



计算机网络（第 5 版）

第 2 章 物理层



第 2 章 物理层

2.1 物理层的基本概念

2.2 数据通信的基础知识

2.2.1 数据通信系统的模型

2.2.2 有关信道的几个基本概念

2.2.3 信道的极限容量

2.2.4 信道的极限信息传输速率

2.3 物理层下面的传输媒体

2.3.1 导向传输媒体

2.3.2 非导向传输媒体



第 2 章 物理层（续）

2.4 信道复用技术

2.4.1 频分复用、时分复用和统计时分复用

2.4.2 波分复用

2.4.3 码分复用

2.5 数字传输系统

2.6 宽带接入技术

2.6.1 xDSL 技术

2.6.2 光纤同轴混合网（HFC 网）

2.6.3 FTTx 技术



2.1 物理层的基本概念

- **物理层**

- 位于 OSI 参考模型的最底层，它直接面向传输介质，负责在传输介质之上，为数据链路层提供一个传输原始比特流的物理连接。

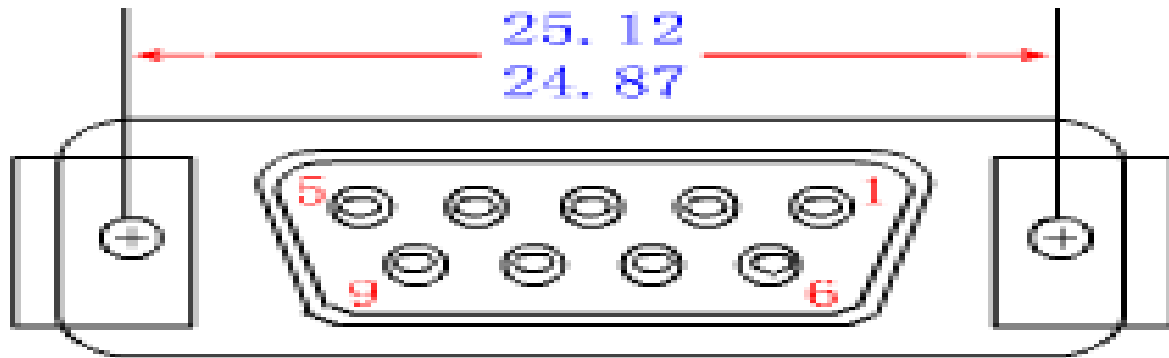
- **物理层的主要任务描述为确定与传输媒体的接口的一些特性，即：**

- 机械特性
- 电气特性
- 功能特性
- 规程特性

物理层协议基本特性

■ 1. 机械特性：

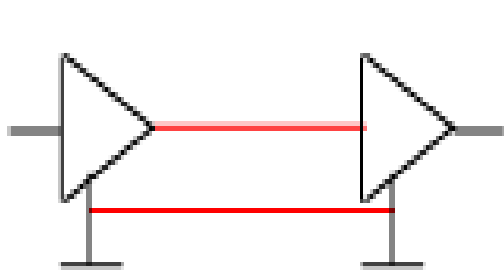
- 规定了物理连接时对插头和插座的几何尺寸、插针或插孔芯数及排列方式、锁定装置形式等。



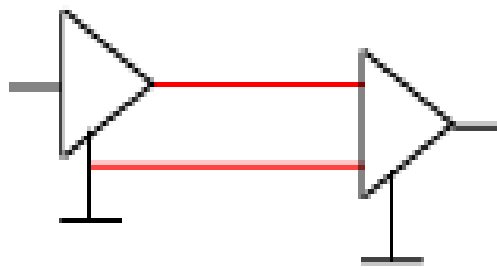
常用连接机械特性

2. 电气特性：

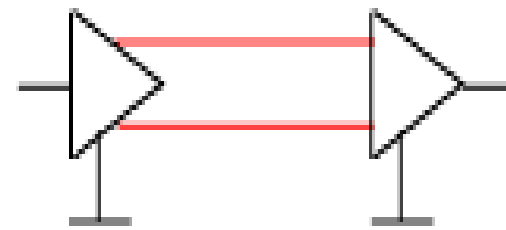
- 指明在接口电缆的各条线上出现的电压的范围。
如电气连接方式、信号电平、最大数据传输率和距离限制等。



(a) 非平衡发送器接收器



(b) 非平衡发送器差动接收器



(c) 平衡发送器
差动接收器



物理层协议基本特性

■ 3. 功能特性：

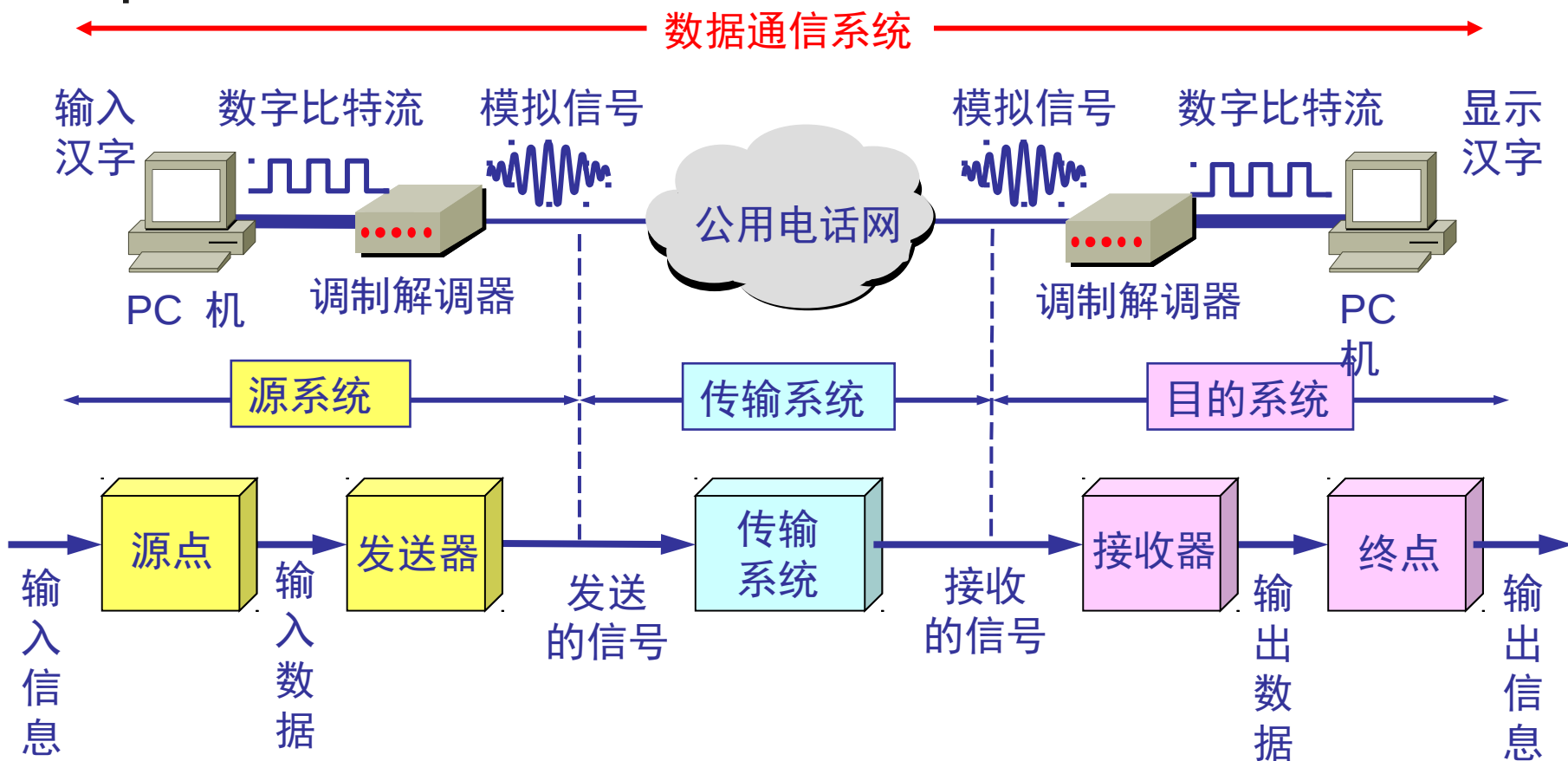
- 指明某条线上出现的某一电平的电压表示何种意义。
- 规定了物理接口上各条信号线的功能分配和确切定义。信号线一般可分为以下几类：数据、控制、定时和地线。

■ 4. 规程特性：

- 指明对于不同功能的各种可能事件的出现顺序。
- 规定了利用信号线进行二进制比特流传输的控制步骤，即各信号线的动作规则和先后顺序。

2.2 数据通信的基础知识

2.2.1 数据通信系统的模型

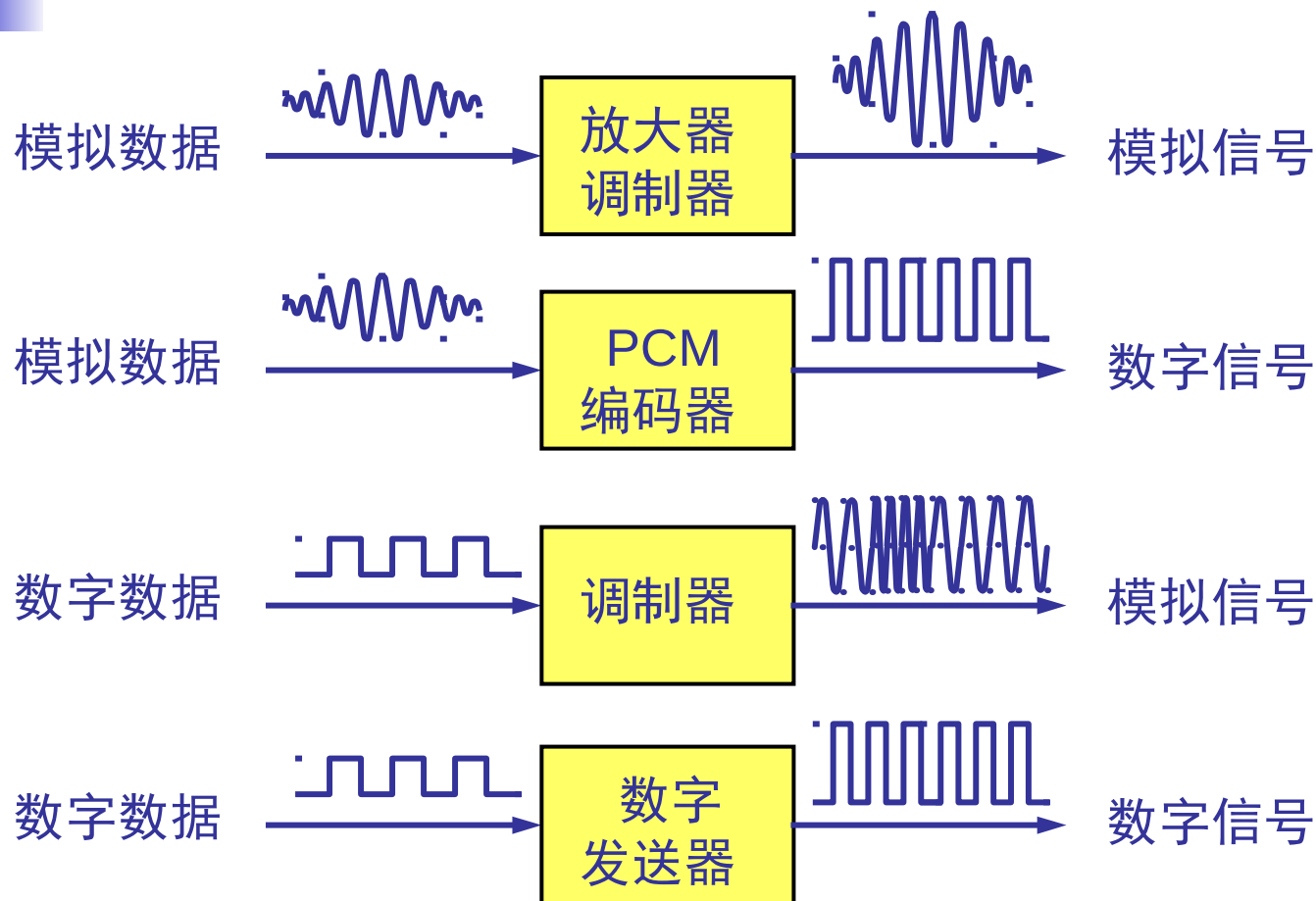




几个术语

- 数据 (data)—— 运送消息的实体。
- 信号 (signal)—— 数据的电气的或电磁的表现。
- “模拟的” (analogous)—— 代表消息的参数的取值是连续的。
- “数字的” (digital)—— 代表消息的参数的取值是离散的。
- 码元 (code)—— 在使用时间域（或简称为时域）的波形表示数字信号时，代表不同离散数值的基本波形。

模拟的和数字的数据、信号





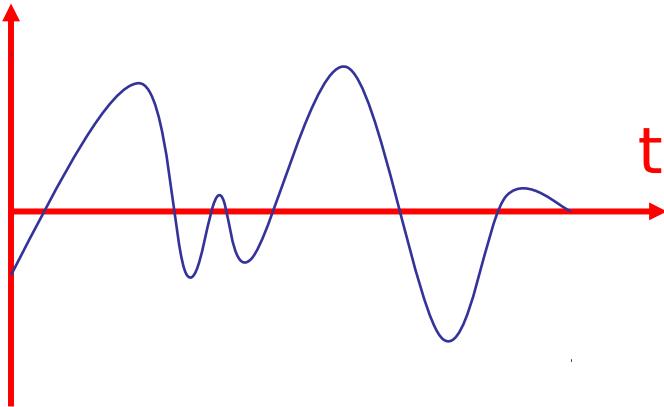
模拟的和数字的数据、信号

- 信号分类：

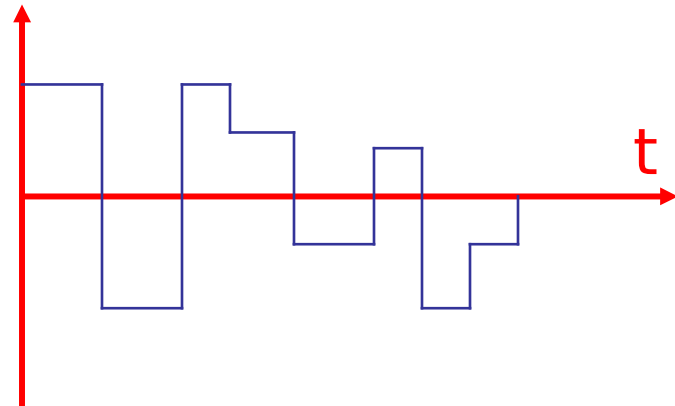
- 模拟信号和数字信号
- 模拟信号是连续变化的电压或电流波形
- 数字信号是一系列表示数字“0”和“1”的电脉冲

模拟信号与数字信号

- 模拟信号：时间上连续，包含无穷多个值
- 数字信号：时间上离散，仅包含有限数目的预定值



a) 模拟信号



b) 数字信号

2.2.2 有关信号的几个基本概念

- **单向通信**（单工通信）——只能有一个方向的通信而没有反方向的交互。
- **双向交替通信**（半双工通信）——通信的双方都可以发送信息，但不能双方同时发送（当然也就不能同时接收）。
- **双向同时通信**（全双工通信）——通信的双方可以同时发送和接收信息。



基带 (baseband) 信号和 带通 (band pass) 信号

- **基带信号**（即基本频带信号）——来自信源的信号。像计算机输出的代表各种文字或图像文件的数据信号都属于基带信号。
- 基带信号往往包含有较多的低频成分，甚至有直流成分，而许多信道并不能传输这种低频分量或直流分量。因此必须对基带信号进行**调制** (modulation)。基带信号调制有 2 种：基带调制和带通调制。
- **基带调制**：仅仅对基带信号的波形进行变换，使它能够与信号特性相适应。



几种最基本的调制方法

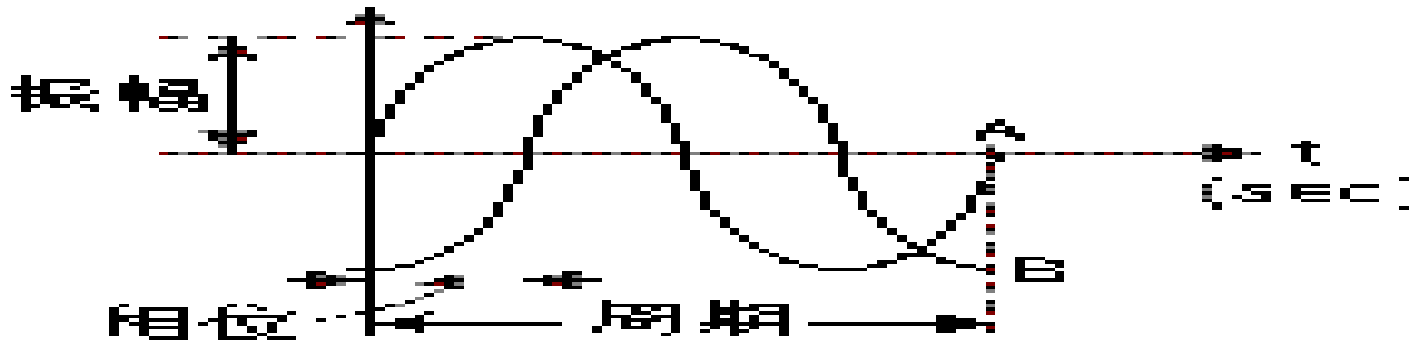
- **带通信号**——把基带信号经过载波调制后，把信号的频率范围搬移到较高的频段以便在信道中传输（即仅在一段频率范围内能够通过信道），这种调制称为带通调制。
- 最基本的二元制带通调制的方法有以下几种：
 - **调幅 (AM)**：载波的振幅随基带数字信号而变化。
 - **调频 (FM)**：载波的频率随基带数字信号而变化。
 - **调相 (PM)**：载波的初始相位随基带数字信号而变化。

模拟数据编码方法

正弦波：

正弦波是最基本的连续信号，其函数为：

$$u(t) = u_m \cdot \sin(\omega t + \varphi_0)$$

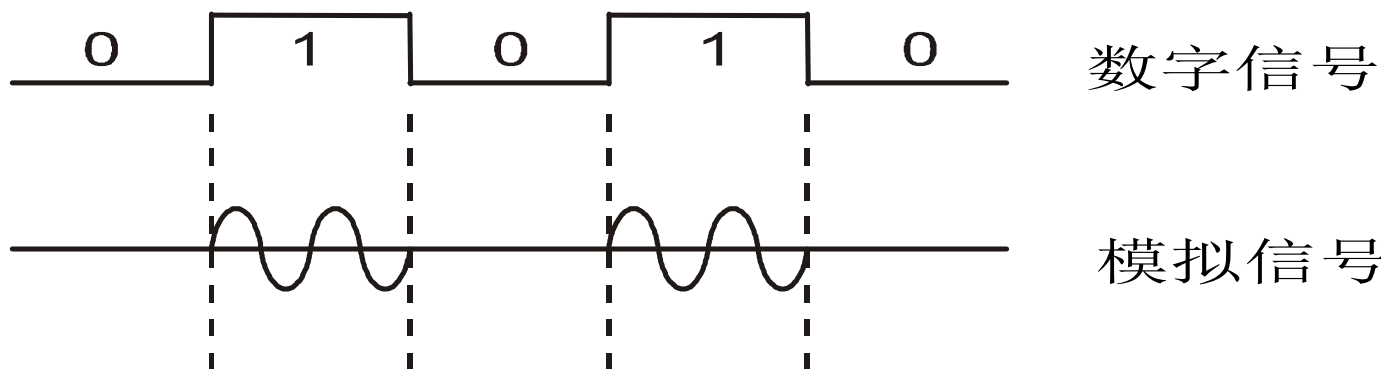


其中 u_m 为振幅（信号峰值）、 ω 为频率（信号重复的速率）、 φ_0 为初相位（单个周期起始位置）。

1. 振幅键控 (amplitude shift keying, ASK)

$$u(t) = \begin{cases} u_m \cdot \sin(\omega_1 t + \varphi_0) & \text{数字 1} \\ 0 & \text{数字 0} \end{cases}$$

振幅不同

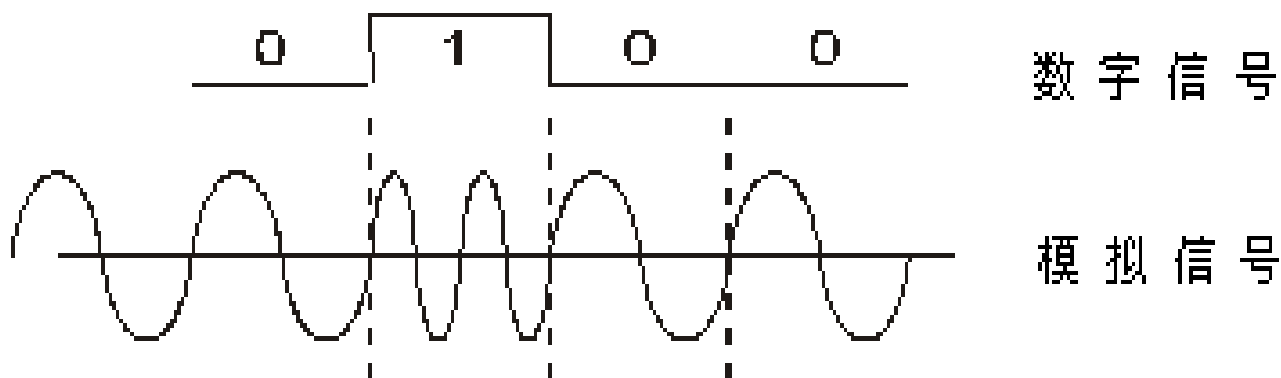


振幅键控 ASK 信号实现容易，技术简单，但抗干扰能力较差。用载波的不同振幅来表示不同的二进制值，如用载波的有无分别表示“1”和“0”。

2. 移频键控 (frequency-shift keying, FSK)

$$u(t) = \begin{cases} u_m \cdot \sin(\omega_1 t + \varphi_0) & \text{数字 1} \\ u_m \cdot \sin(\omega_2 t + \varphi_0) & \text{数字 0} \end{cases}$$

频率不同



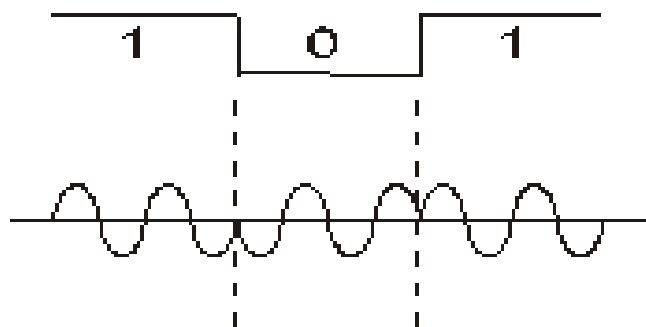
移频键控 FSK 信号实现容易，技术简单，抗干扰能力较强，是目前最常用的调制方法之一。

3. 移相键控 (phase-shift keying, PSK) _

绝对调相

$$u(t) = \begin{cases} u_m \cdot \sin(\omega t + \mathbf{0}) & \text{数字 1} \\ u_m \cdot \sin(\omega t + \mathbf{\pi}) & \text{数字 0} \end{cases}$$

初相不同

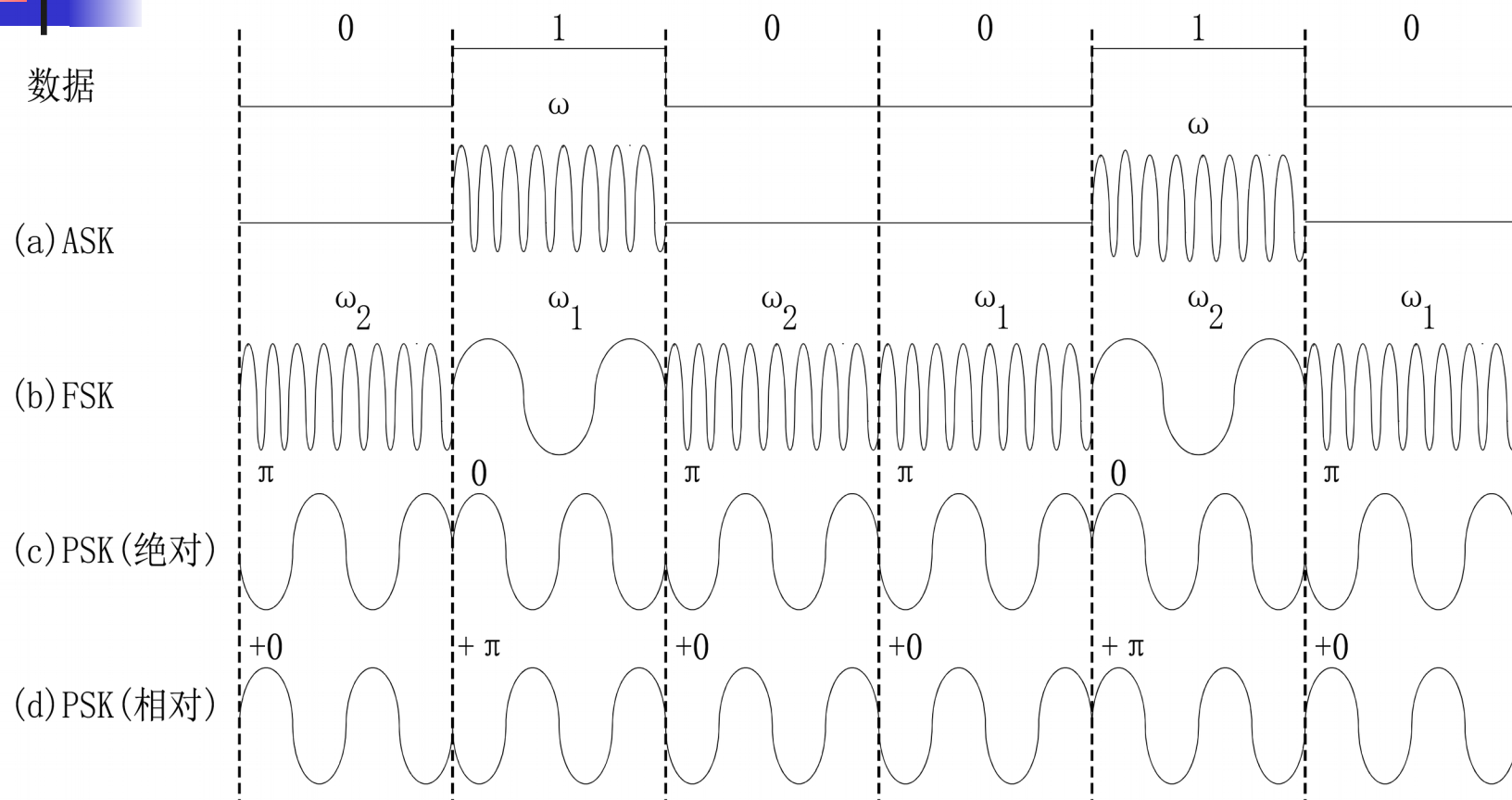


数字信号

模拟信号

对基带数字信号的几种调制方法

(数字信号转换为模拟数据)



“1” 改变初相，“0” 初相不变。

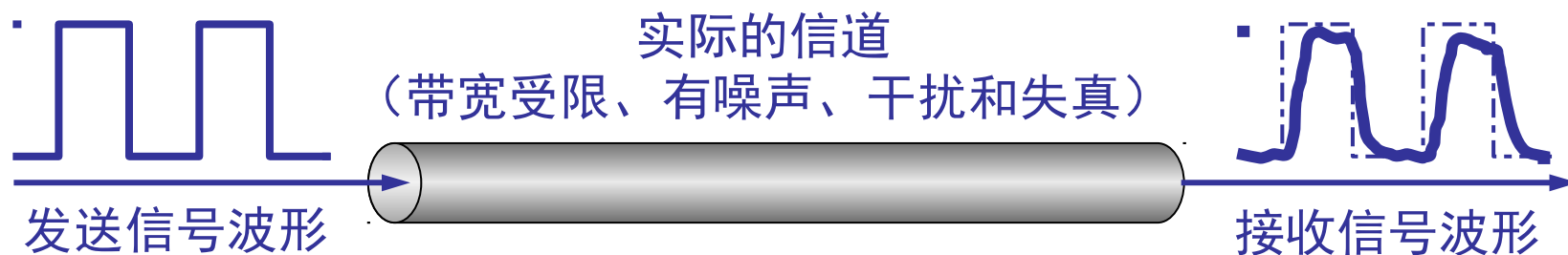


2.2.3 信道的极限容量

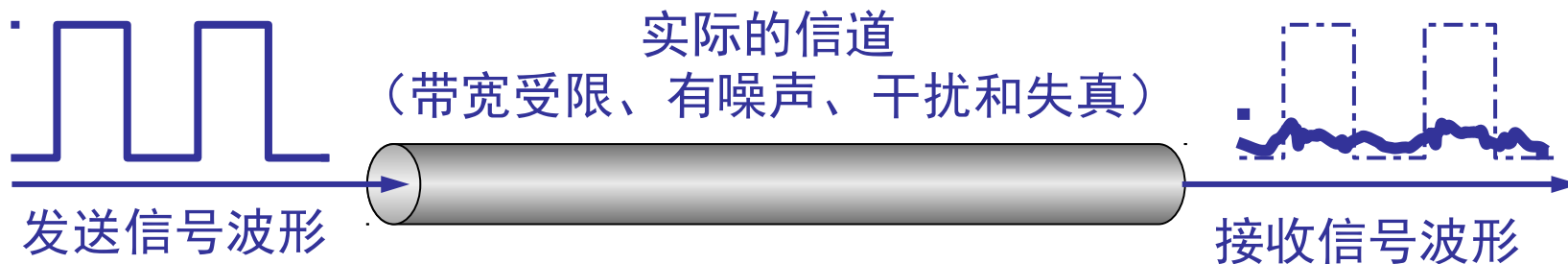
- 任何实际的信道都不是理想的，在传输信号时会产生各种失真以及带来多种干扰。
- 码元传输的速率越高，或信号传输的距离越远，在信道的输出端的波形的失真就越严重。

数字信号通过实际的信道

- 有失真，但可识别



- 失真大，无法识别





噪声

- 传输中的差错都是由于噪声引起的。噪声主要有两大类：一类是信道固有的，持续存在的**热噪声**；一类是由于外界特定的短暂的原因造成的**冲击噪声**。
- 传输过程中的噪声
 - (1) 热噪声：又称白噪声，由电子的热运动产生
 - (2) 脉冲干扰：外来的幅度大而持续时间短的干扰
- 脉冲干扰是数字数据通信造成错误的主要干扰源。
- 由热噪声引起的差错是**随机差错**，或随机错；
- 冲击噪声引起的差错是**突发差错**，或突发错；



(1) 信道能够通过的频率范围

- 1924 年，奈奎斯特 (Nyquist) 就推导出了著名的奈氏准则。他给出了在假定的理想条件下，为了避免码间串扰，码元的传输速率的上限值。
- 在任何信道中，码元传输的速率是有上限的，否则就会出现码间串扰的问题，使接收端对码元的判决（即识别）成为不可能。



计算机网络的带宽

- 计算机网络的带宽是指网络可通过的最高数据率，即每秒多少比特。
- 描述**带宽**也常常把“比特 / 秒”省略。
 - 例如，带宽是 10 M，实际上是 10 Mb/s。
 - 这里的 M 是 10^6 。



什么是宽带？

- 宽带线路：可通过较高数据率的线路。
- 宽带是相对的概念，并没有绝对的标准。
- 在目前，对于用户接入到因特网的用户线来说，每秒传送几个兆比特就可以算是宽带速率。



对宽带传输的错误概念

- 有些人愿意用“汽车在公路上跑”来比喻“比特在网络上传输”，认为宽带传输的好处就是传输更快，好比汽车在高速公路上可以跑得更快一样。
- 对于这种比喻一定要谨慎对待。

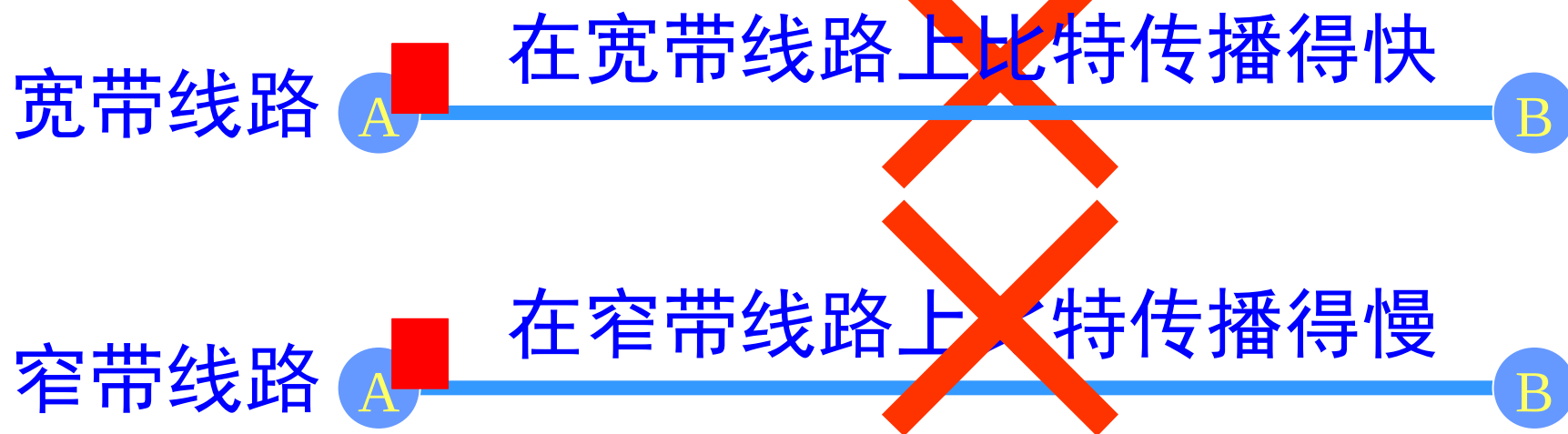


常见的错误是混淆了两种速率

- 在网络中有两种不同的速率：
 - 信号（即电磁波）在传输媒体上的传播速率（米 / 秒，或公里 / 秒）
 - 传输速率：计算机向网络发送比特的速率（比特 / 秒）
- 这两种速率的意义和单位完全不同。
- 宽带传输：计算机向网络发送比特的速率较高。



错误的概念



正确的概念

宽带线路

A

B

窄带线路

A

B

宽带线路：每秒有更多比特从计算机注入到线路。
宽带线路和窄带线路上比特的传播速率是一样的。



比喻：汽车运货

宽带线路

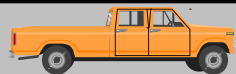
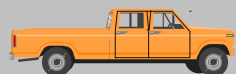
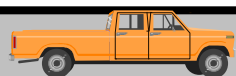
窄带线路

宽带和窄带线路：车速一样

宽带线路：车距缩短

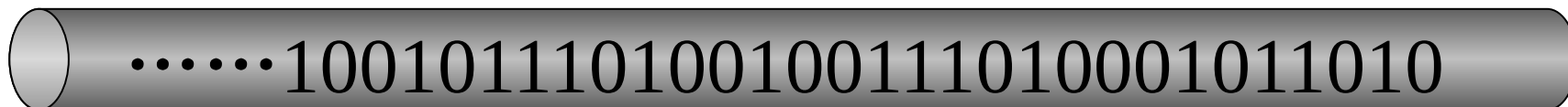
另一种错误概念

——“宽带”相当于“多车道”



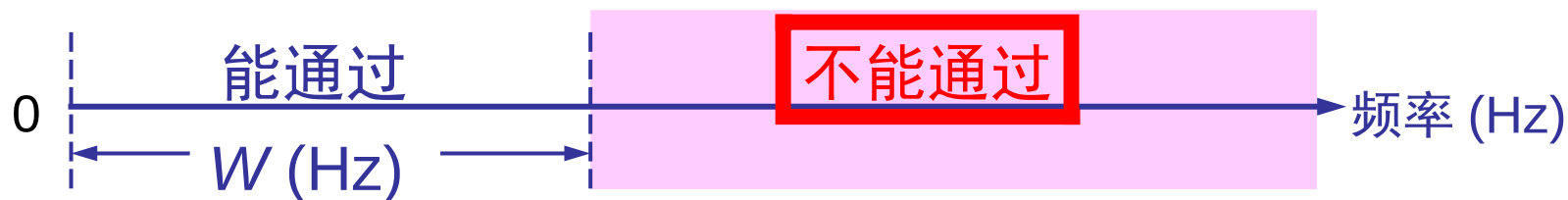
多车道公路是并行传输

通信线路上通常都是串行传输



奈奎斯特 (Nyquist) 定律

- 奈奎斯特定律是理想低通信道的最高码元传输速率。
- 奈奎斯特定律 -- 无噪信道传输能力公式。



- **理想低通信道**：信号的所有低频分量。只要其频率不超过某个上限，信号都能不失真的通过此信道。



奈奎斯特定律

- 最大数据传输速率（比特率） B_{\max} ：
 - 根据奈奎斯特定律：（无噪声）
$$B_{\max} = 2W \cdot \log_2 L \text{ (b/s)}$$
 L 为码元状态数
通常 $L = 2^K$ ， K 为二进制信息的位数， $K = \log_2 L$
 - L 某给定时刻数字信号可能取的离散值的个数
 - W 是理想低通信道（无噪声）的带宽。



(2) 香农定理 ---- 信噪比

- 香农 (Shannon) 用信息论的理论推导出了带宽受限且有高斯白噪声干扰的信道的**极限、无差错的信息传输速率**。
- 香农定理：信道的极限信息传输速率：

$$C_{max} = W \log_2(1+S/N) \text{ b/s}$$

- W 为信道的带宽；
- S 为信道内所传信号的平均功率；
- N 为信道内部的高斯噪声功率。



香农公式表明

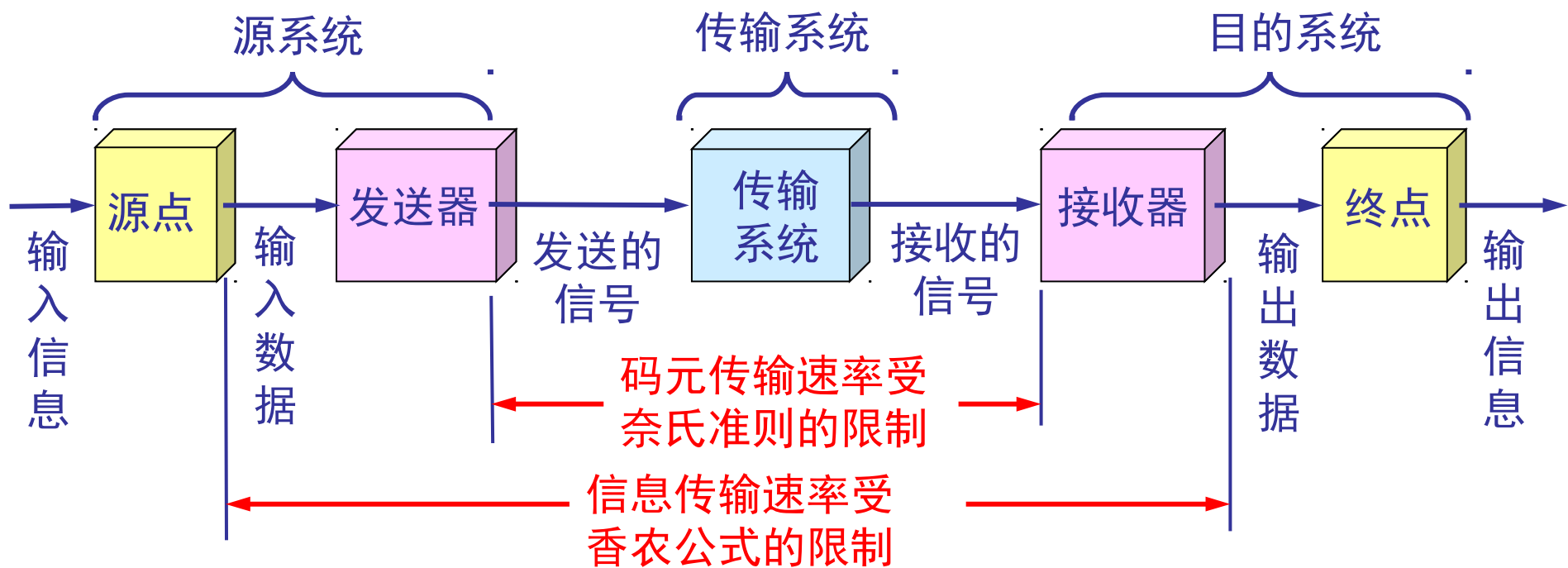
- 信道的带宽或信道中的信噪比越大，则信息的极限传输速率就越高。
- 只要信息传输速率低于信道的极限信息传输速率，就一定可以找到某种办法来实现无差错的传输。
- 实际信道上能够达到的信息传输速率要比香农的极限传输速率低不少。



请注意

- 对于**频带宽度已确定**的信道，如果**信噪比**不能再提高了，并且码元传输速率也达到了上限值，那么还有办法提高信息的传输速率？
- 这就是用编码的方法让每一个码元携带更多比特的信息量。

奈氏准则和香农公式 在数据通信系统中的作用范围





奈氏准则和香农公式的主要区别是什么？ 这两个公式对数据通信的意义是什么？

- 答：奈氏准则指出了：码元传输的速率是受限的，不能任意提高，否则在接收端就无法正确判定码元是 1 还是 0（因为有码元之间的相互干扰）。
- 奈氏准则是在理想条件下推导出的。在实际条件下，最高码元传输速率要比理想条件下得出的数值还要小些。电信技术人员的任务就是要在实际条件下，寻找出较好的传输码元波形，将比特转换为较为合适的传输信号。

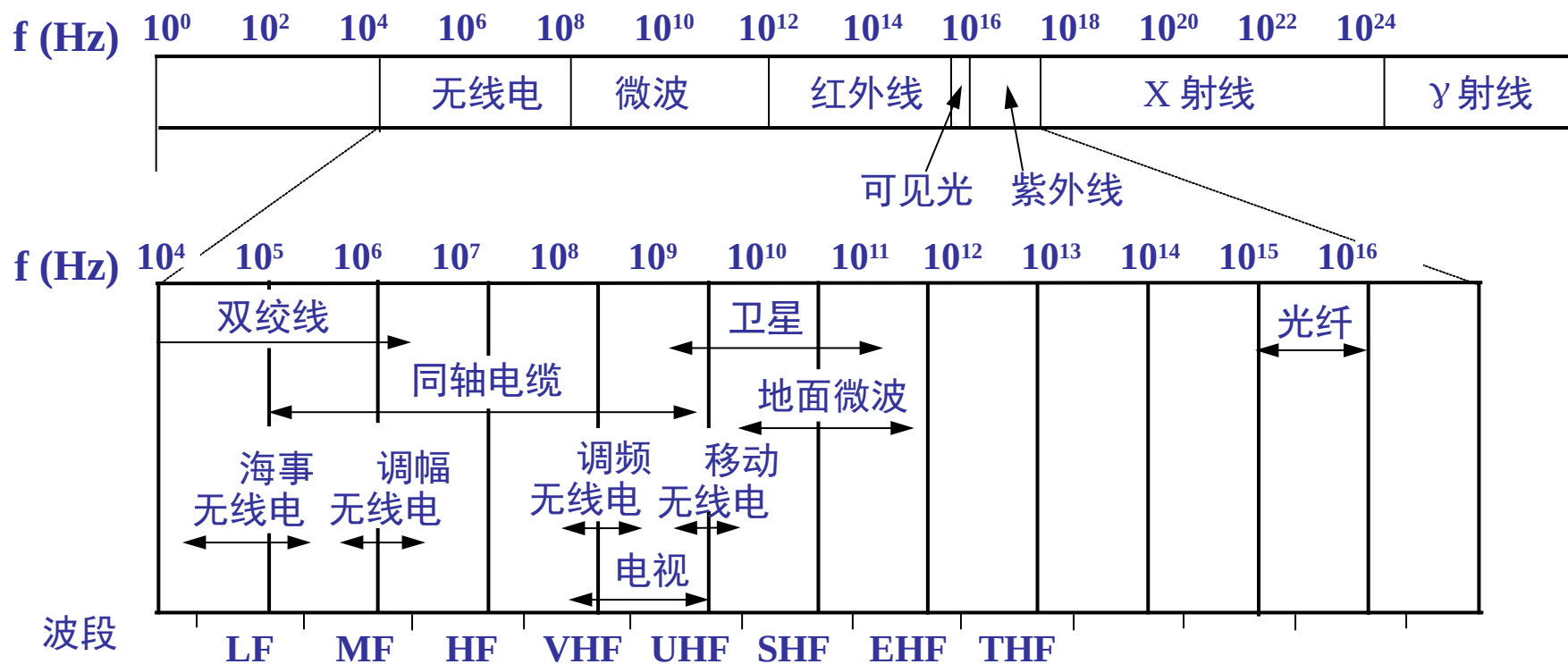


奈氏准则和香农公式的主要区别是什么？ 这两个公式对数据通信的意义是什么？

- 香农公式给出了信息传输速率的极限，即对于一定的传输带宽（以赫兹为单位）和一定的信噪比，信息传输速率的上限就确定了。这个极限是不能够突破的。要想提高信息的传输速率，或者必须设法提高传输线路的**带宽**，或者必须设法提高所传信号的**信噪比**，此外没有任何办法。
- 香农公式告诉我们，若要得到**无限大的信息传输速率**，只有两个办法：要么使用无限大的传输带宽（这显然不可能），要么使信号的信噪比为无限大，即采用没有噪声的传输信道或使用无限大的发送功率（当然这些也都是不可能的）。

2.3 物理层下面的传输媒体

电信领域使用的电磁波的频谱





2.3.1 导向传输媒体

- 双绞线
 - 屏蔽双绞线 STP (Shielded Twisted Pair)
 - 无屏蔽双绞线 UTP (Unshielded Twisted Pair)
- 同轴电缆
 - 50 Ω 同轴电缆
 - 75 Ω 同轴电缆
- 光缆



一、双绞线的主要特性

双绞线是由两根绝缘芯线按一定密度相互绞绕组成，每根绝缘芯线由各种颜色塑料绝缘层的金属导线构成。将多对（2对或4对）双绞线封装在一个塑料封套内，便形成了双绞线电缆。

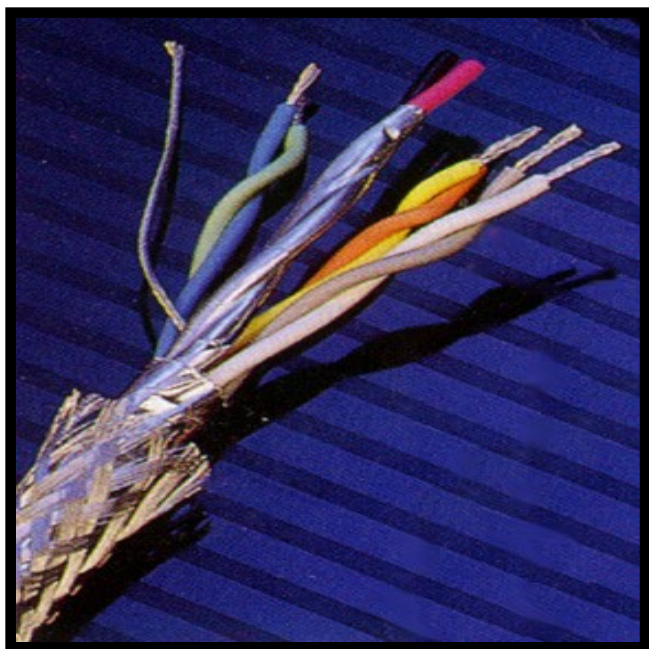


双绞线分类

- ◆ 双绞线可分为**非屏蔽双绞线**（UTP、Unshielded Twisted-Pair）和**屏蔽双绞线**（STP、Shielded Twisted-Pair 在外层封套内加一层金属屏蔽层）
- ◆ 双绞线按电气性能划分可分为：三类、四类、五类、超五类、六类、七类双绞线等类型。

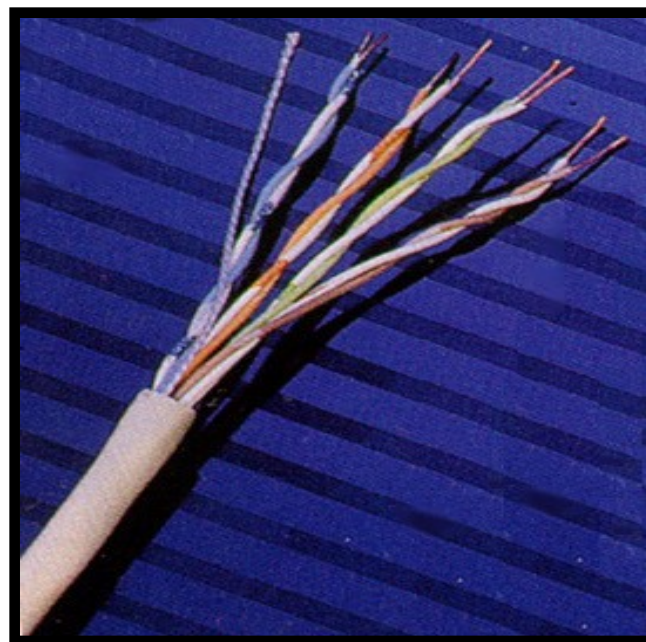
屏蔽双绞线 (STP) (UTP)

- 以铝箔屏蔽以减少
干扰和串音

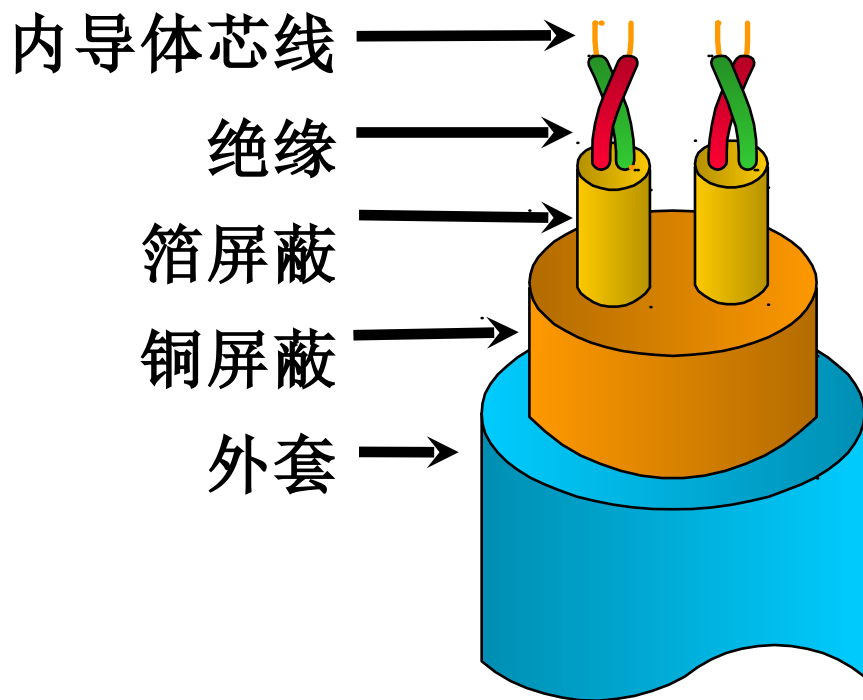


非屏蔽双绞线

3 类、5 类、6 类
双绞线外没有任何附加屏蔽



屏蔽双绞线



- 螺旋绞合的双导线， $\Phi \approx 1\text{mm}$
- 典型连接距离 100m (LAN)
- RJ11、RJ45 插座、插头
- 优缺点：
 - 成本低
 - 密度高、节省空间
 - 安装容易 (综合布线系统)
 - 平衡传输 (高速率)
 - 抗干扰性一般
 - 连接距离较短



2. 双绞线主要的品牌

- ◆ 安普（AMP）：是最常见的品牌，质量好、价格便宜。
- ◆ 西蒙（Siemon）：它相比安普品牌来说，档次要高许多，质量、技术特性都高出一个档次，当然其价格也高许多。
- ◆ 朗讯（Lucent）：用于高端网络组建。
- ◆ 丽特（NORDX/CDT）：它在各项性能参数上都较高。



3. 双绞线性能指标

在计算机局域网中，双绞线最长距为 100 米。在计算机网络中常用超 5 类和 6 类两种双绞线电缆，这两类双绞线电缆都是由 4 对双绞线组成。3 类双绞线速率可达 10Mbps，5 类双绞线速率可达 100Mbps，超 5 类（5 类 e）最高传输速率为 1000Mbps，6 类双绞线最高传输速率为 2.4Gbps



双绞线线序

为了减少线对之间的电磁干扰，双绞线由两根以螺旋状扭合在一起的绝缘铜导线组成。

EIA/TIA T568A 和 EIA/TIA T568B 标准线序 如下图

表 7-1 EIA/TIA T568A 和 EIA/TIA T568B 标准线序

脚位	1	2	3	4	5	6	7	8
T568A	白绿	绿	白橙	蓝	白蓝	橙	白棕	棕
T568B	白橙	橙	白绿	蓝	白蓝	绿	白棕	棕
绕对	同一绕对		与 6 同 一绕对	同一绕对		与 3 同 一绕对	同一绕对	

二、同轴电缆的主要特性

同轴电缆由一对导体按照“同轴”的形式构成线对，其结构如下图所示：



其中最内层是铜芯导体，轴心被绝缘层环形包裹，绝缘层又被外层导体环形包裹，最外层用绝缘塑料包封。



同轴电缆分类

- ◆ **基带同轴电缆**：电缆阻抗 $50\ \Omega$ ，通常用于局域网数字信号传输，数据传输速率最高可达 **10Mbps**。基带同轴电缆又分**粗缆**和**细缆**两种，在 10Mbps 的数据传输速率下，粗缆的传输距离可 500 米，细缆为 185 米；
- ◆ **宽带同轴电缆**：阻抗为 $75\ \Omega$ ，通常用于传输公用有线电视（CATV）的模拟信号，模拟信号的最高带宽可达 450MHz，可采用多路频分复用技术（FDM）传输多路信号。



三、光纤电缆的主要特性

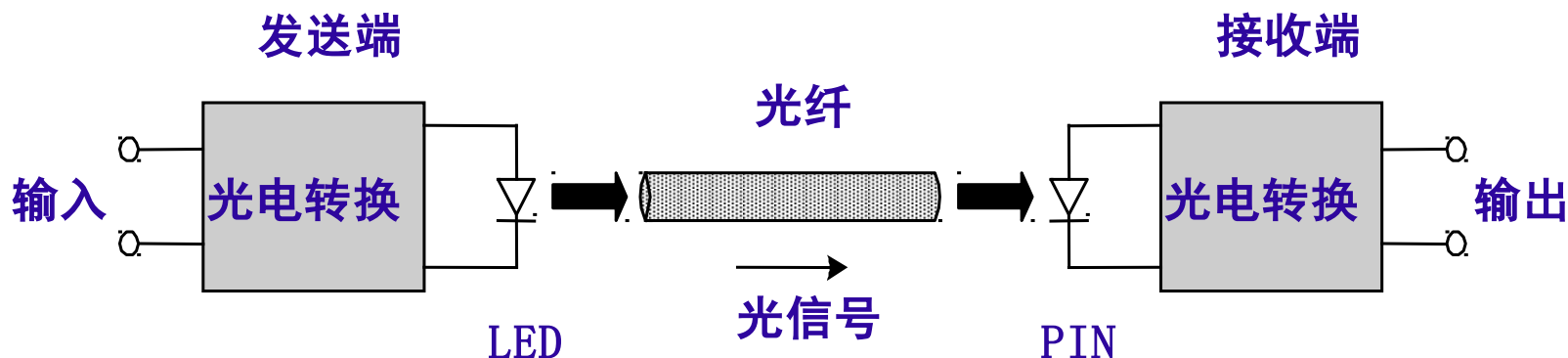
1. 光纤组成

光纤的材质是极细小的玻璃纤维（50–100 μm ），它由三部分组成：

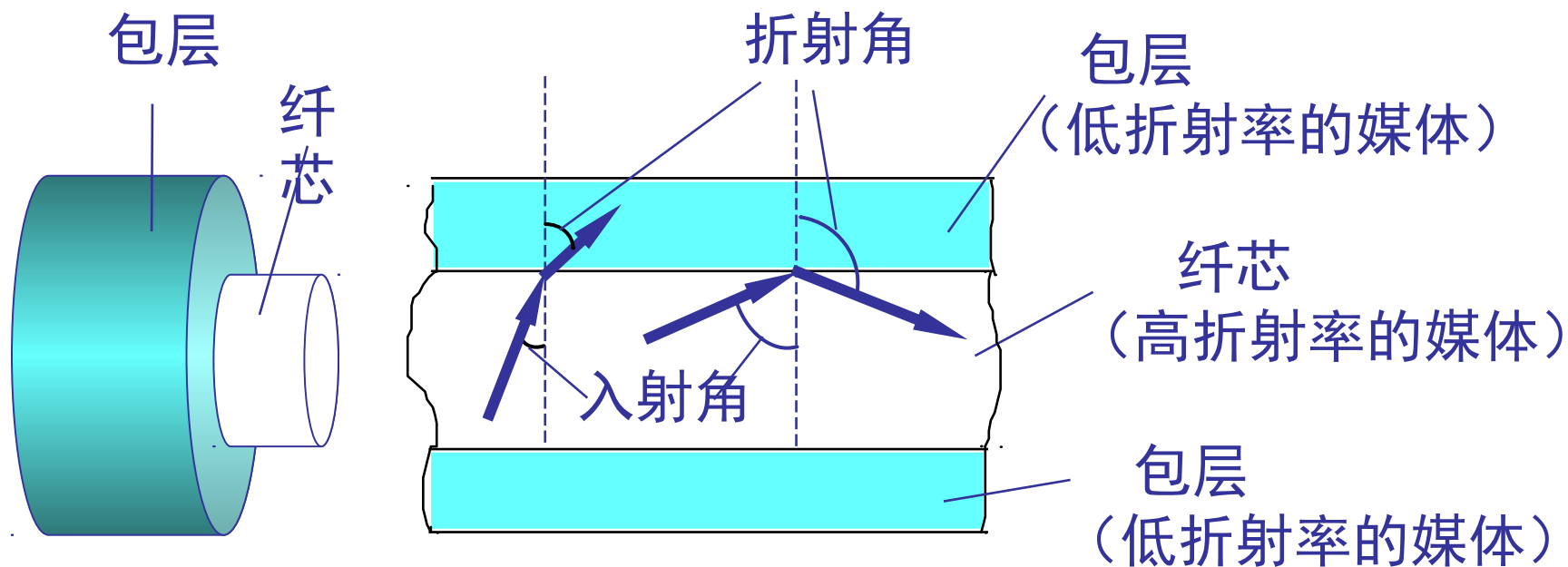
- ◆ 纤芯：玻璃纤维，用于传送光波信号；
- ◆ 包层：具有较低的折射率物质，当光波在纤芯中传送时，便是通过包层与纤芯的接触面进行反射；
- ◆ 保护外套：不透光的材质，用于隔绝外来的干扰，并用于保护纤芯。

光纤系统组成

在光波传输过程中，在发送端要先将电信号转换成光信号，在接收端再用光检测器将光信号还原成电信号，因而光纤系统由三部分组成：



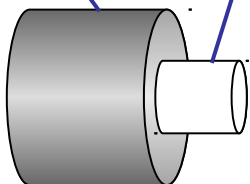
光线在光纤中的折射



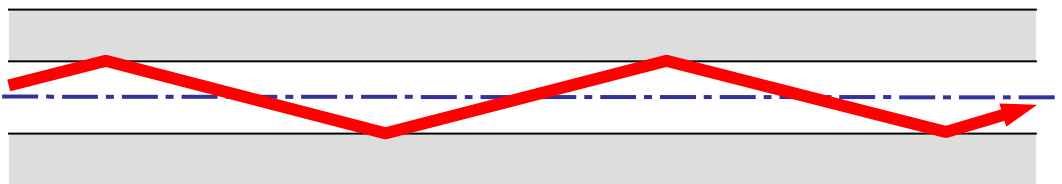
光纤的工作原理

低折射率
(包层)

高折射率
(纤芯)



光线在纤芯中传输的方式是不断地全反射





单模光纤与多模光纤

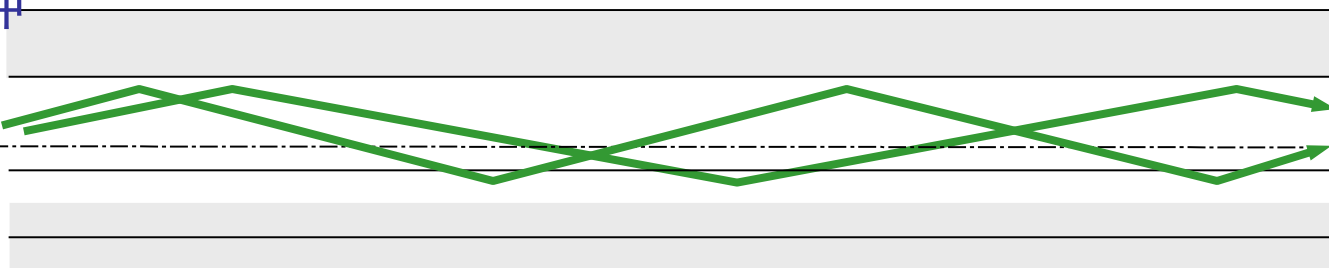
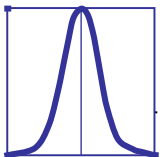
- ◆ 光纤有多模光纤和单模光纤。
- ◆ **多模光纤**通过纤芯和包层的边界折射进行传播，在光纤内部有多条光线同时传播，故称为多模光纤；
- ◆ **单模光纤**中的光线以直线传播而不发生反射。



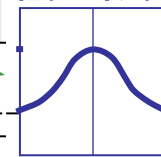
多模光纤与单模光纤

多模光纤

输入脉冲

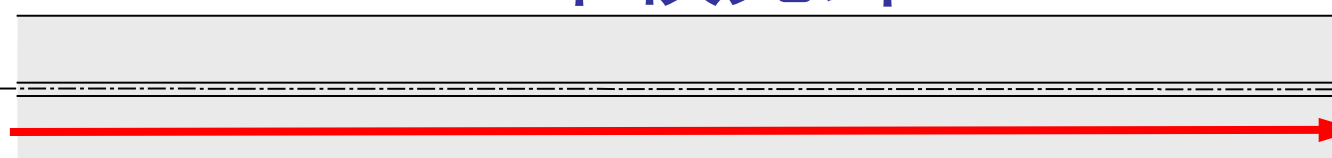
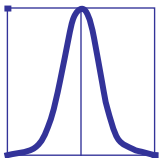


输出脉冲

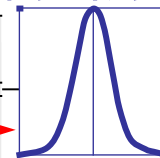


单模光纤

输入脉冲



输出脉冲





单模光纤与多模光纤性能比较

多模光纤	单模光纤
适合近距离低速率传输	适合长距离高速率传输
芯粗	芯细
价格较低	价格昂贵
散射大，效率较低	散射小，效率较高



2.3.2 非导向传输媒体

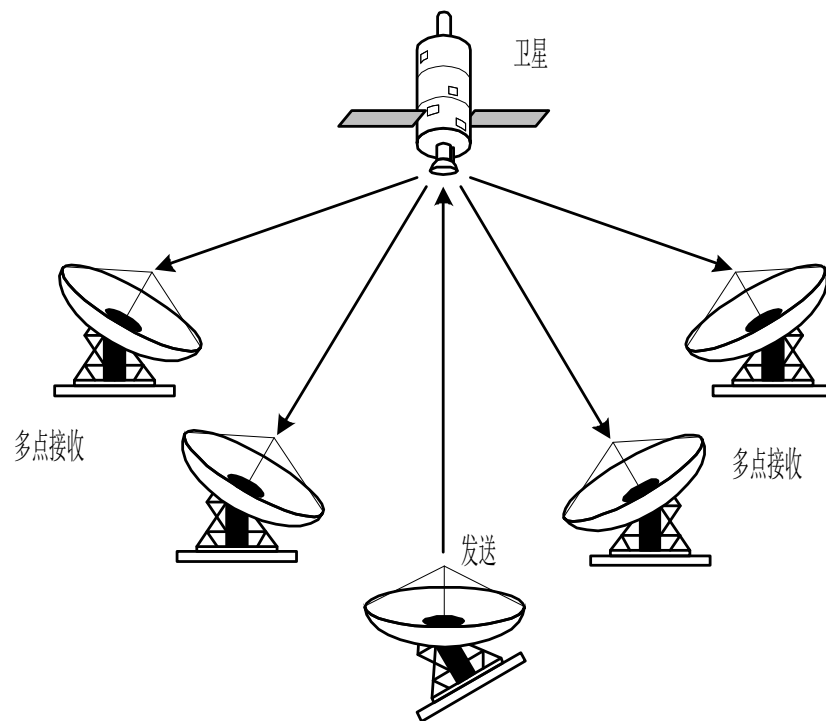
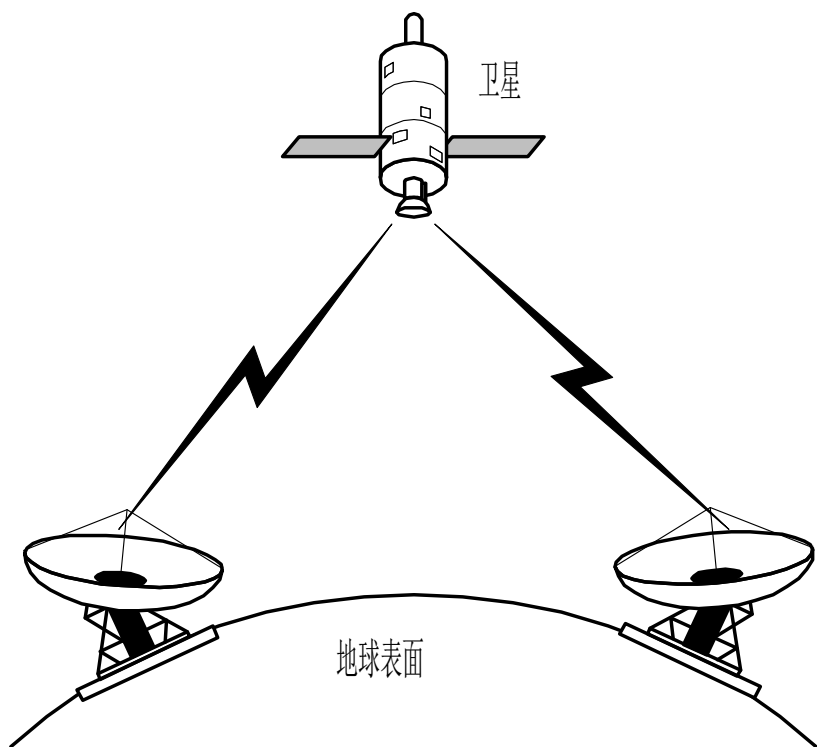
- 无线传输所使用的频段很广。
- 短波通信主要是靠电离层的反射，但短波信道的通信质量较差。
- 微波在空间主要是直线传播。
 - 地面微波接力通信
 - 卫星通信



微波通信

- 微波频率在 100MHz—10GHz，对应的信号波长为 0.3—3m
- 微波信号传输的特点：
 - (1) 只能进行视距传播。微波没有绕射功能，微波在地面一般采用点点通信方式。
 - (2) 大气对微波信号的吸收与辐射影响较大。
- 由于微波信号的波长比较短，因此可以利用尺寸较小的抛物面天线，就可以将微波信号能量集中在一个很小的波束内发送出去，这样就可以用很小的发射功率来进行远距离通信；
- 微波信号的频率很高，因此可以获得较大的通信带宽，特别适合于卫星通信与城市建筑物之间的通信。

卫星通信



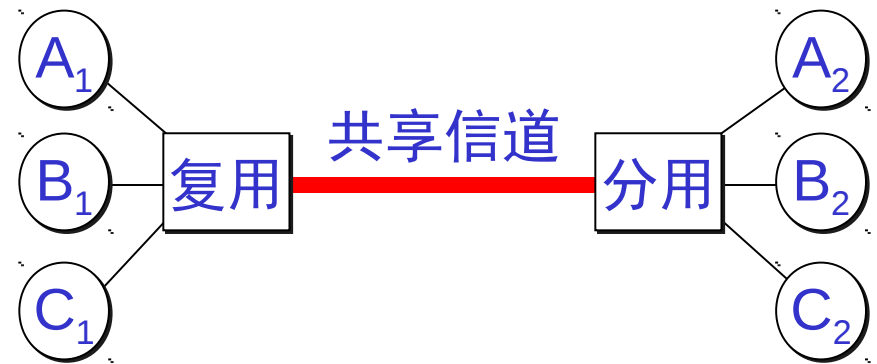
2.4 信道复用技术

2.4.1 频分复用、时分复用和统计时分复用

复用 (multiplexing) 是通信技术中的基本概念。



(a) 不使用复用技术



(b) 使用复用技术



多路复用技术及分类

- 定义：

- 多路复用技术就是将多路信号组合在一条物理信道上进行传输，到接收端再用专门的设备将各路信号分离开来。这样使一路信道资源被多路信号共享。

- 分类：

- 频分多路复用 (FDM)
- 时分多路复用 (TDM)
- 波分多路复用 (WDM)
- 码分多址 (CDMA)



频分多路复用 (FDM)

■ FDM :

- Frequency Division Multiplexing
- 当传输介质的可用带宽超过各路给定信号所需带宽的总和时，可以把多个信号调制在不同的载波频率上，从而在同一介质上实现同时传送多路信号，这就是频分多路复用。

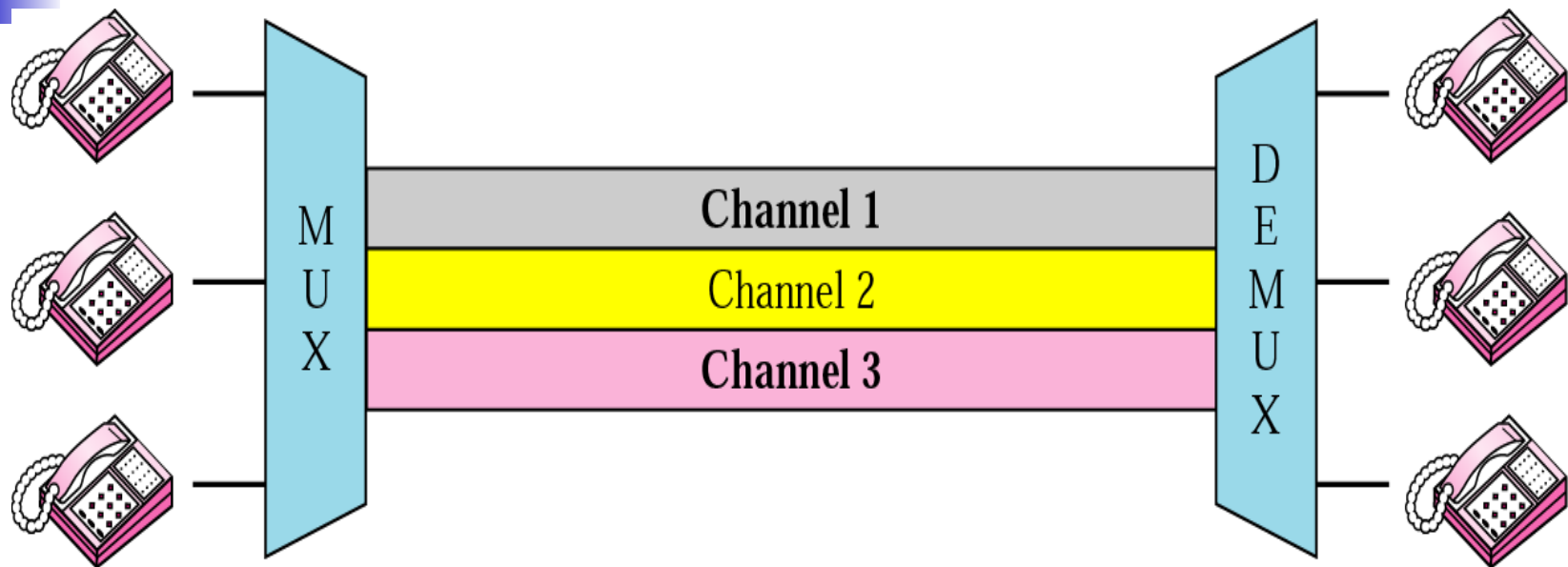
频分复用 FDM

(Frequency Division Multiplexing)

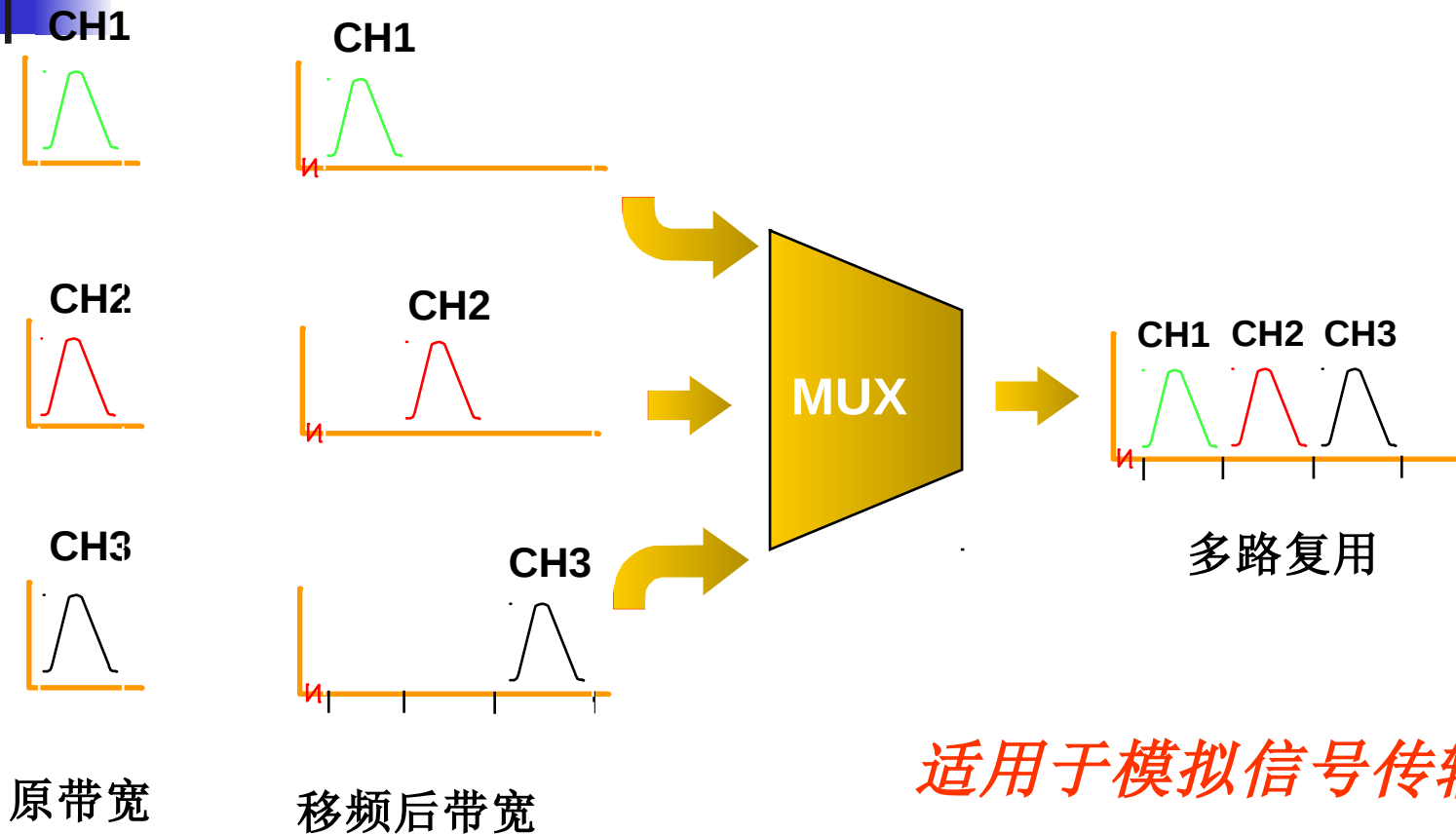
- 用户在分配到一定的频带后，在通信过程中自始至终都占用这个频带。
- **频分复用**的所有用户在同样的时间占用不同的带宽资源（请注意，这里的“带宽”是频率带宽而不是数据的发送速率）。



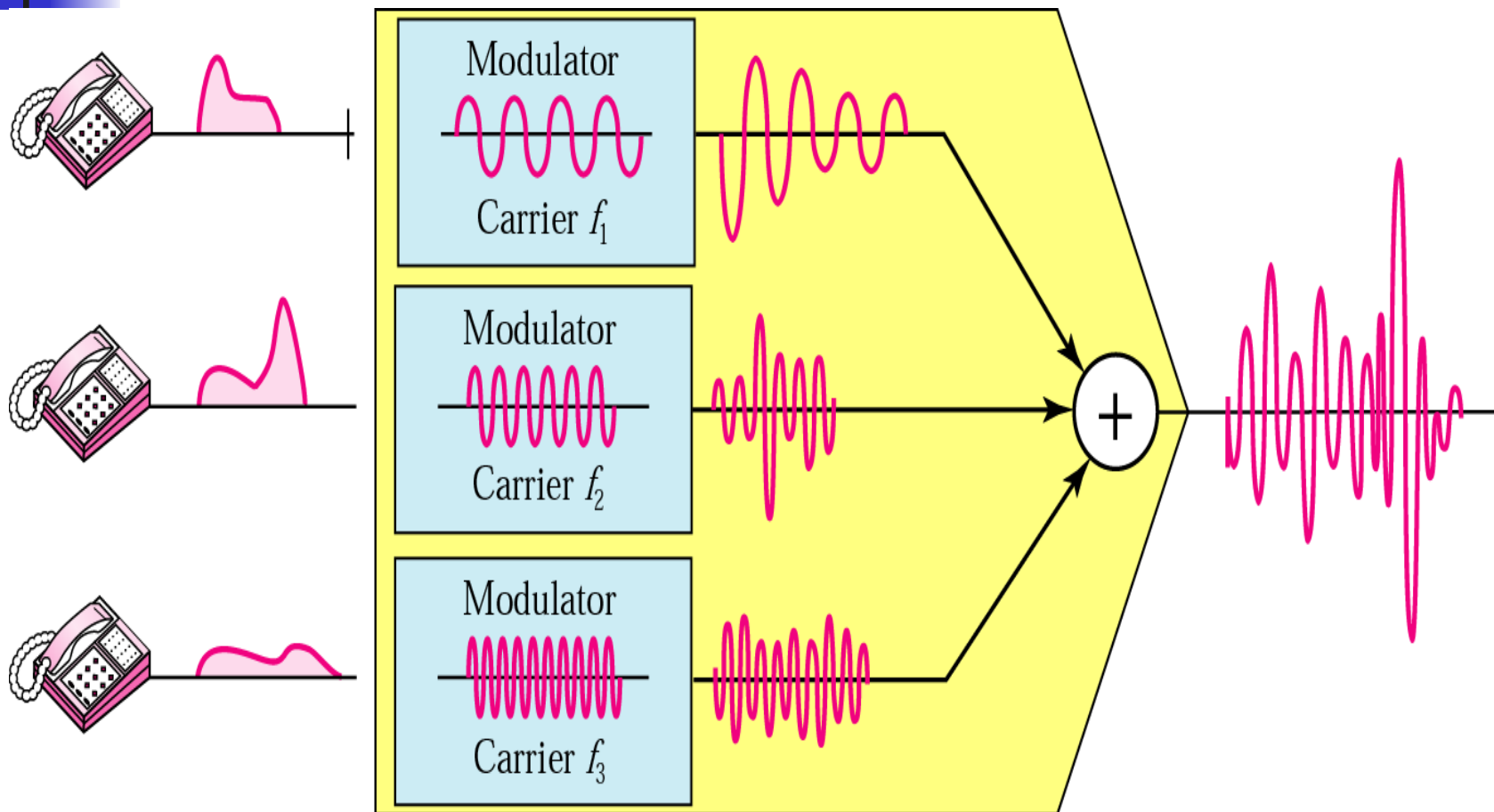
频分多路复用 (续)



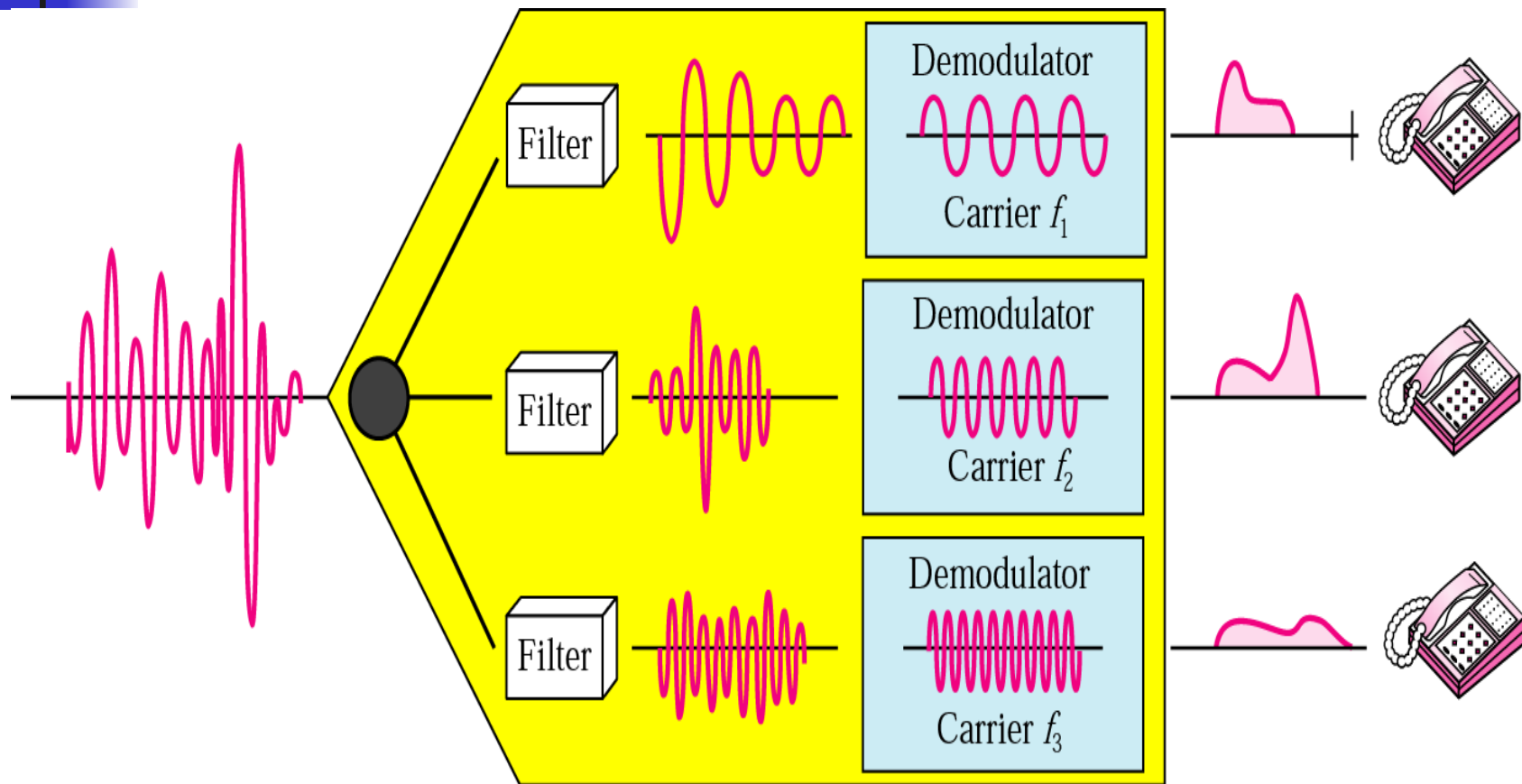
频分多路复用 (续)



FDM 多路复用过程例



FDM 解多路复用



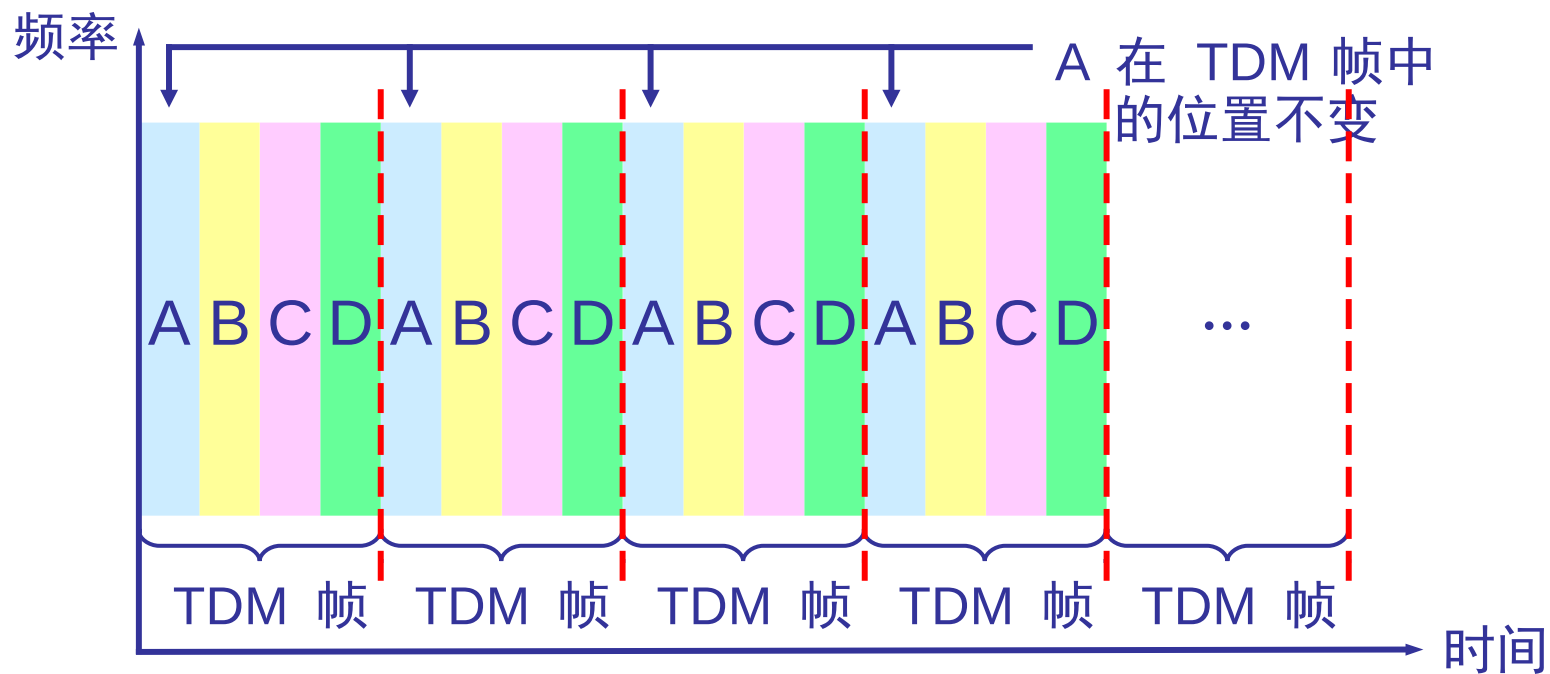


时分复用 TDM

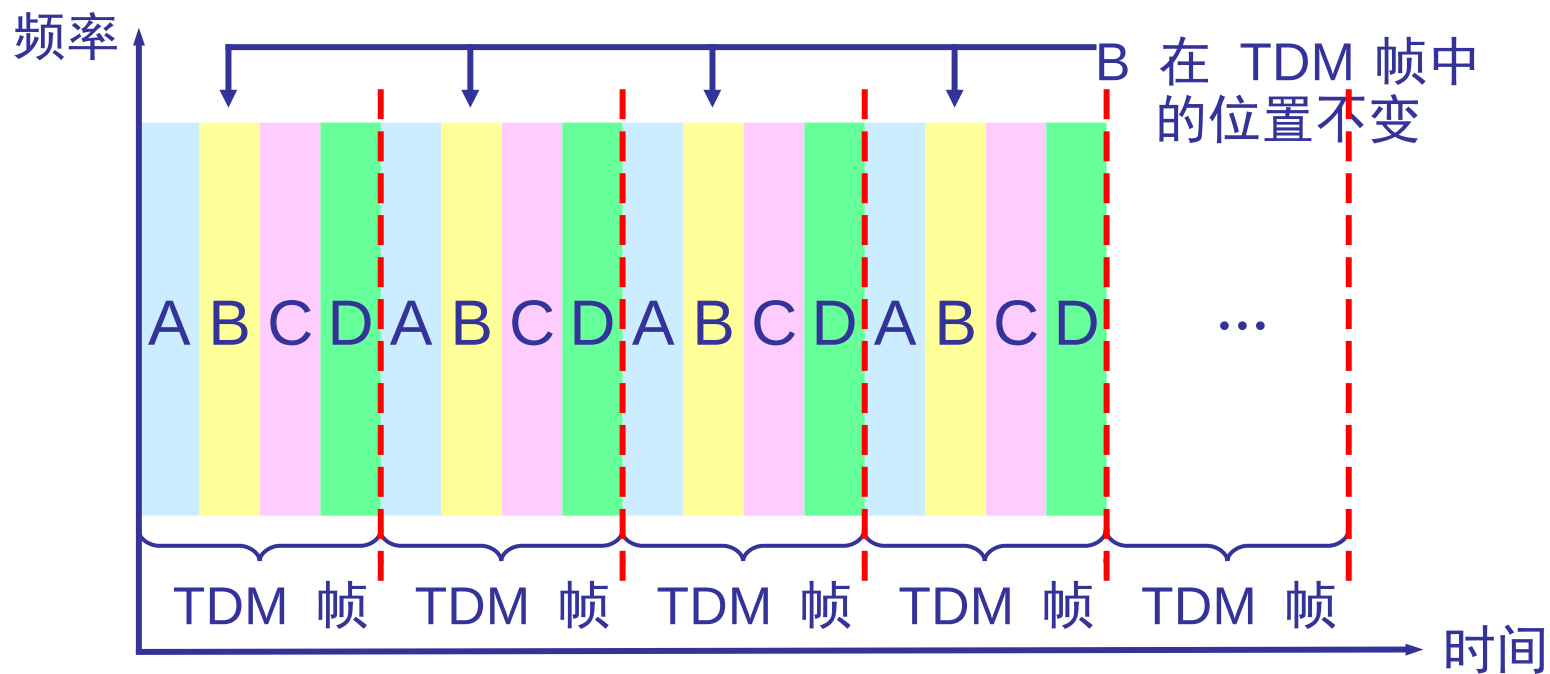
(Time Division Multiplexing)

- 时分复用则是将时间划分为一段段等长的时分复用帧（TDM 帧）。每一个时分复用的用户在每一个 TDM 帧中占用固定序号的时隙。
- 每一个用户所占用的时隙是周期性地出现（其周期就是 TDM 帧的长度）。
- TDM 信号也称为等时 (isochronous) 信号。
- 时分复用的所有用户是在不同的时间占用同样的频带宽度。
- 分类：同步 TDM 和统计 TDM。

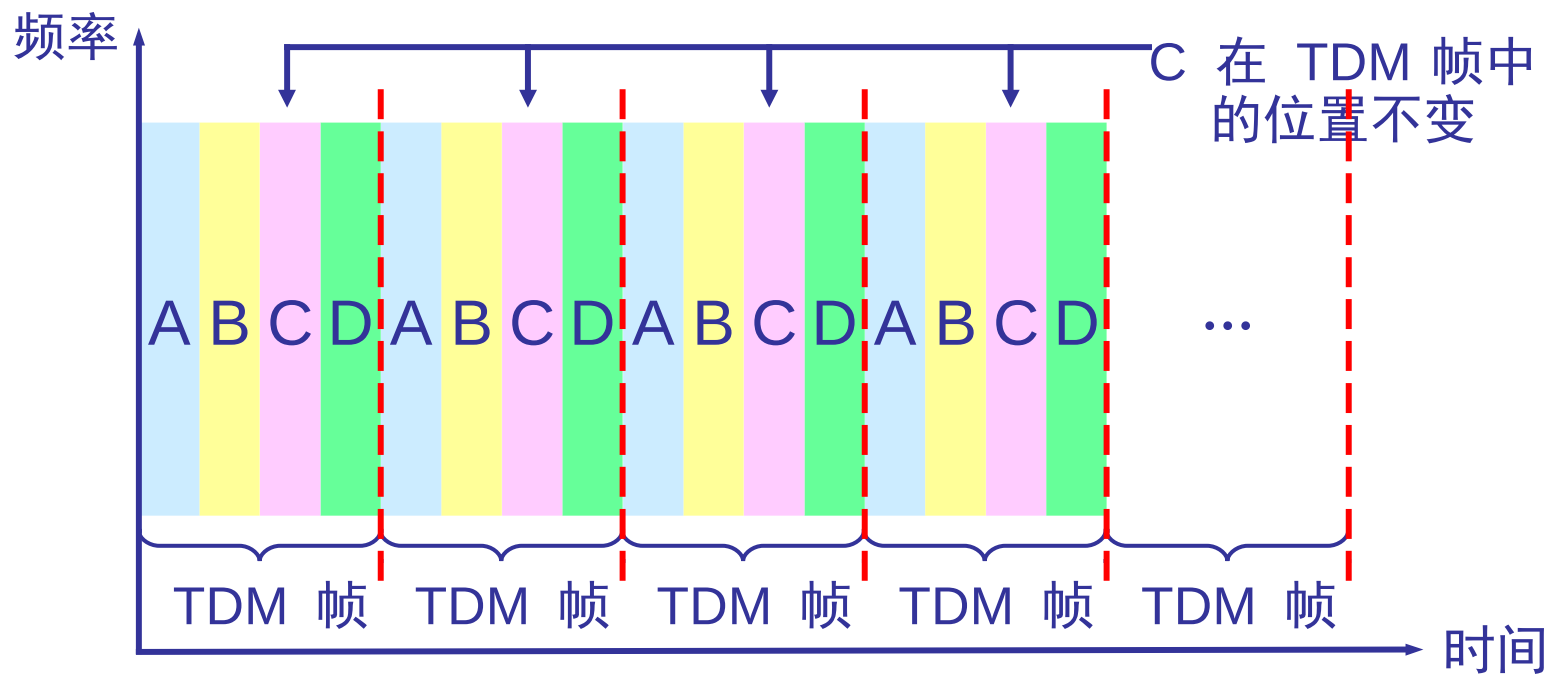
时分复用



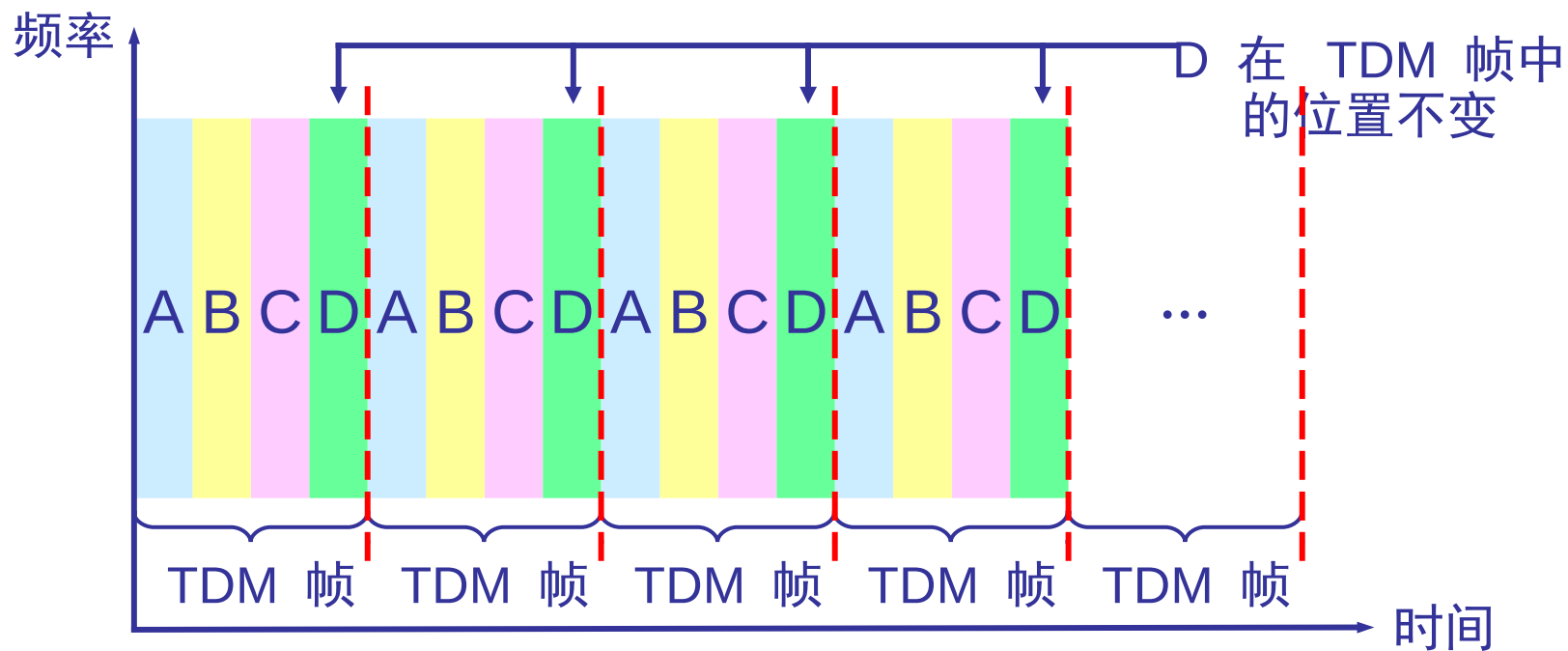
时分复用



时分复用



时分复用

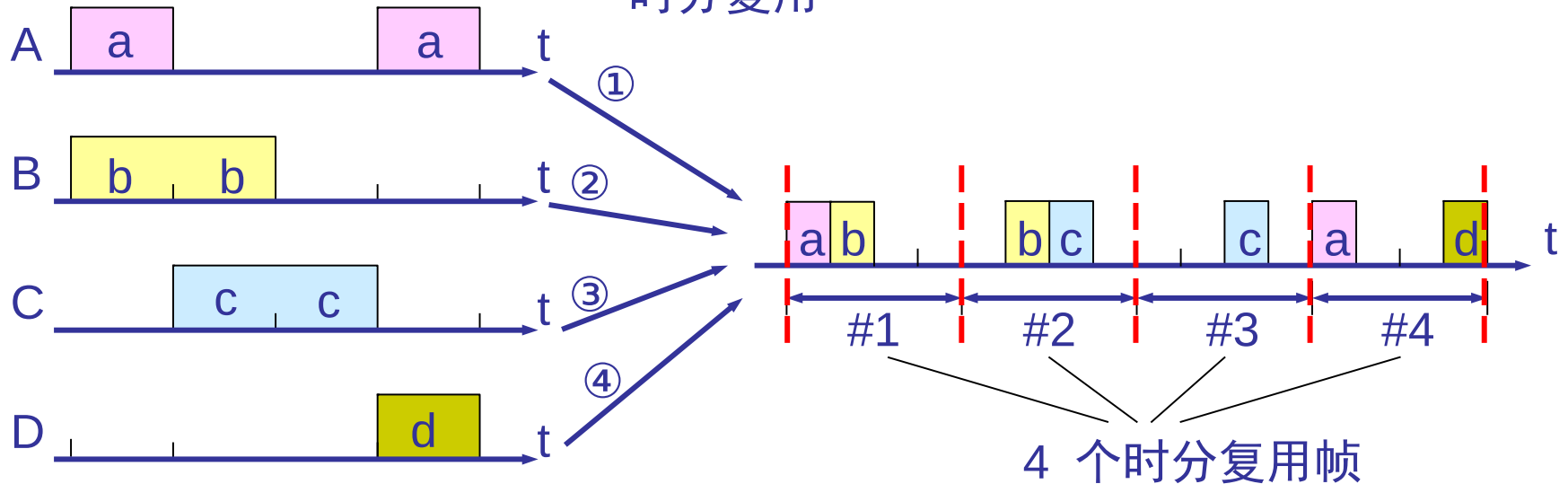


时分复用可能会造成 线路资源的浪费

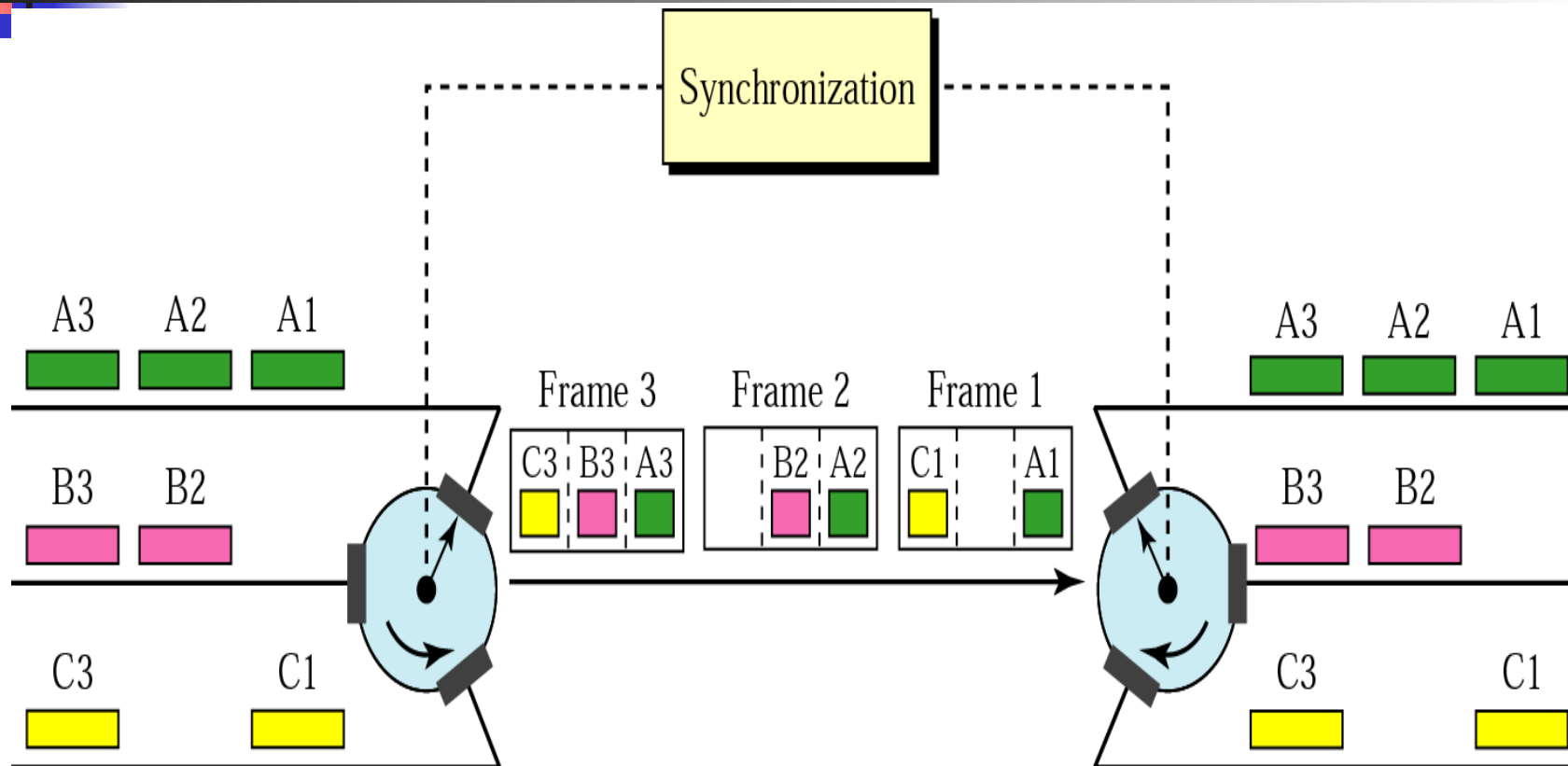
使用时分复用系统传送计算机数据时，由于计算机数据的突发性质，用户对分配到的子信道的利用率一般是不高的。

用户

时分复用



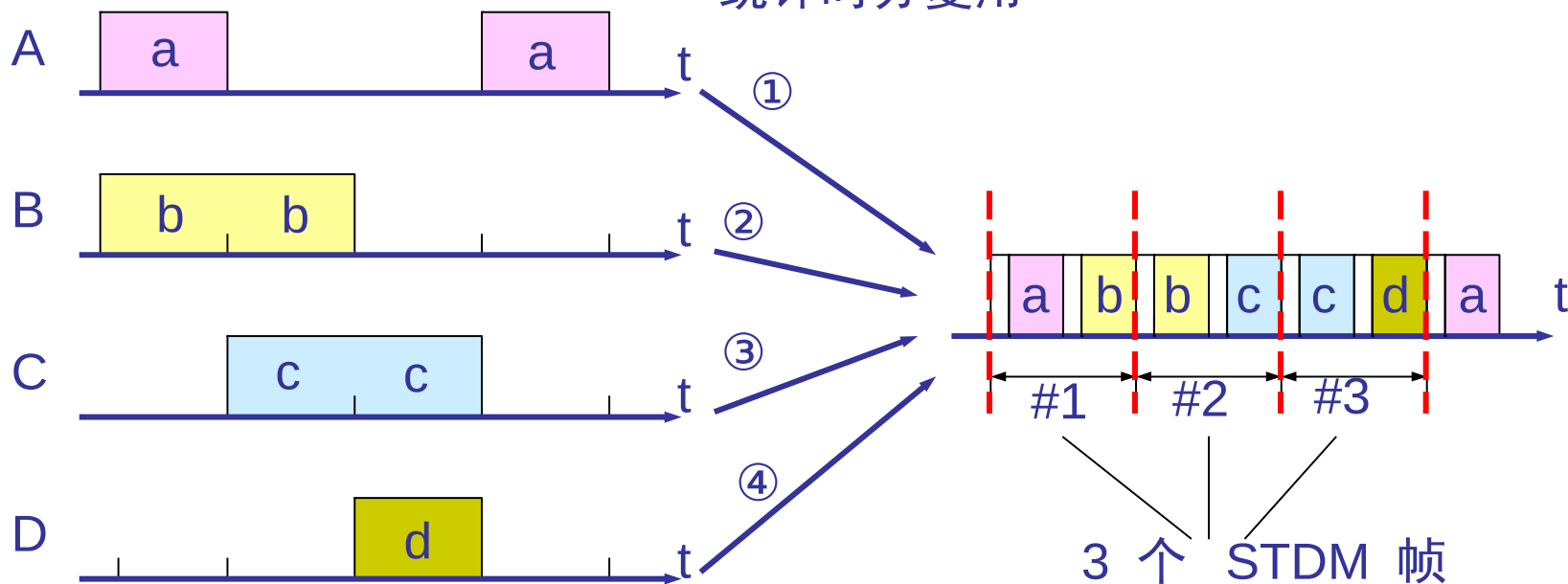
同步时分多路复用 （续）



统计时分复用 STDM (Statistic TDM)

用户

统计时分复用



时分多路复用 (续)

- ◆ T1 信道： 广泛用于北美和日本的电话系统中。每秒 8000 次采样 (帧)，一共 24 路信号，每路信号 8 位 (含 1 比特控制)，每帧还有 1 同步比特。
每帧由 $24 \times 8 = 192$ 位组成，附加一位作为帧开始标志位，所以每帧共有 193 位；数率： $(24 \times 8 + 1) \times 8000 = 1.544 \text{ Mbps}$
- ◆ 发送一帧需要 125 微秒；



7 位数据 +1 位控制信号

帧同步比特

- 



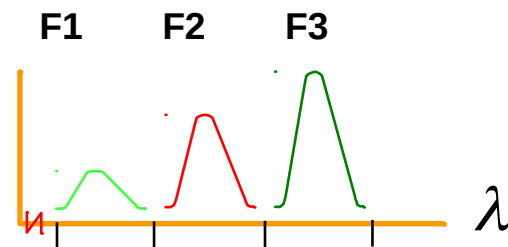
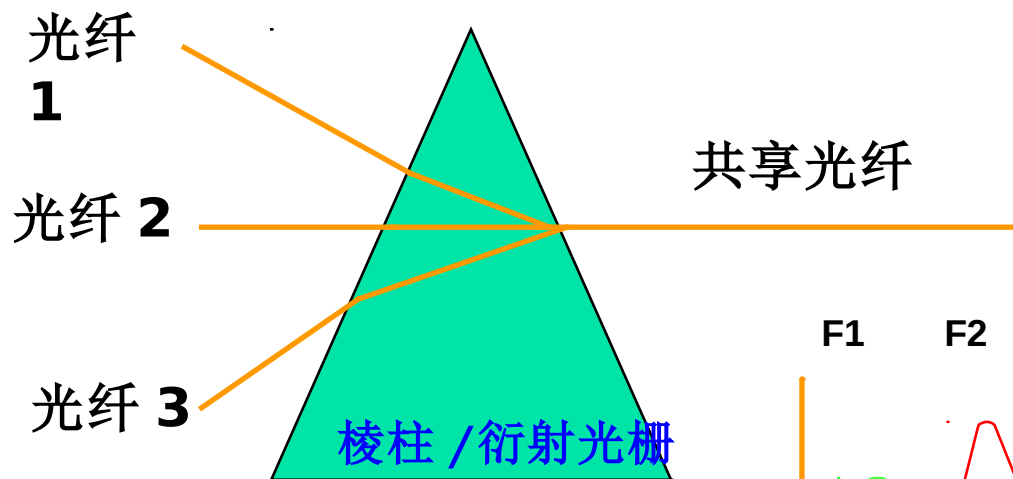
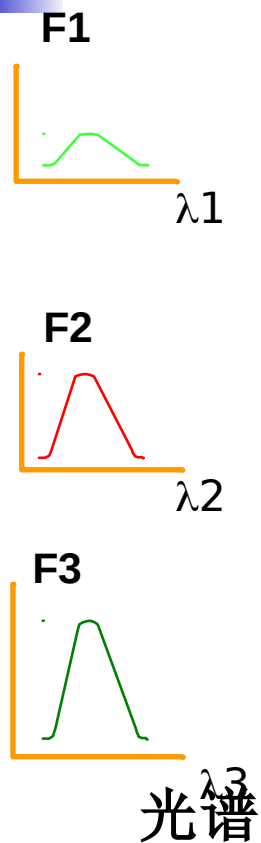


波分多路复用 (WDM)

- WDM :
 - Wavelength Division Multiplexing (WDM)
 - FDM 波分复用就是光的频分复用。
 - 不同的信源使用不同波长的光波来传输数据，各路光波经过一个棱镜（或衍射光栅）合成一个光束在光纤干道上传输，在接收端利用相同的设备将各路光波分开。（见下页图）

波分多路复用 (续)

采用无源设备, 更可靠



共享光纤的
光谱



波分多路复用（续）

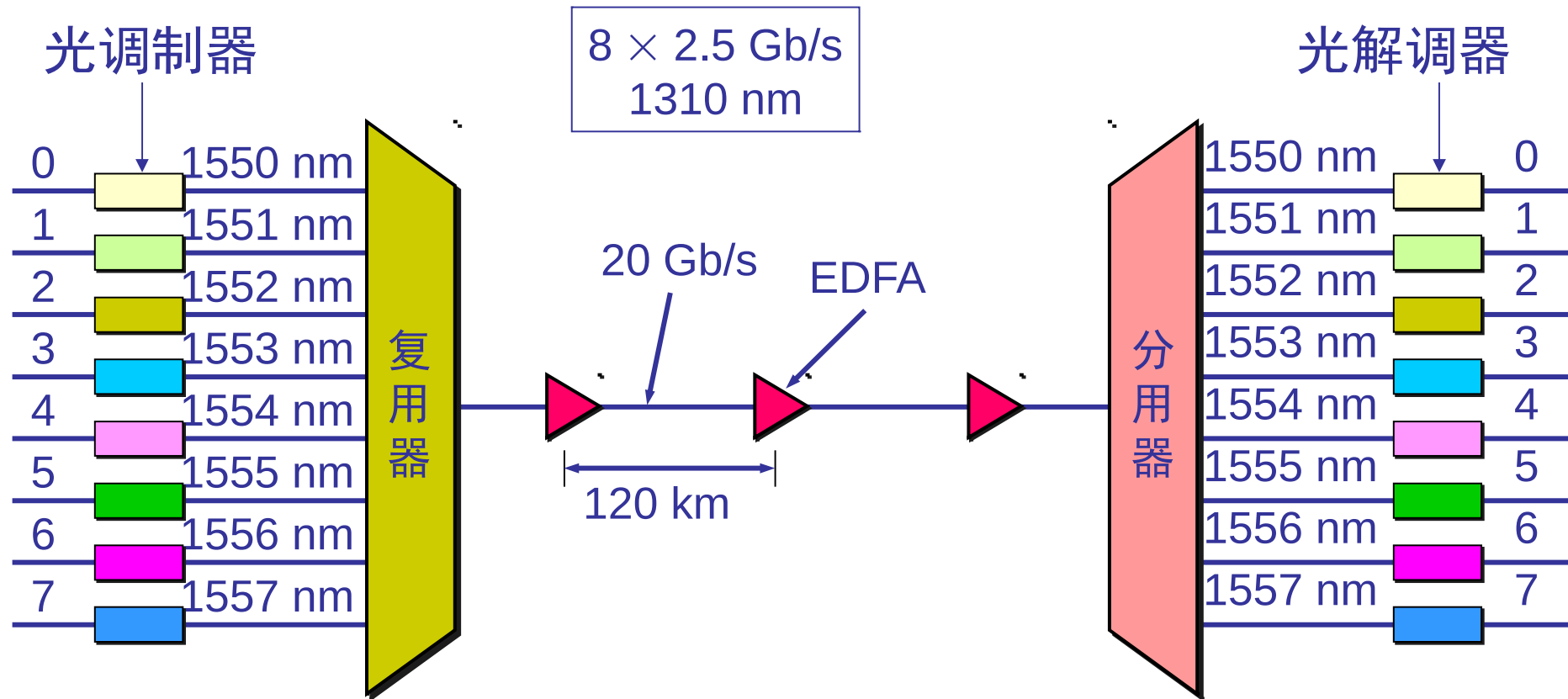
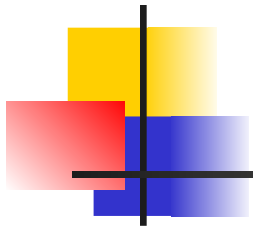
■ DWDM :

- **Density Wave Division Multiplexing**（密集波分多路复用）
- 在 1.55 微米波长区同时用 4、8、16 或 n 个波长，在一对光纤（少数系统采用单光纤）构成的光通信系统。

■ 特点：

- 由 DWDM 光纤系统组成的光纤网可迅速增加网络容量，还具有透明性，可传送语音、数据、图像等多媒体信息。
- 由于多个光信道共用光放大器而显著降低了网络成本。

波分复用 WDM (Wavelength Division Multiplexing)



码分复用 CDM

(Code Division Multiplexing)

- 常用的名词是**码分多址** CDMA (Code Division Multiple Access) 。
- 各用户使用经过特殊挑选的不同码型，因此彼此不会造成干扰。
- 这种系统发送的信号有很强的抗干扰能力，其频谱类似于白噪声，不易被敌人发现。
- 每一个比特时间划分为 m 个短的间隔，称为**码片** (chip) 。



码片序列 (chip sequence)

- 每个站被指派一个唯一的 m bit 码片序列。
 - 如发送比特 1，则发送自己的 m bit 码片序列。
 - 如发送比特 0，则发送该码片序列的二进制反码。
- 例如，S 站的 8 bit 码片序列是 00011011。
 - 发送比特 1 时，就发送序列 00011011，
 - 发送比特 0 时，就发送序列 11100100。
- S 站的码片序列：(-1 -1 -1 +1 +1 -1 +1 +1)



CDMA 的重要特点

- 每个站分配的码片序列不仅必须各不相同，并且还必须互相**正交** (orthogonal) 。
- 在实用的系统中是使用**伪随机码序列**。



码片序列的正交关系

- 令向量 **S** 表示站 S 的码片向量，令 **T** 表示其他任何站的码片向量。
- 两个不同站的码片序列正交，就是向量 **S** 和 **T** 的规格化内积 (inner product) 都是 0：

$$\mathbf{S} \bullet \mathbf{T} \equiv \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m S_i T_i = 0 \quad (2-3)$$



码片序列的正交关系举例

- 令向量 **S** 为 $(-1 -1 -1 +1 +1 -1 +1 +1)$,
向量 **T** 为 $(-1 -1 +1 -1 +1 +1 +1 -1)$ 。
- 把向量 **S** 和 **T** 的各分量值代入 (2-3) 式就可看出这两个码片序列是正交的。



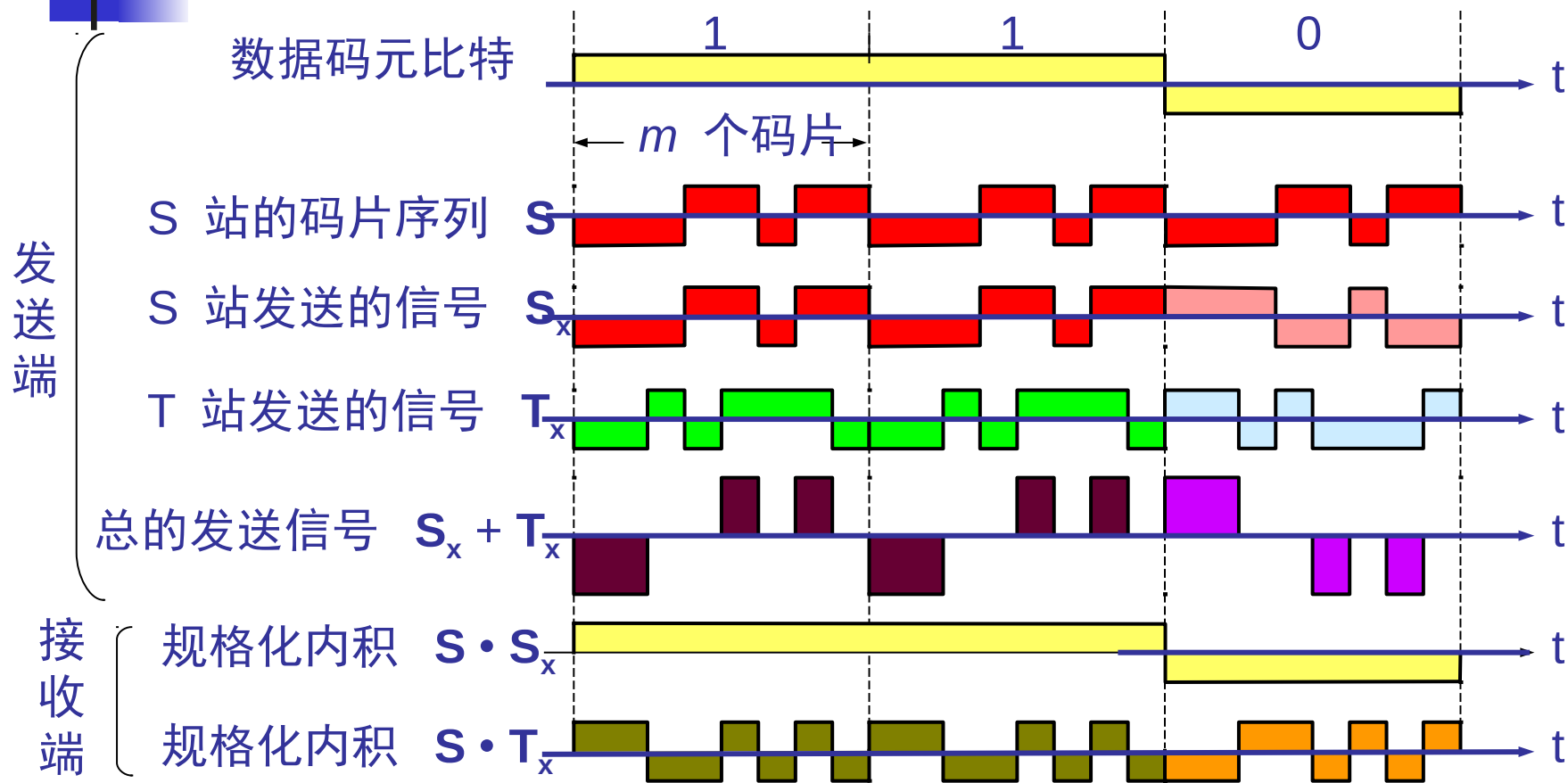
正交关系的另一个重要特性

- 任何一个码片向量和该码片向量自己的规格化内积都是 1 。

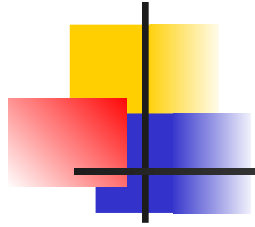
$$\mathbf{S} \bullet \mathbf{S} = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m S_i S_i = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m S_i^2 = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m (\pm 1)^2 = 1$$

- 一个码片向量和该码片反码的向量的规格化内积值是 - 1 。

CDMA 的工作原理



Encoding rules



+1, +1, +1, +1

A

+1, -1, +1, -1

B

+1, +1, -1, -1

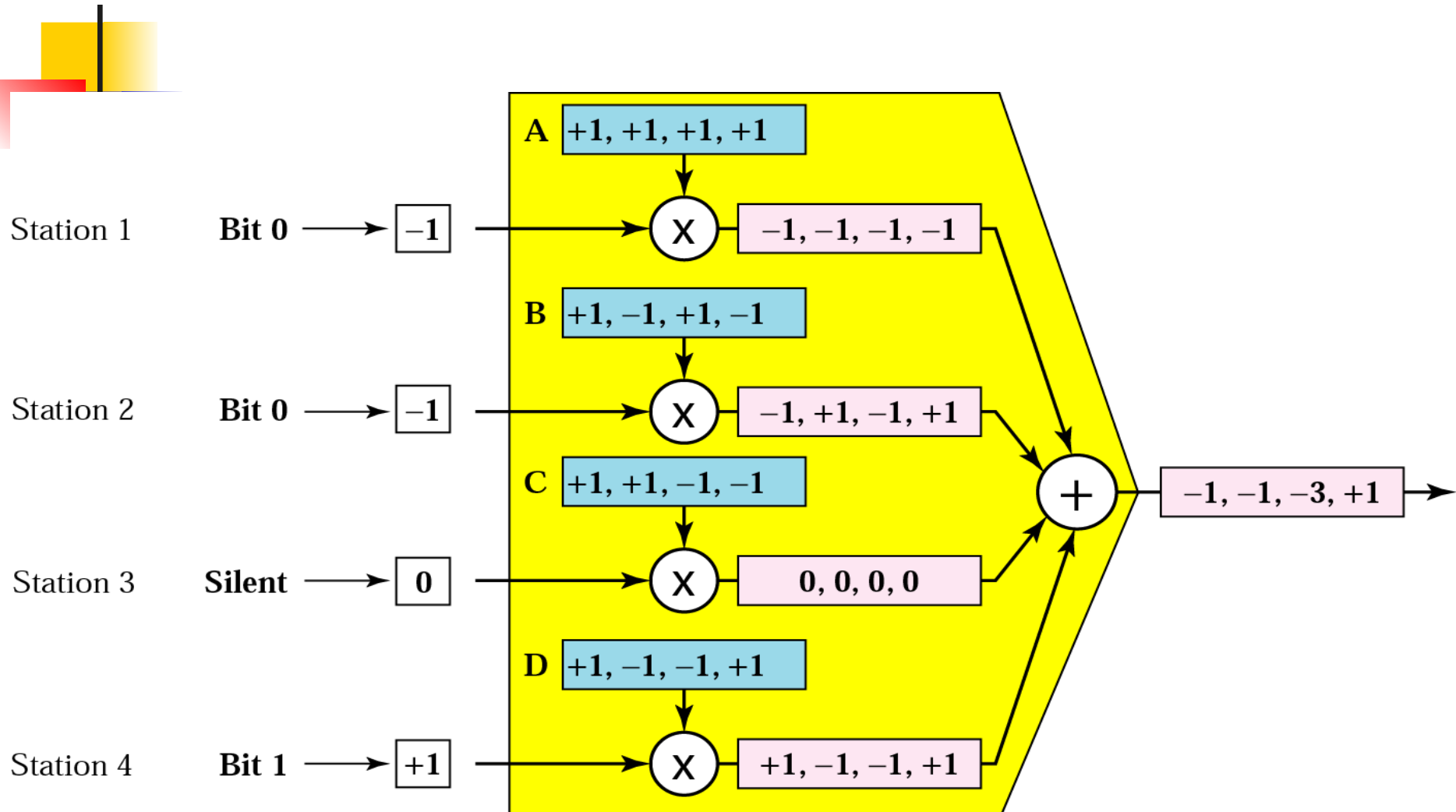
C

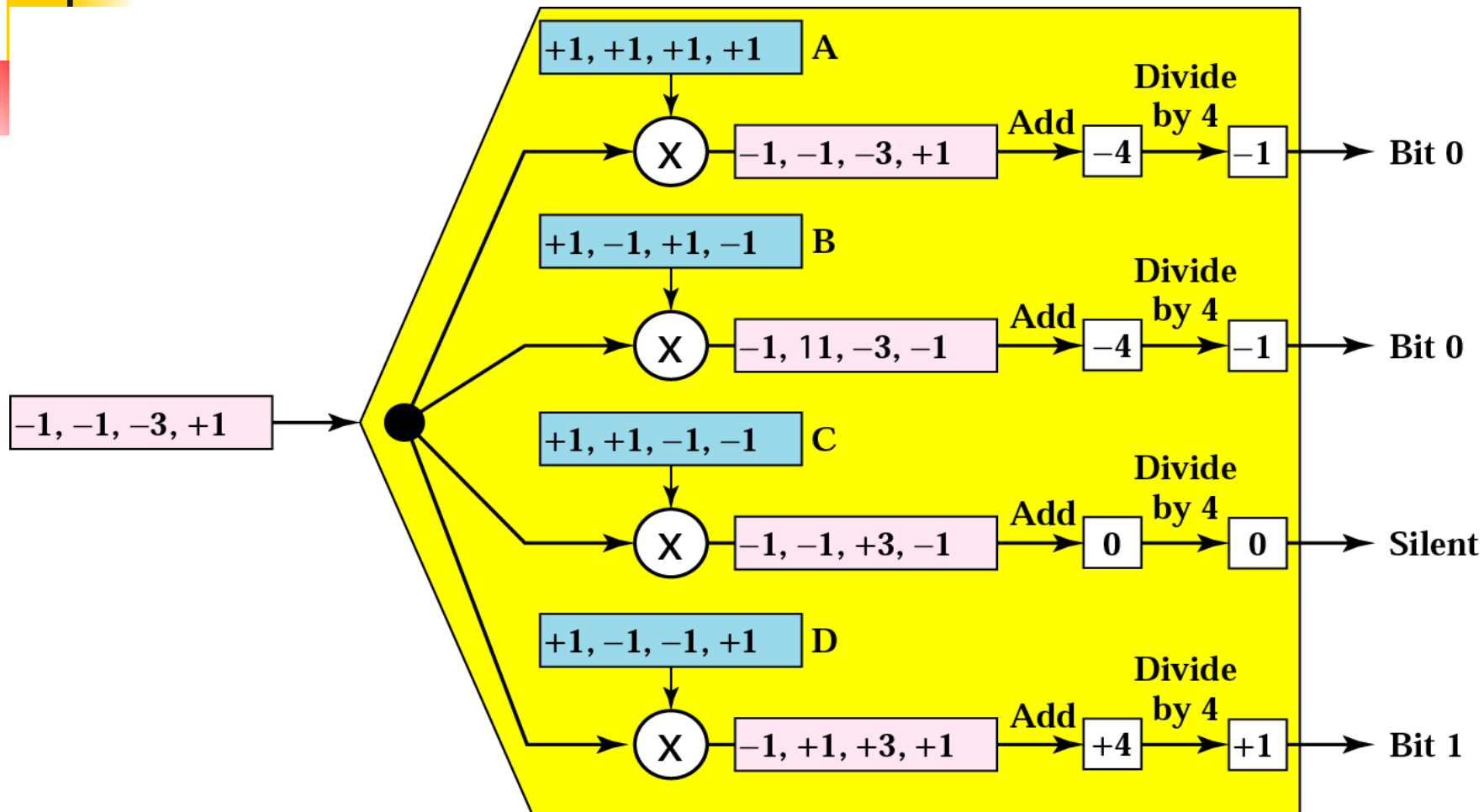
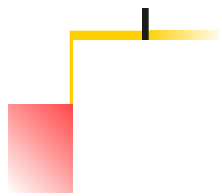
+1, -1, -1, +1

D

ABCD 四个站两两正交，即 ABCD 相应位，位位相乘的和为 0：**规格化内积**。

CDMA multiplexer





2.5 数字传输系统

1. 脉码调制 PCM 体制

- 脉码调制 PCM 体制最初是为了在电话局之间的中继线上传送多路的电话。
- 由于历史上的原因，PCM 有两个互不兼容的国际标准，即北美的 24 路 PCM（简称为 T1）和欧洲的 30 路 PCM（简称为 E1）。我国采用的是欧洲的 E1 标准。
- E1 的速率是 2.048 Mb/s，而 T1 的速率是 1.544 Mb/s。
- 当需要有更高的数据率时，可采用复用的方法。



脉冲数字调制

■ PCM（脉冲编码调制 Pulse Code Modulate）

- 模拟数据转换为数字信号来传输。
- 三个步骤：采样，量化和编码。

■ 采样：

- 即按一定的时间间隔采样测量模拟信号幅值。根据奈奎斯特定理：只要采样频率不低于有效信号最高频率或其带宽的两倍，则足以捕获恢复原始信号的全部信息。
- 如果语音数据限于 4000Hz 以下的频率，那么采用 8000Hz 的采样频率就足以使采样值包含该语音信号的完整特征。



脉冲数字调制

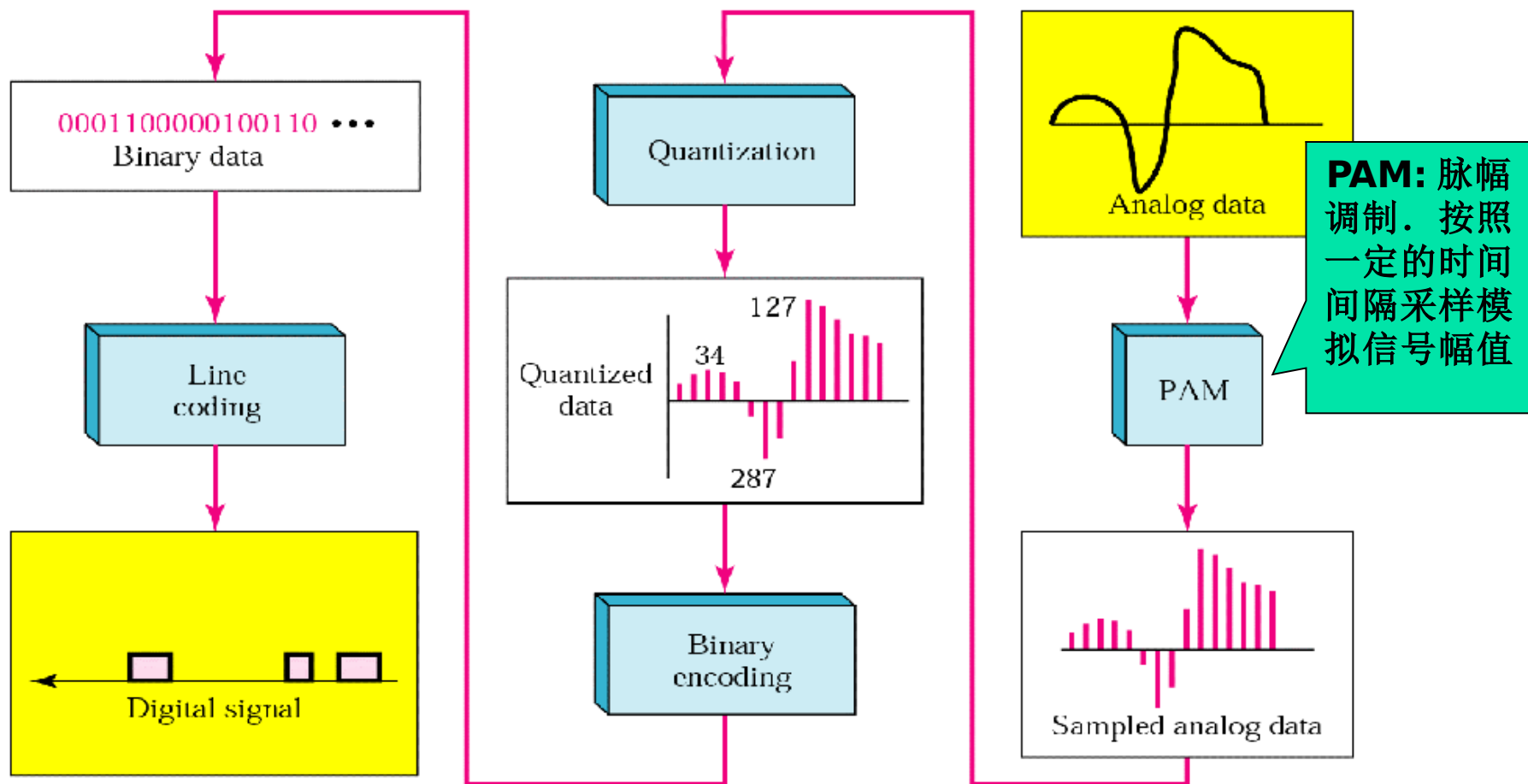
量化：

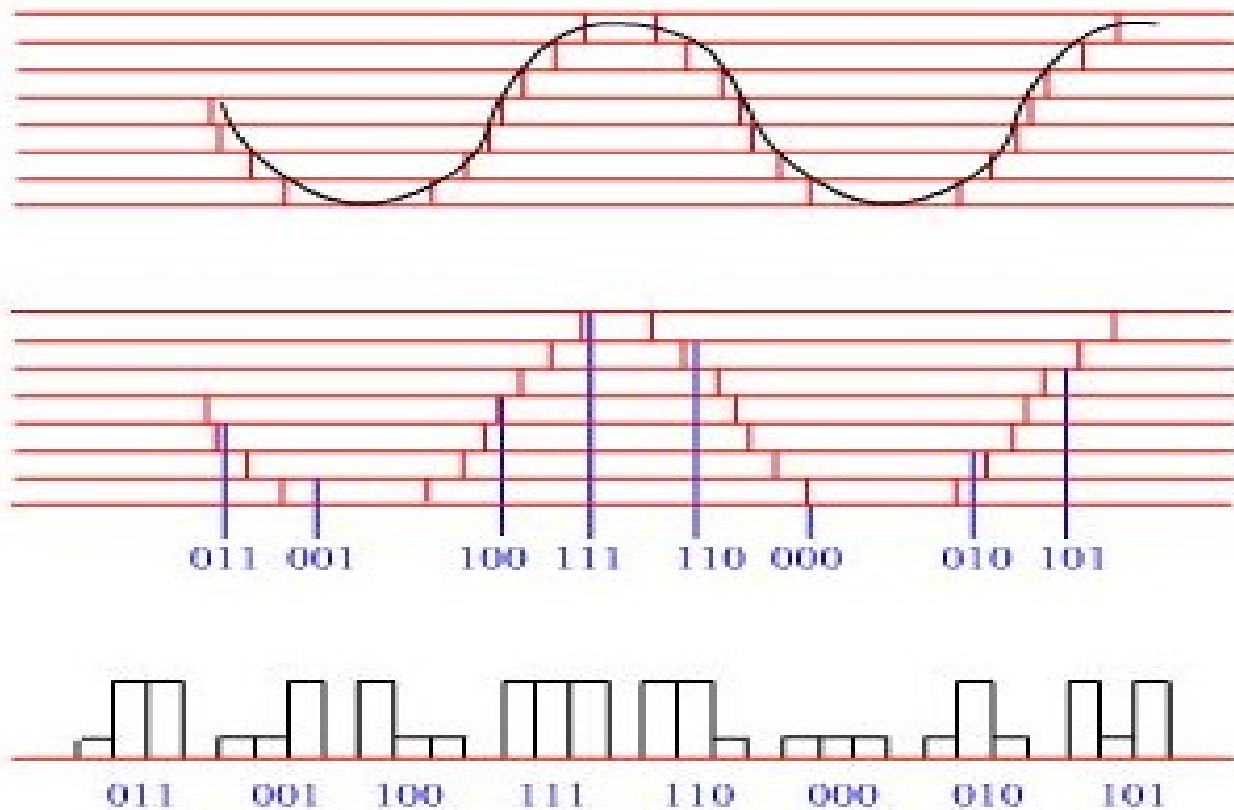
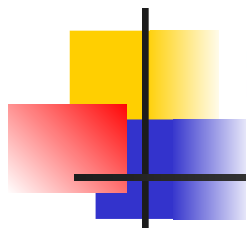
- 将采样点处测得的信号幅值分级取整的过程。通常的做法是将原始信号的取值范围划分成若干个等级（通常为 2^n 级），将每个采样值取整到离它最近的一个等级上。

编码：

- 将量化的的采样值用一定位数的二进制数来表示。

从模拟数据到数字信号





脉码调制 (PCM) 原理



2. 同步光纤网 SONET 和 同步数字系列 SDH

- 旧的数字传输系统存在着许多缺点。其中最主要的是以下两个方面：
- 速率标准不统一。
 - 如果不对高次群的数字传输速率进行标准化，国际范围的高速数据传输就很难实现。
- 不是同步传输。
 - 在过去相当长的时间，为了节约经费，各国的数字网主要是采用准同步方式。



同步光纤网（SONET）

- ◆ 同步光纤网由美国贝尔通信研究所首先提出；
- ◆ 提出目的是解决**光接口标准规范**和定义同步传输的速率等级体系，以使不同产品的互连；
- ◆ 1988 年 **ITU-T** 接受了 SONET，并重新命名为**同步数字体系 SDH**。同时也适用于微波和卫星传输，成为通用性技术体制；
- ◆ ITU-T 对 SDH 的速率、复用帧结构、复用设备、线路系统、光接口、网络管理和信息模型等进行了定义，确立了作为**国际标准**的同步数字体系 SDH；



SDH

- SDH 全称叫做同步数字传输体制，SDH 是一种传输的体制（协议），SDH 这种传输体制规范了数字信号的帧结构、复用方式、传输速率等级，接口码型等特性。



SDH 速率体系

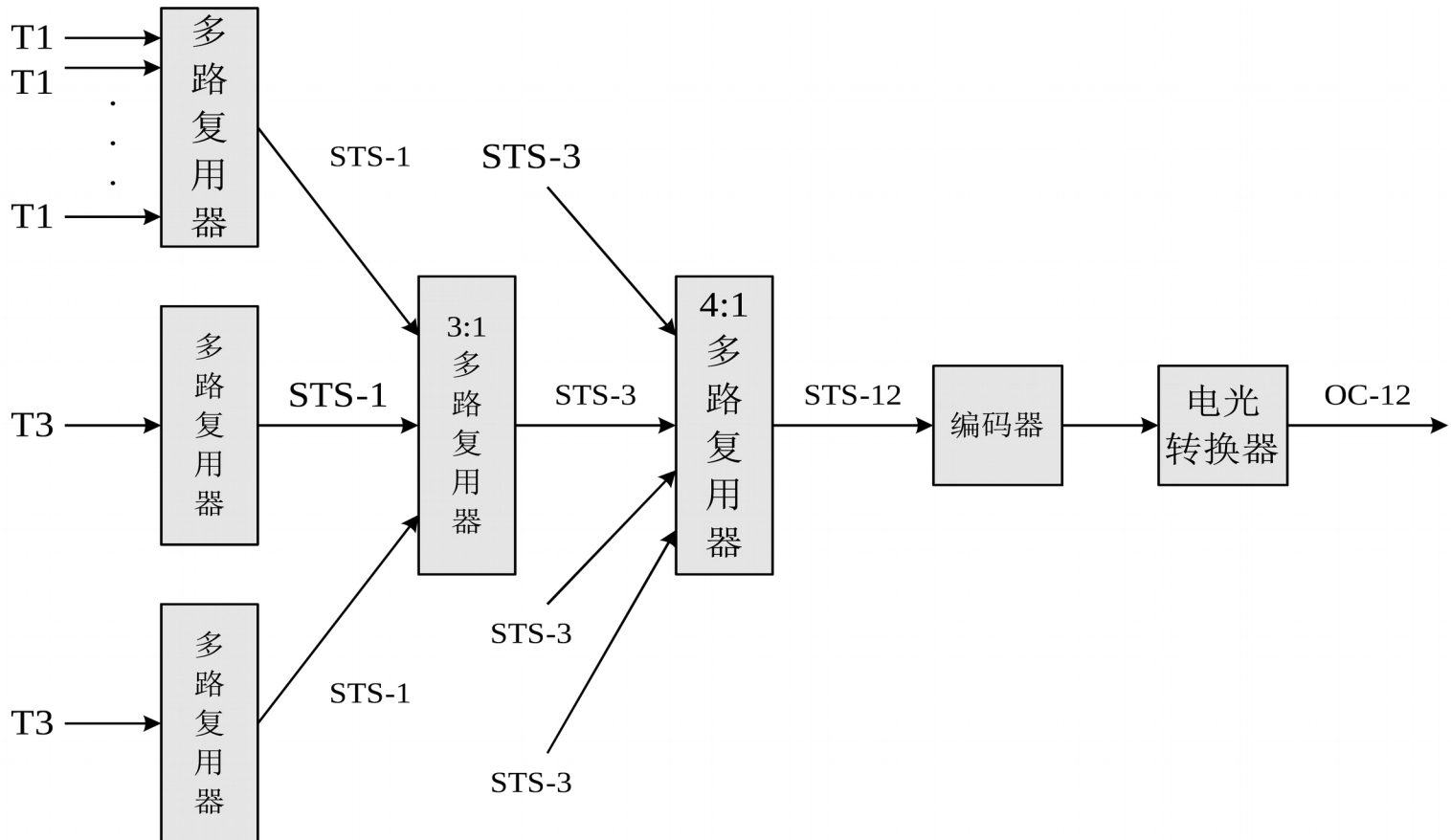
SDH 速率体系涉及 3 种速率：

- STS 速率—数字电路接口的电信号传输速率；
- OC 速率—光纤上传输的光信号速率；
- STM 速率—电话公司为国家之间的主干线路的数字信号规定的速率标准。

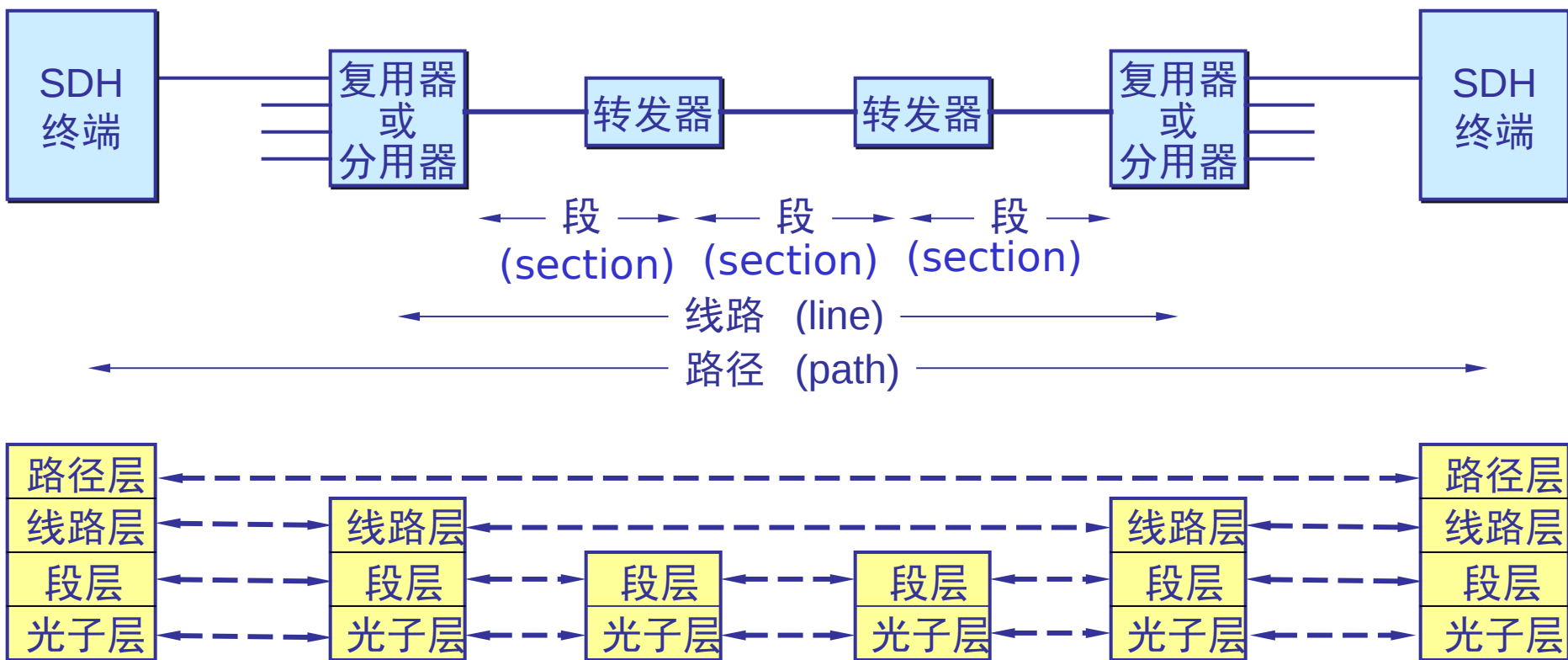
SONET 的 OC 级/STS 级与 SDH 的 STM 级的对应

线路速率 (Mb/s)	SONET 符号	ITU-T 符号	表示线路速率 的常用近似值
51.840	OC-1/STS-1	—	
155.520	OC-3/STS-3	STM-1	155 Mb/s
466.560	OC-9/STS-9	STM-3	
622.080	OC-12/STS-12	STM-4	622 Mb/s
933.120	OC-18/STS-18	STM-6	
1244.160	OC-24/STS-24	STM-8	
2488.320	OC-48/STS-48	STM-16	2.5 Gb/s
4976.640	OC-96/STS-96	STM-32	
9953.280	OC-192/STS-192	STM-64	10 Gb/s
39813.120	OC-768/STS-768	STM-256	40 Gb/s

SDH 的复用结构



SONET 的体系结构





SONET 标准定义了 四个光接口层

- 光子层 (Photonic Layer)
 - 处理跨越光缆的比特传送。
- 段层 (Section Layer)
 - 在光缆上传送 STS-N 帧。
- 线路层 (Line Layer)
 - 负责路径层的同步和复用。
- 路径层 (Path Layer)
 - 处理路径端接设备 PTE (Path Terminating Element) 之间的业务的传输。

2.6 宽带接入技术

2.6.1 xDSL 技术

- xDSL 技术就是用数字技术对现有的模拟电话用户线进行改造，使它能够承载宽带业务。
- 虽然标准模拟电话信号的频带被限制在 300~3400 Hz 的范围内，但用户线本身实际可通过的信号频率仍然超过 1 MHz。
- xDSL 技术就把 0~4 kHz 低端频谱留给传统电话使用，而把原来没有被利用的高端频谱留给用户上网使用。
- DSL 就是数字用户线 (Digital Subscriber Line) 的缩写。而 DSL 的前缀 x 则表示在数字用户线上实现的不同宽带方案。



xDSL 的几种类型

- ADSL (Asymmetric Digital Subscriber Line) : 非对称数字用户线
- HDSL (High speed DSL) : 高速数字用户线
- SDSL (Single-line DSL) : 1 对线的数字用户线
- VDSL (Very high speed DSL) : 甚高速数字用户线
- DSL : ISDN 用户线。
- RADSL (Rate-Adaptive DSL) : 速率自适应 DSL , 是 ADSL 的一个子集, 可自动调节线路速率) 。



ADSL 的极限传输距离

- ADSL 的极限传输距离与数据率以及用户线的线径都有很大的关系（用户线越细，信号传输时的衰减就越大），而所能得到的最高数据传输速率与实际的用户线上的信噪比密切相关。
- 例如，0.5 毫米线径的用户线，传输速率为 1.5 ~ 2.0 Mb/s 时可传送 5.5 公里，但当传输速率提高到 6.1 Mb/s 时，传输距离就缩短为 3.7 公里。
- 如果把用户线的线径减小到 0.4 毫米，那么在 6.1 Mb/s 的传输速率下就只能传送 2.7 公里



ADSL 的特点

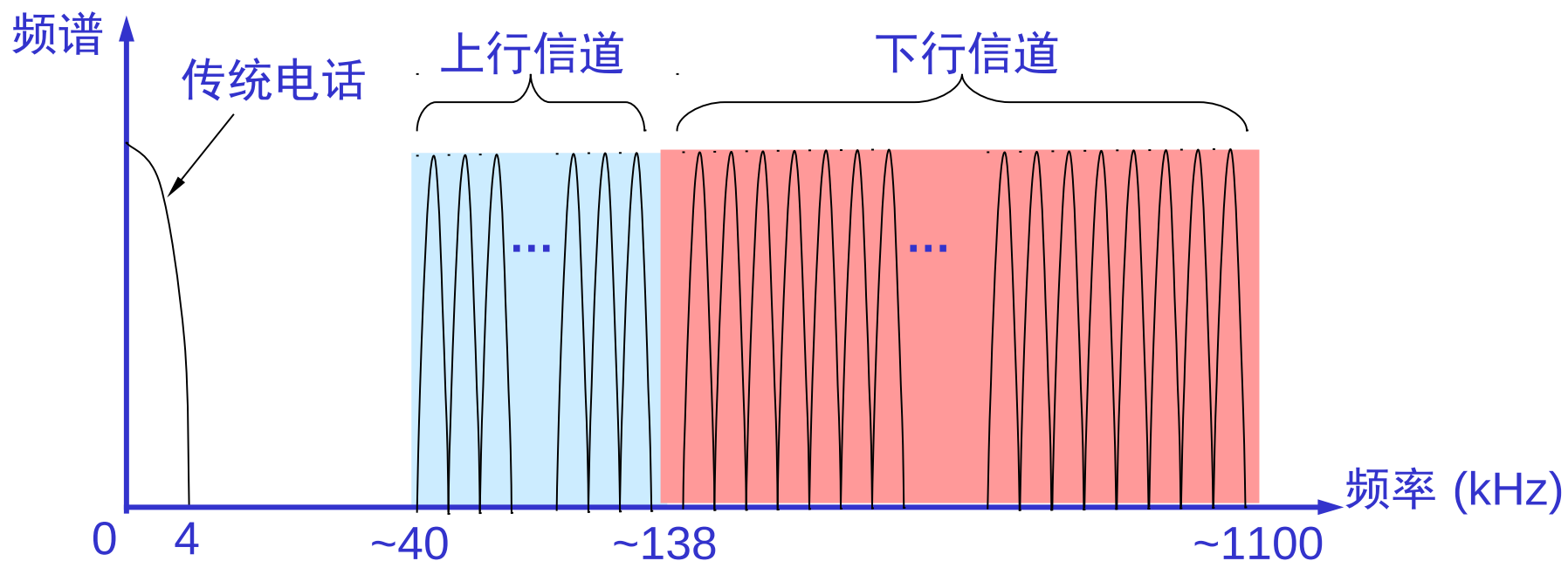
- 上行和下行带宽做成不对称的。
- 上行指从用户到 ISP，而下行指从 ISP 到用户。
- ADSL 在用户线（铜线）的两端各安装一个 ADSL 调制解调器。
- 我国目前采用的方案是离散多音调 DMT (Discrete Multi-Tone) 调制技术。这里的“多音调”就是“多载波”或“多子信道”的意思。



DMT 技术

- DMT 调制技术采用**频分复用**的方法，把 40 kHz 以上一直到 1.1 MHz 的高端频谱划分为许多的子信道，其中 25 个子信道用于上行信道，而 249 个子信道用于下行信道。
- 每个子信道占据 **4 kHz 带宽**（严格讲是 4.3125 kHz），并使用不同的载波（即不同的音调）进行数字调制。这种做法相当于在一对用户线上使用许多小的调制解调器**并行地**传送数据。

DMT 技术的频谱分布

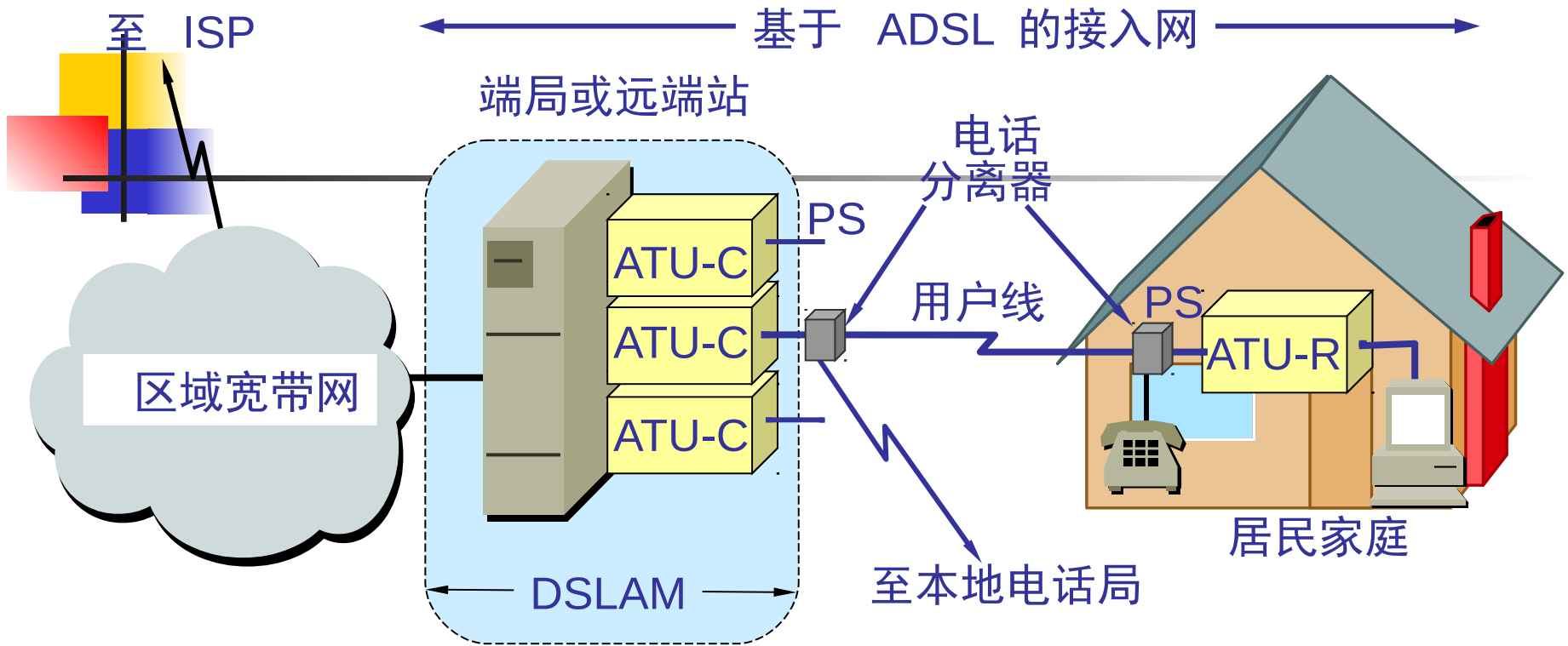




ADSL 的数据率

- 由于用户线的具体条件往往相差很大（距离、线径、受到相邻用户线的干扰程度等都不同），因此 ADSL 采用自适应调制技术使用户线能够传送尽可能高的数据率。
- 当 ADSL 启动时，用户线两端的 ADSL 调制解调器就测试可用的频率、各子信道受到的干扰情况，以及在每一个频率上测试信号的传输质量。
- ADSL 不能保证固定的数据率。对于质量很差的用户线甚至无法开通 ADSL。
- 通常下行数据率在 32 kb/s 到 6.4 Mb/s 之间，而上行数据率在 32 kb/s 到 640 kb/s 之间。

ADSL 的组成



数字用户线接入复用器 DSLAM (DSL Access Multiplexer)

接入端接单元 ATU (Access Termination Unit)

ATU-C (C 代表端局 Central Office)

ATU-R (R 代表远端 Remote)

电话分离器 PS (POTS Splitter)

第二代 ADSL

ADSL2 (G.992.3 和 G.992.4)

ADSL2+ (G.992.5)

- 通过提高调制效率得到了**更高的数据率**。例如，ADSL2 要求至少应支持下行 8 Mb/s、上行 800 kb/s 的速率。而 ADSL2+ 则将频谱范围从 1.1 MHz 扩展至 2.2 MHz，下行速率可达 16 Mb/s（最大传输速率可达 25 Mb/s），而上行速率可达 800 kb/s。
- 采用了**无缝速率自适应技术** SRA (Seamless Rate Adaptation)，可在运营中不中断通信和不产生误码的情况下，自适应地调整数据率。
- 改善了线路质量评测和故障定位功能，这对提高网络的运行维护水平具有非常重要的意义。



2.6.2 光纤同轴混合网

HFC (Hybrid Fiber Coax)

- HFC 网是在目前覆盖面很广的有线电视网 CATV 的基础上开发的一种居民宽带接入网。
- HFC 网除可传送 CATV 外，还提供电话、数据和其他宽带交互型业务。
- 现有的 CATV 网是树形拓扑结构的同轴电缆网络，它采用模拟技术的频分复用对电视节目进行单向传输。而 HFC 网则需要对 CATV 网进行改造。

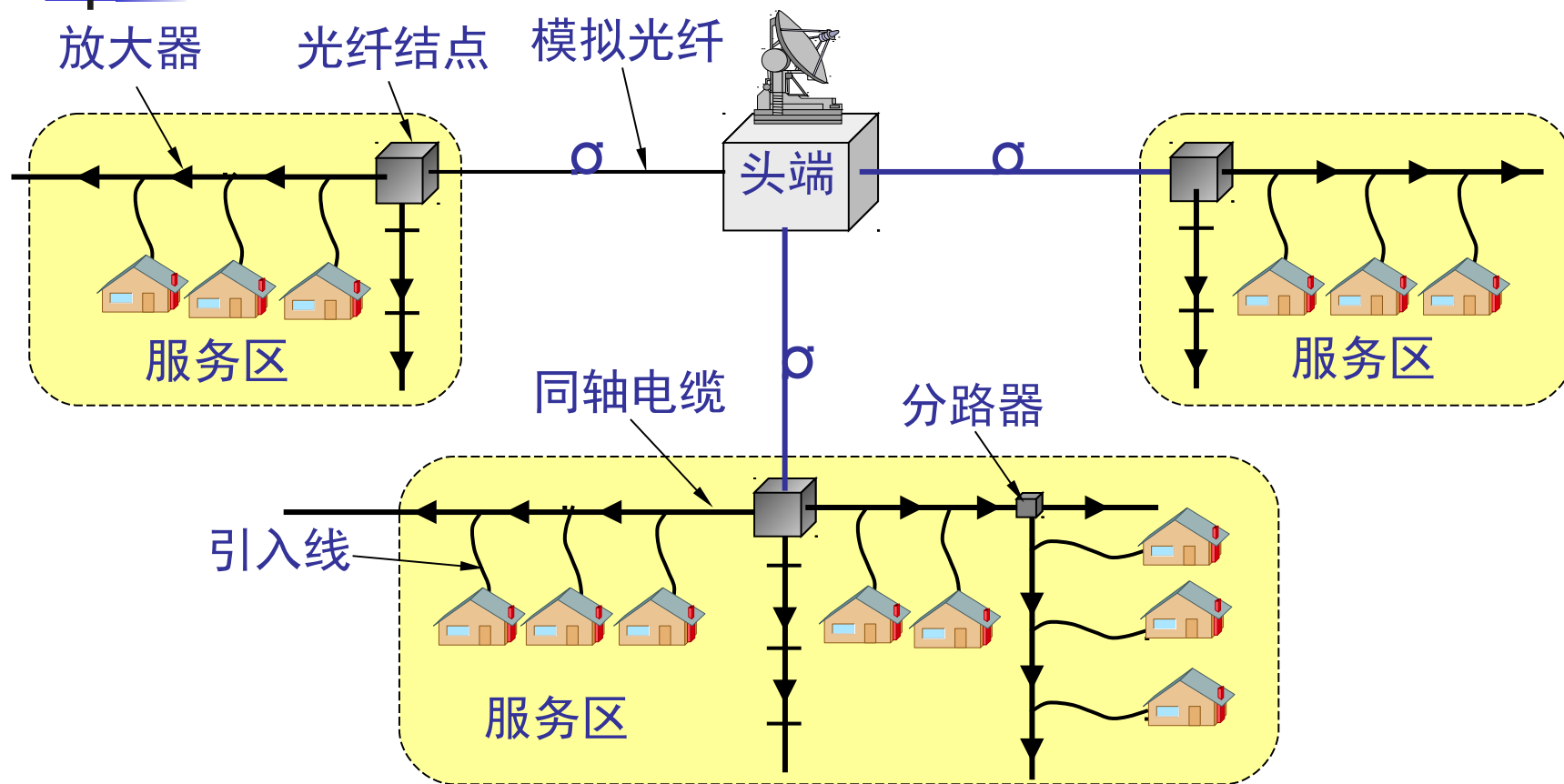


HFC 的主要特点

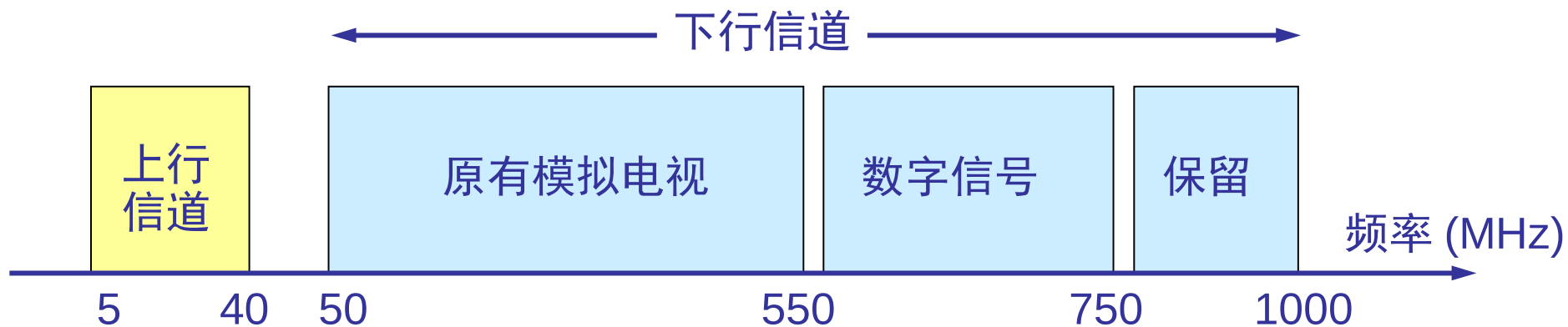
(1) HFC 网的主干线路采用光纤

- HFC 网将原 CATV 网中的同轴电缆主干部分更换为光纤，并使用**模拟光纤技术**。
- 在模拟光纤中采用光的振幅调制 AM，这比使用数字光纤更为经济。
- 模拟光纤从头端连接到**光纤结点** (fiber node)，即**光分配结点** ODN (Optical Distribution Node)。在光纤结点光信号被转换为电信号。在光纤结点以下就是同轴电缆。

(2) HFC 网采用结点体系结构



(3) HFC 网具有比 CATV 网更宽的 的频谱，且具有双向传输功能





(4) 每个家庭要安装一个用户接口盒

- **用户接口盒** UIB (User Interface Box)
要提供三种连接，即：
 - 使用同轴电缆连接到**机顶盒** (set-top box) ，
然后再连接到用户的电视机。
 - 使用双绞线连接到用户的电话机。
 - 使用电缆调制解调器连接到用户的计算机。



电缆调制解调器 (cable modem)

- **电缆调制解调器**是为 HFC 网而使用的调制解调器。
- 电缆调制解调器最大的特点就是传输速率高。其下行速率一般在 3~10 Mb/s 之间，最高可达 30 Mb/s，而上行速率一般为 0.2~2 Mb/s，最高可达 10 Mb/s。
- 电缆调制解调器比在普通电话线上使用的调制解调器要复杂得多，并且不是成对使用，而是只安装在用户端。



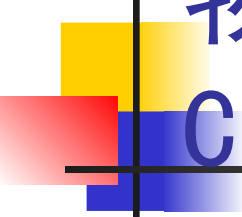
HFC 网的最大优点

- 具有很宽的频带，并且能够利用已经有相当大的覆盖面的有线电视网。
- 要将现有的 450 MHz 单向传输的有线电视网络改造为 750 MHz 双向传输的 HFC 网（还要将所有的用户服务区互连起来而不是一个个 HFC 网的孤岛），也需要相当的资金和时间。
- 在电信政策方面也有一些需要协调解决的问题。



2.6.3 FTTx 技术

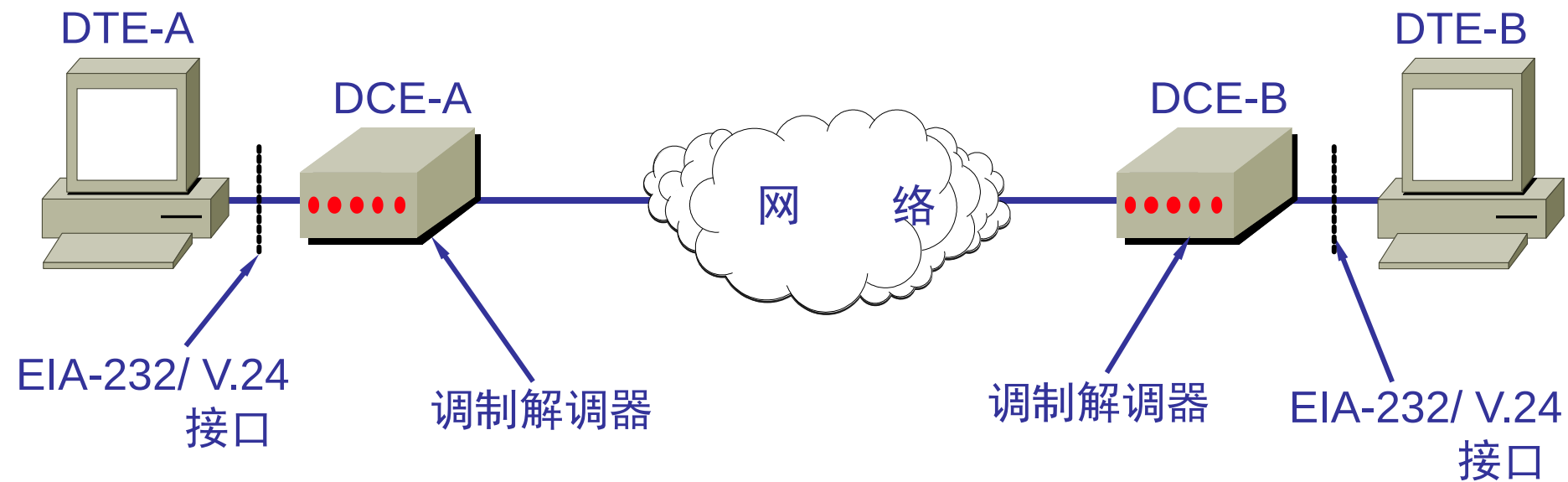
- FTTx（光纤到……）也是一种实现宽带居民接入网的方案。这里字母 x 可代表不同意思。
- **光纤到家** FTTH (Fiber To The Home)：光纤一直铺设到用户家庭可能是居民接入网最后的解决方法。
 -
- **光纤到大楼** FTTB (Fiber To The Building)：光纤进入大楼后就转换为电信号，然后用电缆或双绞线分配到各用户。
- **光纤到路边** FTTC (Fiber To The Curb)：从路边到各用户可使用星形结构双绞线作为传输媒体。



物理层协议举例（EIA RS-232-C）

RS-232-C 是由美国电子工业协会 EIA（Electronic Industry Association）于 1969 年颁布的一个标准，RS（Recommended Standard）表示“推荐标准”，232 是标准的标识号码，C 是该标准的修改版本。它是使用最广泛的**串行物理接口标准**，为使用公用电话网进行数据通信而制订的。

两个 DTE 通过 DCE 进行通信的例子





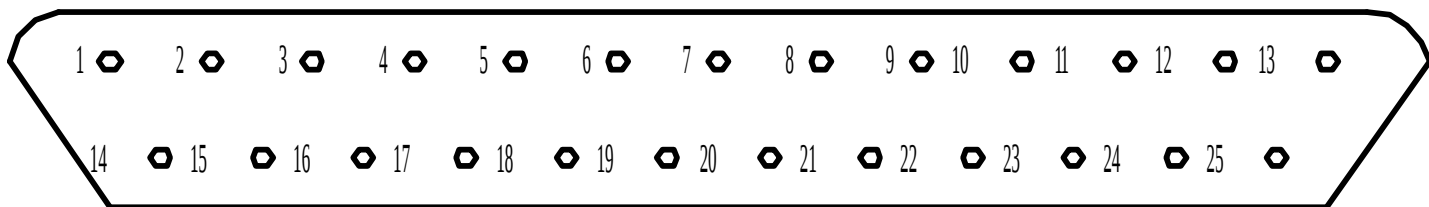
名词术语

DTE(Data Terminal Equipment 数据终端设备)：具有一定数据处理能力及收发数据能力的设备，如计算机。

DCE(Data Communications Equipment 数据电路端接设备)：在 DTE 和传输线路之间提供信号变换和编码功能，并负责建立、保持和释放数据链路的连接，如 MODEM

1. 机械特性

RS-232-C 使用 25 芯的标准连接器，插头用于 DTE 侧，插座用于 DCE 侧。其引脚分为上、下两排，分别有 13 根和 12 根引脚，当引脚指向人的方向时，从左到右其编号分别为 1 ~ 13 和 14 ~ 25



2. 电气特性

RS-232-C 采用 $\pm 15\text{V}$ 的负逻辑电平，用 $-15\text{V} \sim -5\text{V}$ 表示逻辑“1”电平，用 $+5\text{V} \sim +15\text{V}$ 表示逻辑“0”电平， $-5\text{V} \sim +5\text{V}$ 为过渡区域，无定义。

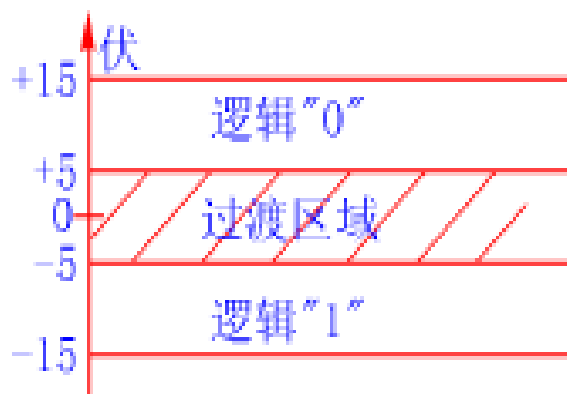


图3.9 RS-232C电器特性

表3.1 RS-232C电器信号表示

	负电平	正电平
逻辑状态	1	0
信号状态	传号	空号
功能状态	OFF (断)	ON (通)



3. 功能特性

RS-232-C 功能特性定义了 25 芯标准连接器中的 20 根信号线，其中包括地线、数据线、控制线和定时信号线，还有 5 根没有定义，作为备用。实际最常用的信号线只有 10 根。

EIA-232/V.24 的信号定义





4. 规程特性

RS-232-C 规程特性规定了 DTE 和 DCE 之间信号时序的应答关系和操作过程。

发送数据操作过程：置 CD 为 ON→置 CC 为 ON→置 CA 为 ON→通知远程 DCE 准备好接收数据→置 CB 为 ON→置远程 DCE 的 CF 为 ON→通知远程 DTE 准备接收数据→在 BA 上发送数据→远程 DTE 在 BB 上接收数据→置控制线为 OFF。