



计算机网络 (第5版)

Andrew S. Tanenbaum 编著
清华大学出版社

第2章 物理层



2.1 **数据通信的理论基础**

2.2 **引导性传输介质**

2.3 **无线传输**

2.4 **通信卫星**

2.5 **数字调制与多路复用**

2.6 **公共电话交换网络**

2.7 **移动电话系统**

2.8 **有线电视**



2.1 数据通信的理论基础

- 物理层考虑的是怎样才能在连接各种计算机的传输媒体上**传输数据比特流**，而不是指具体的传输媒体。
- 物理层的作用是要尽可能地**屏蔽**掉不同传输媒体和通信手段的差异。
- 用于物理层的协议也常称为物理层**规程** (procedure)。

物理层与具体的传输媒介(双绞线、光纤、无线 etc.)无关



物理层的主要任务

主要任务：确定与传输媒体的接口的一些特性。

- **机械特性**：指明接口所用接线器的形状和尺寸、引线数目和排列、固定和锁定装置等。
- **电气特性**：指明在接口电缆的各条线上出现的电压的范围。
- **功能特性**：指明某条线上出现的某一电平的电压的意义。
- **过程特性**：指明对于不同功能的各种可能事件的出现顺序。

案例-以太网标准

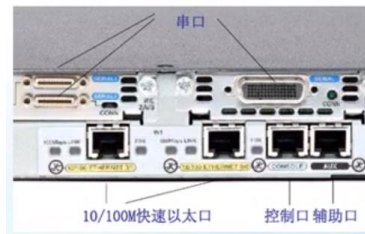
机械特性：例接口形状，大小，引线数目

e.g. 双绞线有8根线

电气特性：例规定电压范围(-5V到+5V)

功能特性：例规定-5V表示0，+5V表示1

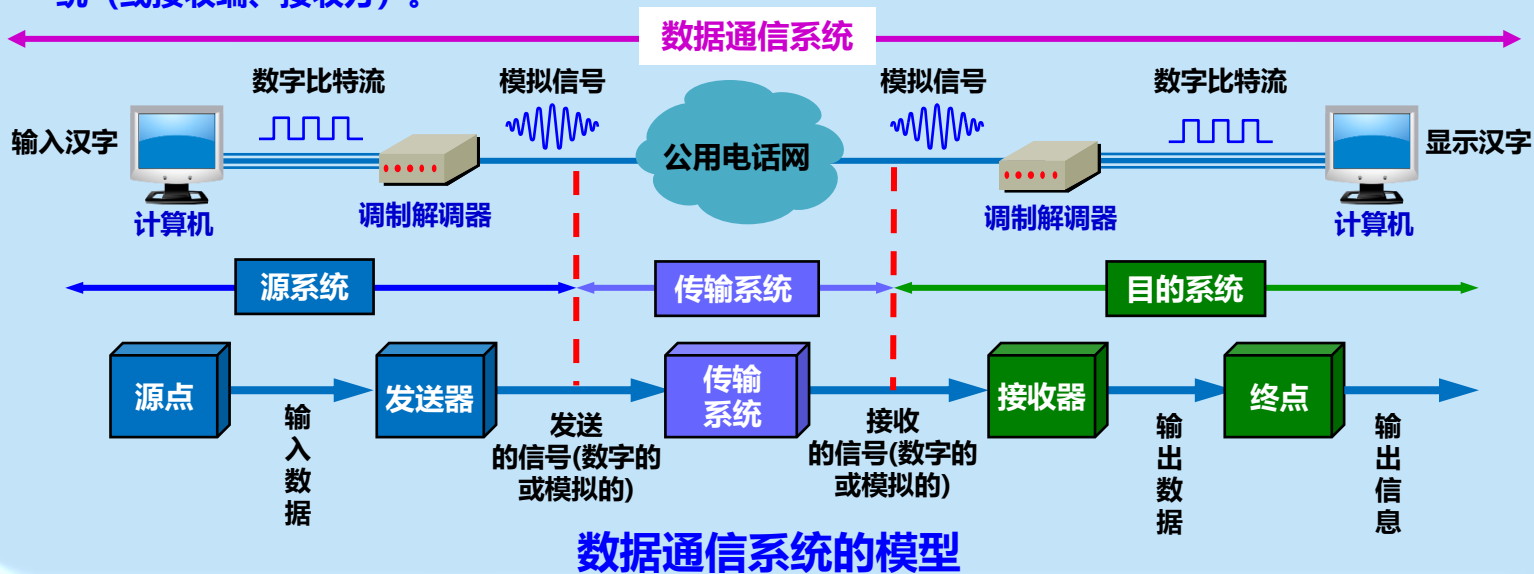
过程特性：也称规程特性，规定建立连接时各个相关部件的工作





数据通信系统的模型

一个数据通信系统包括三大部分：源系统（或发送端、发送方）、传输系统（或传输网络）和目的系统（或接收端、接收方）。

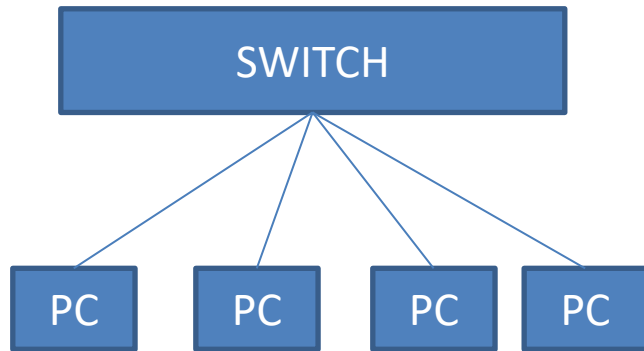




实验机房中PC之间的通信方式

PC通过**交换机**连接而组成计算机网络
不通过调制解调器和公用电话网
直接是**数字信号→数字信号**的传输

通过交换机组件的计算机网络不具有代表性，
所以上述的模型是典型的数据通信模型





常用术语

- **数据 (data)** —— 运送消息的实体 (消息赋予数据语义, 类似于信息与数据)
- **信号 (signal)** —— 数据的电气的或电磁的表现。
- **模拟信号 (analogous signal)** —— 代表消息的参数取值是连续的。
- **数字信号 (digital signal)** —— 代表消息的参数取值是离散的。
- **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。

使用双绞线传输, 信号表示的是电压的高低
使用光纤传输, 信号表示的是光信号
数据可以用这些信号来表现



码元

- 在数字通信中常常用时间间隔相同的符号来表示一个二进制数字
- 这样的时间间隔内的信号称为二进制码元。而这个间隔被称为码元长度
- 1码元可以携带nbit的信息量

波特与Bit的区别

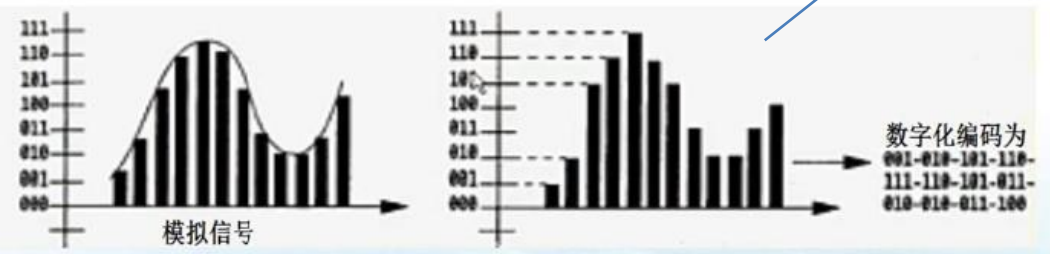
波特 在调制解调器中经常用到波特这个概念

Bit是信息量

如果一个码元含有3个Bit信息量 1波特=3Bit/s

在右图中，每个长方形表示码元，该码元表示xxx二进制数字 (如图中的 111) 在该图中，每个码元都携带了3bit的信息 所以1波特=1码元携带的信息量 (图中 1波特 = 3Bit/s)

码元传输速率的单位： 波特





有关信道的几个基本概念

- **信道** —— 一般用来表示向某一个方向传送信息的媒体。
(平常说的通信线路往往包含一条发送信息的通道和一条接收信息的信道)
- **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。



有关信道的几个基本概念

- **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)。



有关信道的几个基本概念

调制分为两大类：

- **基带调制**：仅对基带信号的波形进行变换，使它能够与信道特性相适应。**变换后的信号仍然是基带信号**。把这种过程称为编码(coding)。
- **带通调制**：使用**载波 (carrier)**进行调制，把基带信号的频率范围搬到较高的频段，并**转换为模拟信号**，这样就能够更好地在模拟信道中传输（即仅在一段频率范围内能够通过信道）。
- **带通信号**：经过载波调制后的信号。



(1) 常用编码方式

- **不归零制**：正电平代表 1，负电平代表 0。
- **归零制**：正脉冲代表 1，负脉冲代表 0。
- **曼彻斯特编码**：位周期中心的向上跳变代表 0，位周期中心的向下跳变代表 1。但也可反过来定义。
- **差分曼彻斯特编码**：在每一位的中心处始终都有跳变。位开始边界有跳变代表 0，而位开始边界没有跳变代表 1。

单极性不归零码

- 只使用一个电压值，用高电平表示 1，低电压表示 0。

双极性不归零码

- 用正电平和负电平分别表示二进制数据的 1 和 0，正负幅值相等。

双极性归零码

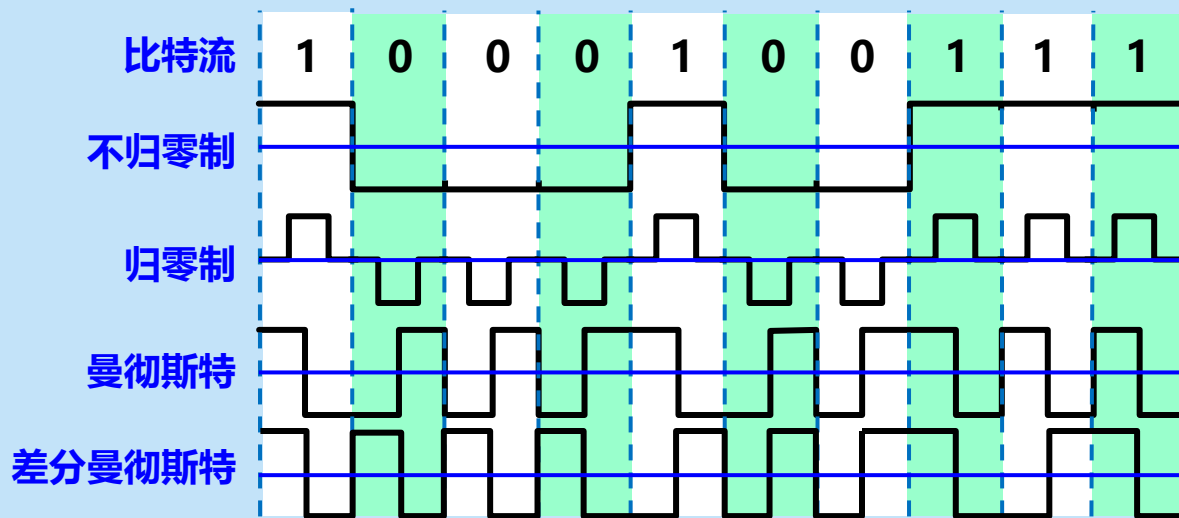
- 正负零三个电平，信号本身携带同步信息。

曼彻斯特编码

差分曼彻斯特编码



(1) 常用编码方式



数字信号常用的编码方式

差分曼彻斯特编码：若有连续的0，则继续跳变
当有连续的1时：则不跳变



(1) 常用编码方式

- 从信号波形中可以看出，曼彻斯特 (Manchester) 编码和差分曼彻斯特编码产生的信号频率比不归零制高。
- 从自同步能力来看，不归零制不能从信号波形本身中提取信号时钟频率（这叫做没有自同步能力），而曼彻斯特编码和差分曼彻斯特编码具有自同步能力。

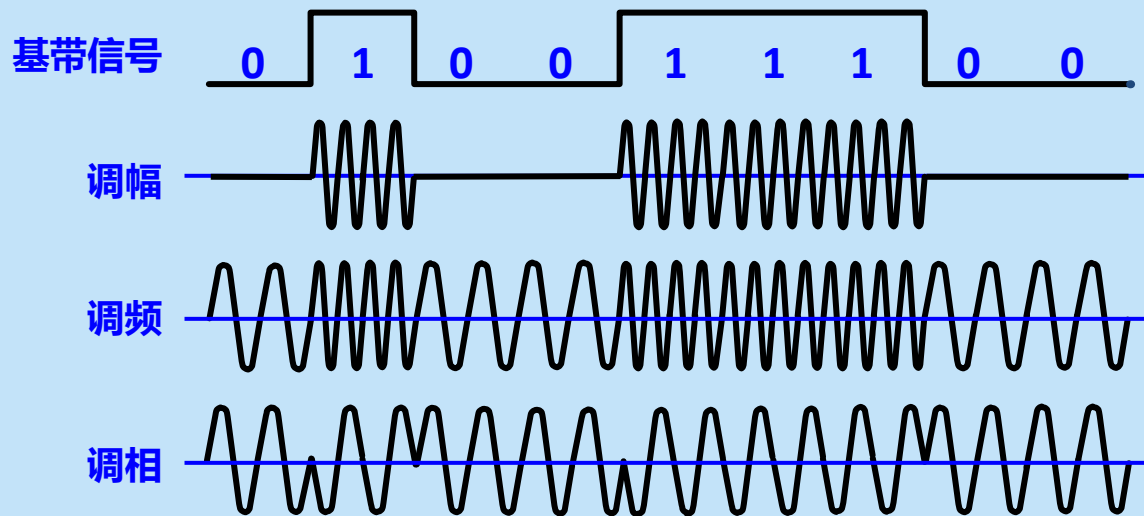


(2) 基本的带通调制方法

- 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。为了解决这一问题，就必须对基带信号进行调制 (modulation)。
- 最基本的二元制**调制**方法有以下几种：
 1. **调幅(AM)**：载波的振幅随基带数字信号而变化。
 2. **调频(FM)**：载波的频率随基带数字信号而变化。
 3. **调相(PM)**：载波的初始相位随基带数字信号而变化。



(2) 基本的带通调制方法



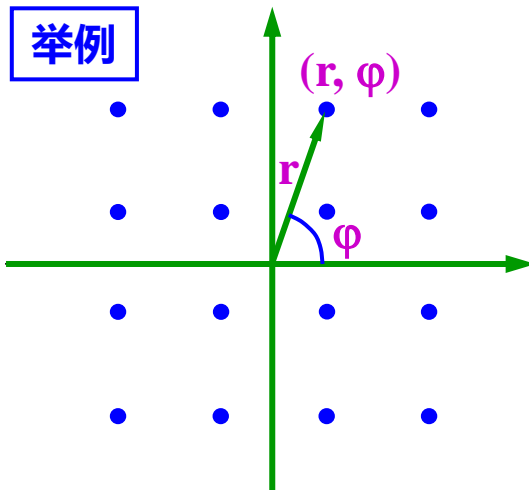
最基本的三种调制方式

正交振幅调制 QAM (Quadrature Amplitude Modulation)

为了达到更高的信息传输速率，必须采用技术上更为复杂的多元制的振幅相位混合调制方法。

例如：

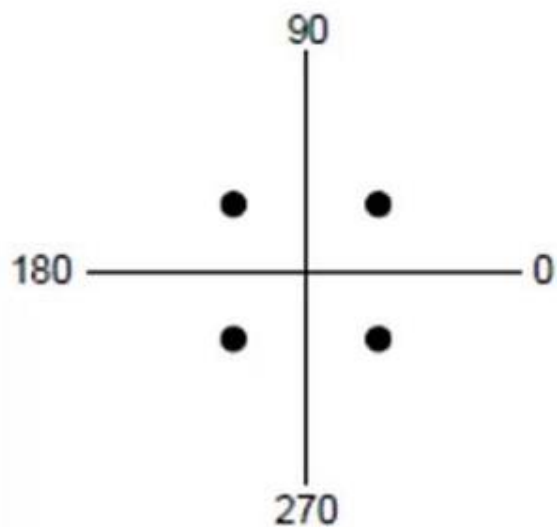
- 可供选择的相位有 12 种，而对于每一种相位有 1 或 2 种振幅可供选择。总共有 16 种组合，即 16 个码元。
- 由于 4 bit 编码共有 16 种不同的组合，因此这 16 个点中的每个点可对应于一种 4 bit 的编码。数据传输率可提高 4 倍。



不是码元越多越好。若每一个码元可表示的比特数越多，则在接收端进行解调时要正确识别每一种状态就越困难，出错率增加。

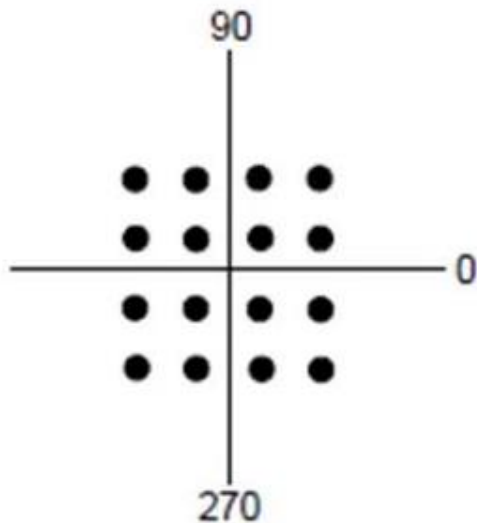


通带传输



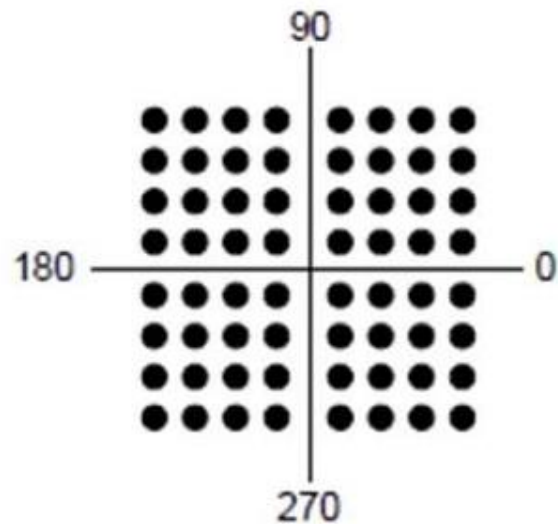
(a)

(a)QPSK



(b)

(b)QAM-16

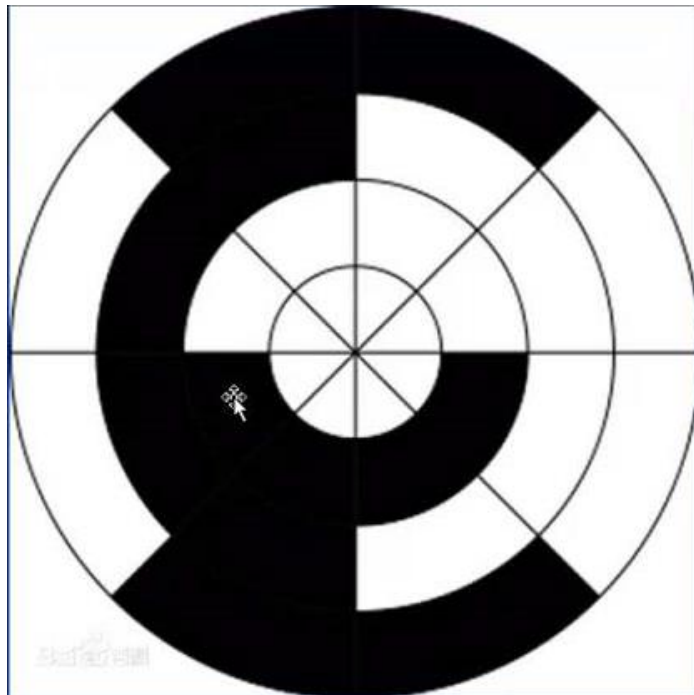


(c)

(c)QAM-64



通带传输-格雷编码





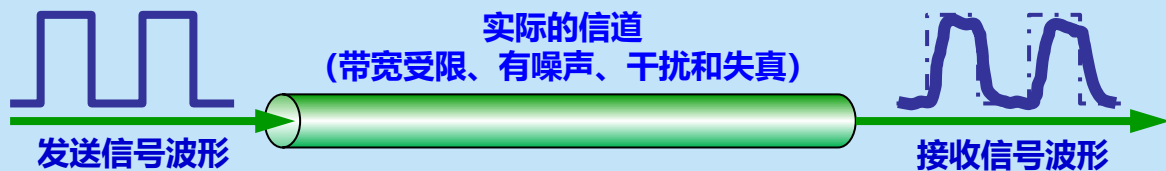
信道的极限容量

- 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，或传输媒体质量越差，在信道的输出端的波形的失真就越严重。

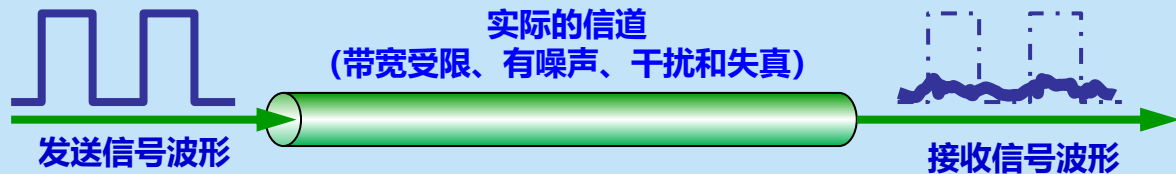


数字信号通过实际的信道

有失真，但**可识别**



失真大，**无法识别**





信道的极限容量

从概念上讲，限制码元在信道上的传输速率的因素有以下两个：

- 信道能够通过的频率范围
- 信噪比



(1) 信道能够通过的频率范围

- 具体的信道所能通过的频率范围总是有限的。信号中的许多高频分量往往不能通过信道。
- 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。

$$\text{最大数据速率} = 2B \log_2 V \text{ (比特/秒)}$$

V: 信号包含V个离散值等级

例：无噪声的3KHz信道传播二进制信号（只有两级，0和1）
的最大数据速率是： $2 * 3000 * \log_2 2 = 6000 \text{bps}$



(1) 信道能够通过的频率范围

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。

如果信道的频带越宽，也就是能够通过的信号高频分量越多，那么就可以用更高的速率传送码元而不出现码间串扰。



(2) 信噪比

- 噪声存在于所有的电子设备和通信信道中。
- 噪声是随机产生的，它的瞬时值有时会很大。因此噪声会使接收端对码元的判决产生错误。
- 但噪声的影响是相对的。如果信号相对较强，那么噪声的影响就相对较小。
- **信噪比**就是信号的平均功率和噪声的平均功率之比。常记为 S/N ，并用分贝(dB)作为度量单位。即：

$$\text{信噪比(dB)} = 10 \log_{10}(S/N) \text{ (dB)}$$

- 例如，当 $S/N=10$ 时，信噪比为10dB，而当 $S/N=1000$ 时，信噪比为30dB。



(2) 信噪比

- 1984年，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**（香农公式）。
- 信道的极限信息传输速率 C 可表达为：

$$C = W \log_2(1 + S/N) \quad (\text{bit/s})$$

其中： W 为信道的带宽（以 Hz 为单位）；

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。

香农公式告诉我们： 当外界的噪声越大，
只要传输速率足够低，对方还是能无差错的接收到信息的



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。
- 若信道带宽 W 或信噪比 S/N 没有上限（当然实际信道不可能有这样的），则信道的极限信息传输速率 C 也就没有上限。
- 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。**



2.2 引导性的传输介质

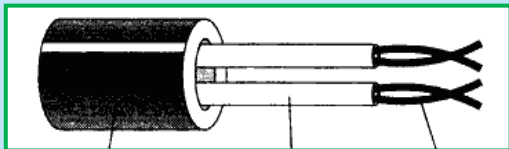
- **传输媒体也称为传输介质或传输媒介**，它就是数据传输系统中在发送器和接收器之间的物理通路。
- **传输媒体可分为两大类**，即**导引型传输媒体**和**非导引型传输媒体**。
- **在导引型传输媒体中**，**电磁波被导引沿着固体媒体（如双绞线、铜线或光纤）传播**。
- **非导引型传输媒体就是指自由空间**。在非导引型传输媒体中，电磁波的传输常称为**无线传输**。



导引型传输媒体-双绞线

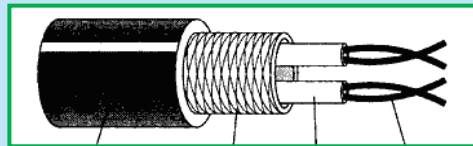
- **双绞线**（制作时，接触不良可能会影响网速）
 - 最常用的传输媒体。
 - **模拟传输和数字传输**都可以使用双绞线，其通信距离一般为几到十几公里。
 - **屏蔽双绞线 STP (Shielded Twisted Pair)**
 - 8根线外面包裹着金属屏蔽层
 - 抗干扰能力强，传输远，外界电磁场对其影响小
 - **无屏蔽双绞线 UTP (Unshielded Twisted Pair)**
 - 8根线外面直接就是一层胶皮

导引型传输媒体-双绞线



聚氯乙烯套层 绝缘层 铜线

(a) 无屏蔽双绞线



聚氯乙烯套层 屏蔽层 绝缘层 铜线

(b) 屏蔽双绞线

3 类线



5 类线



(c) 不同的绞合度的双绞线

双绞线的示意图



双绞线标准

- 1991 年，美国电子工业协会 EIA 和电信行业协会联合发布了一个用于室内传送数据的无屏蔽双绞线和屏蔽双绞线的标准 **EIA/TIA-568**。
- 1995 年将布线标准更新为 **EIA/TIA-568-A**。
- 此标准规定了 **5 个种类的 UTP 标准**（从 1 类线到 5 类线）。
- 对传送数据来说，现在最常用的 UTP 是**5类线（Category 5 或 CAT5）**。



双绞线标准

常用的绞合线的类别、带宽和典型应用

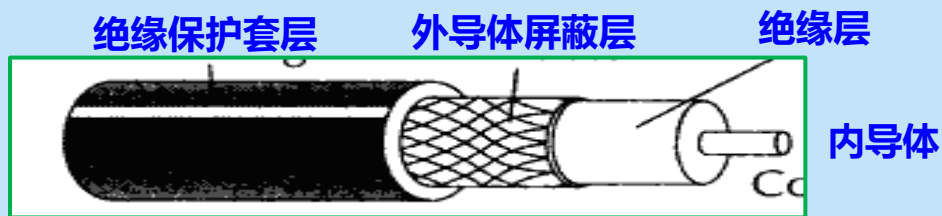
绞合线类别	带宽	线缆特点	典型应用
3	16 MHz	2 对 4 芯双绞线	模拟电话；曾用于传统以太网 (10 Mbit/s)
4	20 MHz	4 对 8 芯双绞线	曾用于令牌局域网
5	100 MHz	与 4 类相比增加了绞合度	传输速率不超过100 Mbit/s 的应用
5E (超5类)	125 MHz	与 5 类相比衰减更小	传输速率不超过 1 Gbit/s 的应用
6	250 MHz	与 5 类相比改善了串扰等性能	传输速率高于 1 Gbit/s 的应用
7	600 MHz	使用屏蔽双绞线	传输速率高于 10 Gbit/s 的应用

导引型传输媒体-同轴电缆

● 同轴电缆

- 同轴电缆具有很好的**抗干扰特性**，被广泛用于传输较高速率的数据。
- 同轴电缆的带宽取决于电缆的质量。
- **50 Ω 同轴电缆** —— **LAN / 数字传输常用**
- **75 Ω 同轴电缆** —— **有线电视 / 模拟传输常用**

同轴电缆的结构





导引型传输媒体-光缆

● 光缆

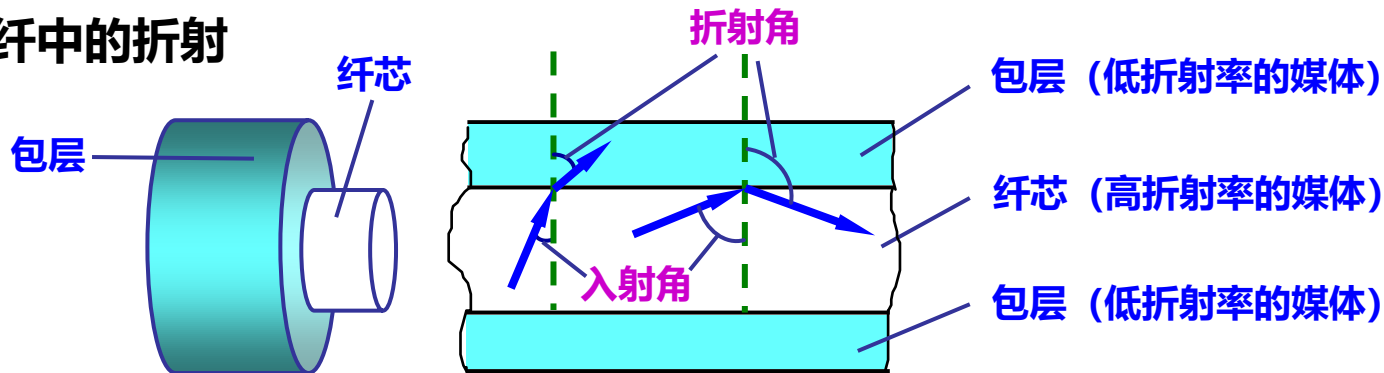
- 光纤是光纤通信的传输媒体。
- 由于可见光的频率非常高，约为 10^8 MHz 的量级，因此一个光纤通信系统的**传输带宽远远大于**目前其他各种传输媒体的带宽。
- **避免将光纤直接对折，传输速度下降，还有可能会损坏**
- **受电磁场的干扰小，别人窃取信息难**

双绞线和同轴电缆传输的数据是电信号

光传输的数据是光信号

光线在光纤中的折射

光线在光纤中的折射

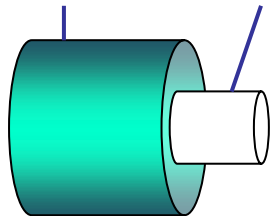


当光线从高折射率的媒体射向低折射率的媒体时，其折射角将大于入射角。因此，如果入射角足够大，就会出现全反射，光也就沿着光纤传输下去。

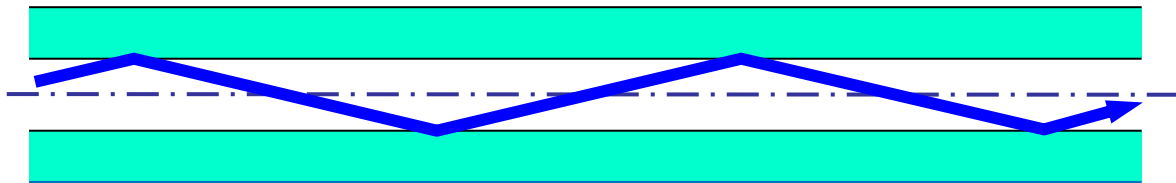
光纤的工作原理

低折射率
(包层)

高折射率
(纤芯)



光波在纤芯中的传播



光线在纤芯中传输的方式是不断地全反射

只要从纤芯中射到纤芯表面的光线的入射角大于某个临界角度，就可产生全反射。



多模光纤与单模光纤

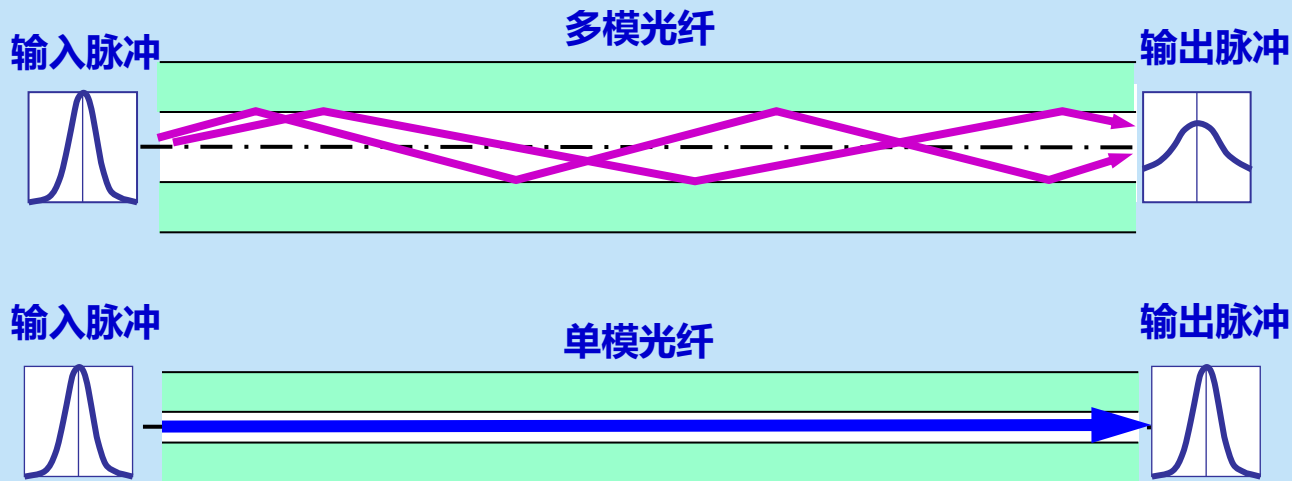
- 多模光纤

可以存在多条不同角度入射的光线在一条光纤中传输。这种光纤就称为**多模光纤**。 (全反射)

- 单模光纤

若光纤的直径减小到只有一个光的波长，则光纤就像一根波导那样，**它可使光线一直向前传播，而不会产生多次反射**。(传输距离远)

多模光纤和单模光纤



多模光纤 (a) 和 单模光纤 (b) 的比较



光纤通信中使用的光波的波段

- 常用的三个波段的中心分别位于 **850 nm, 1300 nm 和 1550 nm**。
- 所有这三个波段都具有 **25000~30000 GHz** 的带宽，可见光纤的通信容量非常大。



光纤优点

1. 通信容量非常大。
2. 传输损耗小，中继距离长。
3. 抗雷电和电磁干扰性能好。
4. 无串音干扰，保密性好。
5. 体积小，重量轻。



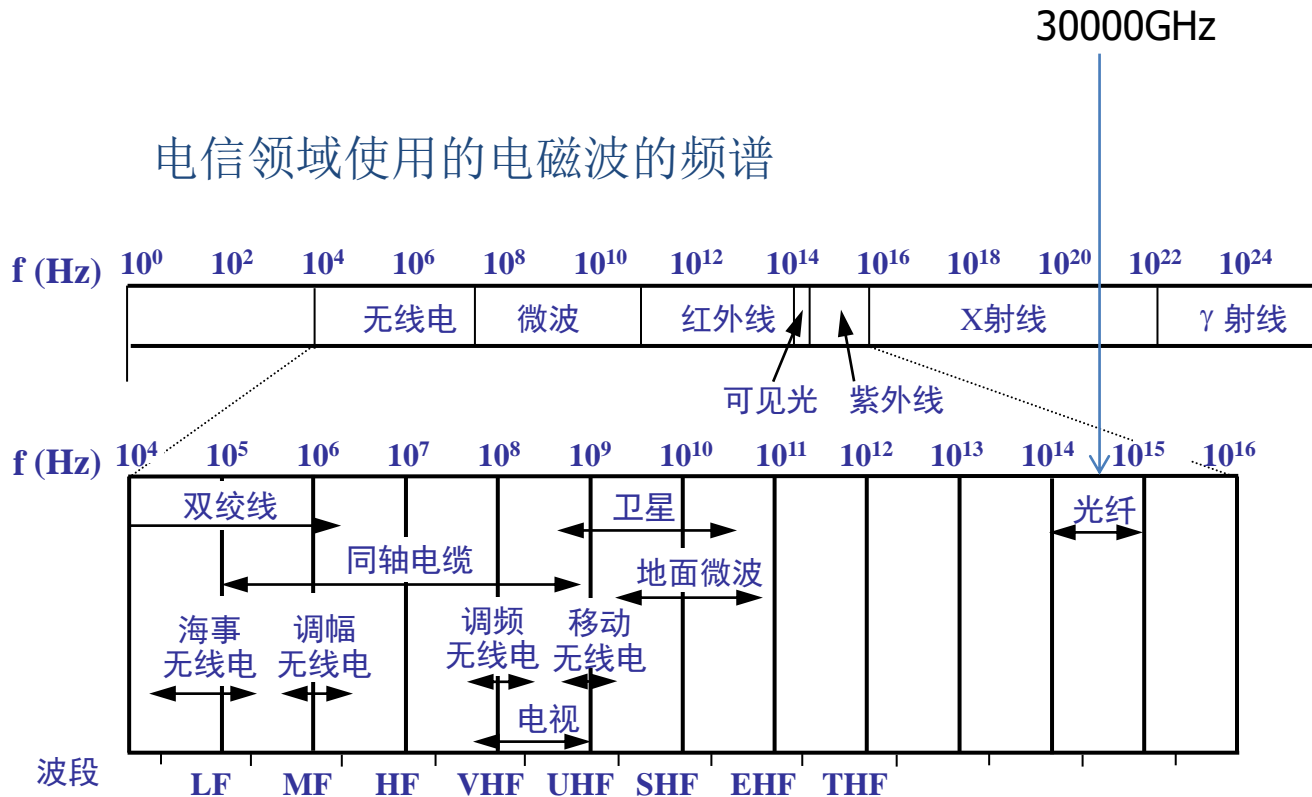
2.3 无线传输

- 将自由空间称为“非导引型传输媒体”。
- 无线传输所使用的频段很广。
- 短波通信（即高频通信）主要是靠电离层的反射，但短波信道的通信质量较差，传输速率低。 **（收音机）**
- 微波在空间主要是直线传播。
- 传统微波通信有两种方式：
 1. 地面微波接力通信 **（发射塔）**
 2. 卫星通信



电磁频谱

电信领域使用的电磁波的频谱





电磁频谱(续)

三种扩频技术:

- 跳频扩频：每秒几百次速率变频
 - 军方、蓝牙、旧版**802.11**
- 直接序列扩频：数据信号展开到一个很宽频段上，
 - 被赋予不同的码片：码分多址**CDMA**。
 - **3G**移动电话、**GPS**全球定位系统
- 超宽带通信**UWB**：快速脉冲



无线电传输

- 无线电频率（RF： 10^7 - 10^9 HZ）
- 干扰 例如：雨水、其他电气设备、障碍物会反射
- 路径损耗 例：信号沿双胶线传播每100米能量下降20分贝，无线信号下降的速度与距离平方成反比。可使用中继放大信号（交换机、无线AP）

微波传输

- 频率：100MHZ以上(>108)
- 微波塔之间的中继距离约80千米
- 电磁频谱政策



2.4 通信卫星

通信卫星可以想象成一个大型的微波中继器。

- 地球同步卫星
 - 高度为35800千米的轨道周期为24小时
 - 轨道槽与频率是争抢的资源，ITU作分配频率。
- 中地球轨道卫星：主要用于导航
- 低地球轨道卫星：
- 卫星与光纤对比：
 - 卫星：用于军事与灾难
 - 特殊地理环境：如印度尼西亚，13677个群岛之间拉数千根光缆的代价远高于发射一颗卫星。
 - 未来的主流通信是两者结合



2.5 信道复用技术

频分复用FDM:

把频谱分成多个频段分配给不同用户

时分复用TDM:

每个用户周期性的获得带宽非常短的时间

码分复用CDM:

扩频技术CDMA: 把每个比特时间分成 m 个更短的时间间隔。

原来每秒发送 b 个比特, 现在每秒发送 mb 个比特

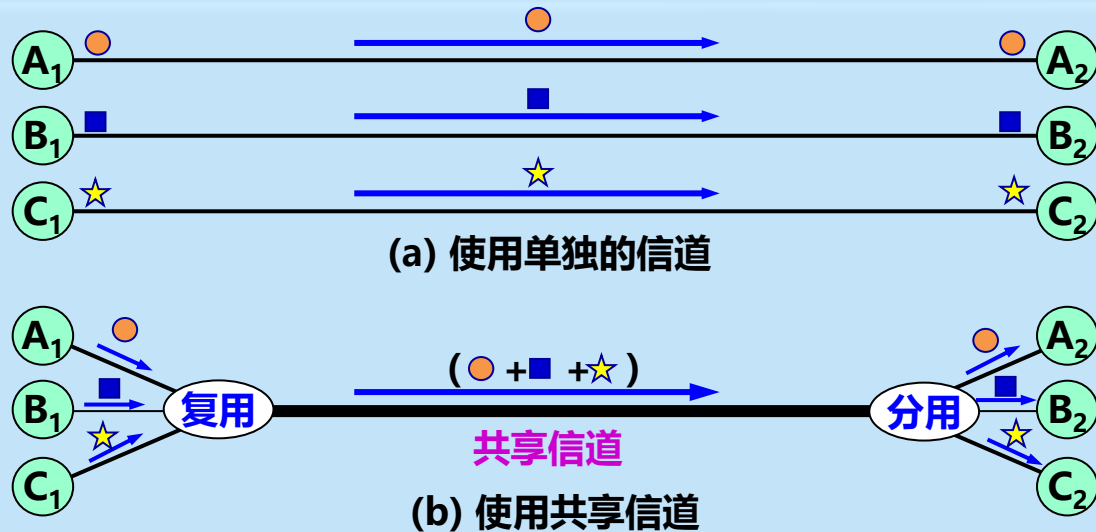


频分复用、时分复用和统计时分复用

复用 (multiplexing) 是通信技术中的基本概念。

它允许用户使用一个共享信道进行通信，降低成本，提高利用率。

复用的示意图





频分复用 FDM (Frequency Division Multiplexing)

- 将整个带宽分为多份，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）。



频分复用：分频率，不分时间，在相同的时间内，可以使用不同的频率段，提高信道的利用率

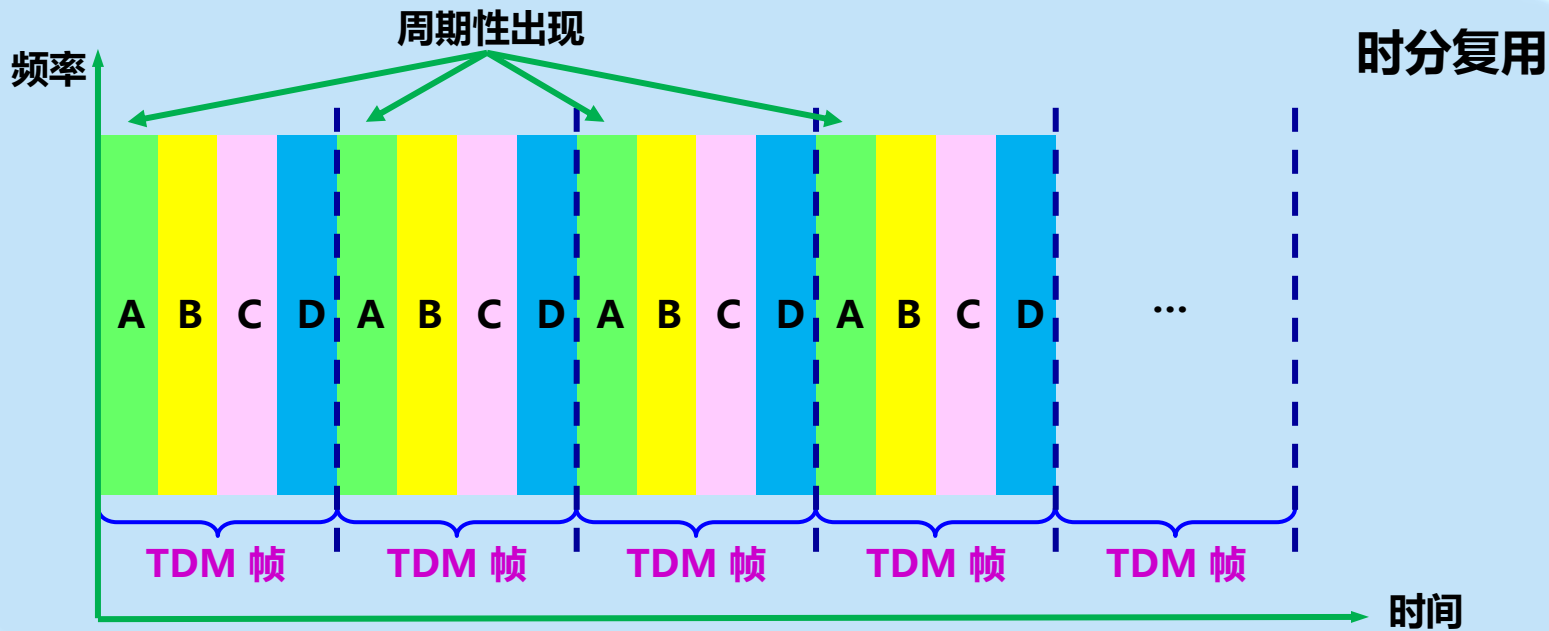


时分复用TDM (Time Division Multiplexing)

- **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）的。
- TDM 信号也称为**等时** (isochronous) 信号。
- **时分复用的所有用户在不同的时间占用同样的频带宽度。**



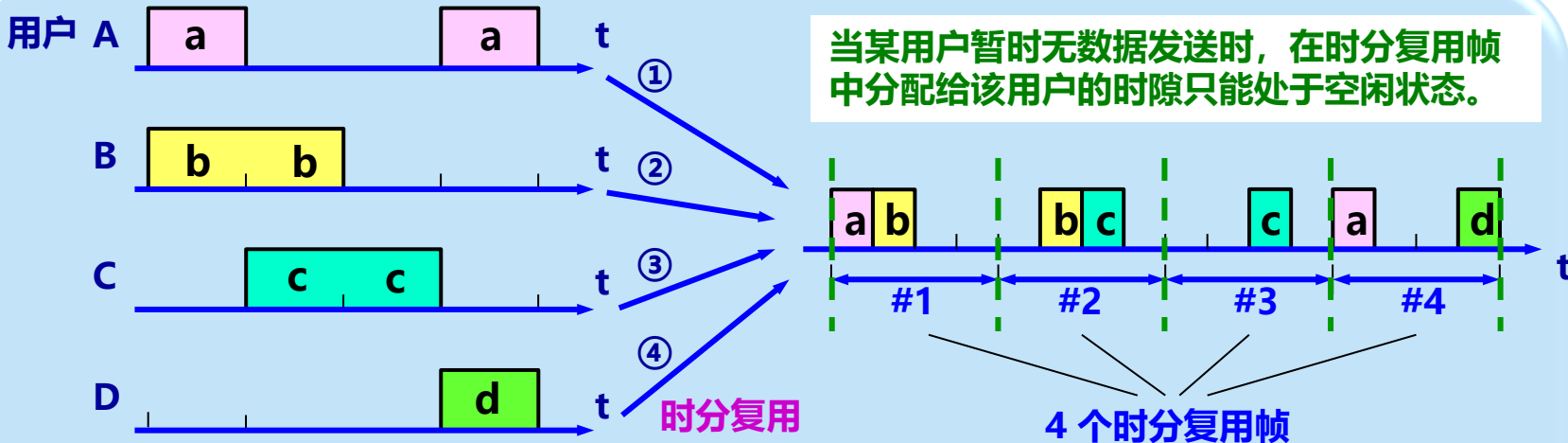
时分复用TDM





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。



时分复用可能会造成线路资源的浪费



时分复用TDM的特点

- 分时间，不分频率，频率相同
- 所有用户在不同的时间占用同样的频带宽度
- 所有用户在每一个**TDM**帧中占用固定的位置，在通信中不会改变

优点：

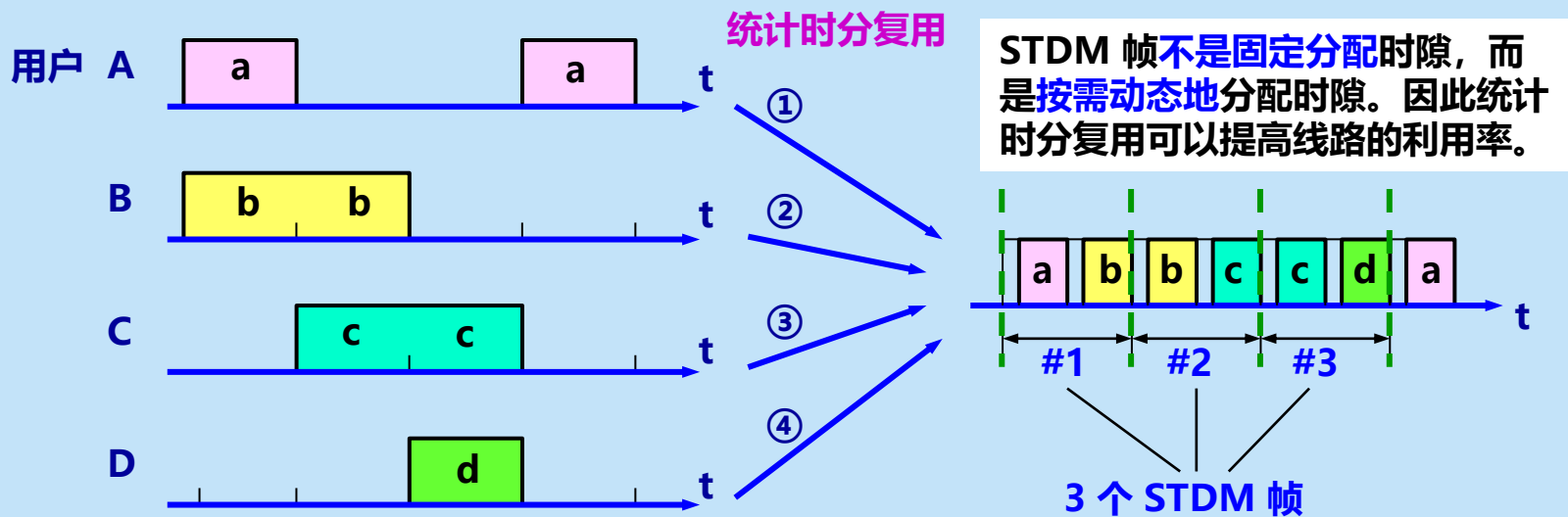
时隙分配固定，便于调节控制，适于数字信息的传输；

缺点：

当某信号源没有数据传输时，它所对应的信道会出现空闲，而其他繁忙的信道无法占用这个空闲的信道，因此会降低线路的利用率



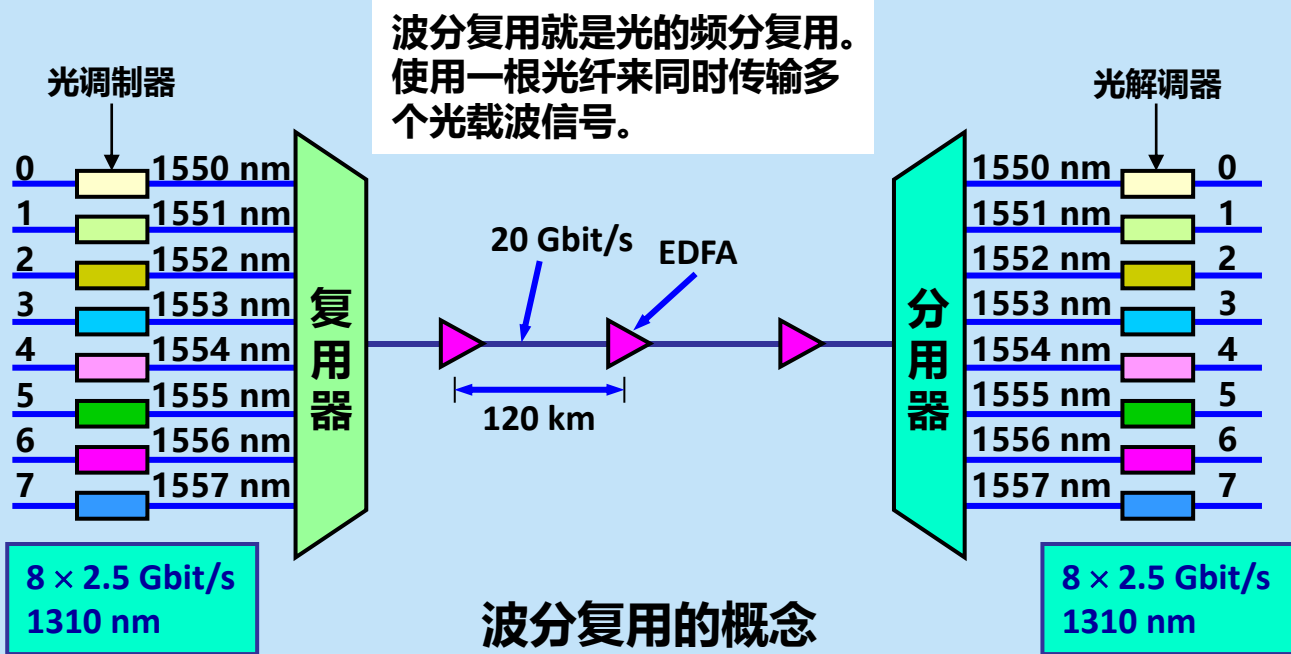
统计时分复用 STDM (Statistic TDM)



STDM: 会给每个片段做个标记，属于哪个用户



2.4.2 波分复用 WDM(Wavelength Division Multiplexing)





2.4.3 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。



码片序列(chip sequence)

- 每一个比特时间划分为 m 个短的间隔，称为**码片 (chip)**。 (分码)
- 每个站被指派一个唯一的 m bit **码片序列**。
 1. 如发送比特 1，则发送自己的 m bit 码片序列。
 2. 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。
 1. 发送比特 1 时，就发送序列 00011011，
 2. 发送比特 0 时，就发送序列 11100100。
- S 站的码片序列(码片向量)： $(-1 \ -1 \ -1 \ +1 \ +1 \ -1 \ +1 \ +1)$



码片序列实现了扩频

- 假定S站要发送信息的数据率为 b bit/s。由于每一个比特要转换成 m 个比特的码片，因此 S 站实际上发送的数据率提高到 mb bit/s，同时 S 站所占用的频带宽度也提高到原来数值的 m 倍。
- 这种通信方式是**扩频**(spread spectrum)通信中的一种。
- 扩频通信通常有两大类：
 1. 一种是**直接序列扩频DSSS** (Direct Sequence Spread Spectrum)，如上面讲的使用码片序列就是这一类。
 2. 另一种是**跳频扩频FHSS** (Frequency Hopping Spread Spectrum)。



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) 等于 0:

$$S \bullet T \equiv \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m S_i T_i = 0$$

每个站分配的码片序列不仅必须各不相同，并且还必须相互正交



正交关系的另一个重要特性

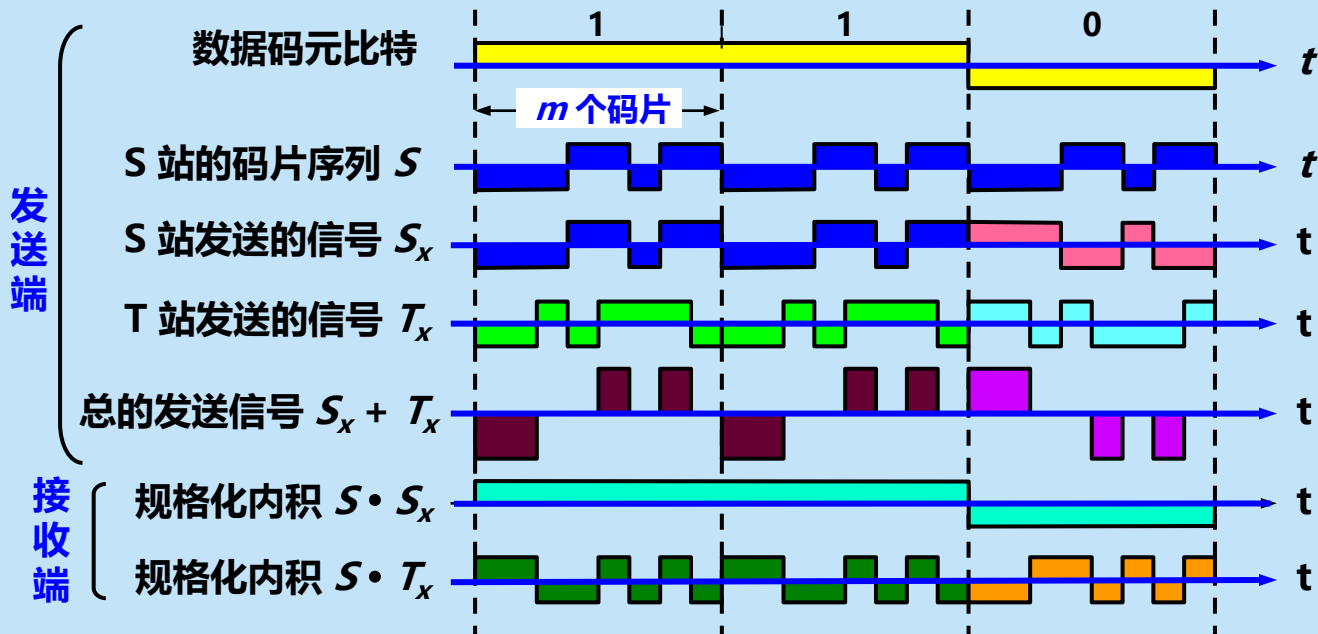
- 任何一个码片向量和该码片向量自己的规格化内积都是 1。

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

- 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





CDMA – 案例

联通的CDMA手机： 使用码分复用机制

每个用户从同一个基站收到的频率是一样的（基站信号）

每个用户拥有不同的码片并且固定不变

每个用户将自己的码片序列和收到的信号序列进行规格化内积

规格化内积：

=0： 没有收到信号

=1： 收到的信号为： 1

=-1： 手打的信号为： -1

案例： 克隆手机号的原理

选择一个和被克隆手机相同的码片即可，当被克隆手机接电话时，克隆的也能听到

缺点：

CDMA中，1bit用m个码片表示

当手机用户越多，由于每个用户的码片不能相同，所以m的位数越多



案例：(采用CDMA机制)

W给A打电话时：

A,B,C都会从基站收到这个频率信号S

那么如何区分W是与A通信呢？

规格化内积(码片)：

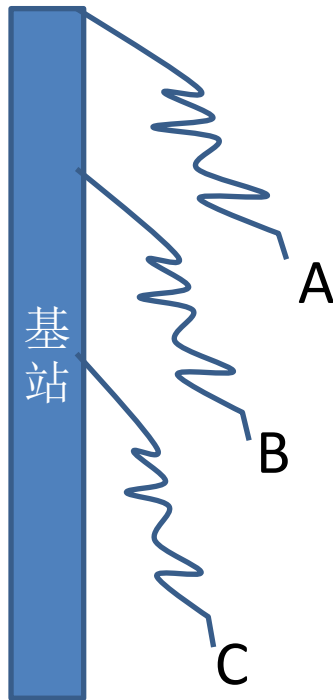
$M_A * S$ ：为相应的信号

$M_B * S = 0$ ：没有信号

$M_C * S = 0$ ：没有信号

当基站发送多个信号时，同时有多个用户打电话，基站会将收到的信号进行叠加成sum：

A,B,C 的码片将会和sum进行规格化内积



A,B,C用户从基站收到同样的频率信号，通过各自的码片进行区分



举例：CDMA 的工作原理

手机号A, B, C, D 的码片如下：

A: (-1 -1 -1 +1 +1 -1 +1 +1)

B: (-1 -1 +1 -1 +1 +1 +1 -1)

C: (-1 +1 -1 +1 +1 +1 -1 -1)

D: (-1 +1 -1 -1 -1 -1 +1 -1)

网络中传输的码片序列为： R(-1 +1 -3 +1 -1 -3 +1 +1)

所有的手机都收到R信号，那么A,B,C,D根据自身的码片收到信号是什么呢？

分别将A, B, C, D 的码片和R进行规格化内积

A * R = 1 (收到信号1)

B * R = -1 (收到信号 -1)

C * R = 0 (没有收到信号)

D * R = 1 (收到信号 1)



2.6 公共电话交换网络

- 公共电话交换网络PSTN：
 - 局域网可以采用一根电缆连接两台计算机，距离远时必须依赖于PSTN。
- 电话系统结构
 - 自贝尔1876年发明电话以来，电话需求非常广，线路全连接是行不通。
 - 从手工接线单交换局模式发展到二级交换局
- 现在的电话系统包括三部分
 - **本地回路**：进入家庭或公司的模拟双绞线
 - **中继线**：连接交换局的光纤
 - **交换局**：电话呼入连接中继线



本地回路

- **调制解调器：Modem：2400bps~56kbps**

语音电话线的频率限制在3100HZ内，比以太网或802.11WIFI带宽小了4个数量级

- **数字用户线路ADSL：**

当电话传输数率达到56Kbps时，相比有线电视10Mbps的竞争，采用非对称数字用户线ADSL：

下行8Mbps，上行1Mbps,现在可达12Mbps

- **光纤到户：FttH,住宅的光纤捆绑后一根连接到端局。**

下行：光分离器splitters

上行：光合并器combiner



中继线和多路复用

电话网络的核心传送的是数字信息而不是模拟信息。在长途传输中需要对信号转换。高带的中继线共享可用TDM和FDM多路复用实现。

- 数字化语音信号

模拟信号数字化：编码解码器设备完成

- 时分多路复用

北美和日本使用的T1载波：每125微秒发送一个语音样值。

24条复用语音信道，每信道8bit样值插入到输出流。

那么每帧： $24 \times 8 = 192$ bit, 附加1bit信令控制



同步光纤网 SONET与同步数字系列 SDH

- 同步光纤网 SONET (Synchronous Optical Network) 的各级时钟都来自一个非常精确的主时钟。
第 1 级同步传送信号 STS-1 (Synchronous Transport Signal) 的传输速率是 51.84 Mb/s。
- 同步数字系列 **SDH**
 - ITU-T 以美国标准 SONET 为基础，制订出国际标准同步数字系列 SDH (Synchronous Digital Hierarchy)。
 - 一般可认为 SDH 与 SONET 是同义词。
 - SDH 的基本速率为 155.52 Mb/s，称为第 1 级同步传递模块 (Synchronous Transfer Module)，即 STM-1，相当于 SONET 体系中的 OC-3 速率。



SONET 的 OC 级/STS 级与 SDH 的 STM 级的对应关系

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	
1866.240	OC-36/STS-36	STM-12	
2488.320*	OC-48/STS-48	STM-16	2.5 Gb/s
4876.640	OC-96/STS-96	STM-32	
9953.280	OC-192/STS-192	STM-64	10 Gb/s



交换技术

- 典型交换技术包括：
 1. 电路交换
 2. 分组交换
 3. 报文交换等。
- 互联网的核心部分采用了分组交换技术。

1. 电路交换的主要特点

2 部电话机只需要用 1 对电线直接连接就能够互相通话。

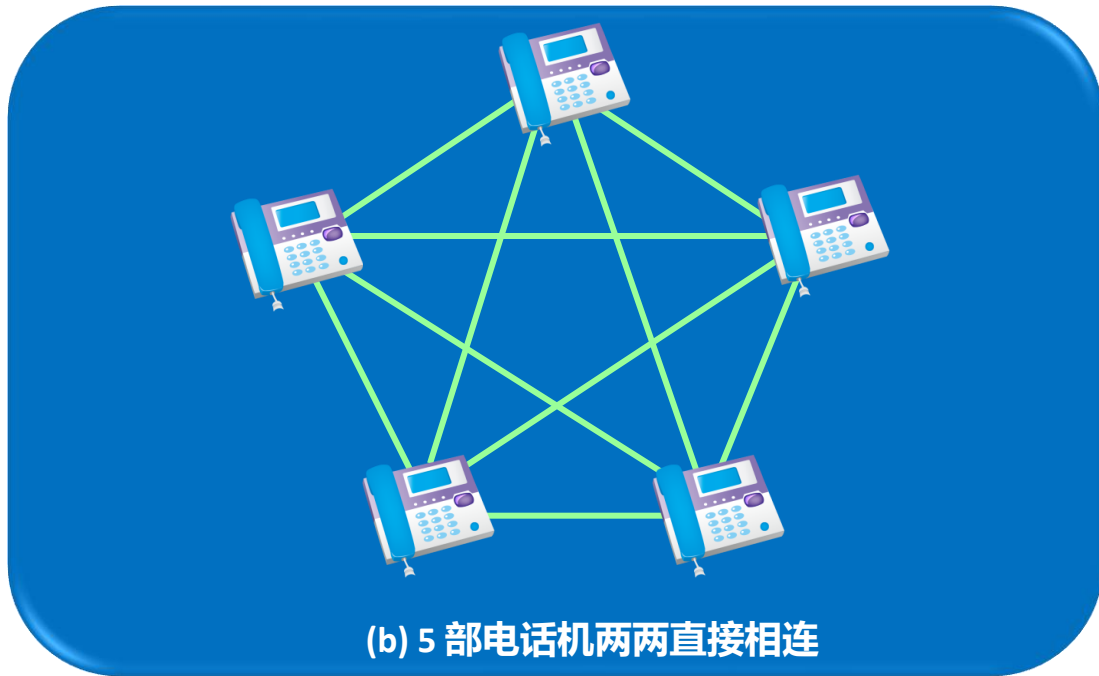


(a) 两部电话直接相连

电话机的不同连接方法

1. 电路交换的主要特点

5 部电话机两两直接
相连，需 10 对电线。

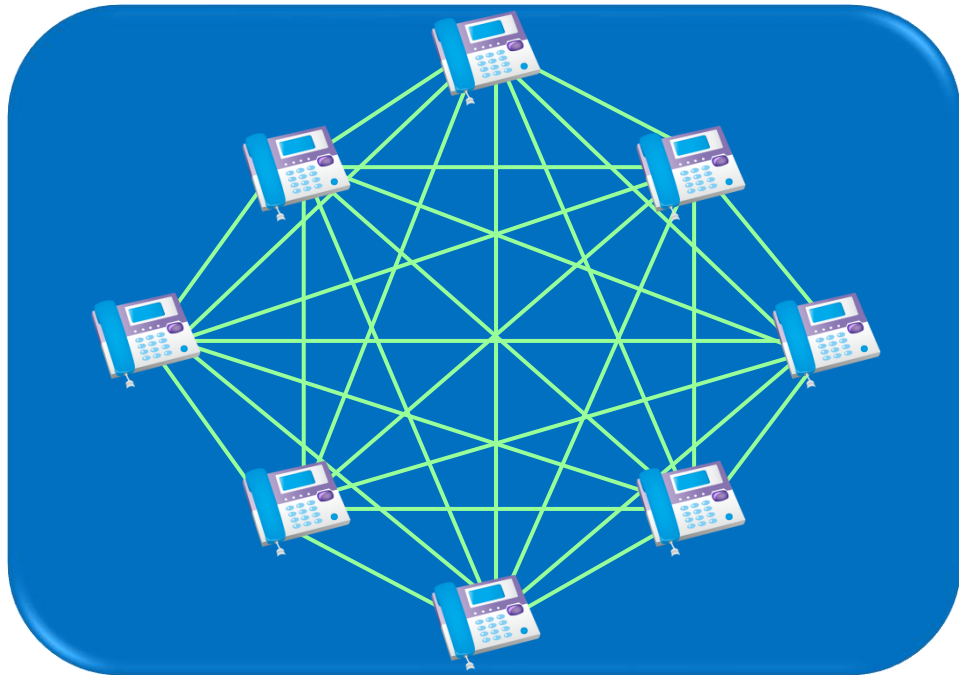


(b) 5 部电话机两两直接相连

电话机的不同连接方法

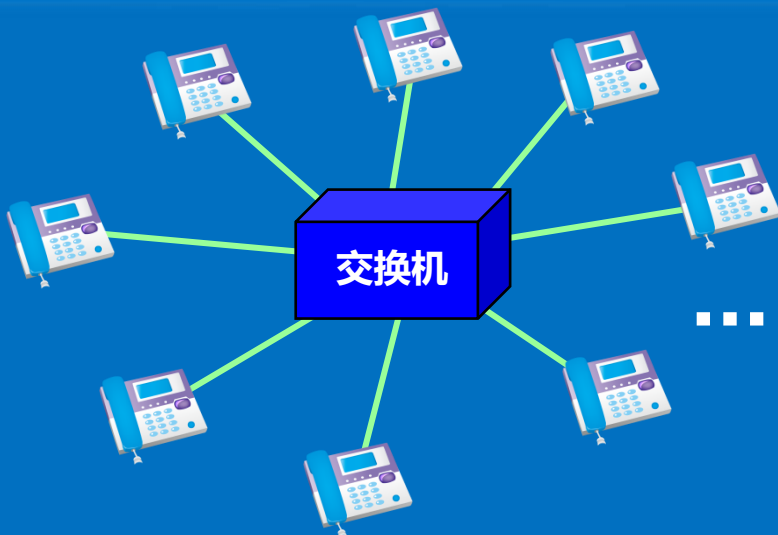
1. 电路交换的主要特点

N 部电话机两两直接相连，需 $N(N-1)/2$ 对电线。这种直接连接方法所需要的电线对的数量与电话机数量的平方 (N^2) 成正比。



使用交换机

当电话机的数量增多时，就要使用**交换机**来完成全网的交换任务。



(c) 用交换机连接许多部电话

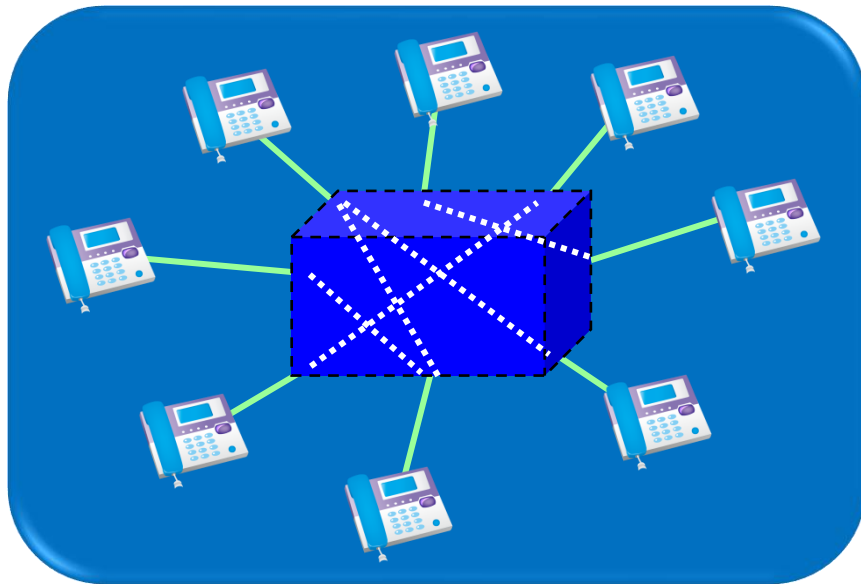
电话机的不同连接方法

每一部电话都直接连接到交换机上，而交换机使用交换的方法，让电话用户彼此之间可以很方便地通信。

所采用的交换方式就是**电路交换 (circuit switching)**。

“交换”的含义

- “交换” (switching) 的含义就是**转接**——把一条电话线转接到另一条电话线，使它们连通起来。
- 从通信资源的分配角度来看，“交换”就是按照某种方式**动态地分配**传输线路的资源。





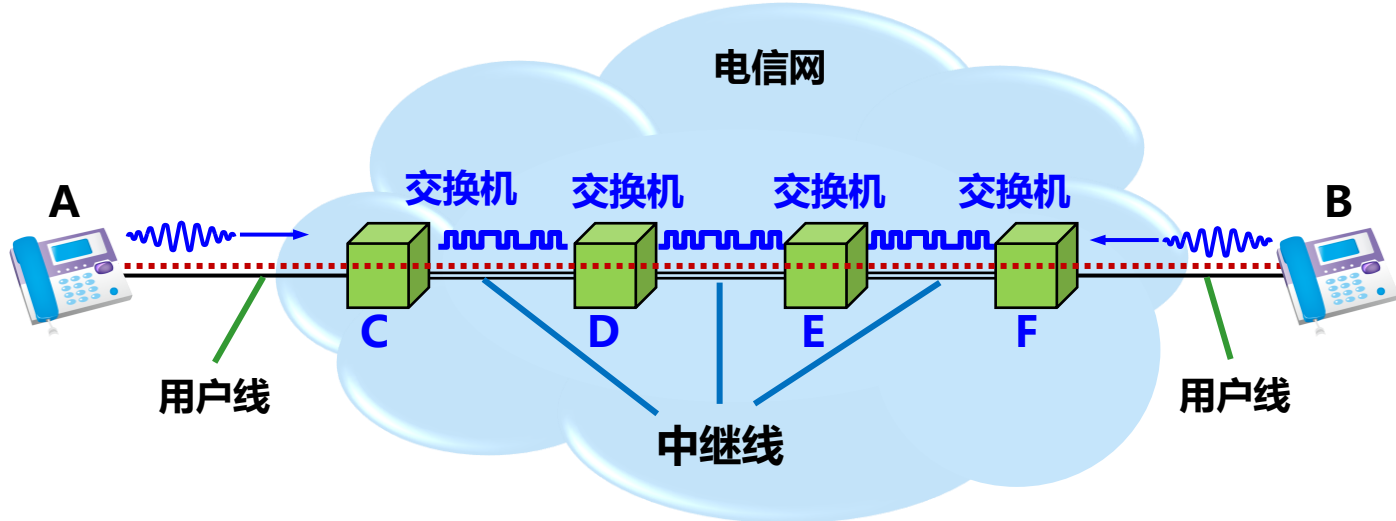
电路交换特点

- 电路交换必定是**面向连接**的。
- 电路交换分为三个阶段：
 1. **建立连接**：建立一条专用的物理通路，以保证双方通话时所需的通信资源在通信时不会被其他用户占用； **（电话拨号）**
 2. **通信**：主叫和被叫双方就能互相通电话； **（通话中）**
 3. **释放连接**：释放刚才使用的这条专用的物理通路（释放刚才占用的所有通信资源）。 **（挂电话）**

电路交换举例

- A 和 B 通话经过四个交换机。
- 通话在 A 到 B 的连接上进行。通话时，AB之间类似搭建了临时专线

右图可以描述A,B 处在不同的省份，如：A在安徽，B在河南因为距离的原因，需要使用多个交换机实现中继的作用，防止信号衰弱，这也是跨地区收费高的原因（长途费，漫游费等）



电路交换的用户始终占用端到端的通信资源



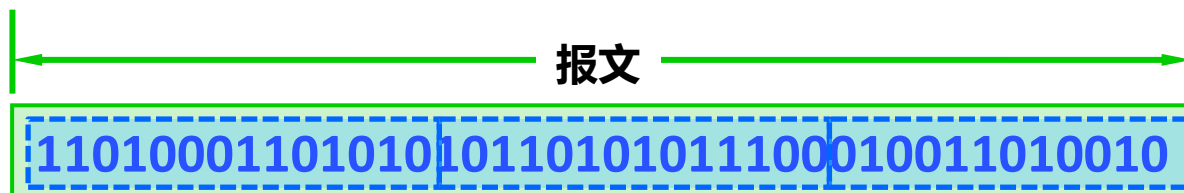
电路交换特点

- 计算机数据具有突发性。
- 这导致在传送计算机数据时，通信线路的利用率很低（用来传送数据的时间往往不到 10% 甚至不到 1%）。



2. 分组交换的主要特点

- 分组交换则采用**存储转发**技术。
- 在发送端，先把较长的报文**划分成较短的、固定长度的数据段**。



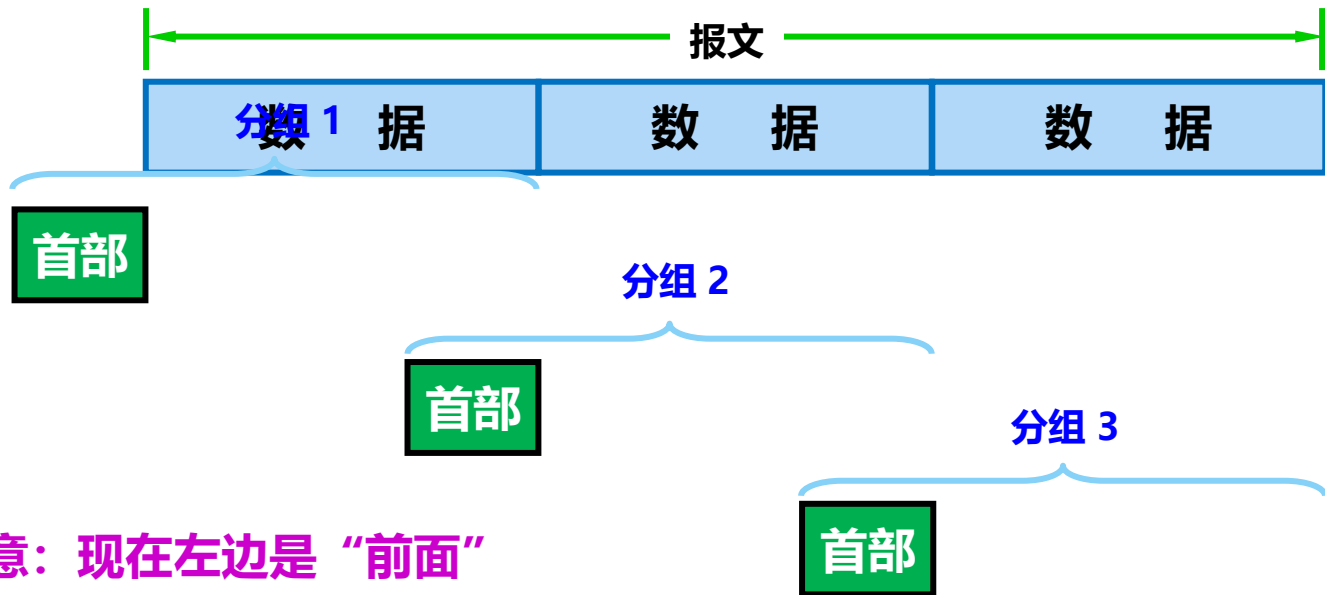
假定这个报文较长不便于传输

计算机网络采用分组交换方式实现通信



添加首部构成分组

每一个数据段前面添加上**首部构成分组** (packet)。(首部包括源和目的地址)

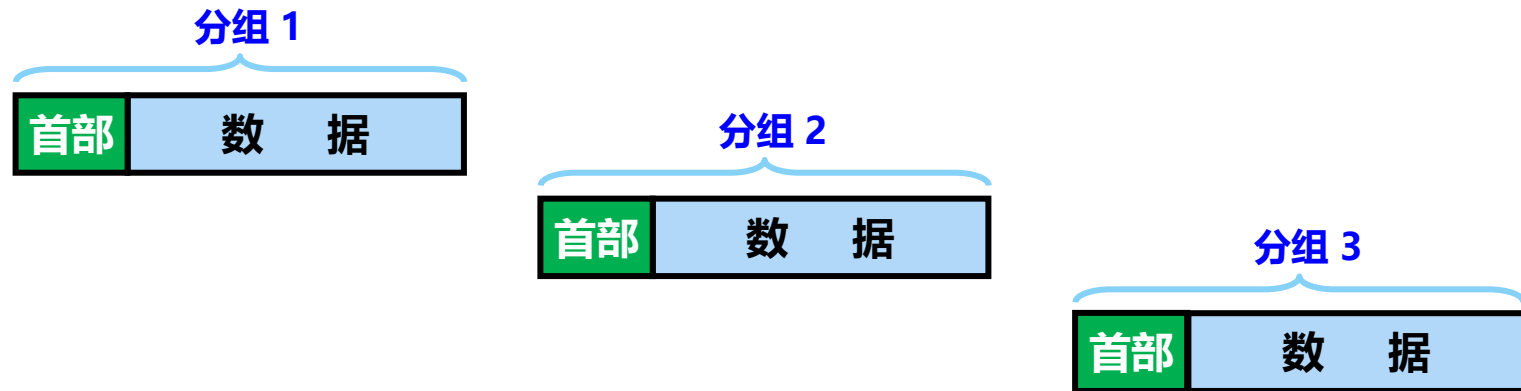


请注意：现在左边是“前面”



分组交换的传输单元

- 分组交换网以“**分组**”作为数据传输单元。
- **依次**把各分组发送到接收端（假定接收端在左边）。

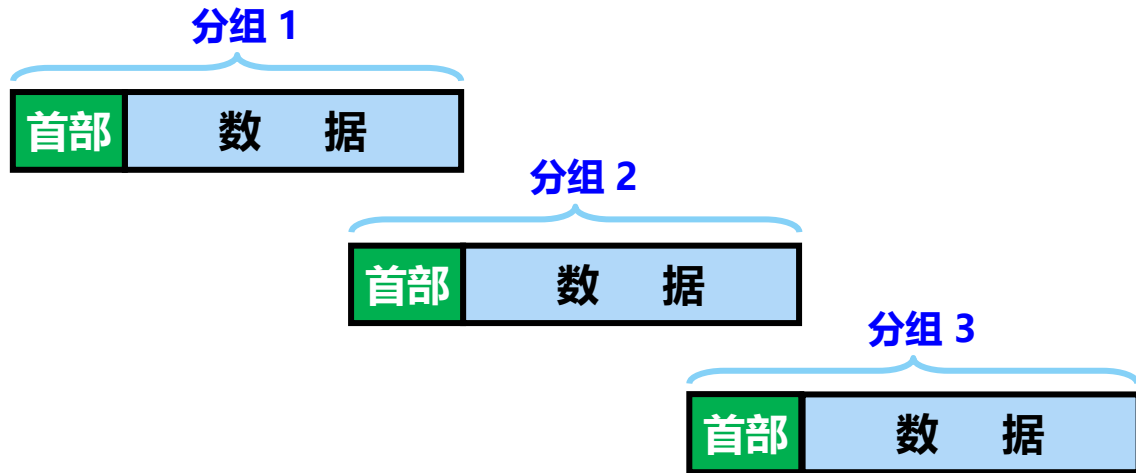


以分组为基本单位在网络中传送



收到分组后剥去首部

接收端收到分组后剥去首部还原成报文。

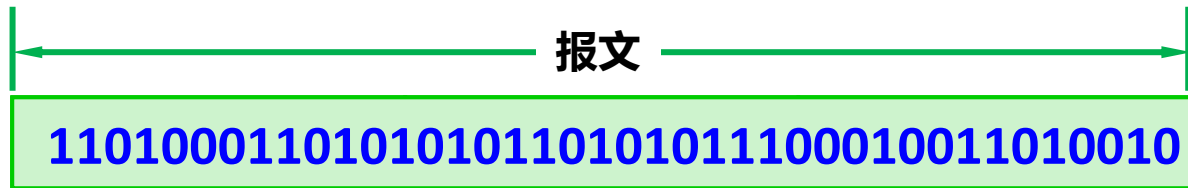


收到的数据



最后还原成原来的报文

- 最后，在接收端把收到的数据恢复成为原来的报文。



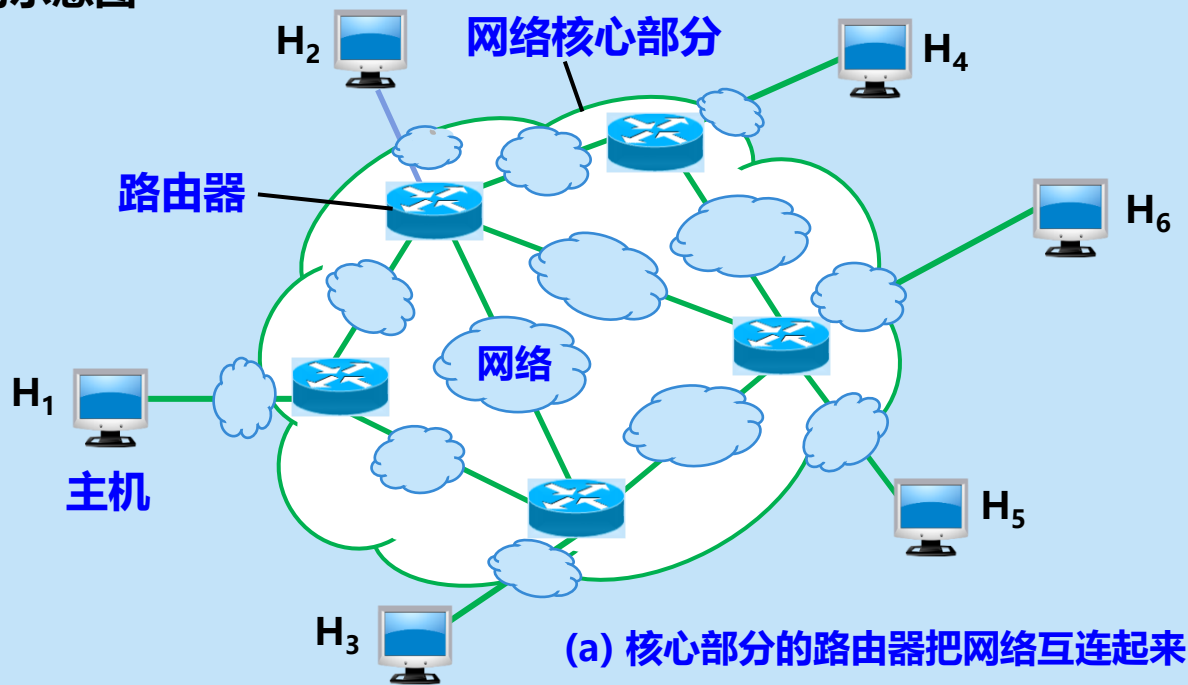
- 这里我们假定分组在传输过程中没有出现差错，在转发时也没有被丢弃。



分组交换的传输单元

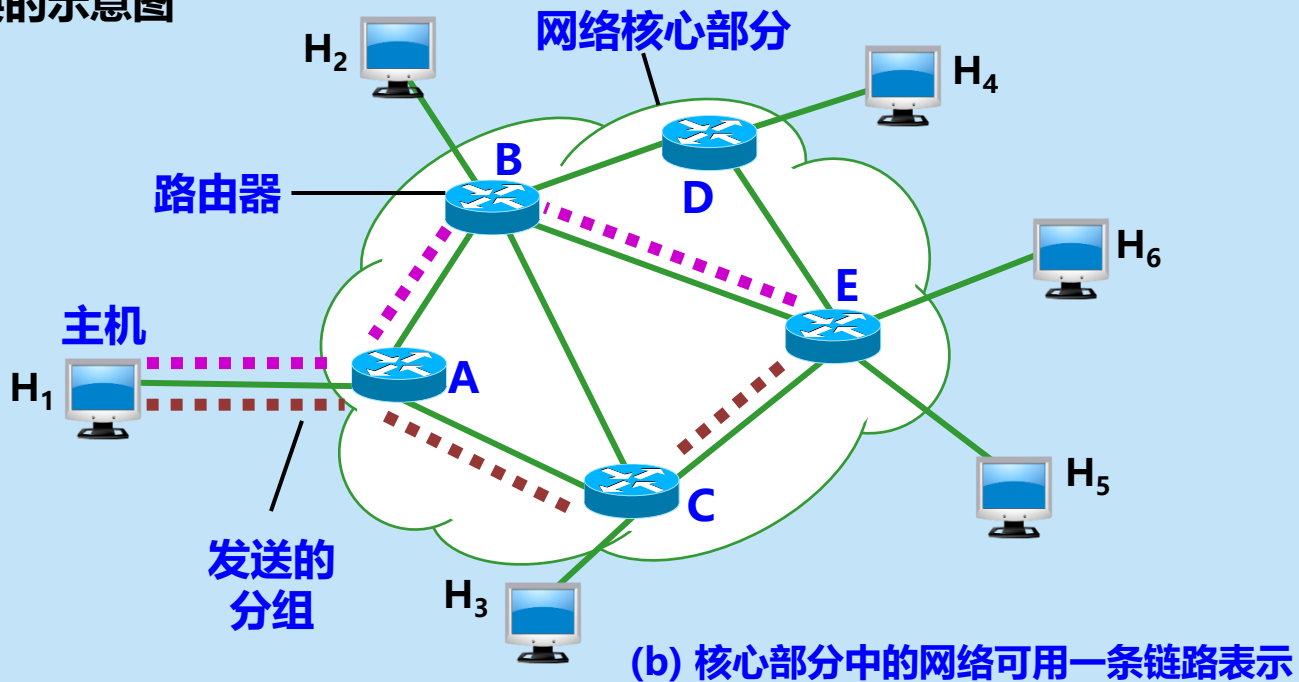
- 每一个分组的首部都含有地址（诸如目的地址和源地址）等控制信息。
- 分组交换网中的结点交换机根据收到的分组首部中的地址信息，把分组转发到下一个结点交换机。
- 每个分组在互联网中独立地选择传输路径。
- 用这样的存储转发方式，最后分组就能到达最终目的地。
- （路由器端口具有存储功能，若某一端口存在多个分组，则需要排队）

分组交换的示意图

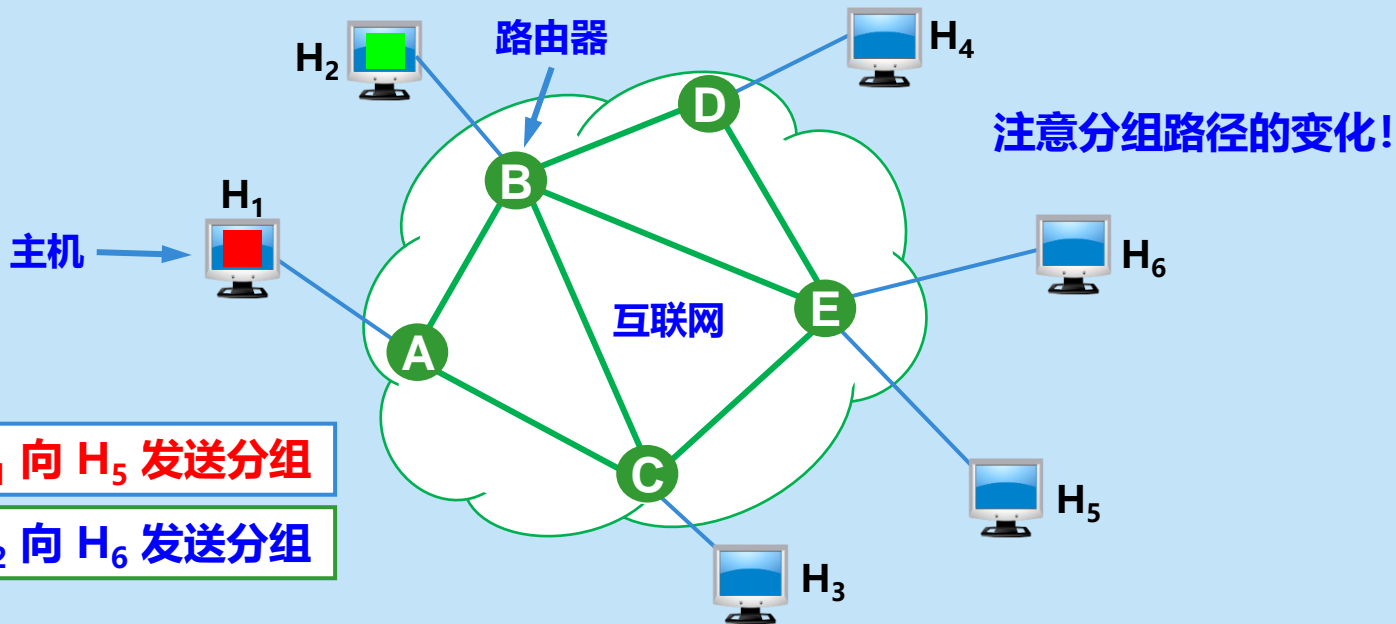




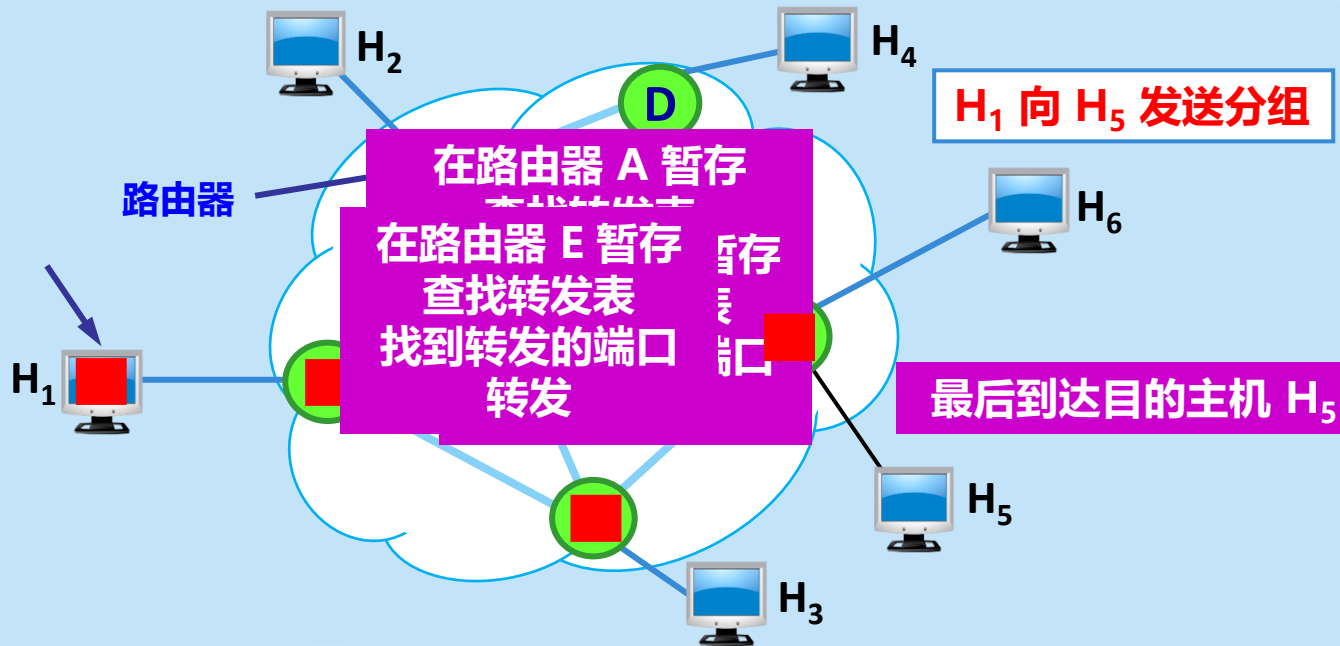
分组交换的示意图



分组交换网的示意图



注意分组的存储转发过程





路由器

- 在路由器中的输入和输出端口之间没有直接连线。
- 路由器处理分组的过程是：
 1. 把收到的分组先**放入缓存（暂时存储）**；
 2. **查找转发表**，找出到某个目的地址应从哪个端口转发；
 3. 把分组送到适当的端口**转发**出去。



主机和路由器的作用不同

- 主机是**为用户进行信息处理**的，并向网络发送分组，从网络接收分组。
- 路由器对分组进行**存储转发**，最后把分组交付目的主机。



分组交换的优点

优点	所采用的手段
高效	在分组传输的过程中动态分配传输带宽，对通信链路是逐段占用。
灵活	为每一个分组独立地选择最合适的转发路由。
迅速	以分组作为传送单位，可以不先建立连接就能向其他主机发送分组。
可靠	保证可靠性的网络协议；分布式多路由的分组交换网，使网络有很好的生存性。



分组交换带来的问题

- 分组在各结点存储转发时需要**排队**，这就会造成一定的**时延**。
- 分组必须携带的首部（里面有必不可少的控制信息）也造成了一定的**开销**。



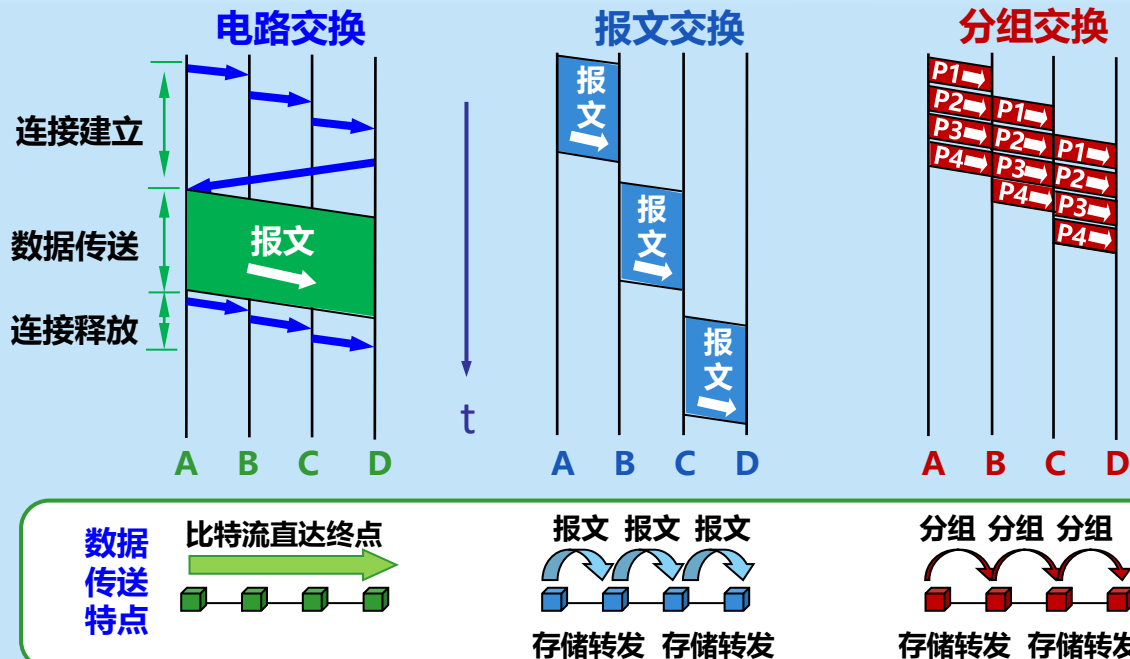
存储转发原理并非完全新的概念

- 在 20 世纪 40 年代，电报通信也采用了基于存储转发原理的**报文交换** (message switching)。
- 报文交换的时延较长，从几分钟到几小时不等。现在报文交换已经很少有人使用了。

报文交换：和上述的分组交换类似，也需要填写地址，区别在于：一次性将报文完整发送出去，不管报文有多大，它都不会对报文进行分割



路由器



分组交换：类似于流水线，分组间可以并发执行（视频004）



三种交换的比较

- 若要连续传送大量的数据，且其**传送时间远大于连接建立时间**，则电路交换的传输速率较快。
- 报文交换和分组交换不需要预先分配传输带宽，在传送突发数据时可提高整个网络的信道利用率。
- 由于一个**分组的长度往往远小于整个报文的长度**，因此分组交换比报文交换的时延小，同时也具有更好的灵活性。



2.7 移动电话系统

- 移动电话：**mobile phone**
 - 应用于更广域的语音通信和数据通信
 - 经历了三代：1G、2G、3G
- 三代不同技术：
 - 模拟语音、
 - 数字语音、
 - 数字语音和数据



2.8 有线电视

- 共用天线电视
 - 20世纪40年代后期出现，解决农村山区的收视
- 线缆上的Internet:
 - 有线电视被替换成光纤后，而到家庭的是同轴电缆
这样的系统称为混合光纤电缆。
- 频谱分配：频分多路复用
- 线缆调制解调器:Cable modem
- ADSL与有线电视电缆
 - 光纤+双胶线（数据用户）
 - 光纤+同轴电缆（是双胶线几百倍，电视节目）



2.9 本章小结

- 了解物理层的基本功能，掌握调制/解调、编码/解码、复用/解复用、电路交换、分组交换等基本概念。
- 习题：
- 第二章：3，4，9，26，32，33，38，39，46







2.5 数字传输系统

- 在早期电话网中，从市话局到用户电话机的用户线是采用最廉价的双绞线电缆，而长途干线采用的是频分复用 FDM 的模拟传输方式。
- 与模拟通信相比，数字通信无论是在传输质量上还是经济上都有明显的优势。
- 目前，长途干线大都采用时分复用 PCM 的数字传输方式。
- 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。



2.5 数字传输系统

- 由于历史上的原因，PCM 有两个互不兼容的国际标准：
 1. 北美的 24 路 PCM（简称为 T1）
 2. 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 Mbit/s，而 T1 的速率是 1.544 Mbit/s。
- 当需要有更高的数据率时，可采用复用的方法。



旧的数字传输系统存在许多缺点

最主要的是以下两个方面：

- **速率标准不统一**

1. 如果不对高次群的数字传输速率进行标准化，国际范围的**基于光纤高速数据传输**就很难实现。

- **不是同步传输**

1. 在过去相当长的时间，为了节约经费，各国的数字网主要采用准同步方式。
2. 当数据传输的速率很高时，**收发双方的时钟同步**就成为很大的问题。



同步光纤网 SONET

- **同步光纤网** SONET (Synchronous Optical Network) 的各级时钟都来自一个非常精确的主时钟。
- SONET 为光纤传输系统定义了同步传输的线路速率等级结构
 1. 对电信信号称为第 1 级**同步传送信号** STS-1 (Synchronous Transport Signal), 其传输速率是 51.84 Mbit/s。
 2. 对光信号则称为第 1 级**光载波** OC-1 (OC 表示 Optical Carrier)。
- 现已定义了从 51.84 Mbit/s (即 OC-1) 一直到 9953.280 Mbit/s (即 OC-192/STS-192) 的标准。



同步数字系列 SDH

- ITU-T 以美国标准 SONET 为基础，制订出国际标准**同步数字系列 SDH** (Synchronous Digital Hierarchy)。
- 一般可认为 SDH 与 SONET 是同义词。
- **其主要不同点是**：SDH的基本速率为155.52 Mbit/s，称为第 1 级**同步传递模块** (Synchronous Transfer Module)，即 STM-1，相当于 SONET 体系中的 OC-3 速率。



SONET的 OC级 / STS级 与SDH的 STM级 的对应关系

线路速率(Mbit/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 Mbit/s
466.560	OC-9/STS-9	STM-3	
622.080	OC-12/STS-12	STM-4	622 Mbit/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 Gbit/s
4976.640	OC-96/STS-96	STM-32	
9953.280	OC-192/STS-192	STM-64	10 Gbit/s
39813.120	OC-768/STS-768	STM-256	40 Gbit/s



SONET / SDH 标准的意义

- 使不同的数字传输体制在 STM-1 等级上获得了统一。
- 第一次真正实现了数字传输体制上的世界性标准。
- 已成为公认的新一代理想的传输网体制。
- SDH 标准也适合于微波和卫星传输的技术体制。



2.6 宽带接入 技术

2.6.1

ADSL 技术

2.6.2

光纤同轴混合网 (HFC网)

2.6.3

FTTx 技术



2.6 宽带接入技术

- 用户要连接到互联网，必须先连接到某个ISP。
- 在互联网的发展初期，用户都是利用电话的用户线通过调制解调器连接到ISP的，电话用户线接入到互联网的速率最高仅达到56 kbit/s。
- 美国联邦通信委员会FCC原来认为只要双向速率之和超过200 kbit/s就是宽带。但 2015 年重新定义为：

宽带下行速率要达到 25 Mbit/s

宽带上行速率要达到 3 Mbit/s



2.6 宽带接入技术

- 从宽带接入的媒体来看，可以划分为两大类：
 1. 有线宽带接入
 2. 无线宽带接入
- 下面讨论有线的宽带接入。（将PC接入Internet）

有线的宽带接入：
利用已有的线路，采用频分复用技术

- 1) 电话线
- 2) 有线电视（光纤同轴混合网）



2.6.1 ADSL 技术

- **非对称数字用户线 ADSL** (Asymmetric Digital Subscriber Line) 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。 (上行信道少于下行信道数目)
- 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。
- ADSL 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。



DSL 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 (Digital Subscriber Line) : 数字用户线**
- **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 的传输距离

- ADSL 的传输距离取决于数据率和用户线的线径（用户线越细，信号传输时的衰减就越大）。
- ADSL 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：
 1. 0.5 毫米线径的用户线，传输速率为 1.5~2.0 Mbit/s 时可传送5.5公里，但当传输速率提高到 6.1 Mbit/s 时，传输距离就缩短为 3.7 公里。
 2. 如果把用户线的线径减小到 0.4 毫米，那么在 6.1 Mbit/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。

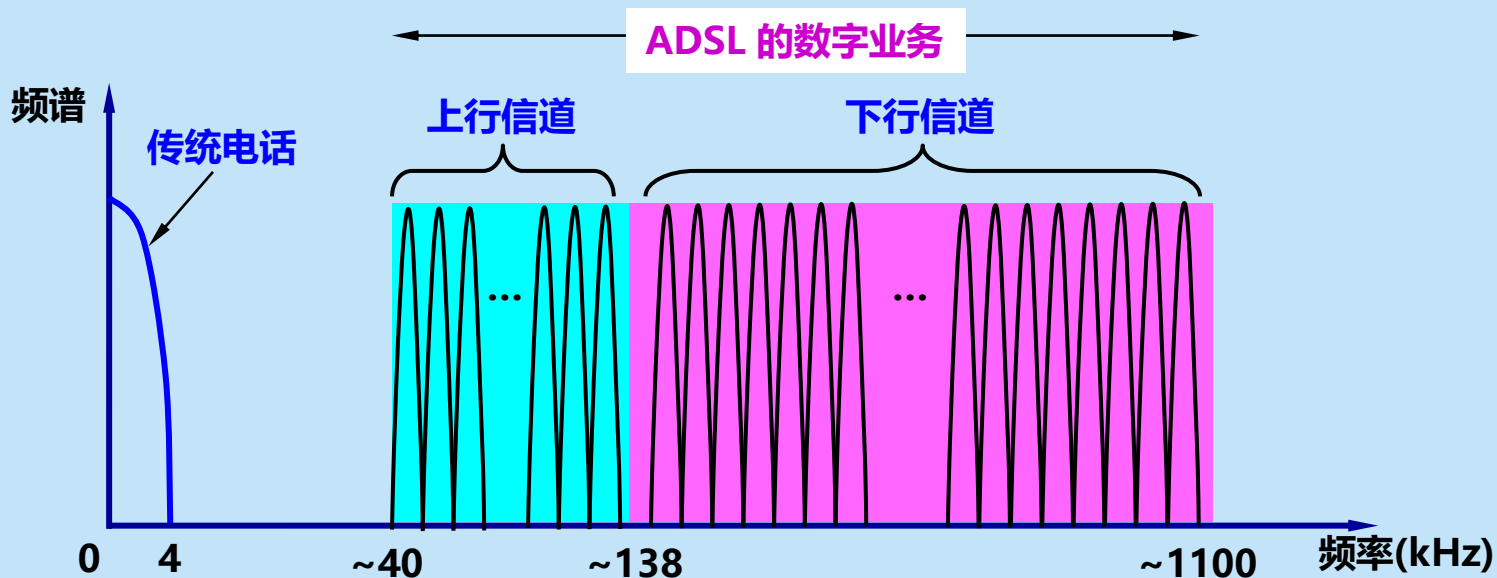
这里的“多音调”就是“多载波”或“多子信道”的意思。



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



0—4KHz：打电话

40—138KHz：上行信道

138KHz—1100KHz：下行信道（下行信道数 > 上行信道，非对称）

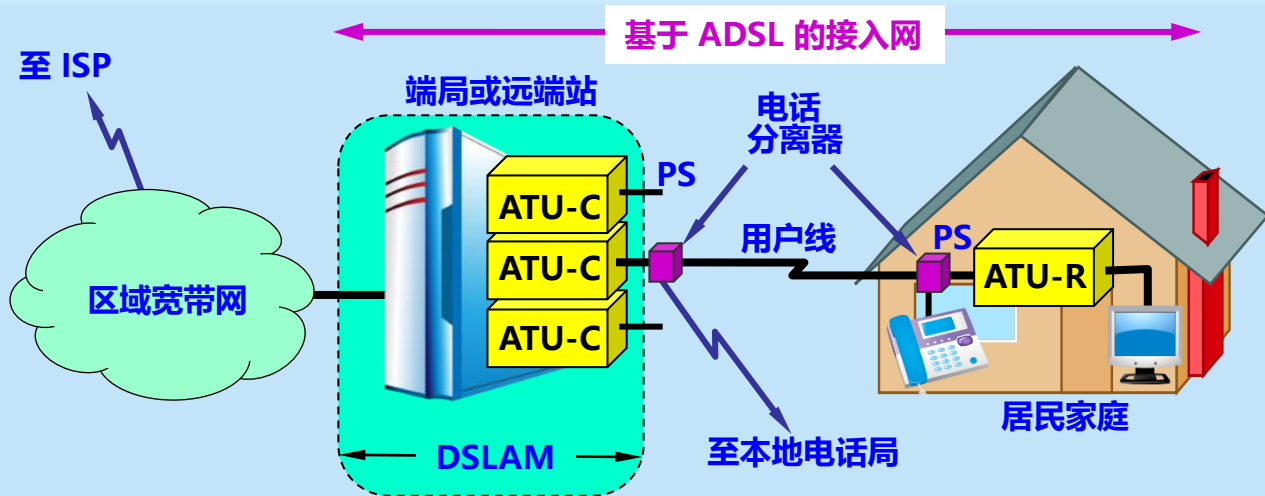


ADSL 的数据率

- 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 kbit/s 到 6.4 Mbit/s 之间，而上行数据率在 32 kbit/s 到 640 kbit/s 之间。

ADSL 的组成

基于ADSL的接入网的组成



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

ATU (Access Termination Unit) : 接入端接单元

ATU-C (C 代表端局 Central Office): ATU-R (R 代表远端 Remote)

PS (POTS Splitter) : 电话分离器



第二代 ADSL

- 包括 ADSL2 (G.992.3 和 G.992.4) 和 ADSL2+ (G.992.5) 。
- 通过提高调制效率得到了**更高的数据率**。
 1. ADSL2 要求至少应支持下行 8 Mbit/s、上行 800 kbit/s的速率。
 2. ADSL2+ 则将频谱范围从 1.1 MHz 扩展至 2.2 MHz，下行速率可达 16 Mbit/s（最大传输速率可达 25 Mbit/s），而上行速率可达 800 kbit/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网)

- HFC (Hybrid Fiber Coax) 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。
- HFC 网对 CATV 网进行了改造。



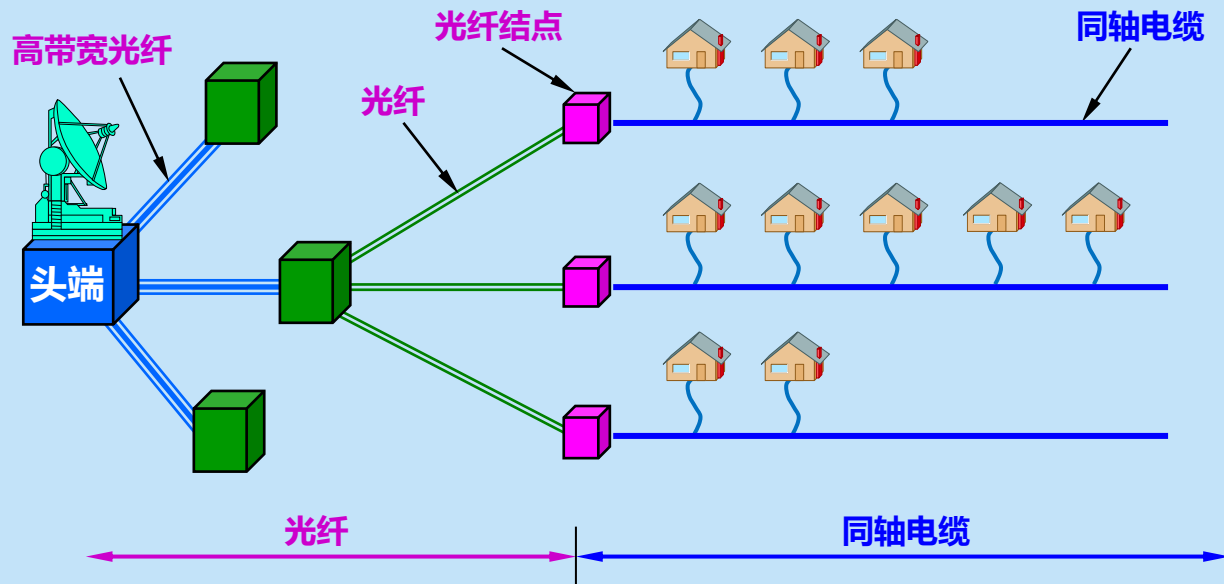
HFC 网的主干线路采用光纤

- HFC 网将原 CATV 网中的同轴电缆**主干部分改换为光纤**，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。



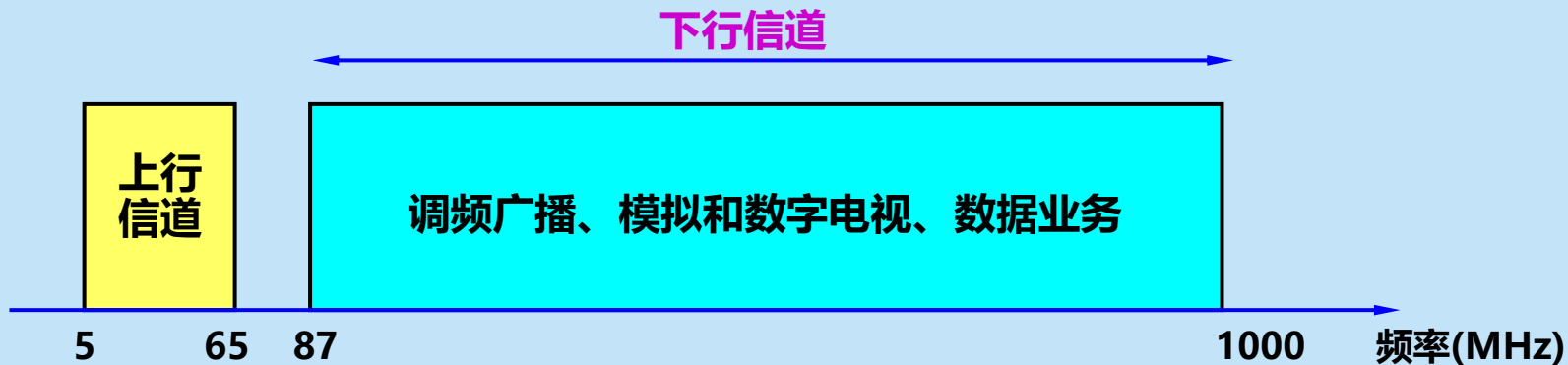
HFC 网采用结点体系结构

HFC 网的结构图





HFC 网具有双向传输功能，扩展了传输频带



我国的 HFC 网的频谱划分



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：
 1. 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。
 2. 使用双绞线连接到用户的电话机。
 3. 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。
 1. 下行速率一般在 3 ~ 10 Mbit/s 之间, 最高可达 30 Mbit/s。
 2. 上行速率一般为 0.2 ~ 2 Mbit/s, 最高可达 10 Mbit/s。
- 电缆调制解调器比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。



2.6.3 FTTx 技术

- FTTx 是一种实现宽带居民接入网的方案，代表多种宽带光纤接入方式。
- FTTx 表示 Fiber To The... (光纤到...)，例如：
 1. **光纤到户 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。
 2. **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。
 3. **光纤到路边 FTTC** (Fiber To The Curb): 光纤铺到路边，从路边到各用户可使用星形结构双绞线作为传输媒体。



无源光网络 PON (Passive Optical Network) 的组成

