ 位长的巴克码组 $\{x_1, x_2, x_3, \dots, x_n\}$ ，其中 $x_i$ 的取值为 $+1$ 或 $-1$ 。

$$R(j) = \sum_{i=1}^{n-j} x_i x_{i+j} = \begin{cases} n & , \text{当 } j = 0 \\ 0 \text{ 或 } \pm 1 & , \text{当 } 0 < j < n \\ 0 & , \text{当 } j \geq n \end{cases}$$

# 巴克码组

位数n	巴克码组
2	+ + (11)
3	+ + - (110)
4	+ + + - (1110); + + - + (1101)
5	+ + + - + (11101)
7	+ + + - - + - (1110010)
11	+ + + - - - + - - + - (11100010010)
13	+ + + + + - - + + - + - + (1111100110101)

其中的 +、- 号表示  $x_i$  的取值为 +1、-1，分别对应二进制码的“1”或“0”。

以7位 ( $n=7$ ) 巴克码组{+++--+-}为例,  
它的局部自相关函数如下:

$$\text{当 } j=0 \text{ 时 } R(j) = \sum_{i=1}^7 x_i^2 = 1 + 1 + 1 + 1 + 1 + 1 + 1 = 7;$$

$$\text{当 } j=1 \text{ 时 } R(j) = \sum_{i=1}^6 x_i x_{i+1} = 1 + 1 - 1 + 1 - 1 - 1 = 0;$$

$$\text{当 } j=2 \text{ 时 } R(j) = \sum_{i=1}^5 x_i x_{i+2} = 1 - 1 - 1 - 1 + 1 = -1。$$

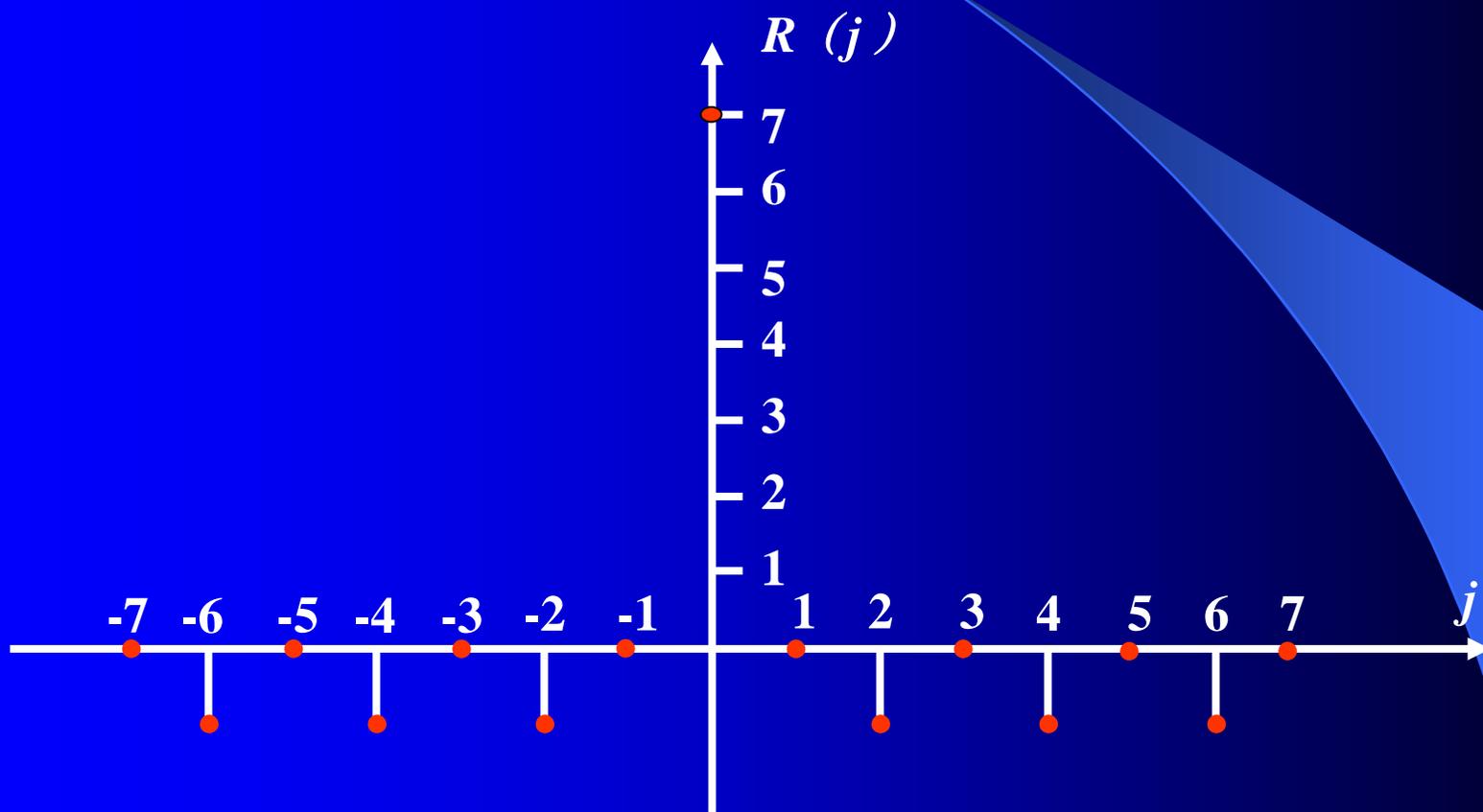
同样可以求出  $j=3, 4, 5, 6, 7$  以及  $j=-1, -2, -3, -4, -5, -6, -7$  时

$$j = 0, \quad R(j) = 7;$$

$$j = \pm 1, \pm 3, \pm 5, \pm 7, \quad R(j) = 0;$$

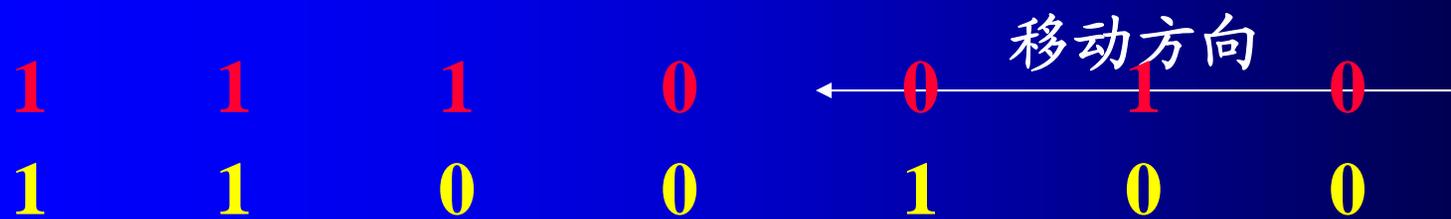
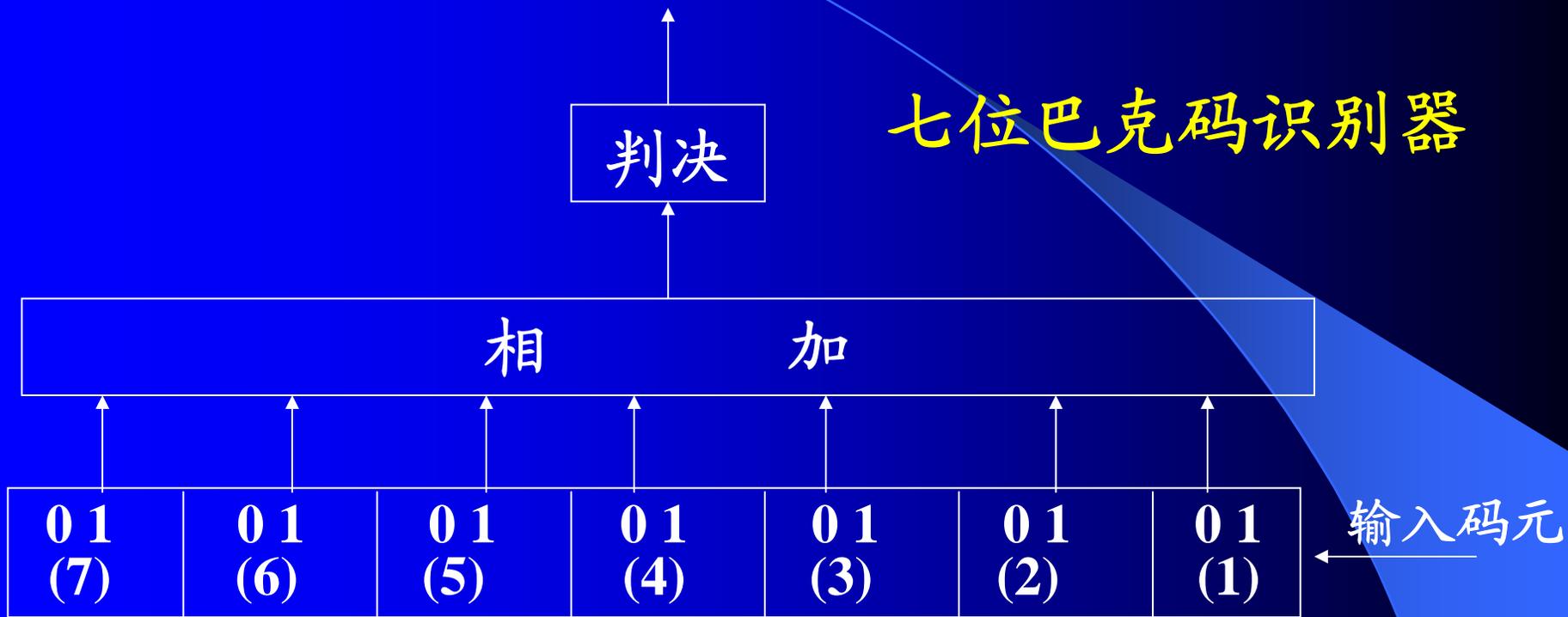
$$j = \pm 2, \pm 4, \pm 6, \quad R(j) = -1。$$

# 7位巴克码局部自相关函数



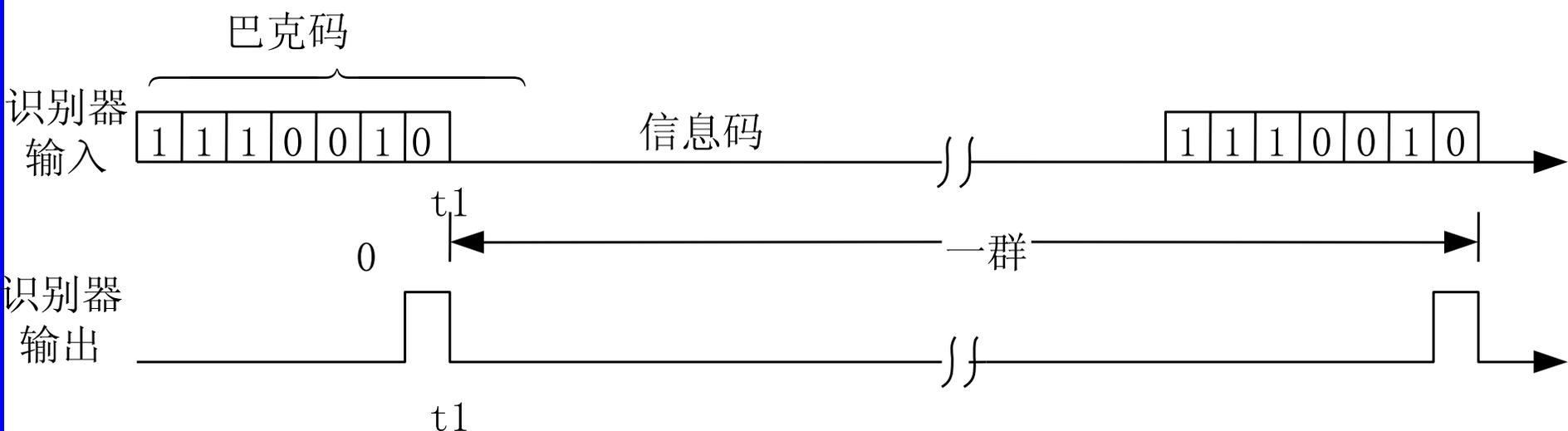
❖ 巴克码的识别器组成十分简单：七级移位寄存器、相加器和判决器就可以组成一个巴克码识别器。

## 七位巴克码识别器

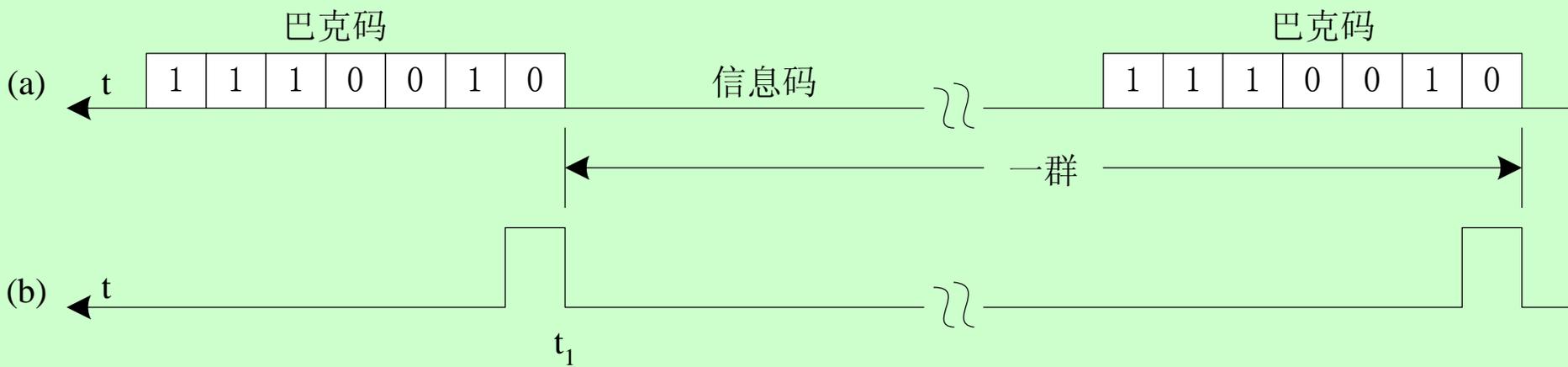
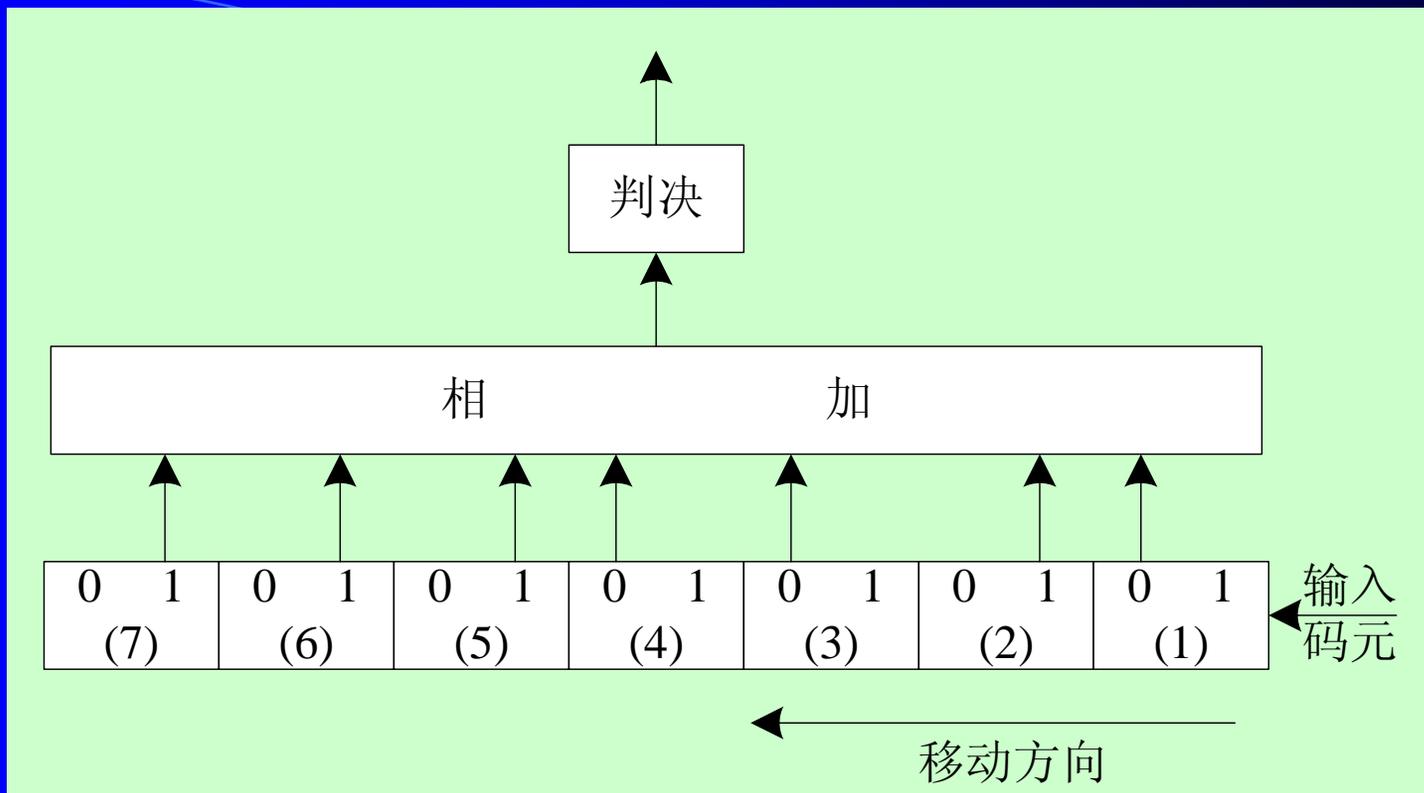


移位寄存器进入1码：1端输出+1；0端输出-1。  
 移位寄存器进入0码：1端输出-1；0端输出+1。

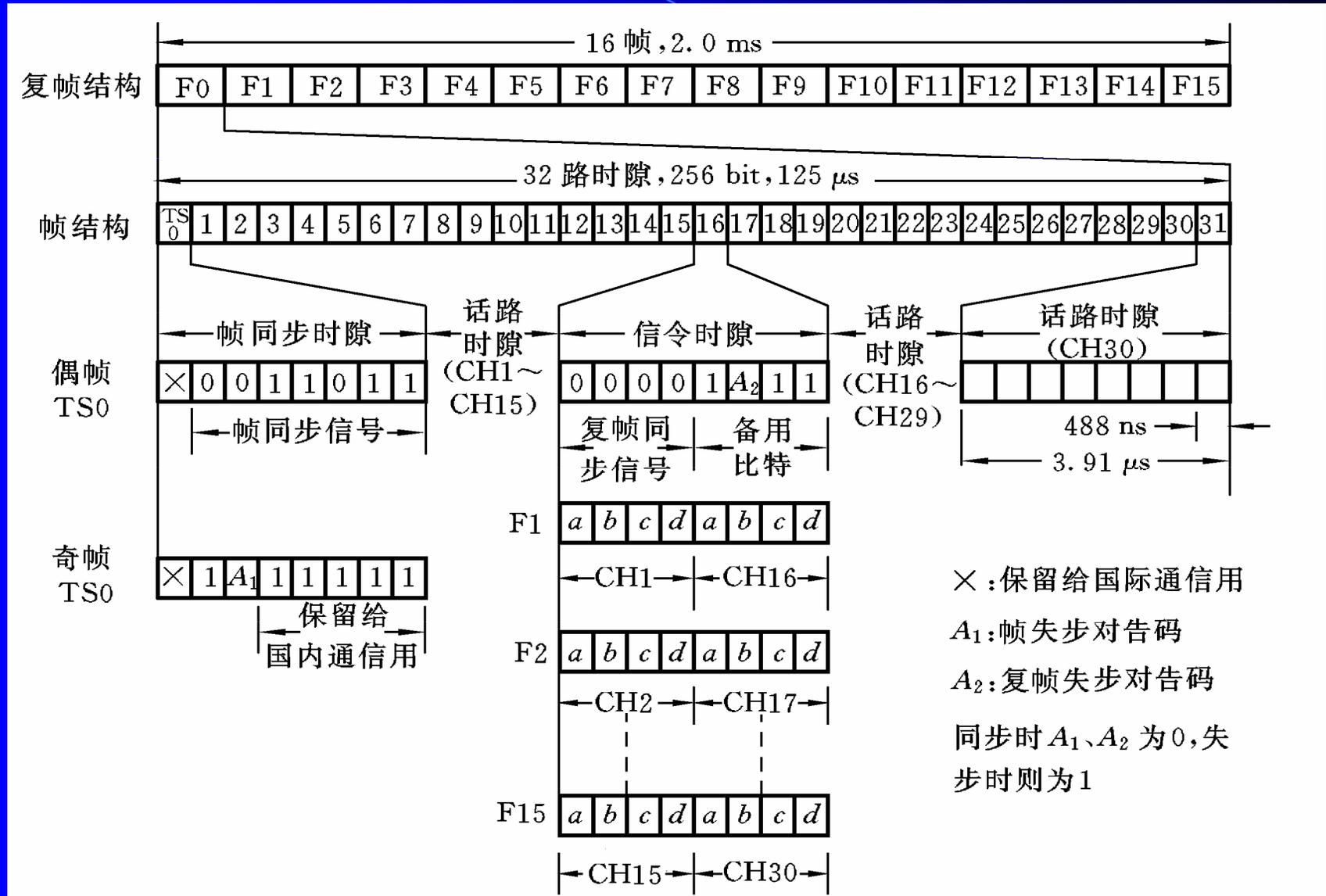
# 巴克码识别器输出



判决器输出的两个脉冲之间的数据，  
称为一群数据或称为一帧数据。

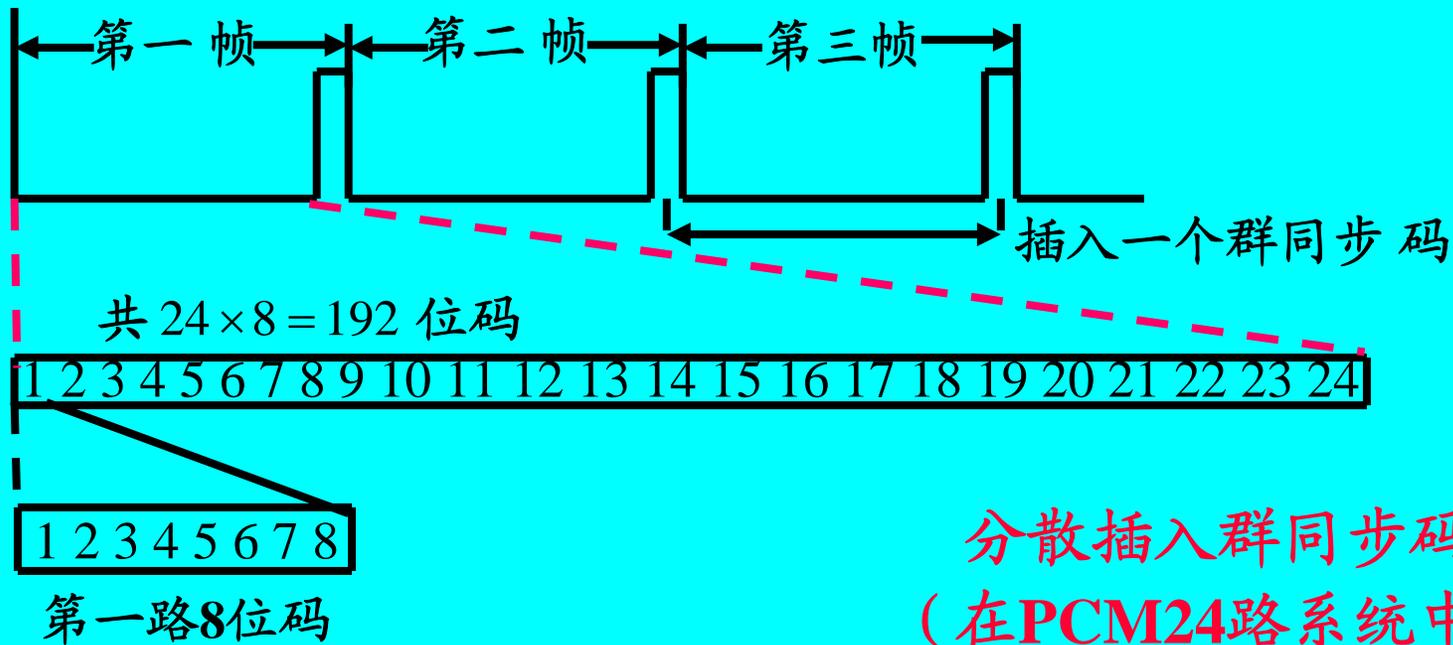
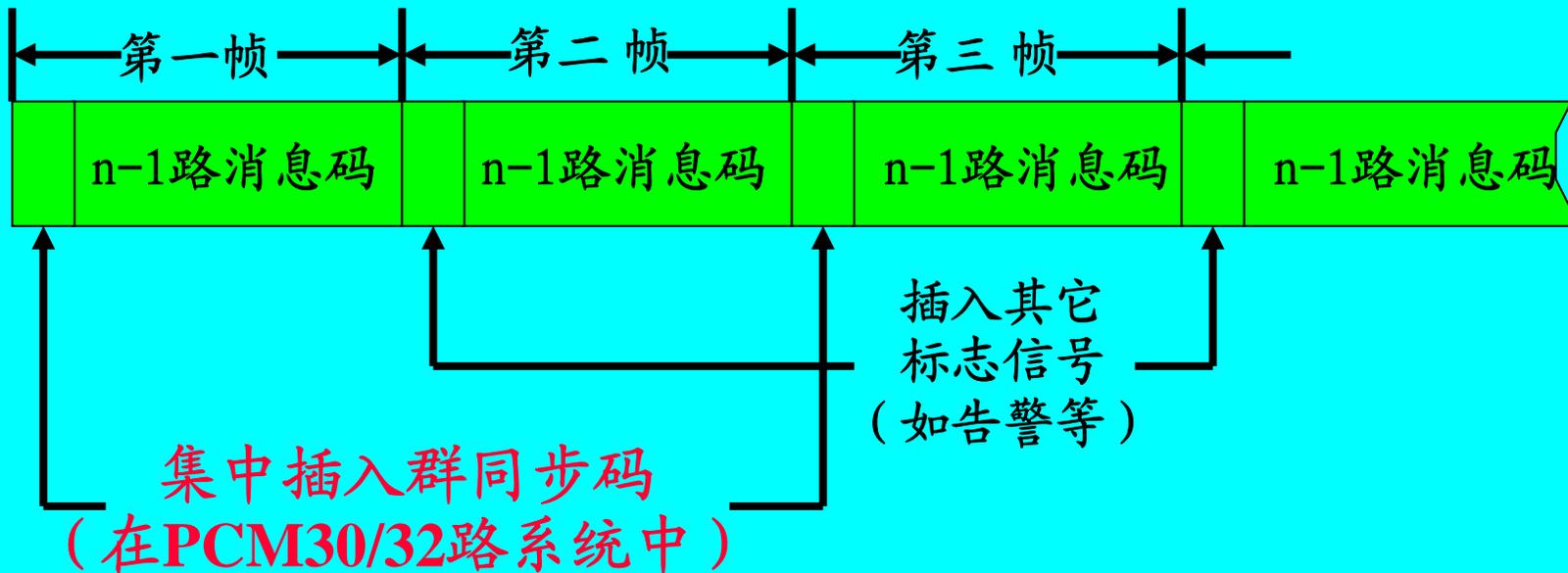


# 例如：PCM30 / 32路基群的帧同步信息的插入方法即为连贯式插入法：



### 3、间歇式插入法

- ❖ 连贯式插入法主要用在数据传输时，每组数据前面集中插入一组特殊的码组作为群同步；
- ❖ 间歇式插入法是将同步码以分散的形式插入信息码流中的一种同步方法，即每隔一定数量的信息码元，插入一个帧同步码元。比较多地用在多路数字电话系统中。



## 四、群同步系统性能:

1、漏同步概率 $P_1$ : 同步码字中一些码元发生错误, 从而使识别器漏识别已发出的群同步码字, 出现这种情况的概率称为漏识概率。

设 $P_e$ 为码元错误概率,  $n$ 为同步码组的码组元数,  $m$ 为判决器容许码组中的错误码元最大数,  $r$ 为实际发生的错误码元数, 则同步码组码元 $n$ 中所有不超过 $m$ 个错误码元的码组都能被识别器识别, 因而, 未漏同步概率为

$$\sum_{r=0}^m C_n^r P_e^r (1 - P_e)^{n-r}$$

故得漏同步概率为

$$P_1 = 1 - \sum_{r=0}^m C_n^r P_e^r (1 - P_e)^{n-r}$$

2、假同步概率 $P_2$ ：假同步概率 $P_2$ 的计算就是计算信息码元中能被判为同步码组的组合数与所有可能的码组数之比。

设二进制信息码中 1、0 码等概率出现， $P(1)=P(0)=0.5$ ，则由该二进制码元组成 $n$ 位码组的所有可能的码组数为 $2^n$ 个，而其中能被判为同步码组的组合数也与 $m$ 有关，若 $m=0$ ，只有 $C_n^0$ 个码组能识别；若 $m=1$ ，则有 $C_n^0 + C_n^1$ 个码组能识，其余类推。写成普遍式，信息码中可被判为同步码组的组合数为

$$\sum_{r=0}^m C_n^r$$

由此可得假同步概率为

$$P_2 = \frac{1}{2^n} \sum_{r=0}^m C_n^r$$

### 3、群同步平均建立时间 $t_s$

对于连贯式插入法，假设漏同步和假同步都不出现，在最不利的情况下，实现帧同步最多需要一帧时间，设每帧的码元数为 $N$ ，每码元的时间宽度为 $T_b$ ，则一帧的时间为 $NT_b$ 。在建立同步过程中，如出现一次漏同步，则建立时间要增加 $NT_b$ ；如出现一次假同步，建立时间也要增加 $NT_b$ ，因此，帧同步的平均建立时间为

$$t_s = (1 + P_1 + P_2)NT_b$$

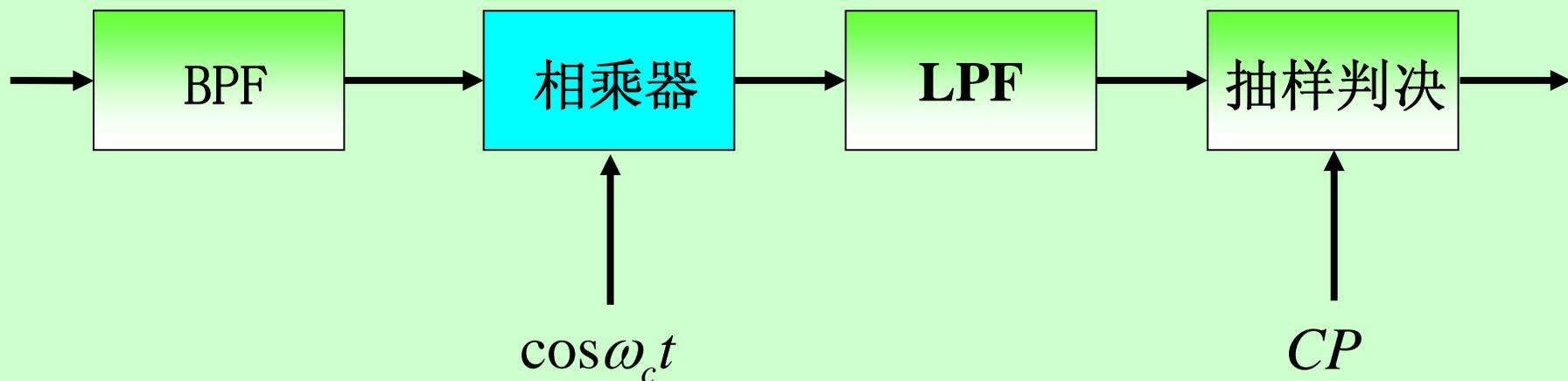
对于分散式插入法，其平均建立时间经过分析计算可得

$$t_s \approx N^2 T_b$$

# 思考与练习

9.21 同步是通信系统的重要部分之一，分析回答下列问题：

- (1) 从同步的功用考虑，同步可以具体分成哪几种；
- (2) 在下图中，指出接收端提供了那几种同步，为什么？
- (3) 试画出平方环法提取同步载波的方框图。



# 小结

❖ 按照同步的功用把同步分为：

载波同步、位同步、帧同步和网同步。

❖ 按照获取和传输同步信息方式的不同，又

可分为外同步法和自同步法：

# 载波同步的方法

## ❖ 直接法（自同步法）：

经非线性变换，直接从信号中提取。

包括平方法（平方变换法和平方环法）、同相正交环法(科斯塔斯环法)。

## ❖ 插入导频法（外同步法）：

在适当频率位置插入导频。（DSB、VSB）

## 位同步的方法:

### ❖插入导频法:

位定时导频插入法和波形变化法（使数字信号的包络按位同步信号的某种波形变化，如对2PSK信号进行附加的幅度调制）

### ❖直接法:

直接法中也分滤波法和锁相法

## 帧同步的方法:

❖ 起止式同步法

❖ 插入特殊同步码组

插入特殊同步码组的方法有两种：  
一种为连贯式插入法（**巴克码**），  
另一种为间隔式插入法。



谢 谢 大 家