

《通信原理》

(12 模拟信号的数字化-PCM PDH)

蔡志岗

光学与光学工程系

中山大学理工学院

lasers@netease.com

13316105077

光信息实验室: **84110909**

中大光信息

第四章 模拟信号的数字传输

4.1 引言

4.2 抽样

4.3 量化

4.4 编码

4.7 增量调制

4.5 脉冲编码调制系统

4.6 差值脉冲编码

4.8 时分复用和多路数字电话系统

4.1~4.4小复习

PCM信号：抽样、量化、编码

(抽样)

(量化)

(编码)

自然二进制；折叠二进制；

A律13折线编码：

- 非均匀量化7位~均匀量化11位；

➤ 逐次比较型编解码原理（实现方法）

4.7 增量调制

ΔM 调制

1. 基本原理

2. 简单 ΔM 调制

a) 不过载

b) 动态范围

3. 性能

a) 抗噪声性能

b) 与PCM系统的比较

4.5 脉冲编码调制PCM系统

4.5.1 脉冲编码调制（PCM）原理

PCM的产生包含抽样、量化、编码三个步骤。它的功能是**完成模/数变换**，实现模拟信号的数字化。应当强调指出，抽样过程中，在满足抽样定理时，PCM系统能够做到无失真的重建。而量化过程始终存在**量化误差**，只不过误差的大小可以通过选择合适的量化方法和量化级数来控制。

声音：40~10000Hz → 电话：300~3400Hz

采样频率： $f_s=8000\text{Hz}$

8bit二进折叠码

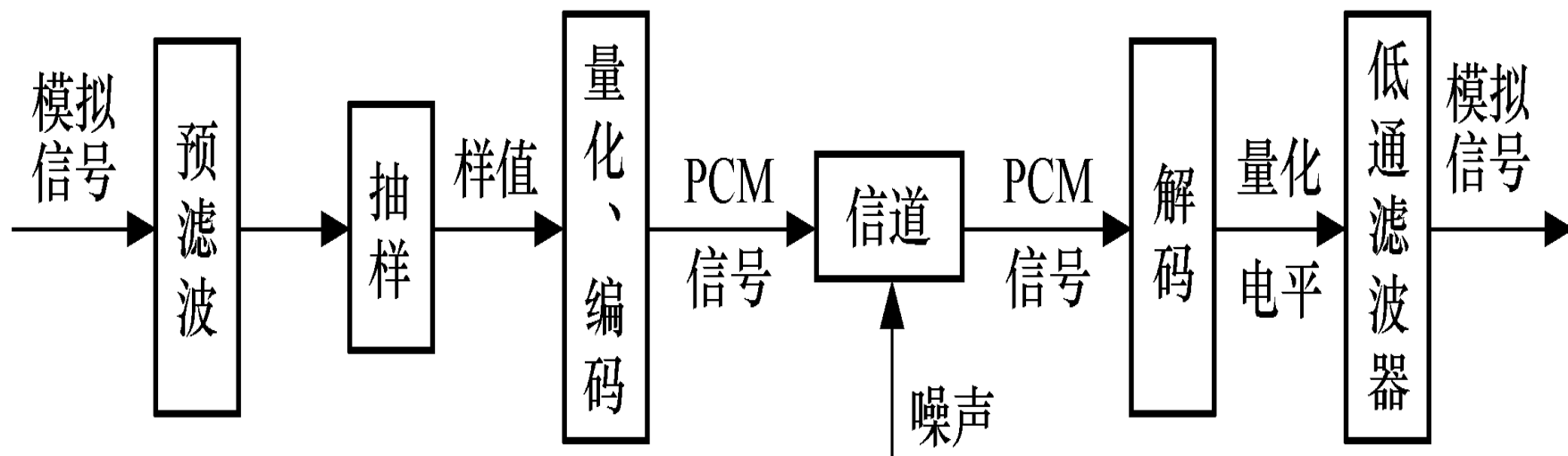


图4-25 PCM系统的原理图

4.5.2 PCM信号的码元速率和带宽

假定抽样频率为 f_s ，量化级数为 M 。二进制编码位数和量化级数满足 $M = 2^l$ 。通过抽样、量化、编码三个步骤，时间连续信号就用二进制代码来表示。因此，一个抽样周期 T_s 内要编 l 位码，每个二进制码元宽度为：

$$T_b = \frac{T_s}{l}$$

所以，二进制代码的**码元速率**为

$$R_B = \frac{1}{T_b} = \frac{l}{T_s} = l \cdot f_s = \log_2 M \cdot f_s \quad (4.5-1)$$

$$R_B = l \cdot f_s = 64k\text{Baud}$$

$$R_b = 64k\text{bit} / s$$

其中，**抽样频率**与抽样周期呈倒数关系的，即

$$f_s = \frac{1}{T_s}$$

$$T_s = \frac{1}{f_s} = 125\mu s$$

$$T_b = \frac{T_s}{l} = \frac{125}{8} = 15.625\mu s$$

PCM信号可以是直接的基带传输，也可以是频带传输，带宽与其传输方式有关，将在第5章和第6章作介绍。这里只讨论PCM信号采用矩形脉冲传输时的**第一零点带宽**。

当采用矩形脉冲传输时，所需要的**带宽B**与**脉冲宽度 τ** 成反比，第一零点带宽为 $B = 1/\tau$ 。

定义二进制码元的**占空比**为二进制脉冲宽度 τ 与二进制码元宽度 T_b 的比值，即

$$\text{占空比} = \frac{\tau}{T_b}$$

因此，已知二进制码元宽度 T_b 和占空比就能得到PCM信号的第一零点带宽。可见，码位 l 越多，码元宽度 T_b 越小，占用带宽 B 越大，信道利用率将下降。显然，传输PCM信号所需要的带宽要比模拟基带信号 $m(t)$ 的带宽大得多。

[例4. 8] 单路语音信号的最高频率为4000Hz，抽样频率为奈奎斯特抽样频率，以PCM方式传输。抽样后按照256级量化。设传输信号的波形为矩形脉冲，占空比为1。计算PCM基带信号第一零点带宽。

解： 因为抽样频率为奈奎斯特抽样频率，所以 $f_s = 2f_H = 8000Hz$ (4. 33)

因为量化级数 $M = 256$ ， 所以

$$R_B = \log_2 M \cdot f_s = 8 \times 8000 = 64000 \quad (4.34)$$

因为二进制码元速率 R_B 与二进制码元宽度 T_b 也是呈倒数关系的，所以：

$$T_b = 1/R_B \quad (4.35)$$

因为占空比为1，所以 $\tau = T_b$ ，则PCM基带信号第一零点带宽： $B = 1/\tau = 64000\text{Hz}$

4.5.3 PCM系统的抗噪声性能分析

影响PCM系统性能的主要噪声源有两种：一是**量化噪声**，二是**信道噪声**。由于两种噪声产生机理不同，可以认为它们是统计独立的。因此，我们可以先讨论它们单独存在时的系统性能，然后再分析它们共同存在时的系统性能。

考虑两种噪声时，如图4-25所示的PCM系统接收端低通滤波器的输出为

$$\hat{m}(t) = m_0(t) + n_q(t) + n_e(t) \quad (4.5-3)$$

式中， $m_0(t)$ 为输出端所需信号成分，其功率用 S_0 表示； $n_q(t)$ 为由量化噪声引起的输出噪声，其功率用 N_q 表示； $n_e(t)$ 为由信道加性噪声引起的输出噪声，其功率用 N_e 表示。

为了衡量PCM系统的抗噪声性能，通常将系统输出端总的信号噪声功率比定义为

$$\left(\frac{S_0}{N_0} \right)_{PCM} = \frac{E[m_o^2]}{E[n_q^2] + E[n_e^2]} = \frac{S_0}{N_q + N_e} \quad (4.37)$$

暂不考虑信道噪声，只考虑量化噪声对系统性能的影响。

假设输入信号 $m(t)$ 在区间 $[-a, a]$ 具有均匀分布的概率密度，发送端采用奈奎斯特抽样速率进行理想抽样，并对抽样值均匀量化，量化电平数为 M ，接收端通过理想低通滤波器恢复原始的模拟信号。通过推导，可以得到PCM系统输出端的平均量化信噪比：

$$\frac{S_0}{N_q} = M^2 = 2^{2l} \quad (4.38)$$

可见，PCM系统输出端的**量化信噪比**随着**编码位数按指数规律增加**。

而PCM系统带宽B随着编码位数 l 呈线性增加，所以PCM系统输出端的量化信噪比随系统的带宽B按指数规律增长。而模拟调制仅随带宽B按线性规律增长，这是PCM系统的优点之一。

加性噪声对PCM系统的影响

信道噪声对PCM系统性能的影响表现在接收端的判决误码上。由于PCM信号中每一码字代表着一定的量化值，所以若出现误码，被恢复的量化值将与发端原抽样值不同，从而引起误差，带来**误码噪声**。

假设加性噪声为**高斯白噪声**，每一码字中出现的误码可以认为是彼此独立的，并设每个码元的误码率皆为 P_e ，只考虑仅有1位误码的码字错误。

通过推导，由误码产生的平均功率为

$$N_e = P_e \sum_{i=1}^l \left(2^{i-1} \Delta \right)^2 = \Delta^2 P_e \frac{2^{2l} - 1}{3} \approx \Delta^2 P_e \frac{2^{2l}}{3}$$

(4.40)

同时考虑**量化噪声**和**信道加性噪声**时，得到PCM系统输出端的总信噪功率比为

$$\left(\frac{S_0}{N_0} \right)_{PCM} = \frac{S_0}{N_q + N_e} = \frac{(S_o / N_q)}{1 + 4P_e 2^{2l}} \quad (4.41)$$

其中 (S_o / N_q) 表示PCM系统输出端的平均量化信噪比。

由式 (4.41) 可知，在小信噪比的条件下，即 $4P_e 2^{2l} \ll 1$ 时，误码噪声起主要作用，总信噪比与误码率成反比。

在大信噪比的条件下，即 $4P_e 2^{2l} \ll 1$ 时，可以忽略误码带来的影响，只考虑量化噪声的影响就可以了，此时

$$\left(\frac{S_0}{N_0} \right)_{PCM} \approx \frac{S_0}{N_q} = 2^{2l} \quad (4.43)$$

一般说来，基带传输的PCM系统中，误码率容易降到 10^{-6} 以下，所以可采用上式来估计PCM系统的性能。

小复习

PCM信号的传输速率和带宽：

- 采样频率，采样周期；
- 码元速率，码元宽度；

➤ 时分复用；多路电话系统；

◆ TDM-PAM

◆ TDM-PCM

- 帧结构
 - 路时隙
 - 位时隙
- 数字复接技术
- PDH

4.8 时分复用和多路数字电话系统

时分复用（TDM）是建立在抽样定理基础上的。抽样定理指明：满足一定条件下，时间连续的模拟信号可以用时间上离散的抽样脉冲值代替。因此，如果**抽样脉冲占据较短时间**，在抽样脉冲之间就留出了**时间空隙**，利用这种空隙便可以传输其它信号的抽样值。

时分复用 (TDM)

时分复用就是利用**各路信号**的抽样值在时间上**占据不同的时隙**，来达到在**同一信道中传输多路信号而互不干扰**的一种方法。

与频分复用 (FDM) 相比，时分复用 (TDM) 具有以下的主要优点：

(1) TDM多路信号的合路和分路都是数字电路，比FDM的模拟滤波器分路简单、可靠。

(2) 信道的非线性会在FDM系统中产生交调失真和多次谐波，引起路间干扰，因此FDM对信道的非线性失真要求很高。而TDM系统的非线性失真要求可降低。

4.8.1 时分复用的PAM系统（TDM-PAM）

我们通过举例来说明时分复用技术的基本原理，假设有**3路PAM信号**进行时分复用，其具体实现方法如图所示。各路信号首先通过相应的低通滤波器（预滤波器）变为**频带受限**的低通型信号。然后再送至**旋转开关**（抽样开关），每秒将各路信号依次抽样一次，在信道中传输的合成信号就是3路在时间域上周期地互相错开的PAM信号，即TDM-PAM信号。

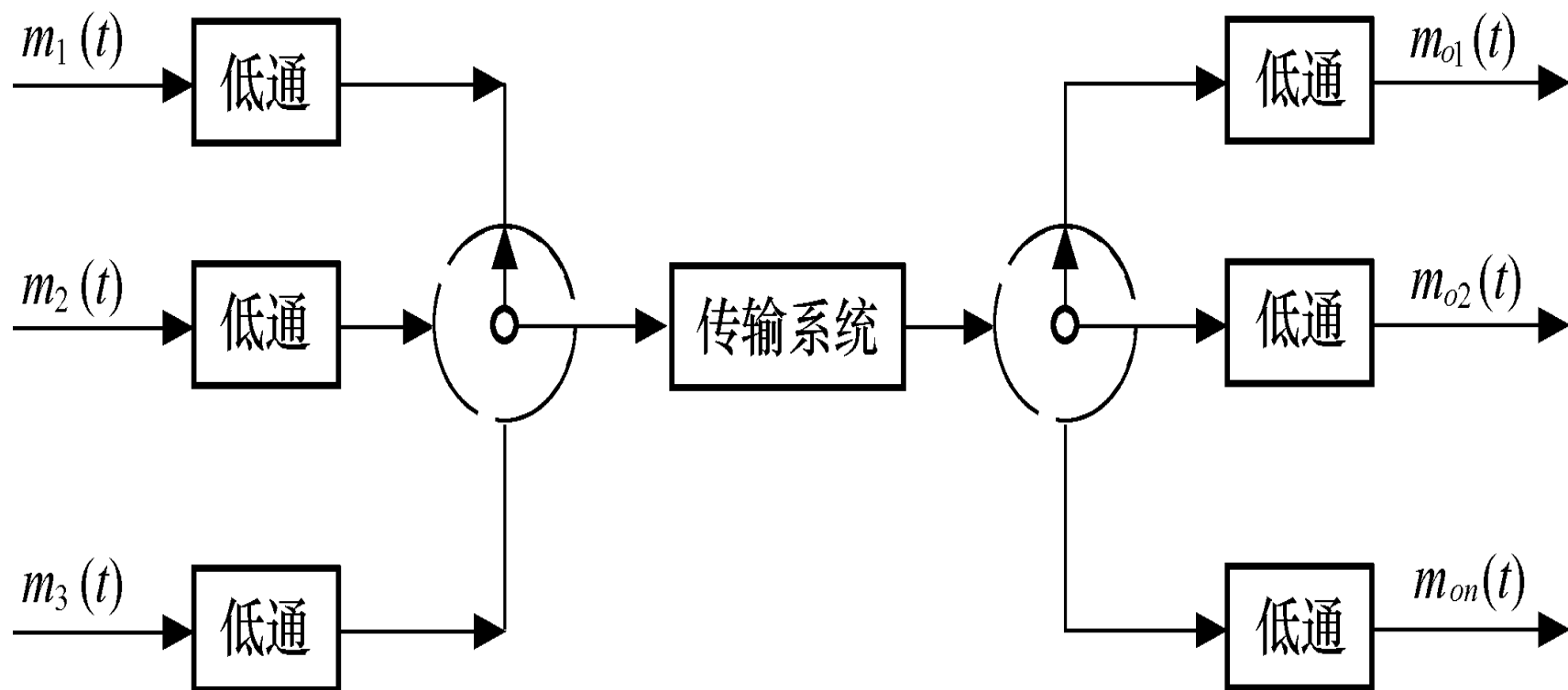
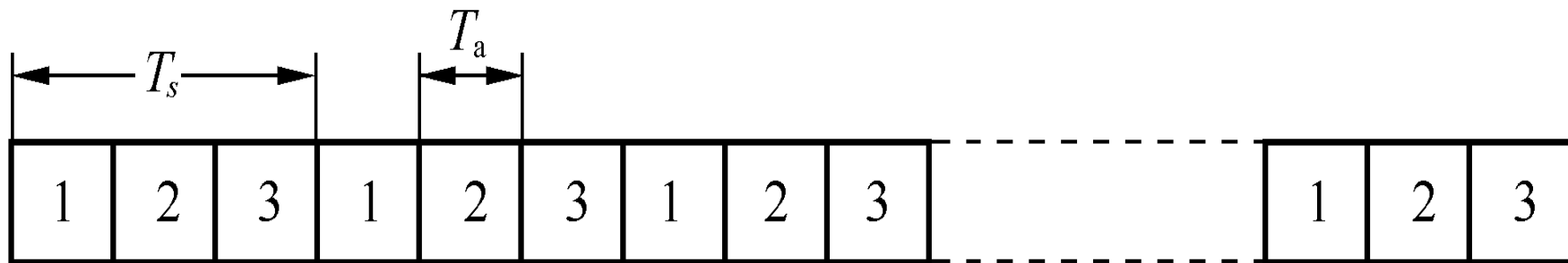


图 3路PAM信号时分复用原理图

抽样时各路每轮一次的时间称为**一帧**，长度记为 T_s ，它就是旋转开关旋转一周的时间，即**一个抽样周期**。一帧中相邻两个抽样脉冲之间的时间间隔叫做**路时隙**（简称为时隙），即每路PAM信号每个样值允许占用的时间间隔，记为 $T_a = T_s/n$ ，这里复用路数 $n=3$ 。3路PAM信号时分复用的帧和时隙如下图所示。



采样频率 = $f_s = 8000\text{Hz}$

采样周期(一帧) = $T_s = 125\mu s$

路时隙 = $T_a = \frac{T_s}{n}$

路时隙 = $T_a = \frac{T_s}{n}$

上述概念可以推广到 n 路信号进行时分复用。多路复用信号可以直接送入信道进行基带传输，也可以加至调制器后再送入信道进行频带传输。

在接收端，合成的时分复用信号由**旋转开关**（分路开关，又称**选通门**）依次送入各路相应的低通滤波器，重建或恢复出原来的模拟信号。需要指明的是，TDM中发送端的抽样开关和接收端的分路开关必须保持**同步**。

TDM-PAM系统目前在通信中几乎不再采用。
抽样信号一般都在量化和编码后以数字信号的形式传输，目前电话信号采用最多的编码方式是PCM和DPCM。

4. 8. 2 时分复用的PCM系统（TDM-PCM）

PCM和PAM的区别在于PCM要在PAM的基础上再进行量化和编码。

为简便起见，假设3路话音信号PCM复用的原理方框图如后图所示。

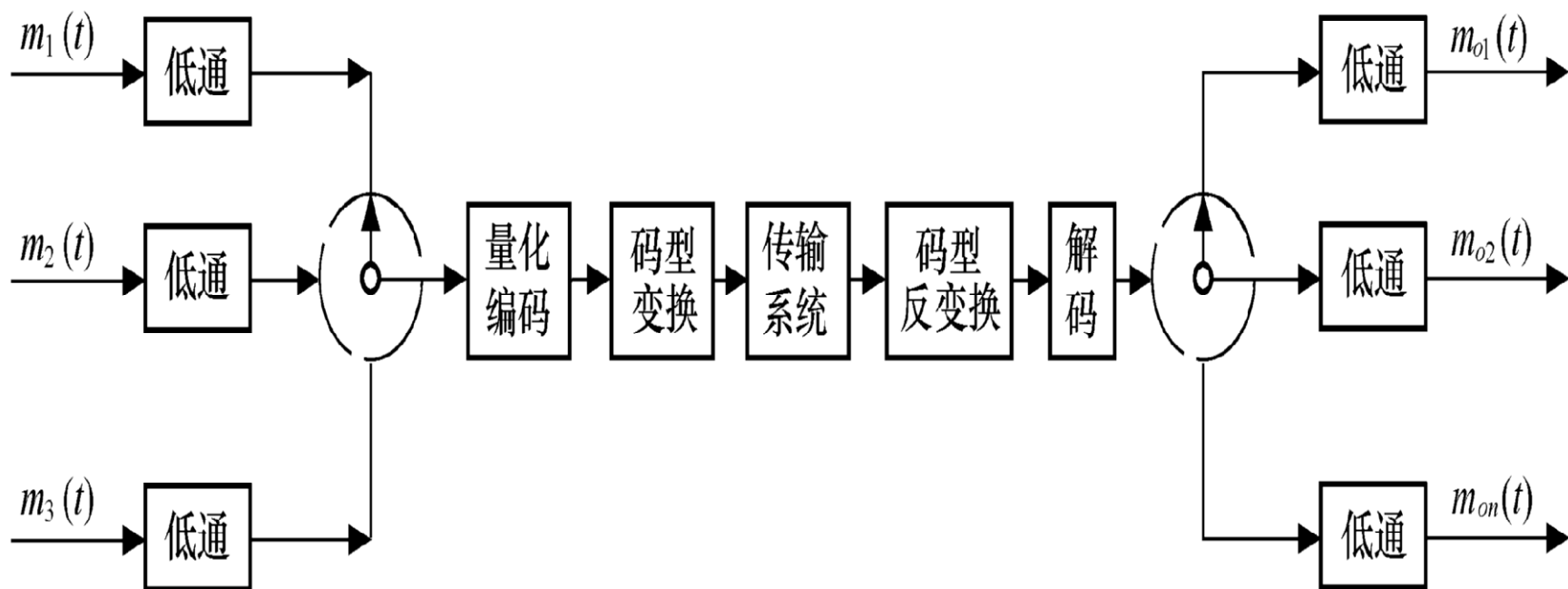


图4-31 3路PCM信号时分复用原理图

在发送端，3路话音信号 $m_1(t)$ 、 $m_2(t)$ 和 $m_3(t)$ 经过低通滤波后成为最高频率为 f_H 的低通型信号，再经过抽样得到3路PAM信号，它们在时间上是分开的，由各路发送的定时取样脉冲进行控制，然后将3路PAM信号一起进行量化和编码，每个PAM信号的抽样脉冲经量化后编为L位二进制代码。最后选择合适的传输码型，经过数字传输系统（基带传输或频带传输）传到接收端。

在接收端，收到信码后，首先经过**码型反变换**，然后加到解码器进行**解码**。解码后得到的是3路合在一起的PAM信号，再经过分路开关把各路PAM信号区分开来，最后经过低通滤波重建原始的话音信号 $m_{01}(t)$ 、 $m_{02}(t)$ 和 $m_{03}(t)$ 。

TDM-PCM系统的二进制代码在每一个抽样周期内有 $n \cdot l$ 个，这里 n 表示复用路数，

表示每个抽样值编码的二进制码元位数 l 。
一位二进制码占用的时间称为**位时隙**，长度记为 T_b 。容易得到：

$$T_b = \frac{T_s}{n \cdot l} = \frac{T_a}{l}$$

其中， T_s 为**一帧**的长度， $T_a = T_s / n$ 为**路时隙**。

$$\text{采样频率} = f_s = 8000\text{Hz}$$

$$\text{采样周期 (一帧)} = T_s = 125\mu s$$

$$\text{路时隙} = T_a = \frac{T_s}{n}$$

$$\text{位时隙} = T_b = \frac{T_a}{1}$$

4.8.3 时分复用信号传输速率

一、TDM信号的码元速率

1、TDM-PAM信号

对于n路频带都是的TDM-PAM信号，每秒钟的脉冲个数为 $n \cdot f_s$ ，即码元速率：

$$R_B = n \cdot f_s (\text{Baud})$$

这里n表示复用路数， f_s 表示一路信号的抽样频率。

2、TDM-PCM信号

通过抽样、合路、量化、编码这几个步骤，容易看出TDM-PCM的信号的二进制码元速率为：

$$R_B = n \cdot l \cdot f_s (\text{Baud})$$

这里 n 表示复用路数， $l = \log_2 M$ 表示每个抽样值编码的二进制码元位数， M 为对抽样值进行量化的量化级数； f_s 表示一路信号的抽样频率。

二进制——1bit

因为, 二进制码元速率 $R_B = n \cdot l \cdot f_s$ (波特)

所以, 对应的信息速率 $R_b = n \cdot l \cdot f_s$ (bit/s)。

二、TDM信号的带宽

得到码元速率后，按照PCM带宽的计算方法容易得到TDM-PAM信号和TDM-PCM信号传输波形为矩形脉冲时的第一零点带宽。

$$B = 1 / \tau$$

[例] 对10路最高频率为3400Hz的话音信号进行TDM-PCM传输，抽样频率为8000Hz。抽样合路后对每个抽样值按照8级量化，并编为自然二进码，码元波形是宽度为的矩形脉冲，且占空比为0.5。计算TDM-PCM基带信号的第一零点带宽。

解： 二进制码元的速率为：

$$\begin{aligned} R_B &= n \cdot l \cdot f_s \\ &= n \cdot \log_2 M \cdot f_s = 10 \times 3 \times 8000 \\ &= 240000(Baud) \end{aligned}$$

因为二进制码元速率与二进制码元宽度也是呈倒数关系的，所以：

$$T_b = 1/R_B = 4.16 \mu s \quad \square$$

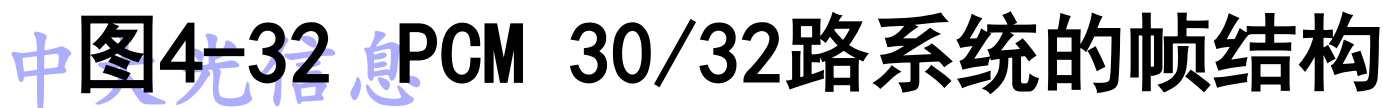
因为占空比为0.5，所以 $\tau = 0.5T_b$ ，则PCM基带信号第一零点带宽：

$$B = 1 / \tau = \frac{R_B}{0.5} = 4800000 \text{ Hz}$$
$$= 480 \text{ kHz} \quad n=10, l=3 \text{ bit}$$

4. 8. 4 PCM30/32路系统的帧结构

对于多路数字电话系统，国际上有两种标准化制式，即PCM 30/32路制式（E体系）和PCM 24路制式（T体系）。

我国规定采用的是PCM 30/32路制式（E体系），一帧共有32个时隙，可以传送30路电话，即复用的路数 $n=32$ 路，其中话路数为30。PCM 30/32路系统的帧结构如图4-32所示。



从图中可以看到，在PCM 30/32路的制式中，一个复帧由16帧组成，一帧由32个时隙组成，一个时隙有8个比特。

对于PCM30/32路系统，由于**抽样频率为8000Hz**，因此，**抽样周期**（即PCM 30/32路的帧周期）为 $1/8000=125\mu\text{s}$ ；一个复帧由16帧组成，这样复帧周期为2ms；一帧内包含32路，则每**路**占用的**时隙**为 $125/32=3.91\mu\text{s}$ ；每时隙包含8位折叠二进制，因此，**位时隙**占**488ns**。

$$\text{采样周期(一帧)}=\mathbf{T_s}=\frac{\mathbf{1}}{\mathbf{8000}}=125\mu s$$

$$\text{路时隙}=\mathbf{T_a}=\frac{\mathbf{T_s}}{\mathbf{n}}=\frac{125}{32}=3.91\mu s$$

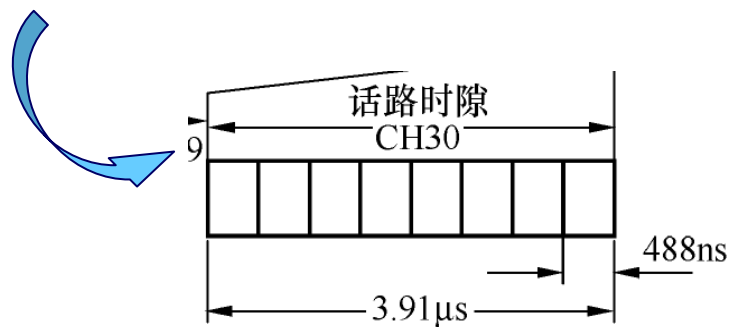
$$\text{位时隙}=\mathbf{T_b}=\frac{\mathbf{T_a}}{\mathbf{1}}=\frac{3.91}{8}=488.3ns$$

PCM30/32体系



采样周期(一帧)= $T_s=125\mu s$ $f_s=8000\text{Hz}$

路时隙= $T_a = \frac{T_s}{n} = \frac{T_s}{32} = 3.91\mu s$



位时隙= $T_b = \frac{T_a}{1} = \frac{3.91}{8} = 488.3ns$



$$\text{采样周期(一帧)} = T_s = \frac{1}{8000} = 125\mu s$$

$$f_s = 8000Hz$$

$$\text{路时隙} = T_a = \frac{T_s}{n} = \frac{125}{32} = 3.91\mu s$$

$$R_{\text{路}} = \frac{1}{T_a} = 256kHz$$

$$\text{位时隙} = T_b = \frac{T_a}{1} = \frac{3.91}{8} = 488.3ns$$

$$R_{\text{位}} = \frac{1}{T_b} = 2.048MHz$$

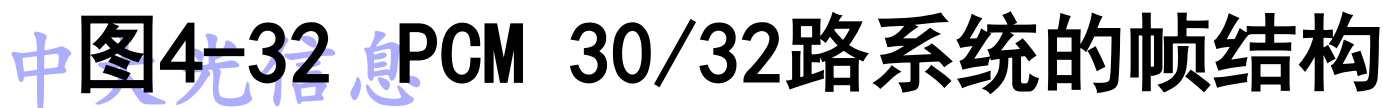
中大光信息

从传输速率来讲，每秒钟能传送8000帧，而每帧包含 $32 \times 8 = 256 \text{ bit}$ ，因此，

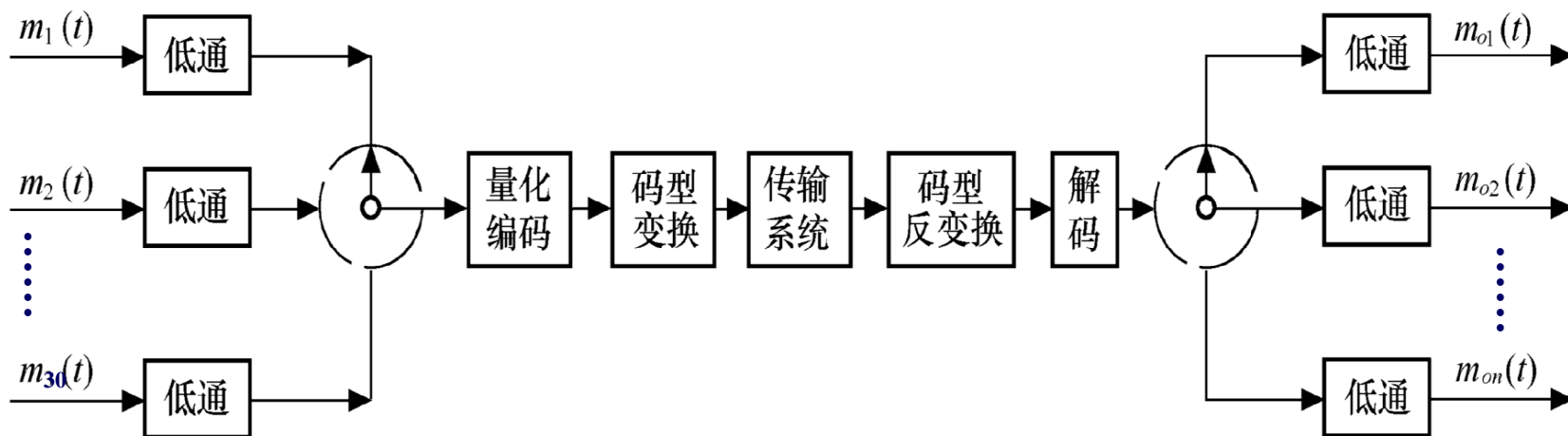
- 传码率为 $256 \times 8000 = 2.048 \text{ MBaud}$
- 信息速率为 2.048 Mbit/s 。

PCM 30/32路系统的一帧由32个时隙组成
其中包括：

一、30个话路时隙： $TS_1 \sim TS_{15}$ ， $TS_1 \sim TS_{15}$ 分别传输第1-15路（ $CH_1 \sim CH_{15}$ ）话音信号， $TS_{17} \sim TS_{31}$ 分别传输第16-30路（ $CH_{16} \sim CH_{30}$ ）话音信号。在话路时隙中，第1比特为极性码，第2-4比特为段落码，第5-8比特为段内码。



发送信令的速率是 $f_s/16=500\text{Hz}$



$$f_{\text{信令}} = 1/2.0\text{ms} = 500\text{Hz}$$



$$f_{\text{信令}} = f_s/16 = 1/T_s/16 = 500\text{Hz}$$

(2) 帧同步时隙：TS0

为了实现帧同步，**偶帧**要传送一组特定标志的帧同步码字，码型为“**0011011**”，占用偶帧TS₀的第2~8位；**奇帧**发送帧失步告警码A₁，占用奇帧TS₀的第3位，当帧同步时，A₁=0，帧失步时，A₁=1。

(3) 信令时隙：TS16

在传送话路信令时，PCM30/32路系统采用共路信令传送方式，将TS16所包含的64kb_{it}/s集中起来用来传送30个话路的信令信号，这时必须将16个帧构成一个复帧。

每路信令只有4个比特，频率为500Hz，即每隔2ms传输一次。由于一个复帧的长度为2ms，一个复帧有16个帧，即有16个TS16（每时隙8个比特）。

- 时隙**TS16**的功能：可以用于传输**信令**，但是当无需用于传输信令时，它也可以像其他**30**路一样用于传输语音。
- **信令**是电话网中传输的各种控制和业务信息，例如电话机上由键盘发出的电话号码信息等。
- **信令**允许程控交换、网络数据库、网络中其它“智能”节点交换下列有关信息：
 - 呼叫建立 (**Call Setup**)
 - 监控 (**Supervision**)
 - 拆除 (**Teardown**)
 - 分布式应用程序：进程；用户到用户的数据
 - 网络管理信息

每帧TS16就可以传送2个话路的信令信号，每路信令信号的4个比特用a、b、c、d表示。除了 F_0 之外，其余 $F_1 \sim F_{15}$ 用来传送30个话路的信令码。

第1-15路（CH1 ~ CH15）的信令码分别占用 $F_1 \sim F_{15}$ 帧的TS16的前4位，第16 ~ 30路（CH16 ~ CH30）的信令码分别占用 $F_1 \sim F_{15}$ 帧的TS16的后4位。例如第20路的信令码占用 F_5 帧的TS16时隙中的后4位。

4.8.5 PCM高次群系统

前面讨论的PCM 30/32路和PCM 24路时分多路系统，称为**数字基群**（即一次群）。为了使宽带信号（如电视信号）通过PCM系统传输，就要求有较高的传码率。因此提出了采用数字复接技术把较低群次的数字流汇合成更高速率的数字流，以形成PCM高次群系统。CCITT推荐了两种一次、二次、三次和四次群的数字等级系列，如表所示。

表 数字复接系列（准同步数字系列）

		一次群（基群）	二次群	三次群	四次群
中国 欧洲	群路等级	E-1	E-2	E-3	E-4
	路数	30 路	120 路（30×4）	480 路（120×4）	1920 路（480×4）
	比特率	2.048Mbit/s	8.448Mbit/s	34.368Mbit/s	139.264Mbit/s
北美	群路等级	T-1	T-2	T-3	T-4
	路数	24 路	96 路（24×4）	672 路（96×7）	4032 路（672×6）
	比特率	1.544Mbit/s	6.312Mbit/s	44.736Mbit/s	274.176Mbit/s
日本	群路等级	T-1	T-2	T-3	T-4
	路数	24 路	96 路（24×4）	480 路（96×5）	1440 路（480×3）
	比特率	1.544Mbit/s	6.312Mbit/s	32.064Mbit/s	97.728Mbit/s

复接系列具有如下优点：

- 易于构成通信网，便于分支与插入。
- 复用倍数适中，具有较高效率。
- 可视电话、电视信号以及频分制载波信号能与某一高次群相适应。
- 与传输媒质，比如电缆、同轴电缆、微波、波导、光纤等传输容量相匹配。

准同步数字系列（PDH）

PCM高次群都是采用准同步方式进行复接的，称为**准同步数字系列（PDH）**。

和一次群需要额外的开销一样，高次群也需要额外的开销，由表7.3-1可以看出，高次群都比相应的低次群平均每路的比特率还高一些，虽然此额外开销只占总比特率很小的百分比，但是当总比特率增高时，此开销的绝对值还是不小的，这就很不经济。

数字通信系统，除了传输**电话**外，也可传输其它相同速率的数字信号，例如**可视电话**、**频分制载波信号**以及**电视信号**。

为了提高通信质量，这些信号可以单独变为数字信号传输，也可以和相应的PCM高次群一起复接成更高一级的高次群进行传输。基于PCM30/32路系列的数字复接体制的结构如图所示。

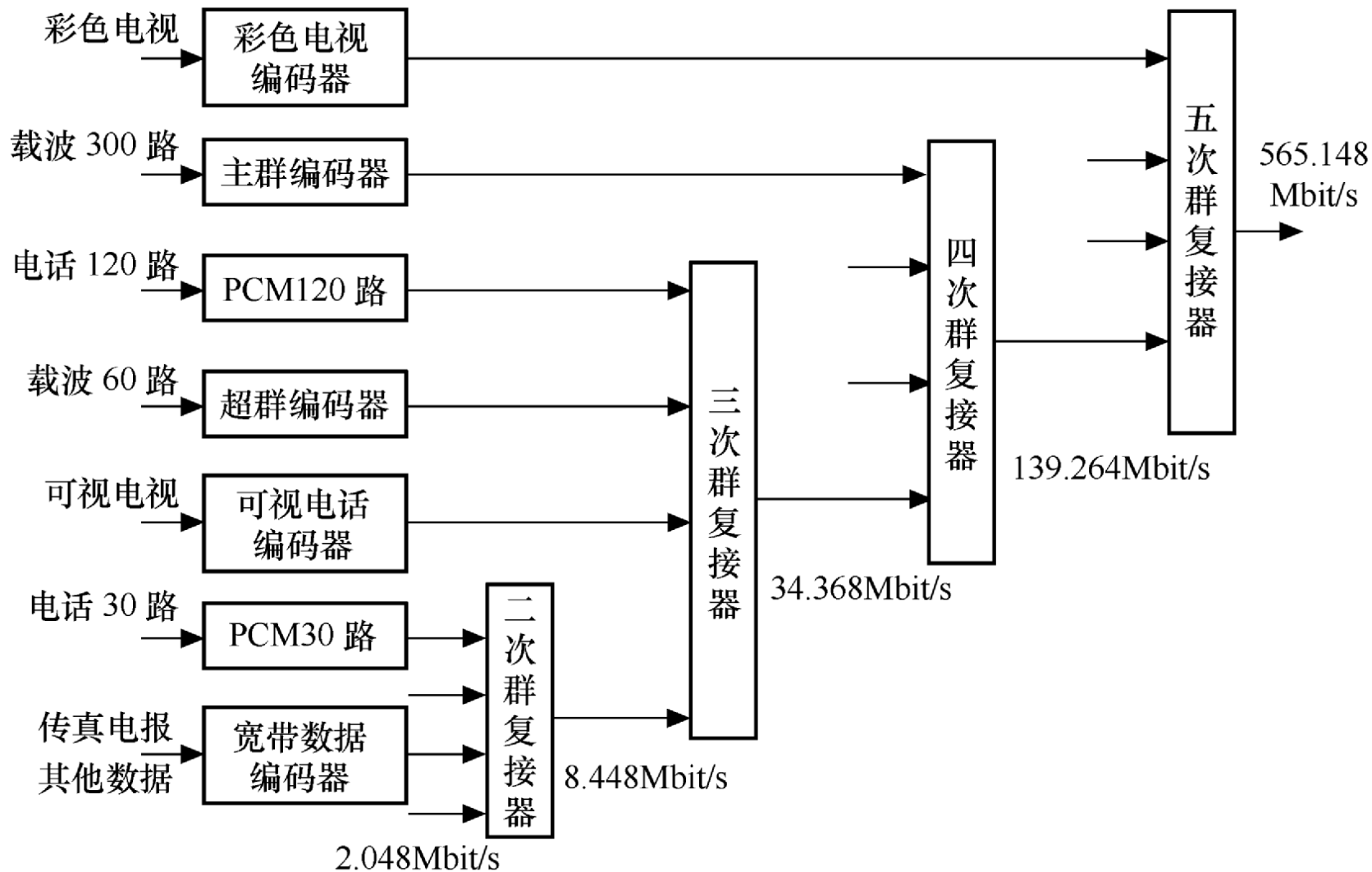


图 基于PCM30/32路系列的数字复接体制
中大光信息

复接和分接

- **复接**：将低次群合并成高次群的过程。

在通信网中往往有多次复用，由若干链路来的多路时分复用信号，再次复用，构成**高次群**。各链路信号来自不同地点，其时钟（频率和相位）之间存在误差。所以在低次群合成高次群时，需要将各路输入信号的时钟调整统一。

- **分接**：将高次群分解为低次群的过程称为分接。
 - 目前大容量链路的复接几乎都是**TDM**信号的复接。
- **标准**：关于复用和复接，**ITU**对于**TDM**多路电话通信系统，制定了两种准同步数字体系(**PDH**)和两种同步数字体系(**SDH**)标准的建议。

准同步数字体系(PDH)

ITU提出的两个建议：

- **E体系** — 我国大陆、欧洲及国际间连接采用
- **T体系** — 北美、日本和其他少数国家和地区采用，

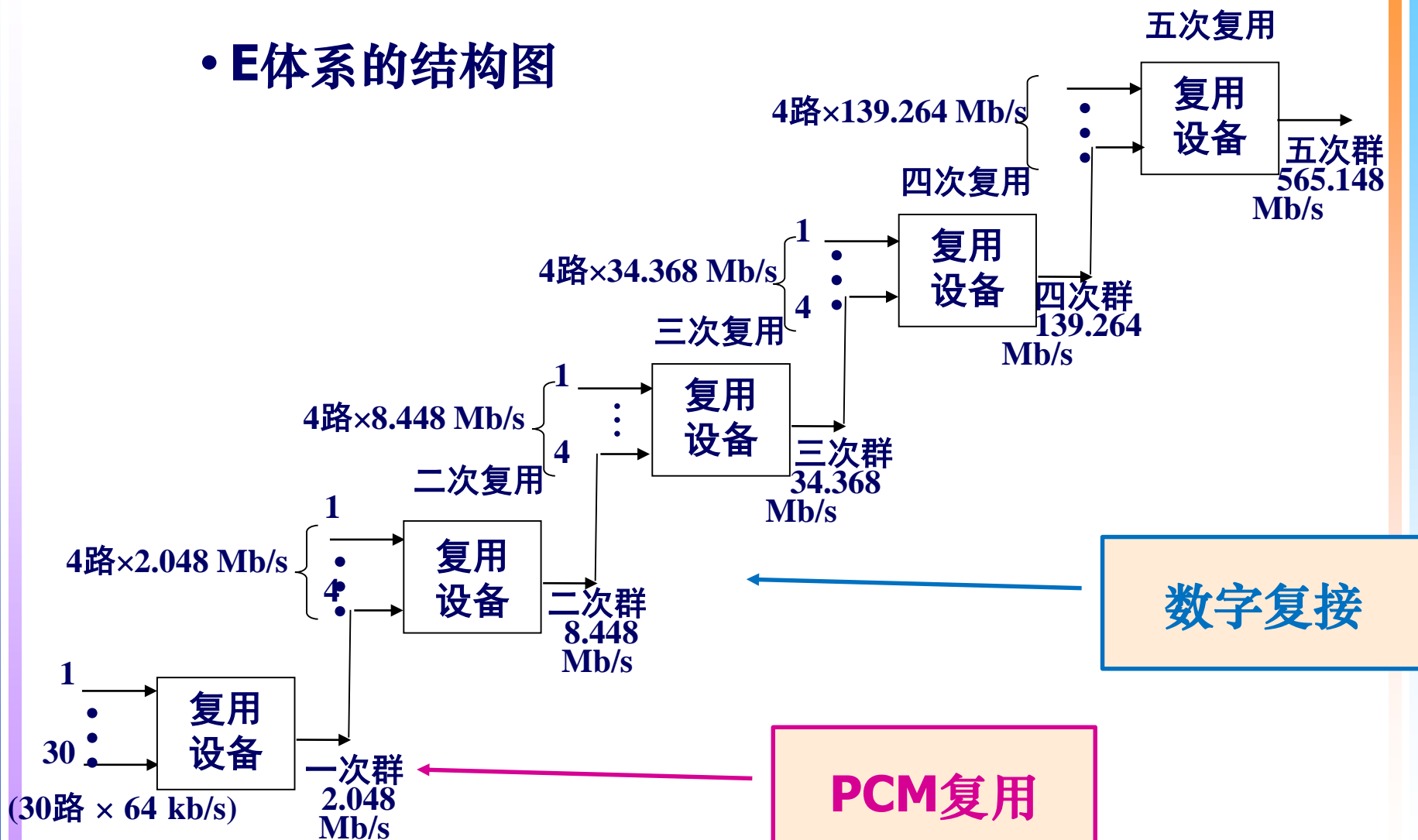
差异在于复接话路的个数有所不同。

E体系 vs. T体系

	层次	比特率 (Mb/s)	路数 (每路 64kb/s)	复接路数
E 体系	E - 1	2.048	30	
	E - 2	8.448	120	×4
	E - 3	34.368	480	×4
	E - 4	139.264	1920	×4
	E - 5	565.148	7680	×4
T 体系	T - 1	1.544	24	
	T - 2	6.312	96	×4
	T - 3	32.064 (日本)	480	×5
		44.736 (北美)	672	×7
	T - 4	97.728 (日本)	1440	×3
		274.176 (北美)	4032	×6
	T - 5	397.200 (日本)	5760	×4
		560.160 (北美)	8064	×2

E体系的结构图

• E体系的结构图



E体系的速率:

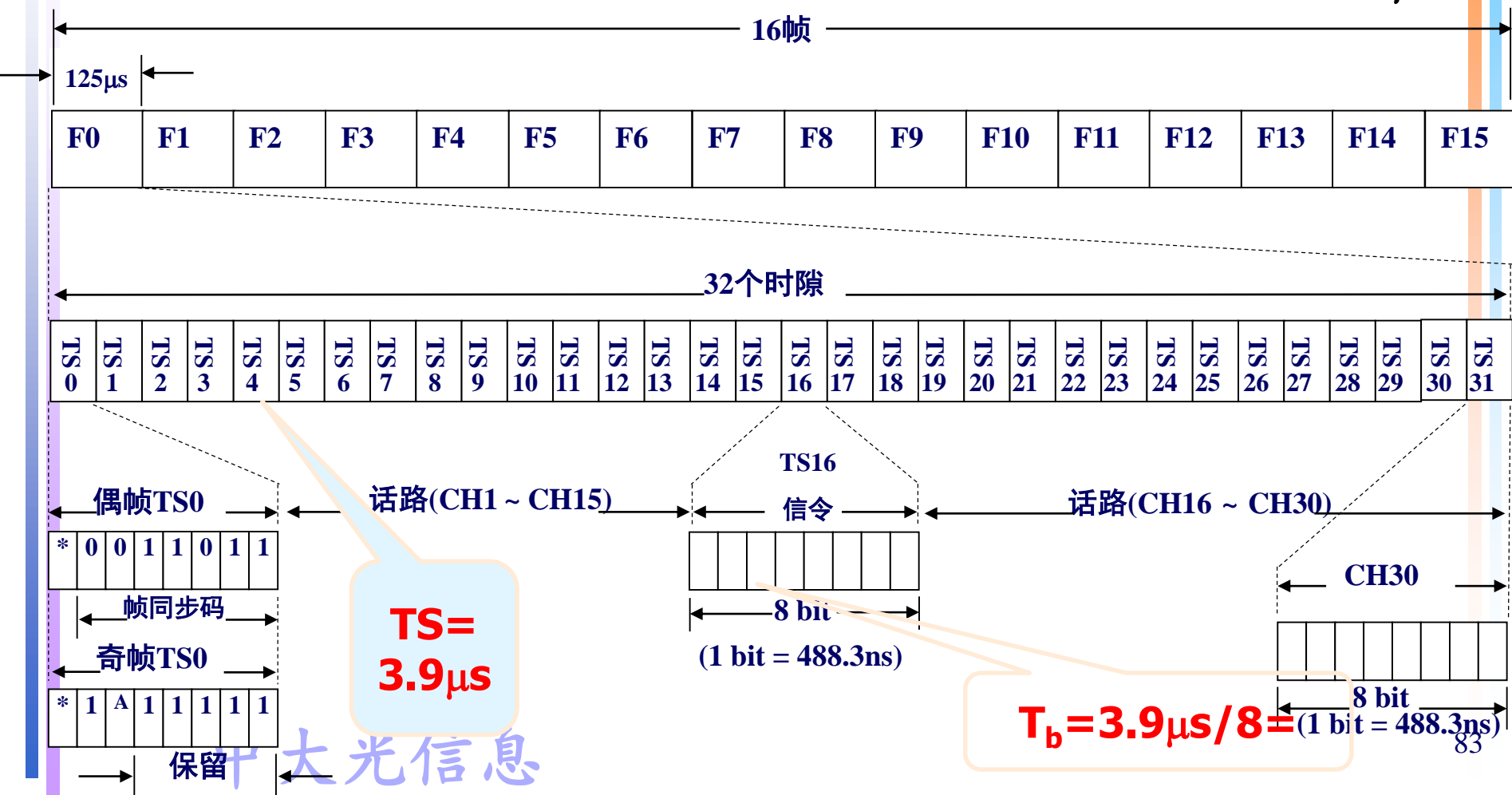
- 基本层(E-1): **30路PCM**数字电话信号, 每路PCM信号的比特率为**64 kb/s**。由于需要加入群同步码元和信令码元等额外开销(overhead), 所以实际占用**32路PCM信号**的比特率。故其输出总比特率为**2.048 Mb/s**, 此输出称为**一次群**信号。
 - E-2层: **4个**一次群信号进行二次复用, 得到**二次群**信号, 其比特率为**8.448 Mb/s**。
 - E-3层: 按照同样的方法再次复用, 得到比特率为**34.368 Mb/s**的**三次群**信号
 - E-4层: 比特率为**139.264 Mb/s**。
 - 注: 相邻层次群之间路数成4倍关系, 但是比特率之间不是严格的4倍关系。

一次群的结构

• E体系的一次群结构

1复帧=16帧

复帧 $2 \text{ ms} = 16 \times 125 \mu\text{s}$



$$TS = 3.9\mu s$$

- **1帧**：由于**1路PCM**电话信号的抽样频率为**8000 Hz**，抽样周期为**125 μs** ，即**1帧**的时间。
- **时隙(TS)**：将**1帧**分为**32个时隙**，每个时隙容纳**8比特**。在**32个时隙**中，**30个时隙**传输**30路语音信号**，另外**2个时隙**可以**传输信令和同步码**。其中时隙**TS0**和**TS16**规定用于传输帧同步码和信令等信息；其他**30个时隙**，即**TS1~TS15**和**TS17~TS31**，用于传输**30路语音**抽样值的**8比特码组**。
 - 时隙**TS0**的功能：在偶数帧和奇数帧不同。
 - 在**偶数帧**的时隙**TS0**发送一次帧同步码。帧同步码含**7比特**，为“**0011011**”，规定占用时隙**TS0**的后**7位**。时隙**TS0**的第**1位“* ”**供国际通信用。
 - **TS0**的**奇数帧**留作告警(alarm)等其他用途。在奇数帧中，**TS0**第**1位“* ”**的用途和偶数帧的相同；第**2位**的“**1**”用以区别偶数帧的“**0**”，辅助表明其后不是帧同步码；第**3位“**A**”**用于远端告警；第**4~8位**保留作维护、性能监测等其他用途，在没有其他用途时，在跨国链路上应该全为“**1**”。

- 时隙**TS16**的功能：可以用于传输**信令**，但是当无需用于传输信令时，它也可以像其他**30**路一样用于传输语音。
- **信令**是电话网中传输的各种控制和业务信息，例如电话机上由键盘发出的电话号码信息等。
- **信令**允许程控交换、网络数据库、网络中其它“智能”节点交换下列有关信息：
 - 呼叫建立 (**Call Setup**)
 - 监控 (**Supervision**)
 - 拆除 (**Teardown**)
 - 分布式应用程序：进程；用户到用户的数据
 - 网络管理信息

在电话网中传输信令的方法有两种

- 一种称为**共路信令(CCS)**，是将各路信令通过一个独立的信令网络集中传输
- 另一种称为**随路信令(CAS)**，将各路信令放在传输各路信息的信道中和各路信息一起传输。
 - 在此建议中为随路信令作了具体规定。采用随路信令时，需将**16**个帧组成一个复帧，时隙**TS16**依次分配给各路使用。如图中第一行所示。

时隙TS16

- 在一个复帧中按照下表共用此信令时隙。在**F0**帧中，前4个比特“0000”是复帧**同步码组**，后4个比特中“x”为备用，无用时它全置为“1”，“y”用于向远端指示**告警**，在正常工作状态它为“0”，在告警状态它为“1”。在其他帧（F1至F15）中，此时隙的8个比特用于传送**2路信令**，每路4比特。由于复帧的速率是**500帧/秒**，所以每路的信令传送速率为**2 kb/s**。

$$\frac{1}{16 \times 125 \mu s} = \frac{1}{2 ms} = 500 \text{ 帧} / s$$

$$4 \text{ bit} \times 500 \text{ 帧} / s = 2 \text{ kb} / s$$

一复帧有 $16 \times 8 \text{ bit}$ (信号)

$$128 \text{ bit} \times 500 \text{ 帧} / s = 64 \text{ kb} / s$$

8*8kHz

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			

PCM的复接

一次群（PCM32/30）：PCM复用

如果二次群也采用PCM复用

- 一次群的时序，（TS/4）

$$T_s = 3.91\mu s / 4 = 0.9775\mu s$$

- 势必要求编码速度更快，这是不易实现的

数字复接：

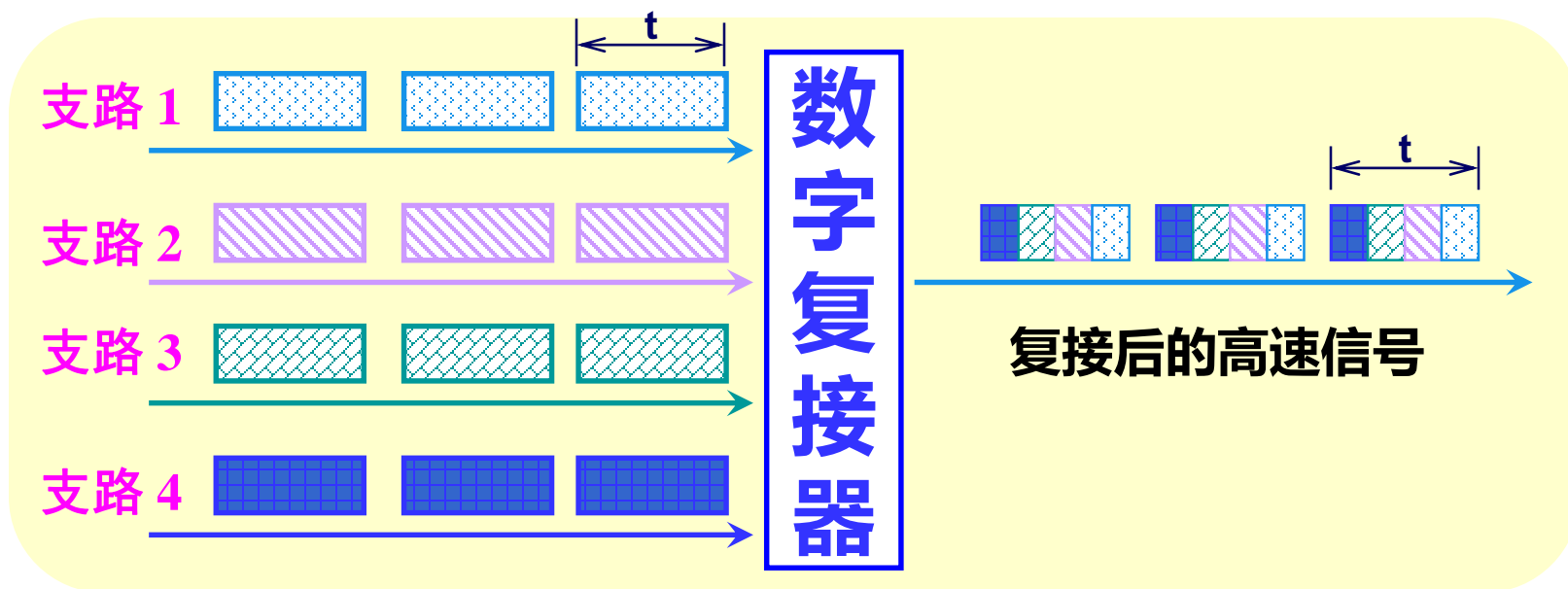
- 按位复接：也叫比特复接，每支路一次复接一比特
- 按字复接：每次复接支路的一个码字
- 按帧复接：每次复接之路的一帧（256bit）

中大光信息

数字复接技术

✓ 逐比特复接（按位复接）

即按被复接支路的顺序，每次只复接一位码。复接后每位码的宽度只有原来的四分之一，但速率提高了四倍。目前，大多数的**PCM**复接设备都是采用这种方法。



数字复接技术

□ 按码字复接（按路复接）

8 位二进制码称为一个“码字”。按码字复接就是按被复接支路的顺序，每次复接一个“码字”。这种方法循环周期长，需要大容量的缓存器，高次群复接设备一般不采用此方法。它的优点是可以保存完整的字结构，便于多路合成和交换，所以PCM基群采用这种方法。

□ 按帧复接

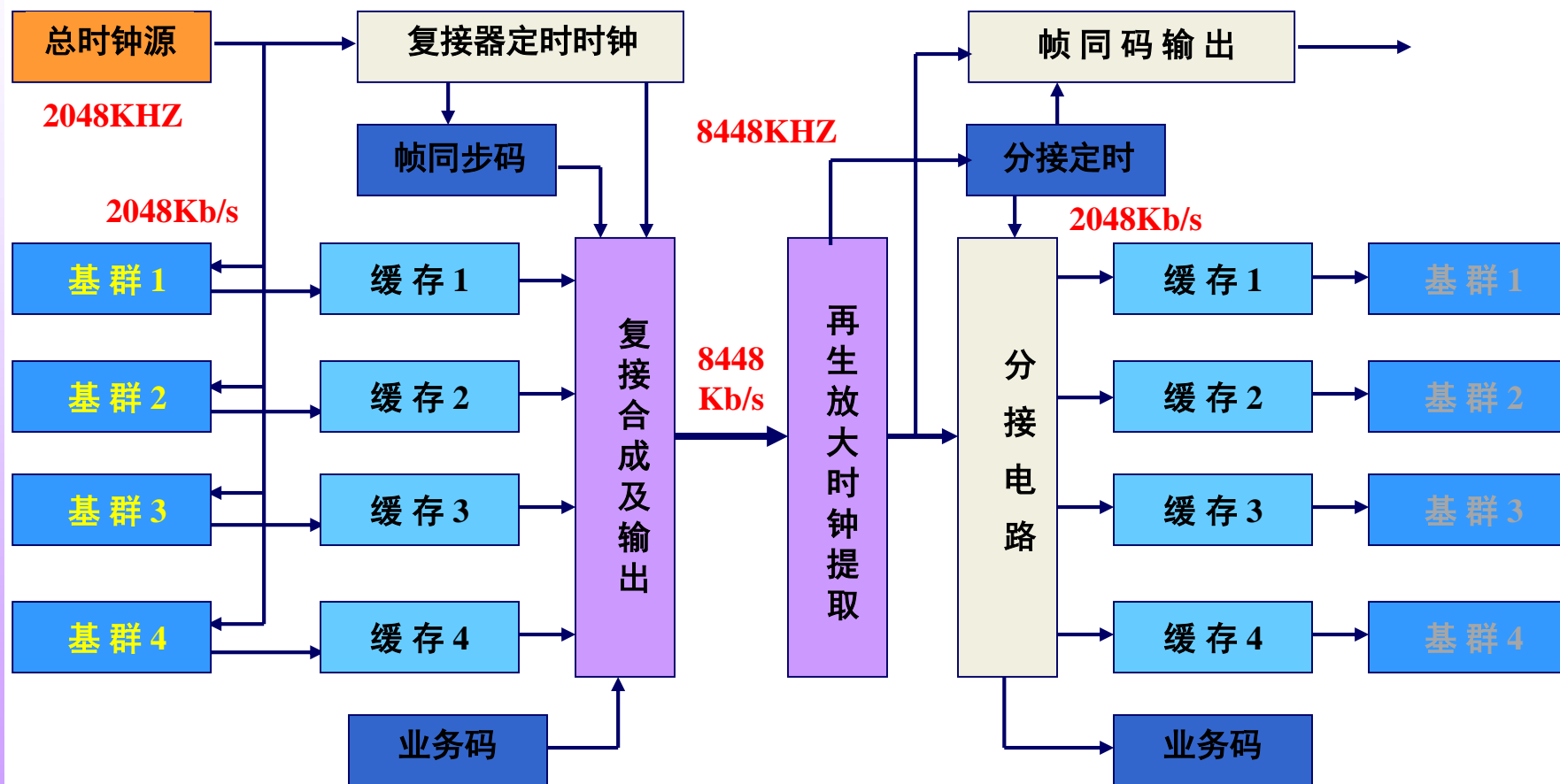
每次复接一个支路一帧的码元，需要更大容量缓存器，因此极少采用。

数字复接 vs 复用技术

- 在数字通信系统中，为了扩大传输容量和提高传输效率，经常把若干路低速数字信号流(称为低次群)合并成一个高速数字信号流（称为高次群），以便在高速信道中传输。这种把两路或两路以上的低速数字信号合并成一路高速数字信号的过程称为数字复接。
- 数字复接技术最早是在PCM系统中提出的，它可使不同数字速率的信号流同在PCM系统中传输。
- 一般理解采用数字复接在技术上更容易实现些，但随着A/D技术的发展，已有比PCM30/32更高速的复用技术，如PCM120也是可以实现的。

$$T_b = T_s / 8 = 0.9775 \mu s / 8 \approx 122 ns$$

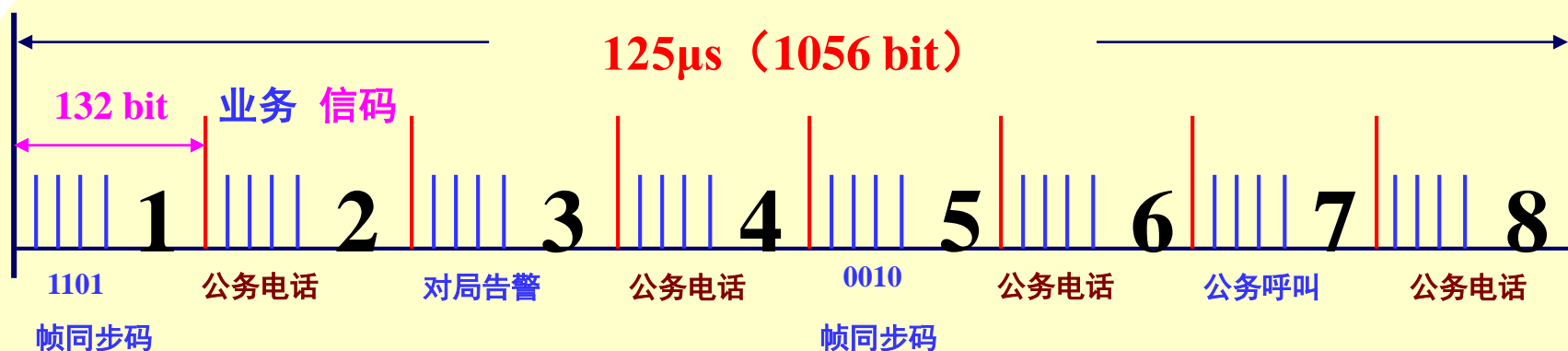
同步复接原理：各支路信号同一个时钟源， 均为标称速率，按位或字节间插即可。



二次群同步复接方框图

二次群同步复接帧结构

4 个基群合成一个二次群，按位复接，帧长 1056 位，分成 8 段，每段插入 4 位帧同步码或业务码（公务、告警等）和 128 位信码。



$$4+128=132$$

$$128/4=32$$

$$\text{传输速率: } 1056\text{bit}/125 \times 10^{-6} = 8448\text{kbit/s}$$

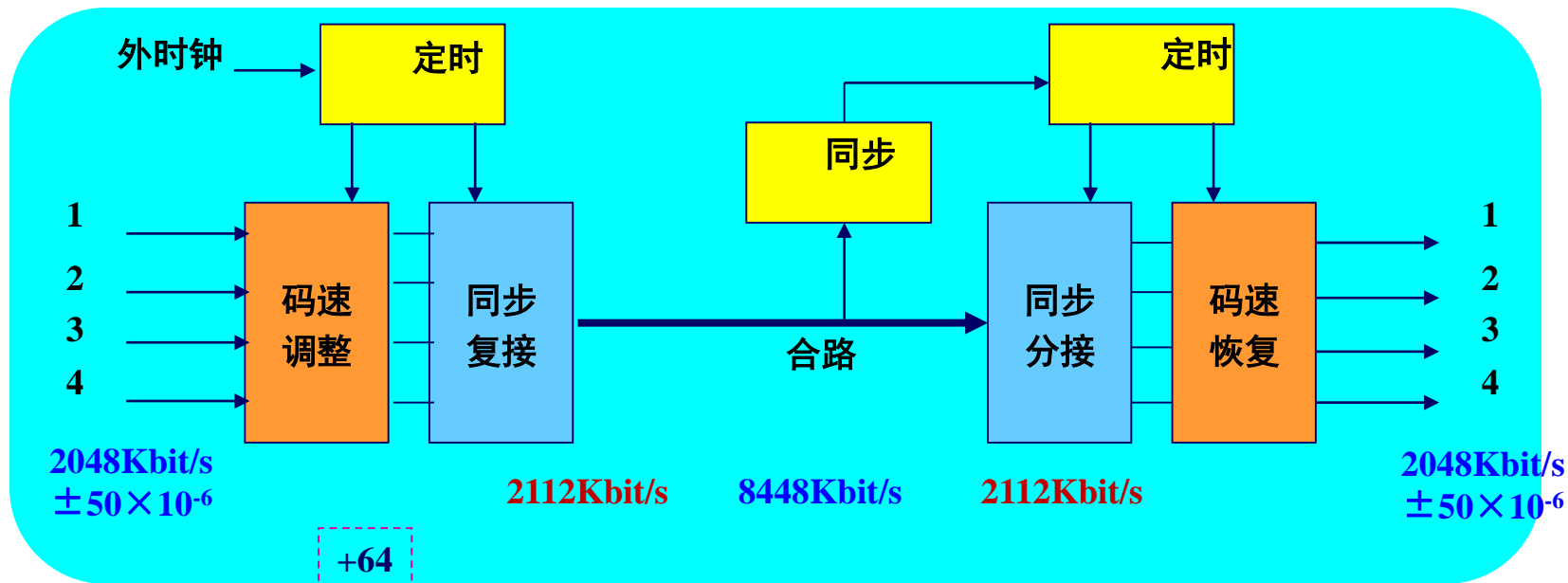
$$2048\text{kbit/s} \times 4 = 8192\text{kbit/s}$$

中大光信息

$$8448 - 8192 = 256$$

异步复接原理： 各支路信号不同源，允许一定范围的容差。

故要对各支路信号进行频率和相位的调整（码速调整），
同步后才能复接。



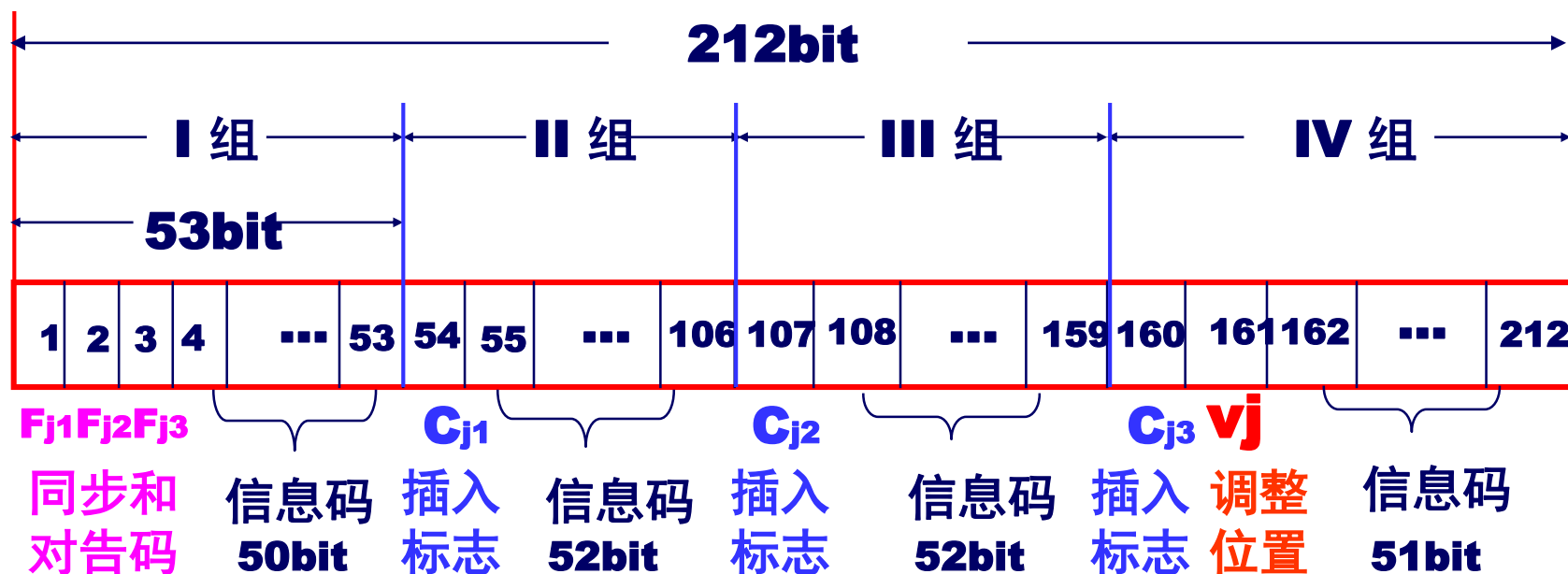
二次群异步复接方框图

基群异步调整帧结构

二次群标称速率：8448 Kb/s = 4 × 2048 Kb/s + 256 Kb/s

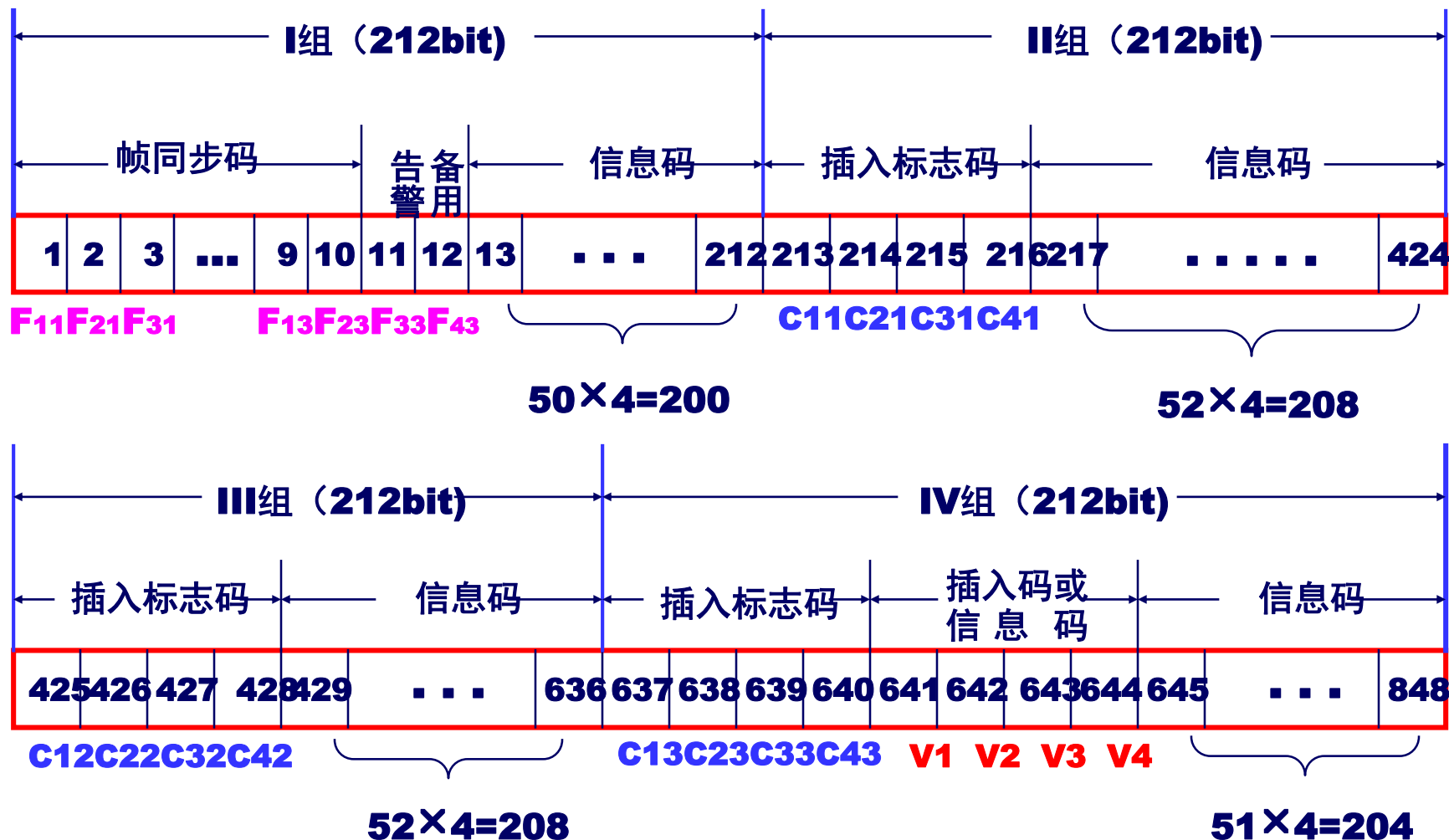
故每个基群每秒钟需要插入：256 K / 4 = 64 Kbit

其中 F_{j1} F_{j2} F_{j3} 为同步、对告码， v_j 为调整插入时隙， C_{j1} C_{j2} C_{j3} 为插入标志，111表示插入，000表示未插入，接收端择多判决。

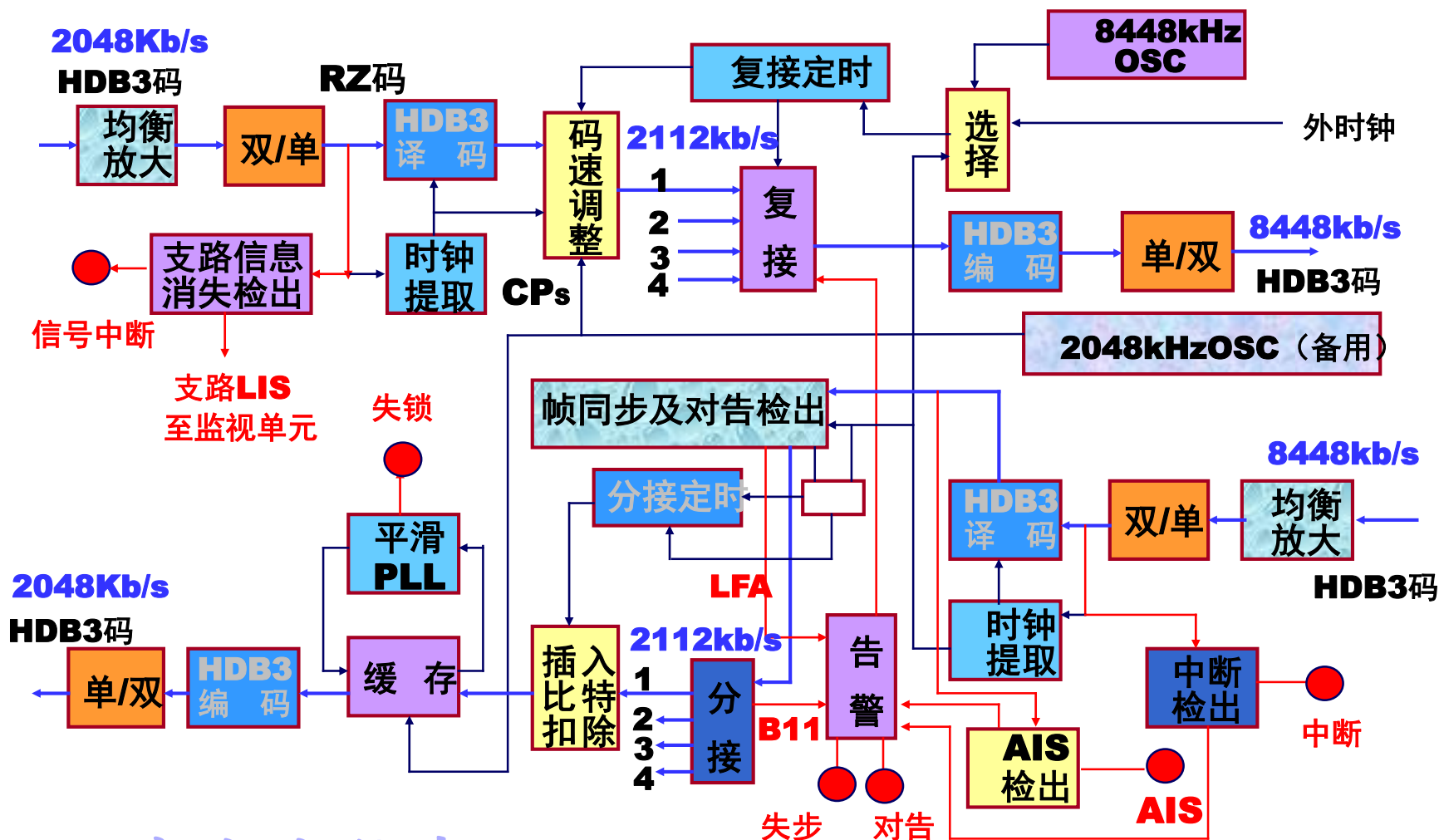


基群支路比特分配示意图

二次群异步复接帧结构



二次群数字复接设备总体框图



PDH vs. SDH

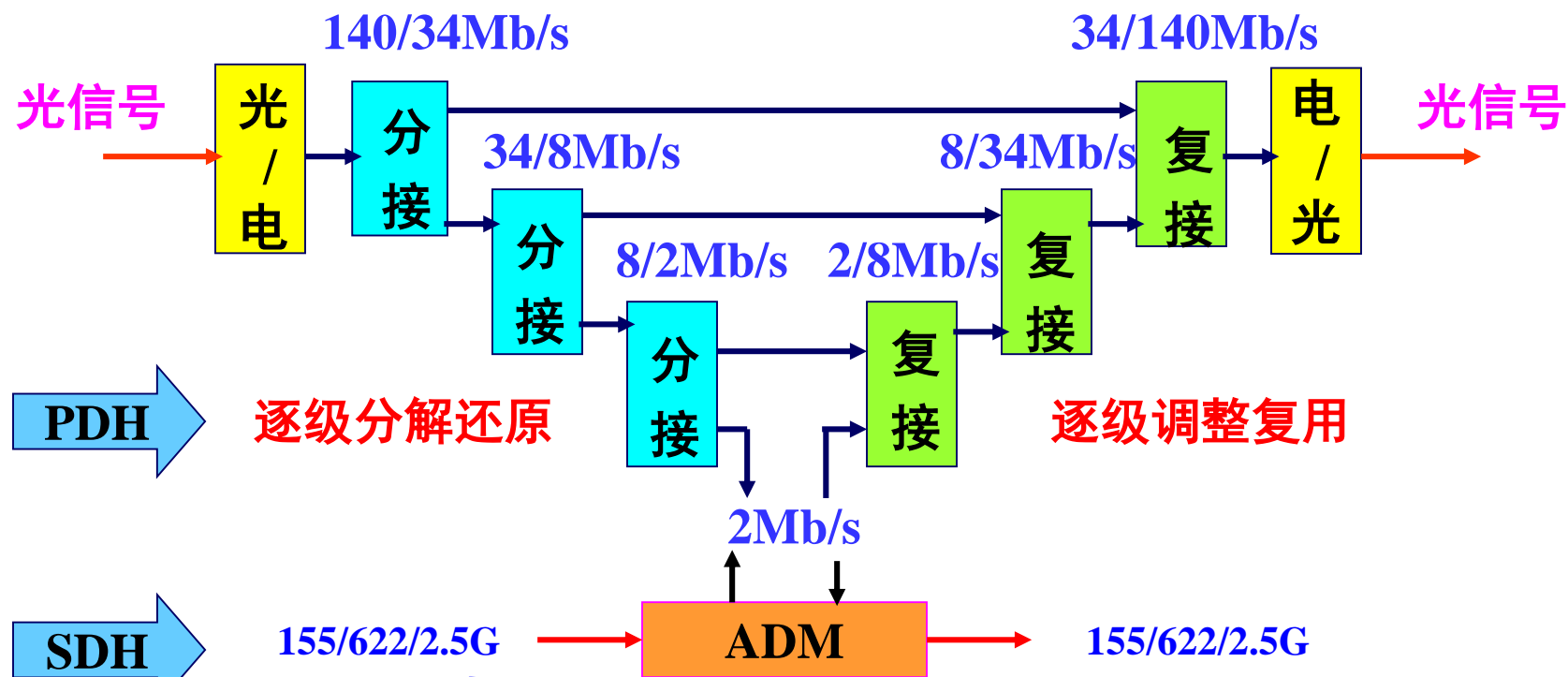
PDH技术与模拟技术相比，在提高信号质量和通信容量、有利于集成、缩小设备体积、减少功耗等方面有显著优点。

1. 只有地区性电接口规范（北美、日本和欧洲标准），造成国际互通困难；
2. 无光接口规范，各厂家自行开发线路码型，无法实现横向兼容；

接口 速率 类型 线路码型	普通型8M 设备	干线型 34M设备	本地型 34M设备	干线型140M 设备	本地型140M 设备
飞利浦 5B6B	10.14	41.24	/	167.12	/
西门子 1B2B	16.896	68.736	/	278.528	/
武汉院 1B1H	16.896	68.736	67.584	278.528	270.336

3. 只有基群速率是同步的，二次群以上是异步的，需要进行逐级码速调整，配备背对背的复用分解设备，系统复杂，硬件数量多，速率越高，层次越多，会使传输性能下降；

PDH分插支路信号的过程



- 4. 主要为语音业务设计，而现代通信要求业务多样化、宽带化（高速数据和视频）；
- 5. 传输以点对点为主，缺乏网络拓扑的灵活性，主要靠人工进行交叉连接
- 6. 开销比特少，运行、管理和维护（OAM）能力差，无法实现传输网的分层管理和对通道实现端到端的监控。

现在长途网、本地网和接入网广泛采用SDH设备。

开销：运行、管理和维护设备必须附加的字节

OAM: Operation, Administration and Maintenance



小复习

TDM: 旋转开关

TDM-PAM; 路时隙

TDM-PCM; 位时隙

码元速率; 带宽

PCM30/32路系统

E体系 (30/32路PCM)

T体系 (24路PCM)

PDH:

数字复接 (PCM高次群)

中大光信息

4. 8. 6 SDH的提出

随着光纤通信的发展，准同步数字系列(PDH)已经不能满足大容量高速传输的要求，不能适应现代通信网的发展要求，其缺点主要体现在以下几个方面：

- 不存在**世界性标准**的数字信号速率和帧结构标准。
- 不存在世界性的标准**光接口规范**，无法在光路上实现互通和调配电路。

- 复接方式大多采用按**位复接**，不利于以**字节**为单位的现代信息交换。
- 准同步系统的复用**结构复杂**，缺乏灵活性，硬件数量大，上、下业务费用高。
- 复用结构中用于网络运行、管理和维护的比特很少。

基于传统的准同步数字系列的上述弱点，为了适应现代电信网和用户对传输的新要求，必须从技术体制上对传输系统进行根本的改革，

为此，CCITT制订了TDM制的**150Mb/s**以上的**同步数字系列（SDH）标准**。它不仅适用于光纤传输，亦适用于微波及卫星等其它传输手段。它可以有效地按动态需求方式改变**传输网拓扑**，充分发挥网络构成的灵活性与安全性，而且在**网路管理功能**方面大大增强。数字复接系列（同步数字系列）如表7.2所示。

表 数字复接系列（同步数字系列）

同步数字系列	STM-1	STM-4	STM-16	STM-64
速率	155.52Mbit/s	622.08Mbit/s	2488.32Mbit/s	9953.28Mbit/s



E - 4	139.264Mbit/s	1920路电话
-------	---------------	---------

与PDH相比，SDH具有一系列优越性：

- 使北美、日本、欧洲三个地区性PDH数字传输系列在**STM-1等级上获得了统一**，真正实现了数字传输体制方面的全球统一标准。
- SDH具有标准的**光接口**，即允许不同厂家的设备在光路上互通。
- SDH系统采用字节间插同步方式**复接**成更高等级的SDH传送模块STM-N，因此，从STM-N中容易分出支路信号，分/插复用灵活，可动态改变网络配置。

比如可以借助软件控制从高速信号中一次分支 / 插入低速支路信号，避免了像PDH那样需要对全部高速信号进行逐级分接复接的作法。

- SDH网大量采用**软件进行网络配置和控制**，增加新功能和**新特性**非常方便，适合将来不断发展的需要。
- 帧结构中的**维护管理比特**大约占**5%**，大大增强了网络维护管理能力，可实现故障检测、区段定位、业务性能监测和性能管理。

➤ SDH网有一套特殊的复用结构，具有**兼容性**和**广泛的适应性**。它不仅与现有PDH网能完全兼容，也支持北美、欧洲和日本现行的载波系统，同时还可容纳**各种新业务信号**。例如局域网中的光纤分布式数据接口(FDDI)信号以及宽带ISDN中的异步转移模式(ATM)信元等等。

综上所述，SDH具有同步复用、标准光接口和强大的网络管理能力等优点，在20世纪90年代中后期得到了广泛应用，而原有的PDH数字传输网已逐步纳入了SDH网。

中大光信息

SDH基本概念

■ 同步数字体系(SDH)

• SDH基本概念

- SDH是针对更高速率的传输系统制定出的全球统一的标准。
- 整个网络中各设备的时钟来自同一个极精确的时间标准（例如铯原子钟），没有准同步系统中各设备定时存在误差的问题。
- 在SDH中，信息是以“**同步传送模块(STM)**”的信息结构传送的。
 - 一个同步传送模块主要由信息有效负荷和**段开销(SOH)**组成**块状帧结构**，其重复周期为**125μs**。按照模块的大小和传输速率不同，SDH分为若干等级。

SDH的速率等级

等级	比特率(Mb/s)
STM-1	155.52
STM-4	622.08
STM-16	2488.32
STM-64	9953.28

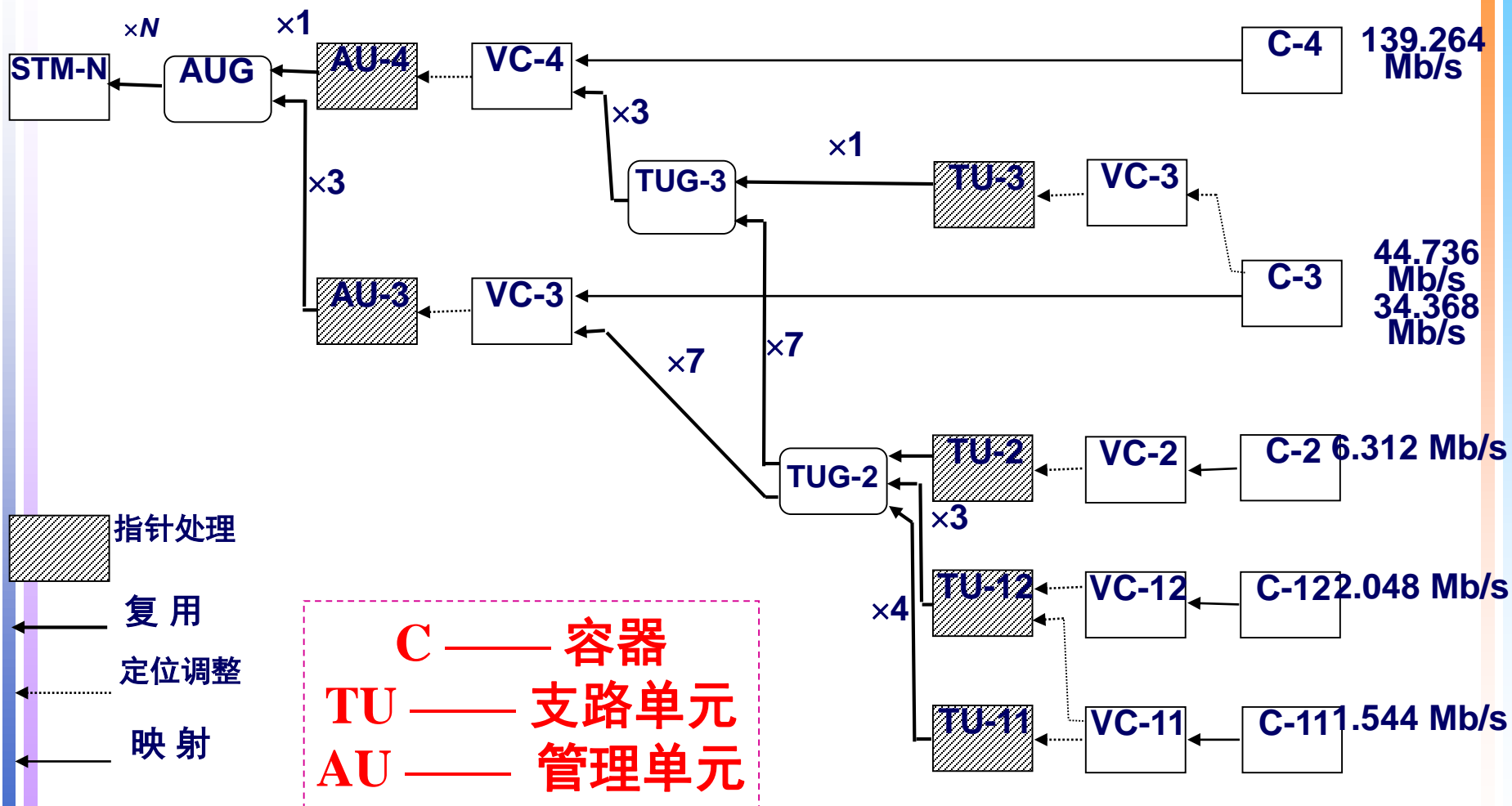
- 目前SDH制定了4级标准，其容量（路数）每级翻为4倍，而且速率也是4倍的关系，在各级间没有额外开销。
- **STM-1**：是基本模块，包含一个管理单元群(AUG)和段开销(SOH)。
- **STM-N**：包含N个AUG和相应的SOH。

PDH体系和SDH体系之间的关系

通常将若干路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。对于T体系也可以作类似的处理。这样，在SDH体系中，各地区的PDH体制就得到了统一。

PDH和SDH连接关系图



C-n 容器-n

SDH的结构

- **容器**：是一种信息结构。PDH体系的输入信号首先进入容器C- n ，($n = 1 \sim 4$)。这里，它为后接的虚容器(VC- n)组成与网络同步的信息有效负荷。
 - 映射：在SDH网的边界处，使支路信号与虚容器相匹配的过程。在图中用细箭头指出。
 - 在ITU的建议中只规定有几种速率不同的标准容器和虚容器。每一种虚容器都对应一种容器。
- **虚容器**：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**125 μ s**或**500 μ s**。
 - 虚容器有两种：低阶虚容器VC- n ($n=1, 2, 3$)；高阶虚容器VC- n ($n=3, 4$)。低阶虚容器包括一个容器C- n ($n = 1, 2, 3$)和低阶虚容器的路径开销。高阶虚容器包括一个容器C- n ($n = 3, 4$)或者几个支路单元群 (TUG-2或TUG-3)，以及虚容器路径开销。虚容器的输出可以进入支路单元TU- n 。

SDH的结构

- 支路单元**TU- n** ($n=1, 2, 3$): 也是一种信息结构, 它的功能是为低阶路径层和高阶路径层之间进行**适配**。它由一信息有效负荷 (低阶虚容器**VC- n**) 和一个支路单元指针组成。支路单元指针指明有效负荷帧起点相对于高阶虚容器帧起点的偏移量。
 - 支路单元群(**TUG**): 由一个或几个支路单元组成。后者在高阶**VC- n** 有效负荷中占据不变的规定的位置。**TUG**可以混合不同容量的支路单元以增强传送网络的灵活性。例如, 一个**TUG-2**可以由相同的几个**TU-1**或一个**TU-2**组成; 一个**TUG-3**可以由相同的几个**TUG-2**或一个**TU-3**组成。

SDH的结构

- 管理单元**AU- n** ($n=3, 4$): 也是一种信息结构。它为高阶路径层和复用段层之间提供适配。管理单元由一个**信息有效负荷（高阶虚容器）**和一个**管理单元指针**组成。此指针指明有效负荷帧的起点相对于复用段帧起点的偏移量。
 - 管理单元有两种：**AU-3**和**AU-4**。**AU-4**由一个**VC-4**和一个管理单元指针组成，此指针指明**VC-4**相对于**STM- M** 帧的相位定位调整量。**AU-3**由一个**VC-3**和一个管理单元指针组成，此指针指明**VC-3**相对于**STM- N** 帧的相位定位调整量。在每种情况中，管理单元指针的位置相对于**STM- M** 帧总是固定的。
 - 管理单元群(**AUG**): 由一个或多个管理单元组成。它在一个**STM**有效负荷中占据固定的规定位置。一个**AUG**由几个相同的**AU-3**或一个**AU-4**组成。

SDH的工作方式

PDH/FDDI/A
TM/IP信号



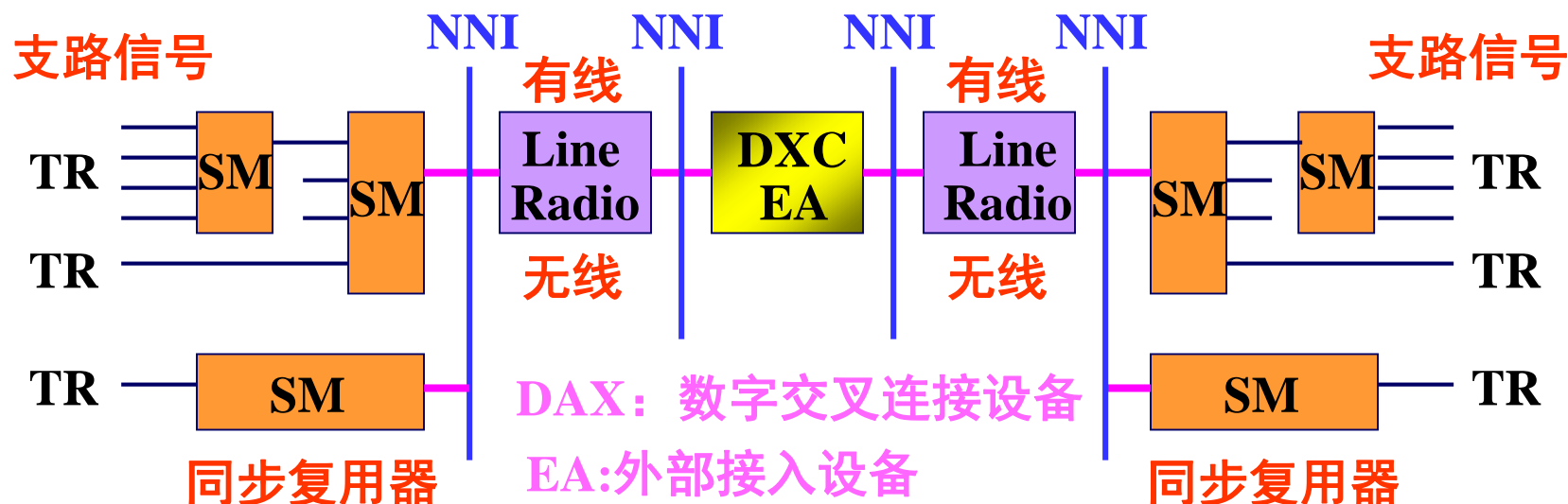
SDH 的基本特点

1. 对网络节点接口进行了统一的规范（速率、帧结构、复接方法、线路接口等），使各厂家设备横向兼容；
2. 适合高速大容量通信，基本模块是STM-1，STM-N采用字节间插方法同步复用而成，便于升级和扩容；
3. 可容纳北美、日本和欧洲现有数字标准（1.5M、2M、6.3M、34M、45M和140M），便于PDH向SDH过渡；
4. 低阶和高阶的复用和分解是一部到位，使设备大大简化；
5. DXC的引入使网络增强了自愈能力，便于动态组网；
6. 帧结构中安排了丰富的段开销，提高了OAM能力；
7. 采用级联技术，实现了IP over SDH。

SDH的速率等级与帧结构

一个电信传输网原则上包含两种基本设备：即**传输设备**和**网络节点设备**。

建立一个统一的网络节点接口(NNI)是实现SDH网的关键，而规定一整套必须共同遵守的速率和数据传送格式是NNI标准化的首要任务。



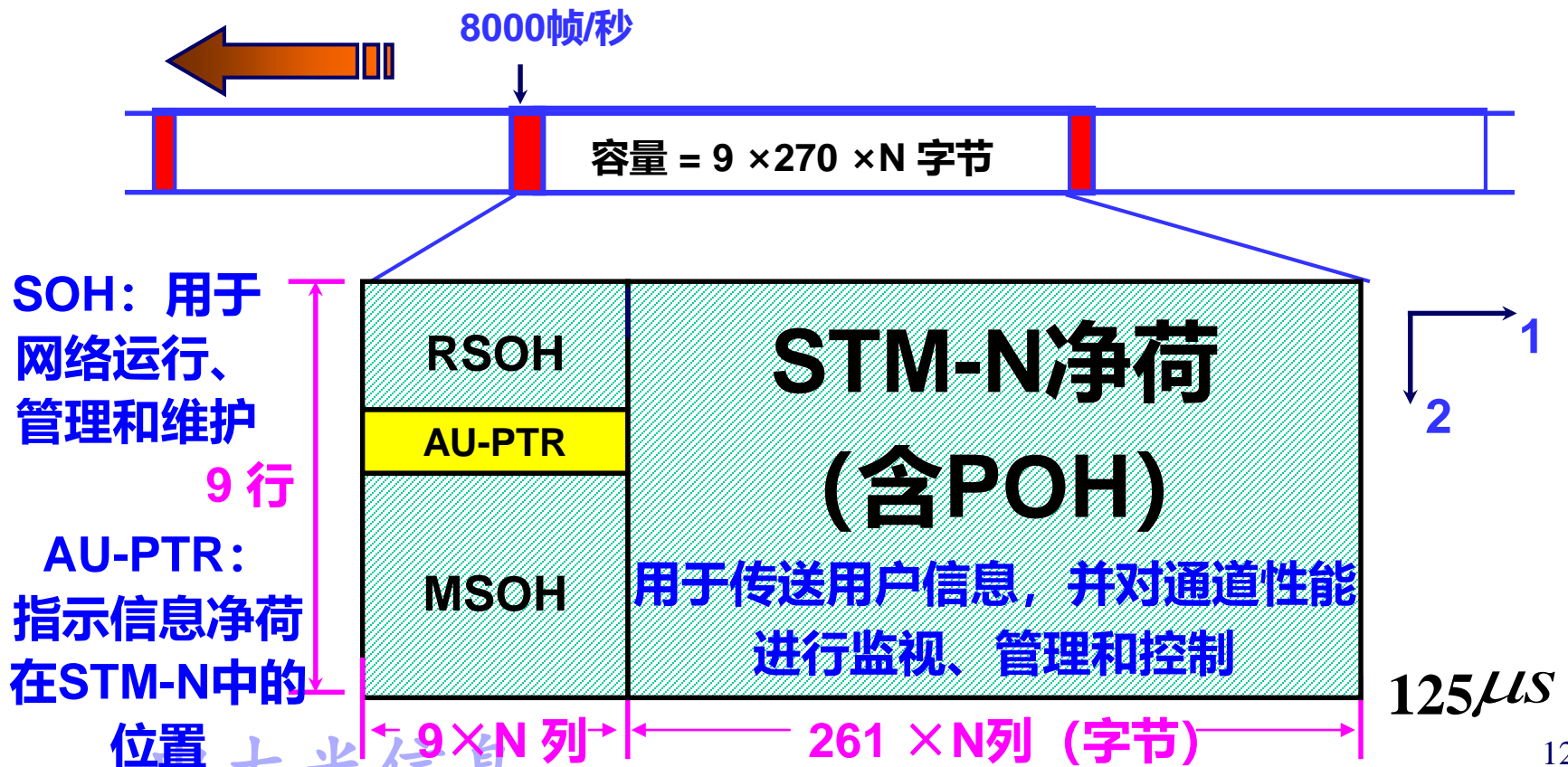
同步数字系列的速率

SDH具有统一规范的速率，信号以同步传送模块（STM）的形式传输。基本模块是STM-1，高等级速率以字节交错间插方式同步复用。

简称	SDH 等级	标称速率
155M	STM-1 (1920CH)	155,520Kb/s
622M	STM-4 (7680CH)	622,080Kb/s
2.5G	STM-16 (30720CH)	2,488,320Kb/s
10G	STM-64 (122880CH)	9,953,280Kb/s
40G	STM-256 (491520CH)	39,813,120Kb/s

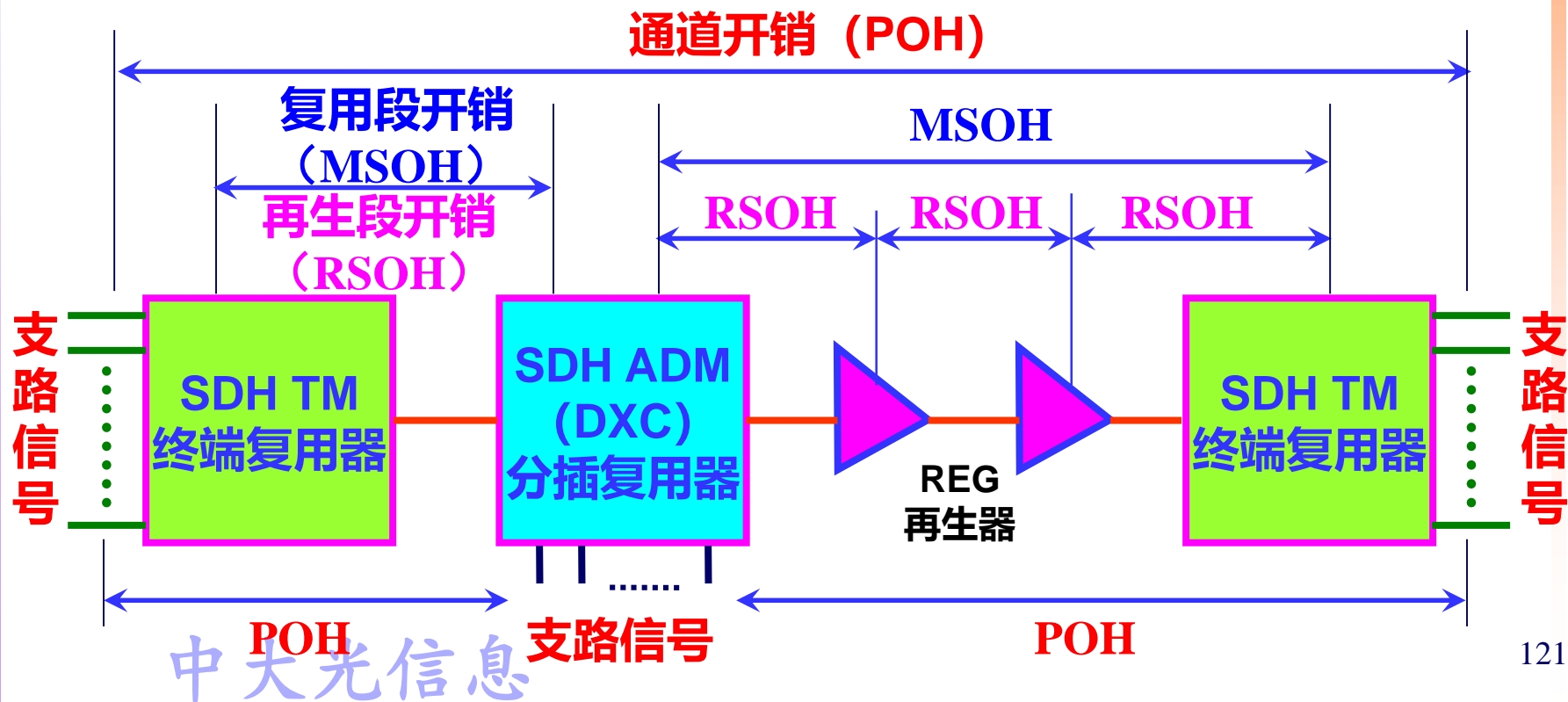
SDH帧结构

SDH 具有统一的帧结构 ($270 \times N$ 列, 9 行) $N=1, 4, 16, 64, 256$ 。
主要由段开销(SOH)、信息净荷(含POH)和管理单元指针(AU-PTR)组成。



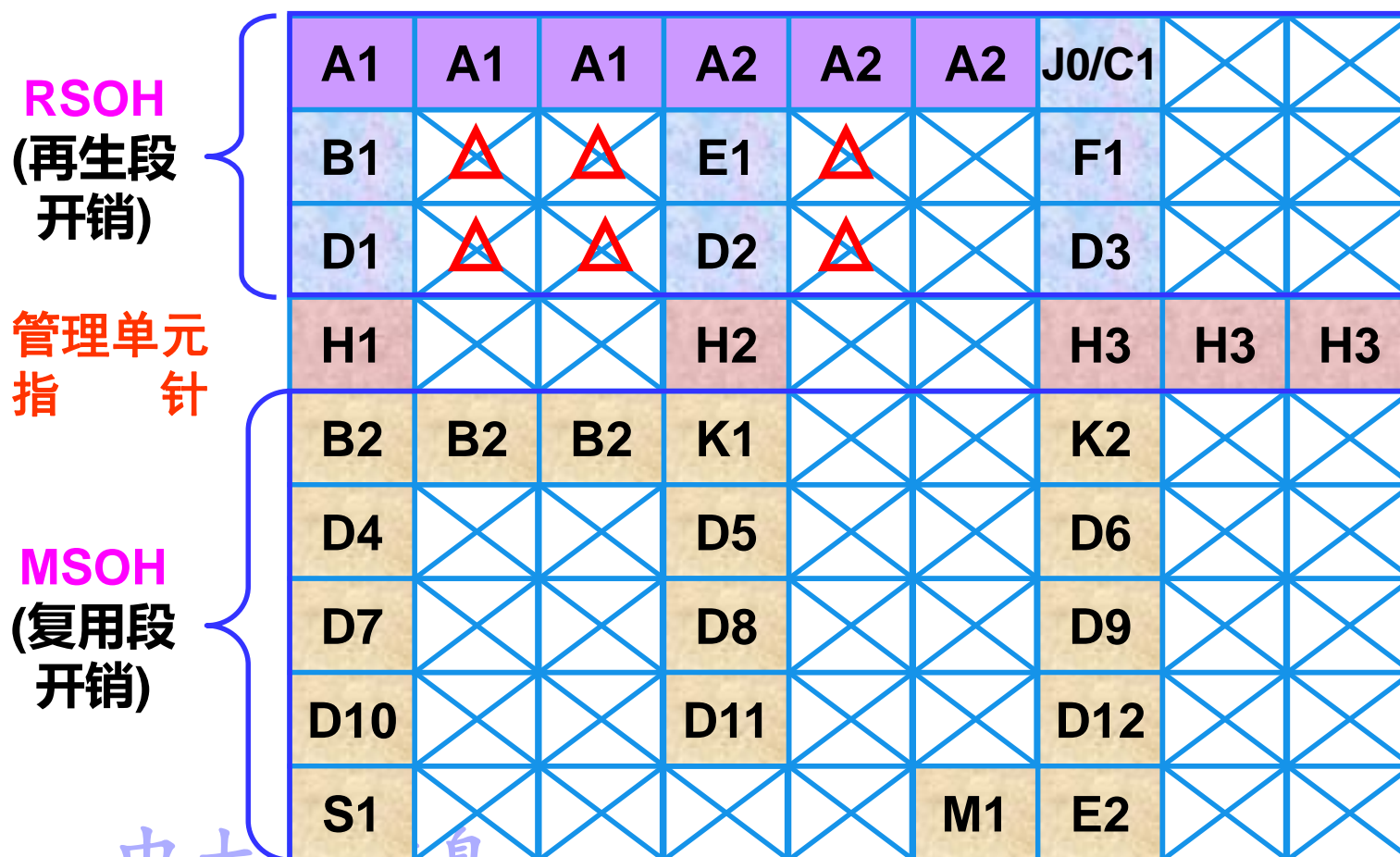
开销的功能

再生段开销用于对STM-N整体信号进行监控，复用段开销用于对STM-N中的净荷进行监控，通道开销则对每个通道进行监控。因此SDH可实现分层管理，维护十分方便。



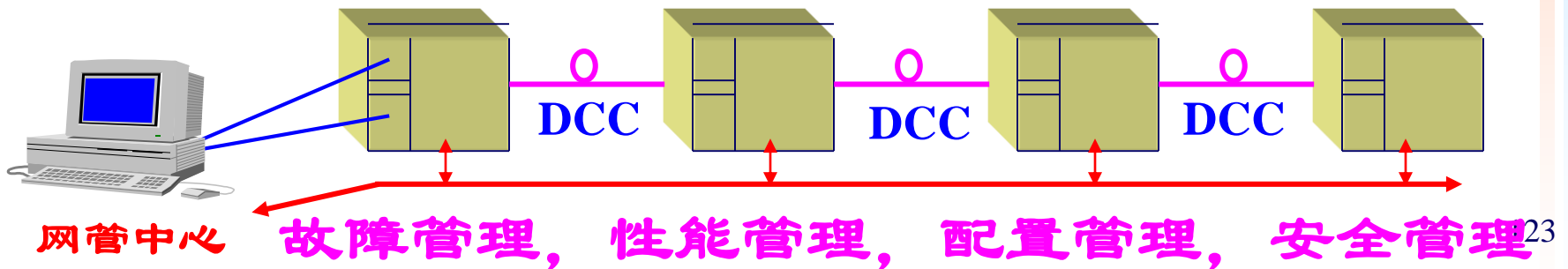
SDH的段开销安排及功能

STM-1段开销的字节安排

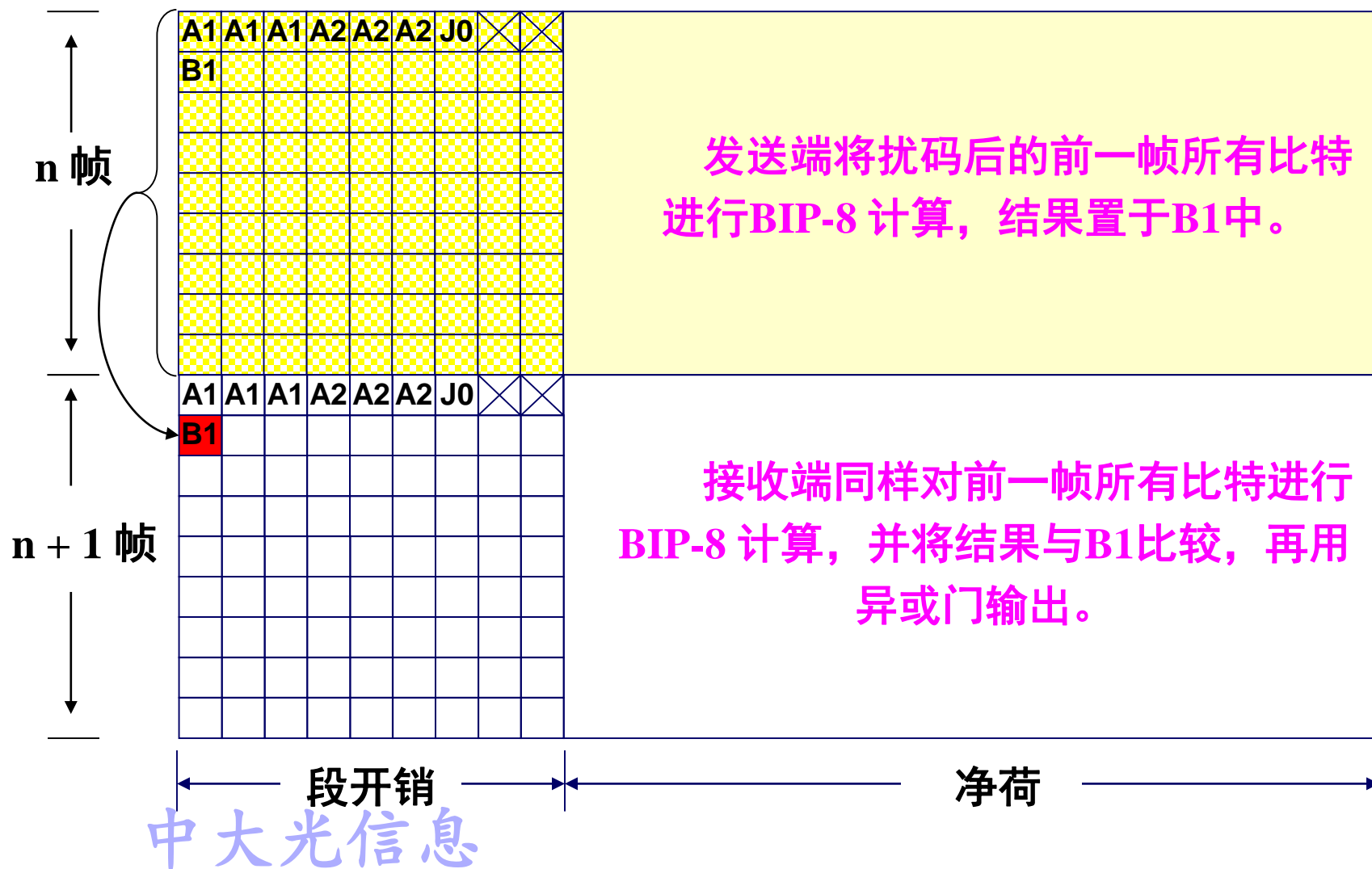


段开销的字节描述

- 1、定帧字节：A1 = 11110110， A2 = 00101000，用于帧同步。
- 2、再生段踪迹 J0：用来重复地发送段接入点识别，使接收机能确认其与指定的发射机处于持续连接状态。
- 3、比特间插奇偶校验 8 位码B1：用于再生段误码监测。
- 4、比特间插奇偶校验 $N \times 24$ 位码B2：用于复用段误码监测。
- 5、数据通信通路（DCC）：D1~D3提供192kb/s信道，用于再生段终端之间交流OAM信息；D4~D12提供576kb/s信道，用于复用段终端之间交流OAM信息。



B1为再生段 8 位误码监测



段开销



- 6、公务联络：**E1**为再生段 公务，**E2**为复用段公务。
- 7、使用者通路 **F1**：用于特定维护目的的临时公务。
- 8、自动保护倒换通路：**K1**表示请求倒换的信道号；
K2表示确认桥接到保护信道的信道号。
- 9、复用段远端故障指示：**K2**的b6~8=110。
- 10、同步状态 **S1**（ b5 ~ b8）：用于同步状态指示。
- 11、段远端误块指示 **M1**：用于检出误块数。
- 12、与传输媒质有关的字节**Δ**：专用于具体传输媒质的特殊功能，如单纤双向传输。

STM-4 SOH 字节安排

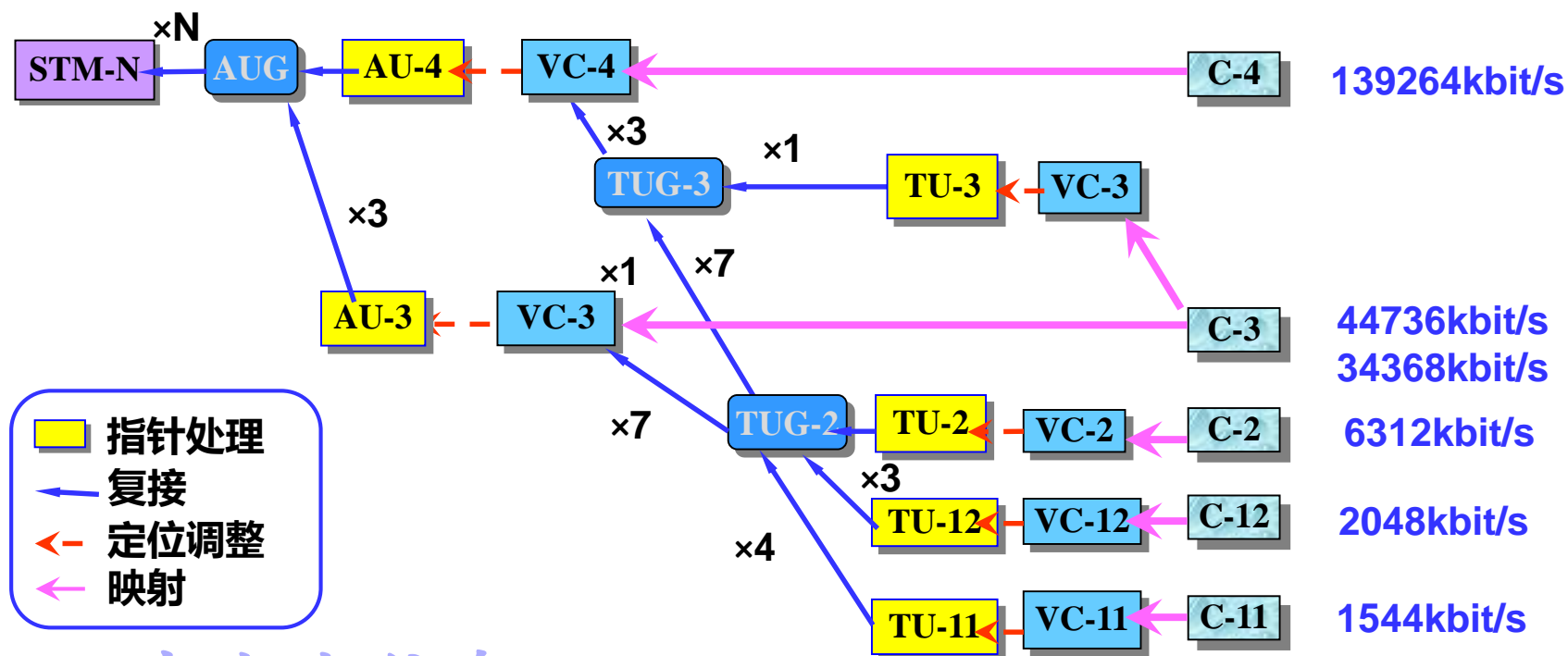
以字节交错间插方式构成高阶段开销时，第一个STM-1的段开销被完整保留，其余STM-1的段开销仅保留A1、A2和B2，其它均应略去。

36 字节																											
A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A2	A2	A2	A2	A2	A2	A2	A2	A2	A2	A2	A2	J0		
B1												E1												F1		
D1												D2												D3		
管 理 单 元 指 针																											
B2	B2	B2	B2	B2	B2	B2	B2	B2	B2	B2	B2	K1												K2		
D4												D5												D6		
D7												D8												D9		
D10												D11												D12		
S1																							M1	E2		

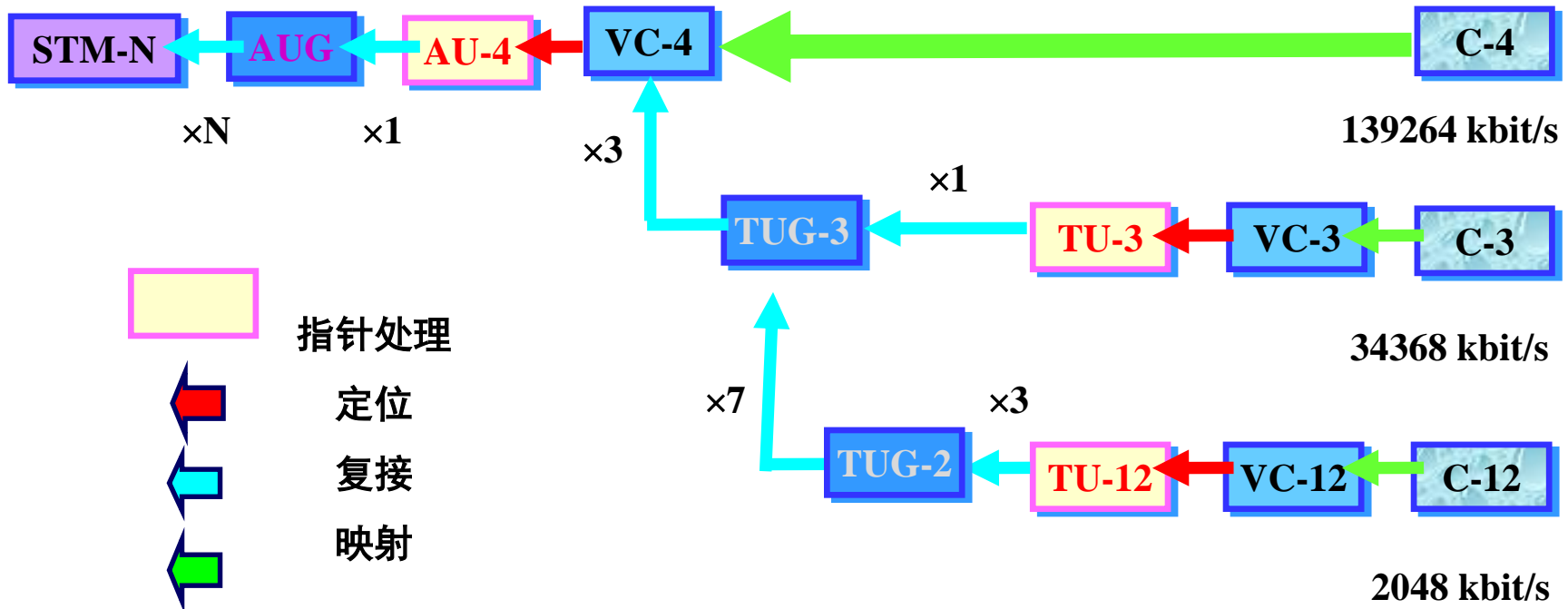
SDH的映射与复用

SDH的复用结构

各种业务信号复用进STM-N帧的过程都要经历**映射**、**定位**和**复用**三个步骤。



我国 SDH 复用映射结构



STM-1可装入1个140Mb/s

主要用于长途网通信

或装入 $3 \times 1 = 3$ 个34Mb/s

用于少数本地或长途网

或装入 $3 \times 7 \times 3 = 63$ 个2M b/s

主要用于本地网通信

SDH

SDH作为一般性的了解