

# 第九章 多路复用和多址技术

## 9.1 概述

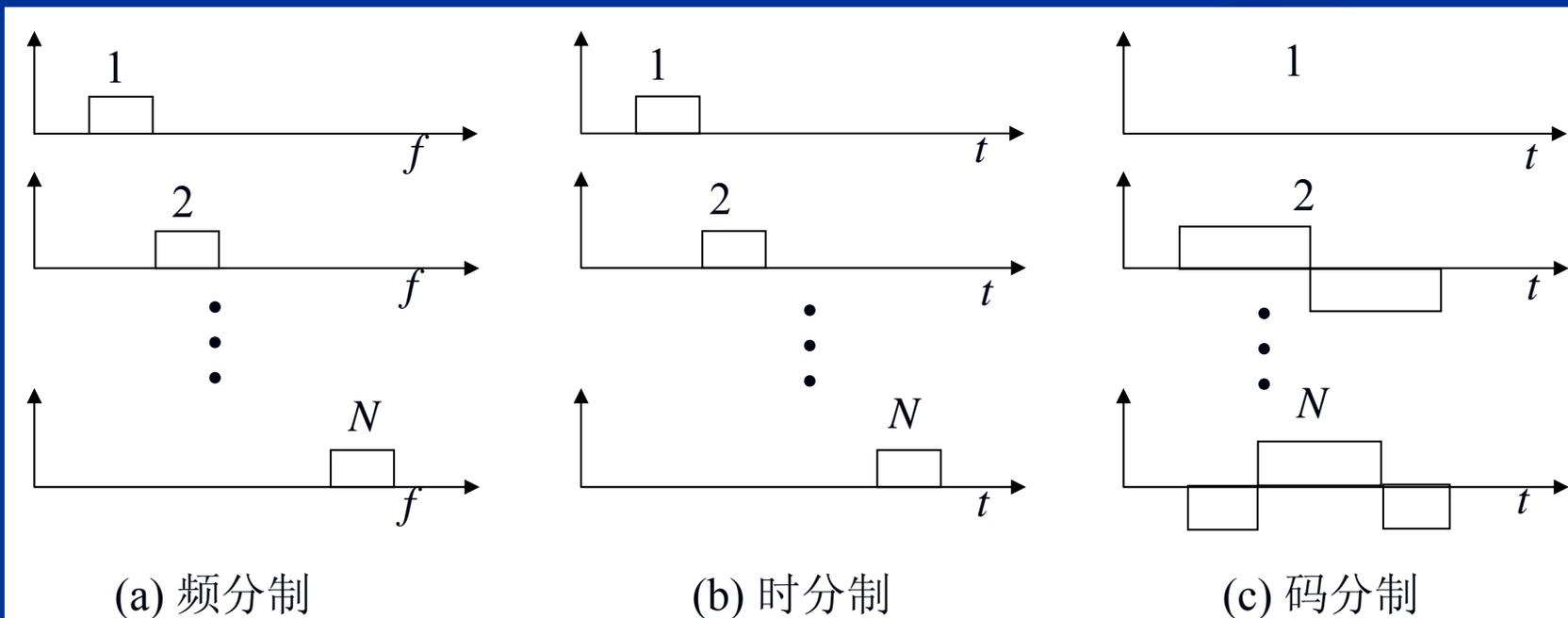
### ➤ 多路复用

- 目的：在一条链路上传输多路独立信号

- 基本原理：正交划分方法

- 3种多路复用基本方法：

频分复用（FDM）、时分复用（TDM）、码分复用（CDM）



## ■ 3种多路复用新方法：

空分复用(SDW)、极化复用(PDW)、波分复用(WDM)

### ➤ 复接

■ 目的：解决来自若干条链路的多路信号的合并和区分。

■ 关键技术问题 — 多路TDM信号时钟的统一和定时问题。

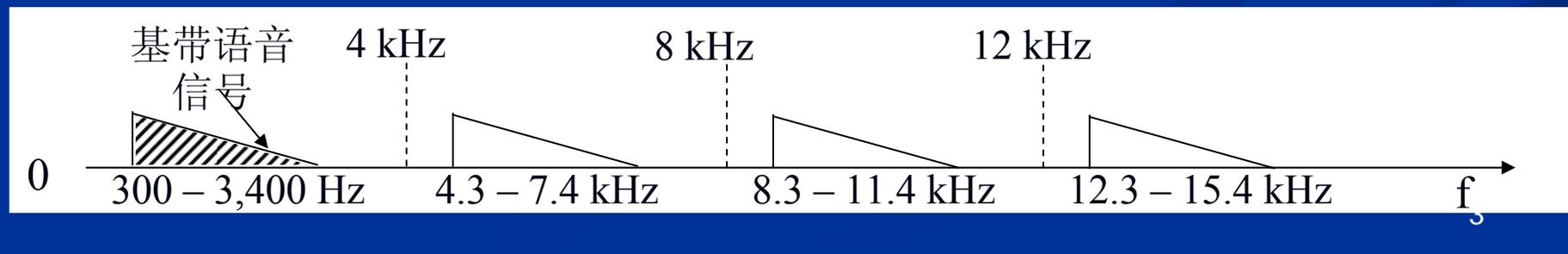
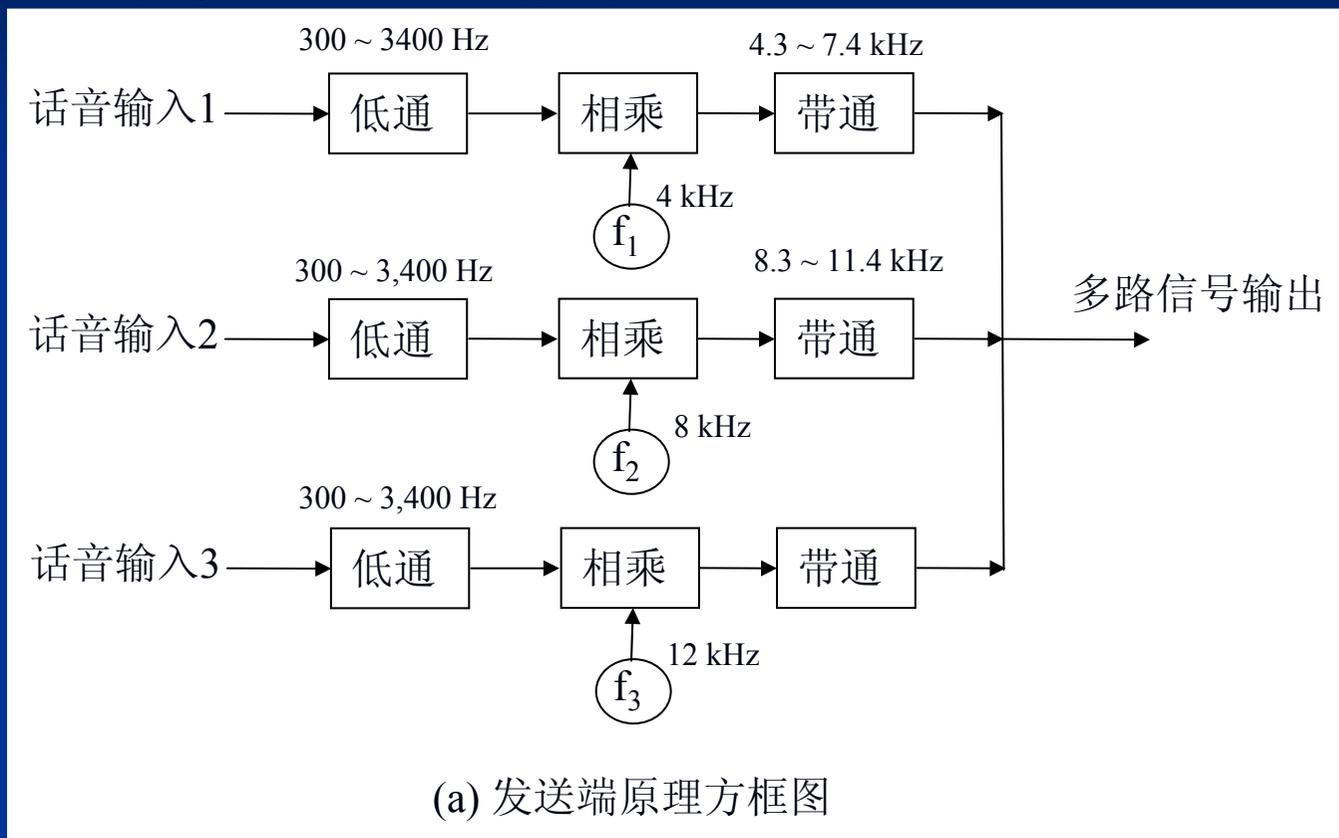
### ➤ 多址接入

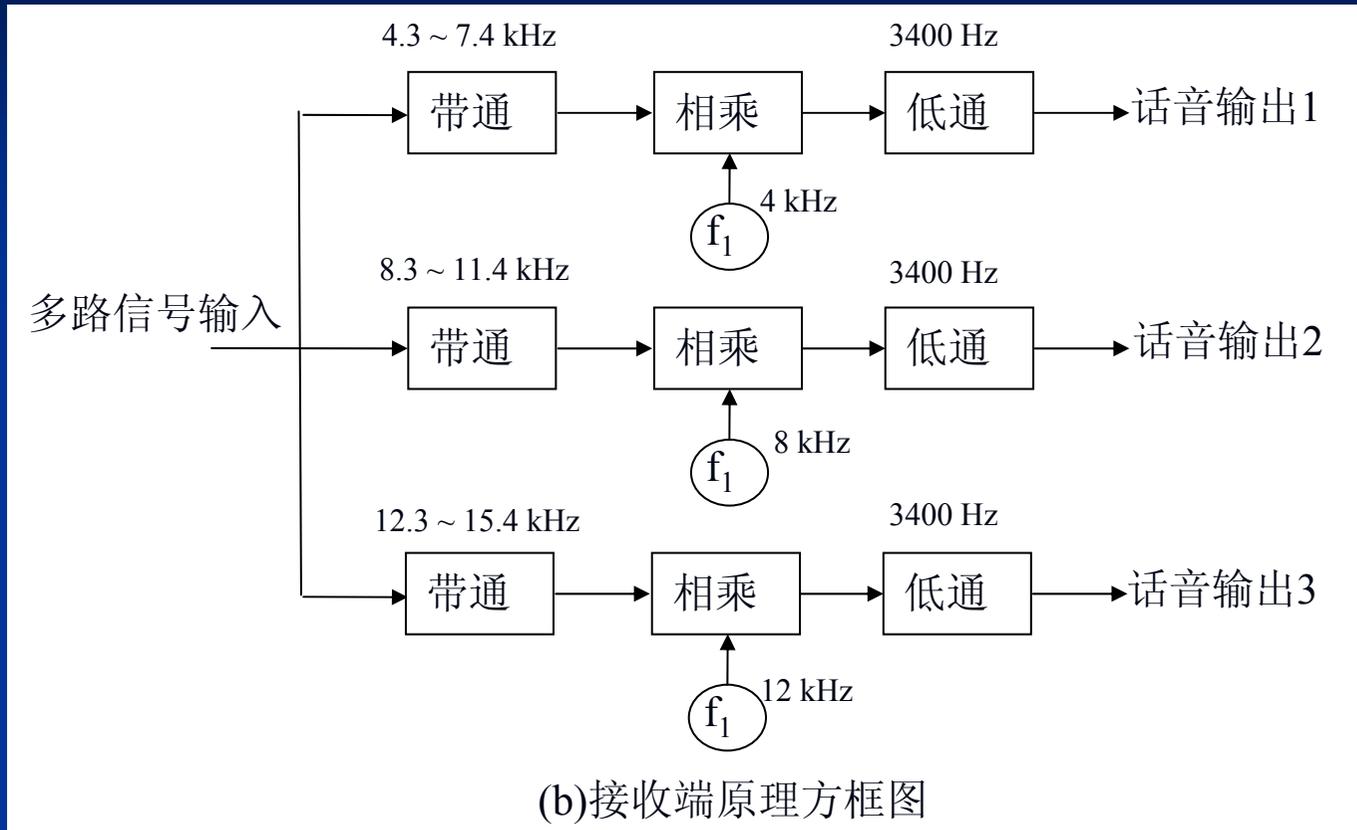
■ 目的：多个用户共享信道、动态分配网络资源。

■ 方法：频分多址、时分多址、码分多址、空分多址、极化多址以及其他利用信号统计特性复用的多址技术等。

## 9.2 频分复用(FDM)

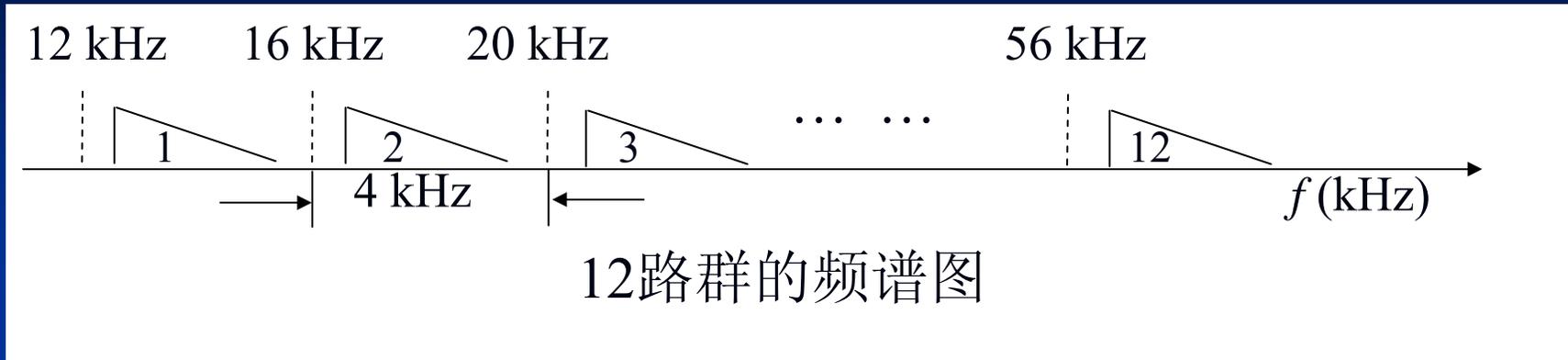
- 方法：采用SSB调制搬移频谱，以节省频带。
- 3路频分复用电话通信系统原理





➤ 国际电信联盟(ITU)建议:

- 基群 — 12路, 占用48 kHz带宽, 位于12 ~ 60kHz之间;



- 超群 — 60路, 由5个基群组成, 占用240 kHz的带宽;

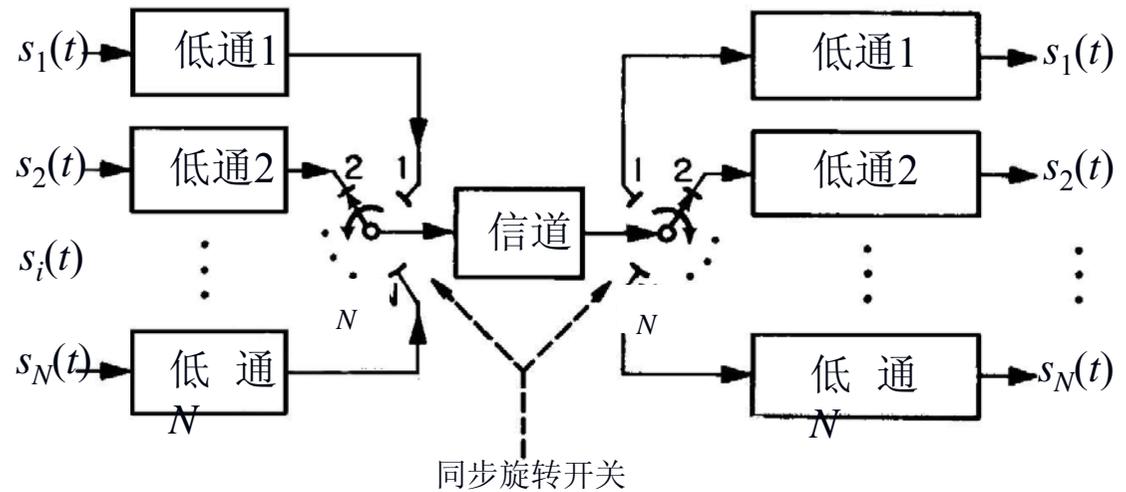
- 主群 — 600路, 由10个超群组成。

➤ 频分复用的主要缺点:

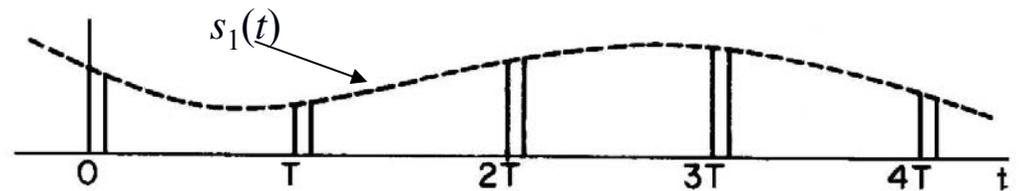
- 要求系统的非线性失真很小, 否则将因非线性失真而产生各路信号间的互相干扰;
- 用硬件实现时, 设备的生产技术较为复杂, 特别是滤波器的制作和调试较繁难;
- 成本较高。

# 9.3 时分复用(TDM)

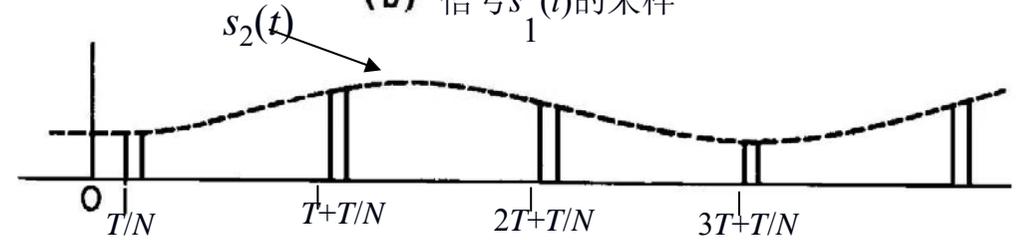
➤ 基本原理：见右图



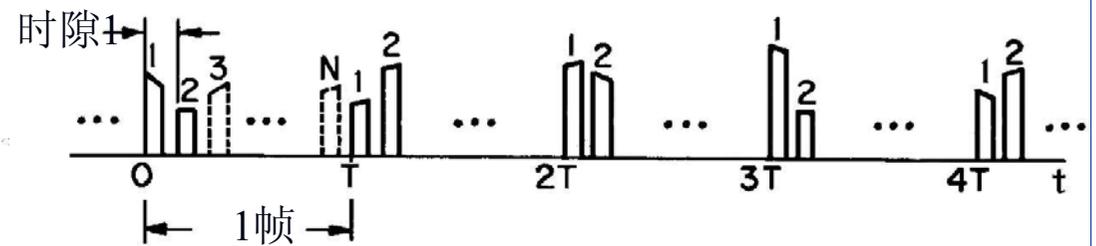
(a) 时分多路复用原理



(b) 信号  $s_1(t)$  的采样



(c) 信号  $s_2(t)$  的采样



(d) 旋转开关采集到的信号

- 基本条件：
  - 各路信号必须组成为帧。
  - 一帧应分为若干时隙。
  - 在帧结构中必须有帧同步码。
  - 当各路信号不是用同一时钟抽样时，必须容许各路输入信号的抽样速率（时钟）有少许误差。
- 主要优点：
  - 便于信号的数字化和实现数字通信。
  - 制造调试较易，更适合采用集成电路实现。
  - 生产成本较低，具有价格优势。
- 国际电信联盟(ITU)建议：
  - 准同步数字体系PDH
  - 同步数字体系 SDH

## 9.3.1 准同步数字体系(PDH)

|         | 层次    | 比特率 (Mb/s)   | 路数 (路× 64kb/s) |
|---------|-------|--------------|----------------|
| E<br>体系 | E - 1 | 2.048        | 30             |
|         | E - 2 | 8.448        | 120            |
|         | E - 3 | 34.368       | 480            |
|         | E - 4 | 139.264      | 1920           |
|         | E - 5 | 565.148      | 7680           |
| T<br>体系 | T - 1 | 1.544        | 24             |
|         | T - 2 | 6.312        | 96             |
|         | T - 3 | 32.064 (日本)  | 480            |
|         |       | 44.736 (北美)  | 672            |
|         | T - 4 | 97.728 (日本)  | 1440           |
|         |       | 274.176 (北美) | 4032           |
|         | T - 5 | 397.200 (日本) | 5760           |
|         |       | 560.160 (北美) | 8064           |

**E体系:**

我国大陆、  
欧洲采用。

**T体系:**

美国、日本  
等地采用。

## ➤ E体系结构图

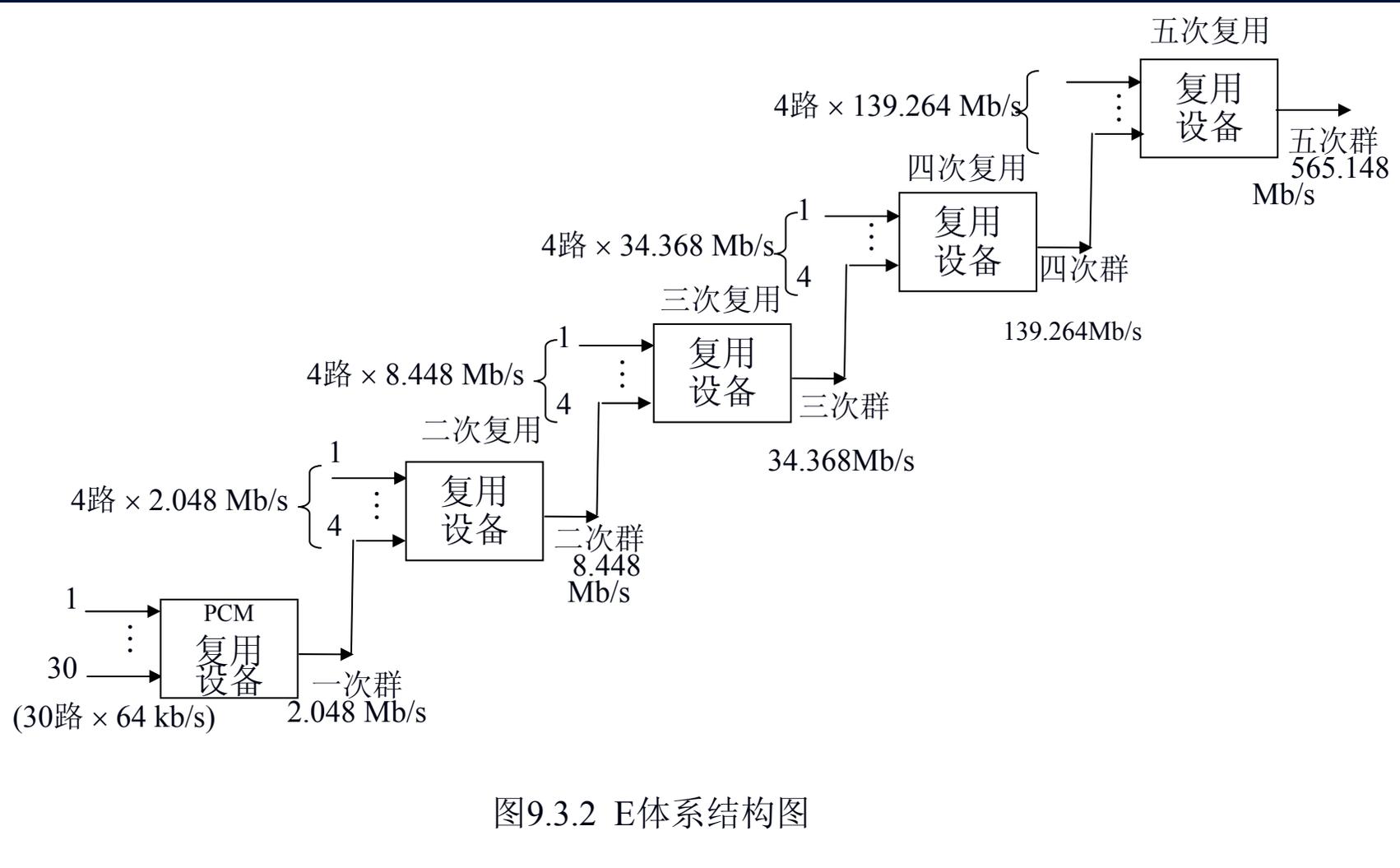
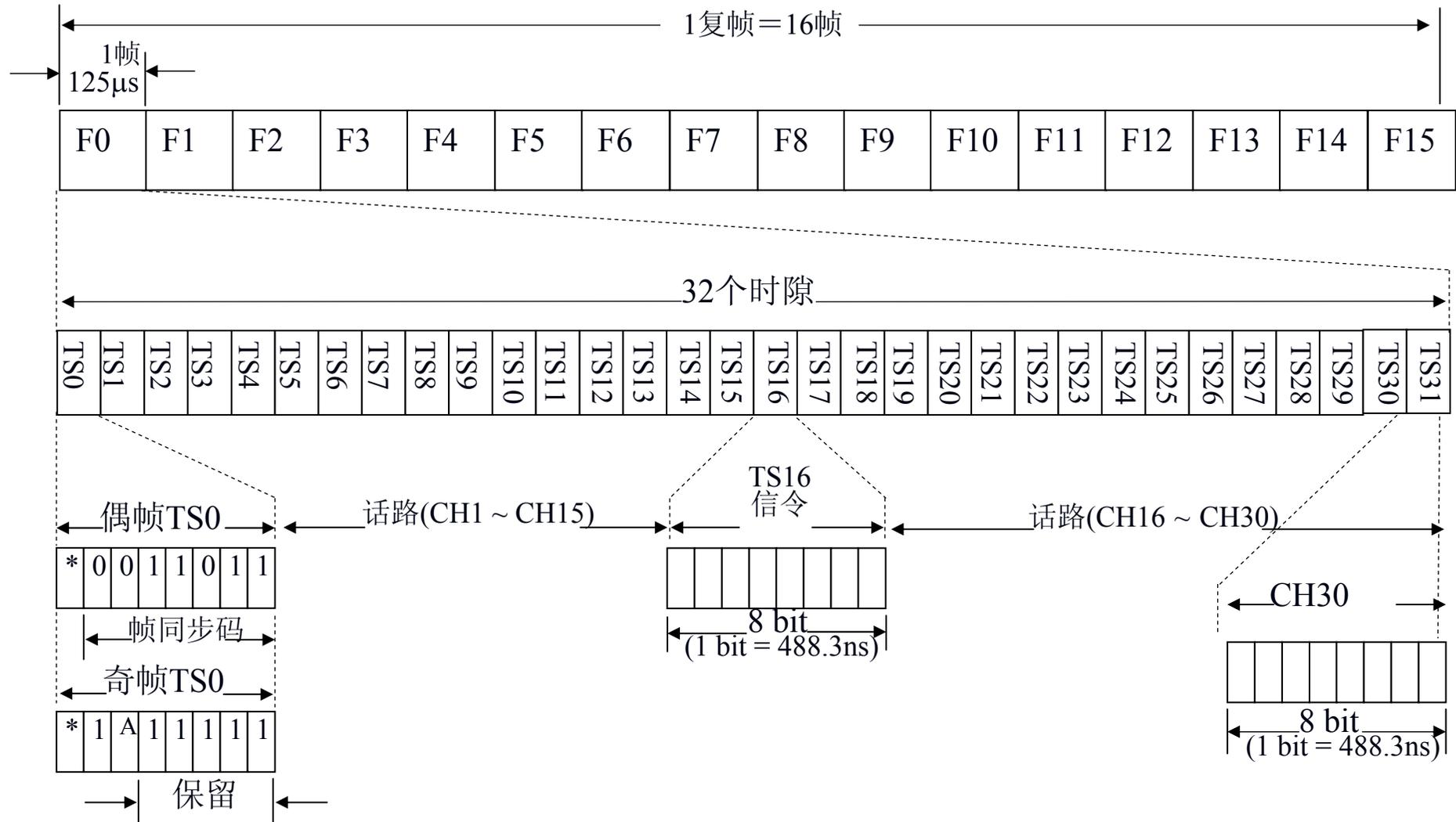


图9.3.2 E体系结构图

# ➤ PCM 一次群的帧结构:



➤ 随路信令:

| 帧   | 比特   |   |   |   |      |   |   |   |
|-----|------|---|---|---|------|---|---|---|
|     | 1    | 2 | 3 | 4 | 5    | 6 | 7 | 8 |
| F0  | 0    | 0 | 0 | 0 | x    | y | x | X |
| F1  | CH1  |   |   |   | CH16 |   |   |   |
| F2  | CH2  |   |   |   | CH17 |   |   |   |
| F3  | CH3  |   |   |   | CH18 |   |   |   |
| ... | ...  |   |   |   | ...  |   |   |   |
| ... | ...  |   |   |   | ...  |   |   |   |
| F15 | CH15 |   |   |   | CH30 |   |   |   |

## 9.3.2 复接与码速调整

### ➤ 复接

- 目的：解决来自若干条链路的多路信号的合并和区分。
- 将低次群合并成高次群的过程称为复接；反之，将高次群分解为低次群的过程称为分接。
- 关键技术问题 — 多路TDM信号时钟的统一和定时问题。

### ➤ 码速调整

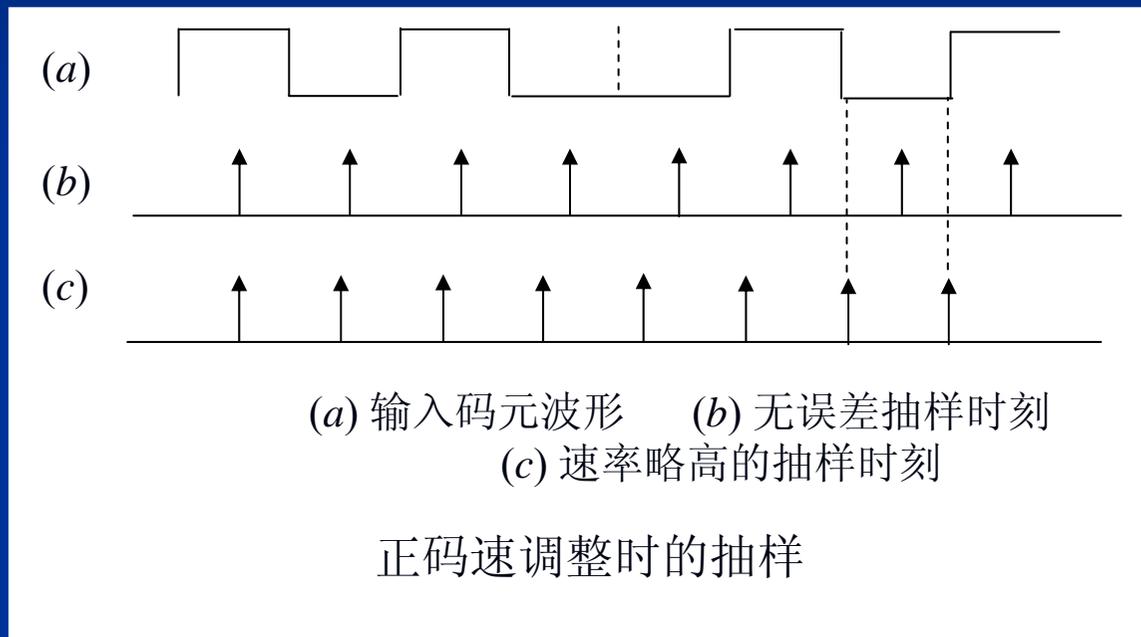
- 低次群合成高次群时，需要将低次群信号的时钟调整一致，再作合并。
- 为此，要增加一些开销。

例如，一次群的速率是2.048Mb/s，4路一次群的总速率应该是8.192Mb/s，但是实际上二次群的速率是8.448 Mb/s，这额外的256kb/s中就包括码速调整所需的开销。

- 码速调整的方案：有多种  
正码速调整、负码速调整、正/负码速调整、...

➤ 正码速调整法:

- 原理: 复接设备对各路输入信号抽样时, 抽样速率比各路码元速率略高。出现重复抽样的情况时, 需减少一次抽样, 或将所抽样值舍去。

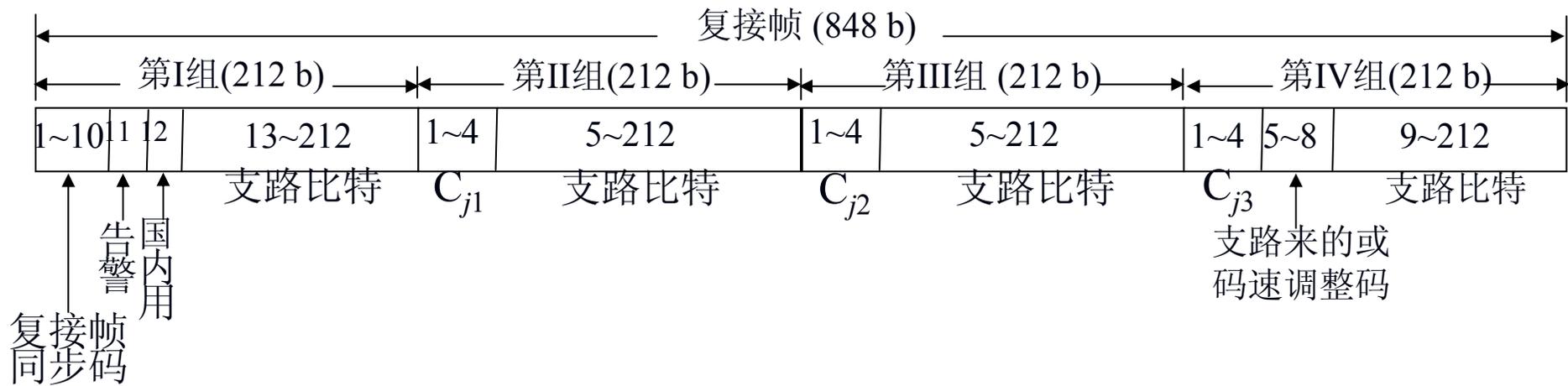


## ■ ITU建议的 8.448Mb/s二次群的复接帧结构

|   |   |
|---|---|
| 支路比特率(kb/s)   | 2048  |
| 支路数   | 4   |
| 帧结构   | 比特数   |
| 帧同步码 (1111010000)<br>向远端数字复用设备送告警信号<br>为国内通信保留<br>自支路来的比特 | 第I组<br>第1至10 b<br>第11 b<br>第12 b<br>第13至212 b |
| 码速调整控制比特 $C_{j1}$ (见注)<br>自支路来的比特                         | 第II组<br>第1至4 b<br>第5至212 b                    |
| 码速调整控制比特 $C_{j2}$ (见注)<br>自支路来的比特                         | 第III组<br>第1至4 b<br>第5至212 b                   |
| 码速调整控制比 $C_{j3}$ (见注)<br>用于码速调整的比特<br>自支路来的比特             | 第IV组<br>第1至4 b<br>第5至8 b<br>第9至212 b          |
| 帧长<br>每支路比特数<br>每支路最大码速调整速率<br>标称码速调整比                    | 848 b<br>206 b<br>10 kb/s<br>0.424            |

注： $C_{ji}$ 表示第 $j$ 支路的第 $i$ 个码速调整控制比特。

## 复接帧结构图



### 9.3.3 同步数字体系(SDH)

#### ➤ SDH的体系结构

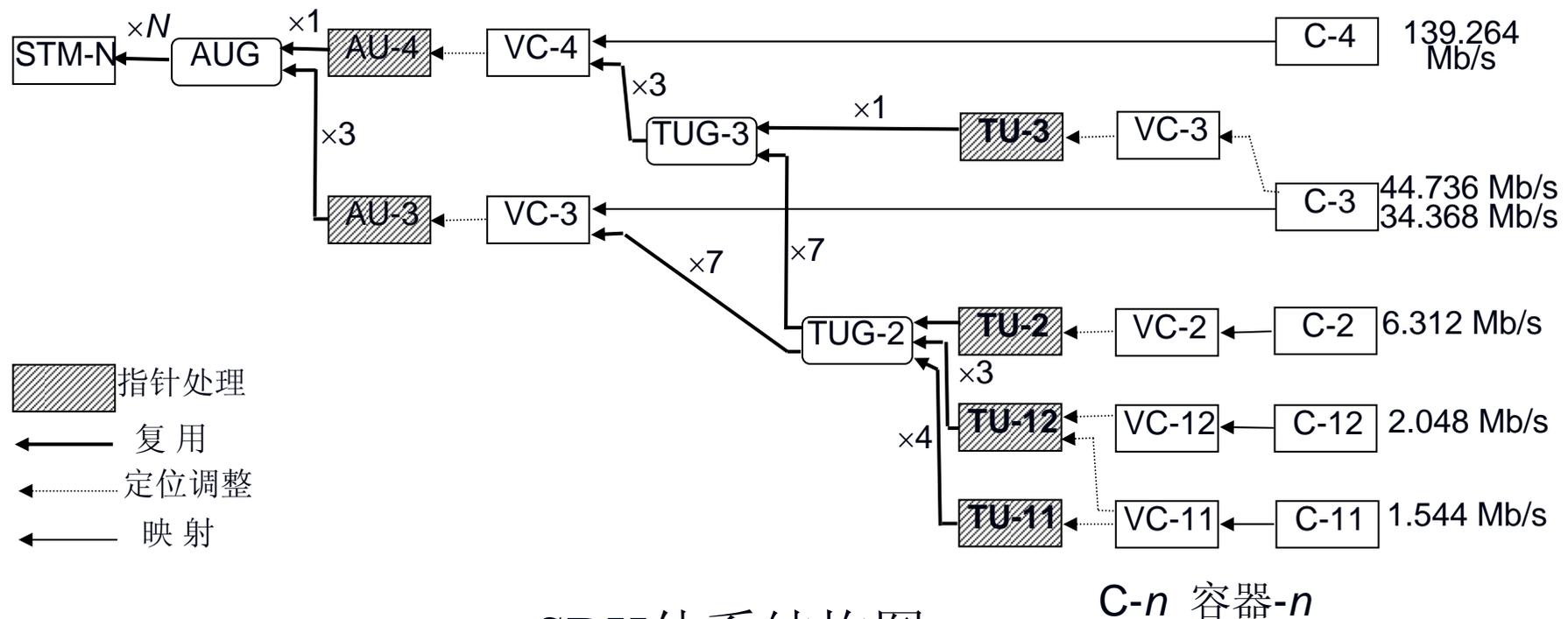
- 在SDH中，信息是以“同步传送模块STM”传送的。
- 同步传送模块(STM)由信息有效负荷和段开销SOH 组成块状帧结构，其重复周期为125μs。
- SDH分为若干等级：

| 等级     | 比特率(Mb/s) |
|--------|-----------|
| STM-1  | 155.52    |
| STM-4  | 622.08    |
| STM-16 | 2,488.32  |
| STM-64 | 9,953.28  |

- STM的基本模块是STM-1。STM-1包含一个管理单元群AUG和段开销SOH。

## ➤ SDH和PDH的关系

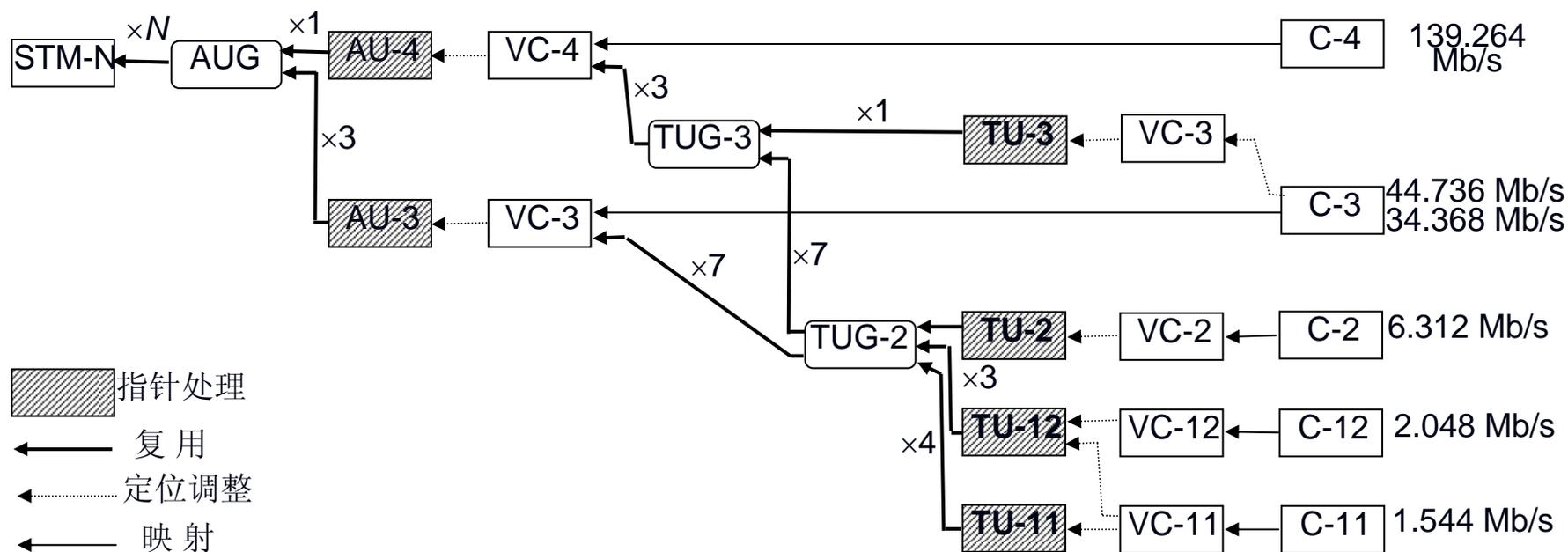
- 通常都是将若干路PDH接入STM-1内，即在155.52Mb/s处接口。这时，PDH信号的速率都必须低于155.52Mb/s，并将速率调整到155.52上。
- 例如，可以将63路E-1，或3路E-3，或1路E-4，接入STM-1中。
- SDH的结构以及和PDH连接关系图：



SDH体系结构图

## ➤ SDH的结构:

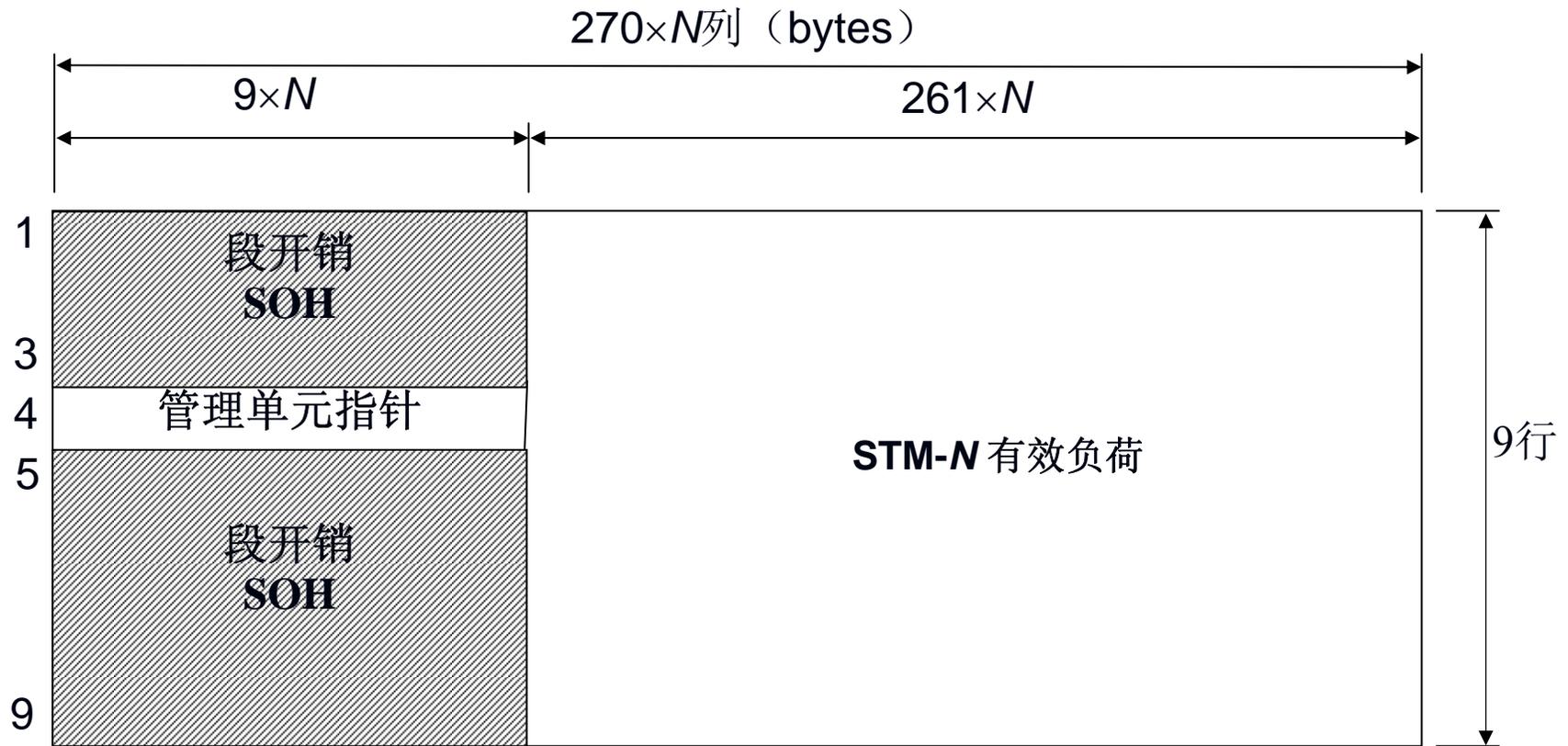
- 容器 (C-n)：是一种信息结构，它为后接的虚容器(VC-n)组成与网络同步的信息有效负荷。
- 虚容器 (VC-n)：也是一种信息结构，它由信息有效负荷和路径开销信息组成帧。每帧长125μs或500μs。
- 支路单元 (TU-n)：也是一种信息结构，它为低阶路径层和高阶路径层之间进行适配。



SDH体系结构图

C-n 容器-n

## ➤ SDH的帧结构



SDH的帧结构

## 9.4 码分复用(CDM)

### 9.4.1 基本原理

➤ 码组正交的概念：设  $x$  和  $y$  表示两个码组：

$$x = (x_1, x_2, \dots, x_i, \dots, x_N)$$

$$y = (y_1, y_2, \dots, y_i, \dots, y_N)$$

式中，  $x_i, y_i \in (+1, -1)$

$$i = 1, 2, \dots, N$$

互相关系数定义：

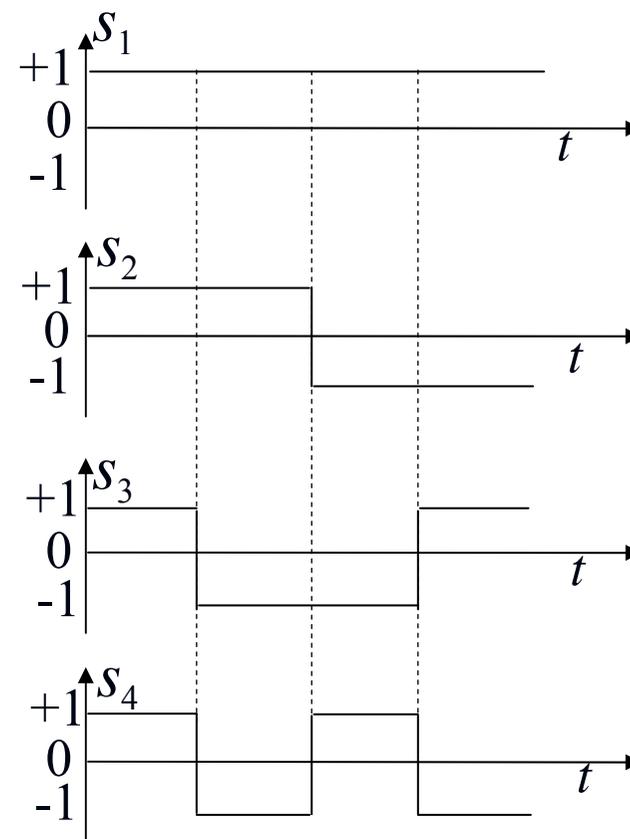
$$\rho(x, y) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i y_i$$

两码组正交的必要和充分条件：

$$\rho(x, y) = 0$$

例：

$$\begin{cases} s_1 = (+1, +1, +1, +1) \\ s_2 = (+1, +1, -1, -1) \\ s_3 = (+1, -1, -1, +1) \\ s_4 = (+1, -1, +1, -1) \end{cases}$$



正交码组

■ 用“1”和“0”表示二进制码元方法：

“1” → “-1”

“0” → “+1”

□ 互相关系数定义式  $\rho(x, y) = \frac{A - D}{A + D}$

式中， $A$  —  $x$  和  $y$  中对应码元相同的个数；

$D$  —  $x$  和  $y$  中对应码元不同的个数。

上例中，

$$\begin{cases} s_1 = (+1, +1, +1, +1) \\ s_2 = (+1, +1, -1, -1) \\ s_3 = (+1, -1, -1, +1) \\ s_4 = (+1, -1, +1, -1) \end{cases}$$



$$\begin{cases} s_1 = (0, 0, 0, 0) \\ s_2 = (0, 0, 1, 1) \\ s_3 = (0, 1, 1, 0) \\ s_4 = (0, 1, 0, 1) \end{cases}$$

□ 优点：

映射关系

“ $\times$ ” → “ $\oplus$ ”

|          |    |    |
|----------|----|----|
| $\times$ | +1 | -1 |
| +1       | +1 | -1 |
| -1       | -1 | +1 |

|          |   |   |
|----------|---|---|
| $\oplus$ | 0 | 1 |
| 0        | 0 | 1 |
| 1        | 1 | 0 |

➤ 码组自相关系数定义：设 $x_i$ 取值+1或-1，

$$\rho_x(j) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i x_{i+j} \quad j=0, 1, \dots, (N-1)$$

式中， $x$ 的下标 $i+j$ 应按模 $N$ 运算，即 $x_{N+i} \equiv x_i$ 。

例：设 $x = (x_1, x_2, x_3, x_4) = (+1, -1, -1, +1)$

则其自相关系数为

$$\rho_x(0) = \frac{1}{4} \sum_{i=1}^4 x_i^2 = 1$$

$$\begin{aligned} \rho_x(1) &= \frac{1}{4} \sum_{i=1}^4 x_i x_{i+1} = \frac{1}{4} (x_1 x_2 + x_2 x_3 + x_3 x_4 + x_4 x_1) \\ &= \frac{1}{4} (-1 + 1 - 1 + 1) = 0 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \rho_x(2) &= \frac{1}{4} \sum_{i=1}^4 x_i x_{i+2} = \frac{1}{4} (x_1 x_3 + x_2 x_4 + x_3 x_1 + x_4 x_2) \\ &= \frac{1}{4} (-1 - 1 - 1 - 1) = -1 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \rho_x(3) &= \frac{1}{4} \sum_{i=1}^4 x_i x_{i+3} = \frac{1}{4} (x_1 x_4 + x_2 x_1 + x_3 x_2 + x_4 x_3) \\ &= \frac{1}{4} (+1 - 1 + 1 - 1) = 0 \end{aligned}$$

- 若设 $x_i$ 取值“0”或“1”，则有自相关系数

$$\rho(x_i, x_{i+j}) = \frac{A - D}{A + D}$$

式中， $A$ 为 $x_i$ 和 $x_{i+j}$ 中对应码元相同的个数；

$D$ 为 $x_i$ 和 $x_{i+j}$ 中对应码元不同的个数。

➤  $\rho$ 的取值范围： $-1 \leq \rho \leq +1$

➤ 按照互相关系数 $\rho$ 值的不同，

当 $\rho = 0$ 时，称码组为正交编码

当 $\rho \approx 0$ 时，称码组为准正交码

当 $\rho < 0$ 时，称其为超正交码，例： $s_1 = (0,1,1)$ ,  $s_2 = (1,1,0)$ ,  $s_3 = (1,0,1)$

➤ 正交编码和其反码还可以构成双正交码，例

(0, 0, 0, 0)

(1, 1, 1, 1)

(0, 0, 1, 1)

(1, 1, 0, 0)

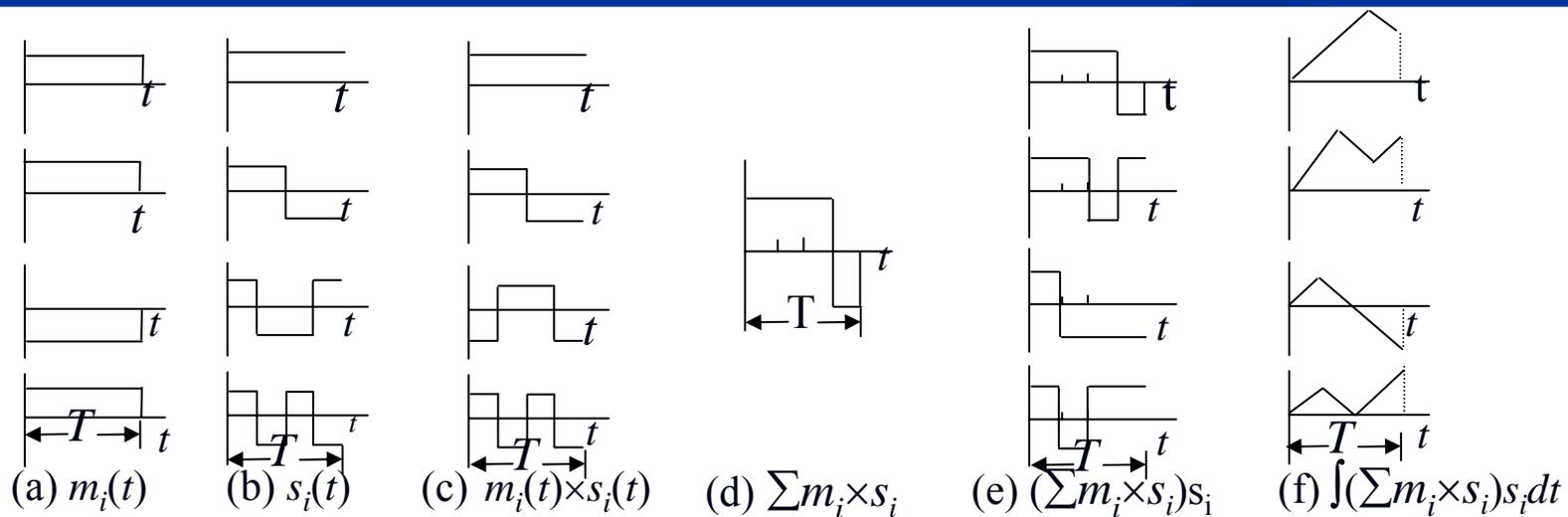
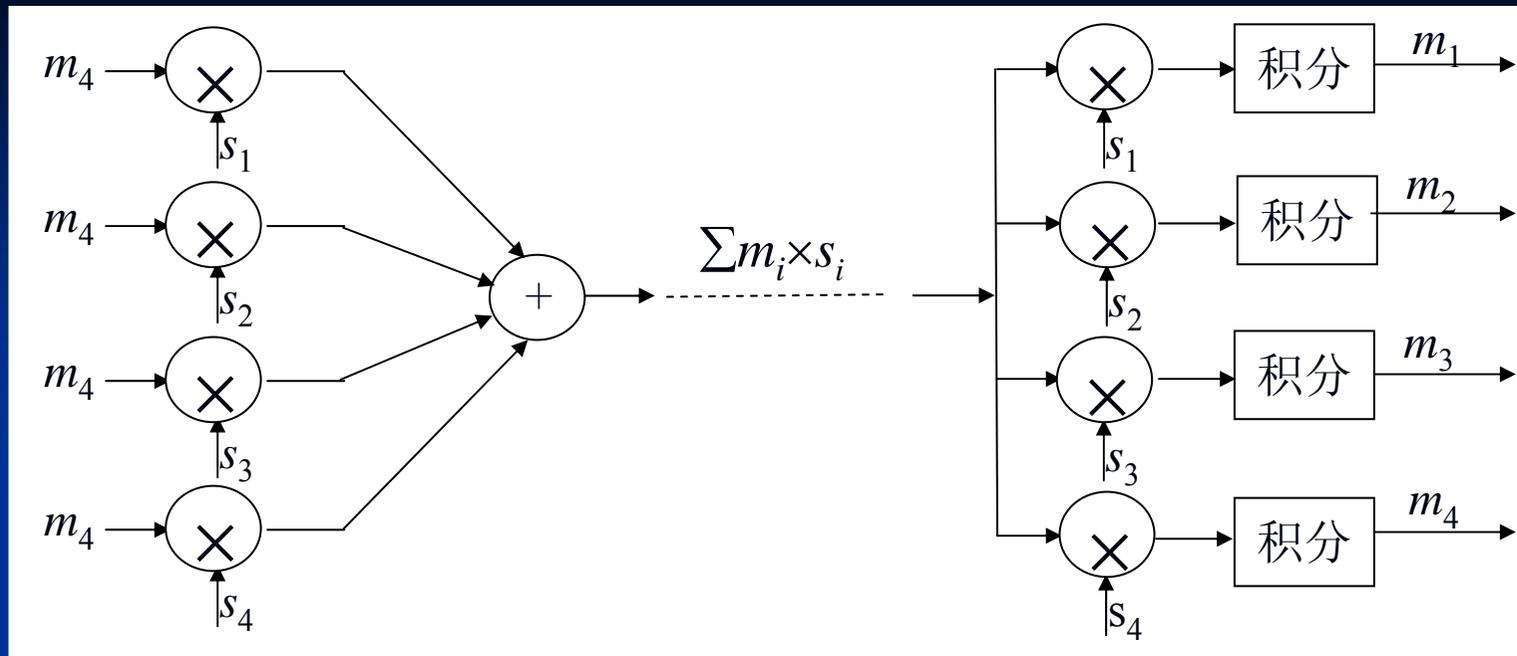
(0, 1, 1, 0)

(1, 0, 0, 1)

(0, 1, 0, 1)

(1, 0, 1, 0)

## 四路码分复用原理方框图



四路码分复用波形图

## 9.4.2 正交码

➤ 阿达玛(Hadamard)矩阵：是一种方阵，仅由元素+1和-1构成。简称H矩阵。

■ 最低阶的阿达玛矩阵是2阶的，如下式

$$\mathbf{H}_2 = \begin{bmatrix} +1 & +1 \\ +1 & -1 \end{bmatrix}$$

为简单起见，将上式写为：

$$\mathbf{H}_2 = \begin{bmatrix} + & + \\ + & - \end{bmatrix}$$

■ 阶数为2的幂的阿达玛矩阵可以用下面的递推公式求出：

$$\mathbf{H}_N = \mathbf{H}_{N/2} \otimes \mathbf{H}_2$$

式中， $\otimes$  — 直积。

- 直积的算法：将矩阵 $H_{N/2}$ 中的每个元素都用矩阵 $H_2$ 代替。  
例：

$$H_4 = H_2 \otimes H_2 = \begin{bmatrix} H_2 & H_2 \\ H_2 & -H_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} + & + & + & + \\ + & - & + & - \\ + & + & - & - \\ + & - & - & + \end{bmatrix}$$

$$H_8 = H_4 \otimes H_2 = \begin{bmatrix} H_4 & H_4 \\ H_4 & -H_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} + & + & + & + & + & + & + & + \\ + & - & + & - & + & - & + & - \\ + & + & - & - & + & + & - & - \\ + & - & - & + & + & - & - & + \\ + & + & + & + & - & - & - & - \\ + & - & + & - & - & + & - & + \\ + & + & - & - & - & - & + & + \\ + & - & - & + & - & + & + & - \end{bmatrix}$$

- 正规阿达玛矩阵：由上法构造出的 $H$ 矩阵是对称矩阵，而且其第一行和第一列中的元素全为“+”，称为正规 $H$ 矩阵。

## ■ $H$ 矩阵的性质:

- 若交换正规 $H$ 矩阵的任意两行或两列，或者改变任一行（或列）中的全部元素的符号，此矩阵仍为 $H$ 矩阵。
  - 高于2阶的 $H$ 矩阵的阶数一定是4的倍数。
  - 目前，除 $N = 4 \times 47 = 188$ 外，所有 $N \leq 200$ 的 $H$ 矩阵都已经找到。
- 沃尔什(Walsh)矩阵: 将 $H$ 矩阵中各行按符号改变次数由少到多排列，得出沃尔什矩阵（简称 $W$ 矩阵）。例:

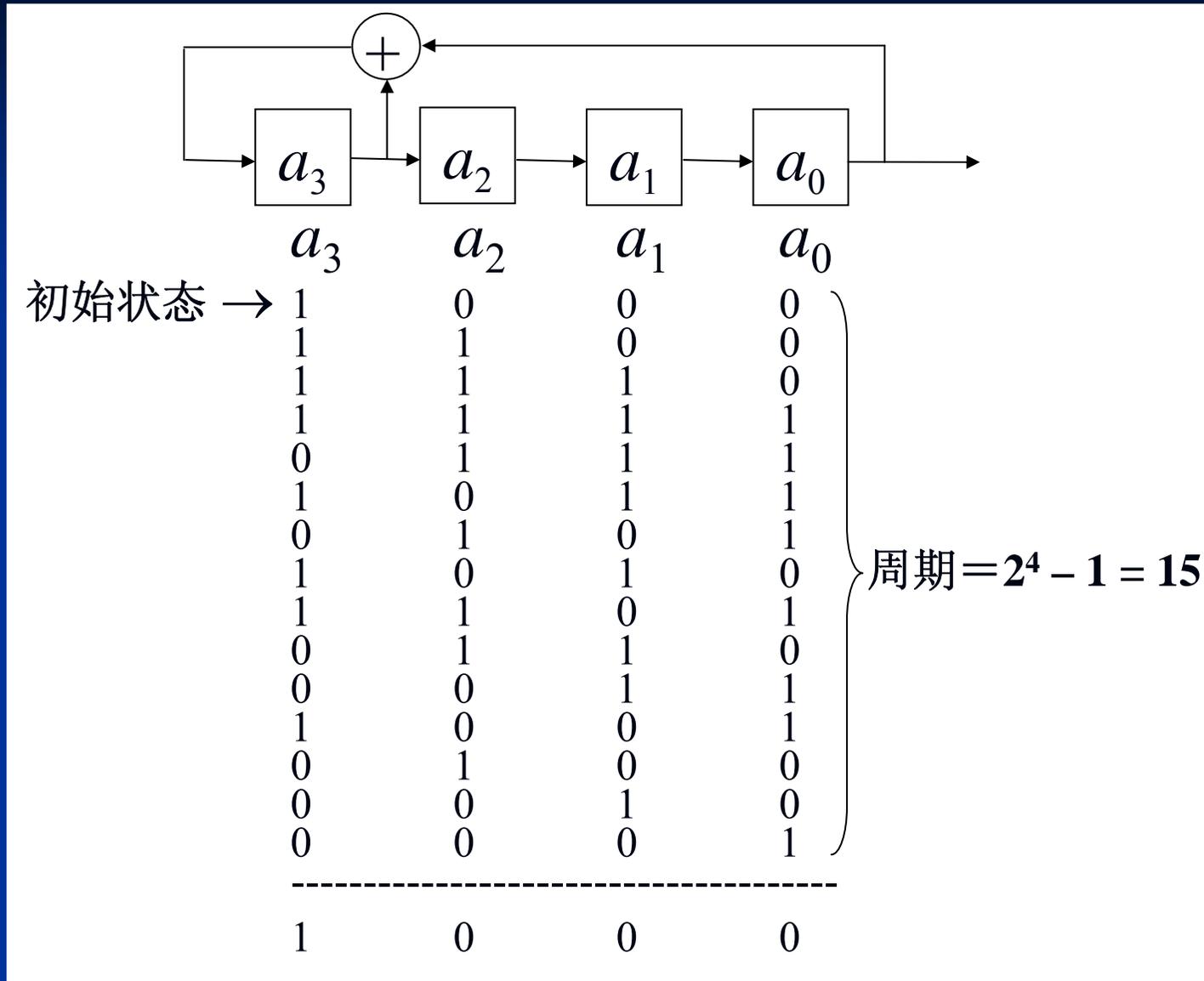
$$W_8 = \begin{bmatrix} + & + & + & + & + & + & + & + \\ + & + & + & + & - & - & - & - \\ + & + & - & - & - & - & + & + \\ + & + & - & - & + & + & - & - \\ + & - & - & + & + & - & - & + \\ + & - & - & + & - & + & + & - \\ + & - & + & - & - & + & - & + \\ + & - & + & - & + & - & + & - \end{bmatrix}$$

$W$ 矩阵仍保有正交性。

### 9.4.3 伪随机码

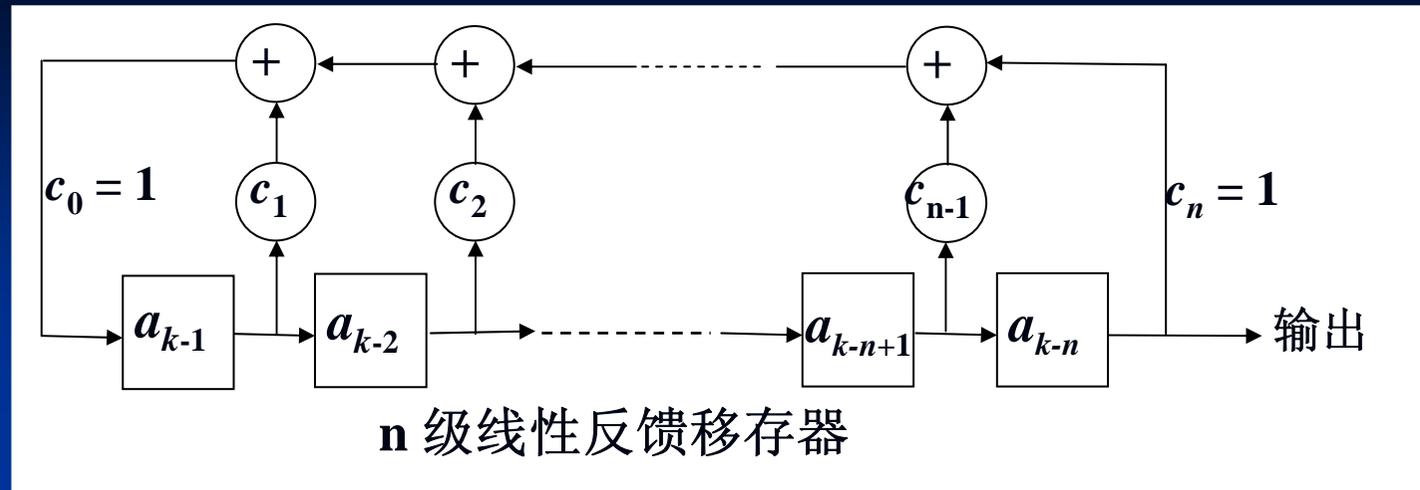
- 伪随机码 — 又称伪随机序列
  - 具有类似白噪声的随机特性但是又能重复产生。
  - 具有良好的相关特性，可以用于码分复用、多址接入、测距、密码、扩展频谱通信和分离多径信号等许多用途。
  - 伪随机序列有多种，其中以 $m$ 序列最为重要。
- $m$ 序列
  - $m$ 序列 — 由线性反馈移位寄存器产生的周期最长的序列。

## ■ $m$ 序列的产生举例：4级 $m$ 序列产生器及其状态



4级移存器共有 $2^4 = 16$ 种可能状态，其周期 $p$ 最长等于15。

## ■ 一般的线性反馈移存器方框图

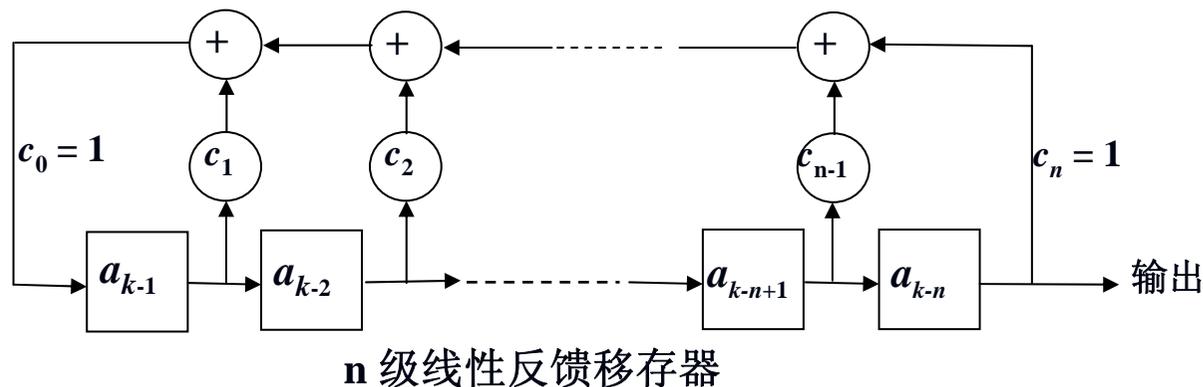


图中， $a_i$  ( $i = 0 - n$ ) — 移存器状态。 $a_i = 0$ 或 $1$ 。

$c_i$  — 反馈状态。 $c_i = 0$ 表示反馈线断开，

$c_i = 1$ 表示反馈线连通。

## ■ 递推方程



设：此移存器的初始状态为  $a_{-1}, a_{-2}, \dots, a_{-n+1}, a_{-n}$

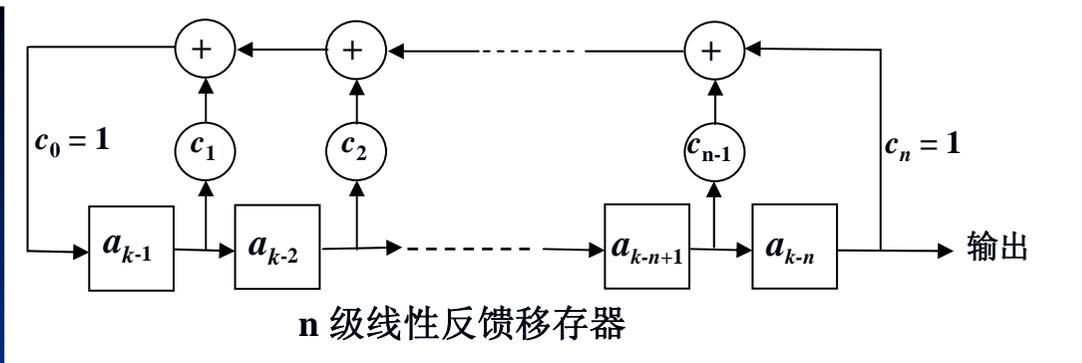
则经1次移位后，状态变为  $a_0, a_{-1}, \dots, a_{-n+2}, a_{-n+1}$

经  $k$  次移位后，状态变为  $a_{k-1}, a_{k-2}, \dots, a_{k-n+1}, a_{k-n}$  (当前状态)

当再次移位时，移存器左端的输入  $a_k$  为

$$a_k = c_1 a_{k-1} \oplus c_2 a_{k-2} \oplus \dots \oplus c_{n-1} a_{k-n+1} \oplus c_n a_{k-n} = \sum_{i=1}^n c_i a_{k-i} \pmod{2}$$

— 称为递推方程，它给出移存器输入  $a_k$  与移存器各级状态的关系。



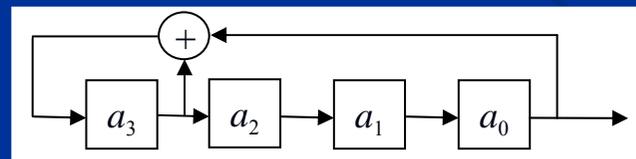
## ■ 特征方程

$$f(x) = c_0 + c_1x + c_2x^2 + \cdots + c_nx^n = \sum_{i=0}^n c_i x^i$$

- $c_i$  的值决定了反馈线的连接状态
- 在上式和后面的公式中都将“ $\oplus$ ”简写为“+”
- 式中  $x_i$  本身并无实际意义，它仅指明其系数是  $c_i$  的值
- 例：  $f(x) = 1 + x + x^4$

表示上式中仅  $x_0, x_1,$  和  $x_4$  的系数  $c_0 = c_1 = c_4 = 1$ ，而其余系数  $c_2 = c_3 = 0$ 。

构成的方框图如右：



- 特征方程  $f(x)$  决定了一个线性反馈移存器的结构，从而决定了它产生的序列的构造和周期。

## ■ 本原多项式

- 使一个线性反馈移存器产生最长周期序列的充分必要条件是其特征方程 $f(x)$ 为本原多项式。
- 本原多项式是指满足下列条件的多项式：
  - ① 是既约的，即不能分解因子的；
  - ② 可以整除 $(x^m + 1)$ ， $m = 2n - 1$ ；即是 $(x^m + 1)$ 的一个因子；
  - ③ 除不尽 $(x^q + 1)$ ， $q < m$ 。
- 例：设计一个4级 $m$ 序列产生器的特征方程 $f(x)$ 。

现在，级数 $n = 4$ ，故 $m = 2^n - 1 = 15$ 。所以，按照上述第②项要求，其特征方程 $f(x)$ 应该是 $(x^{15} + 1)$ 的一个因子。现将 $(x^{15} + 1)$ 分解因子如下：

$$(x^{15} + 1) = (x^4 + x + 1)(x^4 + x^3 + 1)(x^4 + x^3 + x^2 + x + 1)(x^2 + x + 1)(x + 1)$$

$$(x^{15} + 1) = (x^4 + x + 1)(x^4 + x^3 + 1)(x^4 + x^3 + x^2 + x + 1)(x^2 + x + 1)(x + 1)$$

因要求设计的移存器有4级，故其特征方程式的最高次项应为 $x^4$ 项。上式右端前3个因子都符合这一要求。但是，可以验证前两个因子是本原多项式，而第3个因子不是本原多项式，因为

$$(x^4 + x^3 + x^2 + x + 1)(x + 1) = (x^5 + 1)$$

因此，前两个因子和都可以作为特征多项式，用以产生 $m$ 序列。

□ 寻找本原多项式不易。将常用本原多项式列表供查用；

表中除了给出本原多项式的代数式外，还给出了其8进制数字表示形式。例如，当 $n = 4$ 时，表中给出的8进制数字是“23”，它的意义如下：

|       |               |               |
|-------|---------------|---------------|
| 8进制数字 | 2             | 3             |
| 2进制数字 | 0 1 0         | 0 1 1         |
| 抽头系数  | $c_5 c_4 c_3$ | $c_2 c_1 c_0$ |

即 $c_0 = c_1 = c_4 = 1$ ， $c_2 = c_3 = c_5 = 0$ 。

由于反馈线和模2加法电路的数量决定于本原多项式的项数，为了使电路简单，所以应当选用项数最少的那些因子。由表可见，许多本原多项式的项数最少为3项。这时仅需用一个模2加法电路。

本原多项式的逆多项式也是本原多项式。例如， $(x^4 + x + 1)$  和  $(x^4 + x^3 + 1)$  所以表中每个本原多项式可以构成两种m序列产生器。

| n  | 本原多项式                        |       |
|----|------------------------------|-------|
|    | 代数式                          | 8进制表示 |
| 2  | $x^2 + x + 1$                | 7     |
| 3  | $x^3 + x + 1$                | 13    |
| 4  | $x^4 + x + 1$                | 23    |
| 5  | $x^5 + x^2 + 1$              | 45    |
| 6  | $x^6 + x + 1$                | 103   |
| 7  | $x^7 + x^3 + 1$              | 211   |
| 8  | $x^8 + x^4 + x^3 + x^2 + 1$  | 435   |
| 9  | $x^9 + x^4 + 1$              | 1021  |
| 10 | $x^{10} + x^3 + 1$           | 2011  |
| 11 | $x^{11} + x^2 + 1$           | 4005  |
| 12 | $x^{12} + x^6 + x^4 + x + 1$ | 10123 |
| 13 | $x^{13} + x^4 + x^3 + x + 1$ | 20033 |

## ■ $m$ 序列的性质

- 均衡性：在 $m$ 序列的一个周期中，“0”和“1”的个数基本相等。准确地说，“1”的个数比“0”的个数多一个。
- 游程分布：游程是指序列中取值相同的一段元素。并把这段元素的个数称为游程长度。例如，

$$\begin{array}{c} m = 15 \\ \dots \underline{1} \underline{000} \underline{1111} \underline{0101} \underline{1001} \underline{0} \dots \\ \text{游程} \quad \text{游程} \end{array}$$

在上面的一个周期中，共有8个游程，其中长度为4的游程有1个，即“1111”；长度为3的游程有1个，即“000”；长度为2的游程有两个，即“11”和“00”；长度为1的游程有4个，即两个“1”和两个“0”。

一般说来，在 $m$ 序列中，长度为1的游程数目占 $1/2$ ；长度为2的游程数目占 $1/4$ ；长度为3的游程占 $1/8$ ；...

或者说，长度为 $k$ 的游程数目占游程总数的 $2^{-k}$ ， $1 \leq k \leq (n - 1)$ ，并且长度为 $k$  ( $1 \leq k \leq (n - 2)$ )的游程中，连“1”游程数目和连“0”游程数目相等。

## □ 移位相加特性

设： $M_p$ 是一个 $m$ 序列，它经过任意次延迟移位后成为 $M_r$ ，则  $M_p \oplus M_r = M_s$

式中， $M_s$ 是 $M_p$ 的某次延迟移位序列。

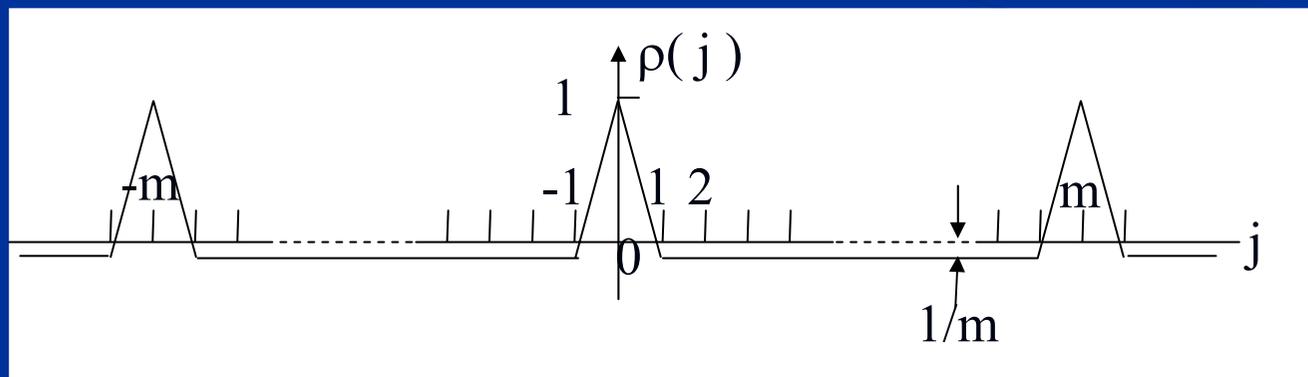
例： $1110010 \oplus 0111001 = 1001011$

上式右端是1110010向右移位5次的结果。

## □ 自相关特性

$$\rho(j) = \begin{cases} 1, & j=0 \\ \frac{-1}{m}, & j=1, 2, \dots, m-1 \end{cases}$$

$$\rho(j) = \rho(j - km), \quad j \geq km, \quad k=1, 2, \dots \quad \text{— 周期性}$$

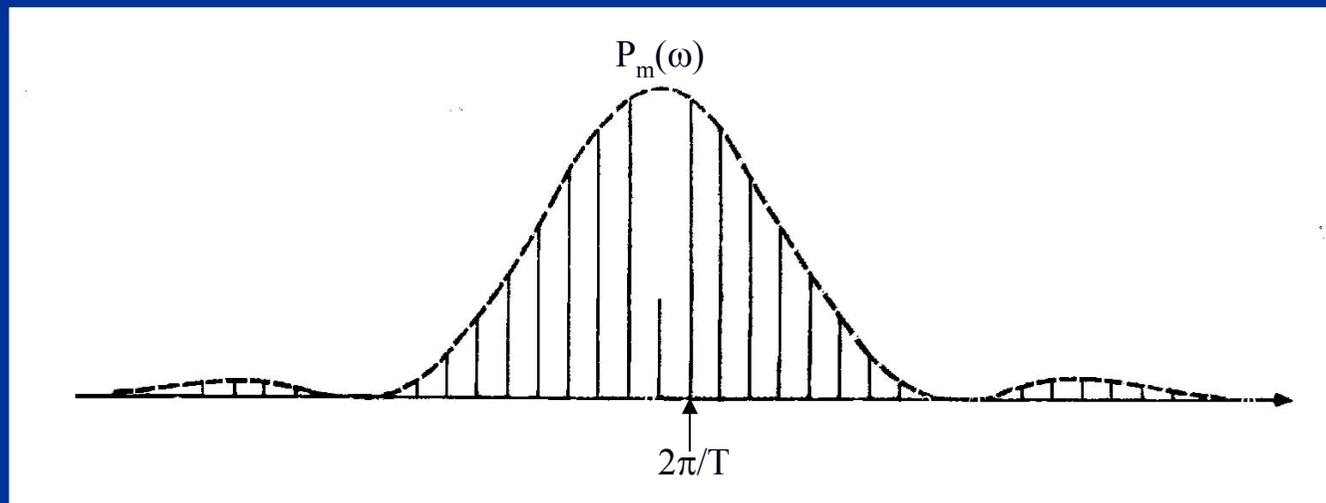


## □ 功率谱密度

功率谱密度和自相关系数构成一对傅里叶变换。

求出如下：

$$P_m(\omega) = \frac{m+1}{m^2} \left[ \frac{\sin(\omega T / 2m)}{(\omega T / 2m)} \right]^2 \sum_{\substack{n=-\infty \\ n \neq 0}}^{\infty} \delta\left(\omega - \frac{2\pi n}{T}\right) + \frac{1}{m^2} \delta(\omega)$$

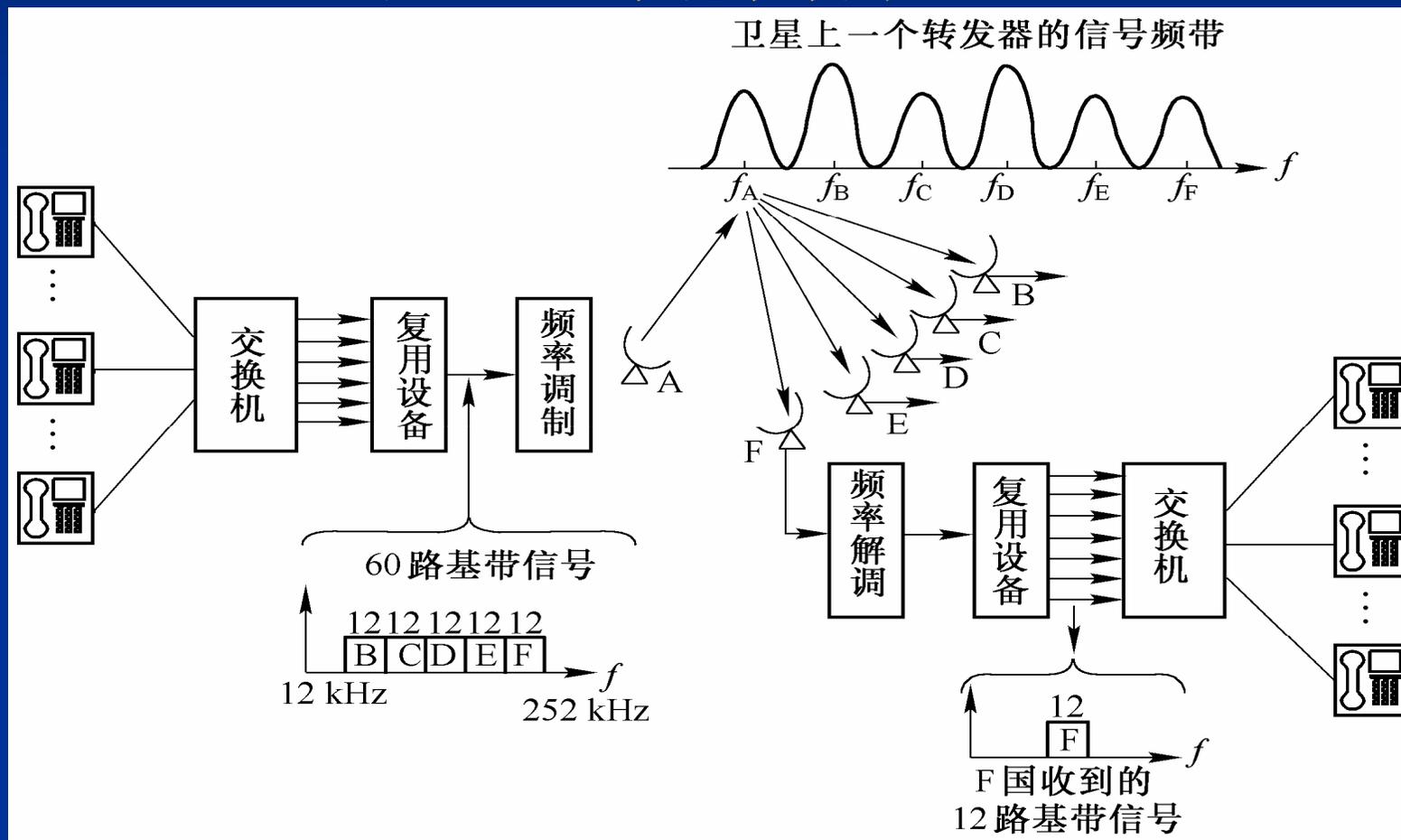


□ 由于当  $m$  大时， $m$  序列的均衡性、游程分布、自相关特性和功率谱密度等都近似白噪声的特性，但是它又有规律，可以重复产生，所以  $m$  序列属于一种伪噪声序列。

## 9.5 多址技术

### 9.5.1 频分多址(FDMA)

- 每载波多路(MCPC)体制：预先分配的FDM/FM/FDMA体制  
INTELSAT II和III卫星系统中采用。



缺点：话路分配不灵活。

## ➤ 按需分配多址(DAMA)体制

- INTELSAT IV卫星中采用的DAMA体制为每载波单路按需分配多址(SPADE)体制。

- SPADE体制特点:

- 1.载波只受单路64 kb/s的PCM信号调制 — QPSK;

- 2.信道间隔为45 kHz, 一个卫星转发器的带宽可以容纳800路载波, 其中留有6个载频位置空闲备用, 故可提供794路载波使用;

- 3.各载波动态地按需分配;

- 4.用一个160 kHz带宽的公共信令信道作动态分配用, 其比特率为128 kb/s, 采用BPSK调制。

- 工作原理:

- 有公共信令信道: 以固定分配的TDMA广播模式工作。

- 每个地球站在公共信令信道内每50ms中有1ms的时隙可以用来请求或释放信道。

- 信道分配是由所有地球站控制的。

- 由于SPADE体制的按需分配, 它的容量相当于提高到4倍, 即800路的SPADE信道相当于3200路MCPC信道。

➤ **FDMA的优缺点:**

- **主要优点:** 设备较简单, 价格较低, 不需要精确的时钟同步;

- **主要缺点:** 要求传输信道的非线性失真要小。

例如, 在卫星通信系统中, 若一个星上转发器内同时转发多个载波信号, 则星上(行波管)放大器的非线性将在各载波信号间产生**交叉调制**, 使星上(行波管)放大器只能工作在线性好的一段功率范围。

## 9.5.2 时分多址(TDMA)

### ➤ 单路时分多址系统

#### ■ ALOHA系统

□ 工作原理：用随机接入的方法通过一颗卫星把几个地面计算机连接起来，用数据分组方式传输，分组的长度是一定的。

#### □ 工作模式：

- 发送模式。 用户需要发送数据时可以随时发送。发送的分组具有纠错能力。
- 收听模式。 在发送后，该用户收听来自接收端的“确认(ACK)”消息。当有几个用户同时发送信号时，由于信号间的重叠会造成接收数据中出现误码。我们称这种现象为碰撞。这时发送端将收到接收端送回的“否认(NAK)”消息。
- 重发模式。 当发送端收到“NAK”后，将重发原来的数据分组。当然，若碰撞对方也立即重发，将再次发生碰撞。所以，要经过一段随机延迟时间后再重发。
- 超时模式。 若发送后在规定时间内既没有收到ACK，也没有收到NAK，则重发此数据分组。

## □ 基本性能分析

设：每个数据分组的长度 =  $b$  比特，

总业务到达率 = 每秒  $\lambda_t$  个分组，

成功接收率 = 每秒  $\lambda$  个分组，

拒收（碰撞）率 = 每秒  $\lambda_r$  个分组，

则有：  $\lambda_t = \lambda + \lambda_r$

■ 成功传输量（吞吐量）定义为：  $p' = b\lambda$

■ 总业务量定义为：  $P' = b\lambda_t$

■ 归一化通过量定义为：  $p = b\lambda / R$

式中，  $R$  — 系统容量（最大传输速率） (b/s)

■ 归一化总业务量定义为：  $P = b\lambda_t / R$

■ 由于平均吞吐量  $p'$  不可能大于系统的容量  $R$ ，所以归一化通过量  $p$  不可能大于 1，即  $0 \leq p \leq 1$

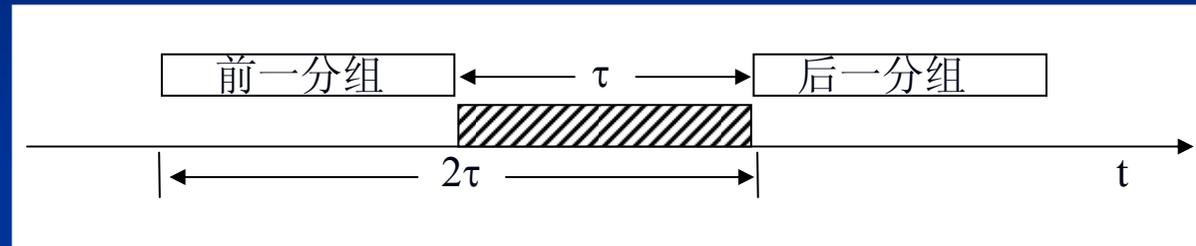
■ 归一化总业务量  $P$  可以大于 1。一般说来，  $0 \leq P \leq \infty$

- 一个分组(pkt)的（最小）传输时间等于：

$$\tau = b / R \quad (\text{s/pkt})$$

- 故有  $p = \lambda \tau$  及  $P = \lambda_t \tau$

- 为了避免冲突，一个分组至少需要  $2\tau$  的空闲时间：



## □ 归一化通过量 $p$ 和归一化总业务量 $P$ 之间关系的分析

- 泊松分布：在  $\tau$  秒时间内有  $K$  个新消息到达的概率

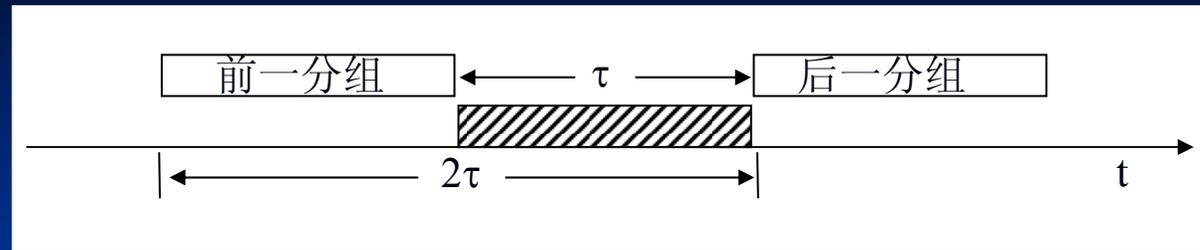
$$P(K) = \frac{(\lambda \tau)^K e^{-\lambda \tau}}{K!} \quad K \geq 0$$

式中， $\lambda$  为消息的平均到达率。

- 在  $\tau$  时间间隔内没有消息到达的概率：

令  $\lambda = \lambda_t$ ， $K = 0$ ，得到 
$$P(0) = \frac{(\lambda_t \tau)^0 e^{-\lambda_t \tau}}{0!} = e^{-\lambda_t \tau}$$

- 在ALOHA系统中，一个消息成功传输的概率 $P_s$ 应该是相邻两个 $\tau$ 内都没有消息到达。



故有：

$$P_s = P(0) \cdot P(0) = e^{-2\tau\lambda_t}$$

另一方面，

$$P_s = \text{平均成功接收率} / \text{总业务到达率} = \lambda / \lambda_t$$

由上两式联立，得出

$$\lambda = \lambda_t e^{-2\tau\lambda_t}$$

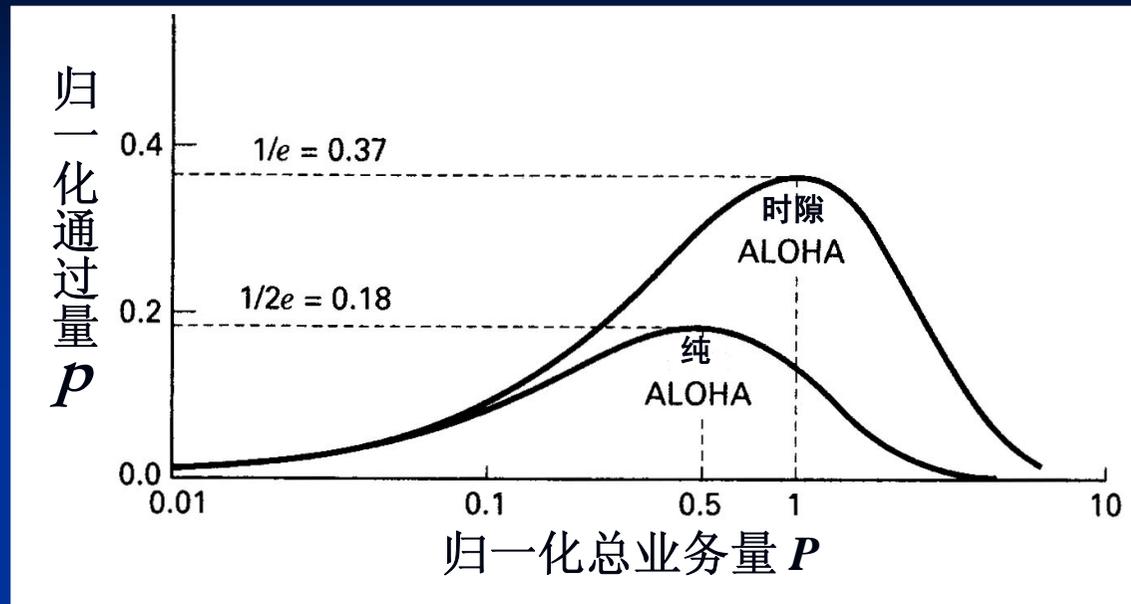
将  $\lambda = \lambda_t e^{-2\tau\lambda_t}$  及  $P = \lambda_t \tau$  代入  $p = \lambda \tau$  ，

最终得到归一化通过量：

$$p = P e^{-2P}$$

$$p = Pe^{-2P}$$

的曲线：下图中“纯ALOHA”曲线



由图可见：

随着 $P$ 增大， $p$ 逐渐增大

$p$ 的最大值等于 $1/2e = 0.18$ ，它发生在 $P$ 等于0.5时。  
由于碰撞大量增加， $p$ 开始下降。

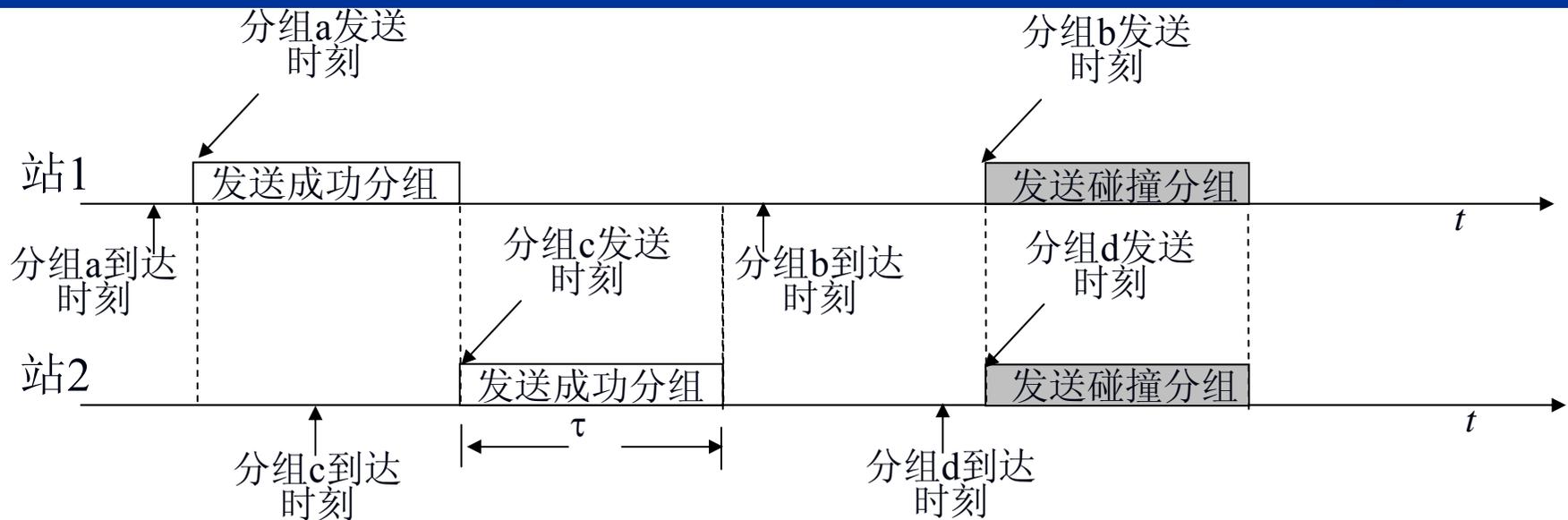
为了提高信道利用率，需要将ALOHA系统改进。

## ■ 时隙ALOHA(S-ALOHA)系统

### □ 改进之处:

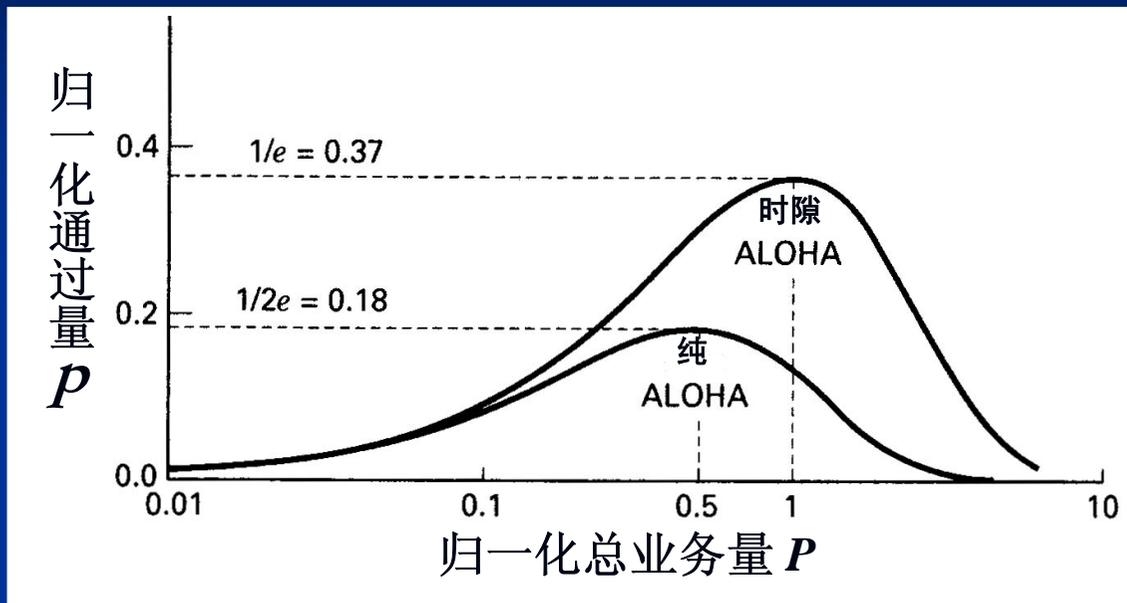
- 卫星向所有地球站发送一同步脉冲序列，将时间划分为等于分组长度的时隙 $\tau$ 。
- 分组开始发送的时间必须在时隙 $\tau$ 的起点。  
(这样的一种简单规定就能使碰撞率减少一半，因为只有在同一时隙中发送的消息才可能发生碰撞。)

### □ 工作原理



□这时的归一化通过量 $p$ 和归一化总业务量 $P$ 的关系式变为  $p = Pe^{-P}$

按上式画出的曲线示于下图中“时隙ALOHA”曲线：



此曲线的最大值等于 $1/e = 0.37$ ，它是纯ALOHA系统的两倍。

□重发的延迟时间决定于各站的随机数产生器。一旦发生再次碰撞，则使用另一个随机数再次重发。

## ■ 预约ALOHA (R-ALOHA) 系统

### □ 两种基本模式：

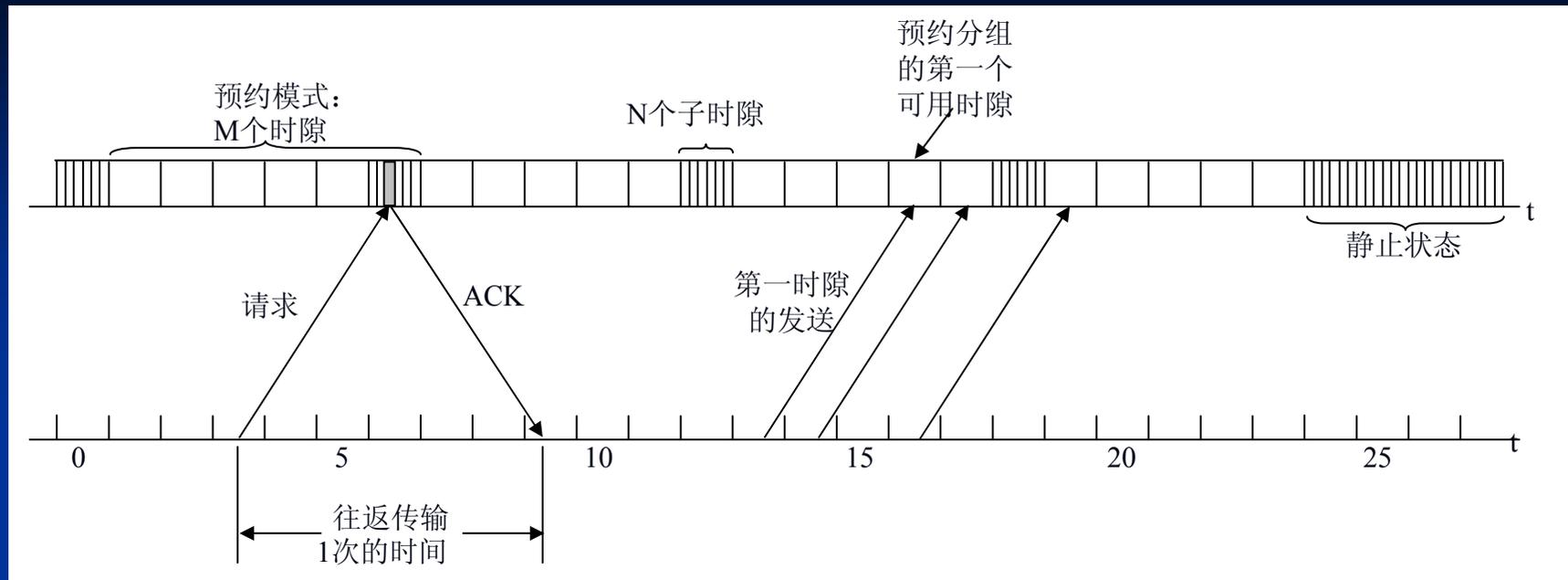
#### 未预约模式（静止状态）：

- ① 将时间分为若干小的子时隙。
- ② 用户使用这些子时隙来预约消息时隙。
- ③ 在发出预约请求后，用户等待收听确认和时隙分配的信息。

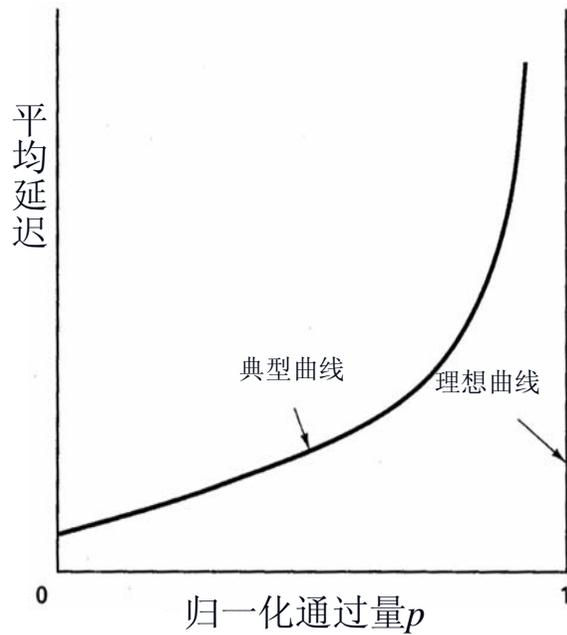
#### 预约模式：

- ① 一旦有了一个预约，时间将被分成帧，每帧又分成  $M+1$  个时隙。
- ② 前  $M$  个时隙用于消息传输。
- ③ 最后一个时隙再分成  $N$  个子时隙，用于请求和分配预约。
- ④ 用户只能在  $M$  个时隙中分配给他的时隙内发送消息分组。

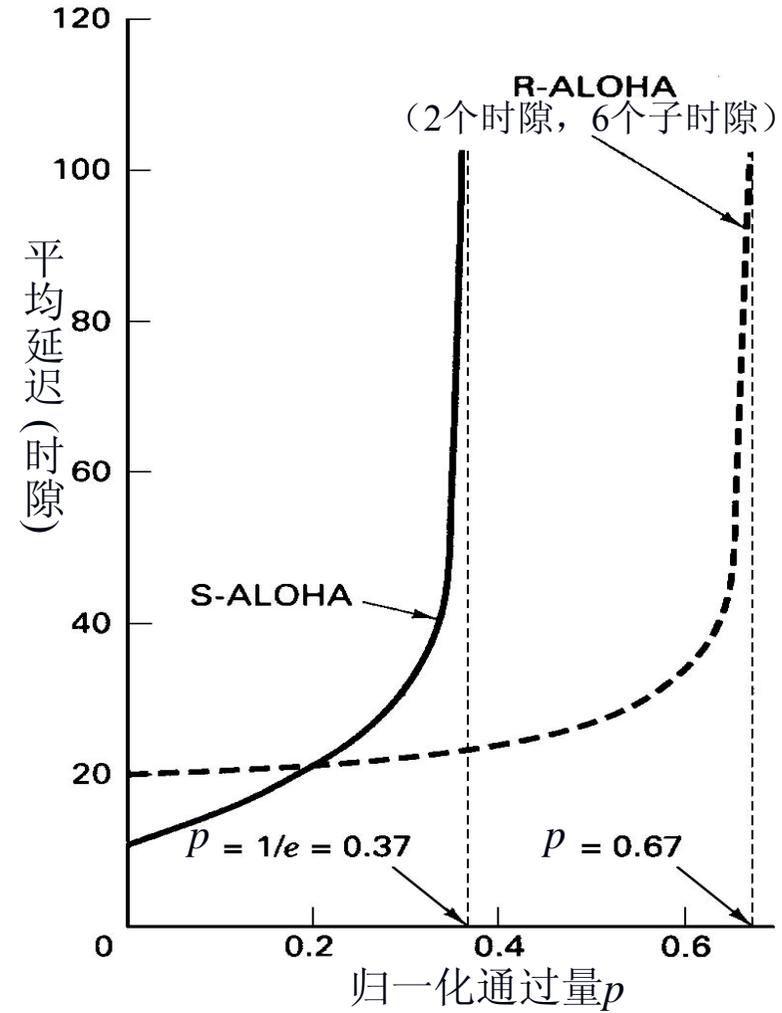
# □ R-ALOHA系统的一种实现方案



# ■ S-ALOHA系统和R-ALOHA系统的性能比较



延迟-通过量曲线



延迟-通过量性能比较

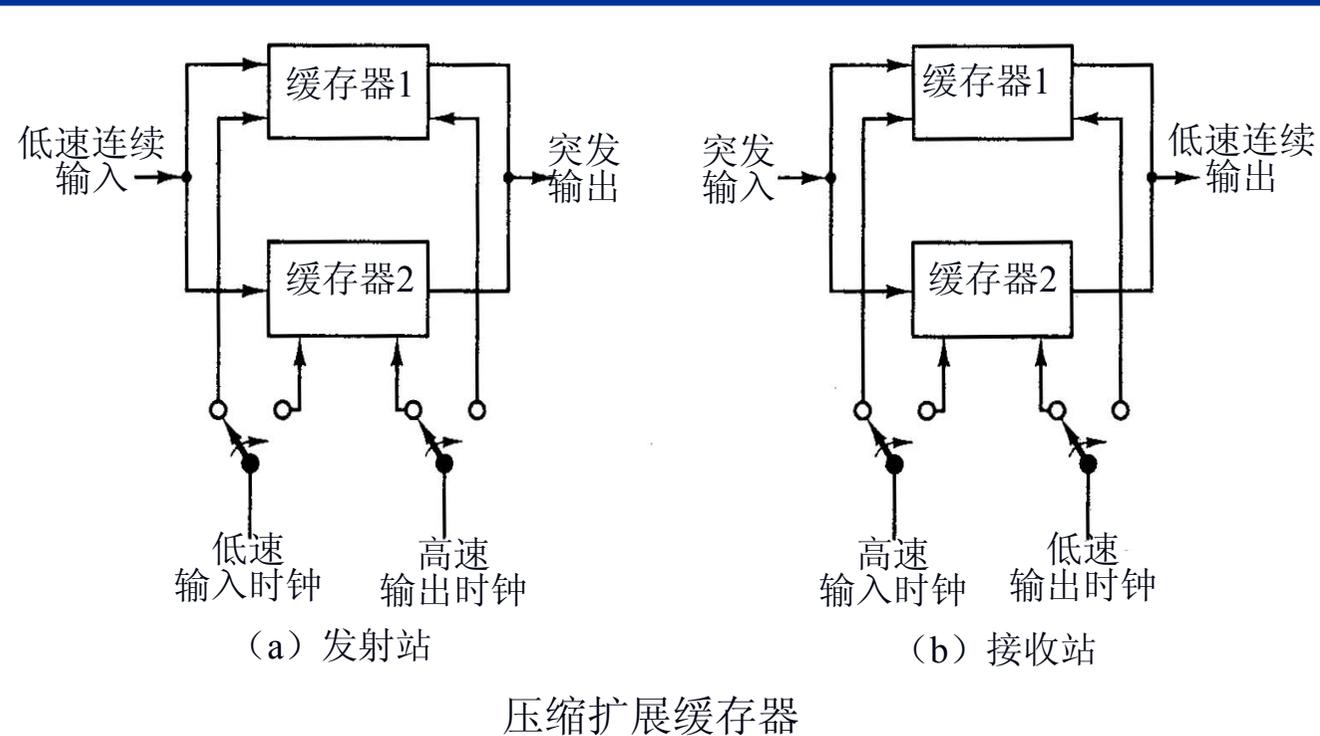
## ➤ 多路时分多址系统

### ■ 多路TDMA优缺点：

- 只需用一个载波，不会发生FDMA的交叉调制。
- 当需要和大量对象通信时，TDMA体制比FDMA经济
- 在多波束系统中，可以方便地实现每个波束和其他波束的通信。
- 在各地球站间以及地球站和卫星之间需要精确的同步系统，这增加了TDMA系统的复杂度和价格。

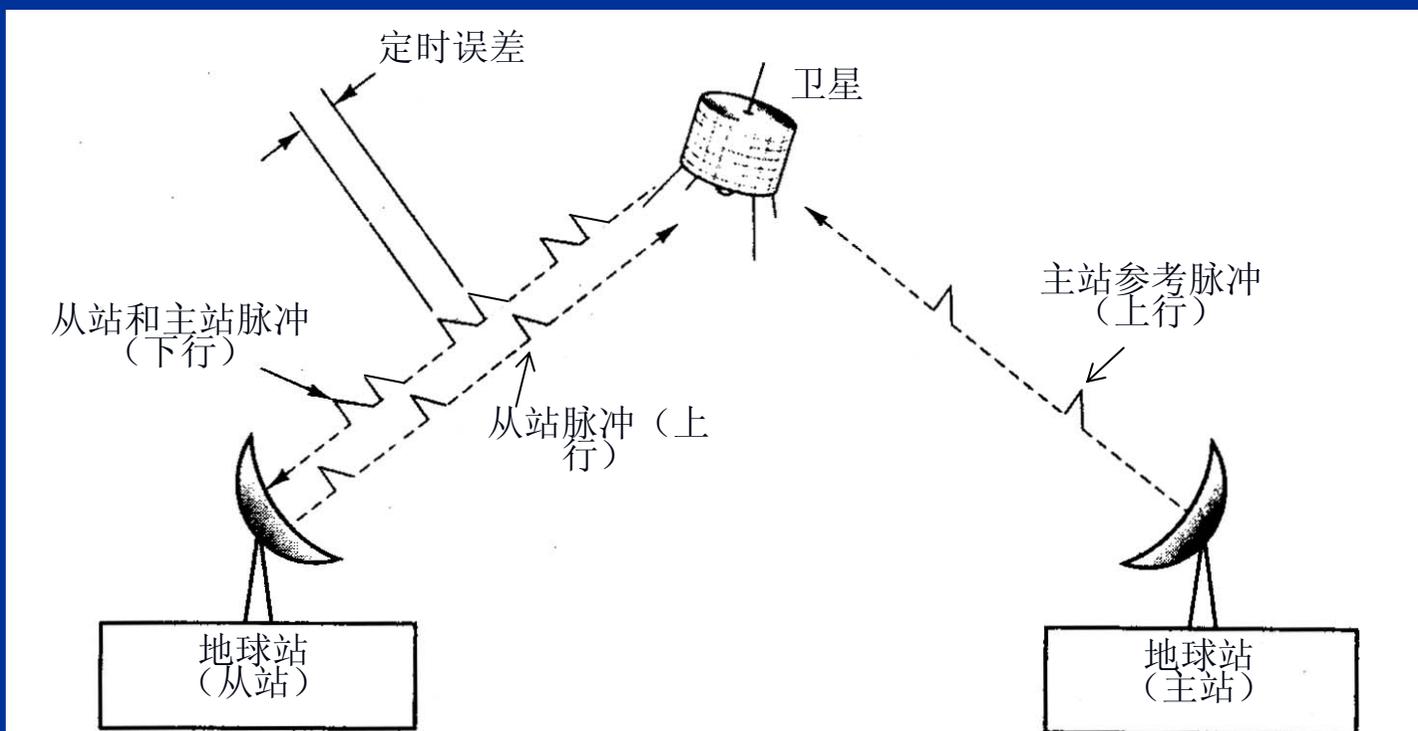
## ■ 工作原理：以INTELSAT系统为例

- 发射地球站：以低速连续数字流进入缓存器之一。另一个缓存器则用高速取出。在一个TDMA帧中，缓存器交替地工作。高速时钟必须精确控制突发时间。
- 接收地球站：接收到的突发信号存入一个扩展缓存器。另一个缓存器则以所需的低速取出。



## □同步方法:

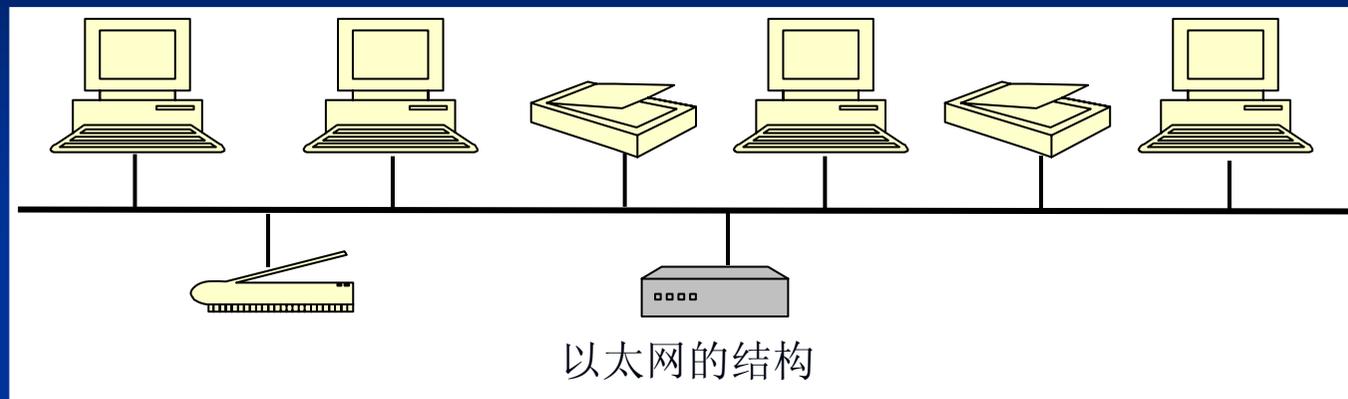
- 指定一个地球站为主站，它周期性地发射参考定时脉冲。
- 其他地球站为从站，它们也发射自己的定时脉冲。从站的下行链路除了接收自己发送的定时脉冲外，还收到主站发射的参考定时脉冲。两者的时间差就是主站和从站定时之间的误差。于是从站可以调整自己的时钟以减小此误差。



### 9.5.3 局域网中的多址技术

➤ 载波侦听/冲突检测多址(CSMA/CD)技术:

■ 例：以太网中应用



■ 基本原理:

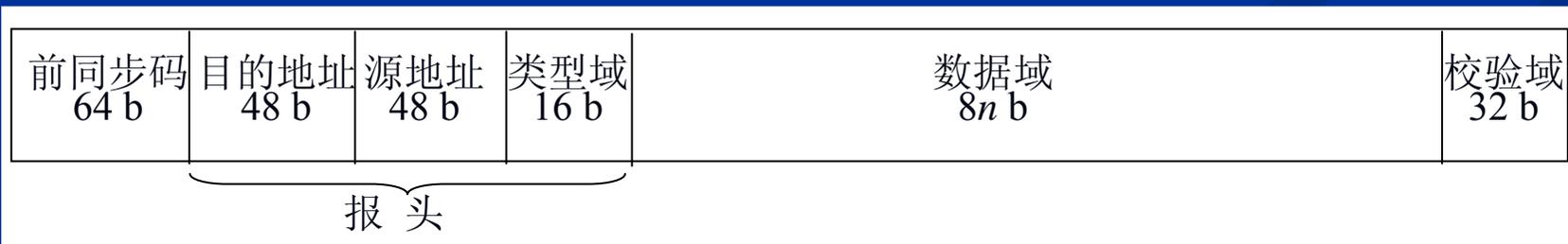
假设一个设备在接入网络之前能够侦听网络的状态。只有当侦听到电缆上没有其他信号传输时，才能向电缆上发送信号。

数据是分组传输的。

## ■ 数据格式:

- 每组数据的最大长度为**1526**字节，最小长度为**72**字节。每组分为：前同步码**8**字节，报头**14**字节，数据**1500**字节，校验码**4**字节。
- 组间最小间隔为**9.6 μs**。
- 前同步码包含**64**比特的“**1/0**”交替码，并且最后以两个比特“**11**”结束，即前同步码为(**101010...101011**)。
- 地址码的第**1**个比特指示地址类型（**0**表示单地址，**1**表示群地址）；地址码若为全“**1**”表示是向所有站广播。
- 类型域码决定数据域中的数据如何解释。例如，类型域中的码能用于表示数据编码、密码、消息优先级等。
- 校验域中校验码的生成多项式如下：

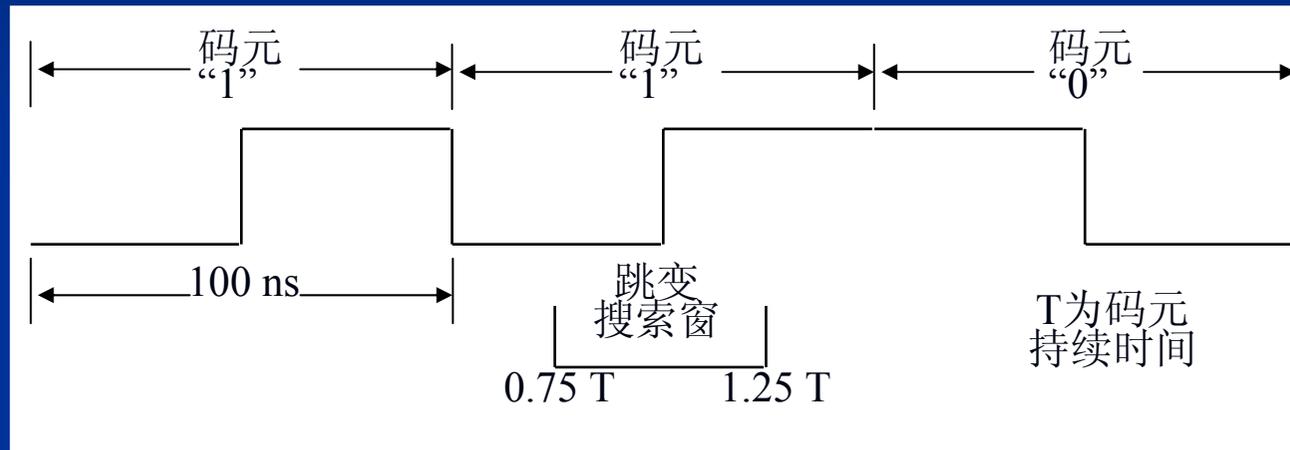
$$X^{32} + X^{26} + X^{23} + X^{22} + X^{16} + X^{12} + X^{11} + X^{10} + X^8 + X^7 + X^5 + X^4 + X^2 + X + 1$$



## ■ 接入步骤:

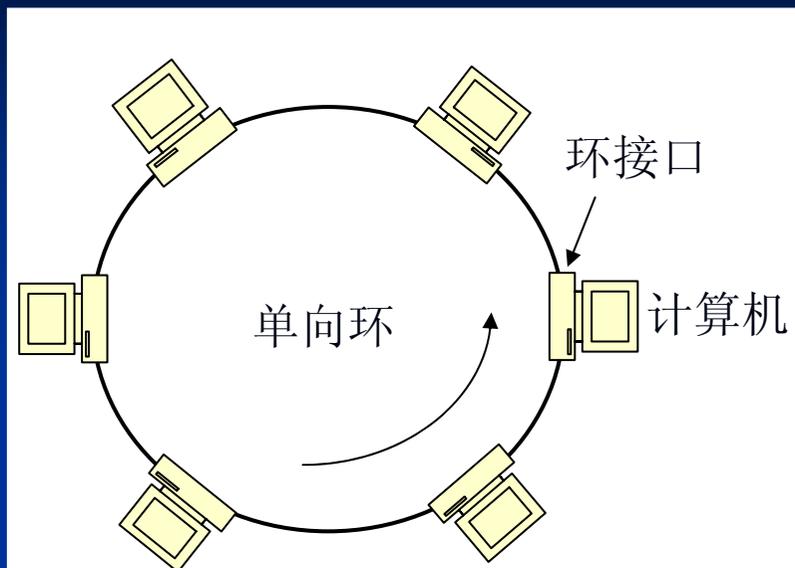
- 延缓: 当存在载波时或在最小组间隔时间内, 用户不能发送。
- 发送: 若没有检测到冲突或在一组结束时没有延缓, 用户可以发送。
- 中断: 若检测到冲突, 用户必须终止传输, 并发送一个短的阻塞信号, 以确保所有冲突方注意到此冲突。
- 重新发送: 用户必须等待一个随机延迟时间, 再试图重新发送。
- 退避: 延迟重新发送称为退避。第 $n$ 次试图发送之前的延迟时间是一个在 $0 \sim (2n - 1)$ 间均匀分布的随机数( $0 < n \leq 10$ )。对于 $n > 10$ , 此区间仍为 $0 \sim 1023$ 。重发延迟的时间单位是512 b(51.2  $\mu$ s)。

- 侦听方法：以双相码，10 Mb/s速率传输格式为例。
  - 存在跳变表明网上有载波存在。
  - 若从最后一次跳变开始在0.75 ~ 1.25个码元时间内看不到跳变，就表明载波没有了，即表示一组的终结。

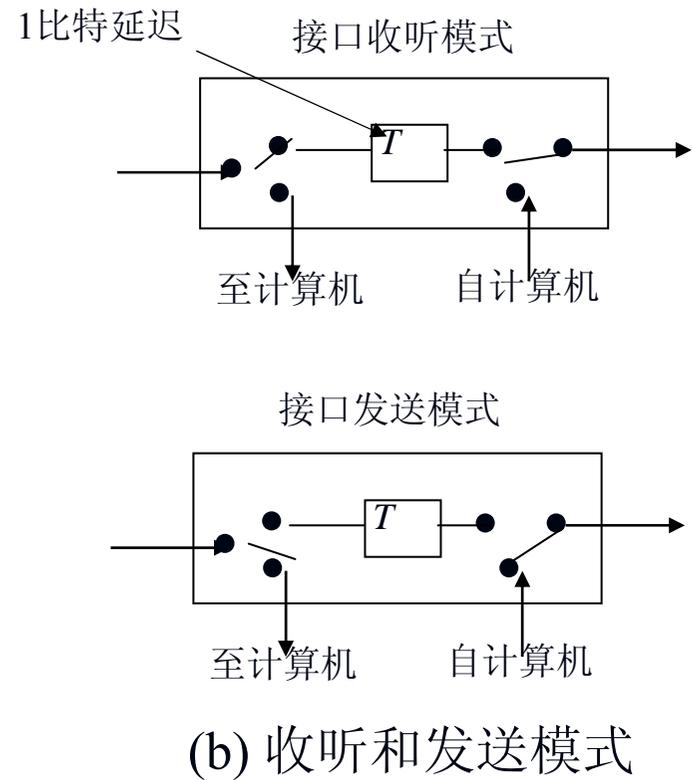


## ➤ 令牌环行多址技术

### ■ 典型单向令牌环形网的结构



(a) 令牌环形网



(b) 收听和发送模式

令牌环网络

## ■ 基本工作原理

- 接口有两种工作模式：收听和发送。
- 在收听模式下，接口将收到的比特流先收下，再转发出去，所以最小有1比特的延迟。
- 在发送模式下，环路断开，该计算机能将其数据发送到环上。
- 令牌是一个特定的码组（例如，1111111）。当环中所有计算机都空闲时，令牌在环中循环。
- 为了防止在信息数据中出现令牌码组，方法之一是采用填充比特。例如，若令牌为连续的8个“1”，则当信息数据中出现连续的7个“1”后就填入一个“0”。在接收时，连续收到7个“1”后，就将下一个“0”删除。

## ■ 工作过程:

- 希发送数据的站监视着接口处出现的令牌并将其截获；例如，当令牌的最后一个比特出现时，将它反转，使令牌变成11111110。然后，该站断开接口的连接，并将自己的数据发送到环上。数据是构成帧发送的。发送数据帧的长度没有限制。
- 当发送的数据帧在环上环行一周后回来时，该发送站可以对该帧进行检查，了解其传输是否正确。
- 在发送完这帧数据的最后一个比特之后，该站必须重新产生一个令牌。当发送的最后一比特数据环行一周返回后，将接口转换到收听模式。
- 在令牌环形网中不会发生争用情况。当网络繁忙时，只要某站重新产生了一个令牌，则沿环行方向下一个要求发送的站会将此令牌马上取走。这样，将沿环依次允许各站发送数据。因为环上只有一个令牌，所以没有争用情况。
- 在接口处于收听模式时，还应该时刻注意收到的比特流中有无本站地址。一旦发现本站地址，应立即将开关S闭合，使环上的该数据帧进入计算机，同时将该数据流转发到下一站。
- 当某站不工作（关闭）时，该站的接口既不在发送模式也不在收听模式，而是处于短路状态。

## ■ 令牌环形网长度的设计：

- 环网的总延迟时间不应小于令牌的“长度”。
- 最坏情况：当其他各站都处于关闭状态时，接口短路，环网只有电缆的延迟时间。
- 故总电缆长度应该使延迟时间不小于令牌“长度”。
- 例：

- 设信号发送速率是 $R$  Mb/s，则1码元占用  $(1/R)$  微秒。

信号在典型同轴电缆中的传播时间约为 $200$  m/ $\mu$ s，

- 所以，1码元在环上传输时相当占用 $200/R$ 米长度。

- 若令牌由8比特组成，信号发送速率为 $10$  Mb/s，则令牌的持续时间等于 $8/10$   $\mu$ s。

- 令牌在电缆上占用的长度将为 $200$  m/ $\mu$ s  $\times$   $(8/10)$   $\mu$ s =  $160$  m。

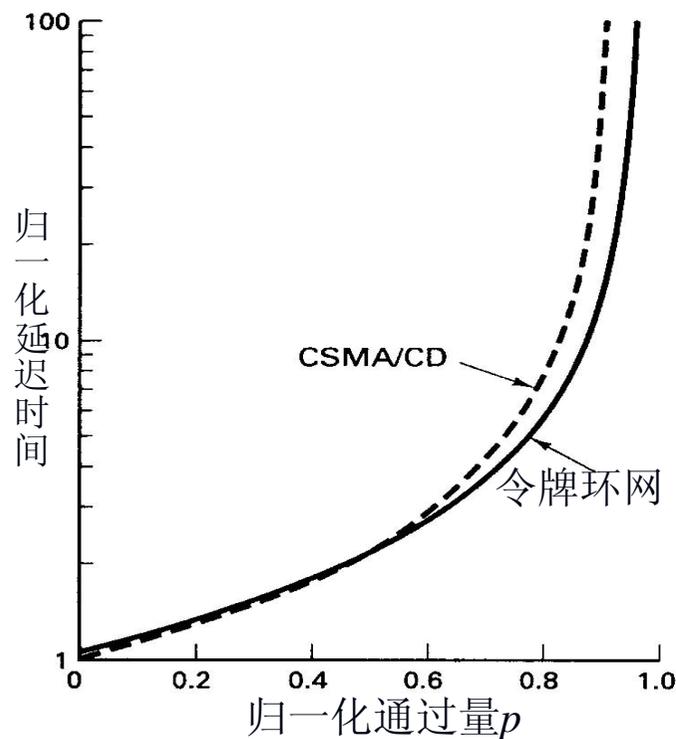
- 所以，此环网的电缆总长度不应小于 $160$  m。

- 令牌的设计：令牌必须不会出现在信息数据流中。

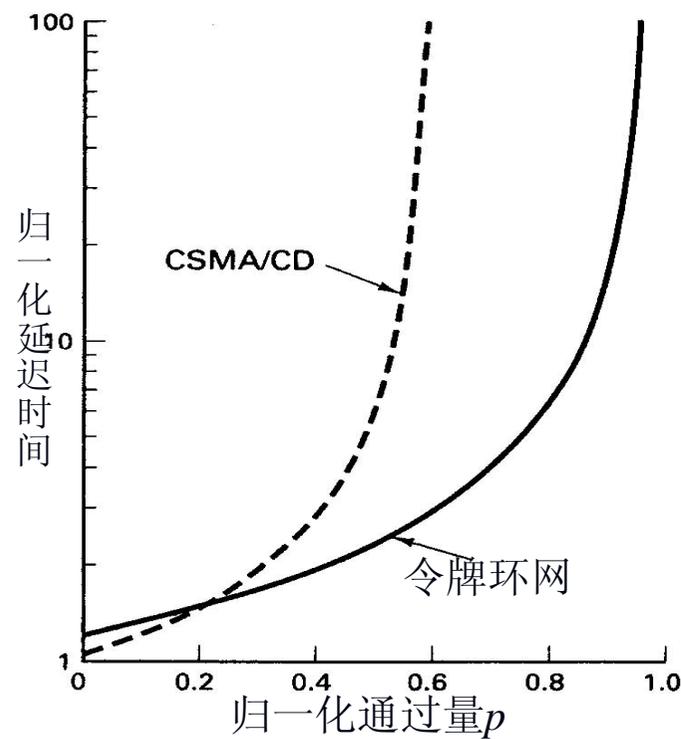
例如，若传输码元采用的是双相码，由于双相码在一个码元的中间必然出现电平突变，所以这时可以采用中间无突变的码型作为令牌。

## ➤ CSMA/CD网和令牌环网的性能比较

- 比较条件：电缆长度=2 km，网内有50个站，平均组（帧）长度是1000 b，报头长为24 b。
- 当传输速率=10 Mb/s时，若归一化通过量 $p > 0.22$ ，令牌环网好于CSMA/CD。这是因为当通过量大时，CSMA/CD网中频繁发生冲突，故延迟时间增大。



(a) 传输速率=1 Mb/s



(b) 传输速率=10 Mb/s

延迟时间和通过量的比较

## 9.6 小结