

# 计算机网络（第8版）

谢希仁 编著



## 第2章 物理层



# 计算机网络体系结构

OSI 的七层协议体系结构



(a)

TCP/IP 的四层协议体系结构



(b)

五层协议的体系结构



(c)



2.1

物理层的基本概念

2.2

数据通信的基础知识

2.3

物理层下面的传输媒体

2.4

信道复用技术

2.5

数字传输系统

2.6

宽带接入技术



## 2.1 物理层的基本概念

- 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。
- **作用：**尽可能**屏蔽**掉不同传输媒体和通信手段的差异，使得物理层上面的数据链路层感觉不到这些差异。
- 用于物理层的**协议**（protocol）也常称为物理层**规程**（procedure）。

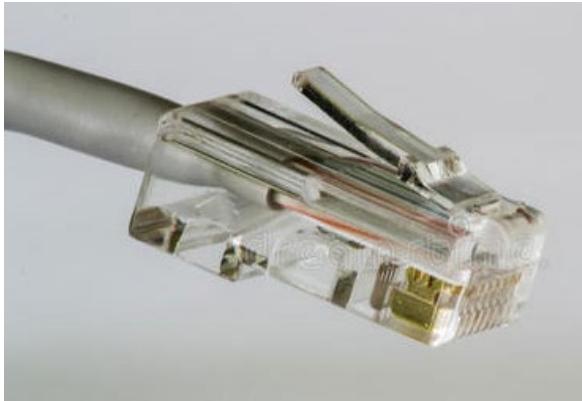


## 物理层的主要任务

- 确定与传输媒体的**接口**的一些特性。4个特性：
  - ◆ **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。



## 物理层的机械特性





## 物理层的电气特性

### ◆ 普通电话交换网接口

电气特性的主要规定

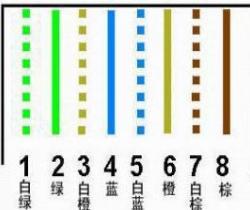
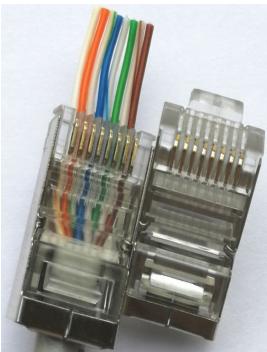
发送电平	$\leq 0\text{dBm}$
接收电平	-5 ~ -35dBm, 视各种Modem而定
阻 抗	$600\Omega$
平衡特性	平衡输入/输出

### ◆ ITU-T V/X系列有关建议的某些电气特性

ITU-T建议	1信号电平	0信号电平	速率范围
V.28	-5 ~ -15V(对地)	+5 ~ +15V(对地)	$\leq 20 \text{ kb/s}$
V.10/X.26	-4 ~ -6V(对地)	+4 ~ +6V(对地)	$\leq 300 \text{ kb/s}$
V.11/X.27	-2 ~ -6V(差动)	+2 ~ +6V(差动)	$\leq 10 \text{ Mb/s}$



## 物理层的功能特性



引脚	信号
1	TD+(发送数据, 正向差分信号)
2	TD-(发送数据, 负向差分信号)
3	RD+(接收数据, 正向差分信号)
4	未使用
5	未使用
6	RD-(接收数据, 负向差分信号)
7	未使用
8	未使用

针脚	符号	方向	说明
1	DCD	输入	数据载波检测
2	RXD	输入	接收数据
3	TXD	输出	发送数据
4	DTR	输出	数据终端准备好
5	GND	-	信号地
6	DSR	输入	数据装置准备好
7	RTS	输出	请求发送
8	CTS	输入	允许发送
9	RI	输入	振铃指示

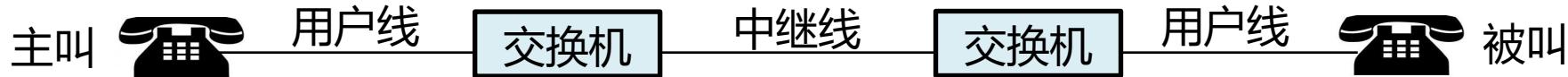


10BASE-T RJ-45 接口功能特性

RS-232-C DB-9接口功能特性



## 物理层的过程特性：电话通信



拨号连接事件序列





## 物理层的常用标准：点对点通信线路

### ● EIA RS-232-C标准

- ◆ 美国电子工业协会(EIA)于1969年颁布
- ◆ 串行、低速、模拟传输设备与计算机之间的物理接口标准
- ◆ 规定了计算机串行通信接口卡与调制解调器之间物理接口的机械、电气、功能和过程的具体参数与工作流程
- ◆ 目前很多低速的数据通信设备仍然采用该标准



### ● EIA RS-449标准

- ◆ 想取代RS-232-C而开发的，但未被广泛使用



点对点通信线路和RS-232-C标准



## 物理层的常用标准：广播通信线路

### ● 广播通信线路的物理层标准

- ◆ 传统以太网 IEEE 802.3: 10BASE-T 等
- ◆ 快速以太网
- ◆ 千兆以太网
- ◆ 万兆以太网
- ◆ 无线局域网

**802.3:** 10BASE-2, 10BASE-5,  
10BASE-T

**802.3u:** 100BASE-T, 100BASE-TX,  
100BASE-T4, 100BASE-FX

**802.3z:** 1000BASE-T, 1000BASE-CX,  
1000BASE-LX, 1000BASE-SX

**802.3ae:** LAN PHY, WAN PHY

**802.15.4:** 无线个人区域网WPAN



## 物理层的常用标准：广播通信线路

- 广播通信线路的物理层标准

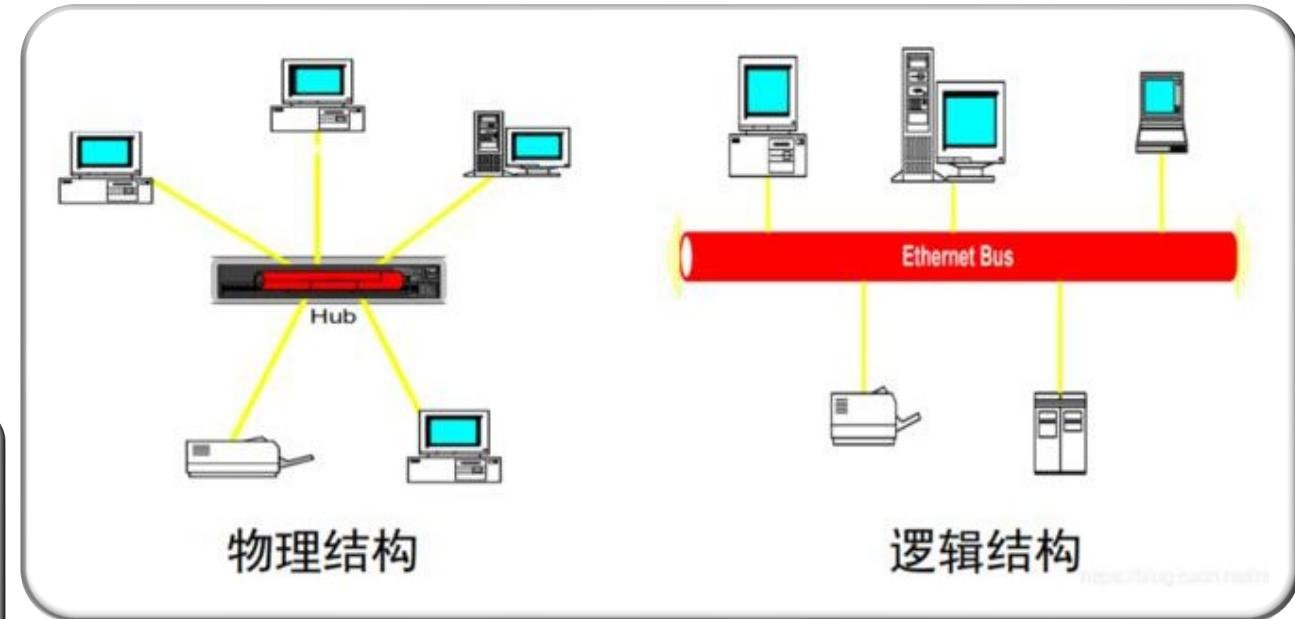
- ◆ 传统以太网
- ◆ 快速以太网
- ◆ 千兆以太网
- ◆ 万兆以太网
- ◆ 无线局域网

10Base-T

数据率  
(Mbps)

基带传输

双绞线





## 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



## 2.2.1 数据通信系统的模型

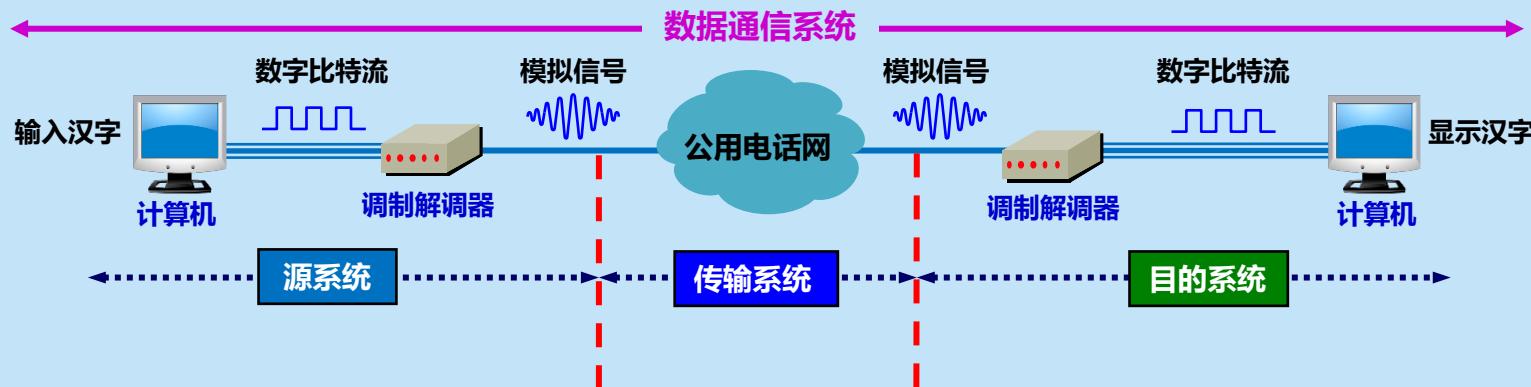
三大部分：源系统（或发送端、发送方）、传输系统（或传输网络）和目的系统（或接收端、接收方）。





## 2.2.1 数据通信系统的模型

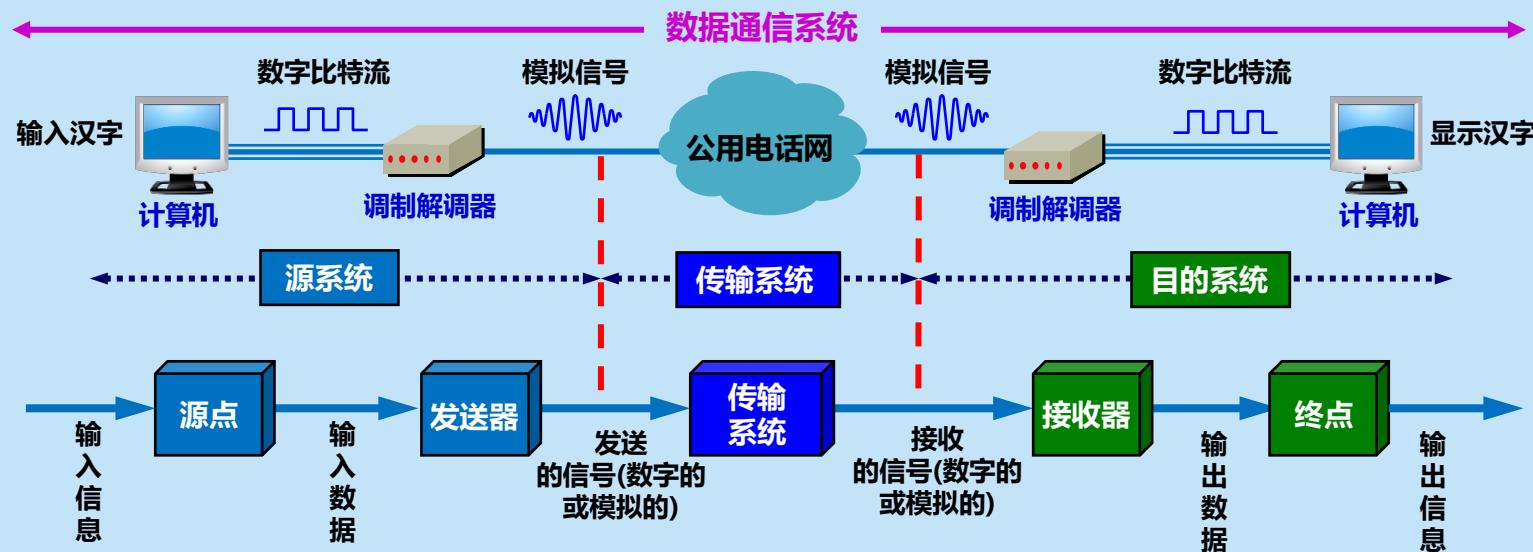
三大部分：源系统（或发送端、发送方）、传输系统（或传输网络）和目的系统（或接收端、接收方）。





## 2.2.1 数据通信系统的模型

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）。





## 常用术语



- **消息**(message): 如语音、文字、图像、视频等。

11001001
00110011
11010110
11001110
.....

- **数据** (data): 运送消息的实体。有意义的符号序列。



## 常用术语

- **信号 (signal)**: 数据的电气的或电磁的表现。

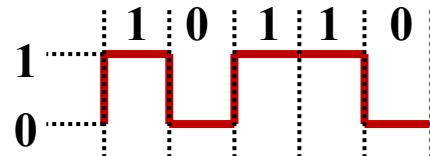


◆ 模拟信号 (analogous signal): 代表消息的参数的取值是**连续的**。



◆ 数字信号 (digital signal): 代表消息的参数的取值是**离散的**。

- **码元**: 在使用时间域 (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。

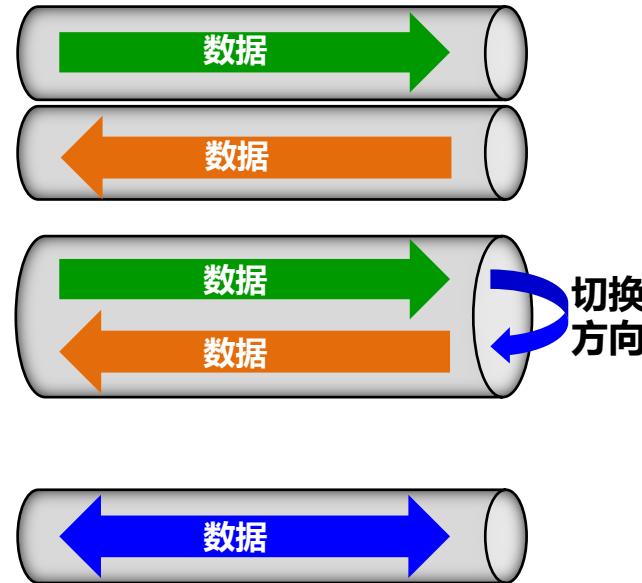


◆ 一个码元所携带的信息量不是固定的，由调制方式和编码方式决定。



## 2.2.2 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。一条通信电路往往包含一条发送信道和一条接收信道。
- **单向通信（单工通信）：**只能有一个方向的通信，没有反方向的交互，如广播和电视。
- **双向交替通信（半双工通信）：**通信的双方都可以发送信息，但双方不能同时发送（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。





## 2.2.2 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。
  - ◆ 包含有较多的低频成分，甚至有直流成分，许多信道不能直接传输。
- **调制**
  - ◆ **基带调制**: 仅对基带信号的波形进行变换，**把数字信号转换为另一种形式的数字信号**。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**。经过载波调制后的信号称为**带通信号** (即仅在一段频率范围内能够通过信道) 。

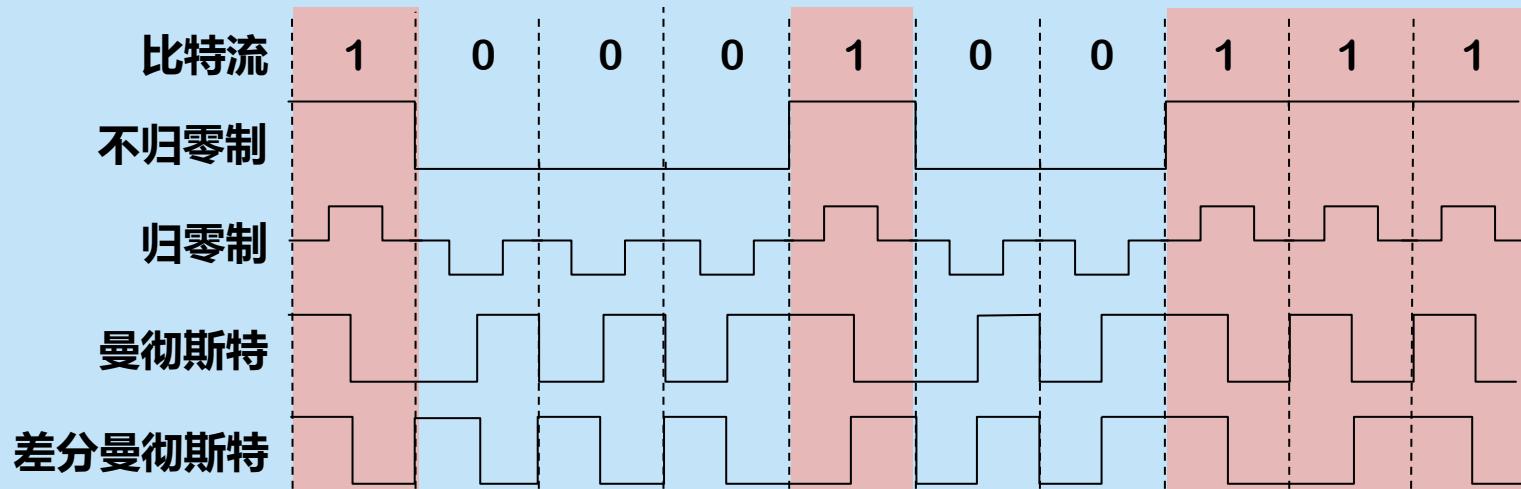


## (1) 常用编码方式

- 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 (Manchester) 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。



## (1) 常用编码方式



数字信号常用的编码方式



## (1) 常用编码方式

- 信号频率：
  - ◆ 曼彻斯特编码和差分曼彻斯特编码产生的信号频率比不归零制高。
- 自同步能力：
  - ◆ 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）。
  - ◆ 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。
- 必须对基带信号进行**调制** (modulation)。
- 最基本的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。例如：0或1分别对应于无载波或有载波输出。
  2. **调频(FM)**：载波的频率随基带数字信号而变化。例如：0或1分别对应于频率 $f_1$ 或频率 $f_2$ 。
  3. **调相(PM)**：载波的初始相位随基带数字信号而变化。例如：0或1分别对应于相位0度或相位180度。

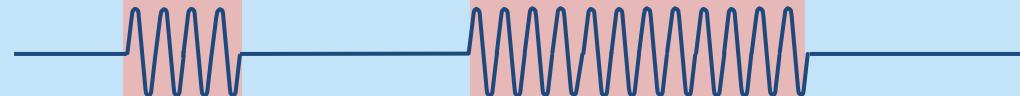


## (2) 基本的带通调制方法

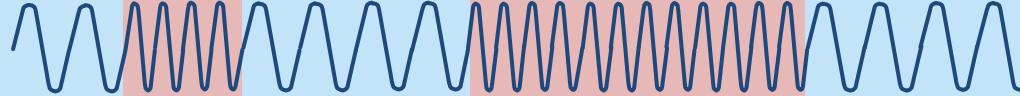
基带信号



调幅



调频



调相

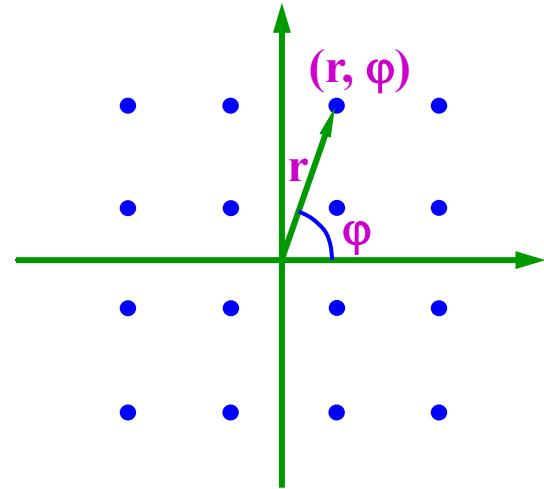


最基本的三种调制方法



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

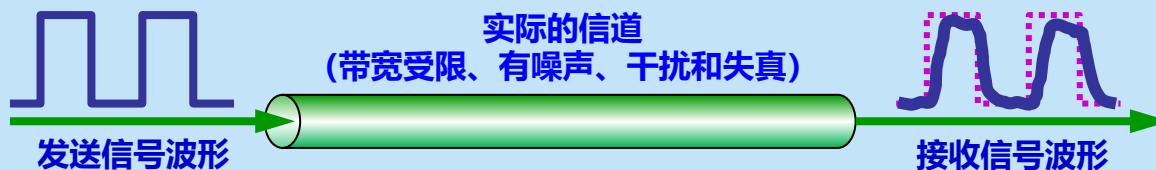
- 一种多元制的振幅相位混合调制方法，以达到更高的信息传输速率。
- 例如：
  - ◆ 可供选择的相位有 12 种，而对于每一种相位有 1 或 2 种振幅可供选择。总共有 16 种组合，即 16 个码元。
  - ◆ 由于 4 bit 编码共有 16 种不同的组合，因此这 16 个点中的每个点可对应于一种 4 bit 的编码。数据传输率可提高 4 倍。



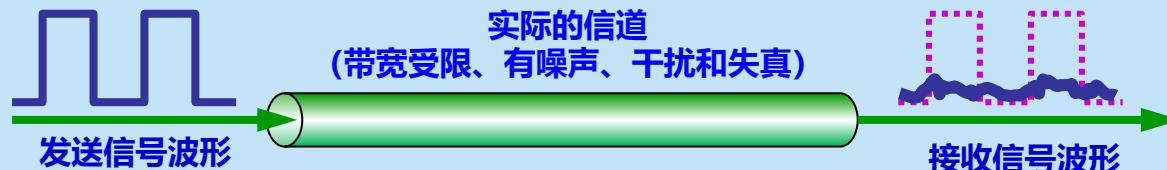


## 2.2.3 信道的极限容量

有失真，但可识别



失真大，无法识别



数字信号通过实际的信道



## 2.2.3 信道的极限容量

- 任何实际的信道都**不是理想的**, 都**不可能**以任意高的速率进行传送。
- 码元传输的速率越高, 或信号传输的距离越远, 或噪声干扰越大, 或传输媒体质量越差, 在接收端的波形的**失真就越严重**。
- 限制码元在信道上的传输速率的**两个因素**:
  - ◆ 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。
- **码间串扰：**接收端收到的信号波形**失去了码元之间的清晰界限**。

**奈氏准则：** 码元传输的最高速率 =  $2W$  (码元/秒)

在带宽为  $W$  (Hz) 的低通信道中，若不考虑噪声影响，则码元传输的最高速率是  $2W$  (码元/秒)。传输速率超过此上限，就会出现严重的码间串扰的问题，使接收端对码元的判决（即识别）成为不可能。



## (2) 信噪比

- 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  $S/N$ 。但是通常采用分贝 (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。
- 电话系统的典型信噪比为30dB。



## 举例：WIFI信号放大器

- wifi信号放大器会通过无线的方式，和原来无线路由器建立连接
- wifi信号放大器自身再提供一个无线信号，从而实现扩大无线信号覆盖范围



WIFI设备



墙体遮挡，  
信号强度减弱



WIFI放大器



覆盖满格  
提升接收信噪比



## 香农公式

- 1948年，香农(C. Shannon)把奈魁斯特的工作扩大到信道受到随机(热) 噪声干扰的情况。
- 信道的极限信息传输速率  $C$  可表达为：

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

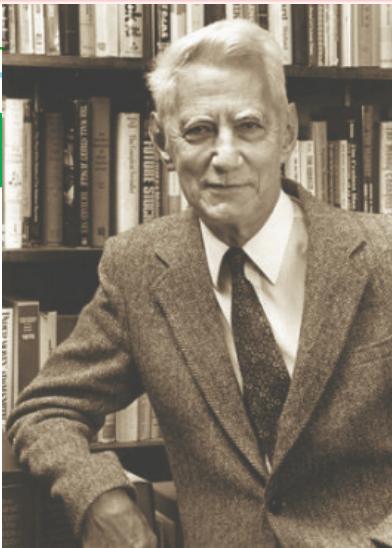
其中：

$W$  信道的带宽 (Hz)；

$S$  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。

- 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。



Entropy

熵

香农创造性的引入  
“信息熵”  
解决了对信息的量化问题

IEEE INFORMATION THEORY SOCIETY  
SCIE.CQUPT

克劳德·艾尔伍德·香农 (Claude Elwood Shannon, 1916年4月30日—2001年2月24日) 是美国数学家、信息论的创始人。1936年获得密歇根大学学士学位，1940年在麻省理工学院获得硕士和博士学位，1941年进入贝尔实验室工作。香农提出了信息熵的概念，为信息论和数字通信奠定了基础。



## 提高信息的传输速率的方法

- 方法：用编码的方法让每一个码元携带更多比特的信息量。

例：

基带信号  $M = 101011000110111010..... \longrightarrow 1 \text{ bit/码元}$

将信号中的每 3 个比特编为 1 组：

101 011 000 110 111 010 .....

$M_1 = \Phi_5 \ \Phi_3 \ \Phi_0 \ \Phi_6 \ \Phi_7 \ \Phi_2 \longrightarrow 3 \text{ bit/码元}$

若以同样的速率发送码元，则同样时间所传送的信息量就提高到了 3 倍。



## 注意：奈氏准则和香农公式的意义不同

- **奈氏准则：**激励工程人员不断探索更加先进的编码技术，使每一个码元携带更多比特的信息量。
- **香农公式：**告诫工程人员，在实际有噪声的信道上，不论采用多么复杂的编码技术，都不可能突破信息传输速率的绝对极限。



## 2.3

# 物理层下面 的传输媒体

### 2.3.1

导引型传输媒体

### 2.3.2

非导引型传输媒体



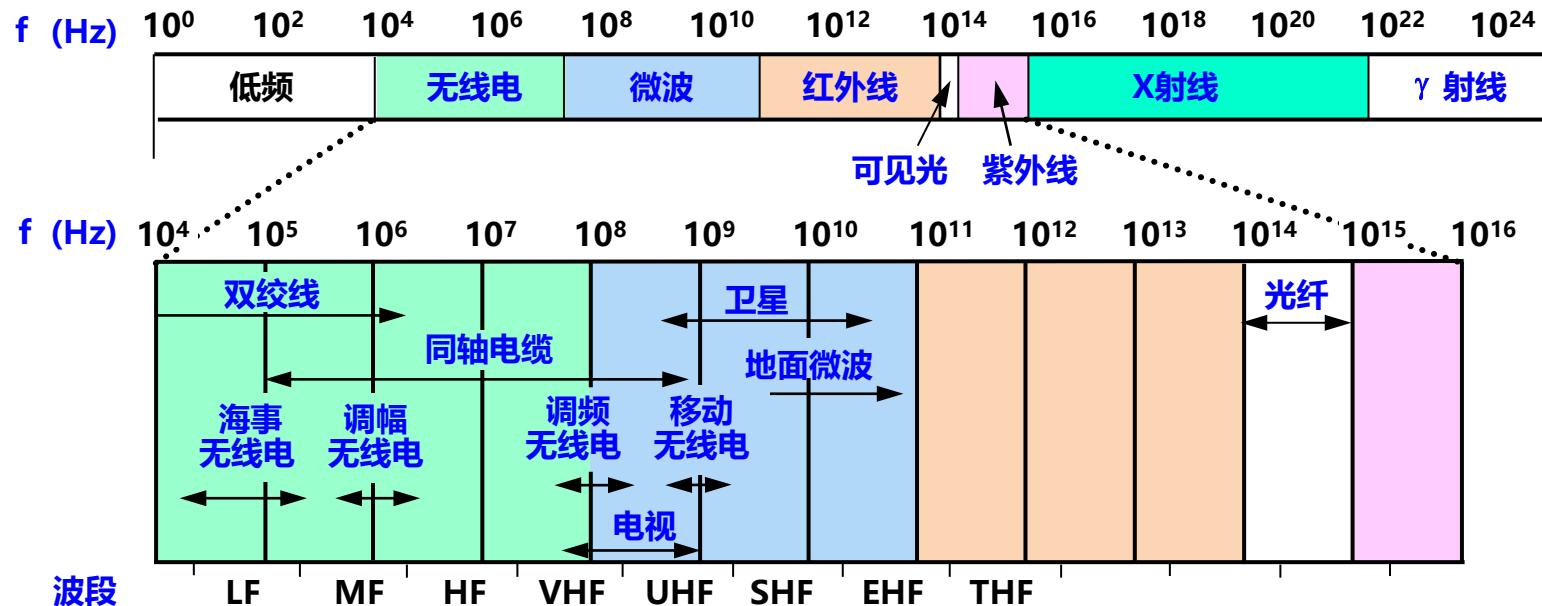
## 2.3 物理层下面的传输媒体

- 传输媒体是数据传输系统中在发送器和接收器之间的**物理通路**。
- 两大类：
  - ◆ **导引型传输媒体**：电磁波被导引沿着固体媒体（铜线或光纤）传播。
  - ◆ **非导引型传输媒体**：指自由空间。非导引型传输媒体中电磁波的传输常称为**无线传输**。



## 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 导引型传输媒体

### 1. 双绞线

- **最古老但又最常用的传输媒体。**
- **把两根互相绝缘的铜导线并排放在一起，然后用规则的方法绞合 (twist) 起来就构成了双绞线。**
- **绞合度越高，可用的数据传输率越高。**
- **2 大类：**
  - ◆ **无屏蔽双绞线 UTP。**
  - ◆ **屏蔽双绞线 STP。**

3 类线



5 类线



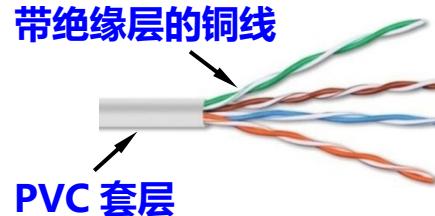
不同的绞合度的双绞线



## 1. 双绞线

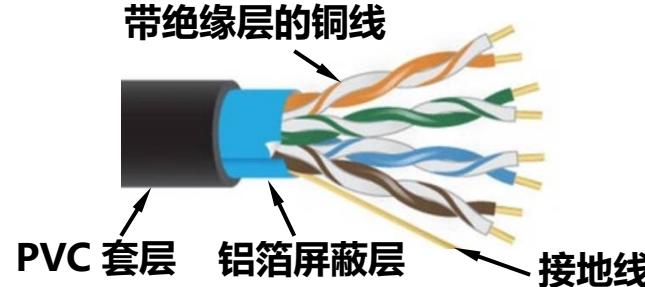
### ● 无屏蔽双绞线 UTP (Unshielded Twisted Pair) :

- ◆ 无屏蔽层。
- ◆ 价格较便宜。



### ● 屏蔽双绞线 STP (Shielded Twisted Pair) :

- ◆ 带屏蔽层。
- ◆ 都必须有接地线。





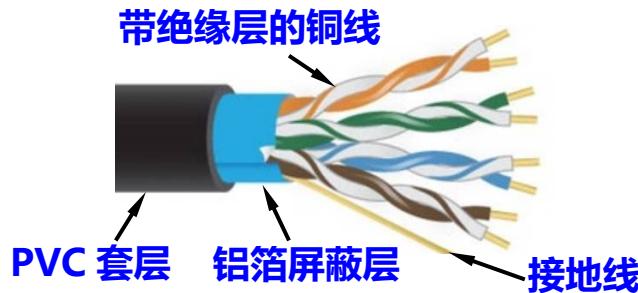
## 屏蔽双绞线 STP

- x/UTP：对整条双绞线电缆进行屏蔽。
  - ◆ F/UTP (F=Foiled)：表明采用铝箔屏蔽层。
  - ◆ S/UTP (S=braid Screen)：表明采用金属编织层进行屏蔽。
  - ◆ SF/UTP：表明在铝箔屏蔽层外面再加上金属编织层的屏蔽。
  - ◆ FTP 或 U/FTP：把电缆中的每一对双绞线都加上铝箔屏蔽层。U表明对整条电缆不另增加屏蔽层
  - ◆ F/FTP：在 FTP 基础上对整条电缆再加上铝箔屏蔽层。
  - ◆ S/FTP：在 FTP 基础上对整条电缆再加上金属编织层的屏蔽。

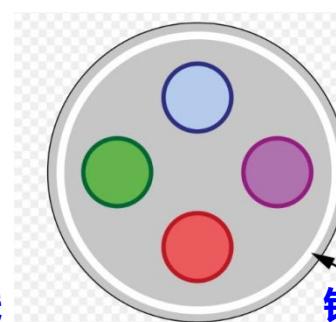


## 屏蔽双绞线 STP

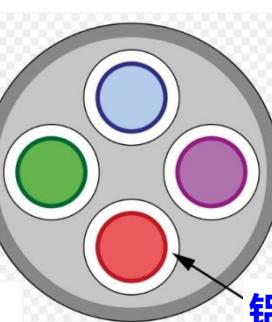
F/UTP



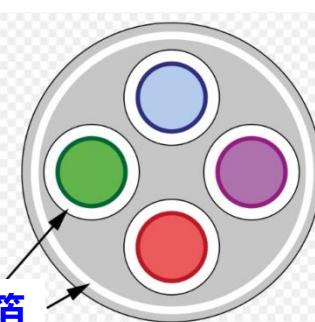
F/UTP



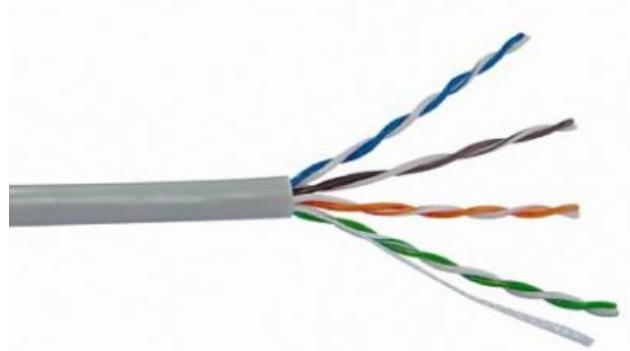
U/FTP



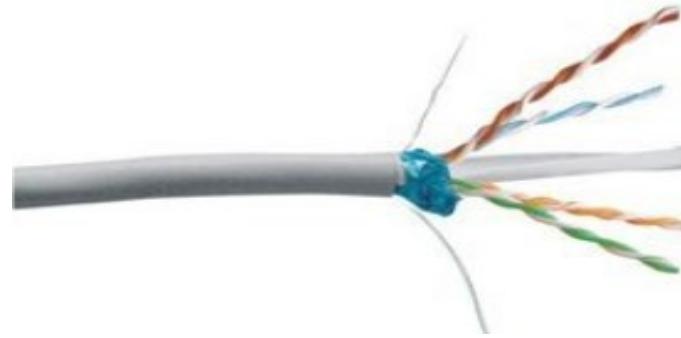
F/FTP



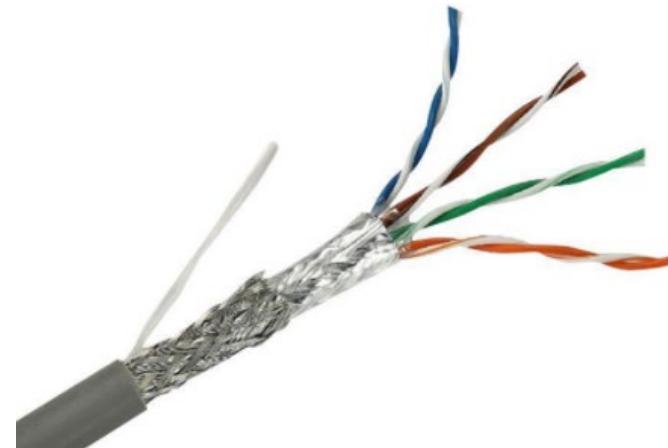
在抗干扰能力上，U/FTP 比 F/UTP 好，而 F/FTP 则是最好的。



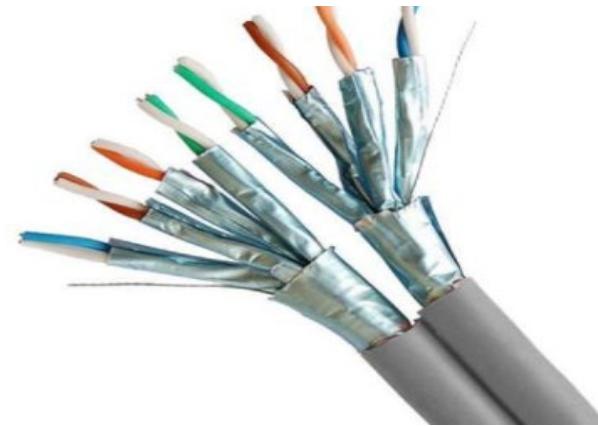
UTP无屏蔽双绞线



F/UTP屏蔽双绞线



SF/UTP屏蔽金属箔双绞线



F/FTP屏蔽双绞线

- 双绞线通常制作作为网线
- 有两种线序排列方式如右图
  - 标准是美国电子工业协会 (EIA) 和电信行业协会 (TIA) 指定



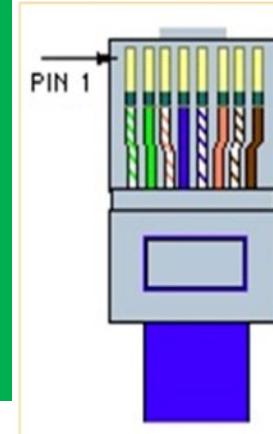
1、剪线



2、插入接头



3、压线钳压紧



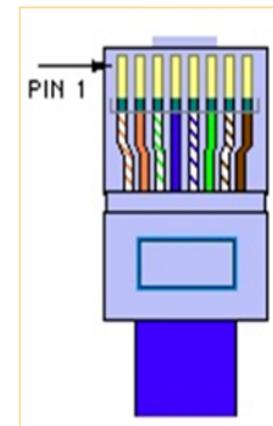
EIA/TIA568A

1 2 3 4 5 6 7 8  
白绿, 绿, 白橙, 蓝, 白蓝, 橙, 白棕, 棕

水晶头塑料弹片突起的一面朝下,  
棕线在最右边



EIA/TIA568A



EIA/TIA568B

1 2 3 4 5 6 7 8  
白橙, 橙, 白绿, 蓝, 白蓝, 绿, 白棕, 棕

水晶头塑料弹片突起的一面朝下,  
棕线在最右边



EIA/TIA568B



## 双绞线标准 EIA/TIA-568

### 常用绞合线的类别、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；传统以太网 (10 Mbit/s)
5	100 MHz	与 3 类相比增加了绞合度	传输速率 100 Mbit/s (距离 100 m)
5E(超5类)	125 MHz	与 5 类相比衰减更小	传输速率 1 Gbit/s (距离 100 m)
6	250 MHz	改善了串扰等性能，可使用屏蔽双绞线	传输速率 10 Gbit/s (距离 35 ~ 55 m)
6A	500 MHz	改善了串扰等性能，可使用屏蔽双绞线	传输速率 10 Gbit/s (距离100 m)
7	600 MHz	必须使用屏蔽双绞线	传输速率超过 10 Gbit/s, 距离 100 m
8	2000 MHz	必须使用屏蔽双绞线	传输速率 25 Gbit/s 或 40 Gbit/s, 距离 30 m



## 双绞线标准 EIA/TIA-568

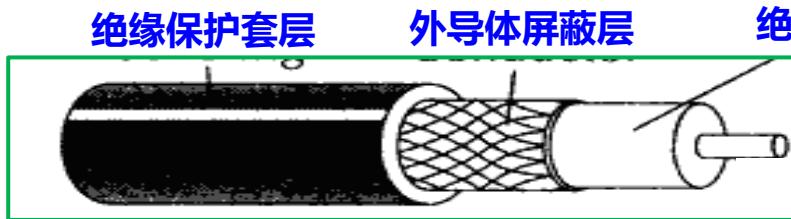
### 常用绞合线的类别、带宽和典型应用

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；传统以太网 (10 Mbit/s)
5			<ul style="list-style-type: none"><li>● 无论是哪种类别的双绞线，衰减都随频率的升高而增大。</li><li>● 双绞线的最高速率还与数字信号的编码方法有很大的关系。</li></ul>
5E(超5类)			
6	250 MHz	改善了串扰等性能，可使用屏蔽双绞线	传输速率 10 Gbit/s (距离 35 ~ 55 m)
6A	500 MHz	改善了串扰等性能，可使用屏蔽双绞线	传输速率 10 Gbit/s (距离 100 m)
7	600 MHz	必须使用屏蔽双绞线	传输速率超过 10 Gbit/s，距离 100 m
8	2000 MHz	必须使用屏蔽双绞线	传输速率 25 Gbit/s 或 40 Gbit/s，距离 30 m



## 2. 同轴电缆

- 由内导体铜质芯线（单股实心线或多股绞合线）、绝缘层、网状编织的外导体屏蔽层（也可以是单股的）以及保护塑料外层所组成。



内导体



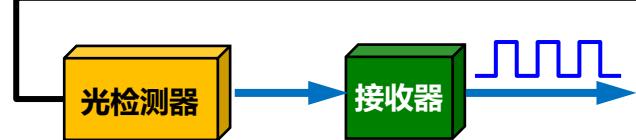
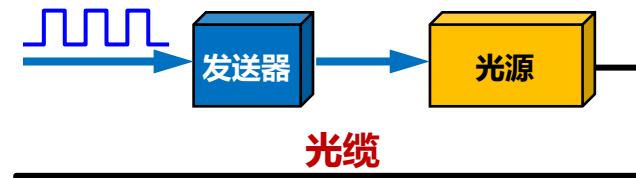
- 具有很好的抗干扰特性，被广泛用于传输较高速率的数据。
- 主要用在有线电视网的居民小区中，高质量同轴电缆的带宽接近1GHz。





### 3. 光缆

- 光纤是光纤通信的传输媒体。通过传递光脉冲来进行通信。
- 其传输带宽 ( $10^{14}$  Hz) 远远大于目前其他各种传输媒体的带宽。
- **发送端：**要有**光源**，在电脉冲的作用下能产生出光脉冲。
  - ◆ 光源：发光二极管，半导体激光器等。
- **接收端：**要有**光检测器**，利用光电二极管做成，在检测到光脉冲时还原出电脉冲。



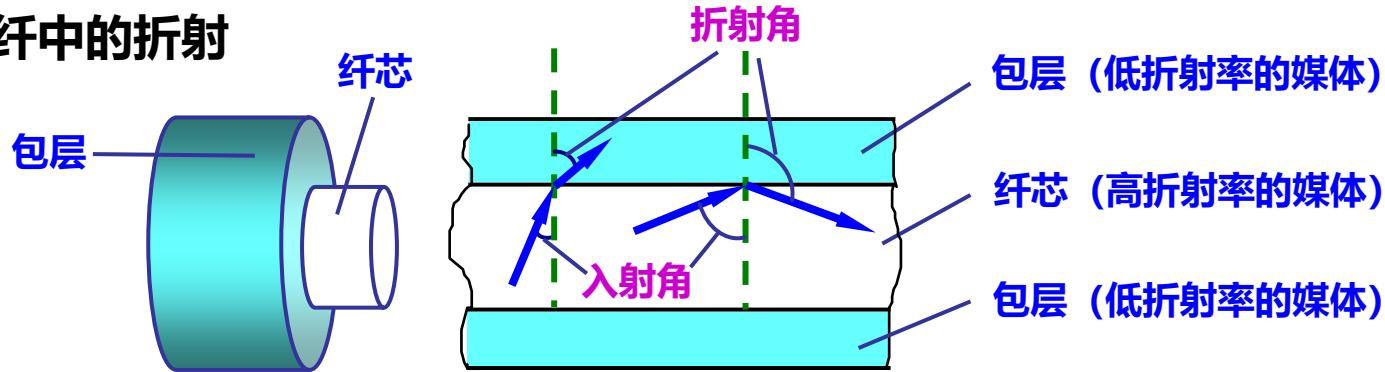
基本的光纤通信系统





## 光波在纤芯中的传播

### 光线在光纤中的折射



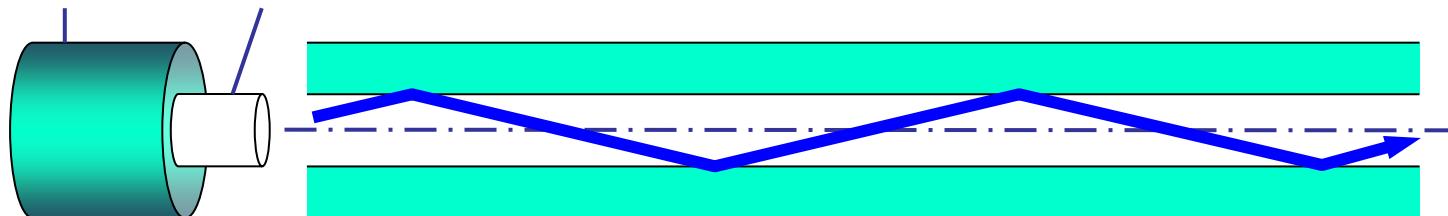
光纤通常由非常透明的石英玻璃拉成细丝，主要由纤芯和包层构成双层通信圆柱体。当光线从高折射率的媒体射向低折射率的媒体时，其折射角将大于入射角。如果入射角足够大，就会出现全反射，光也就沿着光纤传输下去。



## 光波在纤芯中的传播

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**  
光线在纤芯中传输数公里基本上没有什么衰耗，  
这是光纤通信得到飞速发展的最关键因素。



## 多模光纤与单模光纤

### ● 多模光纤

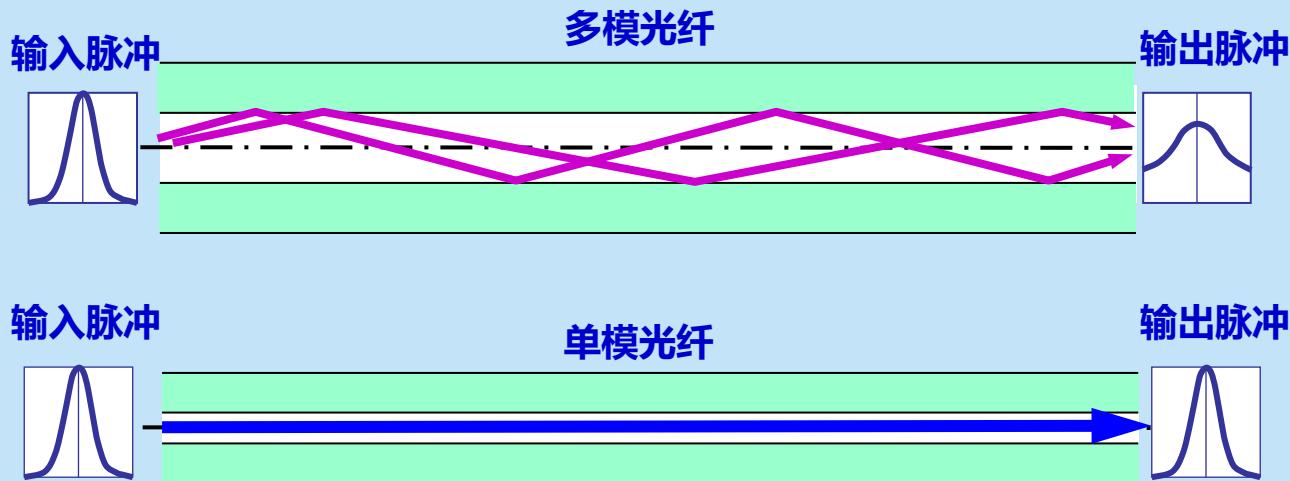
- ◆ 可以存在**多条不同角度入射的光线**在一条光纤中传输。
- ◆ 光脉冲在多模光纤中传输时会逐渐展宽，造成失真，只适合于近距离传输。

### ● 单模光纤

- ◆ 其直径减小到只有一个光的波长（几个微米），可使光线一直向前传播，**而不会产生多次反射**。
- ◆ 制造成本较高，但衰耗较小。
- ◆ 光源要使用昂贵的**半导体激光器**，不能使用较便宜的**发光二极管**。



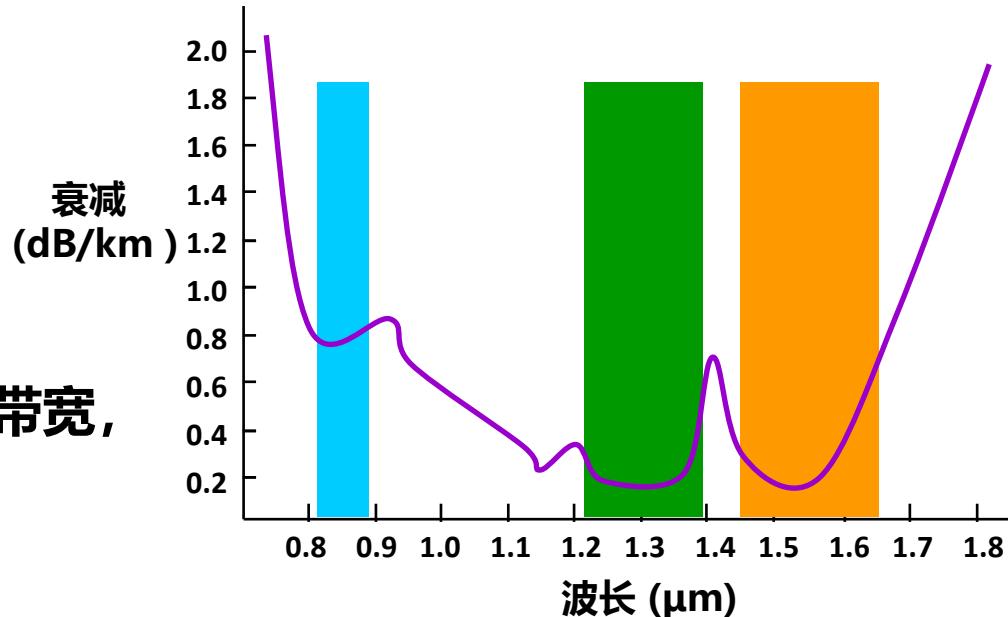
# 多模光纤与单模光纤





## 光纤通信中使用的光波的波段

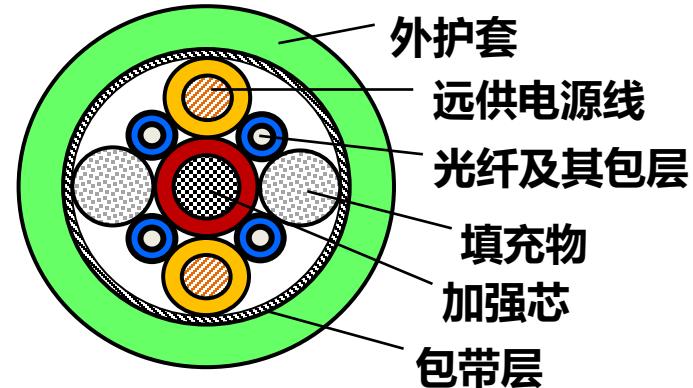
- 常用的三个波段的中心：
  - ◆ 850 nm,
  - ◆ 1300 nm,
  - ◆ 1550 nm。
- 所有这三个波段都具有 25000~30000 GHz 的带宽，通信容量非常大。





## 光缆

- 必须将光纤做成很结实的光缆。
  - ◆ 数十至数百根光纤，
  - ◆ 加强芯和填充物，
  - ◆ 必要时还可放入远供电源线，
  - ◆ 最后加上包带层和外护套。
- 使抗拉强度达到几公斤，完全可以满足工程施工的强度要求。





## 光纤优点

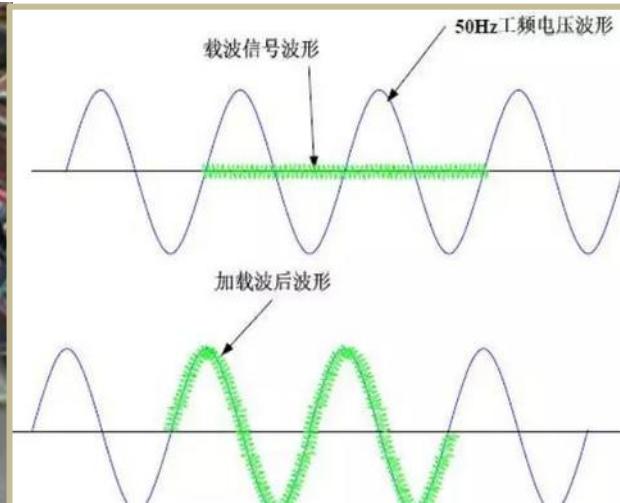
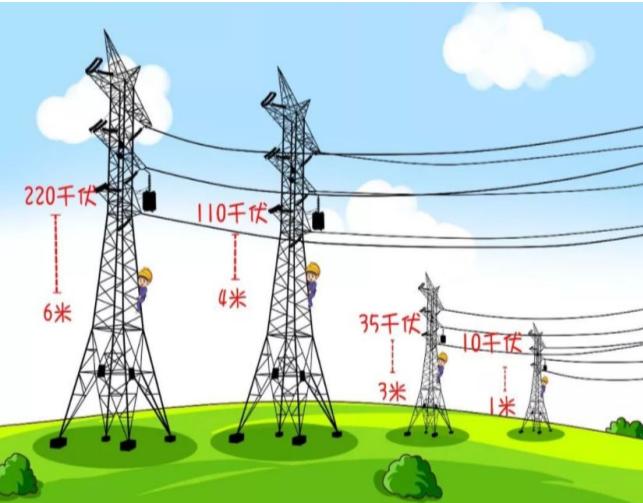
- 通信容量非常大
- 传输损耗小，中继距离长，对远距离传输特别经济。
- 抗雷电和电磁干扰性能好。
- 无串音干扰，保密性好，不易被窃听或截取数据。
- 体积小，重量轻。

现在已经非常广泛地应用在计算机网络、电信网络和有线电视网络的主干网络中。



## 架空明线

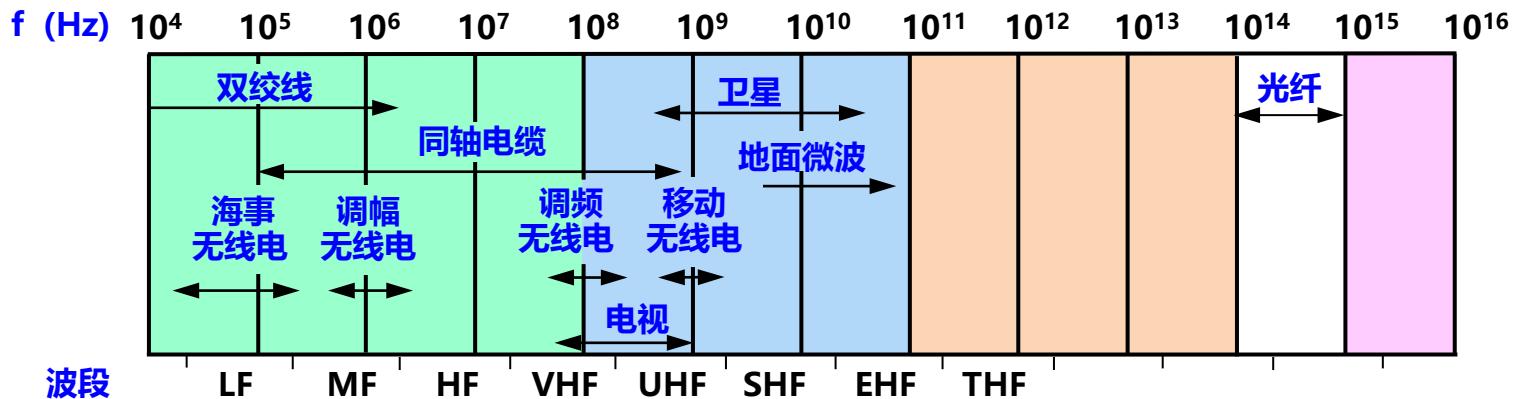
- 电力载波是电力系统特有的通信方式
  - 利用现有电力线，通过载波方式将模拟或数字信号进行高速传输
- 电力线是指输送电能的电力线路
  - 按结构形式的不同，输电线路分架空输电线路和电缆线路
  - 架空输电线由线路杆塔和电力线组成





## 2.3.2 非导引型传输媒体

- 利用无线电波在自由空间的传播可较快地实现多种通信，因此将自由空间称为“非导引型传输媒体”。
- 无线传输所使用的频段很广： $LF \sim THF$  ( $30\text{ kHz} \sim 3000\text{ GHz}$ )
- Low, Middle, High, Very, Ultra, Super, Extremely, Tremendously
- 低频、中频、高频、甚高频、特高频、超高频、极高频





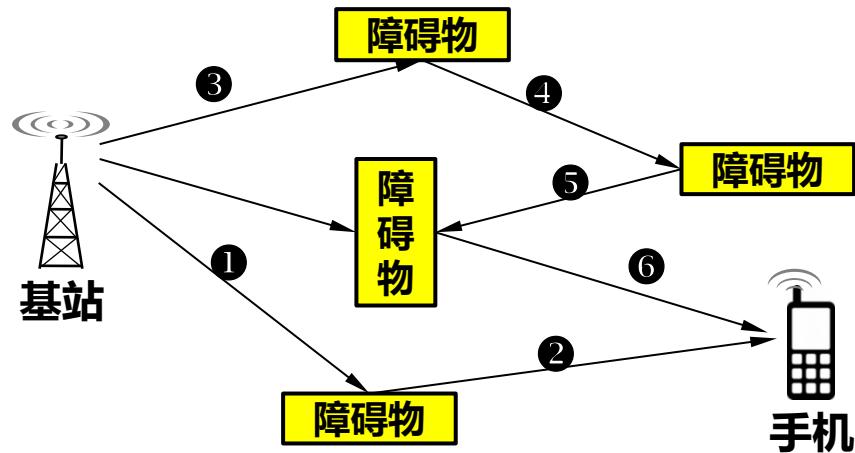
## 无线电微波通信

- 占有特殊重要的地位，如：手机无线蜂窝通信系统。
- 微波频率范围：
  - ◆ 300 MHz~300 GHz (波长1 m ~ 1 mm) 。
  - ◆ 主要使用：2 ~ 40 GHz。
- 在空间主要是**直线**传播。
  - ◆ 地球表面：传播距离受到限制，一般只有 50 km左右。
  - ◆ 100 m 高的天线塔：传播距离可增大到 100 km。



## 多径效应

- 基站发出的信号可以经过多个障碍物的数次反射，从多条路径、按不同时间等到达接收方。多条路径的信号叠加后一般都会产生很大的失真，这就是所谓的**多径效应**。

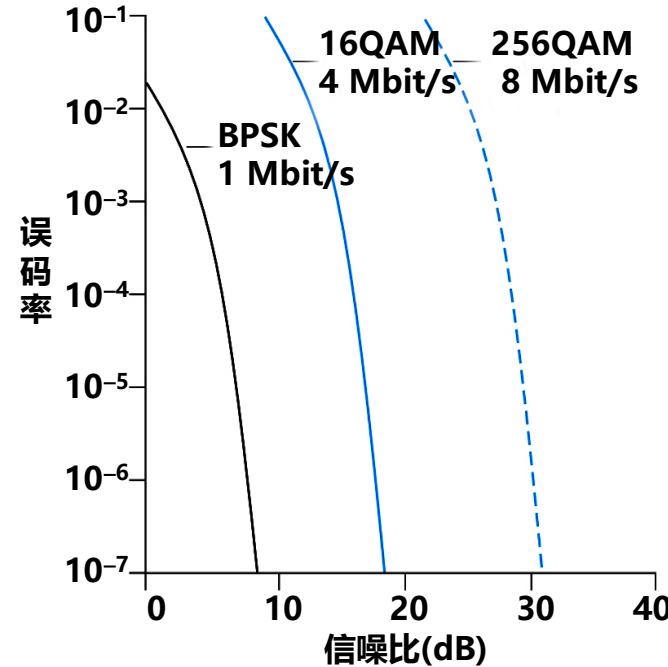


信号从  
①→② 和 ③→④→⑤→⑥  
两条路径到达手机。



## 误码率（即比特错误率）不能大于可容许的范围

- 对于给定的调制方式和数据率，信噪比越大，误码率就越低。
- 对于同样的信噪比，具有更高数据率的调制技术的误码率也更高。
- 如果用户在进行通信时不断改变自己的地理位置，就会引起无线信道特性的改变，因而信噪比和误码率都会发生变化。

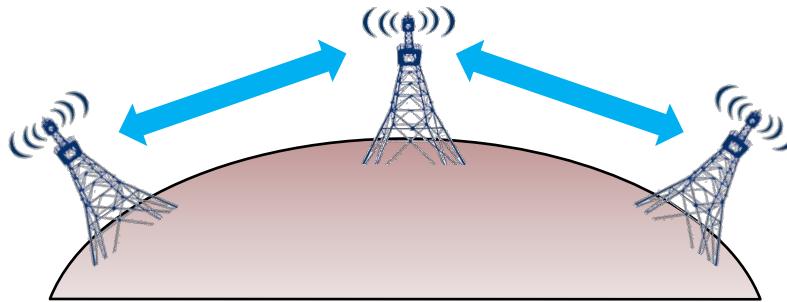


理想无线信道的误码率与信噪比、调制方式、数据率的关系

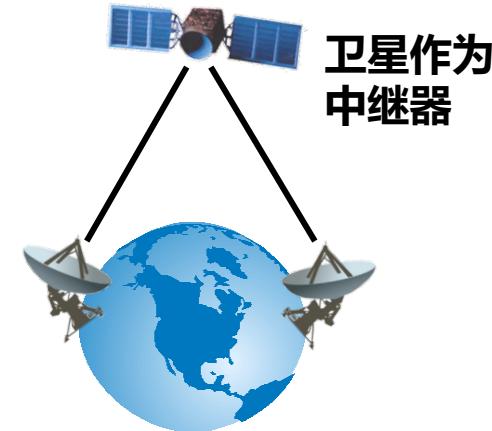


## 远距离微波通信：微波接力

- **微波接力：**中继站把前一站送来的信号**放大后再发送到下一站。**



100 m 高的天线塔可使传播距离  
增大到 100 公里



同步地球卫星通信覆盖区的跨度  
达 18000 多公里



## 远距离微波通信：微波接力

- **主要特点：**

- ◆ 微波波段频率很高，频段范围很宽，其通信信道的容量很大。
- ◆ 工业干扰和天电干扰对微波通信的危害小，微波传输质量较高。
- ◆ 与相同容量和长度的电缆载波通信比较，微波接力通信建设投资少，见效快，易于实施。

- **主要缺点：**

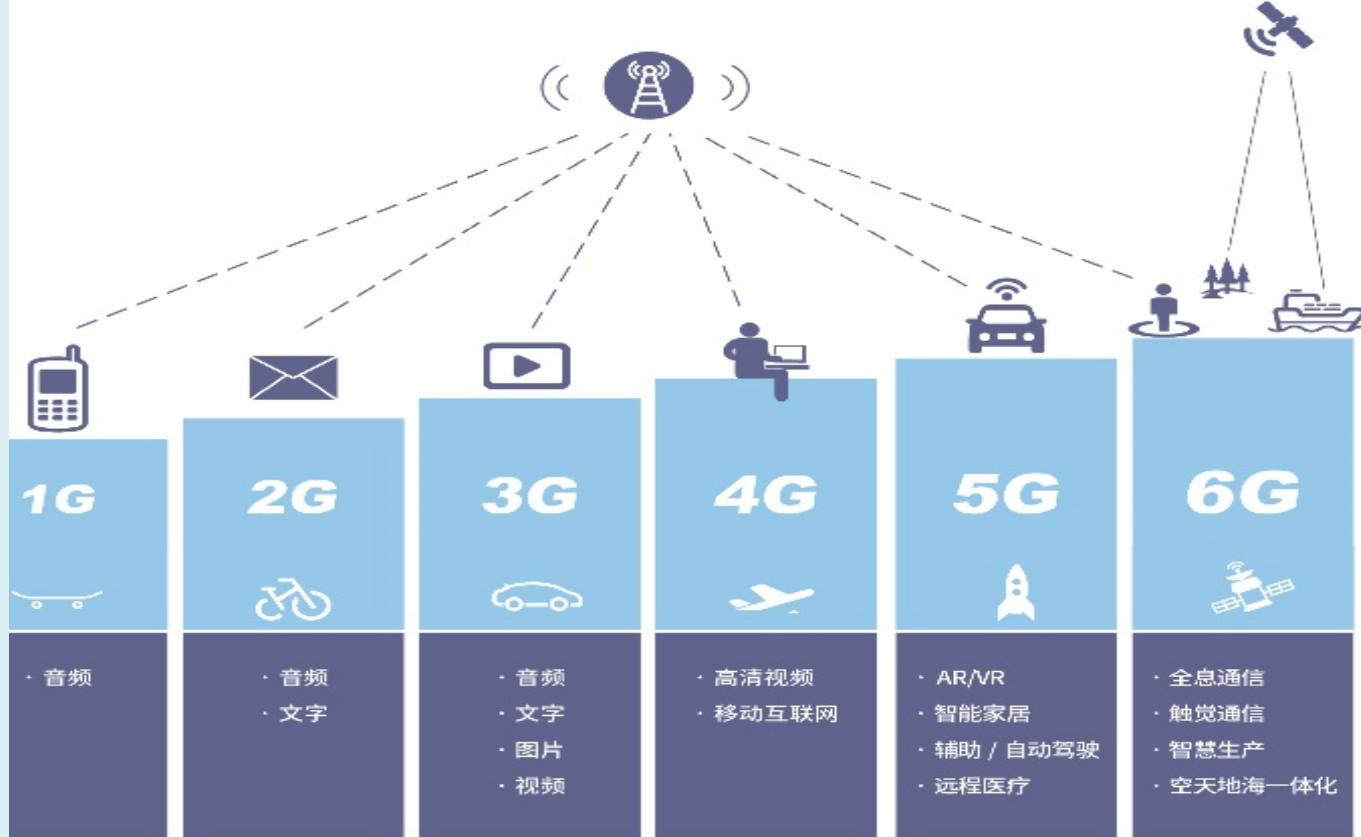
- ◆ 相邻站之间必须直视（常称为视距 LOS (Line Of Sight)），不能有障碍物，存在多径效应。
- ◆ 有时会受到恶劣气候的影响。
- ◆ 与电缆通信系统比较，微波通信的隐蔽性和保密性较差。
- ◆ 对大量中继站的使用和维护要耗费较多的人力和物力。

从最早的1G到5G，每一代移动通信的升级，信息传输的速度都会翻倍



## 无线通信系统：从1G到6G

从1G到4G主要解决了“人-人”间的网络连接，实现了“沟通泛在”；5G网络则打造了“人-机-物”工业互联体系，正在推动“信息泛在”成为现实；作为5G的延续，6G网络将进一步使万物的连接延伸至智慧层面，达到“人-自然-智慧”的连接与融合，实现“智能泛在”



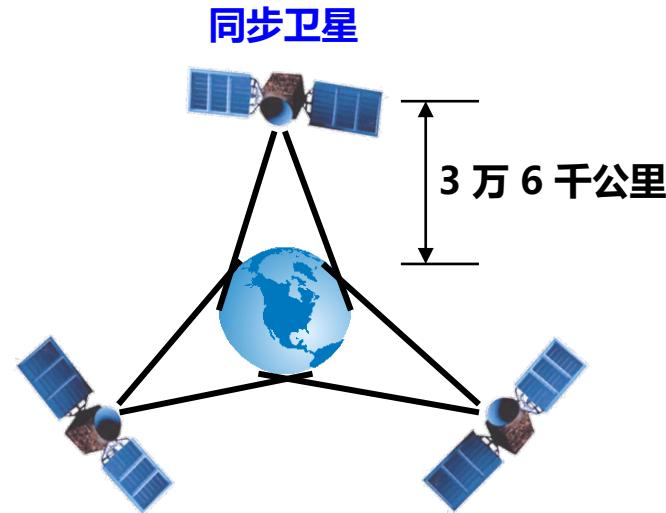


## 卫星通信

- 通信容量大，通信距离远，通信比较稳定，通信费用与通信距离无关。
- 但传播时延较大：在 250~300 ms之间。

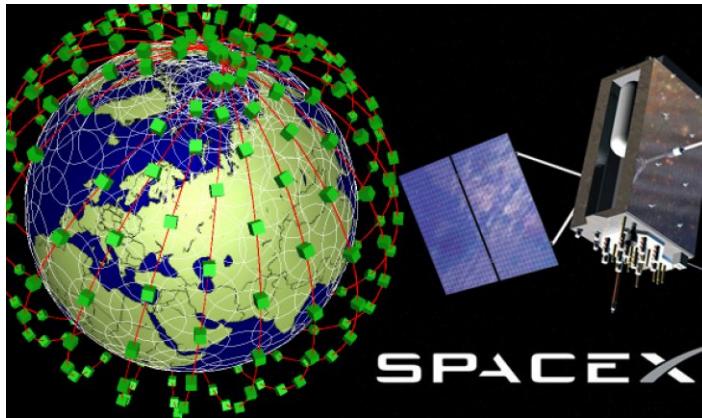
请注意：“卫星信道的传播时延较大”并不等于“用卫星信道传送数据的时延较大”。

- 保密性相对较差。
- 造价较高。



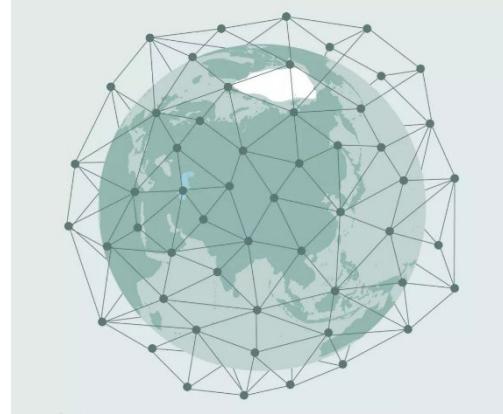


## 卫星通信



SpaceX 在 2015 年 1 月提出了  
“星链”（Starlink）计划

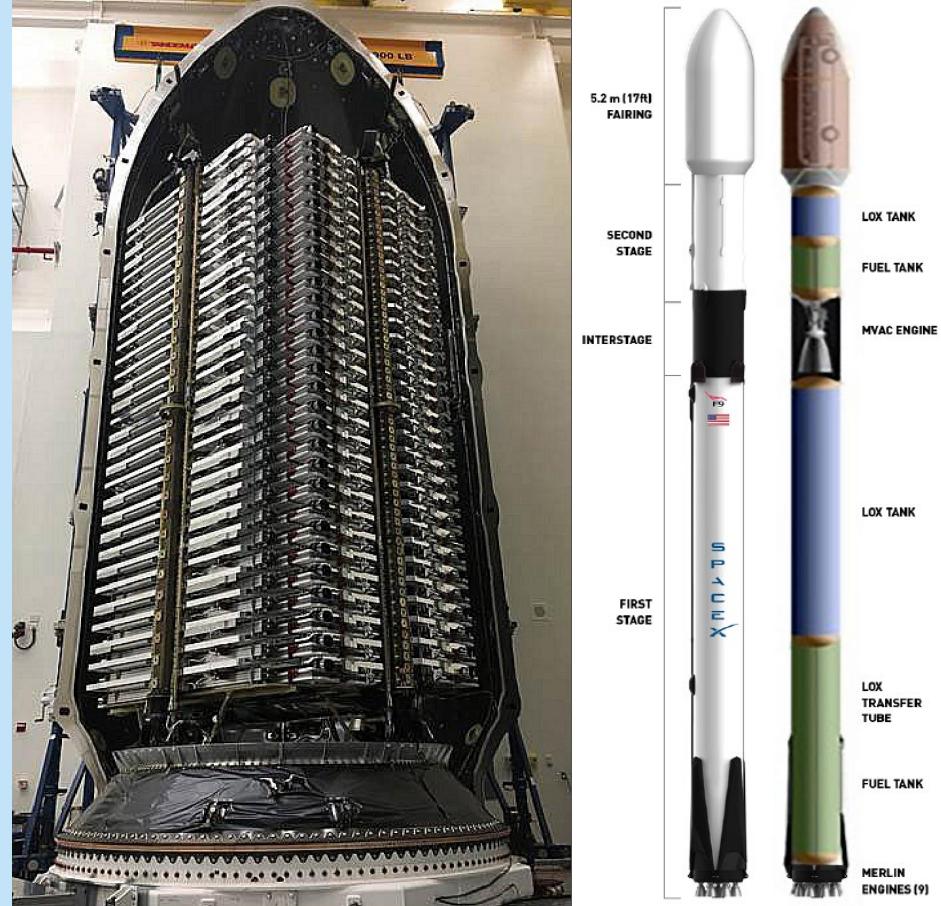
**低轨道卫星**通信系统（卫星高度在 2000 公里以下）已开始使用。目前，大功率、大容量、低轨道宽带卫星已开始在空间部署，并构成了空间高速链路。



鸿雁卫星星座通信系统

# SpaceX Starlink “星链” 互联网

- 2015年1月，马斯克宣布SpaceX计划将约1.2万颗通信卫星发射到轨道，这一项目被命名为“星链”(Starlink)。
- 2019年5月，SpaceX利用猎鹰9号运载火箭成功将“星链”首批60颗卫星送入轨道。
- 2021年2月，SpaceX发射了60颗星链互联网卫星进入轨道，这是猎鹰9号火箭的第50次发射。
- 目前星链卫星互联网服务已经拥有1万多名用户。



一箭60星示意图

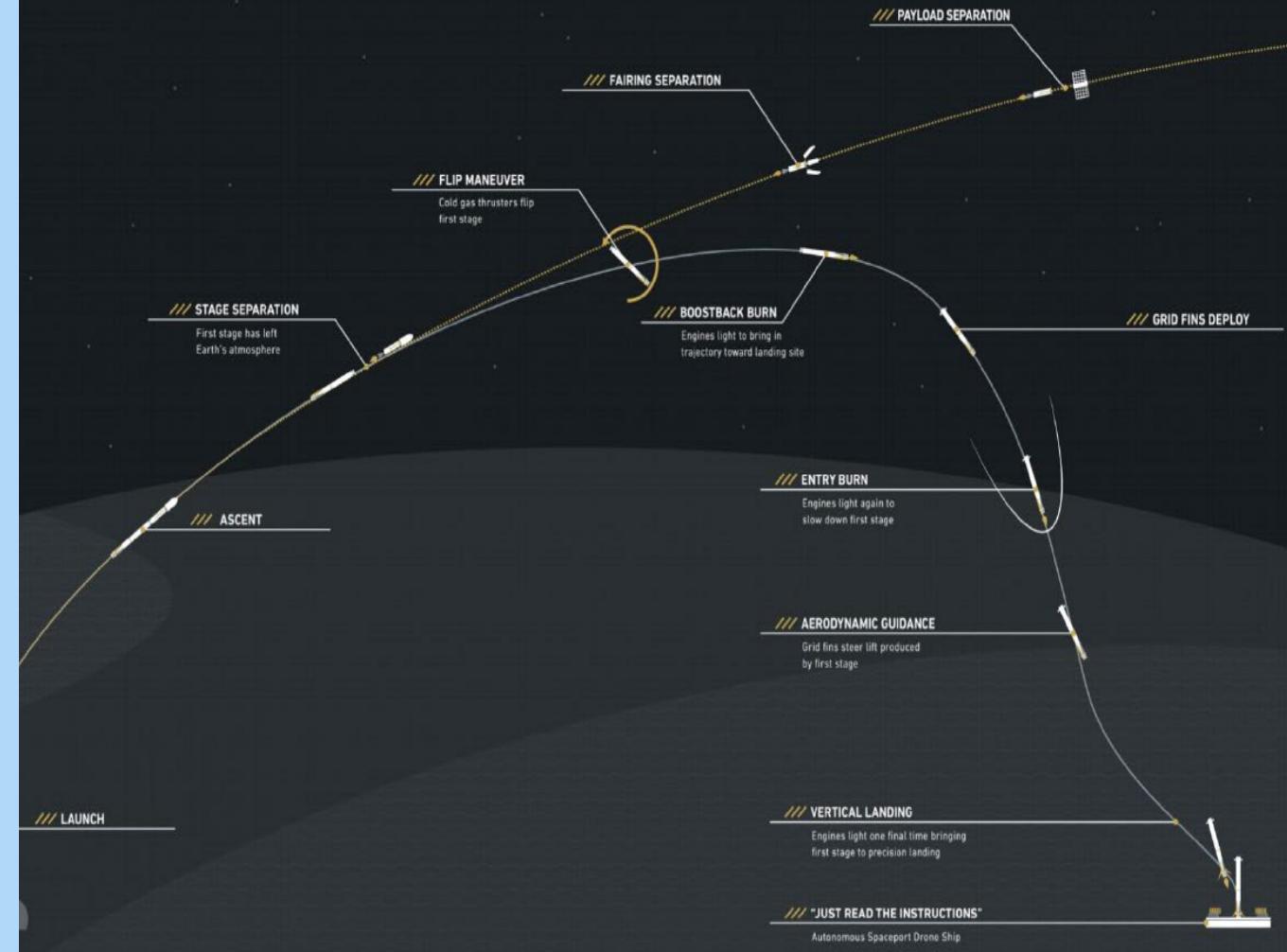
猎鹰9号火箭

# 可回收火箭

SpaceX的猎鹰

(Falcon) 运载火箭

系列是首款也是唯一一种具有可重用能力的轨道级火箭。根据执行任务所需的性能，猎鹰将降落在其中一艘无人驾驶无人机上，最终降落在海洋或者发射台附近的一个着陆区中。



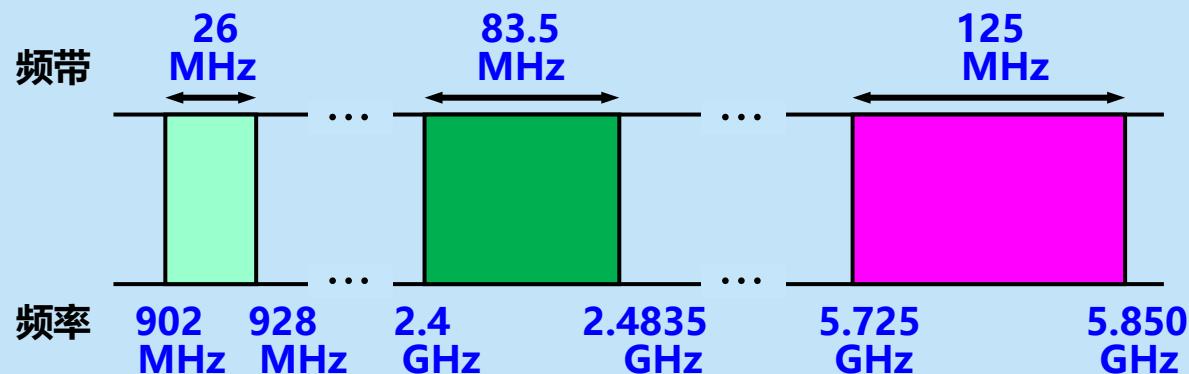


## 无线局域网使用的 ISM 频段

**无线局域网：**使用无线信道的计算机局域网。

**无线电频段：**通常必须得到无线电频谱管理机构的**许可证**。

**ISM 频段：**可以自由使用 (Industrial、Scientific与Medical的缩写) 。





## 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

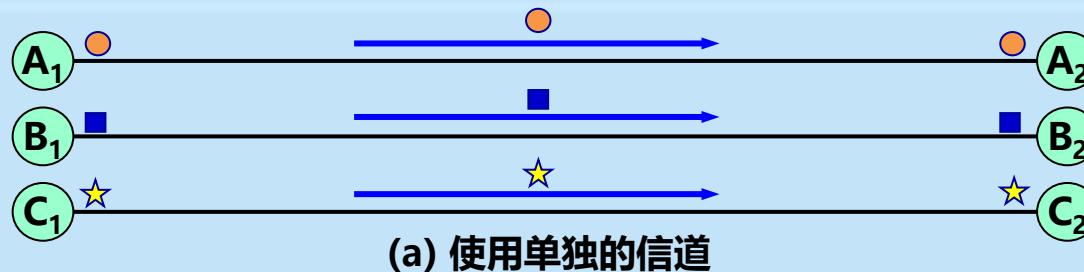
### 2.4.3

### 码分复用



## 2.4.1 频分复用、时分复用和统计时分复用

- **复用** (multiplexing) : 允许用户使用一个共享信道进行通信。





## 频分复用 FDM (Frequency Division Multiplexing)

- 最基本，例如：有N路信号要在同一个信道中传送。使用调制的方法，把各路信号分别搬移到适当的频率位置，使彼此不产生干扰。
- 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。
- 所有用户在**同样的时间**占用**不同的带宽**（即频带）资源。



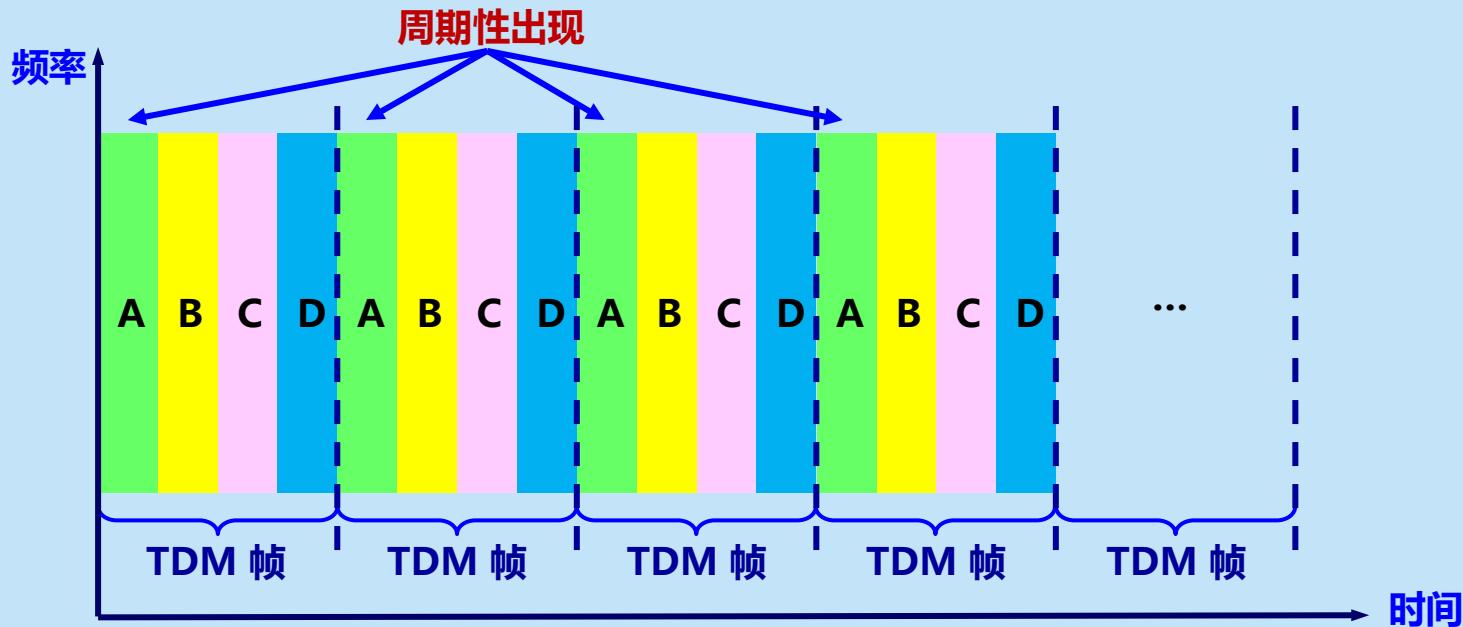


## 时分复用 TDM (Time Division Multiplexing)

- 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。
- 所有用户**在不同的时间占用同样的频带宽度**。



## 时分复用 TDM (Time Division Multiplexing)





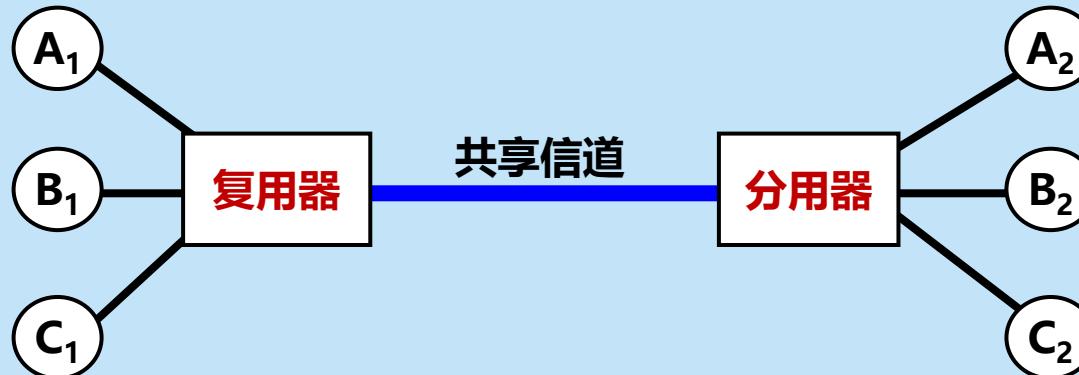
## 频分多址与时分多址

- 可让 N 个用户各使用一个频带，或让更多的用户轮流使用这 N 个频带。
- 后一种方式称为**频分多址接入 FDMA** (Frequency Division Multiple Access)，简称为**频分多址**。
- 可让 N 个用户各使用一个时隙，或让更多的用户轮流使用这 N 个时隙。
- 后一种方式称为**时分多址接入 TDMA** (Time Division Multiple Access)，简称为**时分多址**。



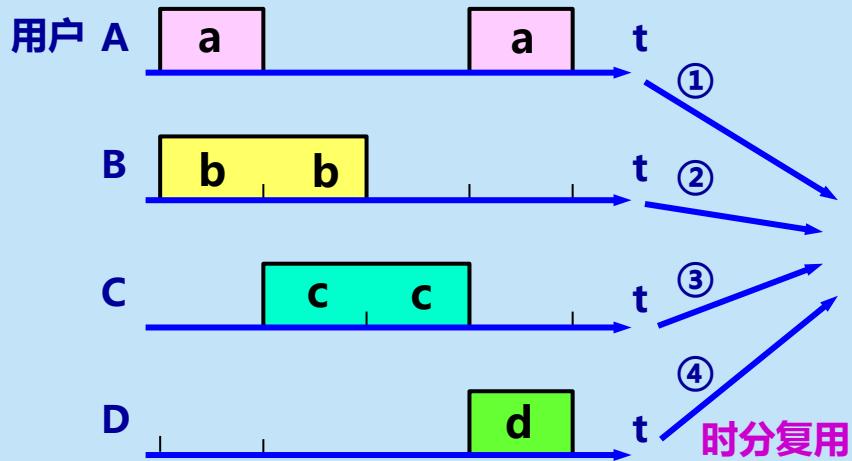
## 复用器 (multiplexer) 和分用器 (demultiplexer)

- 复用器和分用器总是成对使用。
- 复用要付出代价（共享信道由于带宽较大因而费用较高，再加上复用器和分用器）。
- 如果复用的信道数量较大，经济上还是合算的。

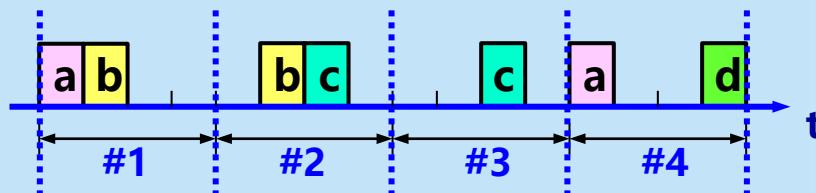




## 时分复用会导致信道利用率不高

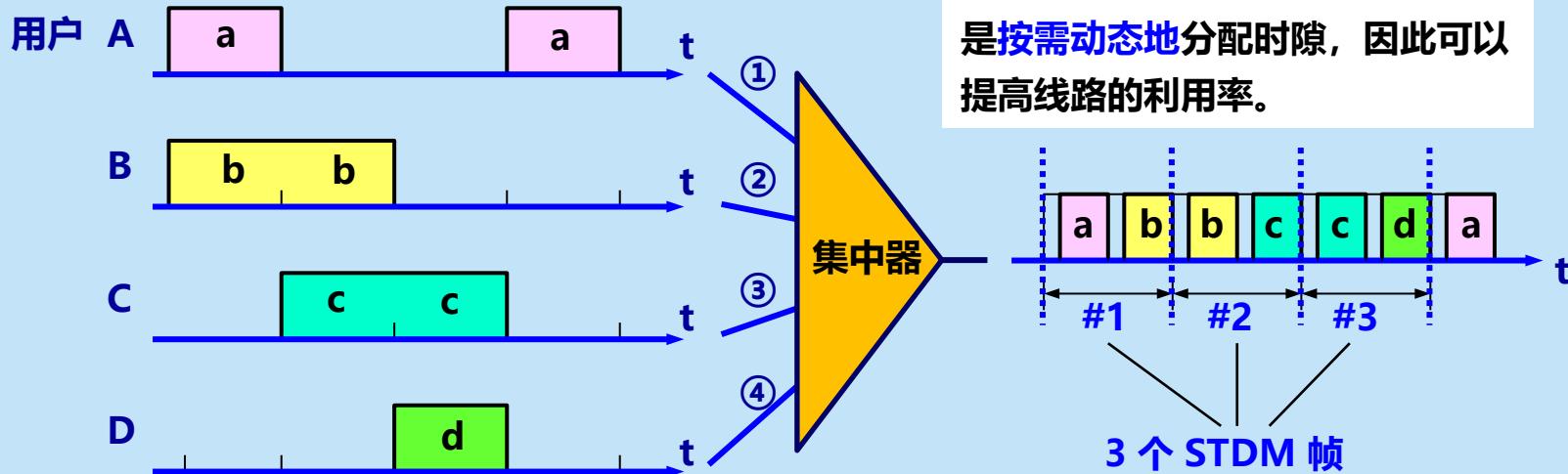


当用户暂时无数据发送时，分配给该用户的时隙只能处于空闲状态。





## 统计时分复用 STDM (Statistic TDM)



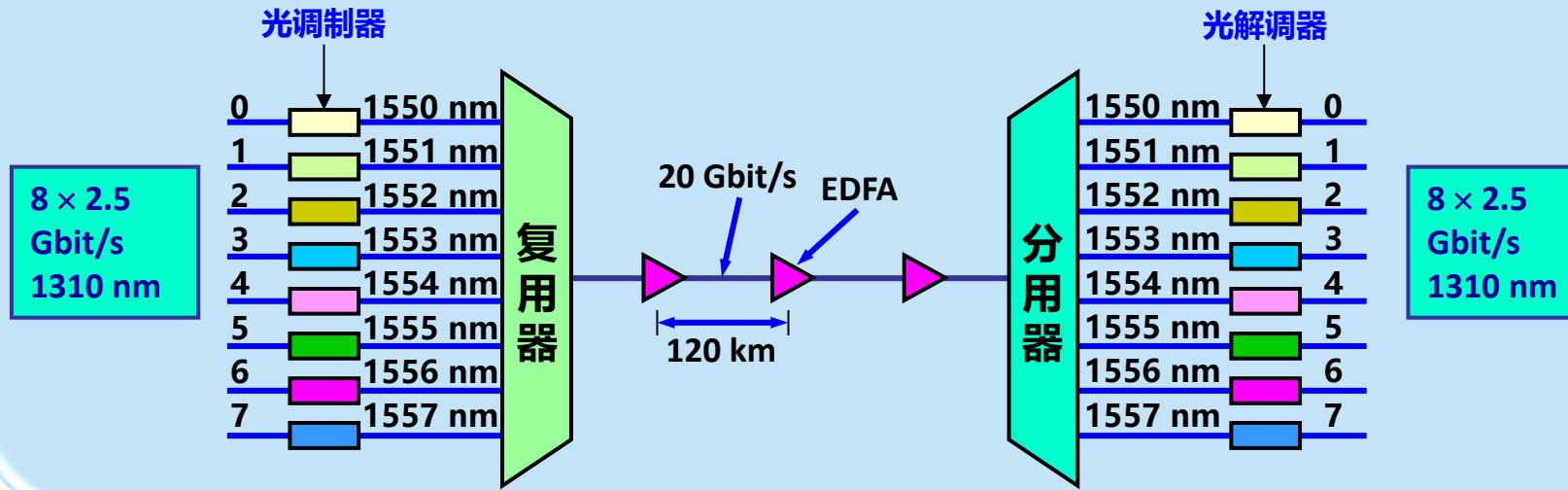
各用户有了数据就随时发往集中器的输入缓存，然后集中器按顺序依次扫描输入缓存，当一个帧的数据放满了，就发送出去。

注意：STDM 帧中的时隙不是固定分配给某个用户的，因此每个时隙中还必须有用户的地址信息（图中每个时隙前面的短时隙）。



## 2.4.2 波分复用

**波分复用 WDM (Wavelength Division Multiplexing) :** 光的频分复用。  
使用一根光纤来同时传输多个光载波信号。



8路传输速率2.5Gbit/s的光载波（波长1310nm），调制后，波长变为1550 – 1557nm，总速率达到20Gbit/s。EDFA是一种光放大器。



## 2.4.3 码分复用

- 每一个用户可以在**同样的时间使用同样的频带**进行通信。
- 各用户使用经过特殊挑选的**不同码型**，因此不会造成干扰。
- 当**码分复用 CDM** (Code Division Multiplexing) 信道为多个**不同地址**的用户所共享时，就称为**码分多址 CDMA** (Code Division Multiple Access)。



## CDMA 工作原理

- 将每一个比特时间再划分为  $m$  个短的间隔，称为码片 (chip)。
- 为每个站指派一个唯一的  $m$  bit 码片序列。
  - ◆ 发送比特 1：发送自己的  $m$  bit 码片序列。
  - ◆ 发送比特 0：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 → 00011011

0 → 11100100

按惯例，把0记为-1,1记为+1,

则码片序列：(-1 -1 -1 +1 +1 -1 +1 +1)



## 码片序列实现了扩频

- 要发送信息的数据率 =  $b$  bit/s, 实际发送的数据率 =  $mb$  bit/s,  
同时, 所占用频带宽度也提高到原来的  $m$  倍。
- 扩频通常有 2 大类:
  - ◆ **直接序列扩频 DSSS** (Direct Sequence Spread Spectrum)。
  - ◆ **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：各不相同，且必须互相正交 (orthogonal)。
- 正交：向量  $S$  和  $T$  的规格化内积 (inner product) 等于 0：

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

- 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 。

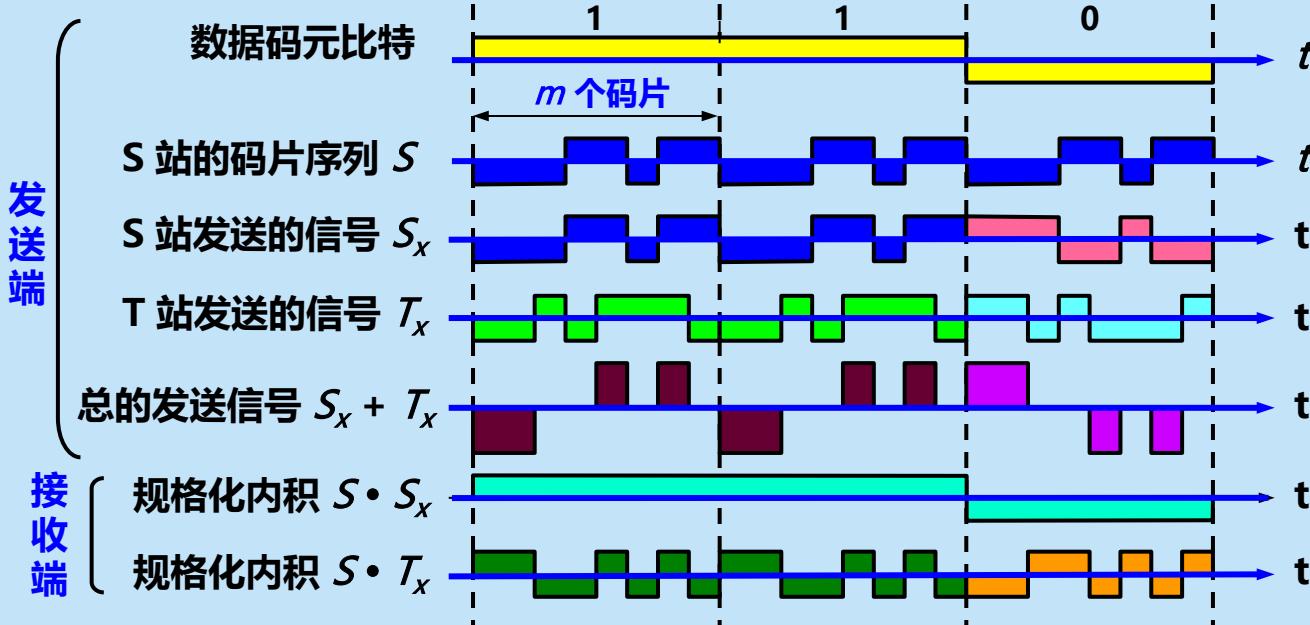
$$S \bullet S = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m S_i S_i = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m S_i^2 = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m (\pm 1)^2 = 1$$

- 一个码片向量和该码片反码的向量的规格化内积值是 -1。

$$S \bullet \bar{S} = -1$$



# CDMA 工作原理





## CDMA 举例

- 共有四个站进行码分多址CDMA通信，四个站的码片分别为
  - ◆ 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 )
- 问题
  - ◆ 现收到这样的码片序列：M= (-1 +1 -3 +1 -1 -3 +1 +1)
  - ◆ 问哪个站发送数据了？
  - ◆ 发送数据的站发送的1还是0？
- 求解
  - $A^*M = 1/8 * (1 -1 +3 +1 -1 +3 +1 +1) = 1$ , 因此A发送了1
  - 同理,  $B^*M = -1$ ,  $C^*M = 0$ ,  $D^*M = 1$
  - 即A、D发送了1, B发送了0, C未发数据。



## 2.5 数字传输系统

- 早期，电话网长途干线采用**频分复用 FDM** 的模拟传输方式。
- 目前，大都采用**时分复用 PCM** 的**数字传输方式**。
- 现代电信网业务包括话音、视频、图像和各种数据业务。因此需要一种能承载来自其他**各种业务网络数据**的传输网络。
- 在数字化的同时，**光纤**开始成为长途干线最主要的传输媒体。



## 早期数字传输系统的缺点

- **速率标准不统一。** 两个互不兼容的国际标准：
  - ◆ 北美和日本的 T1 速率 (1.544 Mbit/s)
  - ◆ 欧洲的 E1 速率 (2.048 Mbit/s) 。
- **不是同步传输。** 主要采用准同步方式。
  - ◆ 各支路信号的时钟频率有一定的偏差，给时分复用和分用带来许多麻烦。



## 同步光纤网 SONET (Synchronous Optical Network)

- 1988年，美国推出的一个数字传输标准：SONET。
- 各级时钟都来自一个非常精确的主时钟。
- 为光纤传输系统定义了**同步传输**的线路速率等级结构：
  - ◆ 传输速率以 **51.84 Mbit/s** 为基础。对电信信号称为第 1 级同步传送信号 **STS-1 (Synchronous Transport Signal)**，对光信号则称为第 1 级光载波 **OC-1 (Optical Carrier)**。
  - ◆ 现已定义了从 **51.84 Mbit/s** (即 OC-1) 到 **9953.280 Mbit/s** (即 OC-192/STS-192) 的标准。



## 同步数字系列 SDH (Synchronous Digital Hierarchy)

- ITU-T 以美国标准 SONET 为基础制订的国际标准。
- 与 SONET 的主要不同：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/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

- 定义了标准光信号，规定了波长为 1310 nm 和 1550 nm 的激光源。
- 在物理层定义了帧结构。
- 使北美、日本和欧洲这三个地区三种不同的数字传输体制在 STM-1 等级上获得了统一。
- 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

- **宽带：**标准在不断提高（56kbit/s, 200kbit/s）。
- 美国联邦通信委员会 FCC 定义：

**宽带下行速率达 25 Mbit/s，宽带上行速率达 3 Mbit/s。**

- 从宽带接入的媒体来看，划分为 2 大类：
  - ◆ 有线宽带接入。
  - ◆ 无线宽带接入。



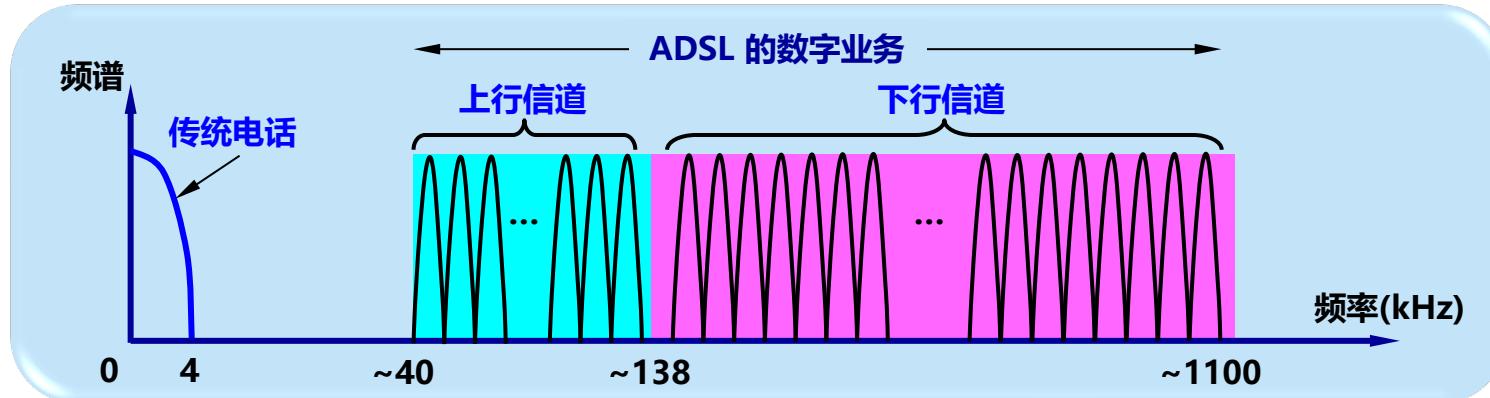
## 2.6.1 ADSL 技术

- **非对称数字用户线 ADSL (Asymmetric Digital Subscriber Line) 技术：**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。
- ADSL 技术把 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。
- **ADSL 的 ITU 的标准：** G.992.1 (或称 G.dmt) 。
- **非对称：**下行（从 ISP 到用户）带宽**远大于**上行（从用户到 ISP）带宽。



## ADSL 调制解调器

- 采用**离散多音调 DMT** (Discrete Multi-Tone) 调制技术。
- DMT 调制技术采用**频分复用 FDM** 方法。
- 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。
- 用户线的具体条件相差很大，因此ADSL**不能**保证固定的数据率。

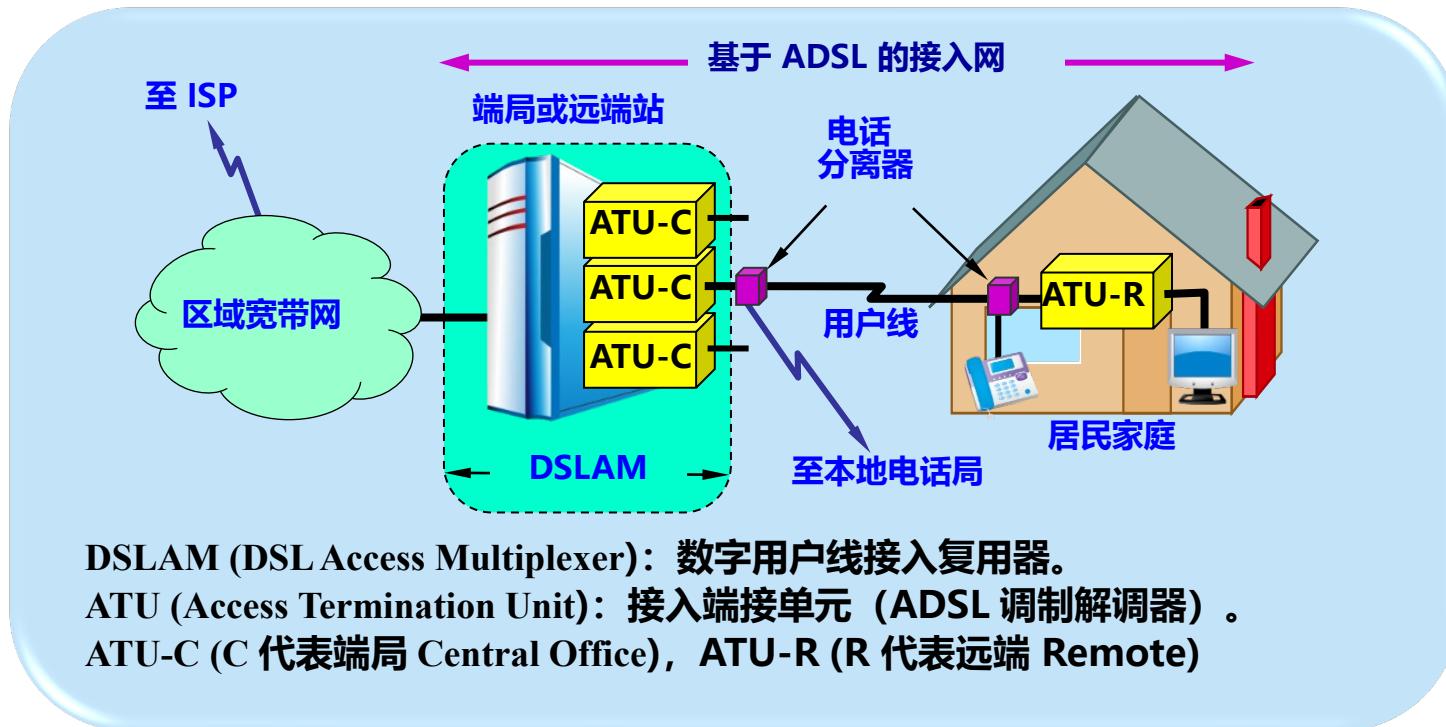


DMT 技术的频谱分布



## ADSL 的组成

数字用户线接入复用器 **DSLAM** (DSL Access Multiplexer) , 用户线和用户家中的一些设施。



**ADSL 最大好处：**  
可以利用现有电话网中的用户线  
(铜线) , 而不需要重新布线。

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

**ATU (Access Termination Unit):** 接入端接单元 (ADSL 调制解调器) 。

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



## 第二代 ADSL

- 包括 ADSL2 (G.992.3 和 G.992.4) 和 ADSL2+ (G.992.5) 。
- **主要改进：**
  - ◆ 通过提高调制效率得到了更高的数据率。
  - ◆ 采用了无缝速率自适应技术 SRA (Seamless Rate Adaptation)。
  - ◆ 改善了线路质量评测和故障定位功能。

ADSL 并不适合于企业，因为企业往往需要使用上行信道发送大量数据给许多用户。



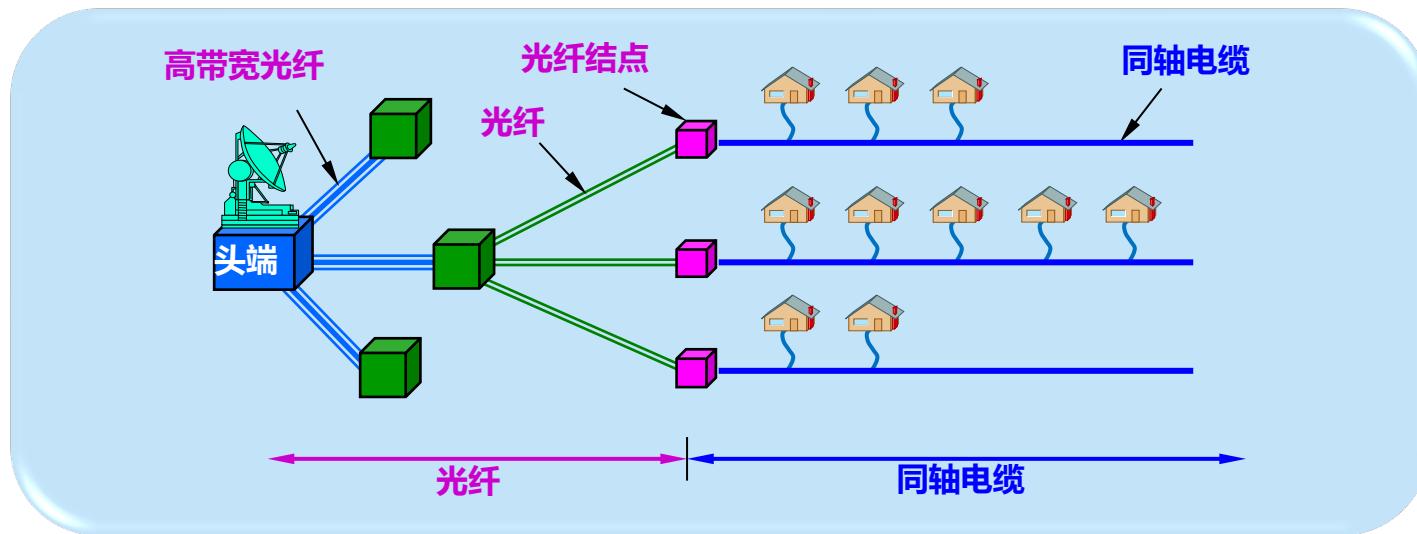
## xDSL

- SDSL (Symmetric DSL): 对称数字用户线
- HDSL (High speed DSL): 高速数字用户线
- VDSL (Very high speed DSL): 甚高速数字用户线
- Giga DSL: 超高速数字用户线
  - ◆ 华为公司于 2012 年首先研制成功样机。
  - ◆ 使用时分双工 TDD (Time Division Duplex) 和 OFDM 技术



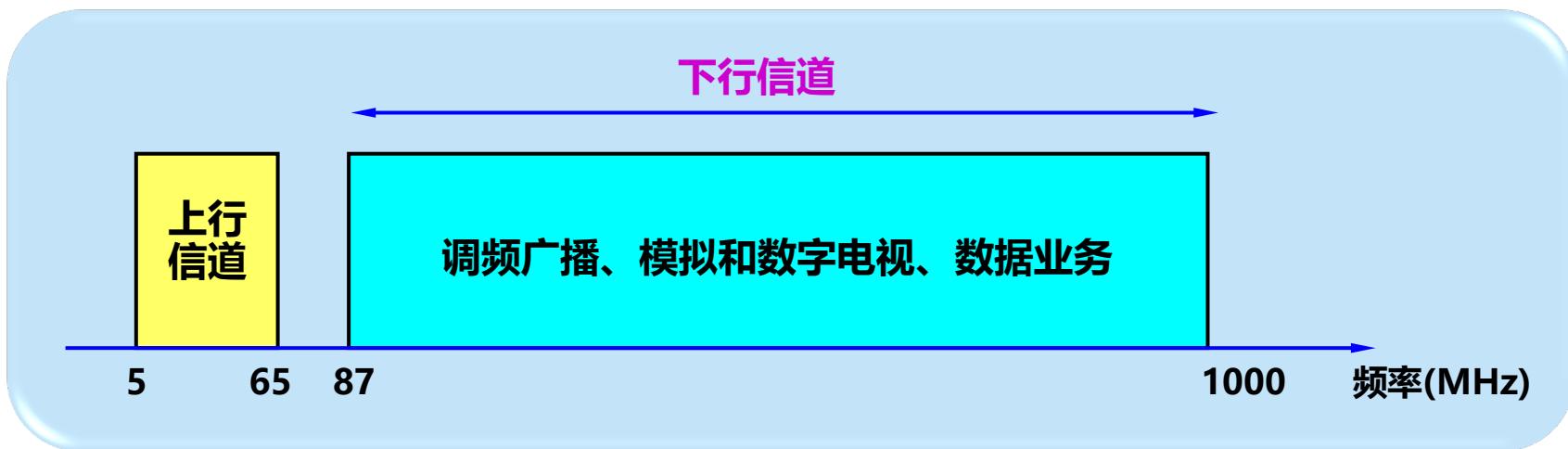
## 2.6.2 光纤同轴混合网 (HFC 网)

- HFC (Hybrid Fiber Coax) 网基于有线电视网 CATV 网。
- 改造：把原有线电视网中的同轴电缆主干部分改换为光纤





## HFC 网具有双向传输功能，扩展了传输频带



我国的 HFC 网的频带划分



## 机顶盒与电缆调制解调器 (set-top box)

- **机顶盒 (set-top box) :**
  - ◆ 连接在同轴电缆和用户的电视机之间。
  - ◆ 使现有的模拟电视机能够接收数字电视信号。
- **电缆调制解调器 (cable modem) :**
  - ◆ 将用户计算机接入互联网。
  - ◆ 在上行信道中传送交互数字电视所需的一些信息。
  - ◆ 不需要成对使用，而只需安装在用户端。
  - ◆ 复杂，必须解决共享信道中可能出现的冲突问题。

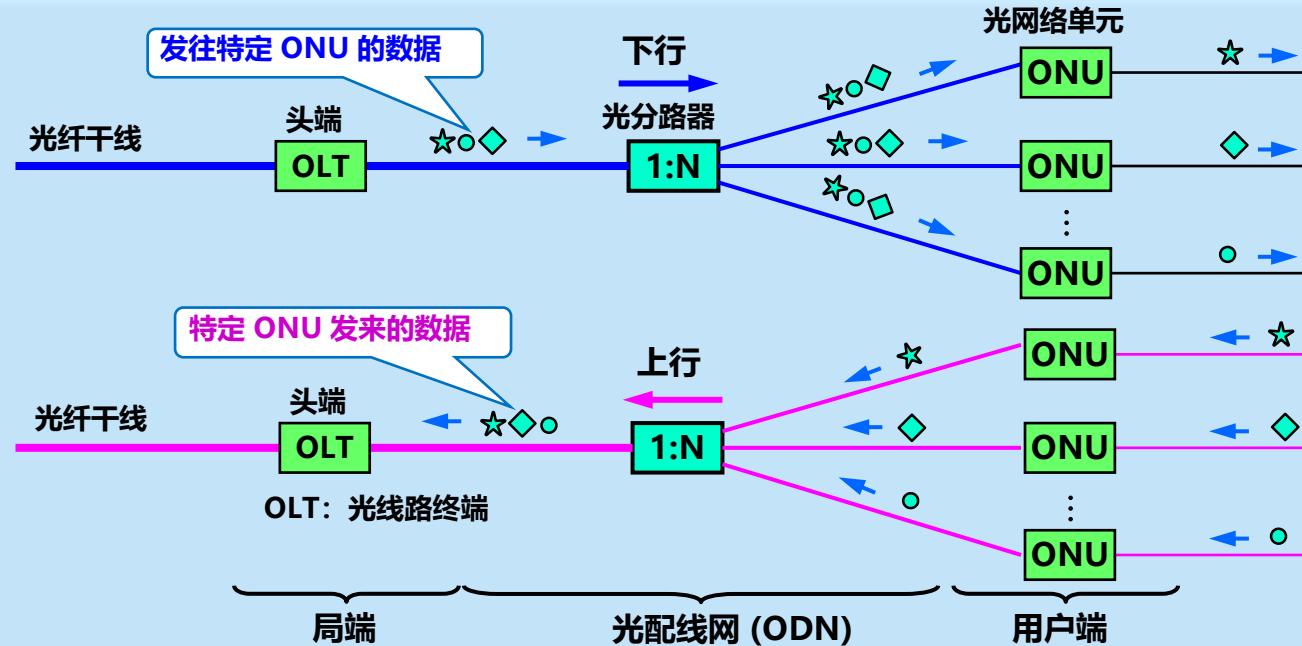


## 2.6.3 FTTx 技术

- 代表多种宽带光纤接入方式。
- **FTTx** 表示 Fiber To The... (光纤到...) , 例如:
  - ◆ 光纤到户 FTTH (Fiber To The Home): 在光纤进入用户的家门后, 才把光信号转换为电信号。
  - ◆ 光纤到大楼 FTTB (Fiber To The Building)
  - ◆ 光纤到路边 FTTC (Fiber To The Curb)
  - ◆ 光纤到小区 FTTZ (Fiber To The Zone)
  - ◆ 光纤到办公室 FTTO (Fiber To The Office)
  - ◆ 光纤到桌面 FTTD (Fiber To The Desk) 等。



## 光配线网 ODN (Optical Distribution Network)



**光配线网 ODN (Optical Distribution Network):** 位于光纤干线和广大用户之间。无源的光配线网常称为**无源光网络 PON (Passive Optical Network)**。



## 光配线网 ODN (Optical Distribution Network)

- 采用波分复用 WDM，上行和下行分别使用不同的波长。
- 2 种最流行的无源光网络 PON (Passive Optical Network)：
  - ◆ 以太网无源光网络 EPON (Ethernet PON)
    - 在链路层使用以太网协议，利用 PON 的拓扑结构实现以太网的接入。
    - 与现有以太网的兼容性好，并且成本低，扩展性强，管理方便。
  - ◆ 吉比特无源光网络 GPON (Gigabit PON)
    - 采用通用封装方法 GEM (Generic Encapsulation Method)，可承载多业务，且对各种业务类型都能够提供服务质量保证，总体性能比EPON好。
    - 成本稍高。