

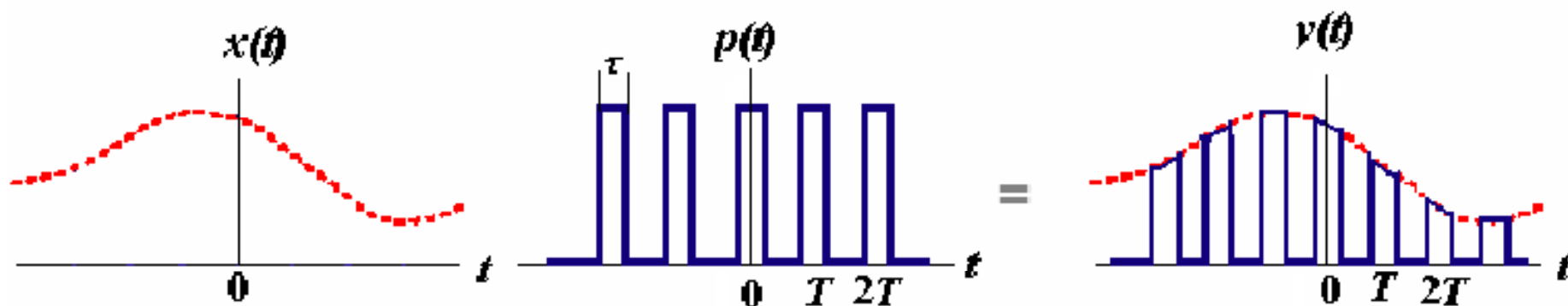
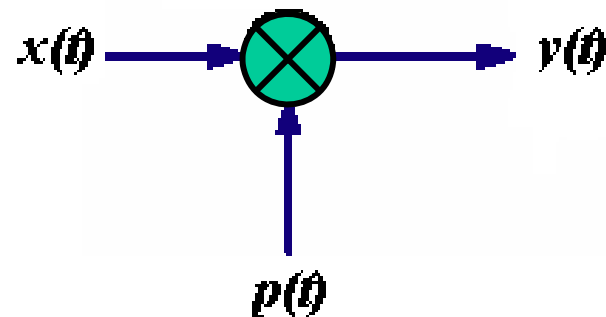
## § 3.2 脉冲幅度调制和时分多路复用

**抽样定理结论**：最高频率为 $f_m$ 的带限信号 $x(t)$ ，可以由其等间隔 $T$ (不大于 $1/2f_m$ )的抽样值 $x(nT)$ 完全确定

- 抽样值序列可视为载波为周期脉冲，幅度受到信号抽样值的调制，称为**脉冲幅度调制**(Pulse Amplitude Modulation, PAM)
- PAM系统：直接传输这个抽样值序列的系统
- 每隔 $T$  抽取一个很窄的抽样值，两个抽样值的空挡可用于传输其他信号的抽样值
- **时间划分多路复用**，简称**时分多路复用**或**时分复用**(Time Division Multiplexing, TDM)：在时间上依序排列各个信号的抽样值，并在一个信道中同时传输多路信号的技术

# 一、曲顶PAM

- 曲顶PAM: 抽样脉冲为矩形脉冲序列  $p(t)$ , 与带限信号  $x(t)$  相乘, 得到PAM信号  $y(t)$ , 其脉冲顶部随信号  $x(t)$  的变化而变化



$$\begin{aligned}
 p(t) &= \text{rect}\left(\frac{t}{\tau}\right) * \delta_T(t) = \text{rect}\left(\frac{t}{\tau}\right) * \sum_{k=-\infty}^{\infty} \delta(t - kT) \\
 &= \sum_{k=-\infty}^{\infty} \text{rect}\left(\frac{t}{\tau}\right) * \delta(t - kT) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} \text{rect}\left(\frac{t - kT}{\tau}\right)
 \end{aligned}$$

$$\text{rect}\left(\frac{t}{\tau}\right) \xleftrightarrow{F} \tau \text{Sa}\left(\frac{\omega\tau}{2}\right)$$

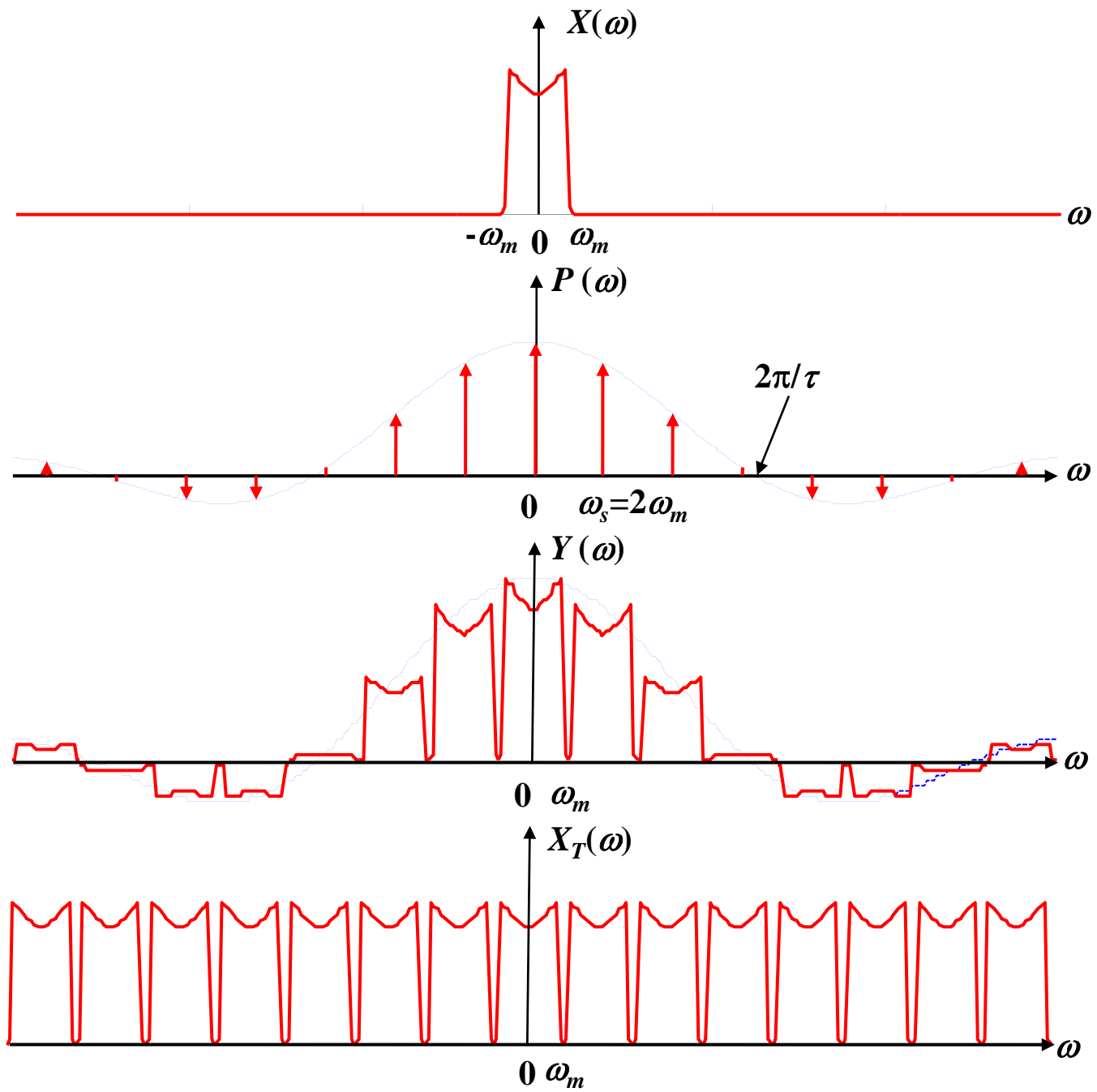
$$\begin{aligned} \therefore p(t) \xleftrightarrow{F} P(\omega) &= \left[ \tau \text{Sa}\left(\frac{\omega\tau}{2}\right) \right] \delta_T(\omega) = \left[ \tau \text{Sa}\left(\frac{\omega\tau}{2}\right) \right] \left[ \frac{2\pi}{T} \sum_{k=-\infty}^{\infty} \delta\left(\omega - \frac{2\pi}{T}k\right) \right] \\ &= \frac{2\pi\tau}{T} \sum_{k=-\infty}^{\infty} \text{Sa}\left(\frac{\omega\tau}{2}\right) \delta\left(\omega - \frac{2\pi}{T}k\right) = \frac{2\pi\tau}{T} \sum_{k=-\infty}^{\infty} \text{Sa}\left(\frac{\frac{2\pi}{T}k\tau}{2}\right) \delta\left(\omega - \frac{2\pi}{T}k\right) \\ &= \frac{2\pi\tau}{T} \sum_{k=-\infty}^{\infty} \text{Sa}\left(\frac{k\pi\tau}{T}\right) \delta(\omega - k\omega_s) \quad \omega_s = \frac{2\pi}{T} \end{aligned}$$

矩形脉冲序列 $p(t)$ 的频谱是包络为 $\text{Sa}(k\pi\tau/T)$ 的离散频谱

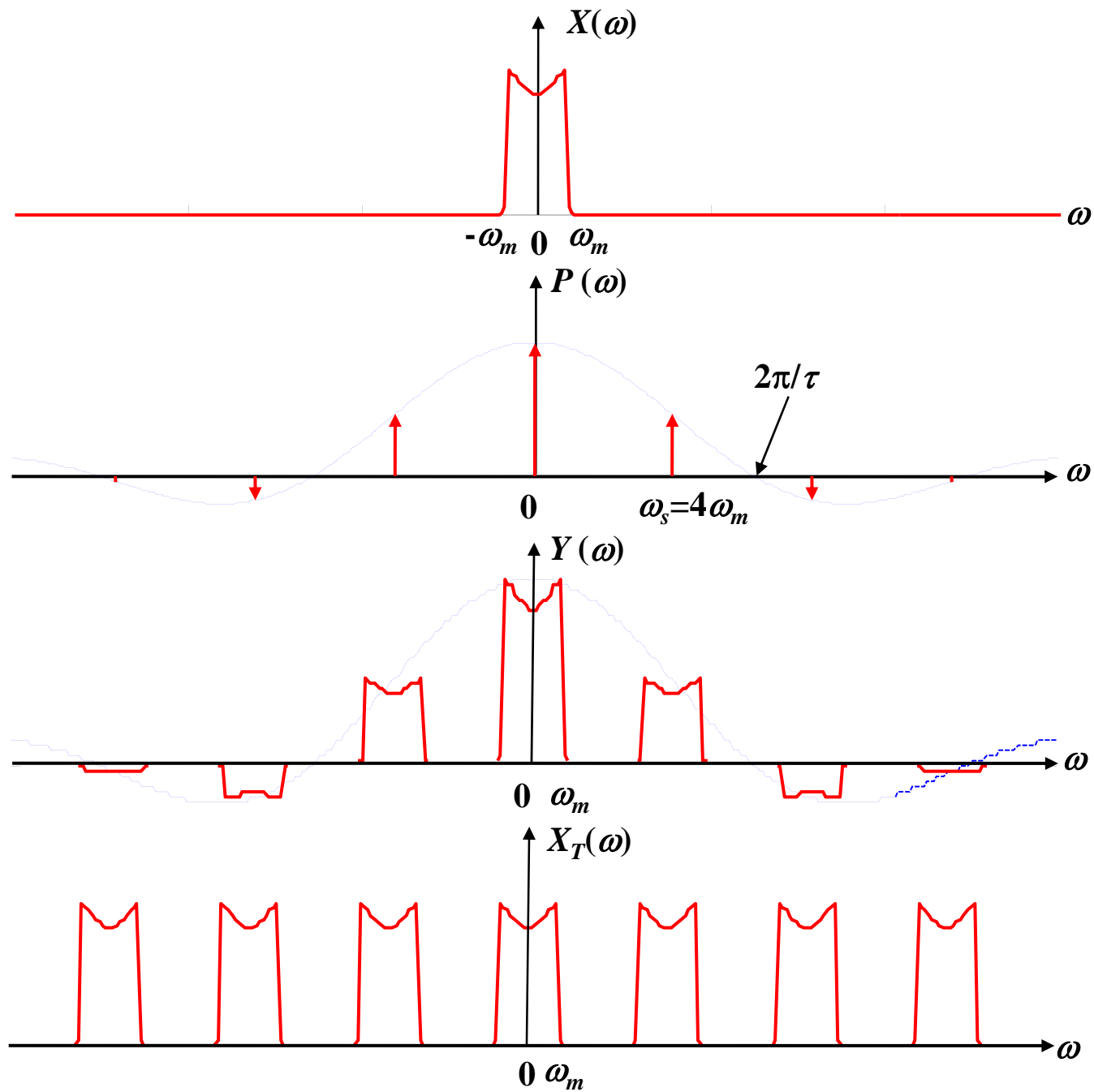
$$\begin{aligned}
\therefore y(t) &= x(t)p(t) = x(t) \sum_{k=-\infty}^{\infty} \text{rect}\left(\frac{t-kT}{\tau}\right) \\
\therefore y(t) &\xleftrightarrow{F} Y(\omega) = \frac{1}{2\pi} X(\omega) * P(\omega) \\
&= \frac{1}{2\pi} X(\omega) * \frac{2\pi\tau}{T} \sum_{k=-\infty}^{\infty} \text{Sa}\left(\frac{k\pi\tau}{T}\right) \delta(\omega - k\omega_s) \\
&= \frac{\tau}{T} \sum_{k=-\infty}^{\infty} X(\omega) * \text{Sa}\left(\frac{k\pi\tau}{T}\right) \delta(\omega - k\omega_s) \\
&= \frac{\tau}{T} \sum_{k=-\infty}^{\infty} \text{Sa}\left(\frac{k\pi\tau}{T}\right) [X(\omega) * \delta(\omega - k\omega_s)] \\
&= \frac{\tau}{T} \sum_{k=-\infty}^{\infty} \text{Sa}\left(\frac{k\pi\tau}{T}\right) X(\omega - k\omega_s)
\end{aligned}$$

曲顶PAM信号 $y(t)$ 的频谱是原信号 $x(t)$ 的频谱以 $\omega_s$ 为周期的重复，只是各周期的频谱幅度按系数 $\text{Sa}(k\pi\tau/T)$ 衰减

$$\omega_s = 2\omega_m$$



$$\omega_s = 4\omega_m$$



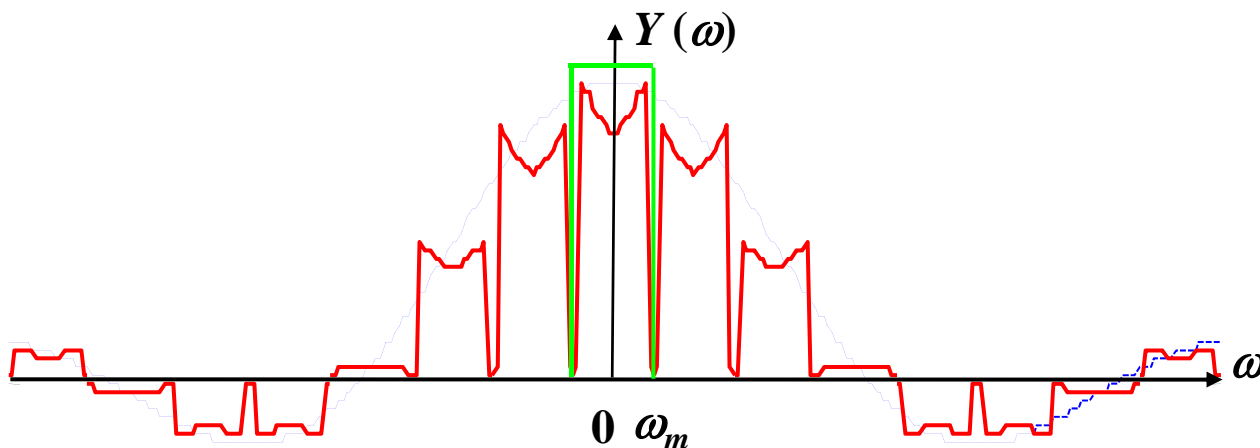
# 由曲顶PAM信号 $y(t)$ 恢复连续信号 $x(t)$

$$\because y(t) \xleftrightarrow{F} Y(\omega) = \frac{\tau}{T} \sum_{k=-\infty}^{\infty} \text{Sa}\left(\frac{k\pi\tau}{T}\right) X(\omega - k\omega_s)$$

- 理想低通滤波器:

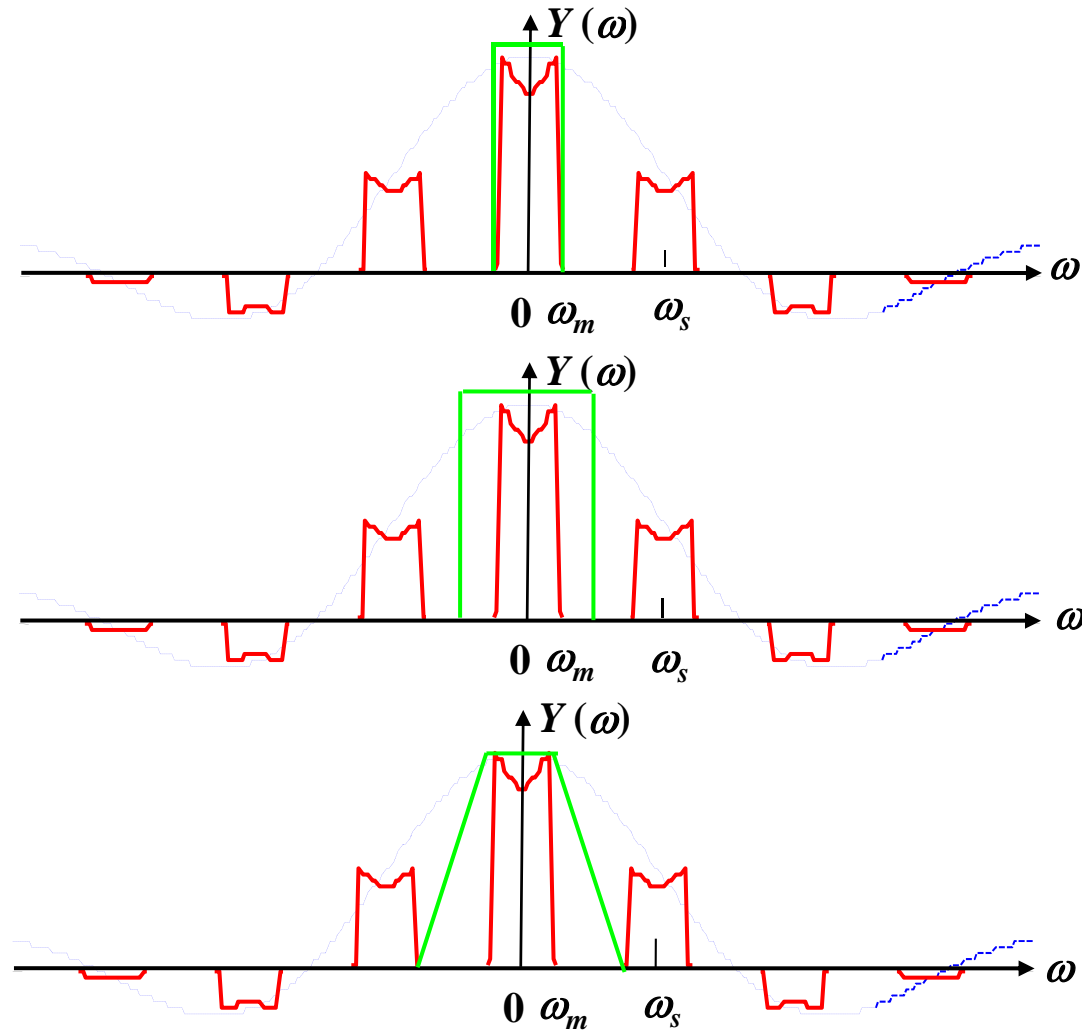
$$H_r(\omega) = \begin{cases} T/\tau & |\omega| < \omega_s/2 \\ 0 & |\omega| > \omega_s/2 \end{cases} \quad H(\omega) = \begin{cases} T/\tau & |\omega| < \omega_m \\ 0 & |\omega| > \omega_m \end{cases}$$

$$\omega_s = 2\omega_m$$



- 实际低通滤波器的通带： $0 \sim \omega_m$   
 过渡带： $\omega_m \sim (\omega_s - \omega_m)$   
 阻带： $>(\omega_s - \omega_m)$

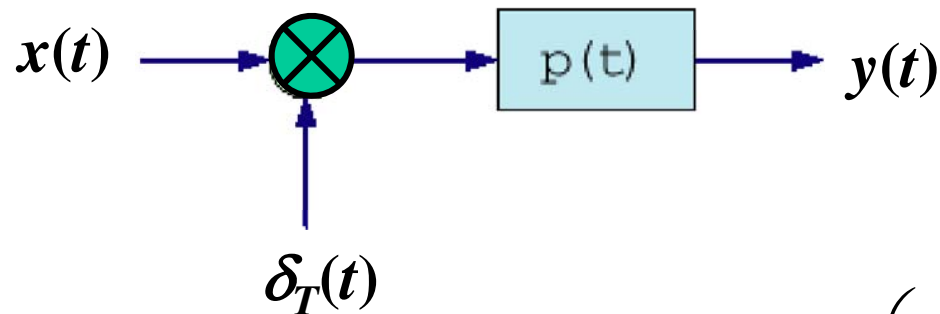
$$\omega_s = 4\omega_m$$





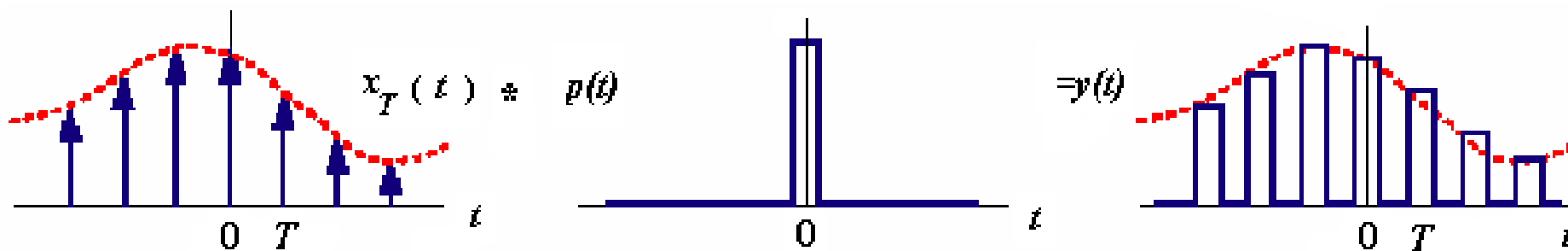
## 二、平顶PAM

- 曲顶PAM实际上很少采用：脉冲的顶部形状易受噪声影响
- 常用**平顶PAM**：脉冲幅度是抽样时刻的瞬时值
- 实现方法：先用窄脉冲对带限信号 $x(t)$ 进行抽样，再用保持电路展宽这些脉冲，产生平顶PAM信号 $y(t)$
- 含义：先抽样，再与宽度为 $\tau$ 的脉冲 $p(t)$ 卷积



$$x_T(t) = x(t)\delta_T(t) \quad p(t) = \text{rect}\left(\frac{t}{\tau}\right)$$

$$\therefore y(t) = x_T(t) * p(t) = [x(t)\delta_T(t)] * p(t)$$



$$y(t) = [x(t)\delta_T(t)] * p(t) = \left[ x(t) \sum_{k=-\infty}^{\infty} \delta(t - kT) \right] * \text{rect}\left(\frac{t}{\tau}\right)$$

$$= \left[ \sum_{k=-\infty}^{\infty} x(kT)\delta(t - kT) \right] * \text{rect}\left(\frac{t}{\tau}\right)$$

$$= \sum_{k=-\infty}^{\infty} \left\{ x(kT) \left[ \delta(t - kT) * \text{rect}\left(\frac{t}{\tau}\right) \right] \right\}$$

$$= \sum_{k=-\infty}^{\infty} \left[ x(kT) \text{rect}\left(\frac{t - kT}{\tau}\right) \right]$$

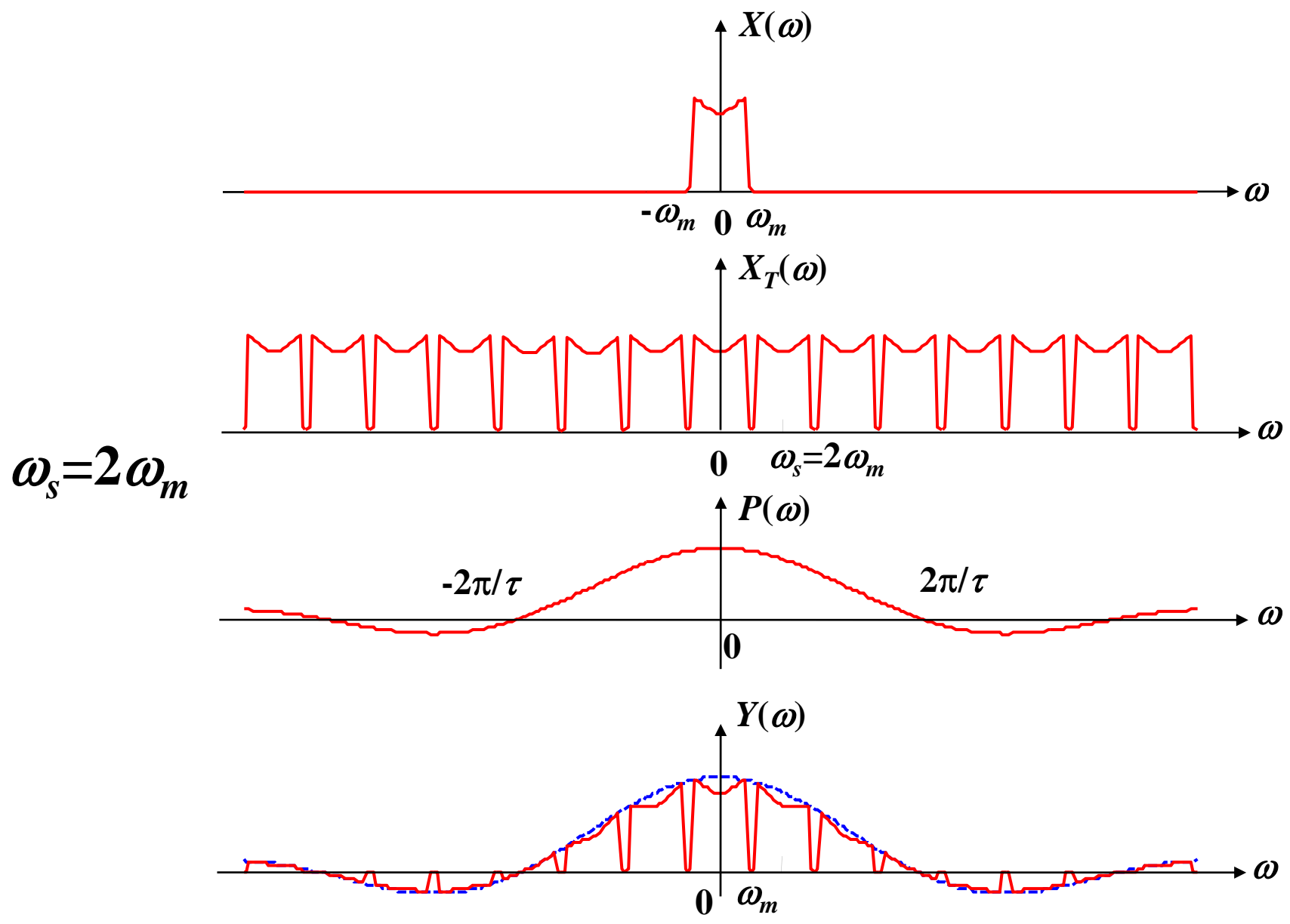
$$\delta_T(t) \xleftrightarrow{F} \delta_T(\omega) = \frac{2\pi}{T} \sum_{k=-\infty}^{\infty} \delta\left(\omega - \frac{2\pi}{T}k\right) = \frac{2\pi}{T} \sum_{k=-\infty}^{\infty} \delta(\omega - k\omega_s) \quad \omega_s = \frac{2\pi}{T}$$

$$p(t) = \text{rect}\left(\frac{t}{\tau}\right) \xleftrightarrow{F} P(\omega) = \tau \text{Sa}\left(\frac{\omega\tau}{2}\right)$$

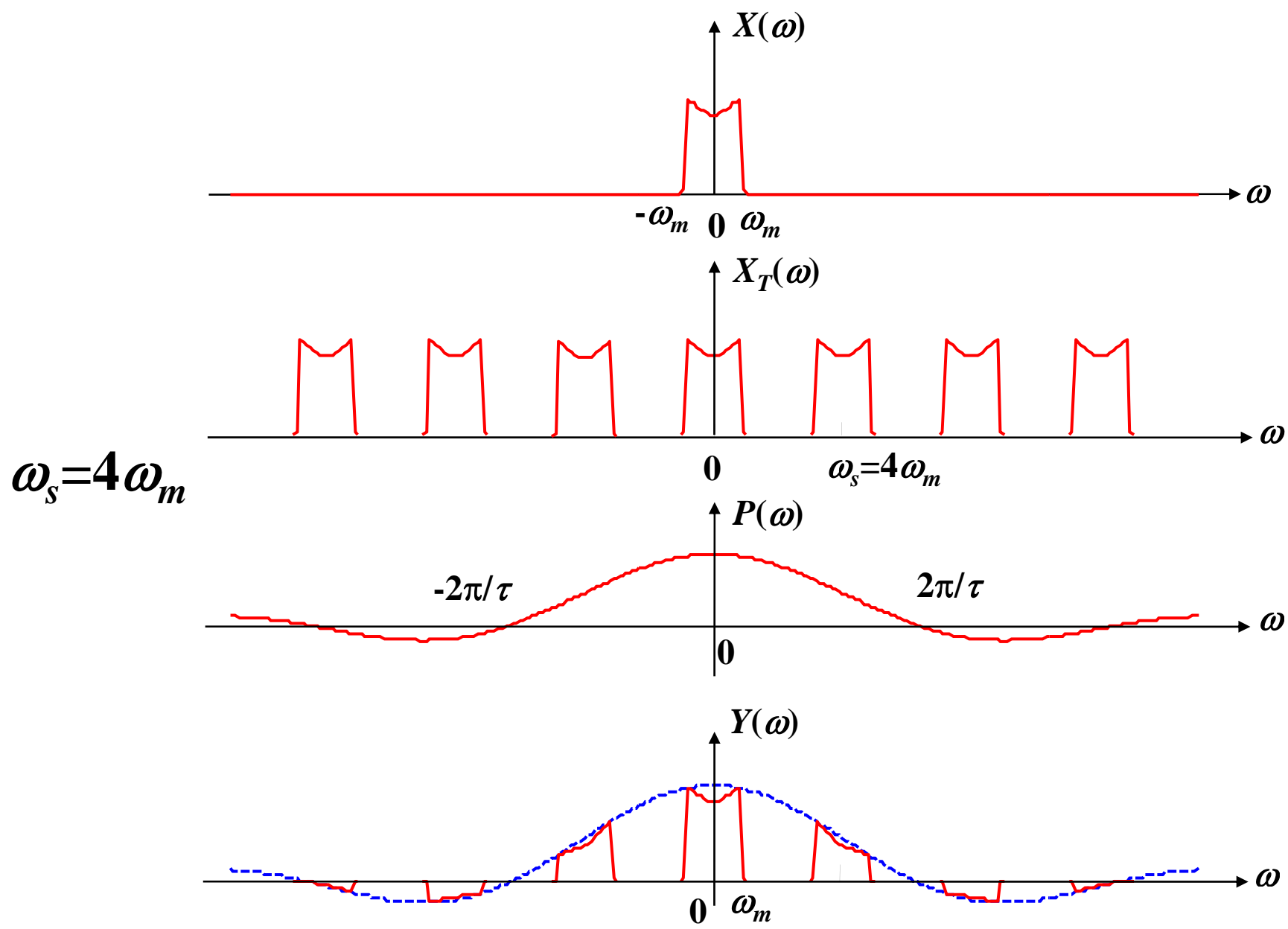
$$y(t) = [x(t)\delta_T(t)] * p(t) \xleftrightarrow{F} Y(\omega) = \left[ \frac{1}{2\pi} X(\omega) * \delta_T(\omega) \right] P(\omega)$$

$$\begin{aligned} \therefore Y(\omega) &= \left[ \frac{1}{T} X(\omega) * \sum_{k=-\infty}^{\infty} \delta(\omega - k\omega_s) \right] \cdot \tau \text{Sa}\left(\frac{\omega\tau}{2}\right) \\ &= \frac{\tau}{T} \text{Sa}\left(\frac{\omega\tau}{2}\right) \sum_{k=-\infty}^{\infty} [X(\omega) * \delta(\omega - k\omega_s)] = \frac{\tau}{T} \text{Sa}\left(\frac{\omega\tau}{2}\right) \sum_{k=-\infty}^{\infty} X(\omega - k\omega_s) \end{aligned}$$

平顶PAM信号 $y(t)$ 的频谱是原信号 $x(t)$ 的频谱以 $\omega_s$ 为周期的重复频谱，重复频谱的包络为 $\text{Sa}(\omega\tau/T)$



$$\omega_s = 2\omega_m$$



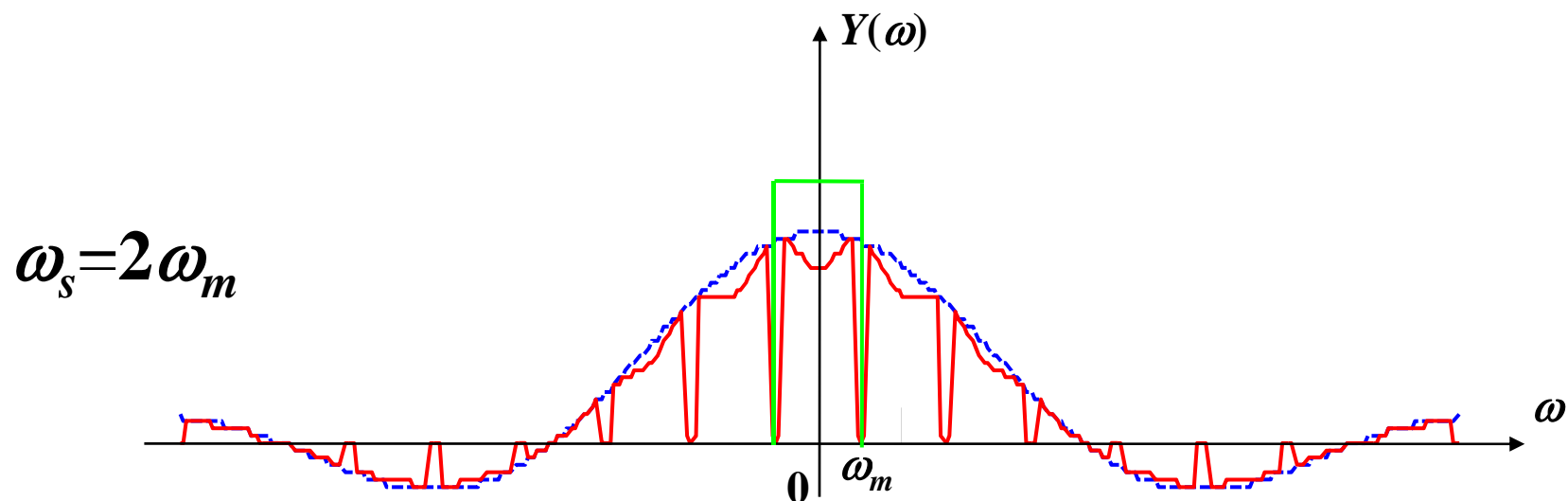
$$\omega_s = 4\omega_m$$

# 由平顶PAM信号 $y(t)$ 恢复连续信号 $x(t)$

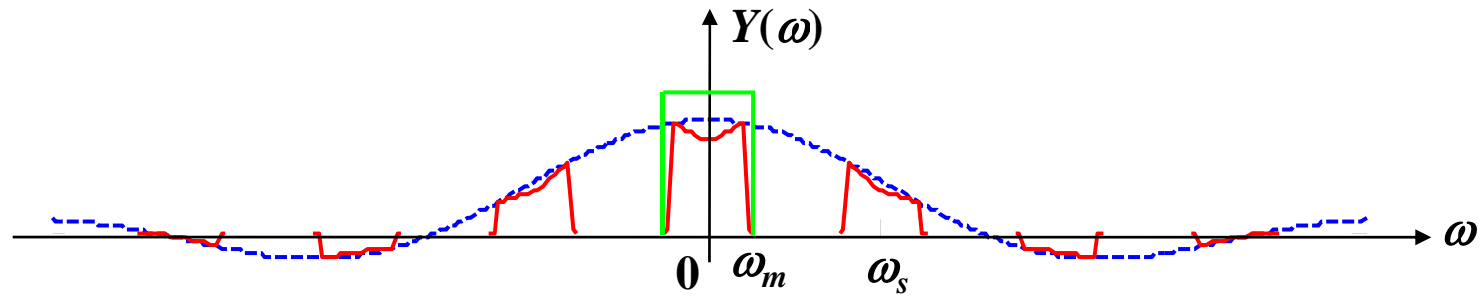
$$\therefore Y(\omega) = \frac{\tau}{T} \text{Sa}\left(\frac{\omega\tau}{2}\right) \sum_{k=-\infty}^{\infty} X(\omega - k\omega_s)$$

- 理想低通滤波器:

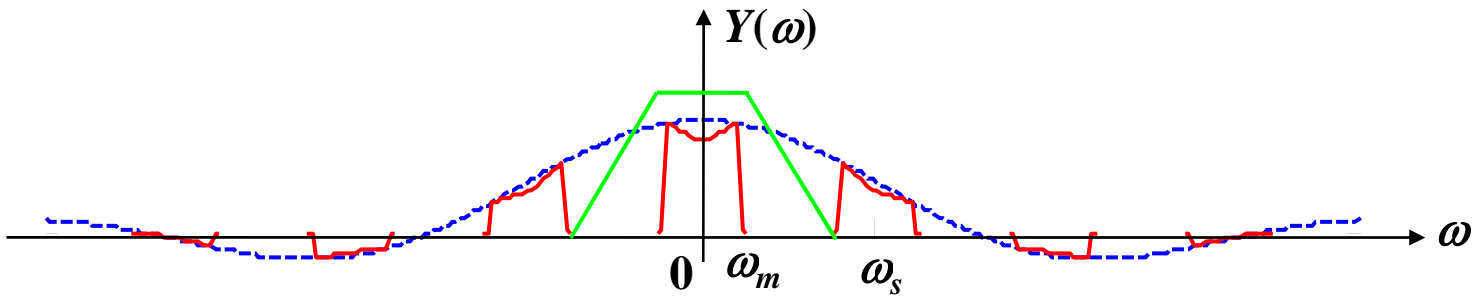
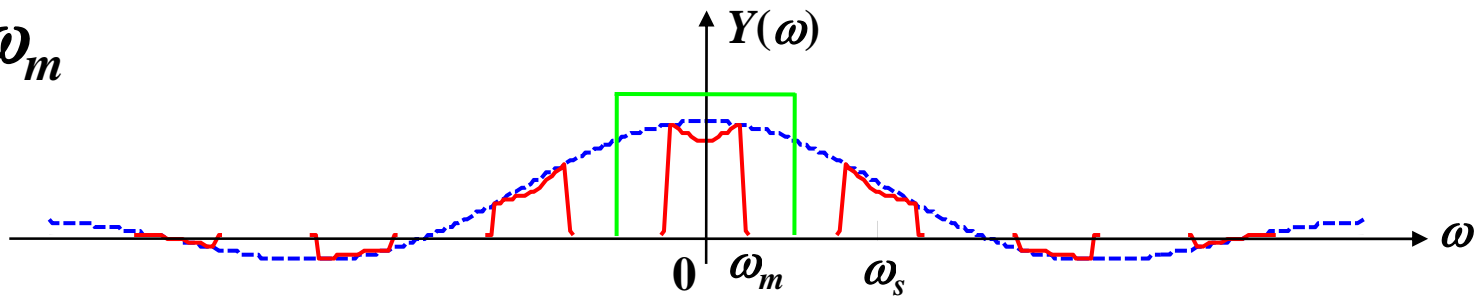
$$H_r(\omega) = \begin{cases} T/\tau & |\omega| < \omega_s/2 \\ 0 & |\omega| > \omega_s/2 \end{cases} \quad H(\omega) = \begin{cases} T/\tau & |\omega| < \omega_m \\ 0 & |\omega| > \omega_m \end{cases}$$



- 实际低通滤波器的通带： $0 \sim \omega_m$   
 过渡带： $\omega_m \sim (\omega_s - \omega_m)$   
 阻带： $>(\omega_s - \omega_m)$



$$\omega_s = 4\omega_m$$



$$Y(\omega) = \frac{\tau}{T} \text{Sa}\left(\frac{\omega\tau}{2}\right) \sum_{k=-\infty}^{\infty} X(\omega - k\omega_s) \Rightarrow$$

$$k=0, \quad \frac{\tau}{T} \text{Sa}\left(\frac{\omega\tau}{2}\right) X(\omega) \neq K \cdot X(\omega), \quad \omega \in [-\omega_s/2, \omega_s/2]$$

- 缺点：低通滤波器恢复的信号稍有失真
- 当脉冲宽度  $\tau \ll T$  时，失真较小

for  $\omega \in [-\omega_s/2, \omega_s/2]$

$$\left. \text{Sa}\left(\frac{\omega\tau}{2}\right) \right|_{\omega=0} = 1$$

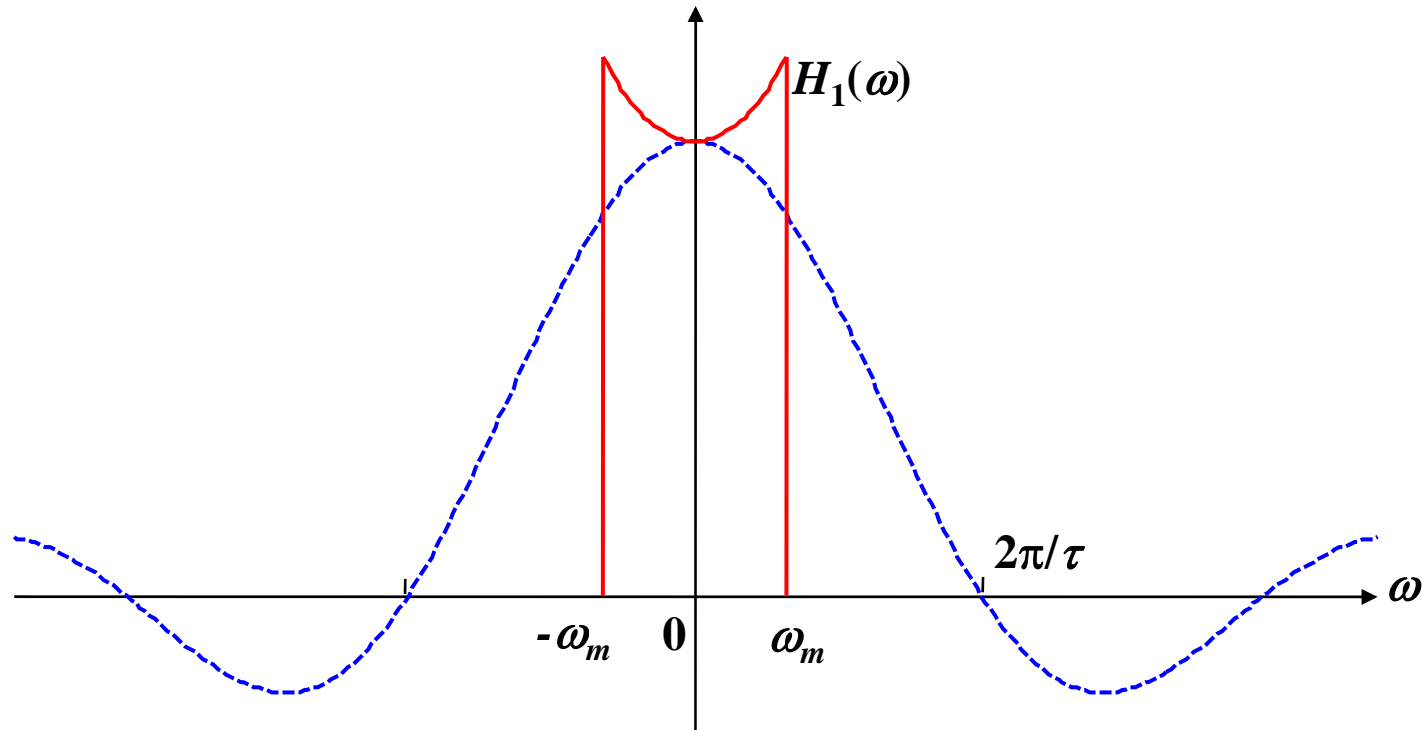
$$\left. \text{Sa}\left(\frac{\omega\tau}{2}\right) \right|_{\omega=\omega_s/2} = \text{Sa}\left(\frac{\omega_s\tau}{4}\right) = \text{Sa}\left(\frac{2\pi\tau}{T} \frac{\tau}{4}\right) = \text{Sa}\left(\frac{\pi\tau}{2T}\right) \xrightarrow{\tau \ll T} 1$$



- 若需无失真恢复，可使用**均衡滤波器**
- 该均衡滤波器的频率响应满足：

$$H_1(\omega) = \begin{cases} \frac{T}{P(\omega)} = \frac{T}{\tau \text{Sa}\left(\frac{\omega\tau}{2}\right)} & \omega \in [-\omega_m, \omega_m] \\ 0 & \text{else} \end{cases}$$

$$\begin{aligned} & \left[ \frac{\tau}{T} \text{Sa}\left(\frac{\omega\tau}{2}\right) X(\omega) \right] \cdot H_1(\omega) \\ & = \begin{cases} \frac{\tau}{T} \text{Sa}\left(\frac{\omega\tau}{2}\right) X(\omega) \cdot \frac{T}{\tau \text{Sa}\left(\frac{\omega\tau}{2}\right)} = X(\omega) & \omega \in [-\omega_m, \omega_m] \\ 0 & \text{else} \end{cases} \end{aligned}$$



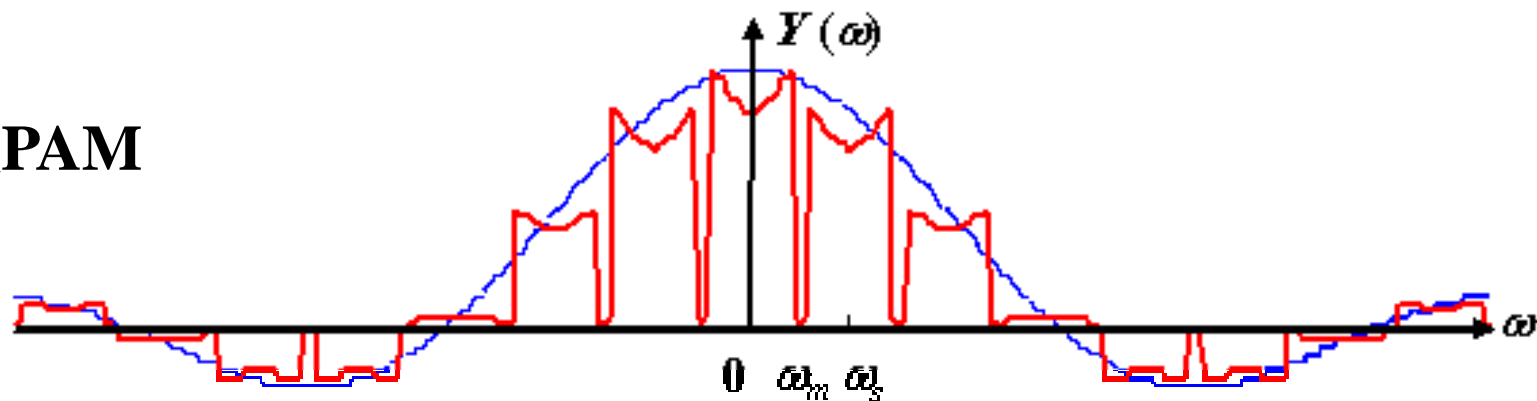
### 三、PAM系统的带宽与传输

#### 1、PAM系统的带宽

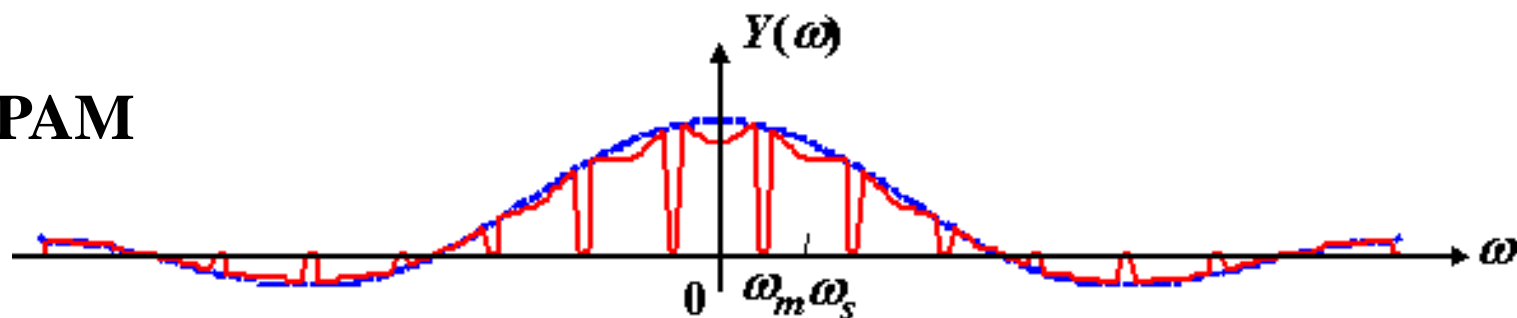
- 曲顶PAM、平顶PAM的带宽均为无限
- 要无失真传输PAM信号，需要传输系统的带宽无限

- 任何实际传输系统的信道带宽总是有限的
- 设传输PAM信号的信道等效于截止频率为 $F_0$ 的理想低通信道
- 考查 $F_0$ 应为多大，才能从系统的接收端完整地恢复原信号 $m(t)$

曲顶PAM



平顶PAM



- PAM传输系统的最小带宽为： $F_0 = f_m$
- 根据抽样定理， $f_m$ 满足： $f_m \leq \frac{1}{2} f_s = \frac{1}{2T}$

$$\therefore F_{0\min} = f_m = \frac{1}{2} f_{s\min} = \frac{1}{2T_s}$$

- 当 $F_0$ 为最小带宽时，脉冲波形必然失真，只是脉冲幅度信息仍然保留
- 事实上，此时的输出不再是脉冲，而是连续的波形
- 一般而言，为既能完整恢复原信号，又能使脉冲的形状尽量少失真，信道的带宽应满足：

$$F_0 \geq f_m = \frac{1}{2} f_{s\min} = \frac{1}{2T_s}$$

- 对于全宽脉冲： $\tau = T_s$ ，信道的最小带宽满足：

$$F_{0\min} = \frac{1}{2T_s} = \frac{1}{2\tau}$$

- 一般情况下，有： $F_{0\min} = \frac{1}{2T_s} \leq \frac{1}{2\tau}$

- 为使脉冲形状尽量少失真，信道带宽通常取脉冲宽度的倒数：

$$F = \frac{1}{\tau}$$

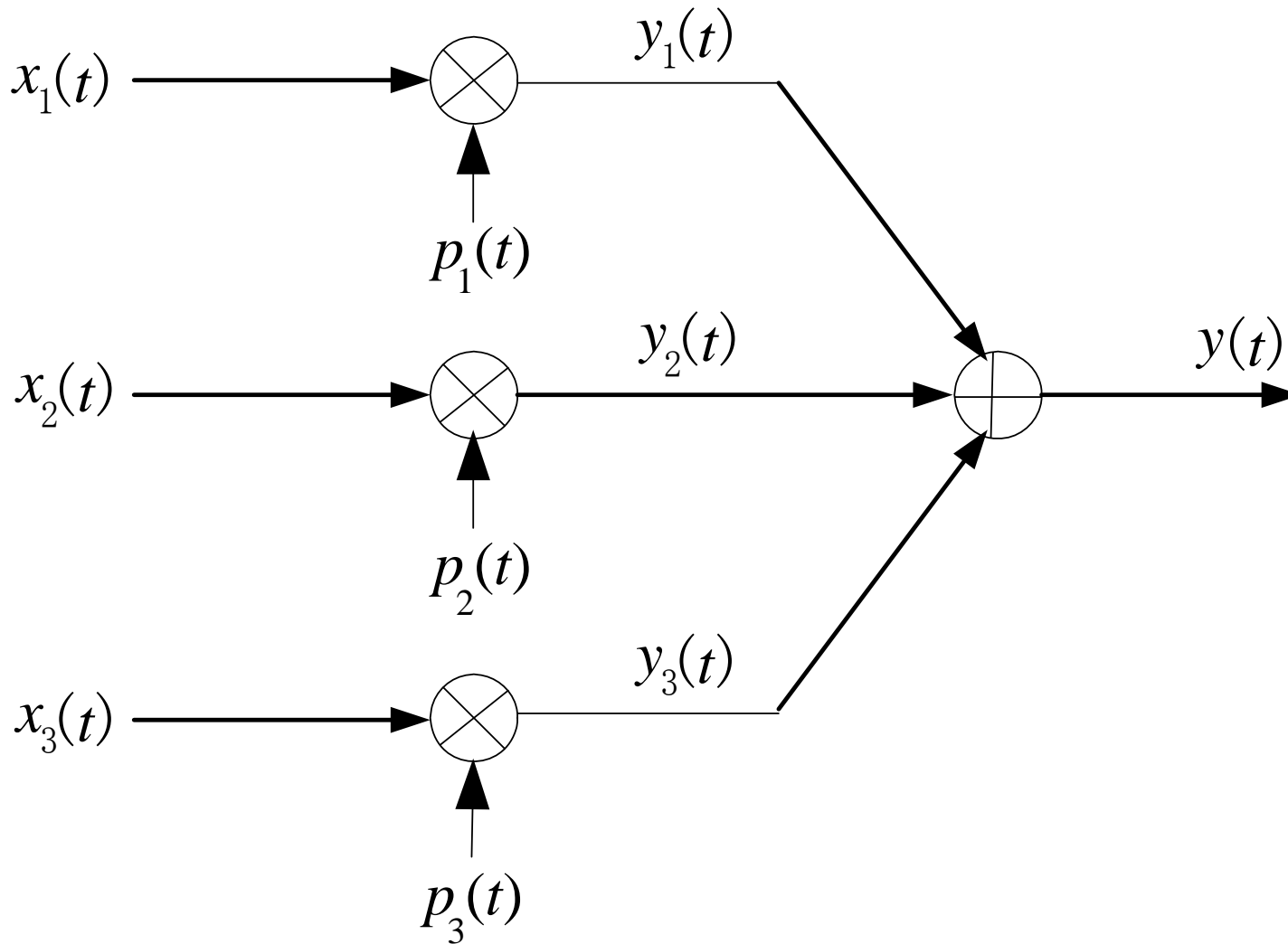
## 2、PAM信号的传输

- PAM信号可直接在一对导线中传输，不能直接用电磁波形式在空气中传输
  - 为在空气中传输，可用下一章介绍的振幅调制方法将PAM信号频谱移到相应的高频处 - - **二级调制系统：PAM/AM系统**
- 

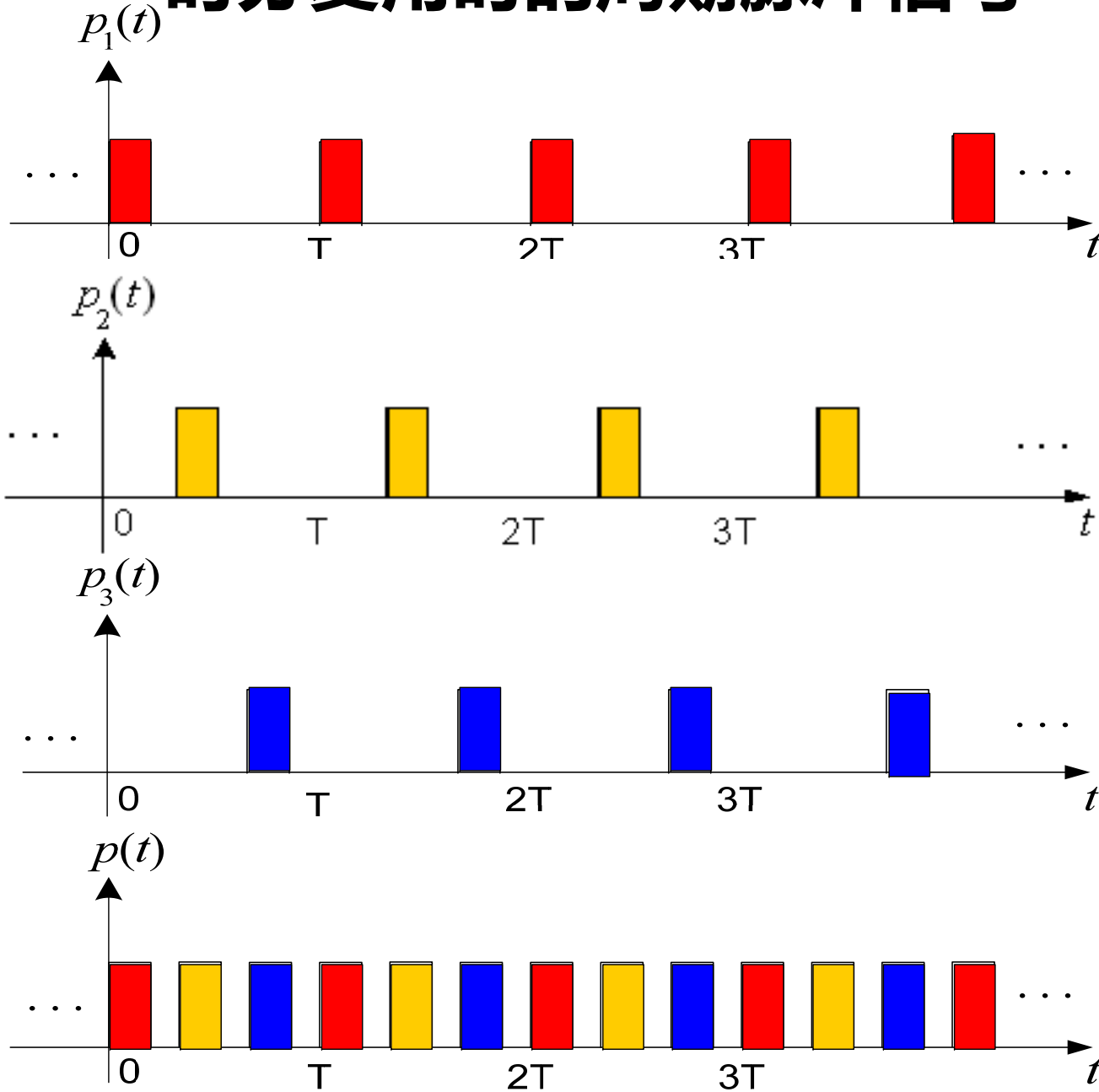
## 四、时分复用

### 基本思想

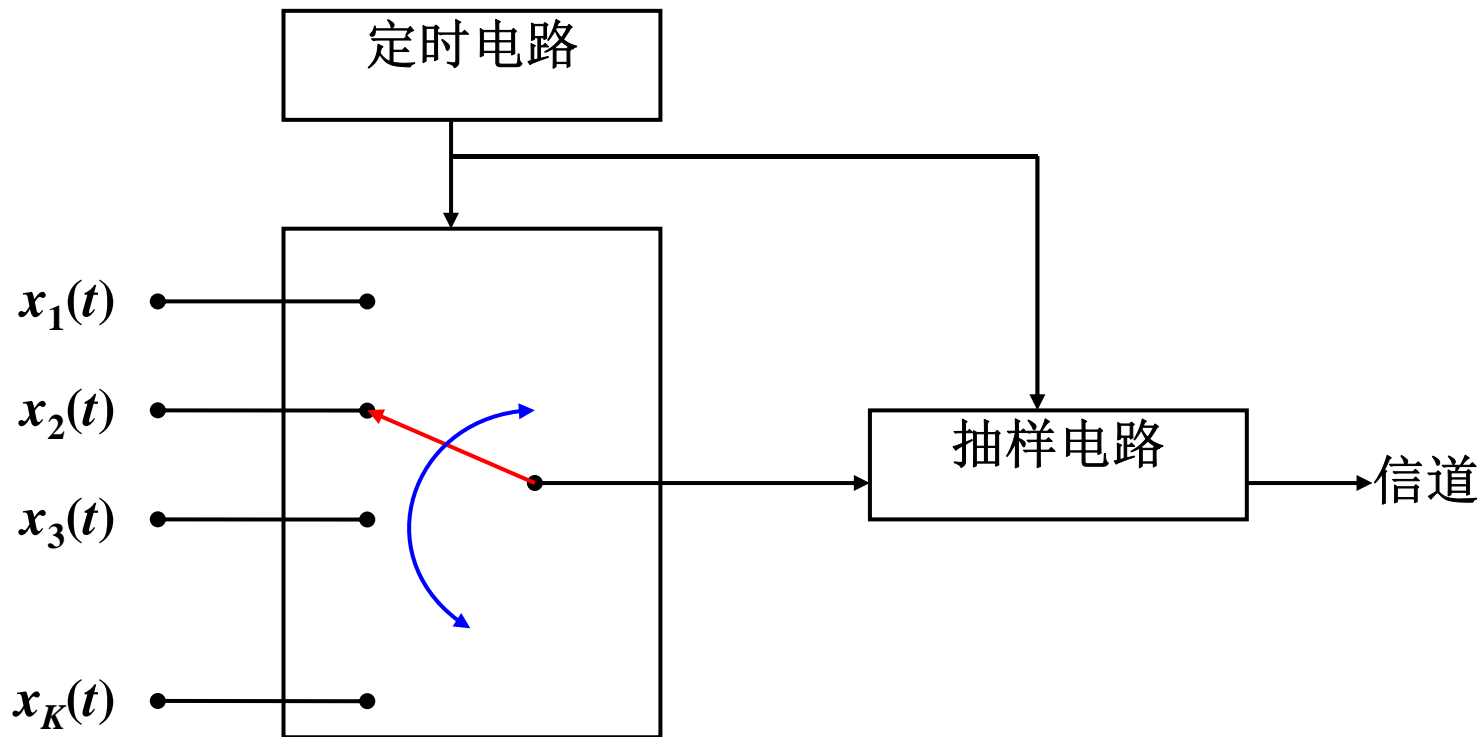
# 时分多路复用的原理框图



# 时分复用时的周期脉冲信号



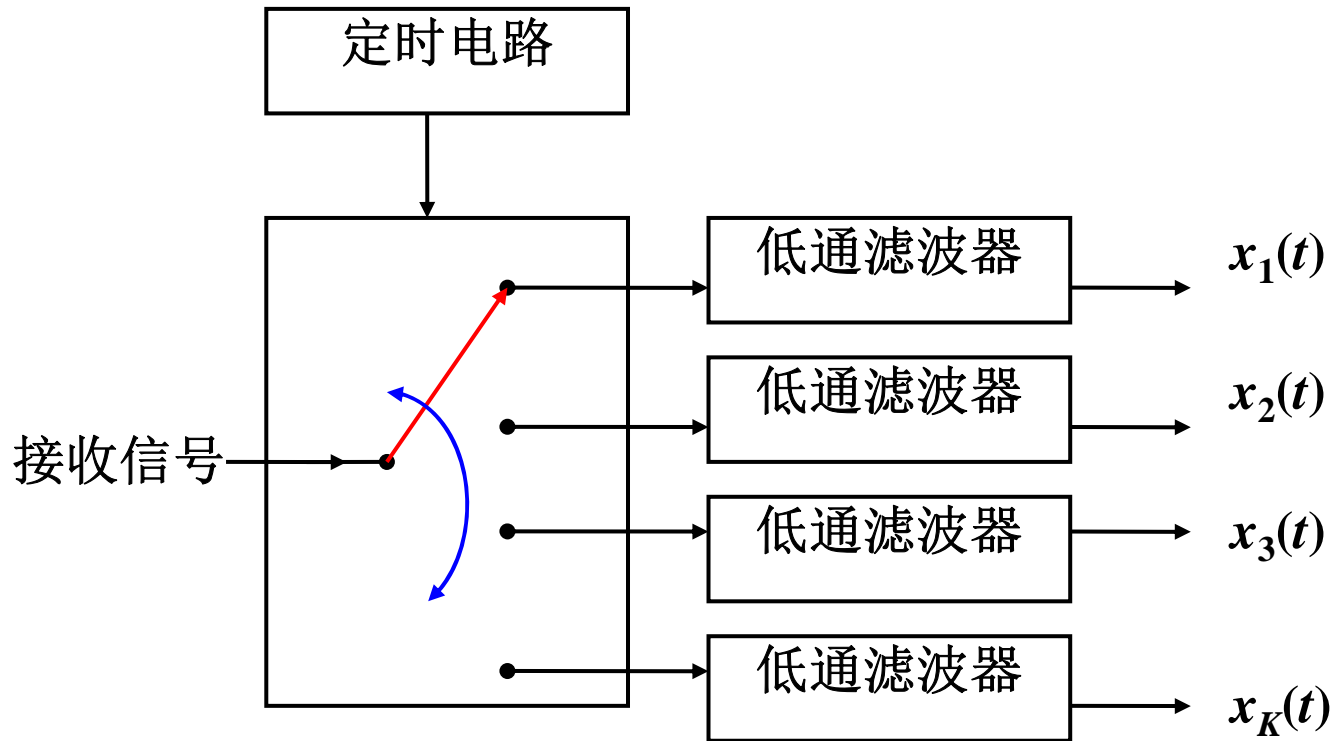
- 时分多路复用特点：利用不同时隙来传送多路脉冲调制信号
- 时分多路复用的发送框图



**电子开关与抽样脉冲同步，按定时电路给出的顺序进行切换**



- 时分多路复用的接收框图



与发送端同步的定时电路控制电子开关按顺序进行切换，从而分离各路信号抽样值

- **同步问题**在时分多路中很重要

## 时分多路复用系统的带宽

---

- 设每路信号的最大频率为 $f_m$ ，每路的抽样频率为 $f_s$
- 每路PAM信号的带宽可以取为：

$$F_0 = \frac{1}{2} f_s = \frac{1}{2T_s} \geq f_m$$

- 设共有 $N$ 路信号进行时分多路复用，定时电路的切换频率为 $F_s = Nf_s$ ，则传输系统的带宽随着路数的增加而增加：

$$F_c = \frac{1}{2} Nf_s = \frac{1}{2} F_s \geq Nf_m$$

- $N$ 路时分多路复用信号的最小带宽为：

$$F_{c \min} = Nf_m$$

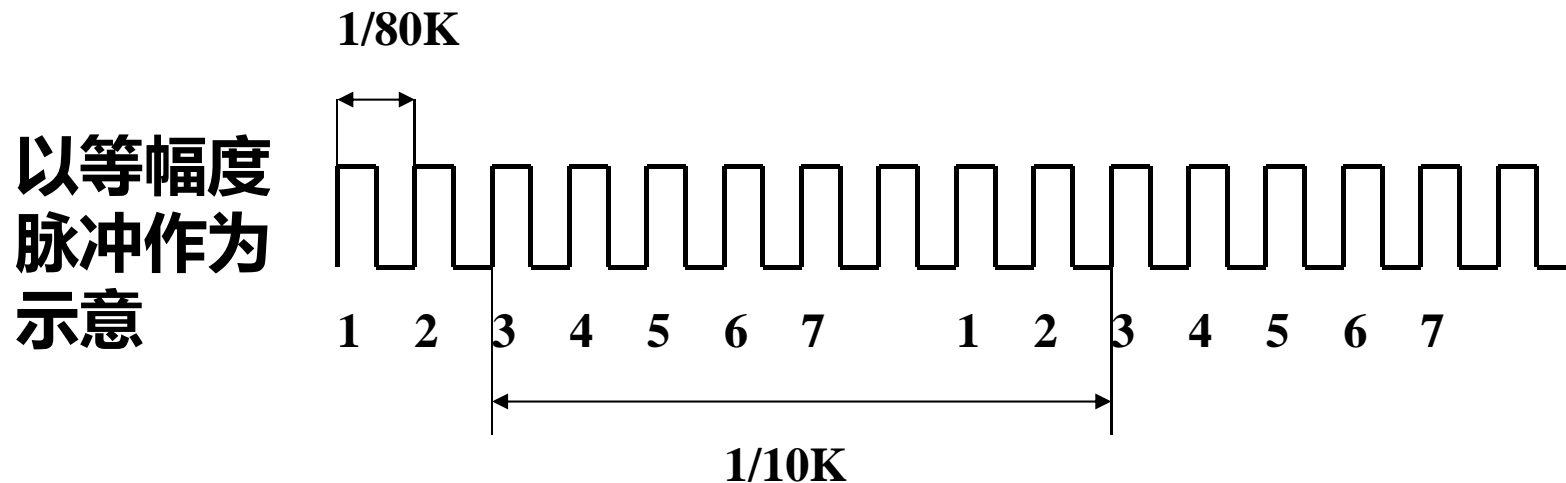
**例1** 试设计一个七路医学信号时分多路复用的系统，这七路信号的最大频率分别为：血流多普勒信号5 kHz；心电信号2 kHz；脑电信号1 kHz；血压、体温、呼吸和心率信号200 Hz。

**解：** 根据抽样定理，七路医学信号的最小抽样频率为：

血流多普勒信号10 kHz；心电信号4 kHz；

脑电信号2 kHz；血压、体温、呼吸和心率信号400 Hz

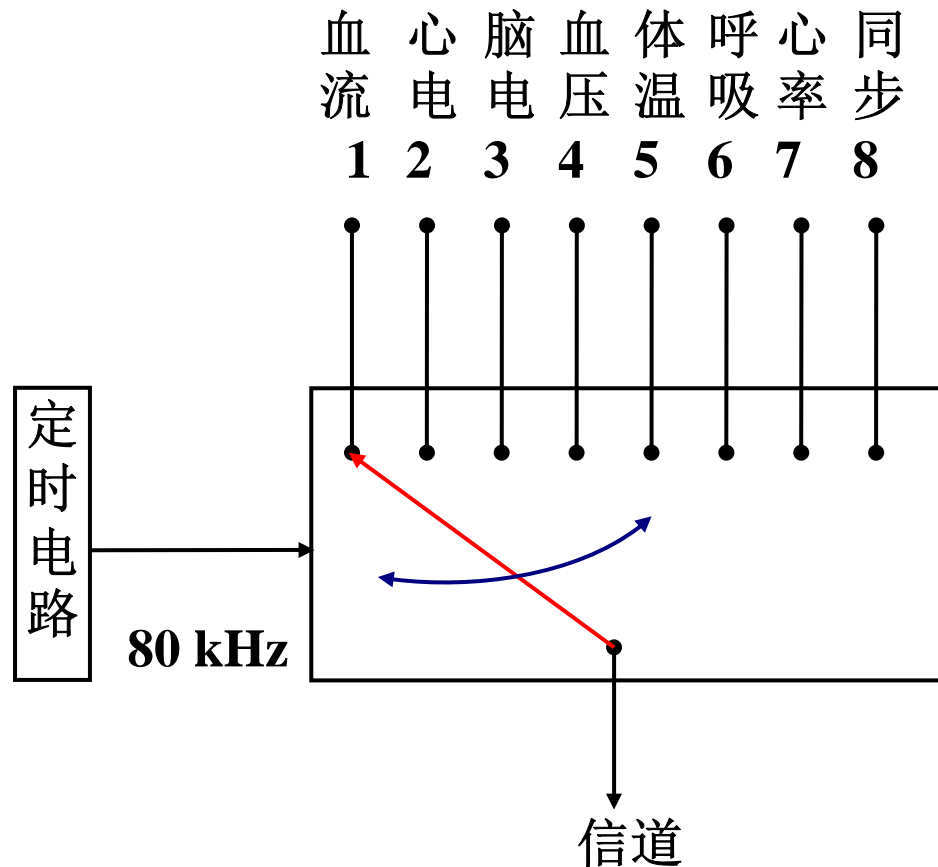
**方案一、8路复用(含1路同步)，每路抽样频率为10 kHz**



定时电路的切换频率为： $F_s = Nf_s = 8 \times 10 = 80 \text{ kHz}$

时分复用PAM信号的最小带宽为：

$$F_c = \frac{1}{2} Nf_s = \frac{1}{2} F_s = Nf_m = \frac{1}{2} \times 8 \times 10 = 40 \text{ kHz}$$



定时电路的切换时间  
(每路所占时间)称为  
一个**时隙**

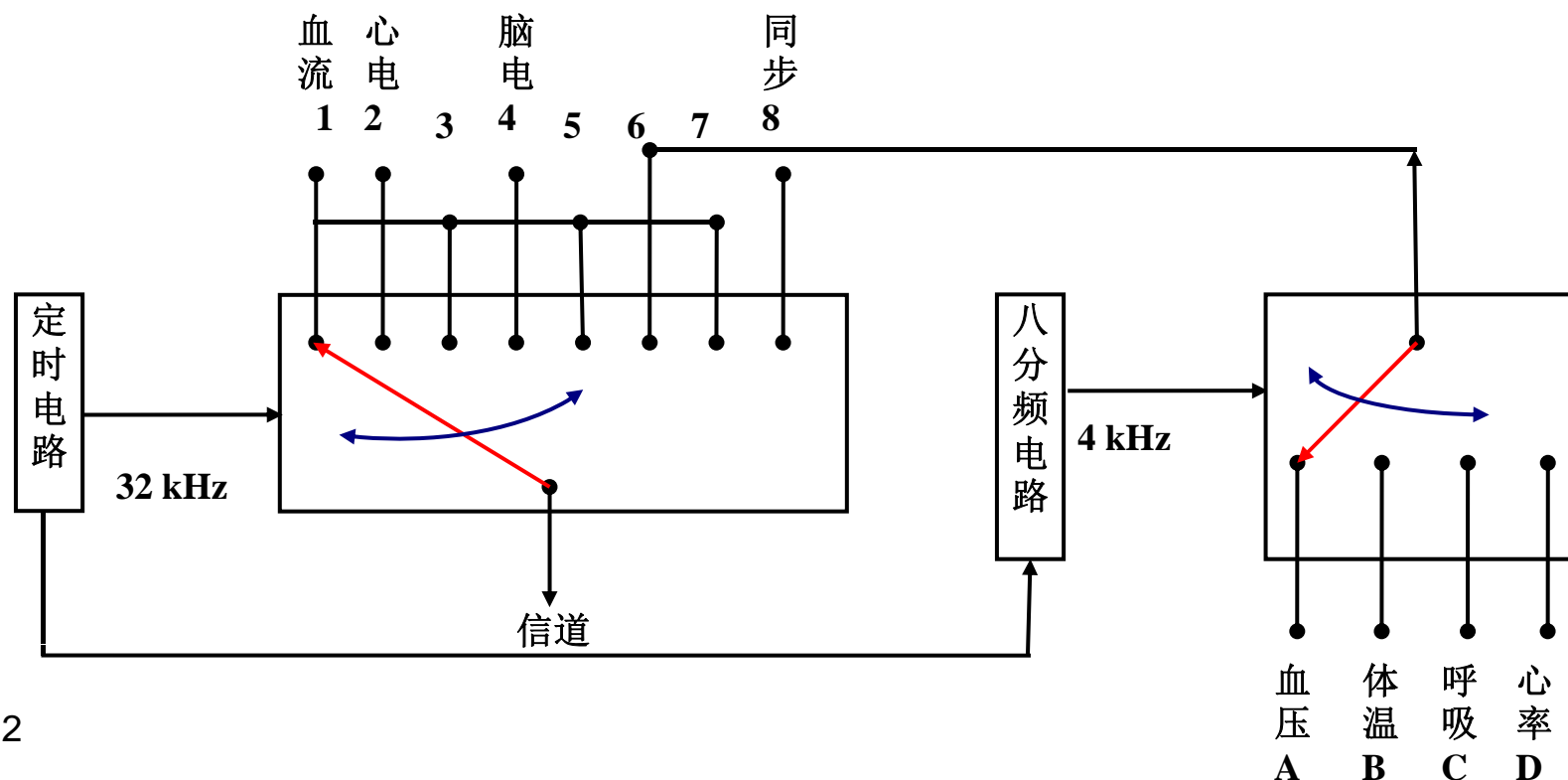
本方案中8个时隙的  
脉冲序列称为**一帧**

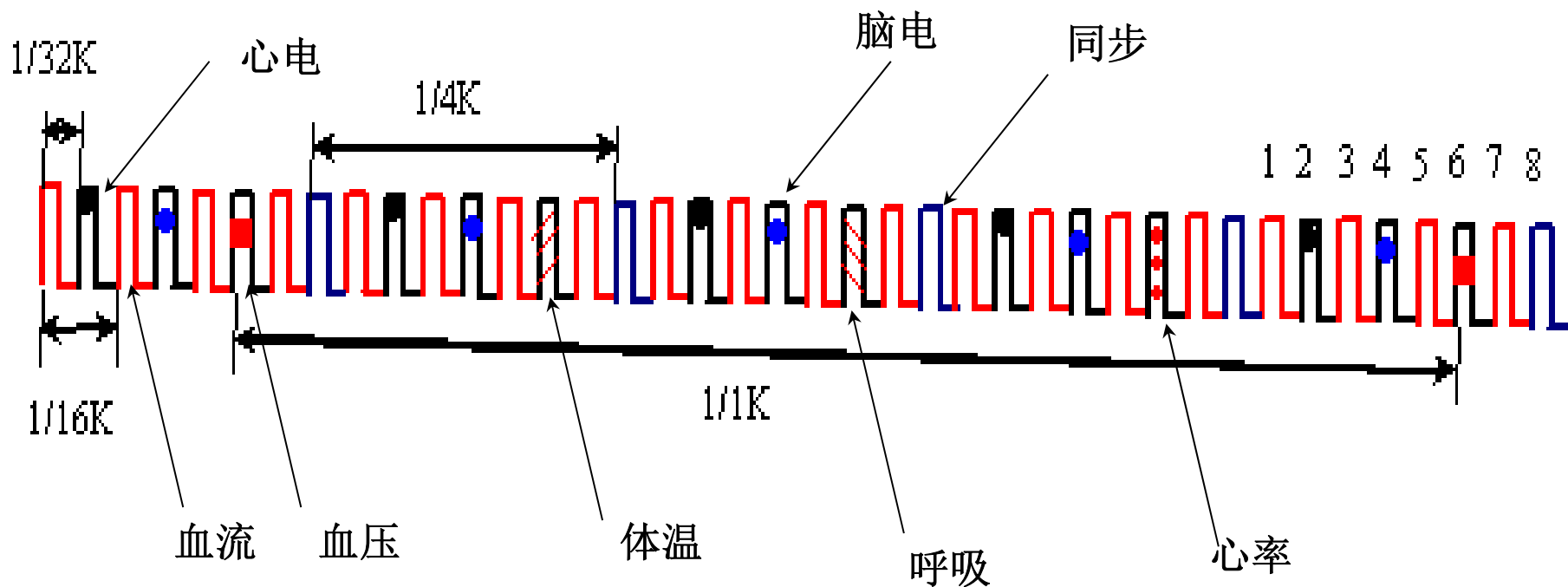
## 方案二、8路复用(含1路同步), 每路抽样频率为4 kHz

心电、脑电最小抽样频率不大于4 kHz, 各单独使用1路

血流最小抽样频率为10 kHz, 需使用 $2^2=4$ 路( $4 \times 4=16$  kHz)

剩余1路供血压、体温、呼吸和心率4路复用的信号使用, 每路抽样频率  $4/4=1$  kHz ( $> 400$  Hz, 满足要求)





**时分复用PAM信号的最小带宽为：**

$$F_c = \frac{1}{2} N f_s = \frac{1}{2} F_s = N f_m = \frac{1}{2} \times 8 \times 4 = 16 \text{ kHz}$$

**最小带宽比第一种方案的最小带宽40 kHz小得多**

## 几点说明

- 设计的方案可有多种，实现复杂度、最小带宽各不相同
- 设定电路切换时间为 $T$ ，则每个脉冲的宽度 $\tau$ 应满足： $\tau \leq T$

◆ 方案一：
$$\tau \leq T = \frac{1}{80 \text{ kHz}} = \frac{1}{80} \text{ ms}$$

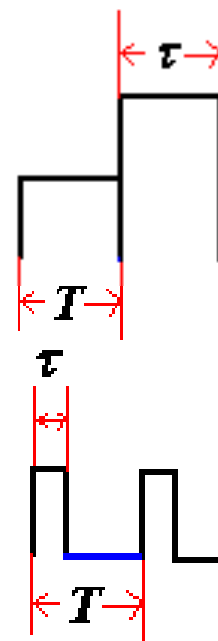
◆ 方案二：
$$\tau \leq T = \frac{1}{32 \text{ kHz}} = \frac{1}{32} \text{ ms}$$

◆ 若用全宽脉冲，则有： $\tau = T$

◆ 考虑邻路防护，则有： $\tau < T$

- 提法一、邻路防护为每路应占时间的 $1/a$ ，则有：

$$\frac{T - \tau}{T} = \frac{1}{a} \Rightarrow \tau = \frac{a - 1}{a} T$$



- 提法二、邻路防护为脉冲宽度的 $1/a$ ，则有：

$$\frac{T - \tau}{\tau} = \frac{1}{a} \Rightarrow \tau = \frac{a}{a+1} T$$

- 最小带宽时脉冲形状失真较严重
- 为使脉冲的时域波形尽量少失真，系统的带宽常取大一点
- 一种常用的取法：带宽取为脉冲宽度 $\tau$ 的倒数

◆ 方案一：

$$\tau \leq T = \frac{1}{80 \text{ kHz}} = \frac{1}{80} \text{ ms}$$

- 全宽脉冲： $\tau = T = \frac{1}{80} \text{ ms} \Rightarrow F_c = \frac{1}{\tau} = 80 \text{ kHz}$

- 邻路防护占每路信号的一半：

$$\tau = \frac{T}{2} = \frac{1}{160} \text{ ms} \Rightarrow F_c = \frac{1}{\tau} = 160 \text{ kHz}$$



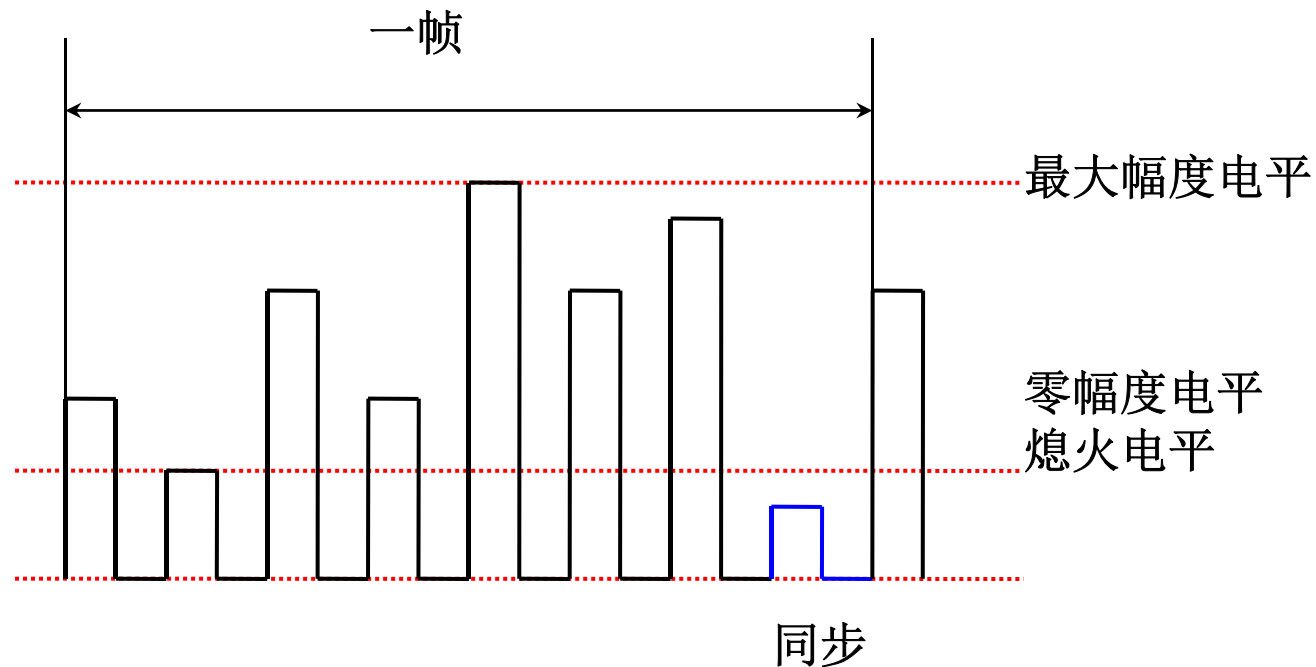
◆ **方案二：**  $\tau \leq T = \frac{1}{32 \text{ kHz}} = \frac{1}{32} \text{ ms}$

■ **全宽脉冲：**  $\tau = T = \frac{1}{32} \text{ ms} \Rightarrow F_c = \frac{1}{\tau} = 32 \text{ kHz}$

■ **邻路防护占每路信号的一半：**

$$\tau = \frac{T}{2} = \frac{1}{64} \text{ ms} \Rightarrow F_c = \frac{1}{\tau} = 64 \text{ kHz}$$

- **示意图中以相同的脉冲幅度为例，事实上PAM信号的脉冲幅度各不相同(零幅度~最大幅度)**
- **为提供同步电平，所有幅度的电平都取在一个阈值(称为**熄火电平**)以上**
- **熄火电平对应PAM信号的零幅度**
- **同步脉冲的幅度可小于熄火电平**



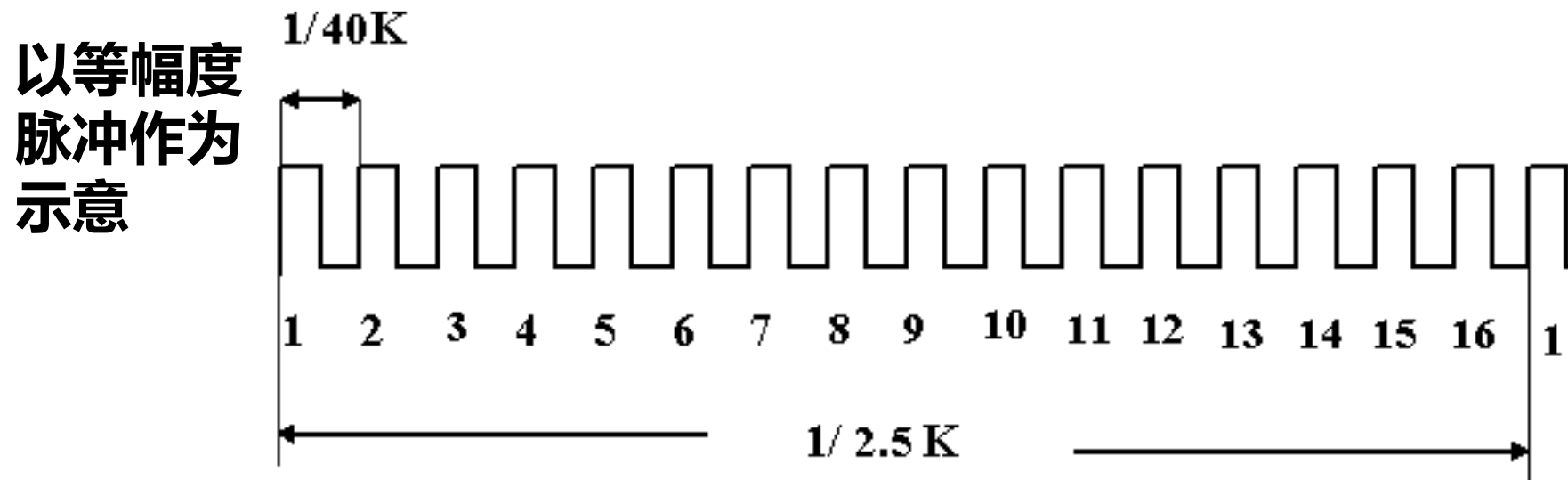
**例2** 试设计一个318路无线电遥测PAM信号的时分多路复用系统，信号最大频率为1 Hz ~ 2 kHz不等，具体如表所示：

信号路数	3	2	5	28	170	110
最大频率	2 kHz	1 kHz	100 Hz	25 Hz	5 Hz	1 Hz

**解：** 根据抽样定理，318路信号的最小抽样频率为：

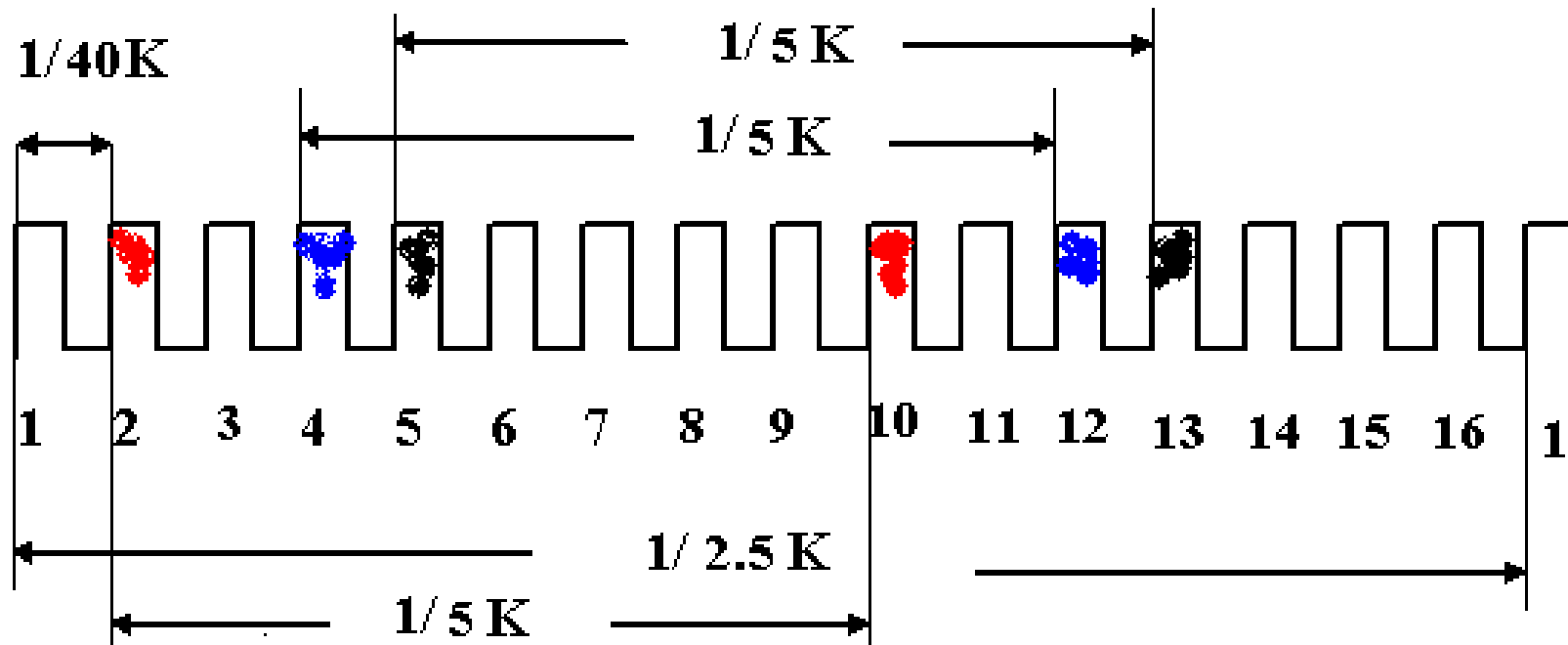
信号路数	3	2	5	28	170	110
最大频率	2 kHz	1 kHz	100 Hz	25 Hz	5 Hz	1 Hz
最小抽样频率	4 kHz	2 kHz	200 Hz	50 Hz	10 Hz	2 Hz

**实现方案：** 16路复用，每路抽样频率为2.5 kHz



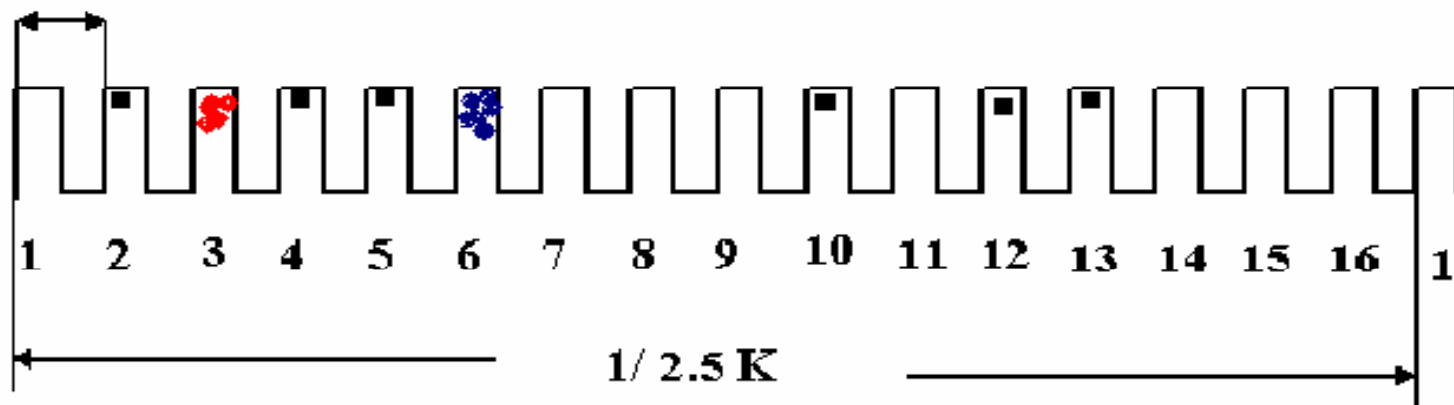
**对3路最大频率为2 kHz信号，抽样频率取为5 kHz(各需2个时隙)**

这3路信号分别用第2和10、4和12、5和13时隙：

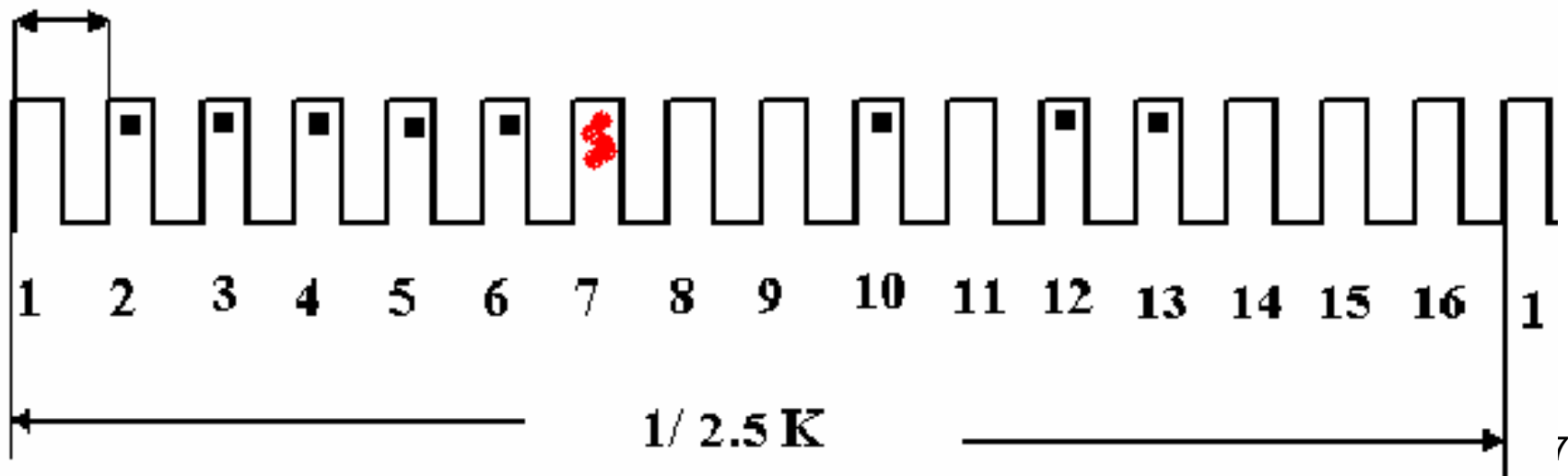
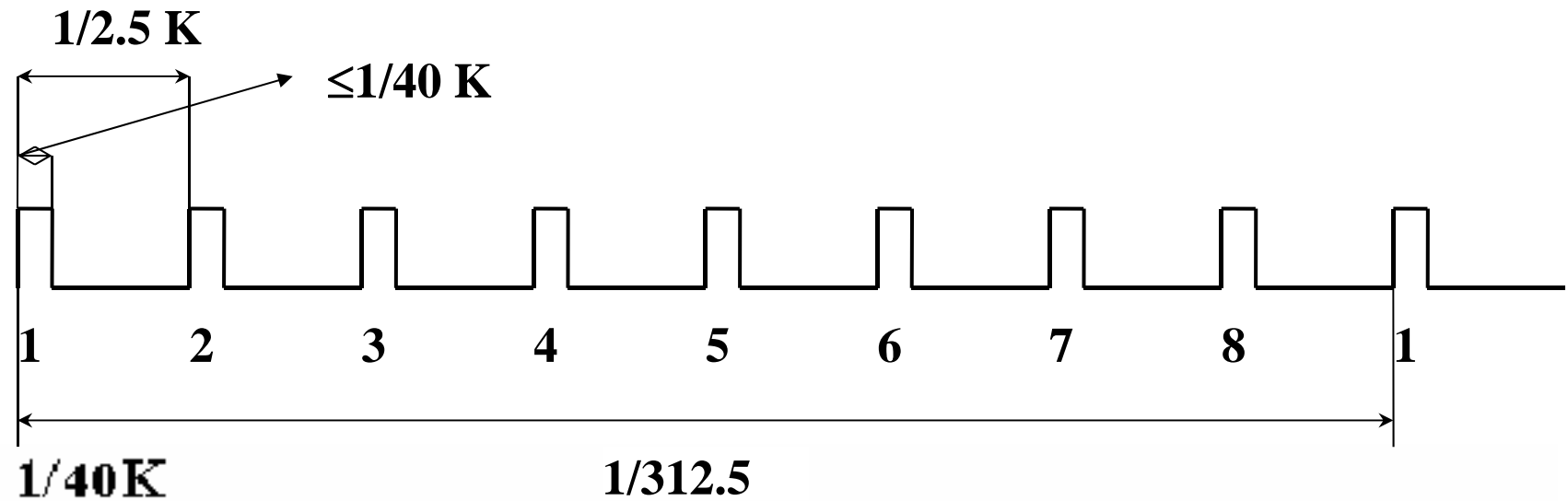


2路最大频率为1 kHz的信号分别用第3、6时隙：

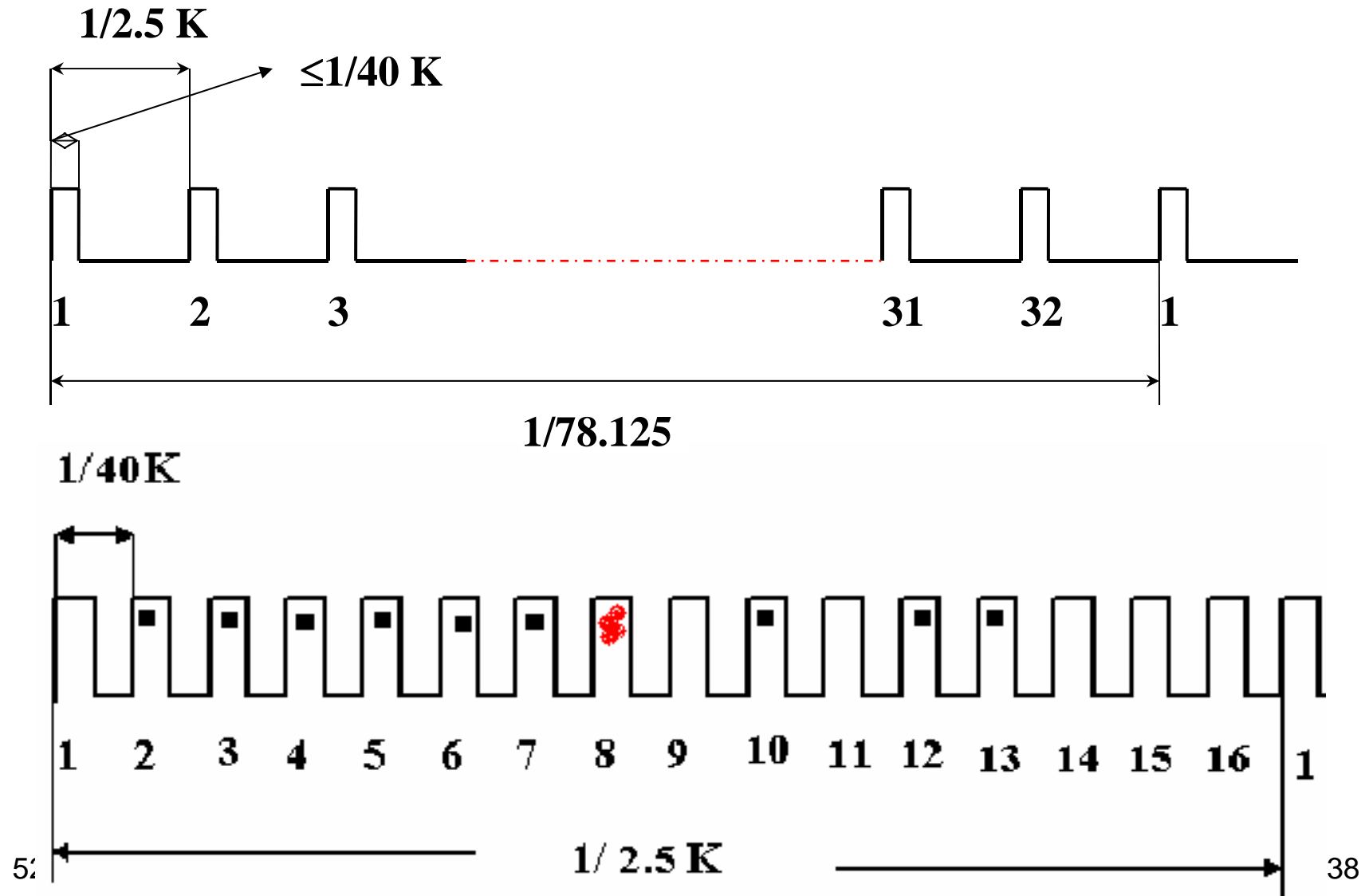
1/40K



5路最大频率为100 Hz的信号先进行8路(6、7备用；8同步)时分多路复用，复用后的信号用第7时隙：

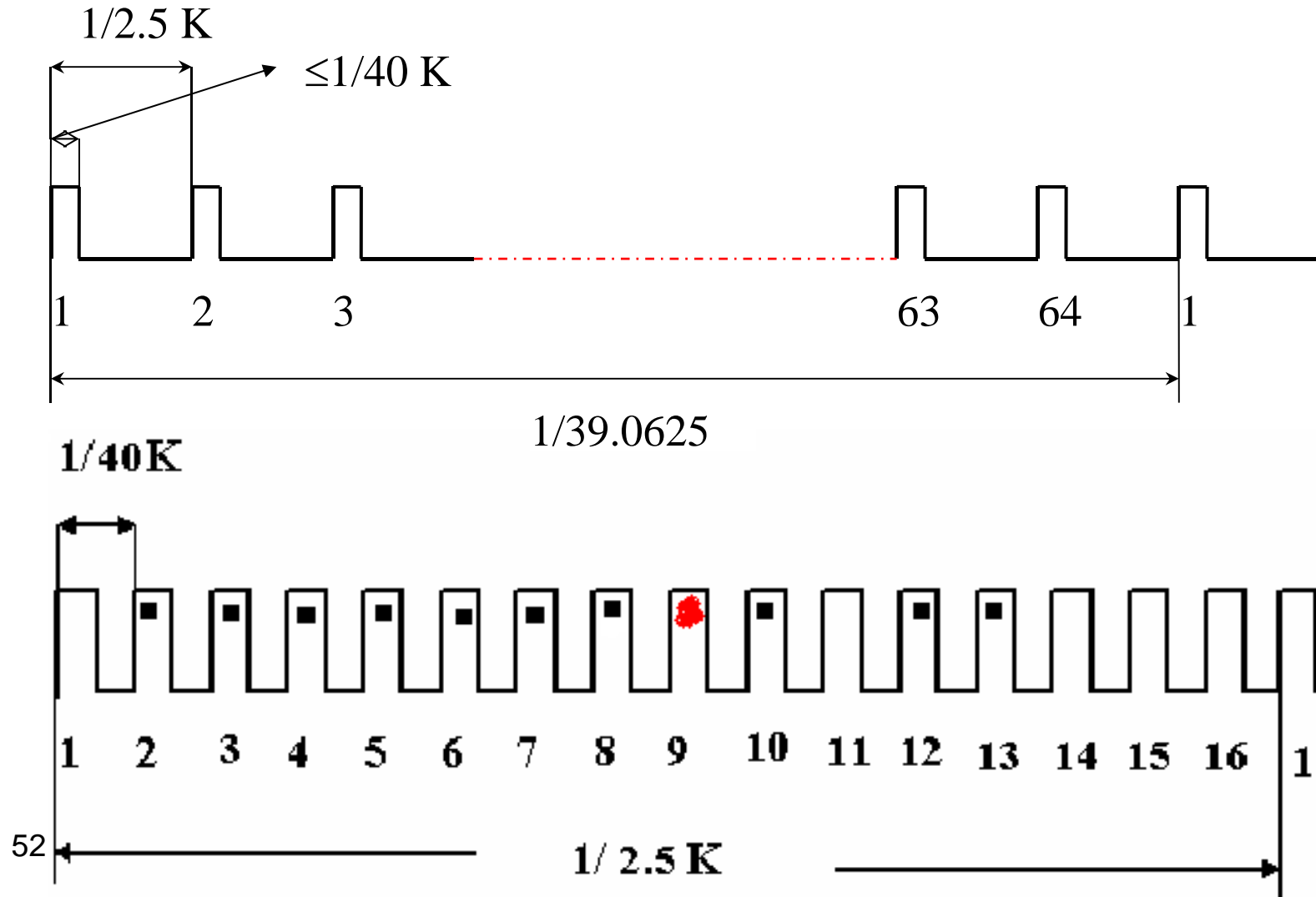


28路最大频率为25 Hz的信号先进行32路(29~31备用；32同步)时分多路复用，复用后的信号用第8时隙：



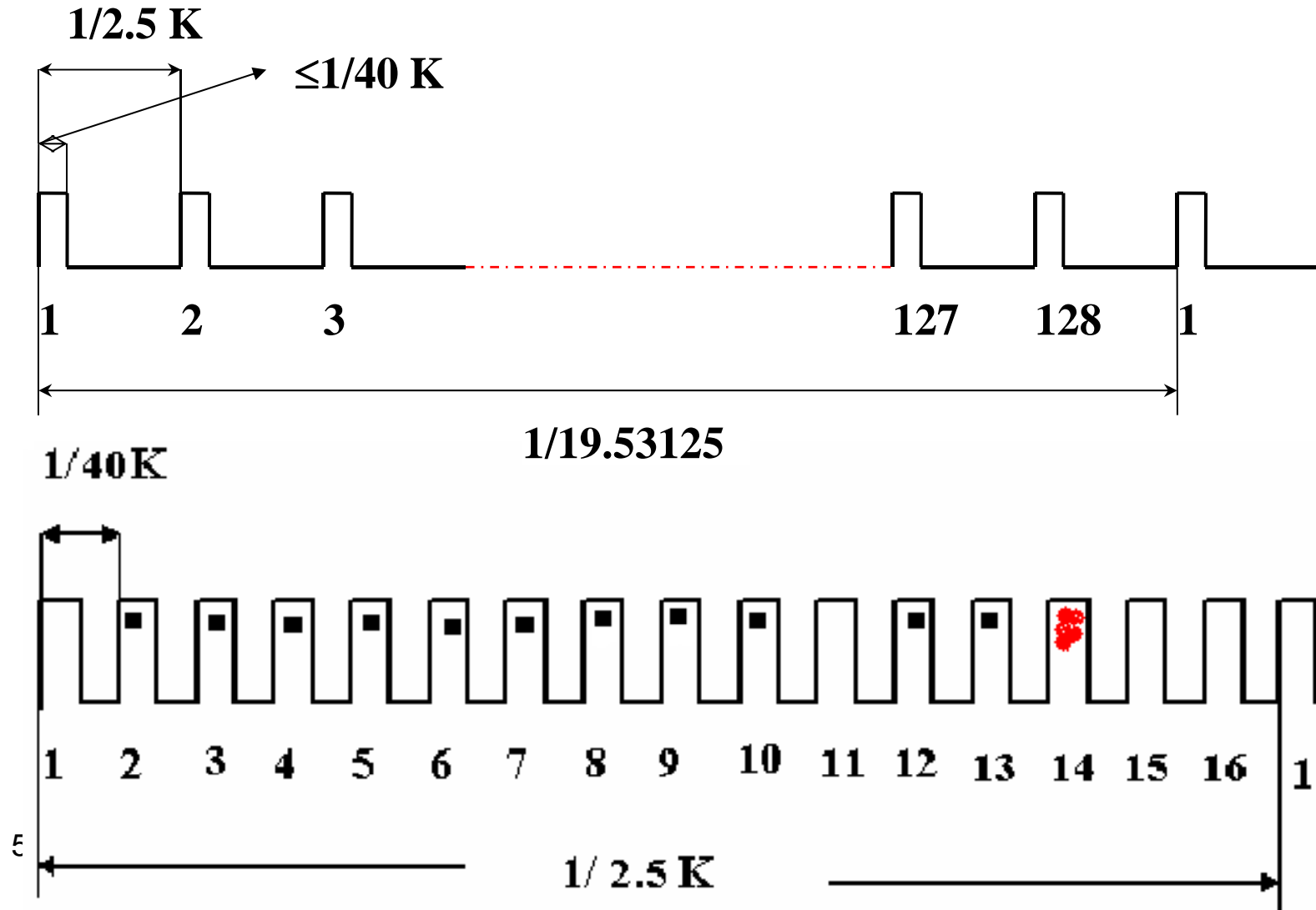
170路最大频率为5 Hz的信号分成两部分：

- ◆ 55路信号先进行64路(56~63备用；64同步)时分多路复用，复用后的信号用第9时隙：



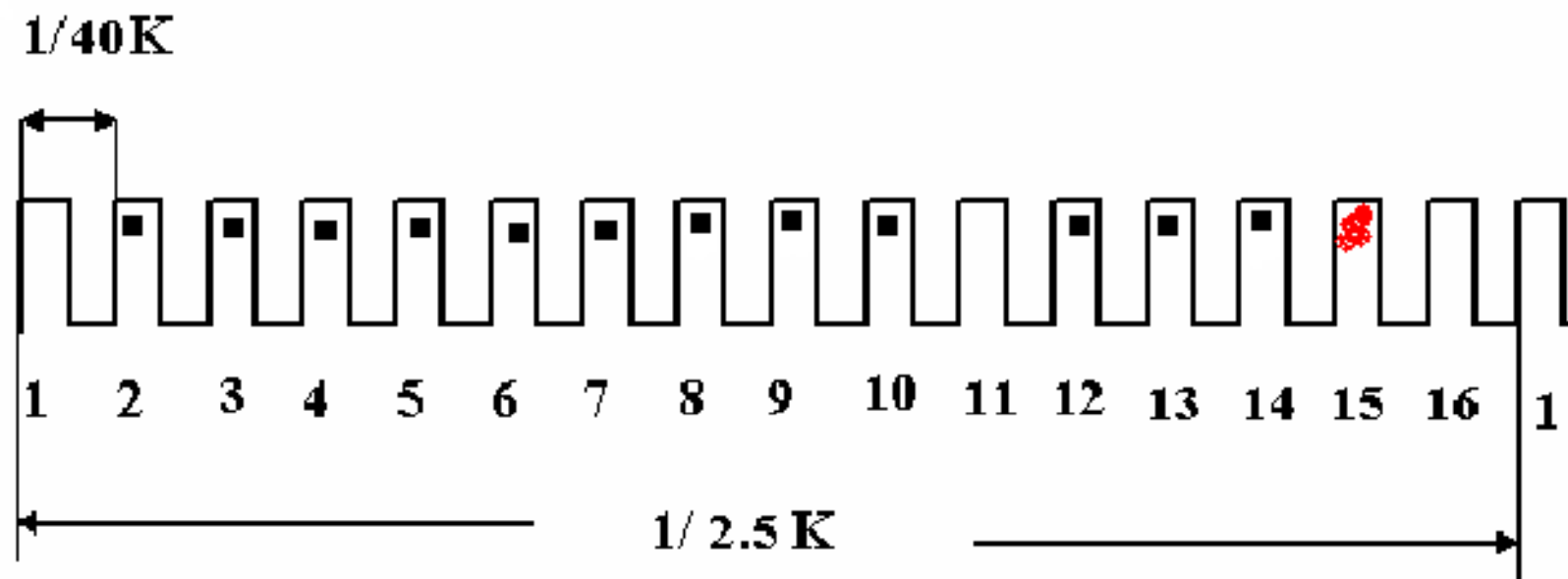
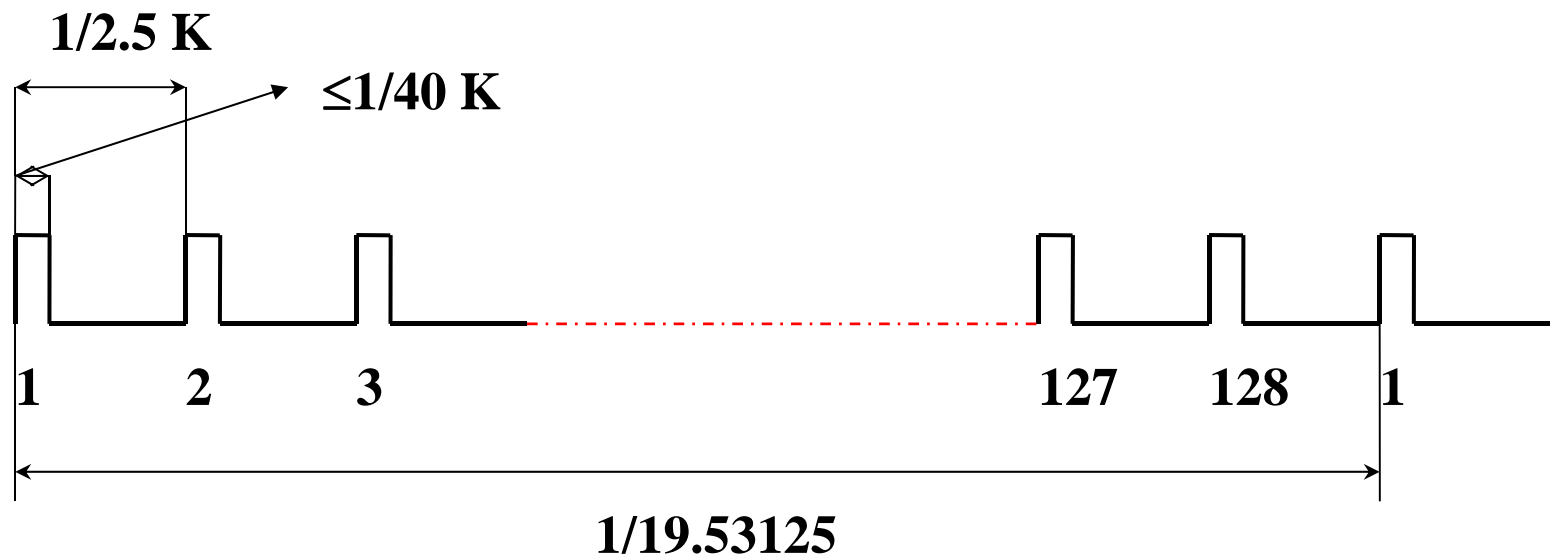
170路最大频率为5 Hz的信号分成两部分：

- ◆ 其余115路信号先进行128路(116~127备用；128同步)时分多路复用，复用后的信号用第14时隙：



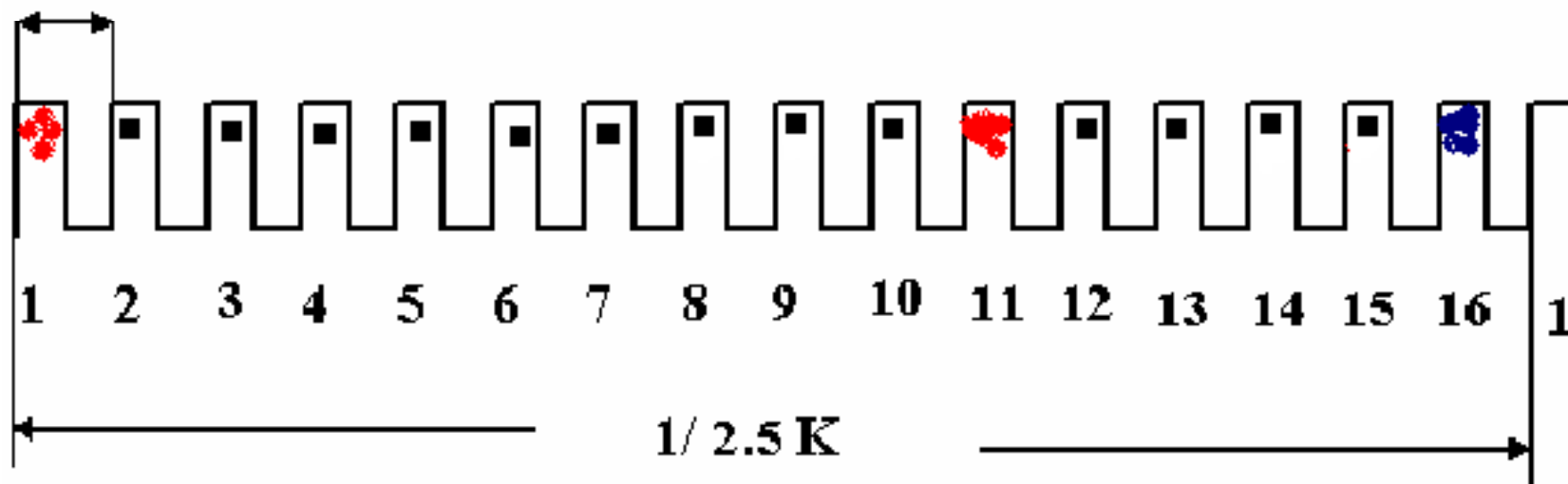


110路最大频率为1 Hz的信号先进行128路(111~127备用；128同步)时分多路复用，复用后的信号用第15时隙：



**同步：第1、 11时隙；备用：第16时隙**

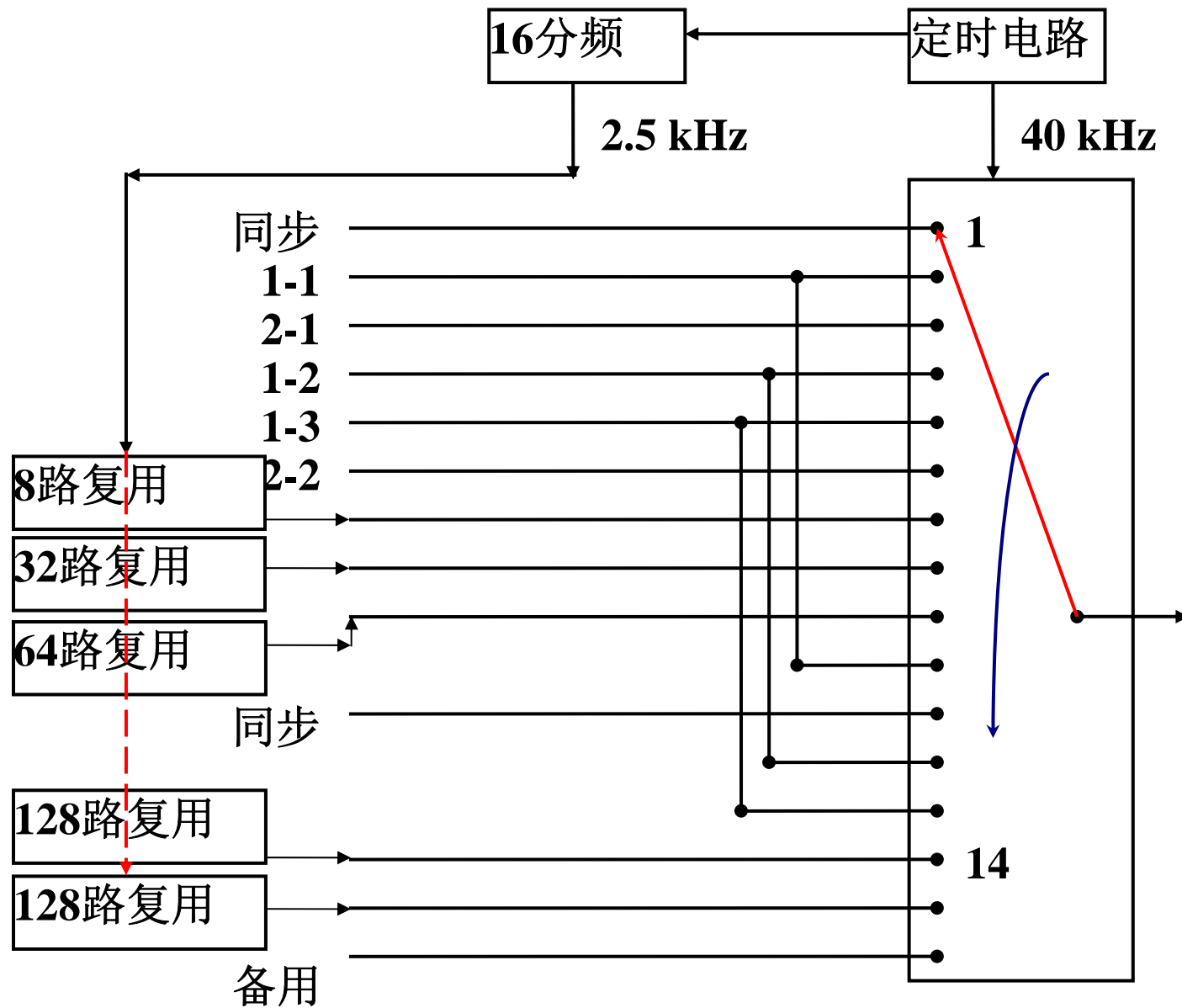
1/40K



**时分复用PAM信号的最小带宽为：**

$$F_c = \frac{1}{2} N f_s = \frac{1}{2} F_s = \frac{1}{2} \times 16 \times 2.5 = 20 \text{ kHz}$$

# 发送端实现框图

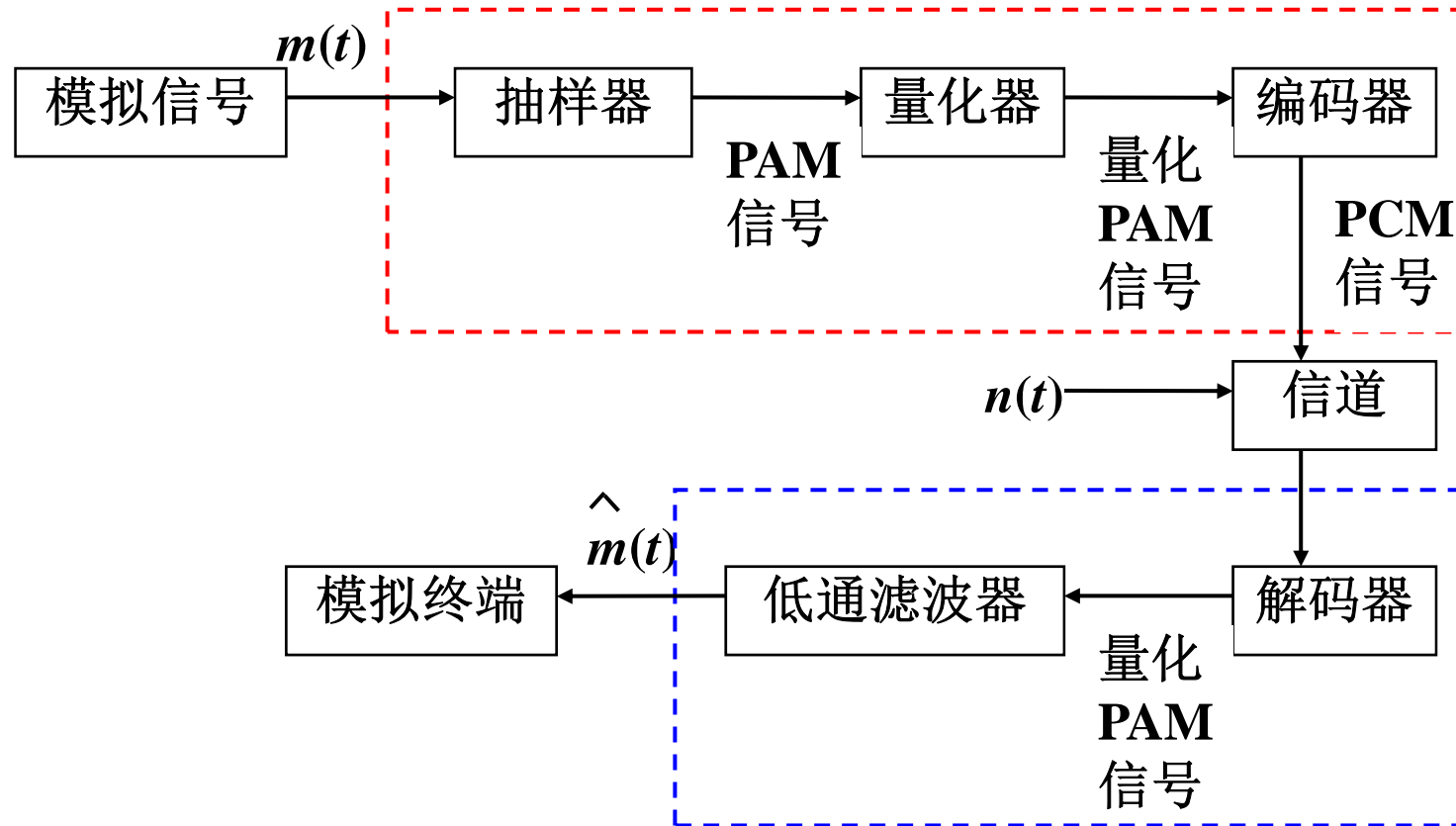


## § 3.3 脉冲编码调制(PCM)

- **脉冲编码调制(Pulse Code Modulation , PCM)简称脉码调制**
- **PCM是一种将模拟信号转换为数字信号的编码形式**
- **1937年法国工程师Alec Reeres最早提出**
- **1946年美国Bell实验室出现第一台PCM数字电话终端机**
- **1962年晶体管PCM终端机大量应用于市话网局间中继线，使市话电缆传输电话路数扩大24~30倍**
- **70年代后期，超大规模集成电路PCM编解码器出现，PCM广泛应用于光纤通信、数字微波通信、卫星通信**

### 一、线性PCM编码

- **PCM系统的发送端主要包括：抽样、量化与编码三个过程**



- **抽样、量化和编码可以由模数转换器A/D一次完成**
- **接收端，PCM信号由数模转换器D/A恢复出原来的模拟信号**
- **抽样：连续时间信号→离散时间(幅度连续)的抽样信号**
- **量化：离散时间(幅度连续)的抽样信号→数字信号**

- 编码：将数字信号用一个二进制或多进制码组来表示
- 最常用的是**二进制码元**
  - ◆  $n$ 位二进制码元有 $M=2^n$ 种不同的组合
  - ◆ 一种组合能成为一个码字
  - ◆ 不同码字表示不同电平
  - ◆  $n$ 位二进制码元可表示 $2^n$ 种不同的电平
  - ◆  $2^n$ 个码字和 $2^n$ 个电平的对应关系有不同方式(不同码组)

### 1、自然二进制码(**Natural Binary Code, NBC**)

- 最普通的二进制编码
- 从低位算起，第 $i$ 位码的权重为： $q_i=2^{i-1}$
- $n$ 位NBC码组成的码字记为： $a_{n-1} a_{n-2} \dots a_1 a_0$
- 对应的权重分别为： $2^{n-1} 2^{n-2} \dots 2^1 2^0$
- 码字对应的量化电平为：

$$V = a_{n-1} 2^{n-1} + a_{n-2} 2^{n-2} + \dots + a_1 2^1 + a_0 2^0 = \sum_{i=0}^{n-1} a_i 2^i$$

## 2、折叠二进制码(**Folded Binary Code, FBC**)

- 由自然二进制码演变而来
- 除最高位外，其余各位在上半部(对双极性信号相当于正极性部分)与NBC相同，下半部(相当于负极性部分)是上半部的对折而成；上、下半部的最高位分别为1、0
- FBC表示双极性信号很方便，可用最高位表示信号正负；其余位表示信号的绝对值
- 常用的A/D转换器用FBC
- 相对NBC的优点：传输中若出现误码，对小信号的影响较小；因小信号幅度的出现概率大，FBC引起的误码失真的误差功率相对NBC要小

## 3、格雷二进制码(**Gray/Reflected Binary Code, RBC**)

- RBC的特点：任何相邻电平的码元只有1位不同

## $n=4$ 码字与电平的对应关系

极性	电平 序号	NBC	FBC	RBC
		$a_3a_2a_1a_0$	$a_3a_2a_1a_0$	$a_3a_2a_1a_0$
正极性	15	<b>1111</b>	<b>1111</b>	1000
	14	1110	1110	1001
	13	1101	1101	1011
	12	1100	1100	1010
	11	1011	1011	1110
	10	1010	1010	1111
	9	1001	1001	1101
	8	<b>1000</b>	<b>1000</b>	1100
负极性	7	<b>0111</b>	<b>0000</b>	0100
	6	0110	0001	0101
	5	0101	0010	0111
	4	0100	0011	0110
	3	0011	0100	0010
	2	0010	0101	0011
	1	0001	0110	0001
	0	<b>0000</b>	<b>0111</b>	0000

大信号1位误码，如1111  
→0111，NBC误差为8个  
量化级，FBC为15个量化  
级

小信号1位误码，如1000  
→0000，NBC误差仍为8  
个量化级，FBC只有1个  
量化级

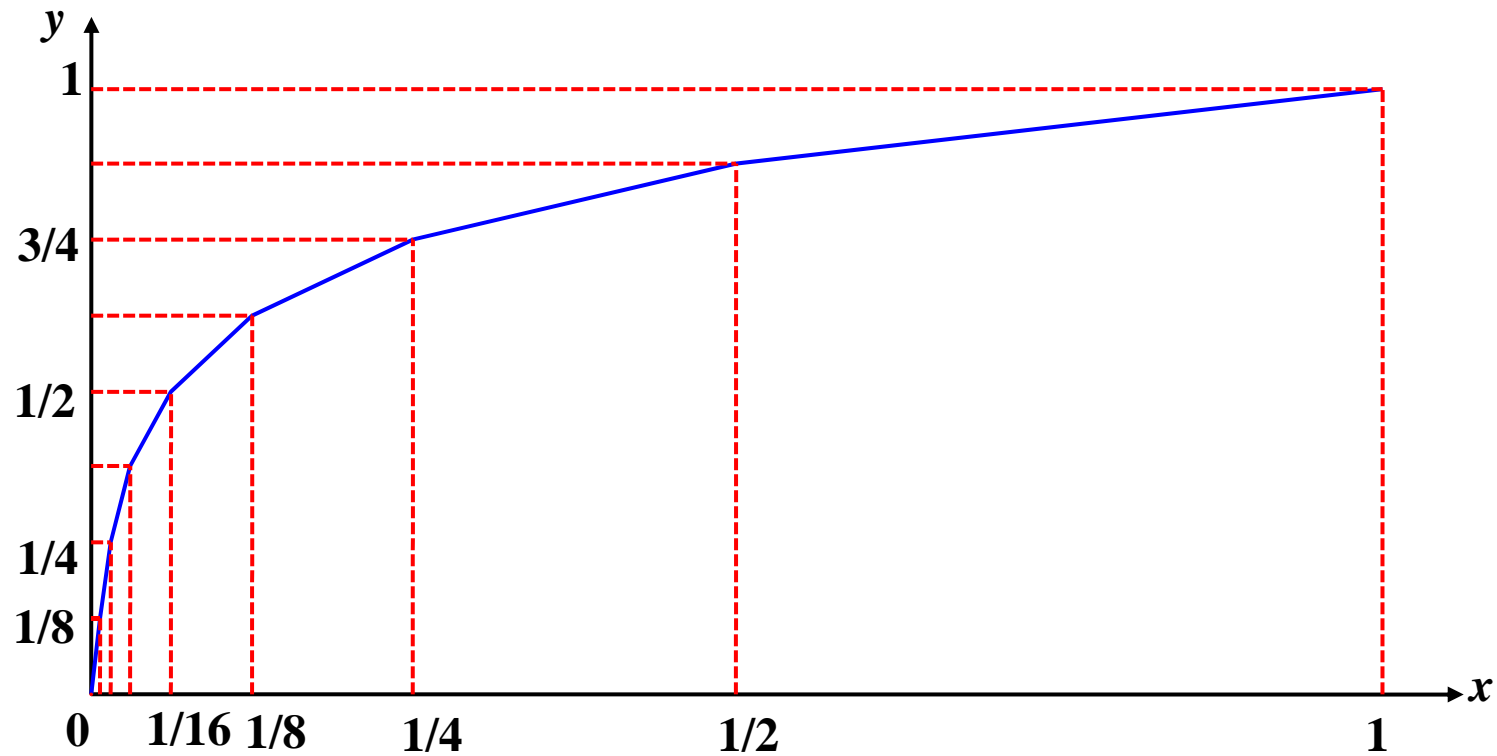
统计角度，FBC产生的失  
真误差功率小



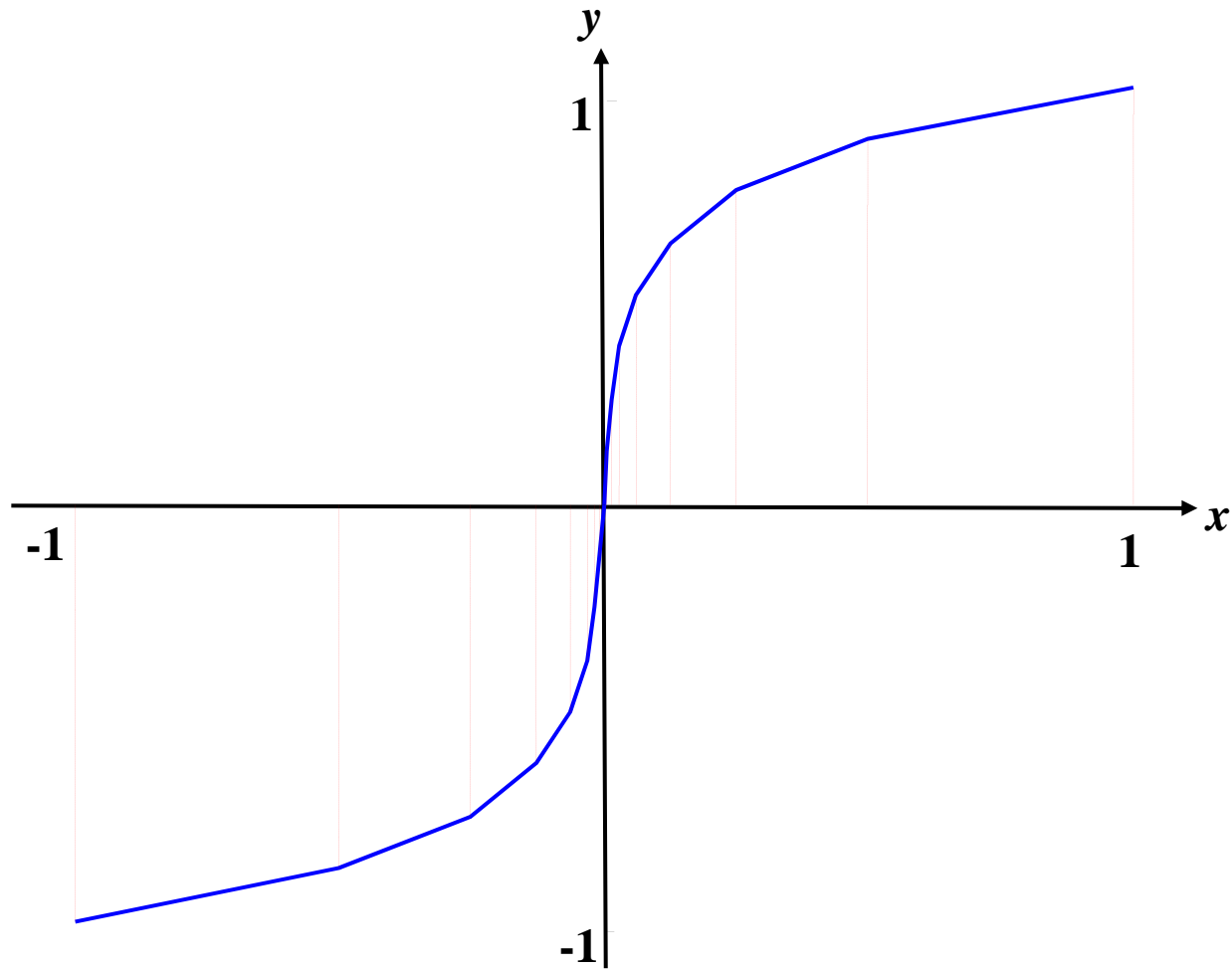
- **PCM系统的优点：**
  - ◆ **脉冲幅度不再连续变化(包含信息)，抗噪声性能好**
  - ◆ **可以加密，增强通信的保密性**
  - ◆ **可与计算机直接连接**

## 二、非线性PCM编码

- **为保证量化信噪比和信号输入动态范围，可采用先非均匀量化再编码的方式：非线性编码**
- **非线性编码的实现方法：模拟压扩编码、数字压扩编码、直接非线性编码等**
- **以A律A87.6/13折线编码为例说明12位线性PCM码如何通过数字压缩技术变为8位码**
  - ◆ **先对x轴的输入信号归一化，取值范围按1/2递减规律分为8段，分段点依次为 $1/2, 1/4, \dots, 1/128$**
  - ◆ **再对y轴的压缩输出归一化，取值范围均匀分为8段**
  - ◆ **将x轴和y轴相应分段的交点连接起来，得到8段斜线**



- **第一、二段的斜率为：**  $(1/8) \div (1/128) = 16$
- **其余6段斜率依次减小(8, 4, 2, 1, 1/2, 1/4)**
- **正向：7段不同斜率的折线**



- 负向7段折线与正向奇对称
- 正向的第一、二段和负向的第一、二段斜率相同，可连成一条线→13段折线

- 13段折线近似A律的压缩特性

- A律小信号的压缩斜率为：

$$f'(x \rightarrow 0) = \frac{A}{1 + \ln A}$$

- 13段折线第一段折线的斜率为16

$$\frac{A}{1 + \ln A} = 16 \Rightarrow A = 87.6$$

- 称为**A87.6/13段折线压缩特性**

段号		1	2	3	4	5	6	7	8
x	0	1/128	1/64	1/32	1/16	1/8	1/4	1/2	1
y(13折线)	0	1/8	2/8	3/8	4/8	5/8	6/8	7/8	8/8
y(A=87.6)	0	1/8	210/876	321/876	432/876	543/876	654/876	765/876	1