

## § 2. 物理层

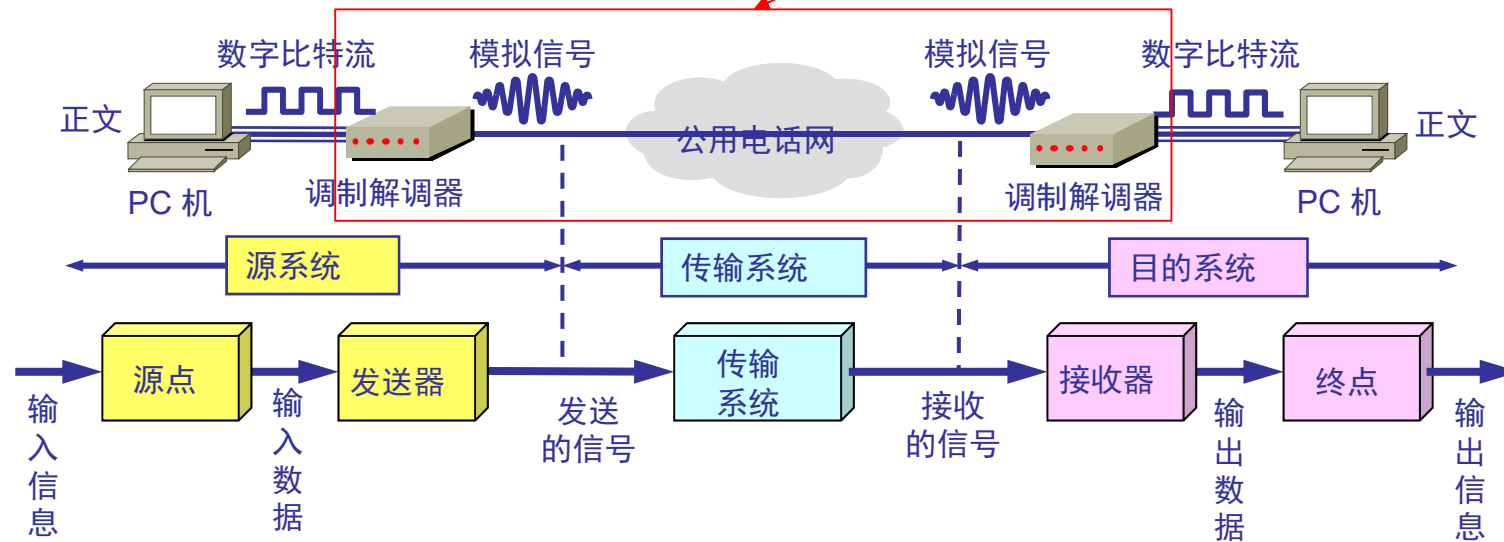
### 2.0. 物理层概述

#### 2.0.1. 物理层的主要任务

确定与传输媒体的接口的一些特性，包括：

- ★ 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表示何种意义
- ★ 规程特性：指明对于不同功能的各种可能事件的出现顺序

#### 2.0.2. 数据通信系统的模型



## § 2. 物理层

### 2.0. 物理层概述

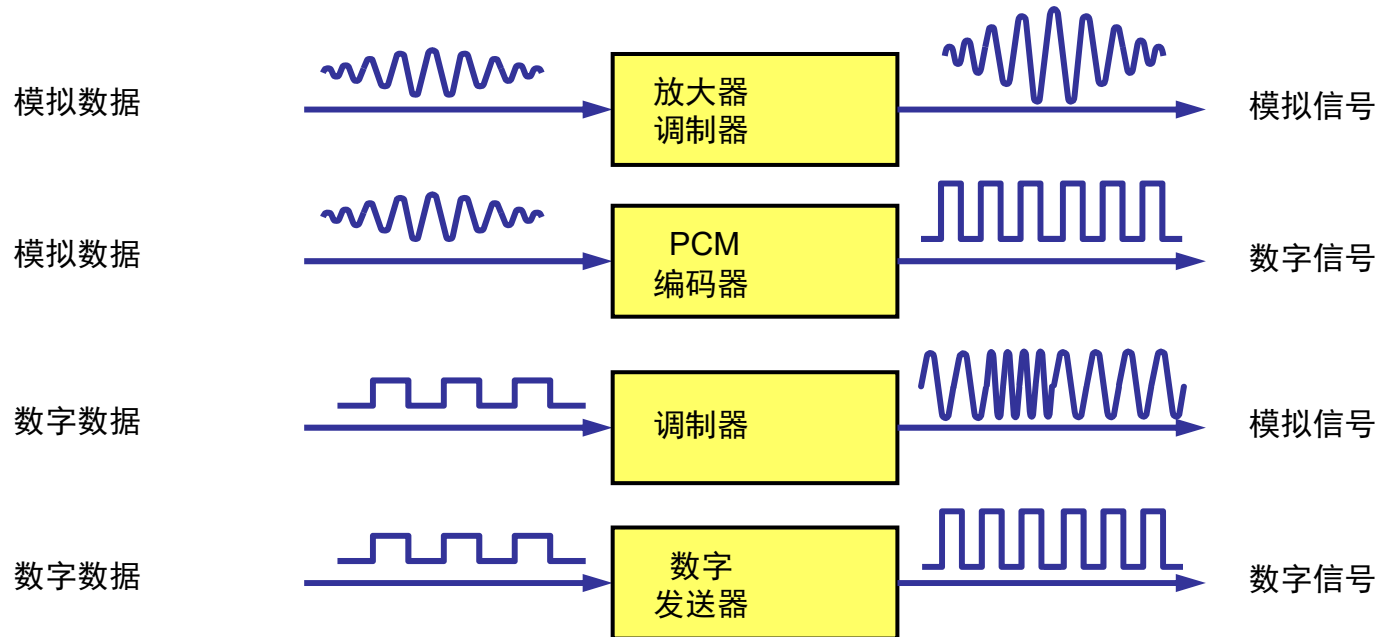
#### 2.0.3. 常见术语

- ★ 数据(data): 运送信息的实体
- ★ 信号(signal): 数据的电气的或电磁的表现
- ★ “模拟的”(analogous): 连续变化的
- ★ “数字的”(digital): 取值是离散数值
- ★ 调制: 把数字信号转换为模拟信号的过程。
- ★ 解调: 把模拟信号转换为数字信号的过程
- ★ 波特 (Baud): 传输速率的单位, 1 波特为每秒传送1个码元 (n个数字单元)
- ★ 波特率 (Baud Rate): 每秒传送码元的数量
  - 比特率(bit rate): 每秒传送bit的数量

## § 2. 物理层

### 2.0. 物理层概述

#### 2.0.4. 模拟与数字的数据、信号



#### 2.0.5. 通信的几个基本概念

- ★ 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

## § 2. 物理层

### 2. 1. 数据通信的理论基础

改变诸如电压或电流等某种物理特性的方法可用来在电线上传输信息

#### 2. 1. 1. 傅里叶分析

电压型或电流型脉冲可表示成周期T的函数g(t), g(t)的Fourier级数展开式为:

$$g(t) = \frac{1}{2} c + \sum_{n=1}^{\infty} a_n \sin(2\pi nft) + \sum_{n=1}^{\infty} b_n \cos(2\pi nft)$$

经计算可得,  $a_n = \frac{2}{T} \int_0^T g(t) \sin(2\pi ft) dt$  P. 70-71推导

$$b_n = \frac{2}{T} \int_0^T g(t) \cos(2\pi ft) dt$$

$$c = \frac{2}{T} \int_0^T g(t) dt$$

其中:  $f = 1/T$ 为基频,  $a_n$ 、 $b_n$ 分别是正弦和余弦函数的n次谐波的振幅,  
 $c$ 为直流分量

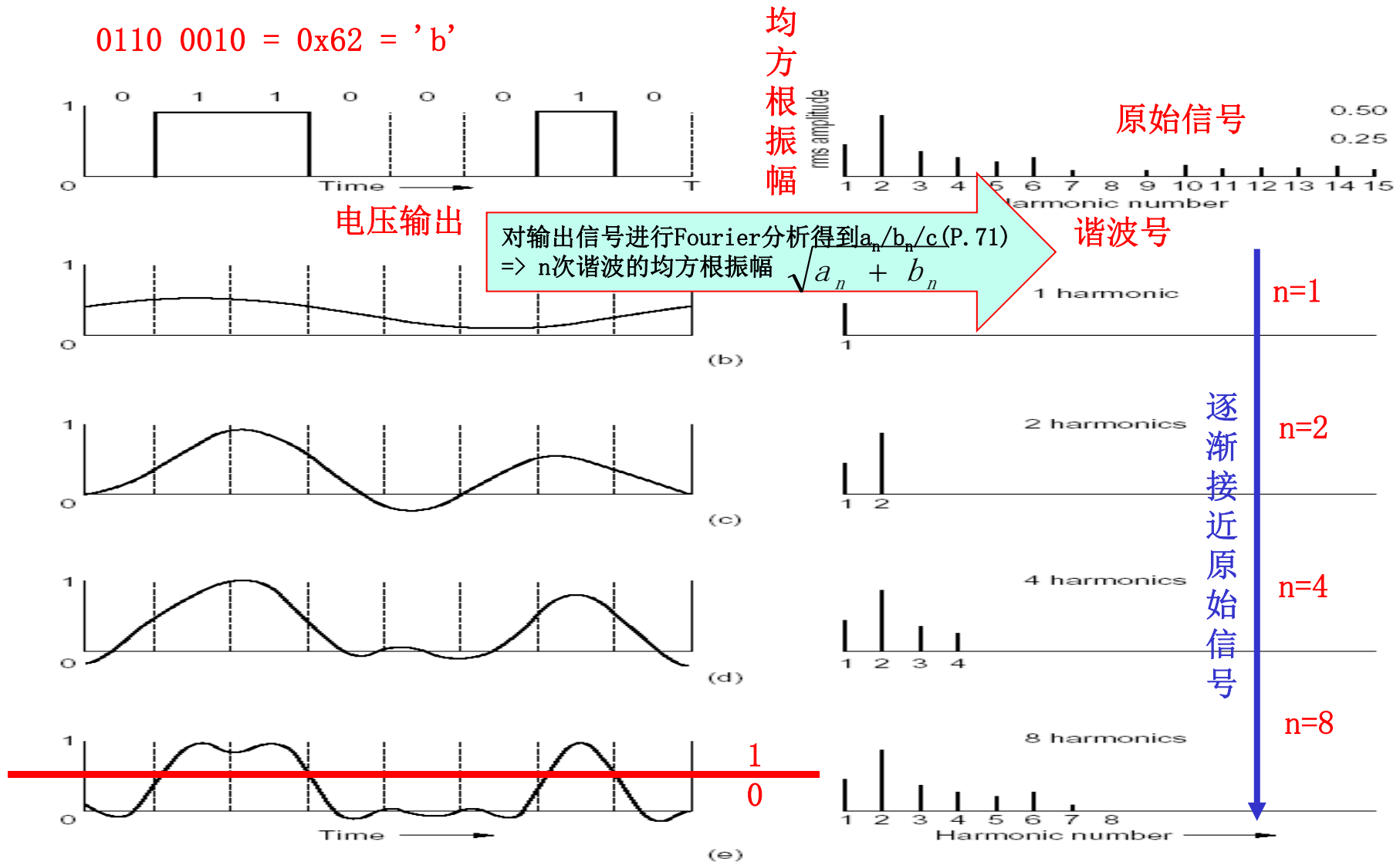
★ 体现了实际信道对不同频率信号有不同的影响

## § 2. 物理层

### 2. 1. 数据通信的理论基础

#### 2. 1. 2. 带宽有限的信号

0110 0010 = 0x62 = 'b'



## § 2. 物理层

### 2.1. 数据通信的理论基础

#### 2.1.2. 带宽有限的信号

★ 带宽(bandwidth): 在传输过程中振幅不会明显减弱的频率的宽度（信道频带的宽度），即指信道所能传输信号的频率的范围

★ 基带(baseband)信号和宽带(broadband)信号

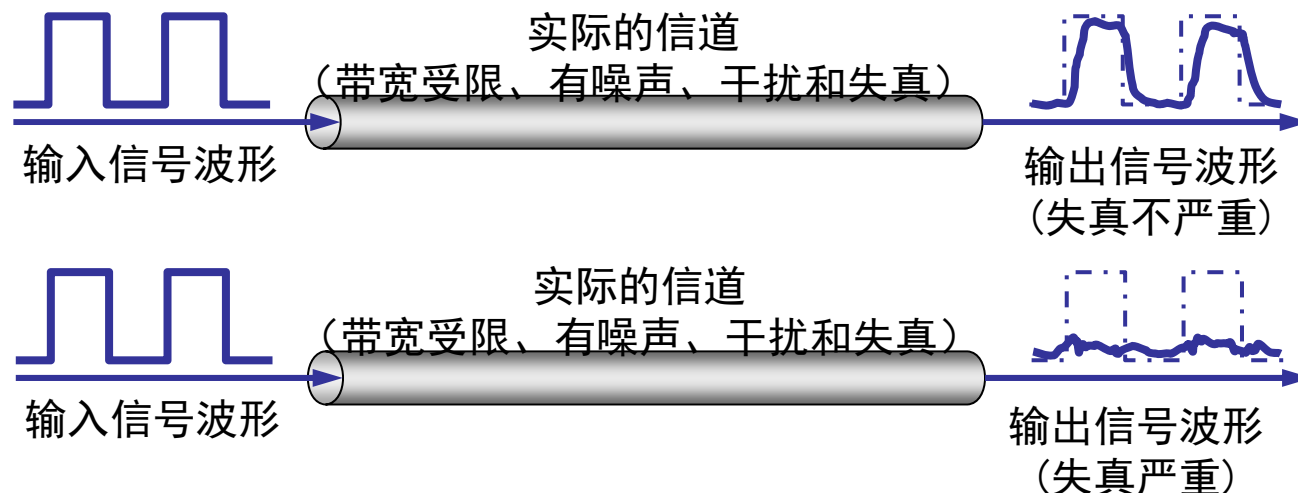
基带信号：将数字信号 1 或 0 直接用两种不同的电压来表示，然后送到线路上去传输

宽带信号：将基带信号进行调制后形成的频分复用模拟信号

#### 2.1.3. 信道的最大数据速率

★ 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

★ 传输速率越高，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



## § 2. 物理层

### 2.1. 数据通信的理论基础

#### 2.1.3. 信道的最大数据速率

尼奎斯特定理：如果一个任意信号通过一个带宽为B的低通滤波器，那么只要进行每秒 $2B$ 次采样，就可以完全重构出被过滤的信号，如果信号包含 $V$ 个离散等级，则最大数据速率

$$= 2B \log_2 V$$

★ 假设 $V=2^n$ ，则需要用  $n$ 个bit才能表示一个码元此时 **波特率 =  $n$ \*比特率**

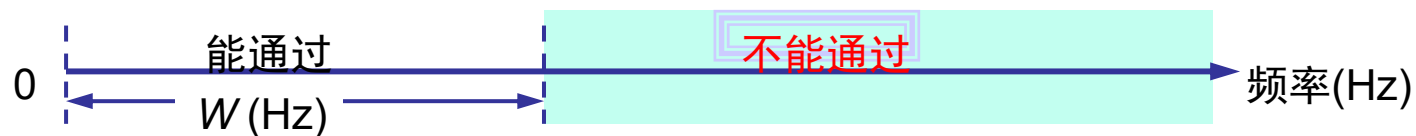
=> 当  $V=2$  时，1个bit表示1个码元 **波特率=比特率**

=> 二进制， $V=2$

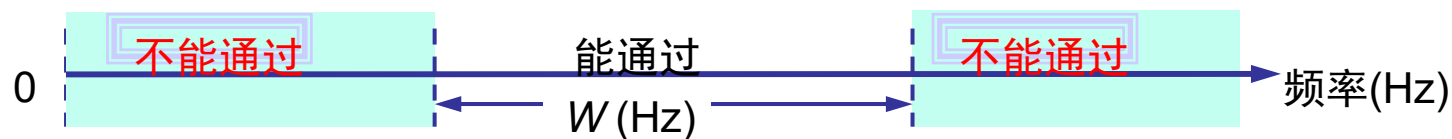
=> 最大数据速率 =  $2B$

例：3k Hz信号，Max = 6000 bps

尼奎斯特定理：（有限带宽的无噪声信道）



尼奎斯特定理的另一种理解：



## § 2. 物理层

### 2. 1. 数据通信的理论基础

#### 2. 1. 3. 信道的最大数据速率

香农公式：（有噪声的信道）

对一条带宽为  $B$  Hz，噪声比是  $S/N$  的有噪声信道，其传输的最大比特率  $= B \log_2(1+S/N)$

其中： $10 \log_{10} S/N$  的取值单位为分贝 (dB)

例： $40\text{dB} = 10 \times 4$

$\Rightarrow \log_{10} S/N = 4$

$\Rightarrow S/N = 10000$

例：假设ADSL带宽为  $1\text{M}$  Hz，理想条件下信噪比为 $40\text{dB}$

则：ADSL的最大速率  $= 1 \times \log_2(1+10000) = 13.28$  (Max =  $13\text{Mbps}$ )

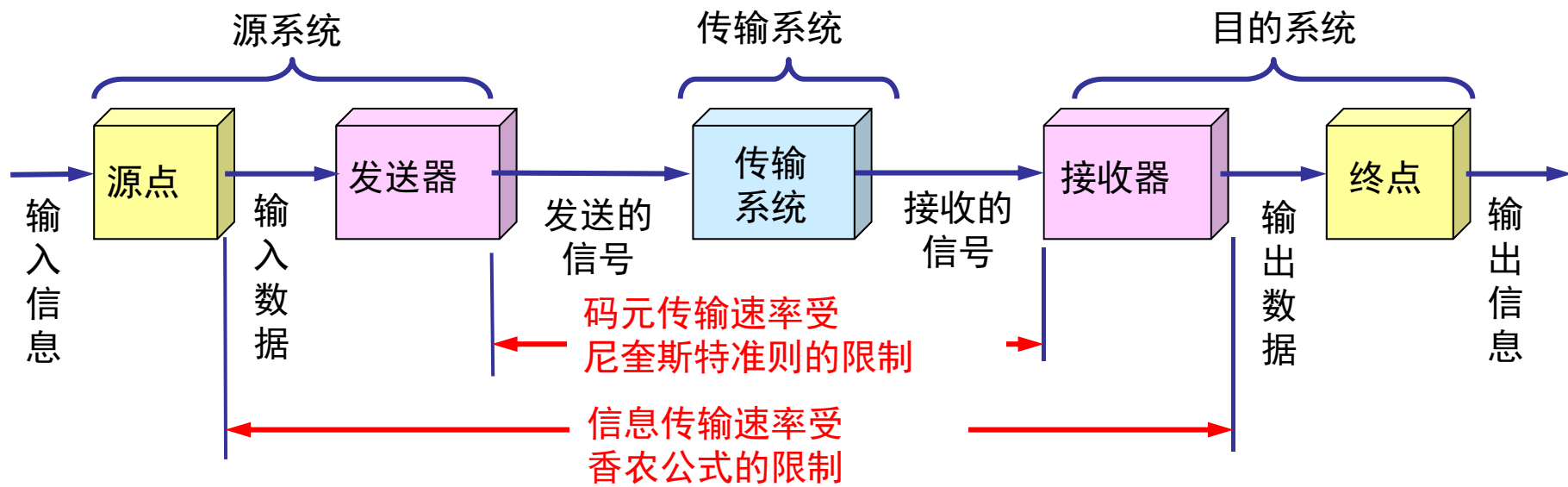
- ★ 香农公式推导了带宽受限且有高斯白噪声干扰(服从高斯分布)的信道的极限、无差错的信息传输速率
- ★ 信道的带宽或信道中的信噪比越大，则信息的极限传输速率就越高  
(理论上无上限，实际不可能)
- ★ 只要信息传输速率低于信道的极限信息传输速率，就一定可以找到某种办法来实现无差错的传输
- ★ 实际信道上能够达到的信息传输速率要比香农的极限传输速率低不少



## § 2. 物理层

### 2.1. 数据通信的理论基础

#### 2.1.3. 信道的最大数据速率



## § 2. 物理层

### 2.2. 引导性传输介质

★ 传输介质：通信网络中发送方和接收方之间的物理通路

- 有导向传输介质（有线介质）：在有导向传输介质中，电磁波被导向沿着固体媒体（铜线或光纤）传输。常用的有双绞线、同轴电缆和光纤三种
- 无导向传输介质（无线介质）：在非导向传输介质（就是指自由空间）中电磁波的传输通常称为无线传输，常用的有无线电、微波、红外线和激光等

#### 2.2.1. 光磁介质

不是通过网络传输，而是将数据放在光/磁介质中，再用人工传送的方式来传输数据  
(和网络无关)

# § 2. 物理层

## 2.2. 引导性传输介质

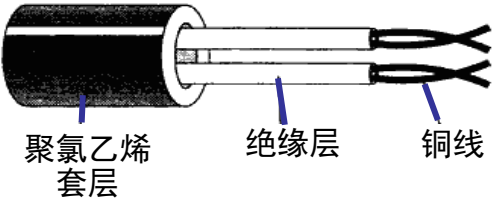
### 2.2.2. 双绞线

★ 按结构分类:

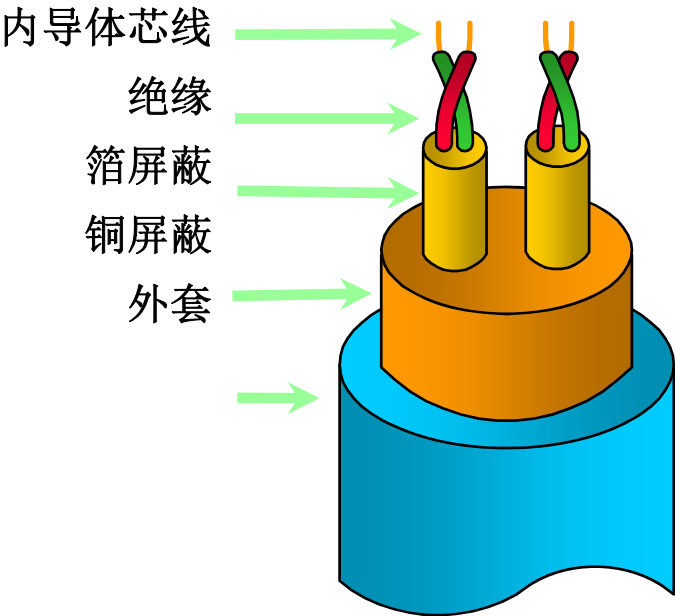
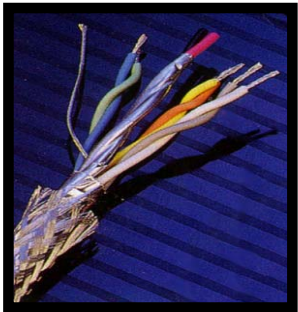
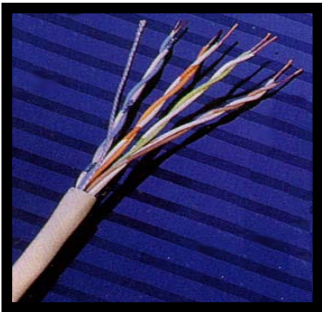
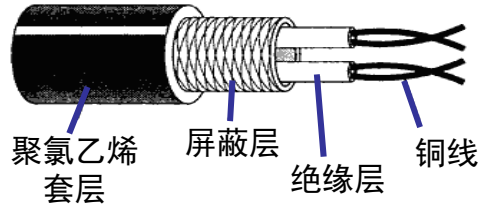
屏蔽双绞线 STP (Shielded Twisted Pair)

无屏蔽双绞线 UTP (Unshielded Twisted Pair)

无屏蔽双绞线 UTP



屏蔽双绞线 STP



类别	最大传输速度
1类	2M bps
2类	4M bps
3类	10M bps
4类	16M bps
5类	100M bps
超5类	250M bps
6类	1G bps
超6类	1G bps (比6类改善)
7类	10G bps

螺旋绞合的双导线,  $\Phi \approx 1\text{mm}$

每根4对、25对、1800对

典型连接距离100m (LAN)

RJ45插座、插头

特点:

- 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

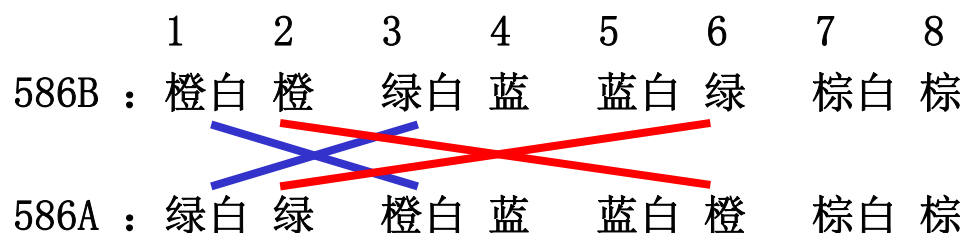
## § 2. 物理层

### 2.2. 引导性传输介质

#### 2.2.2. 双绞线

★ 常识：双绞线RJ45水晶头的制作线序

线序：将水晶头金属片面向自己，朝上，从左到右线序



- 两边都是586B，称为直连线，连接计算机与交换机、计算机与HUB(集线器)等(不同级设备)
- 一边586B，一边586A，称为交叉线，连接计算机与计算机、交换机与交换机等(同级设备)
- 一般不使用两边586A标准
- 现在交换机的端口一般都有自适应线缆功能，即交叉线、直连线均可连接同级/不同级设备

★ 常识：RJ45网络模块的制作线序

按不同模块的颜色指示，用卡线刀将线压入模块内

★ 常识：如何识别线缆类型并估算长度

## § 2. 物理层

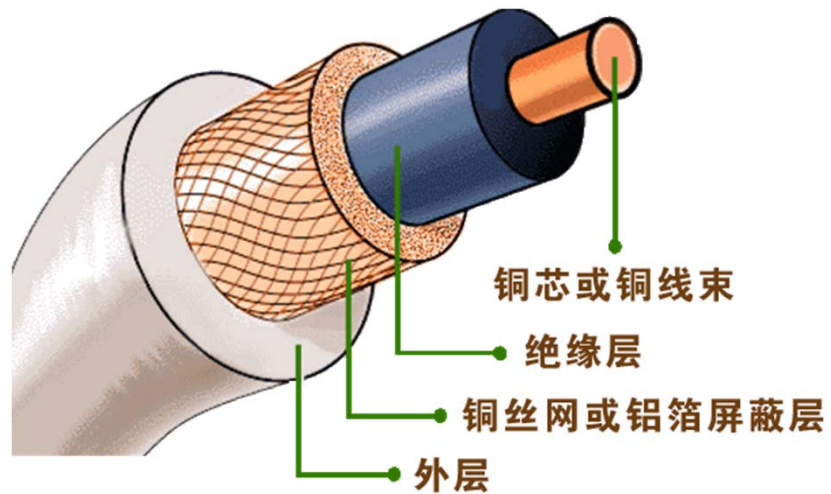
### 2.2. 引导性传输介质

#### 2.2.3. 同轴电缆

##### ★ 同轴电缆的种类

基带同轴电缆：一条电缆只用于一个信道，阻抗为 $50\Omega$ ，用于数字传输(计算机网络)

宽带同轴电缆：一条电缆可同时传输不同频率的多路模拟信号，阻抗为 $75\Omega$ ，用于模拟传输， $300\sim 450\text{MHz}$ ， $100\text{km}$ ，需要放大器。现主要用于CATV



## § 2. 物理层

### 2.2. 引导性传输介质

#### 2.2.4. 电力线

##### ★ 电力线通信 (PLC = Power Line Communication)

指利用电力线传输数据和媒体信号的一种通信方式。该技术是把载有信息的高频加载于电流，然后用电线传输接受信息的适配器再把高频从电流中分离出来并传送到计算机或电话以实现信息传递

##### ★ 电力猫 (PLC Modem)

全称为电力线通讯调制解调器，是通过电力线进行宽带上网的Modem的俗称，能通过普通家庭电力线传输网络IP数字信号

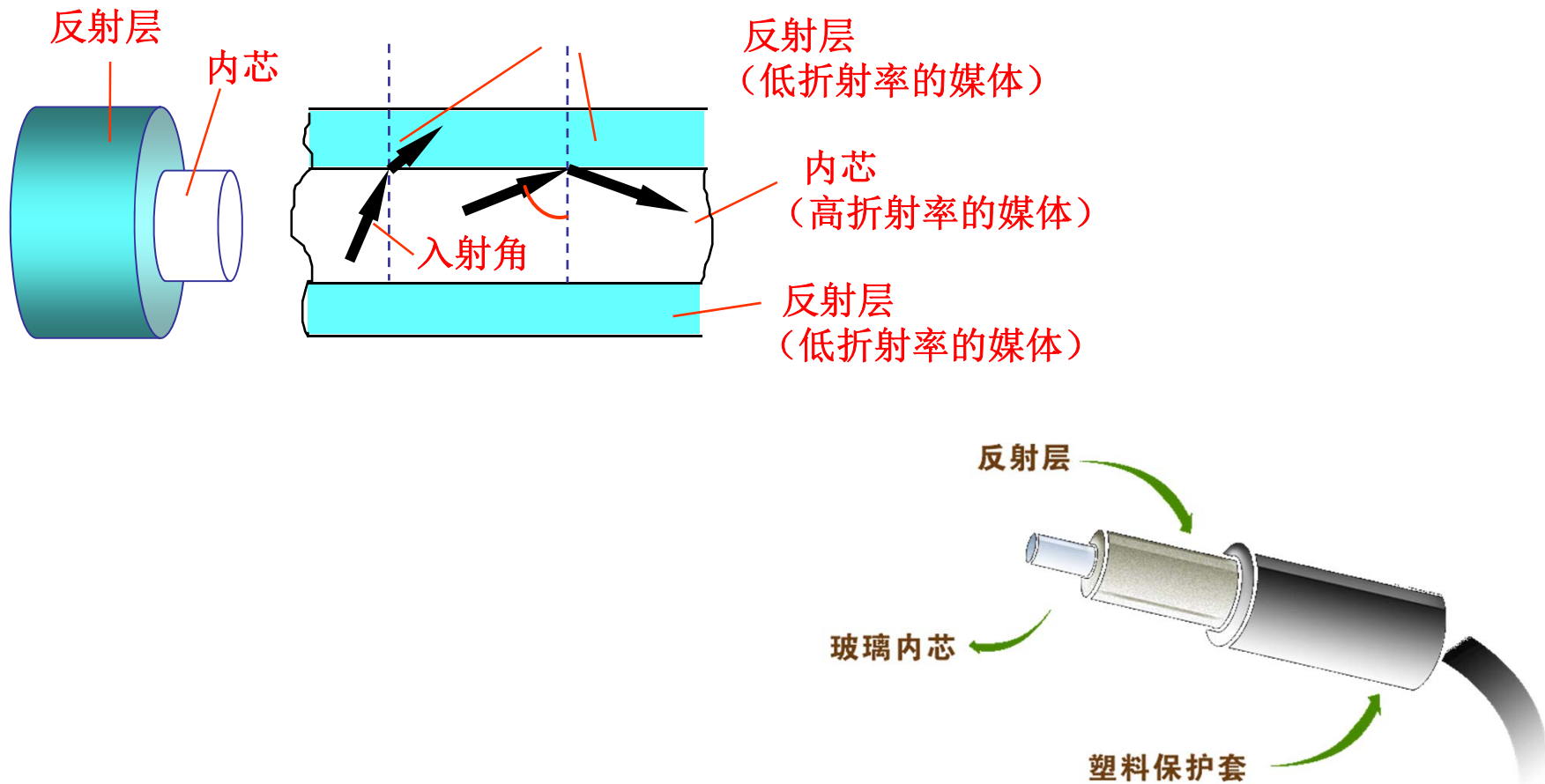
## § 2. 物理层

### 2.2. 引导性传输介质

#### 2.2.5. 光纤

##### ★ 光线在光纤中的折射

光从一种媒体入射到另一种媒体时会产生折射。折射量取决于两种媒体的折射率。  
当入射角 $\geq$ 临界值时产生全反射，不会泄漏



## § 2. 物理层

### 2.2. 引导性传输介质

#### 2.2.5. 光纤

##### ★ 描述光纤尺寸的参数

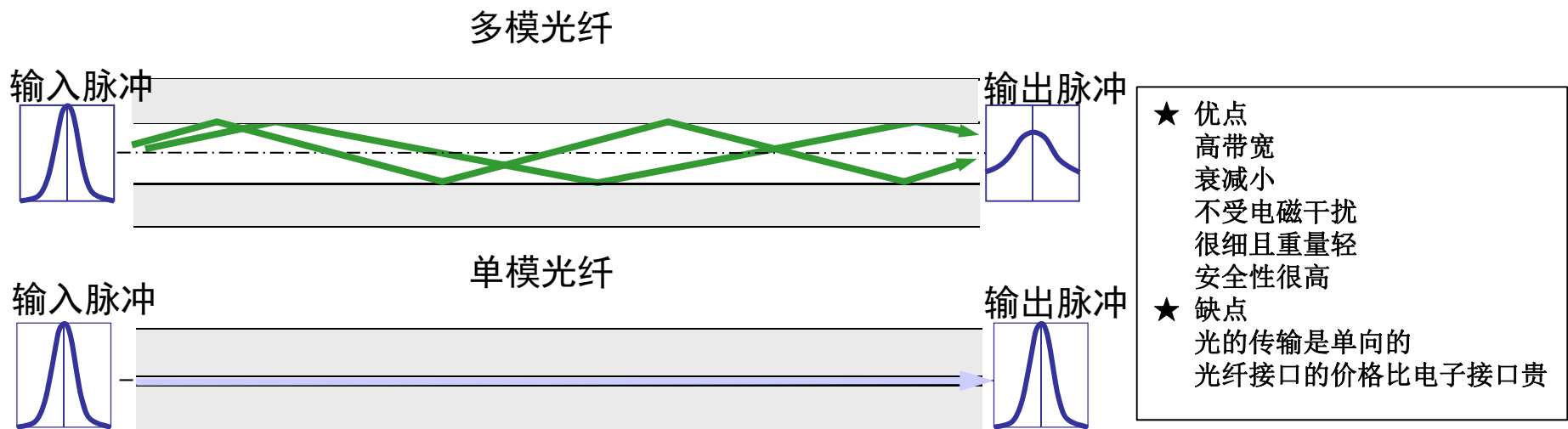
内芯直径和反射层直径，其度量单位都为微米( $10^{-6}$ )

- 最细的光纤其内芯直径通常只有 $5\sim 10\text{ }\mu\text{m}$ ，粗一些的光纤其内芯直径为 $50\sim 100\text{ }\mu\text{m}$ 。
- 局域网中最常用的光纤是 $62.5\text{ }\mu\text{m}/125\text{ }\mu\text{m}$ 的光纤，其中62.5是内芯直径，而125是反射层的直径

##### ★ 单模光纤 (SMF) 与多模光纤 (MMF)

SMF: 单束光线沿直线传播，光纤直径与光波波长相等，在无中继条件下，传播距离可达几十km，采用激光作为光源

MMF: 多束光线以不同的反射角传播，在无中继条件下，传播距离可达几km，采用LED或激光作为光源

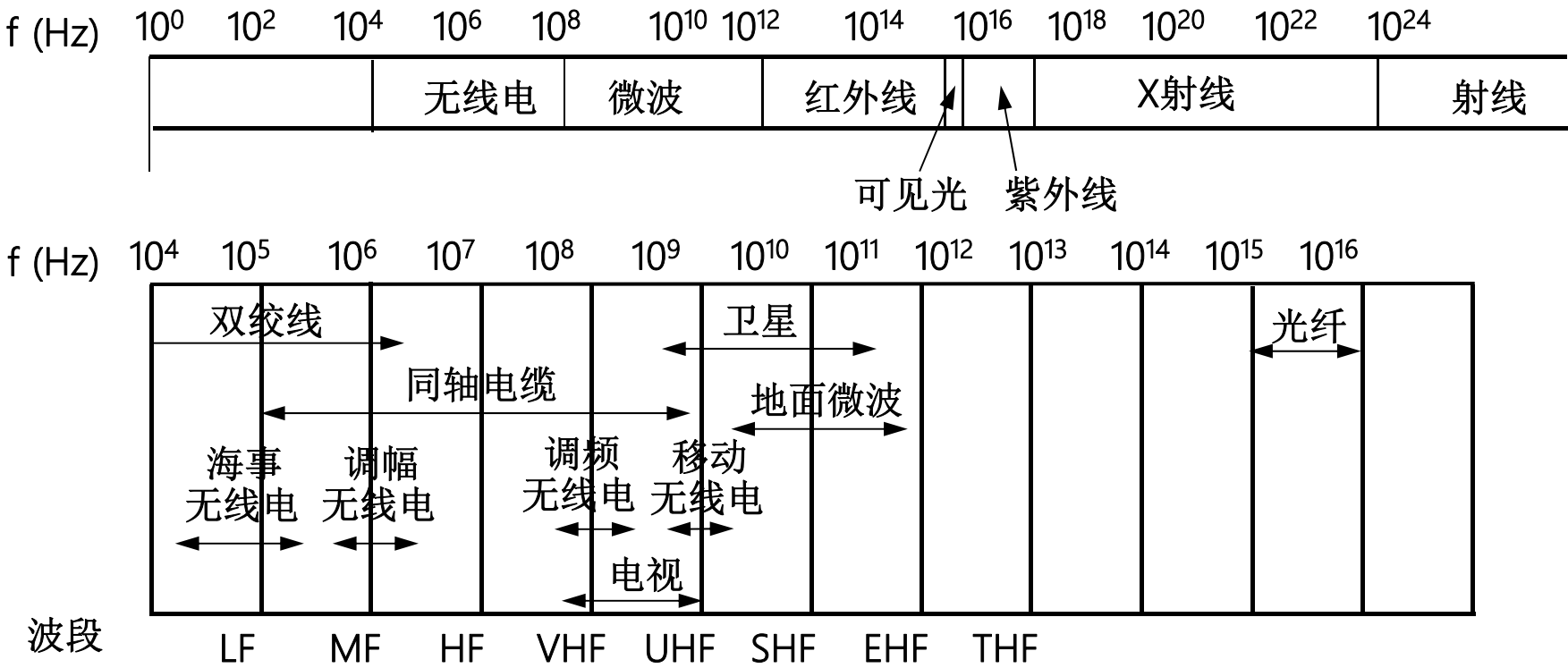




# § 2. 物理层

## 2.3. 无线传输

### 2.3.1. 电磁频谱



## § 2. 物理层

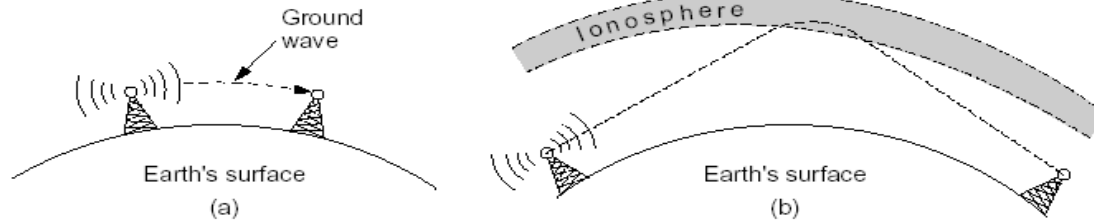
### 2.3. 无线传输

#### 2.3.2. 无线电传输

★ 无线电具有容易产生、传播很远、穿透力强、全方向传播等特点

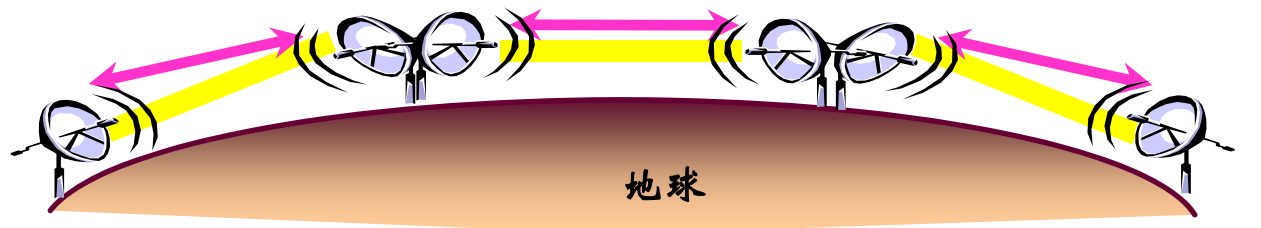
★ 无线电波的特性与频率有关

VLF、LF、MF沿地面传播，HF、VHF受电离层反射



#### 2.3.3. 微波传输

微波具有直线传输、穿透性不强（大气条件和固体物将妨碍微波的传播）等特点，常用于地面通信



地面站之间的直视线

微波传送塔

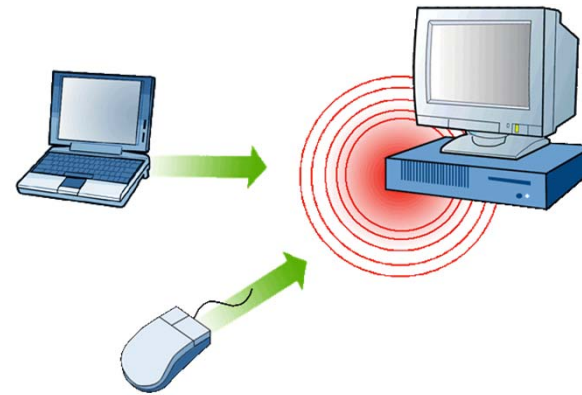
两个地面站之间传送的距离：50 ~ 100 km

## § 2. 物理层

### 2.3. 无线传输

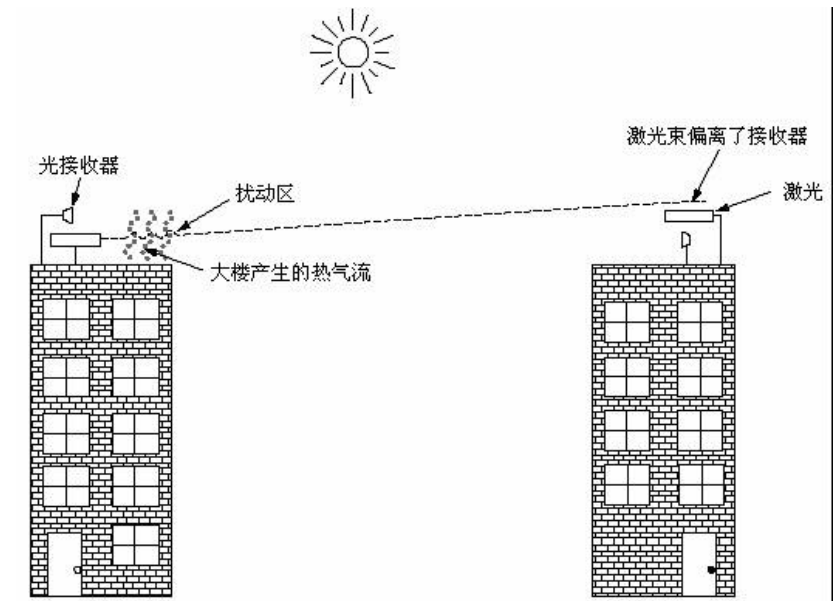
#### 2.3.4. 红外传输

红外线具有相对有方向性、便宜且容易制造，但无法穿透坚实的物体等特点，常用于短距离通信，例如：家电的遥控、室内无线网等



#### 2.3.5. 光通信

激光具有方向性好、成本低、安装容易、高带宽、无需授权，但不能穿透雨或浓雾等特点，常用于地面通信



## § 2. 物理层

### 2.4. 通信卫星

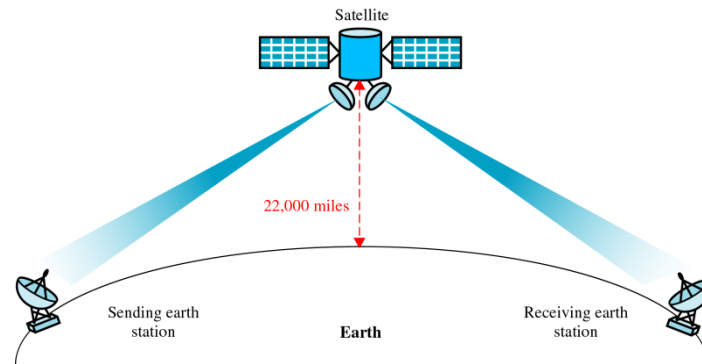
卫星通信就是利用位于人造地球卫星作为太空无人值守的微波中继站的一种特殊形式的微波接力通信。卫星通信可以克服地面微波通信的距离限制，其最大特点就是通信距离远，且通信费用与通信距离无关

★ 优点：卫星通信的频带比微波接力通信更宽，通信容量更大，信号所受到的干扰也较小，误码率也较小，通信比较稳定可靠

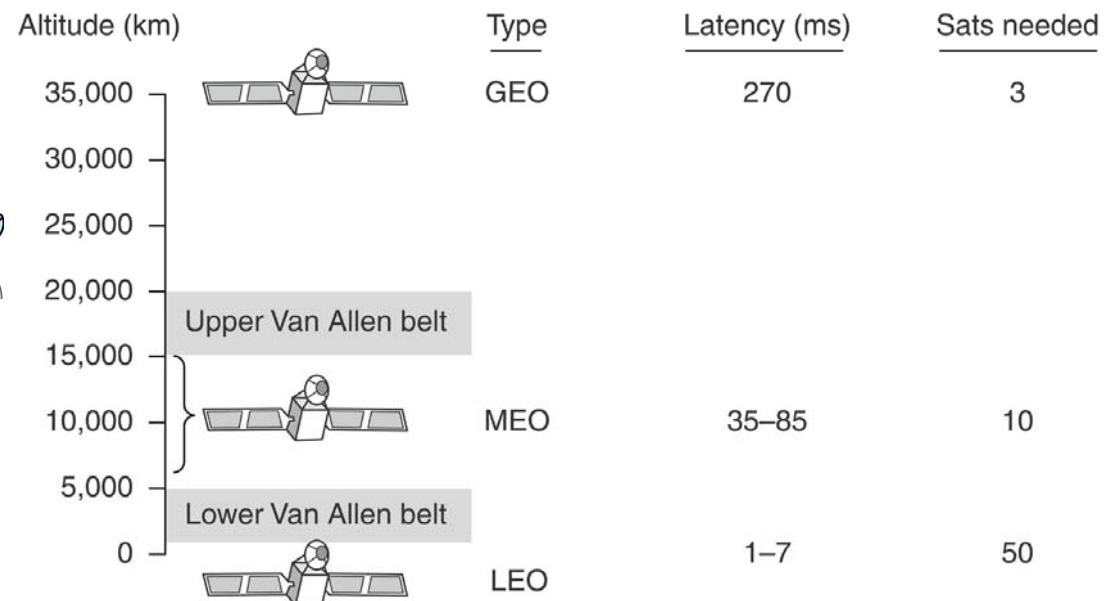
★ 缺点：传播时延较长

★ 范艾伦辐射带：受地球磁场影响的一些高带电粒子层，飞进该辐射带中的卫星会很快损毁

★ 卫星的通信原理



★ 通信卫星的分类

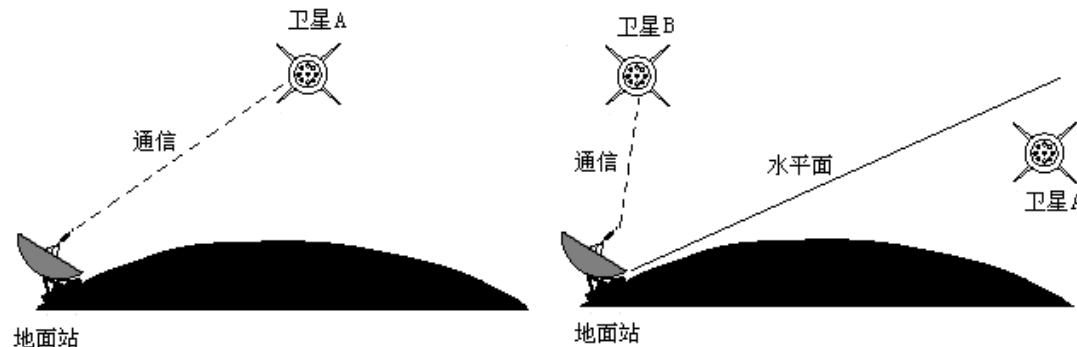
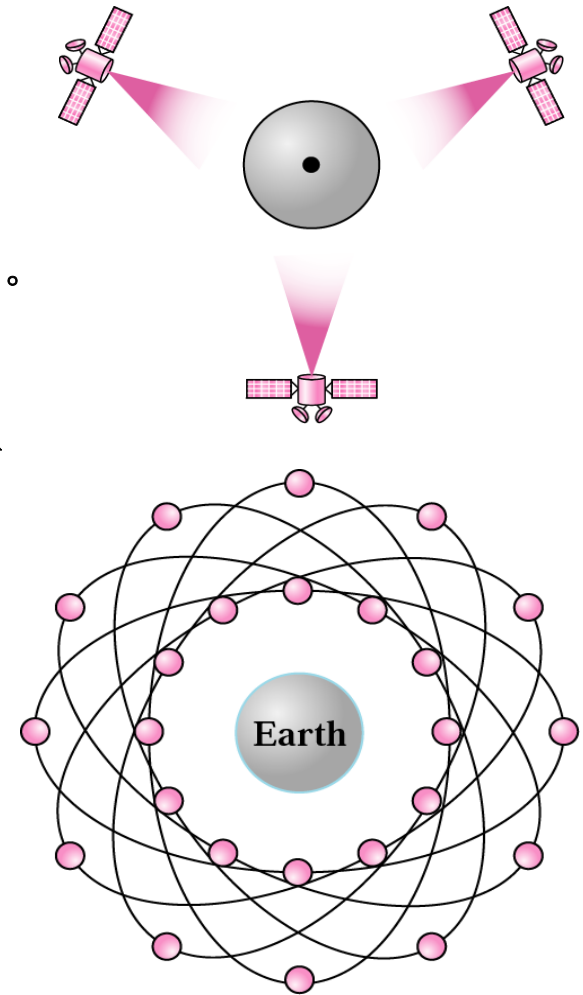


## § 2. 物理层

### 2.4. 通信卫星

#### ★ 通信卫星的分类

- 地球同步卫星 (GEO): 位于赤道上方35800km处, 卫星的周期是24小时, 与地球的自转速率是相同的, 从地球上它是静止的。  
三颗GEO就可以覆盖整个地球表面 (部分南北极地区除外)
- 中轨道卫星 (MEO): 轨道位于两个Van Allen带之间, 从地球上看到它在缓慢地移动(6小时)  
例: ICO (中高度圆形轨道) 电话系统  
GPS (全球定位系统) 卫星
- 低轨道卫星 (LEO): 轨道较低, 从地球上看到卫星移动较快(1.5小时), 构成一个完整的通信系统所需卫星数目较多 (一颗卫星超出视野时, 另一颗可以代替它), 但卫星所需能量小, 通信时间短



## § 2. 物理层

### 2.4. 通信卫星

#### ● LE0 - 铱 (Iridium) 计划

高750km的圆形极地轨道，6条轨道串行覆盖地球

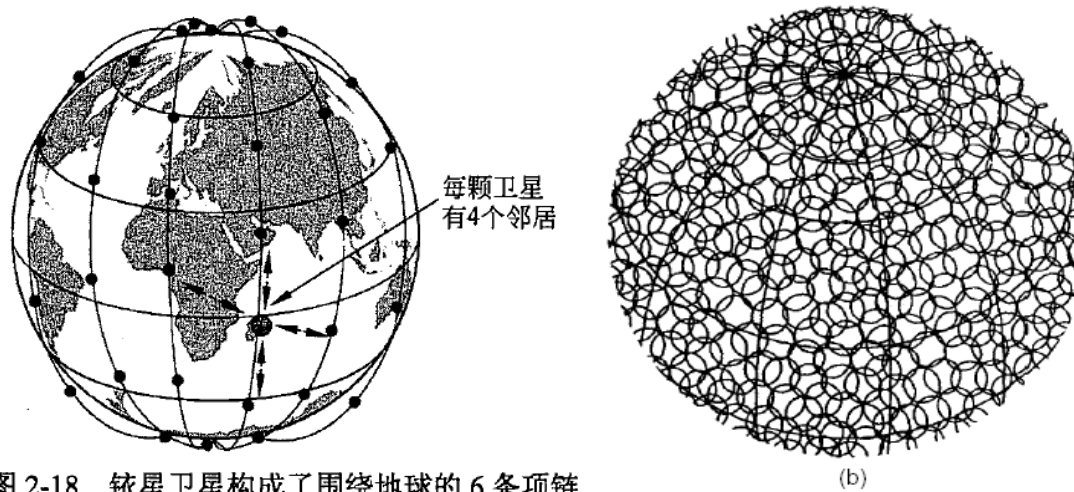


图 2-18 铱星卫星构成了围绕地球的 6 条项链

#### ● LE0 - 全球星 (Globalstar)

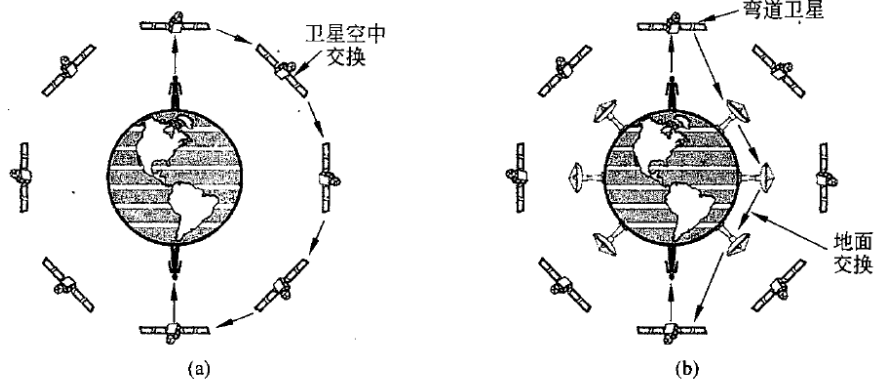


图 2-19  
(a) 空中中继; (b) 地面中继

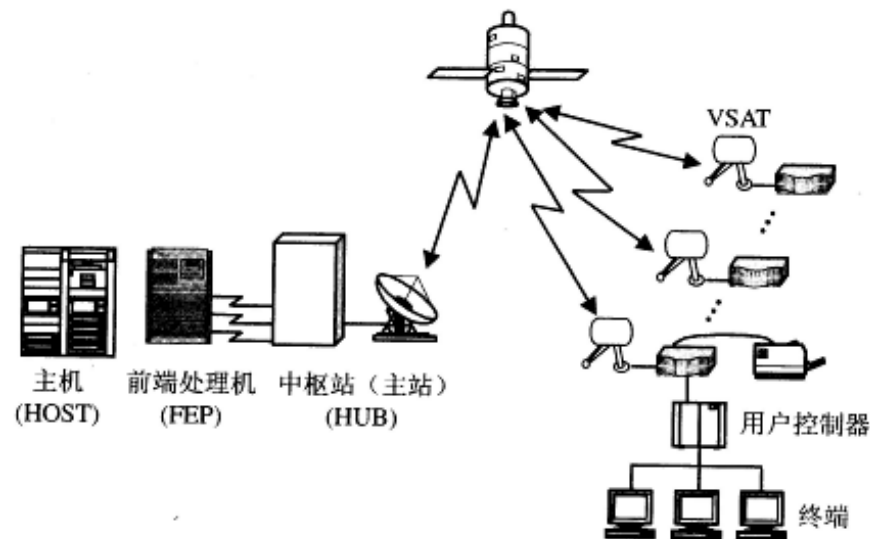
## § 2. 物理层

### 2.4. 通信卫星

#### ★ VSAT (Very Small Aperture Terminal)

甚小口径地球终端，是20世纪80年代末发展起来并于90年代得到广泛应用的新一代数字卫星通信系统。VSAT网通常由一个卫星转发器、一个大型主站和大量的VSAT小站组成，能单/双向传输数据、语音、图像、视频等多媒体综合业务

- 优点：其特点是天线直径很小(0.3-2.4米)，设备结构紧凑、固体化、智能化、价格低、安装方便、对使用环境要求不高，且不受地面网络的限制，组网灵活
- 有两种类型，一种是双向VSAT系统，它由中心站控制许多VSAT终端来提供数据传输、语音和传真等业务；另一种是单向VSAT系统，在这种系统中，图像和数据等信号从中心站传输到单收VSAT终端



#### ★ VSAT的组成

中心站 (Hub)：与普通地球站一样，使用大型天线，天线直径一般约为3.5m~8m (Ku波段) 或7m~13m (C波段)

VSAT小站：由小口径天线、室外单元 (ODU) 和室内单元 (IDU) 组成。可以方便地架设在办公地点，口径为1m或更小

卫星转发器：一般采用工作于C或Ku波段的同步卫星透明转发器 (bent-pipe)

## § 2. 物理层

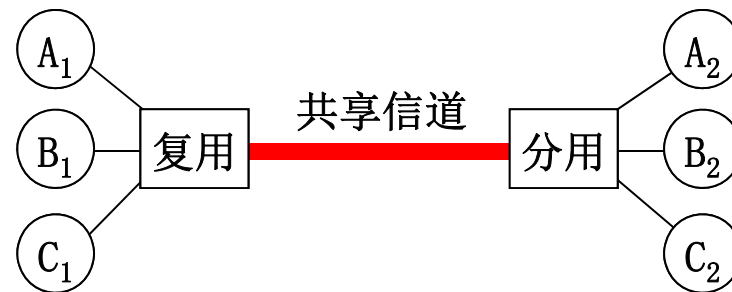
### 2.5. 数字调制与多路复用

#### 2.5.0. 几个名词

- ★ 数字调制 (digital modulation) : 数字量(bit)与代表它的模拟量信号之间的转换过程称为数字调制
- ★ 基带传输 (baseband transmission) : 信号的传输占有传输介质上从0-Max间的全部频率, 最大频率取决于信令速率 (有线)
- ★ 通带传输 (passband transmission) : 信号占据以载波信号频率为中心的一段频带 (无线、光纤)
- ★ 多路复用技术 (multiplexing) : 一个信道被多个信号所共享



(a) 不使用复用技术



(b) 使用复用技术

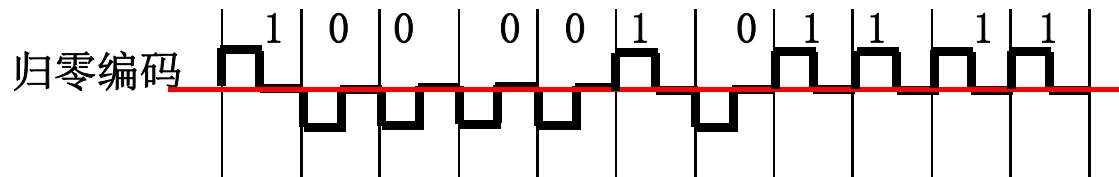


## § 2. 物理层

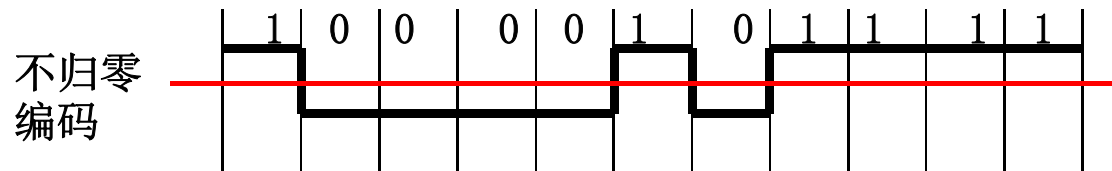
### 2.5. 数字调制与多路复用

#### 2.5.1. 基带传输

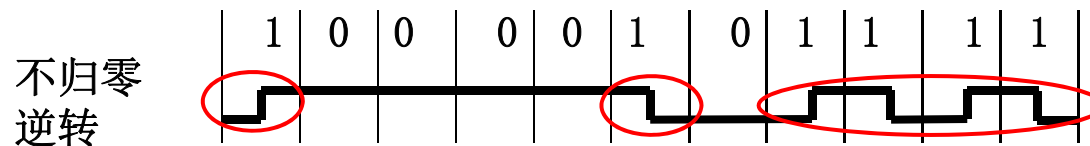
##### ★ 几种常见的线性编码方式



- 归零编码 (RZ=Return-to-Zero): 正电压表示1, 负电压表示0, 每传完1bit, 电压归0 (有正、负、零三种电压出现, 表示复杂, 大部分带宽用于归零)



- 不归零编码 (NRZ = Non-Return-to-Zero):  
在每个bit时间内, 用正电压表示1, 负电压表示0 (光纤: 有光线/无光线)



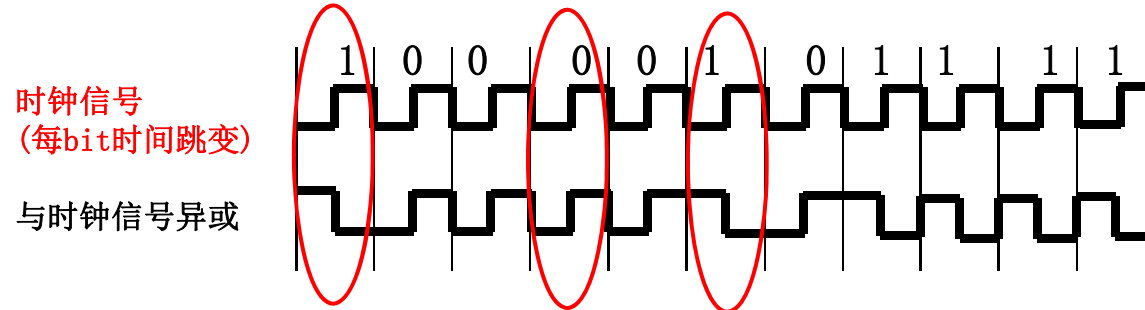
- 不归零逆转 (NRZI = Non-Return-to-Zero Inverted):  
电压一次跳变表示1, 不变表示0

## § 2. 物理层

### 2.5. 数字调制与多路复用

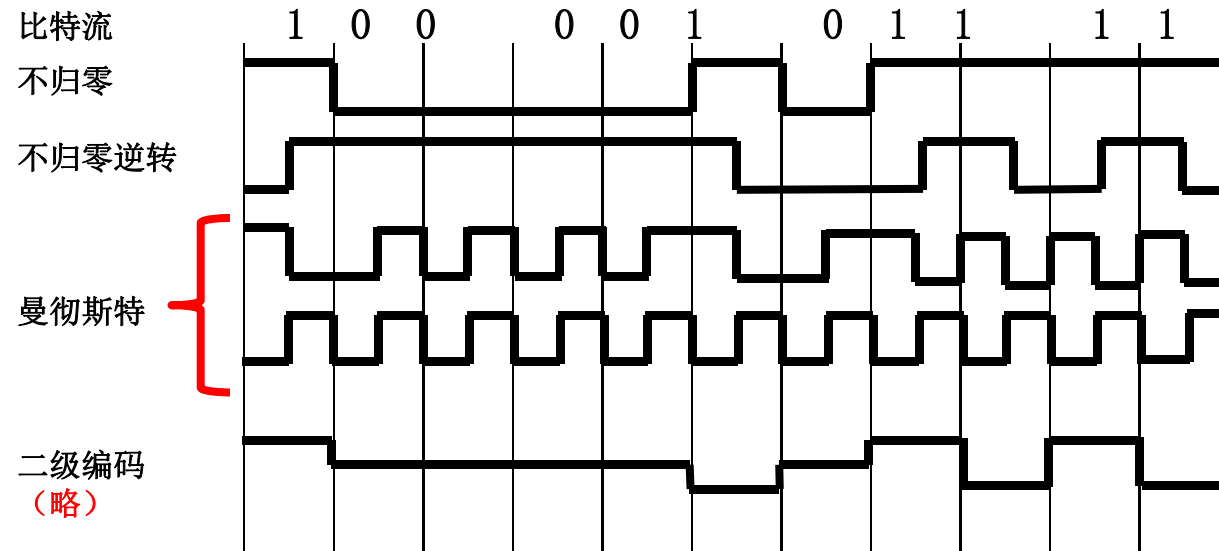
#### 2.5.1. 基带传输

##### ★ 几种常见的线性编码方式



- 曼彻斯特编码：时钟每bit时间跳变一次，数据信号和时钟信号异或后混在一起，  
从低→高：表示0      高→低：表示1

##### ★ P. 98 图2-20有错位



## § 2. 物理层

### 2.5. 数字调制与多路复用

#### 2.5.2. 通带传输

##### ★ 基带传输的缺点

- 0~Max的频率传输在实际应用中不现实(特别是无线, 波长与天线大小成比例)
- 无法一次传输多个信号, 线路利用率低

##### ★ 数字调制: 对通带内的载波信号进行波形变换(频谱变换)

##### ★ 调制解调器(Modem): (以标准二线模拟电话线路为例)

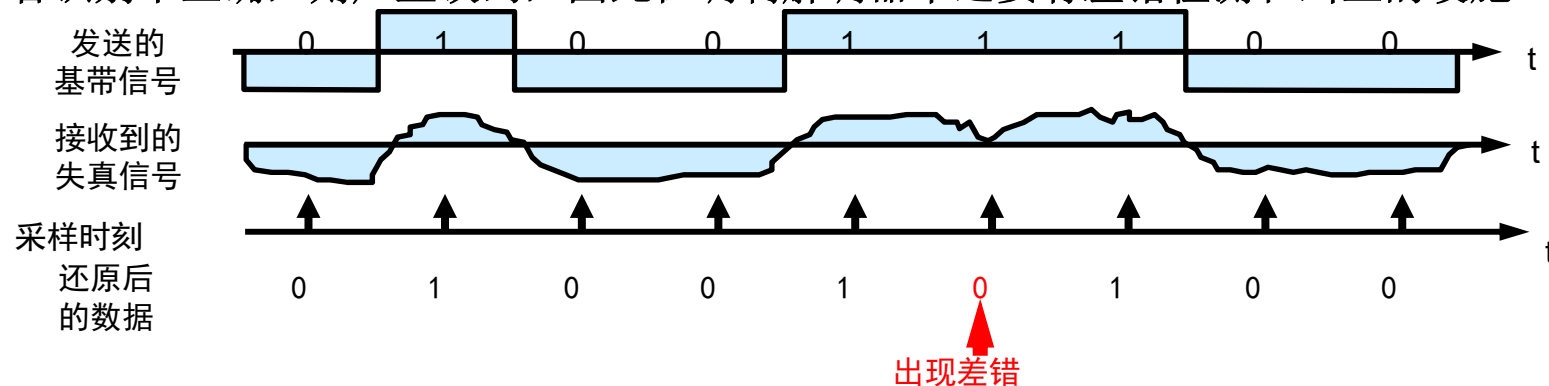
- 调制器(MOduлятор): 把要发送的数字信号转换为频率范围在 300~3400 Hz 之间的模拟信号, 以便在电话用户线上传送

调制器的主要作用就是波形变换, 它把基带数字信号的波形变换成适合于模拟信道传输的波形

- 解调器(DEMulator): 把电话用户线上传送来的模拟信号转换为数字信号

解调器的主要作用就是波形识别, 它将经过调制器变换过的模拟信号恢复成原来的数字信号

- 若识别不正确, 则产生误码, 因此在调制解调器中还要有差错检测和纠正的设施



## § 2. 物理层

### 2.5. 数字调制与多路复用

#### 2.5.2. 通带传输

##### ★ 最基本的二元制调制方法

调幅(AM)：载波的振幅随基带数字信号而变化

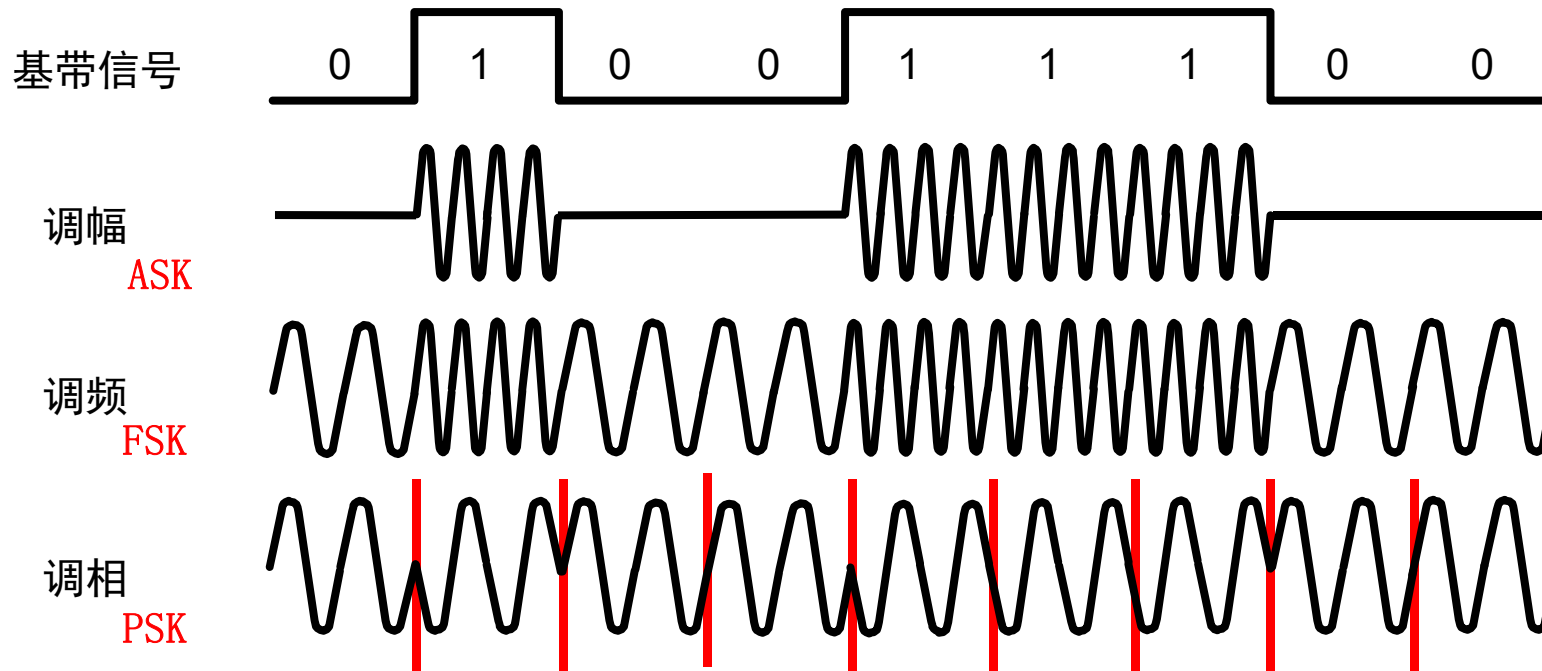
调频(FM)：载波的频率随基带数字信号而变化

调相(PM)：载波的初始相位随基带数字信号而变化

ASK=Amplitude Shift Keying

FSK=Frequency Shift Keying

PSK=Phase Shift Keying



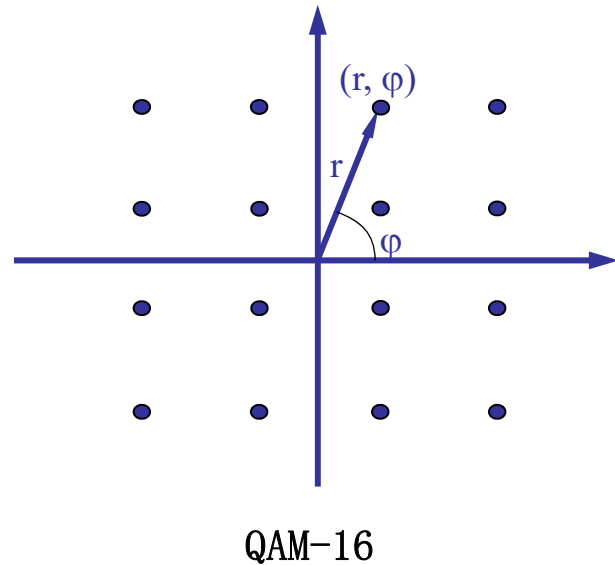
说明：图示只是两种状态的表示，如果需要同时表示多种状态，则可以增加更多等级

## § 2. 物理层

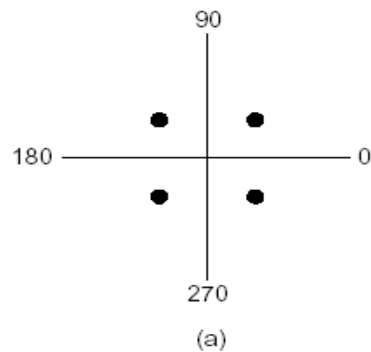
### 2.5. 数字调制与多路复用

#### 2.5.2. 通带传输

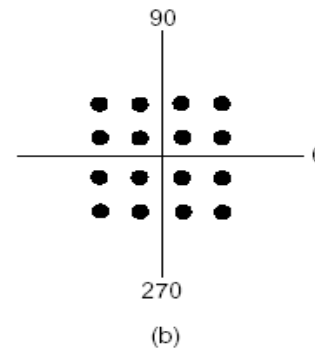
#### ★ 正交振幅调制 QAM(Quadrature Amplitude Modulation)



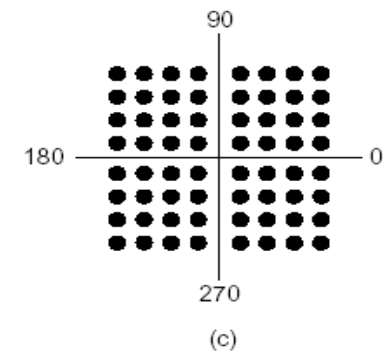
- 供选择的相位有 12 种，每一种相位有 1 或 2 种振幅可供选择
- 由于 4 bit 编码共有 16 种不同的组合，因此这 16 个点中的每个点可对应于一种 4bit 的编码
- 每个码元可表示的比特数越多，则接收端进行解调时要正确识别每一种状态就越困难



2bit



4bit



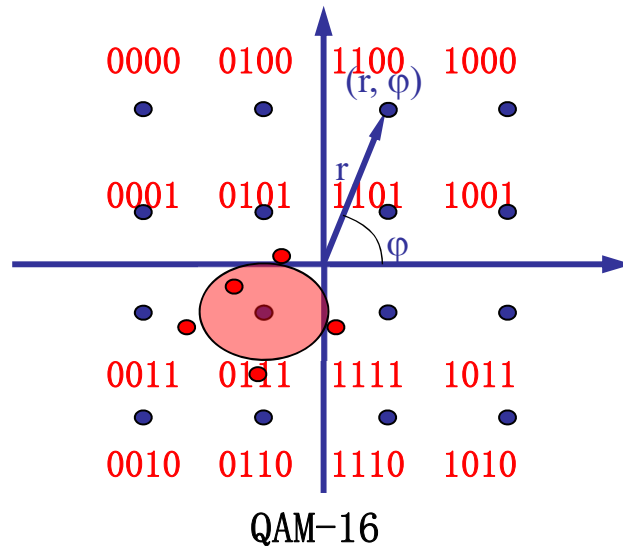
6bit

## § 2. 物理层

### 2.5. 数字调制与多路复用

#### 2.5.2. 通带传输

#### ★ 正交振幅调制 QAM(Quadrature Amplitude Modulation)



- 格雷码 (以QAM-16为例)  
在一组数的编码中, 任意两个相邻的代码只有1个bit的二进制位不同

落在圆圈内 : 0111 (正确值)

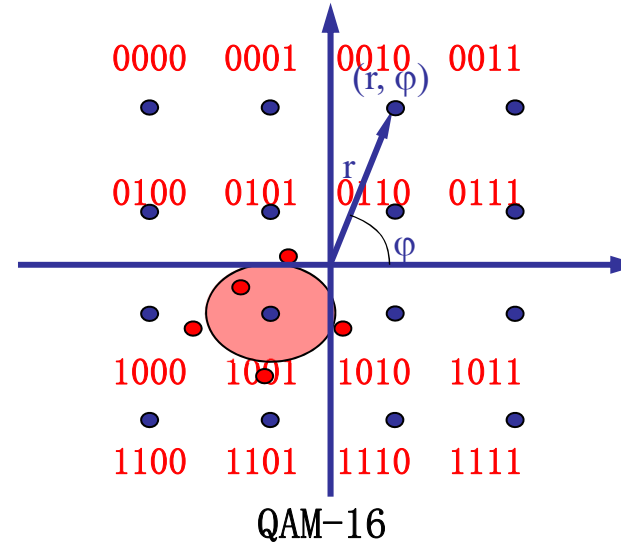
图示上方偏移: 0101

下 : 0110

左 : 0011

右: : 1111

=> 如果接收时信号出错, 只错1bit位



例: 非格雷码(假设按顺序排列)

落在圆圈内 : 1001 (正确值)

图示上方偏移: 0101 (2bit)

下 : 1101 (1bit)

左 : 1000 (1bit)

右: : 1010 (2bit)

=> 如果接收时信号出错, 会错多bit位

## § 2. 物理层

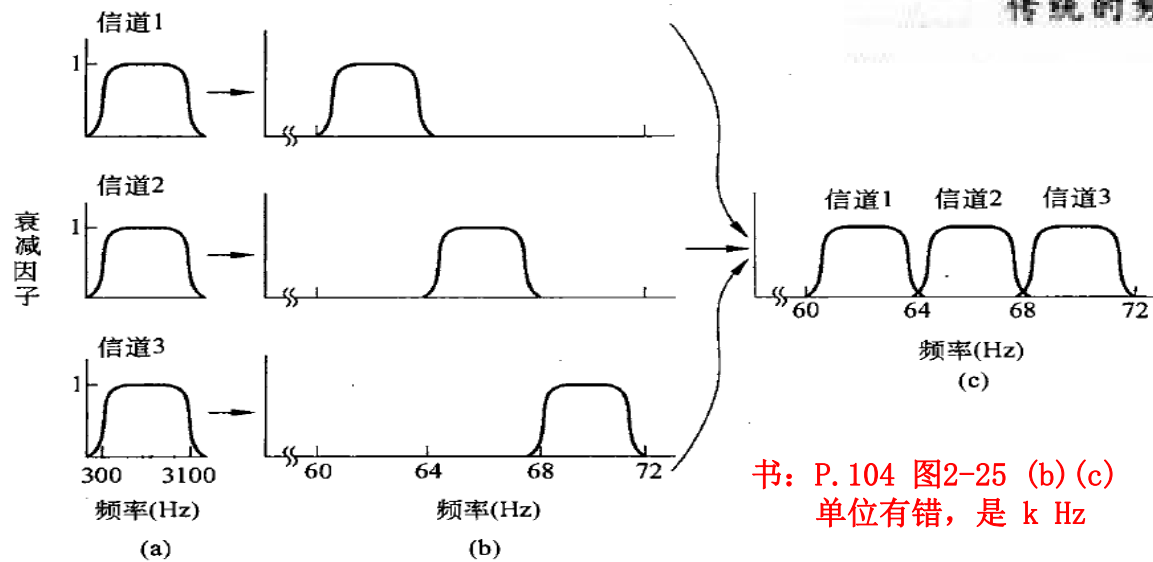
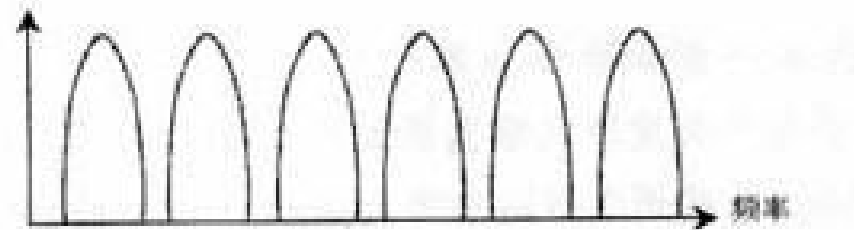
### 2.5. 数字调制与多路复用

#### 2.5.3. 频分复用

#### ★ 频分复用 (FDM = Frequency Division Multiplexing)

将频带分成若干逻辑子信道，用户在分配到一定的频带后，在通信过程中始终都占用这个频带

- 同样的时间占用不同的频率带宽资源
- 每个信源占用一个子信道



书: P. 104 图2-25 (b) (c)  
单位有错, 是 k Hz

图 2-25 频分多路复用  
(a) 原始带宽; (b) 提升到频谱上的带宽; (c) 多路复用的信道

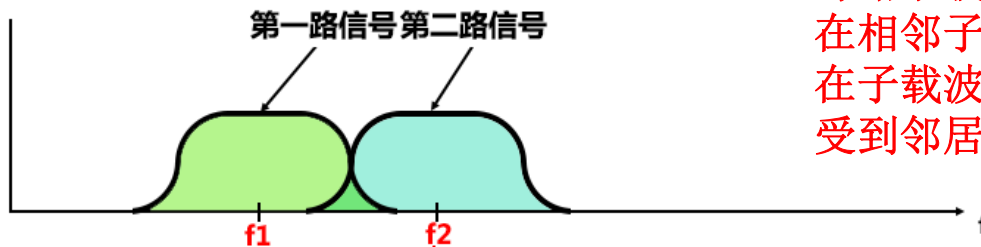
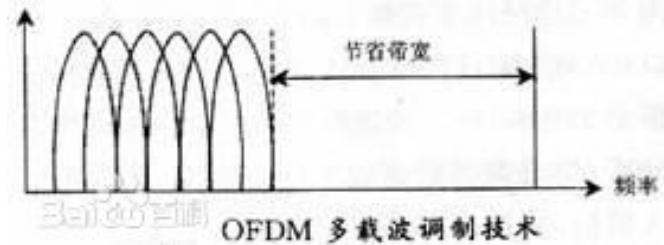
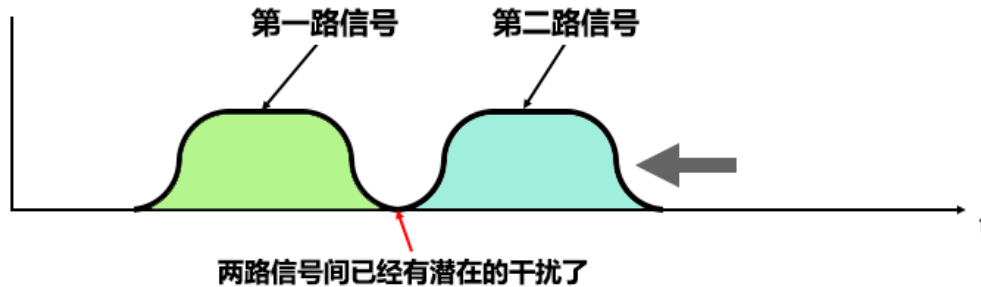
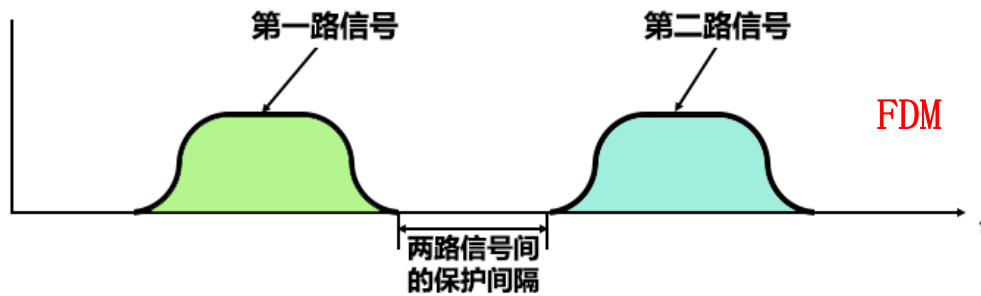
## § 2. 物理层

### 2.5. 数字调制与多路复用

#### 2.5.3. 频分复用

#### ★ 正交频分复用

OFDM = Orthogonal Frequency Division Multiplexing



OFDM: 每路子载波的频率响应被设计成在相邻子载波的中心为零，如果在子载波的中心频率采样则不会受到邻居的干扰



## § 2. 物理层

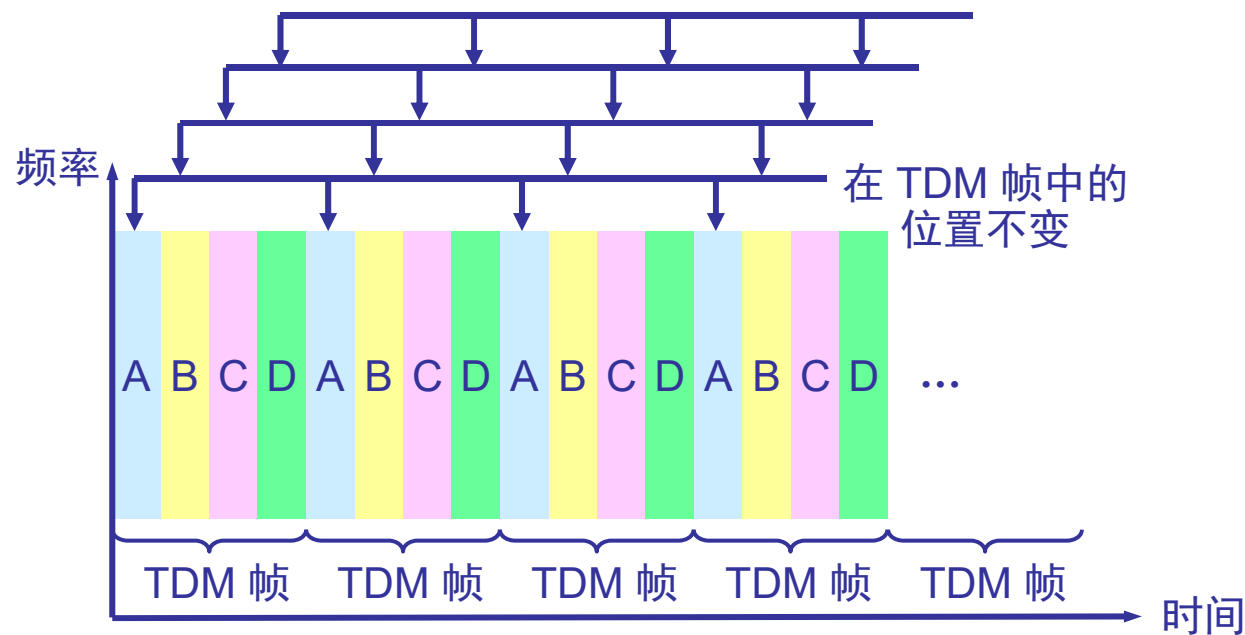
### 2.5. 数字调制与多路复用

#### 2.5.4. 时分复用

##### ★ 时分多路复用 (TDM = Time Division Multiplexing)

将时间划分为一段段等长的时分复用帧(TDM帧)，每个用户在每个TDM帧中占用固定序号的时隙，即将一条物理传输线路分成若干等长的时间片，轮换地被多个信源使用

- 每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，因此所有用户在不同的时间占用同样的频带宽度
- TDM 信号也称为等时(isochronous)信号，将多个话路的PCM信号用 TDM 方式封装为时分复用帧后发送到线路上，可以有效地利用传输线路(PCM: Pulse Code Modulation 见后)
- 中国采用欧洲体制，美国和日本等国采用北美体制 (具体见P. 120-122)



## § 2. 物理层

### 2.5. 数字调制与多路复用

#### 2.5.5. 码分复用

##### ★ 码分复用 (Code Division Multiplexing)

把一个窄带信号扩展到一个很宽的频带上，是扩展频谱通信 (spread spectrum) 的一种形式，允许来自不同用户的多个信号共享相同的频带

##### ★ 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

例：公共场所多人谈话

TDM：排队，按序交谈

FDM：用不同的语调交谈(声音高低)，可同时进行多对交谈且相互独立

CDMA：用不同的语言进行交谈

- 允许每个站使用整个频段发送信号，而且没有任何的时间限制，冲突的帧不再丢弃，而是可以线性叠加
- 能够提取出希望要的信号，同时拒绝其它所有的信号（当做噪声），因此CDMA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（最初军用）

## § 2. 物理层

### 2.5. 数字调制与多路复用

#### 2.5.5. 码分复用

★ 每个比特时间分为 $m$ 个更短的间隔，称为码片(chip)

- 每个站被指派一个惟一的 $m$  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：S 站的 8 bit 码片序列是 00011011，则发送比特 1 时，发送序列 = 00011011

发送比特 0 时，发送序列 = 11100100

=> S站的码片序列 = (-1 -1 -1 +1 +1 -1 +1 +1)

★ 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)

- Walsh码 (Walsh Code) 可以产生这样的正交码片序列
- 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，则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)=0

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

例：向量  $S = (-1 -1 -1 +1 +1 -1 +1 +1)$ ，向量  $T = (-1 -1 +1 -1 +1 +1 +1 -1)$ ，

则：将向量  $S$  和  $T$  的各分量值代入上式，得0

- 同理  $\overline{S} \bullet \overline{T} = 0$

- 任何一个码片向量和自己的规格化内积都是1  $S \bullet S = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m S_i S_i = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m S_i^2 = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m (\pm 1)^2 = 1$

- 一个码片向量和其反码的规格化内积值是 -1  $S \bullet \overline{S} = -1$

## § 2. 物理层

### 2.5. 数字调制与多路复用

#### 2.5.5. 码分复用

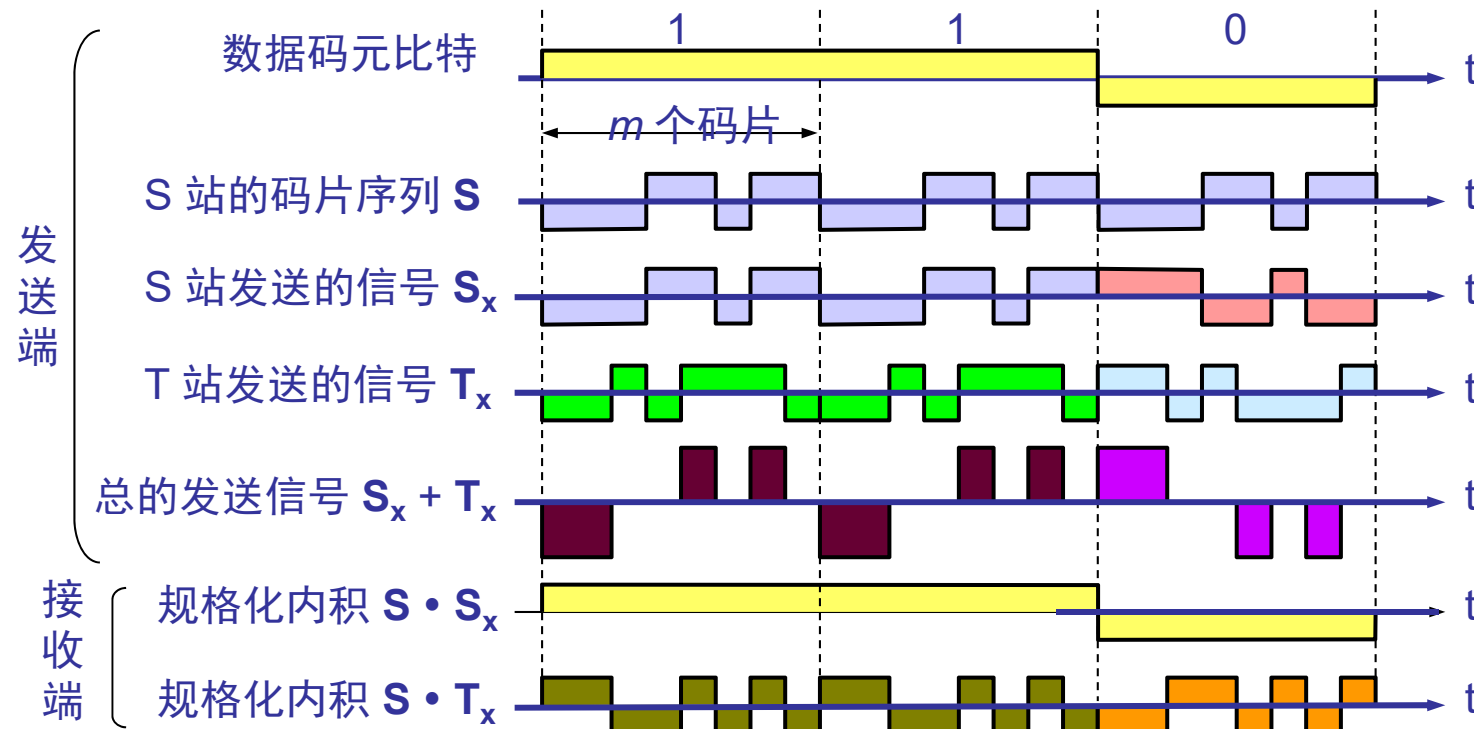
例：S 站的 8 bit 码片序列是 00011011

则发送比特 1 时，发送序列 = 00011011

发送比特 0 时，发送序列 = 11100100

=> S站的码片序列 = (-1 -1 -1 +1 +1 -1 +1 +1)

向量  $T = (-1 -1 +1 -1 +1 +1 +1 -1)$



★ 在实用的系统中是使用伪随机码序列

(电信CDMA，每次通话，从 $2^{32}$ 中随机挑选一个码片，相当于 32bit 的码片，远大于示例的8bit)

## § 2. 物理层

### 2.6. 公共电话交换网络 (PSTN = Public Switched Telephone Network)

#### 2.6.1. 电话系统结构

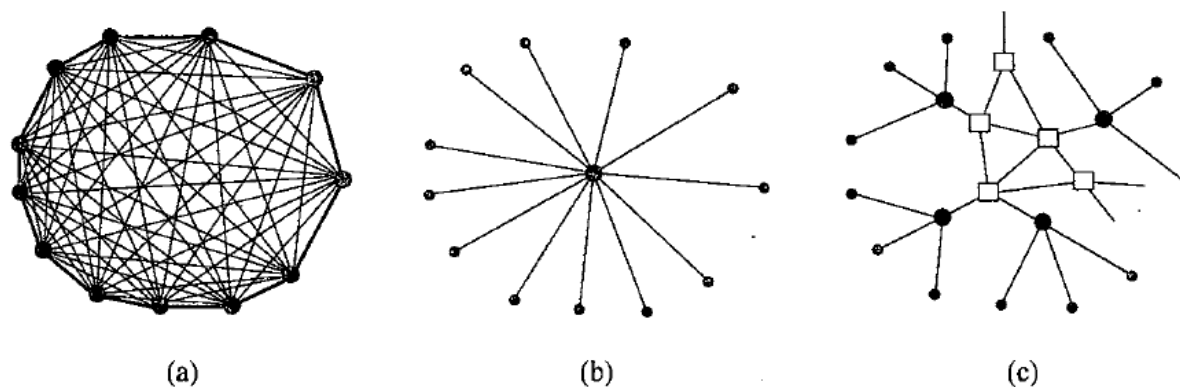


图 2-29

(a) 全连通网络; (b) 中心交换网络; (c) 两层体系网络

- ★ 用户：电话终端
- ★ 端局(end office)：连接用户的最近的交换局，也称为本地中心局(local central office)
- ★ 本地回路(local loop)：客户电话和端局之间（采用模拟信号传输）
- ★ 交换局(switch office)：完成端局间的交换，可以多级
- ★ 干线(trunk)：端局和汇接局之间回路（已经全数字化）

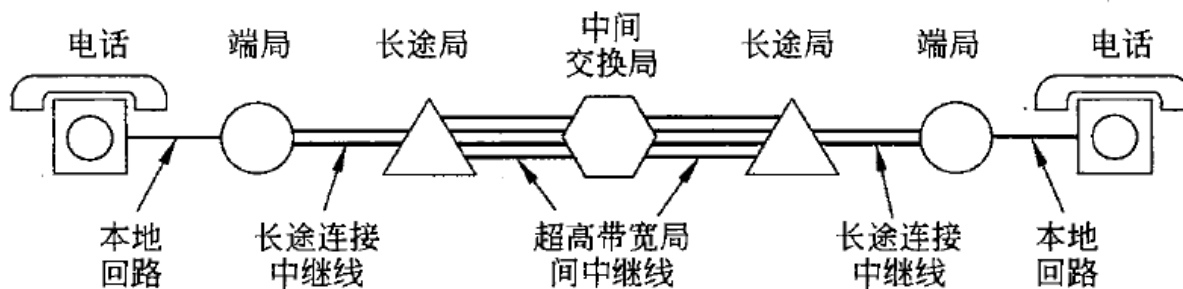


图 2-30 一个长途呼叫的典型电路路由

## § 2. 物理层

### 2.6. 公共电话交换网络

#### 2.6.2. 电话政治化

（政府监管：拆分贝尔、允许竞争、携号转网等，略）

## § 2. 物理层

### 2.6. 公共电话交换网络

#### 2.6.3. 本地回路：调制解调器、ADSL和光纤

★ 通过电话系统进行计算机通信 (P. 113 图2-32)

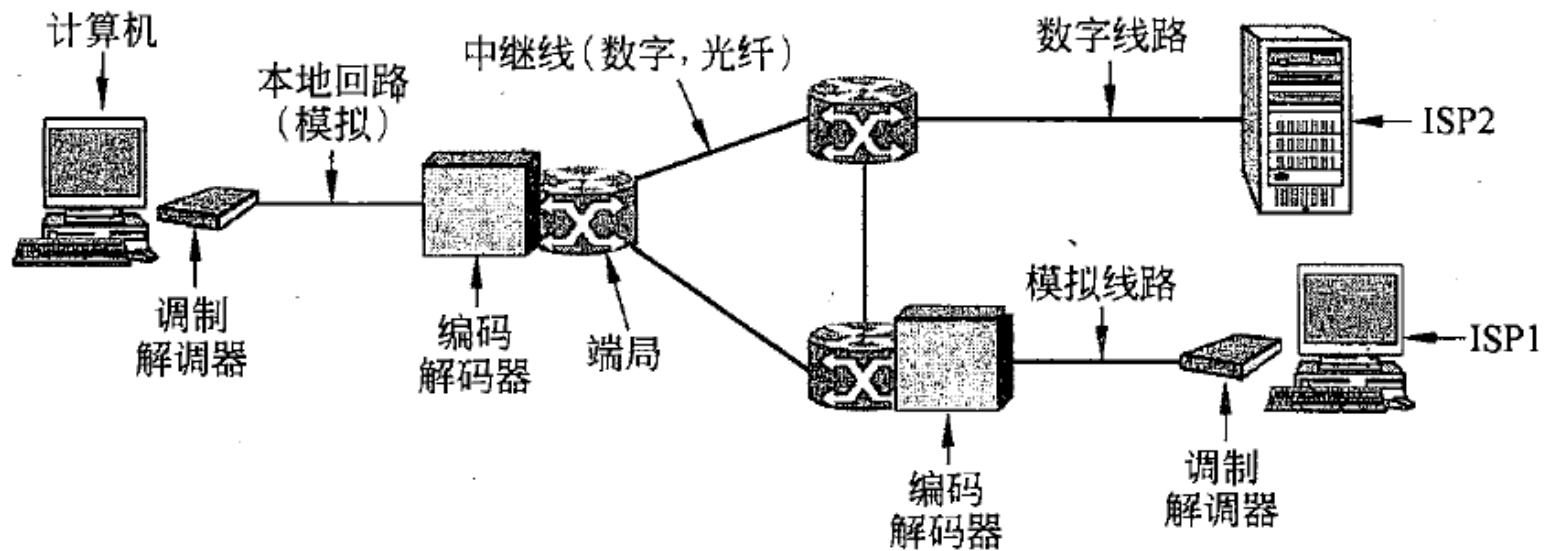


图 2-32 计算机-计算机呼叫中的模拟和数字传输。转换由调制解调器和编码解码器完成

## § 2. 物理层

### 2.6. 公共电话交换网络

#### 2.6.3. 本地回路：调制解调器、ADSL和光纤

##### ★ 数字用户线路(DSL = Digital Subscriber Line)

xDSL是一种新的传输技术，在原有的电话线路上采用较高的频率及相应调制技术，在模拟线路中加入可获取更多的数字数据的信号处理技术来获得高传输率

- 标准模拟电话信号的频带：300~3400 Hz

=> 用户线路（二芯铜线）本身实际可通过的信号频率仍然超过 1 MHz

=> 把0~4 kHz留给电话，把原来没有被利用的高端频谱留给用户上网使用

- 各种DSL技术最大的区别体现在信号传输速率和距离的不同，以及上行信道和下行信道的对称性不同两个方面（ADSL、RADSL、VDSL、SDSL、IDSL和HDSL等）
- ASDL = Asymmetric DSL：非对称数字用户线路，采用频分复用技术把普通电话线分成电话、上行和下行三组相对独立的信道(每组可能多个)，用户可以边打电话边上网，不用担心上网速率和通话质量下降的情况

我国目前采用的方案是**离散多音调调制**技术(DMT = Discrete Multi-Tone)，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 4kHz 带宽（4.3125 kHz），并使用不同的载波（即不同的音调）进行数字调制

**（多个小调制解调器并行地传送数据）**

理论上，ADSL可在5 km范围内，在一对铜缆双绞线上提供最高1 Mbps的上行速率和最高8Mbps 的下行速率；实际应用中，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）



## § 2. 物理层

### 2.6. 公共电话交换网络

#### 2.6.3. 本地回路：调制解调器、ADSL和光纤

#### ★ 数字用户线路(DSL = Digital Subscriber Line)

##### ● ASDL = Asymmetric DSL : 非对称数字用户线路

ADSL技术能够充分利用现有PSTN, 只须在线路两端加装ADSL设备即可为用户提供高宽带服务, 无需重新布线, 同时ADSL用户独享带宽, 线路专用, 不受用户增加的影响

最新的ADSL2+技术可以提供最高24Mbps的下行速率(通过提高调制效率得到更高速率)

##### ● 在国内基本已淘汰, 目前主流是光进铜退

##### ● 新建全部是光纤

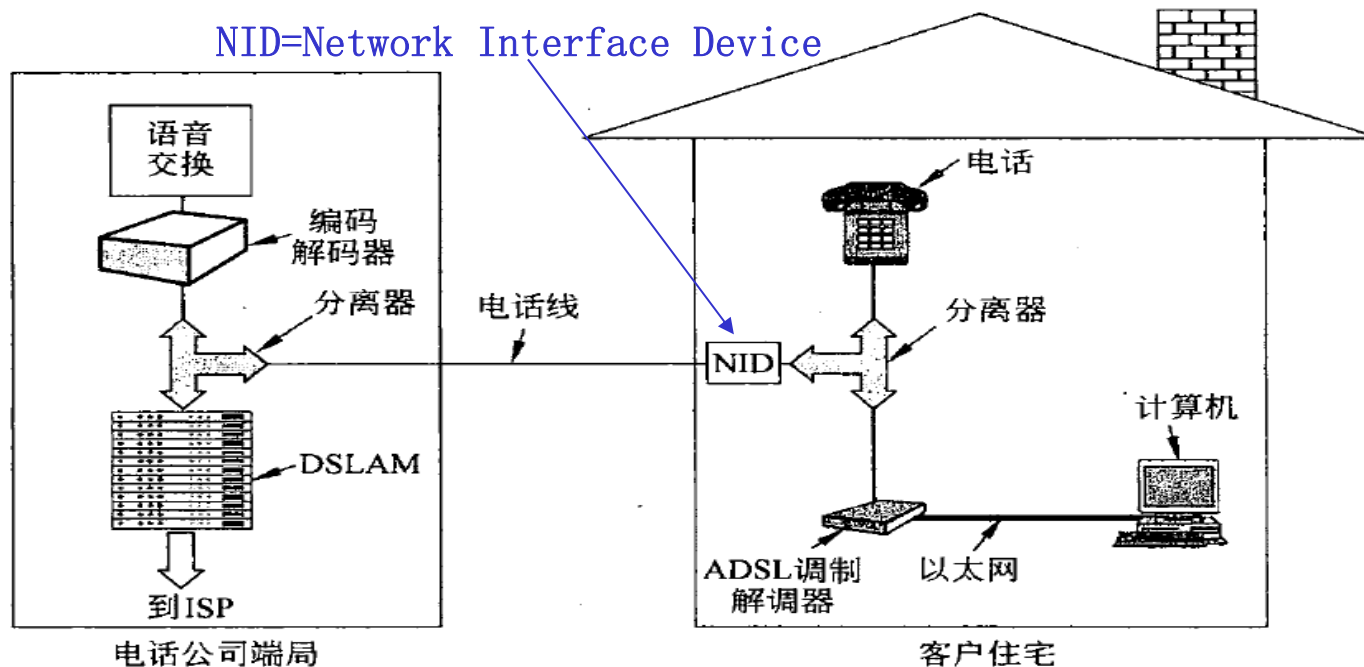


图 2-35 一种典型的 ADSL 设备配置

## § 2. 物理层

### 2.6. 公共电话交换网络

#### 2.6.3. 本地回路：调制解调器、ADSL和光纤

##### ★ 光纤

FTTB: Fiber to the building

FTTH: Fiber to the Home

PON : Passive Optical Network

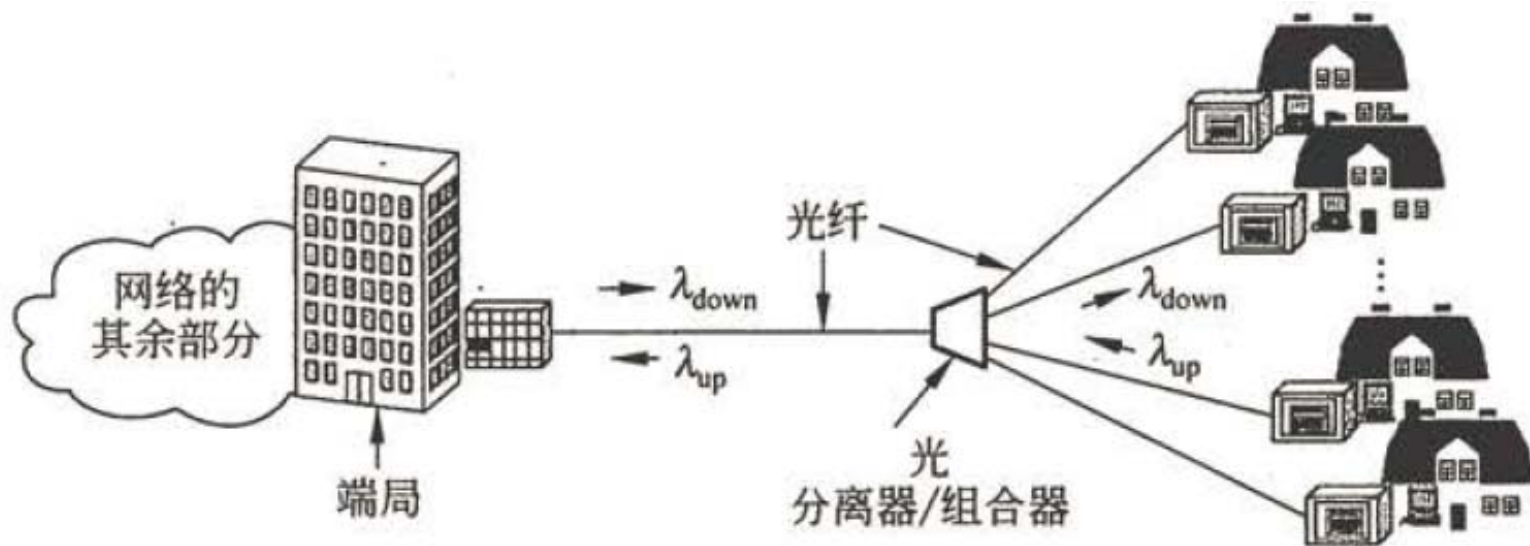


图 2-36 用作光纤到户的无源光网

## § 2. 物理层

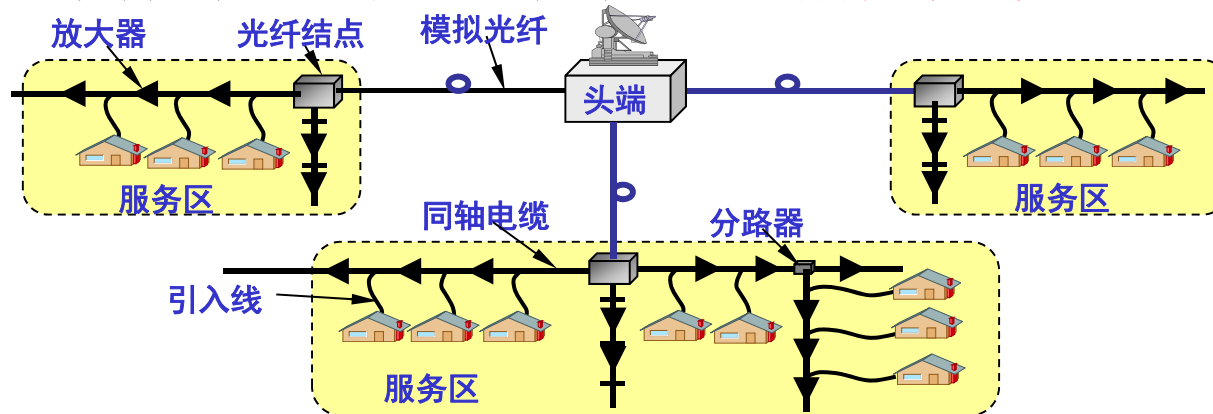
### 2.6. 公共电话交换网络

#### 2.6.3. 本地回路：调制解调器、ADSL和光纤

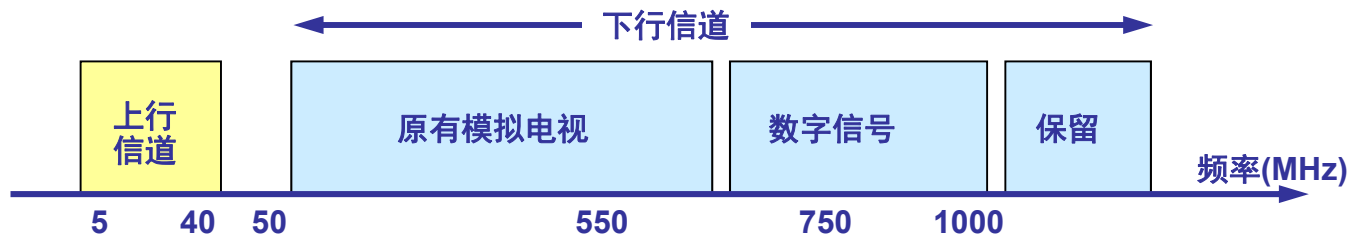
##### ★ 光纤同轴混合网 (HFC = Hybrid Fiber Coax)

在有线电视网CATV的基础上开发的宽带接入网。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，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，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（模拟光纤：和现有模拟图像信号兼容，采用光的振幅调制AM，这比使用数字光纤更为经济），在光纤结点以下**保持同轴电缆不变**



HFC 网具有比 CATV 网更宽的频谱，并且具有双向传输功能



## § 2. 物理层

### 2.6. 公共电话交换网络

#### 2.6.4. 中继线和多路复用

★ 中继线：端局之间传输信号的线路(已全数字化)

★ 频分复用(FDM)：

群：将12个4kHz的音频信道复用到60kHz~108kHz的频带上

超群：5个群多路复用成一个超群

主群：5个超群（ITU-T标准）或  
10个超群（Bell系统）多路  
复用成一个主群

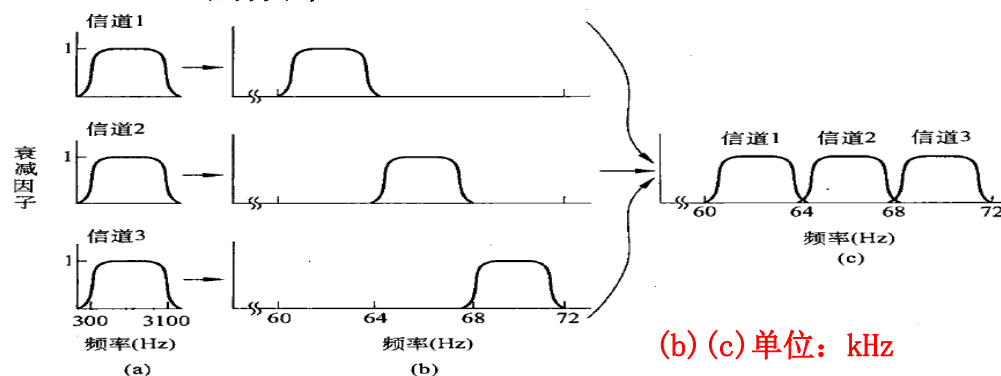


图 2-25 频分多路复用  
(a) 原始带宽; (b) 提升到频谱上的带宽; (c) 多路复用的信道

● FDM需模拟线路，已逐渐淘汰(微波等仍在使用)

● 用Modem进行数字/模拟信号间的转换

● PCM: Pulse Code Modulation (脉冲编码调制)

例：电话信道带宽 ( $4000\text{Hz} = 3100\text{Hz} + \text{保护带}$ )

尼奎斯特定理  $\Rightarrow$  8000采样值/秒 足够

$\Rightarrow$  125微秒/值

$\Rightarrow$  每个值量化为8bit(256级)

$\Rightarrow$  语音级电话 64kbps

## § 2. 物理层

### 2.6. 公共电话交换网络

#### 2.6.4. 中继线和多路复用

★ 时分多路复用(TDM)：两种制式

- ┌ T1：每125us发送一帧，多路复用24信道，因此每帧含 $24 \times 8 + 1 = 193$ bit，速率1.544 Mbps  
  (北美、日本)
- └ E1：每125us发送一帧，多路复用32信道，因此每帧 含 $32 \times 8 = 256$ bit，速率2.048 Mbps  
  (欧洲、中国等其它地区)

## § 2. 物理层

### 2.6. 公共电话交换网络

#### 2.6.4. 中继线和多路复用

#### ★ 时分多路复用(TDM)：两种制式

T1 carrier : 每125us为每路电话发送一个样值

- T1用于模拟传输时，多路复用24路话音信道，每条话音信道输出7比特数据+1比特控制，因此速率为 1.544Mbps
- T1用于数字传输时，仅23条信道用于数据传输，第24条信道用于同步模式

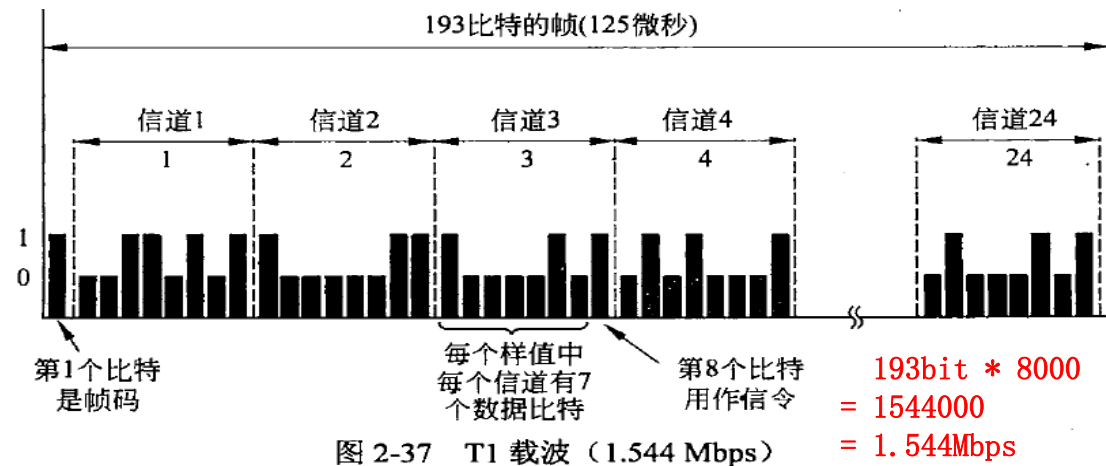


图 2-37 T1 载波 (1.544 Mbps)

- T1 carrier 被复用到更高级的载波中 (4/7/3升级)

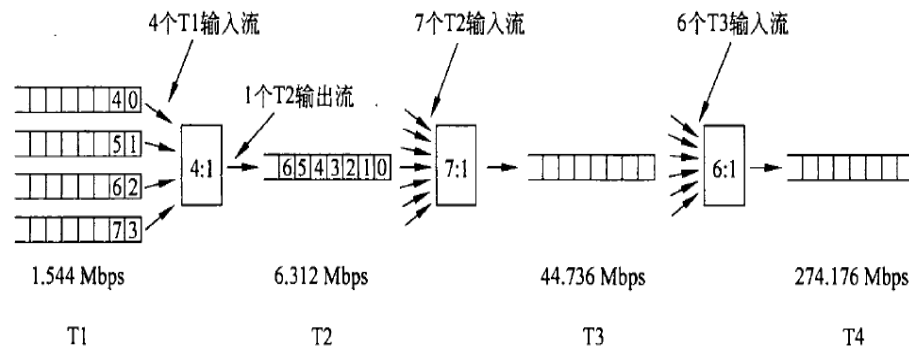


图 2-38 T1 载波被复用到更高级的载波中

## § 2. 物理层

### 2.6. 公共电话交换网络

#### 2.6.4. 中继线和多路复用

#### ★ 同步光网络 (SONET) / 同步数字序列 (SDH)

SONET = Synchronous Optical Network

SDH = Synchronous Digital Hierarchy

- 引入：1984年AT&T被拆分，长途和本地电话分离，导致一个本地电话公司需要接入多个长途电话公司，每个公司都有自己的TDM系统，  
=> 标准化需求

- 旧的数字传输系统的主要缺点

- 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：为了节约经费，各国的数字网主要是采用准同步方式(时钟精度要求不高)

- 设计目标

定义公共信令标准，使不同运营商不同线路互连，合并T1/E1等基于64kbps的PCM信道，但复用方式不兼容的标准；支持多个高速（高于T3/E5）信道的复用，支持OAM  
OAM = 操作(operation)、管理(administrator)和维护(maintenance)

- SONET的各级时钟都来自一个非常精确的主时钟

- 第1级的传输速率是 51.84 Mbps

每125us发送一帧，每帧810字节      =>  $810 * 8 = 6480 \text{ bit}$

=>  $8000 * 6480 = 51840000 = 51.84 \text{ Mbps}$       => 810字节的帧称为 STS-1 帧  
(向上为STS-n)

## § 2. 物理层

### 2.6. 公共电话交换网络

#### 2.6.4. 中继线和多路复用

#### ★ 同步光网络 (SONET) / 同步数字序列 (SDH)

SONET = **S**ynchronous **O**ptical **N**etwork

SDH = **S**ynchronous **D**igital **H**ierarchy

#### ● 第1级的传输速率是 51.84 Mbps

每125us发送一帧，每帧810字节

$\Rightarrow 810 * 8 = 6480 \text{ bit}$

$\Rightarrow 8000 * 6480 = 51840000 = 51.84 \text{ Mbp}$

$\Rightarrow$  810字节的帧称为 STS-1 帧

(向上为STS-n)

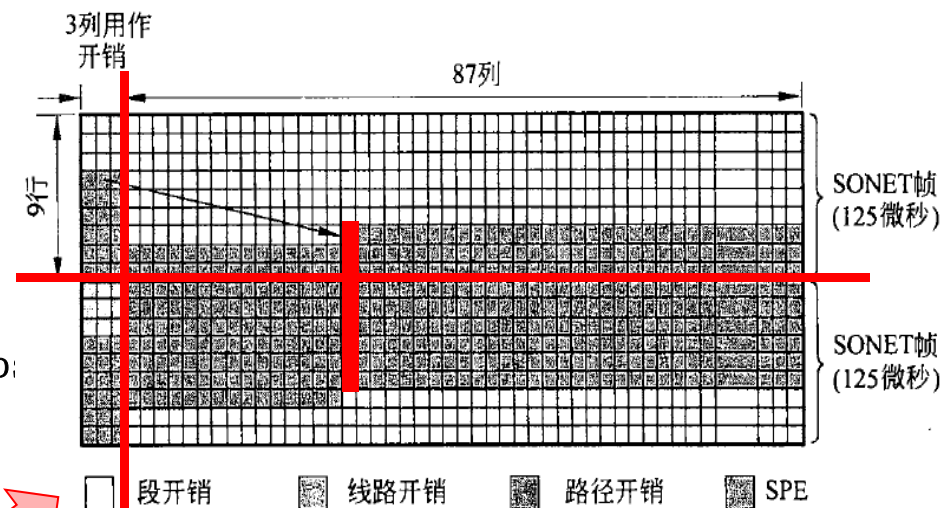


图 2-39 两个连续的 SONET 帧

810字节 = 9行90列，每行前3列是系统管理信息，后87列是用户数据，用户数据封装在SPE帧中，每帧的第1列是路径开销

SPE=(Synchronous Payload Envelope)

SPE :  $87 * 9 * 8 * 8000 = 50112000 = 50.112 \text{ MB}$

用户:  $86 * 9 * 8 * 8000 = 49536000 = 49.536 \text{ MB}$

SONET		SDH	数据率(Mbps)		
电子	光	光	总速率	SPE	用户速率
STS-1	OC-1		51.84	50.112	49.536
STS-3	OC-3	STM-1	155.52	150.336	148.608
STS-12	OC-12	STM-46	22.08	601.344	594.432
STS-48	OC-48	STM-16	2488.32	2405.376	2377.728
STS-192	OC-192	STM-64	9953.28	9621.504	9510.912
STS-768	OC-768	STM-256	39813.12	38486.016	38043.648

图 2-40 SONET 和 SDH 多路复用率

STM-4 622.08

OC-1536 — about 80 Gbit/s

OC-3072 — about 160 Gbit/s

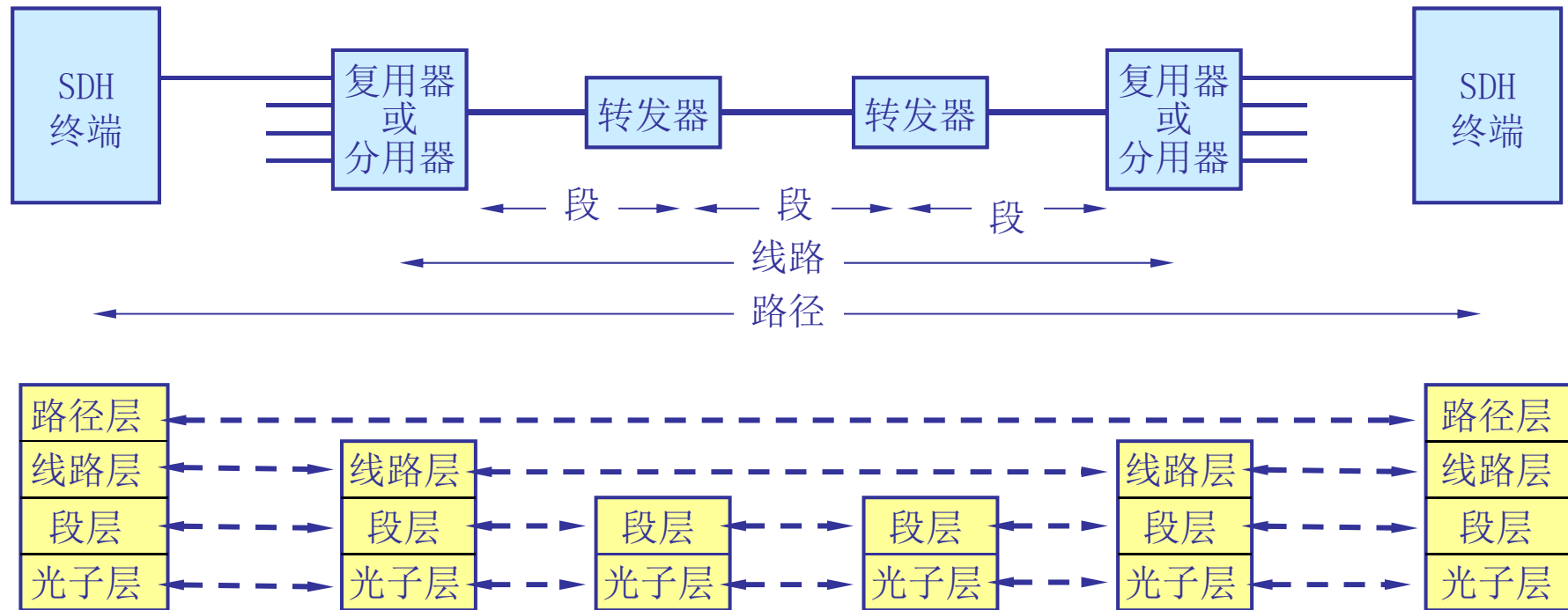


## § 2. 物理层

### 2.6. 公共电话交换网络

#### 2.6.4. 中继线和多路复用

#### ★ 同步光网络 (SONET) / 同步数字序列 (SDH)



- 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. 物理层

### 2.6. 公共电话交换网络

#### 2.6.4. 中继线和多路复用

#### ★ 波分多路复用(WDM = Wavelength Division Multiplexing)

将多种不同波长的光载波信号（携带各种数据信息）在发送端经组合器(Multiplexer)汇合在一起，并耦合到同一根光纤中进行传输的技术；在接收端经解复用器(Demultiplexer)将各种波长的光载波分离，这种在同一根光纤中同时传送众多不同波长光信号的技术称为WDM

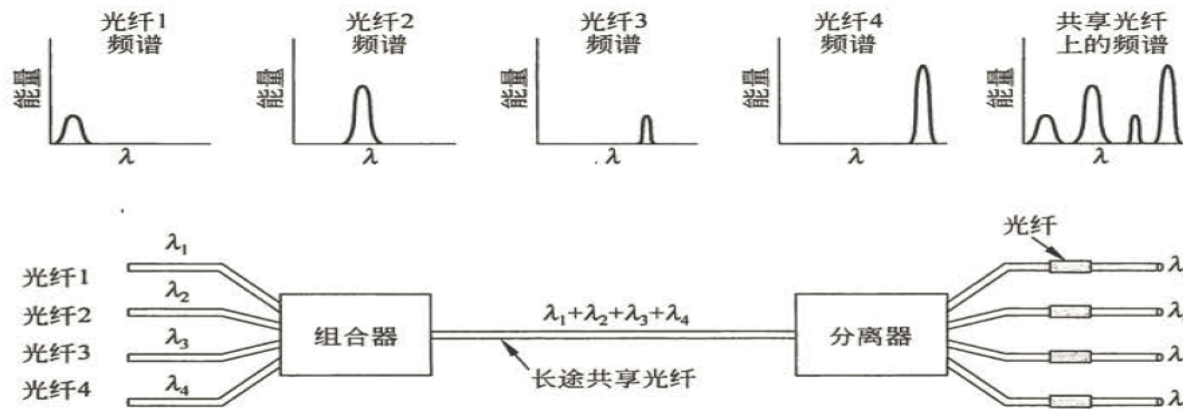


图 2-41 波分多路复用

- WDM = Wavelength Division Multiplexing

$$2 \leq \lambda \text{ 个数} \leq 8$$

- DWDM (Dense WDM 密集波分多路复用)

$$\lambda \text{ 个数} \geq 16$$

每个  $\lambda$  对应带宽 2.5Gbps (最新可达 10Gbps)

=> 单根光纤总带宽 (bps)

$\lambda = 8$ , 带宽 = 2.5Gbps => 20Gbps

$\lambda = 192$ , 带宽 = 10Gbps => 1.92Tbps

$\lambda = 64$ , 带宽 = 40Gbps => 2.56Tbps

## § 2. 物理层

### 2.6. 公共电话交换网络

#### 2.6.5. 交换

##### ★ 两种不同的交换技术

电路交换：发起连接后，系统会建立一条端到端的路径，路径持续到交换结束后才结束

- 第一章中打电话的例子
- 建立路径需要花费时间，接通后全部占用

包交换：无需事先建立端到端的路径，采用存储-转发方式尽快将数据包发出

- 第一章中寄信/寄快递的例子
- 数据包被尽快发出后，到达可能需要花费时间，到达顺序可能不同，且有可能丢失

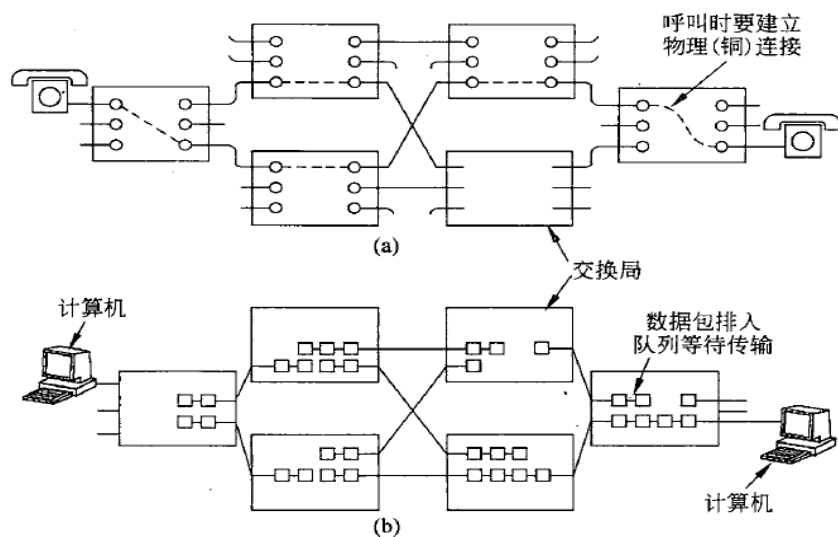





图 2-42  
(a) 电路交换；(b) 数据包交换

项目	电路交换	包交换
呼叫建立	需要	不需要
专用物理路径	是	不是
每个包遵循相同的路由	是	不是
包按序到达	是	不是
交换机崩溃是否致命	是	不是
可用带宽	固定	动态
可能拥塞的时间	在建立时	在每个包
潜在浪费带宽	是	不是
存储-转发传输	不是	是
收费	按分钟计	按包计

图 2-44 电路交换和数据包交换网络的比较

## § 2. 物理层

### 2.7. 移动电话系统

	制式	用途	主要技术派别																							
第一代	模拟	模拟语音	已淘汰，我国于2001. 12. 31关闭																							
第二代	数字	数字语音	★ GSM: (Global System For Mobile Communications) 采用时分多址技术 <ul style="list-style-type: none"> <li>● GPRS: 2. 5G</li> <li>● EDGE: 2. 75G</li> </ul> ★ CDMA: (Code Division Multiple Access) 采用码分多址技术 <div>中国联通已启动 关闭2G网络的工作</div>																							
第三代	数字	数字语音和数据	<table border="1"> <tr> <td></td><td> TD-SCDMA</td><td> WCDMA</td><td> CDMA2000</td></tr> <tr> <td>最新版本</td><td>TD-HSDPA</td><td>HSUPA</td><td>EV-DO RevA/RevB</td></tr> <tr> <td rowspan="2">速率</td><td>下行</td><td>2. 8Mbps</td><td>14. 4Mbps</td></tr> <tr> <td>上行</td><td>384kbps</td><td>5. 76Mbps</td></tr> <tr> <td>功能</td><td>可视电话、高速数据上网、WAP、彩信、语音、短信</td><td>可视电话、高速数据上网、WAP、彩信、语音、短信</td><td>可视电话、高速数据上网、WAP、彩信、语音、短信</td></tr> <tr> <td>技术演进</td><td>TD-SCDMA → TD-HSDPA → TD-HSUPA → TD-HSPA+ → LTE TDD</td><td>GSM → GPRS → EDGE → WCDMA → HSDPA → HSUPA → HSPA+ → LTE FDD</td><td>CDMA → CDMA1X → CDMA2000 EV-DO Rev. 0 → Rev. A → Rev. B → LTE FDD</td></tr> </table> <div>中国移动已启动 关闭3G网络的工作</div>		 TD-SCDMA	 WCDMA	 CDMA2000	最新版本	TD-HSDPA	HSUPA	EV-DO RevA/RevB	速率	下行	2. 8Mbps	14. 4Mbps	上行	384kbps	5. 76Mbps	功能	可视电话、高速数据上网、WAP、彩信、语音、短信	可视电话、高速数据上网、WAP、彩信、语音、短信	可视电话、高速数据上网、WAP、彩信、语音、短信	技术演进	TD-SCDMA → TD-HSDPA → TD-HSUPA → TD-HSPA+ → LTE TDD	GSM → GPRS → EDGE → WCDMA → HSDPA → HSUPA → HSPA+ → LTE FDD	CDMA → CDMA1X → CDMA2000 EV-DO Rev. 0 → Rev. A → Rev. B → LTE FDD
	 TD-SCDMA	 WCDMA	 CDMA2000																							
最新版本	TD-HSDPA	HSUPA	EV-DO RevA/RevB																							
速率	下行	2. 8Mbps	14. 4Mbps																							
	上行	384kbps	5. 76Mbps																							
功能	可视电话、高速数据上网、WAP、彩信、语音、短信	可视电话、高速数据上网、WAP、彩信、语音、短信	可视电话、高速数据上网、WAP、彩信、语音、短信																							
技术演进	TD-SCDMA → TD-HSDPA → TD-HSUPA → TD-HSPA+ → LTE TDD	GSM → GPRS → EDGE → WCDMA → HSDPA → HSUPA → HSPA+ → LTE FDD	CDMA → CDMA1X → CDMA2000 EV-DO Rev. 0 → Rev. A → Rev. B → LTE FDD																							
第四代	数字	数据和数字语音	★ LTE-FDD: 采用频分双工技术，在两个对称的频率上，分别建立上行和下行通道，两个方向的数据互不干扰（速度快） <ul style="list-style-type: none"> <li>● LTE FDD理论下行速度为150Mbps</li> <li>● LTE FDD适合广域覆盖</li> </ul> ★ LTE-TDD: 在一个频率上建立通道，既负责上传，又负责下载。通过时分双工来控制上下行数据（频谱利用率高） <ul style="list-style-type: none"> <li>● TD-LTE理论下行速度为100Mbps</li> <li>● TD-LTE适合热点区域覆盖</li> </ul> <div>混合组网 VoLTE = Voice over LTE</div>																							

## § 2. 物理层

### 2.8. 有线电视 (略)