



计算机网络 (第 8 版)

谢希仁 编著



电子工业出版社
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY
<http://www.phei.com.cn>

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)。

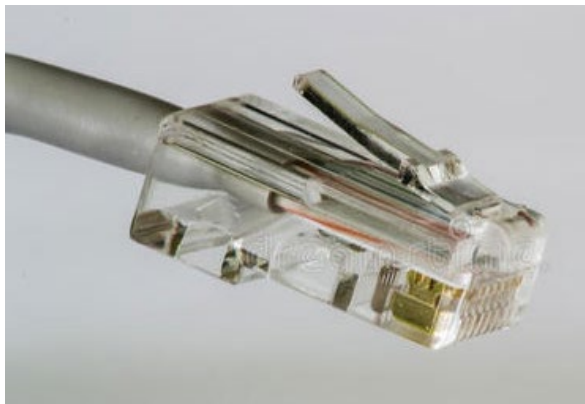


物理层的主要任务

- 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	$-5 \sim -35\text{dBm}$, 视各种Modem而定
阻 抗	600Ω
平衡特性	平衡输入/输出

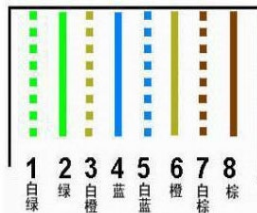
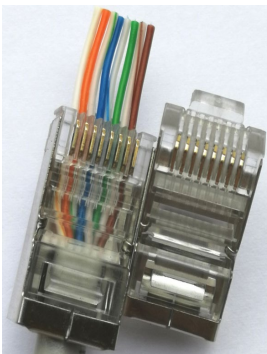
◆ ITU-T V/X系列有关

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	$-5 \sim -15\text{V}(\text{对地})$	$+5 \sim +15\text{V}(\text{对地})$	$\leq 20 \text{ kb/s}$
V.10/X.26	$-4 \sim -6\text{V}(\text{对地})$	$+4 \sim +6\text{V}(\text{对地})$	$\leq 300 \text{ kb/s}$
V.11/X.27	$-2 \sim -6\text{V}(\text{差动})$	$+2 \sim +6\text{V}(\text{差动})$	$\leq 10 \text{ Mb/s}$



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

10BASE-T RJ-45 接口功能特性

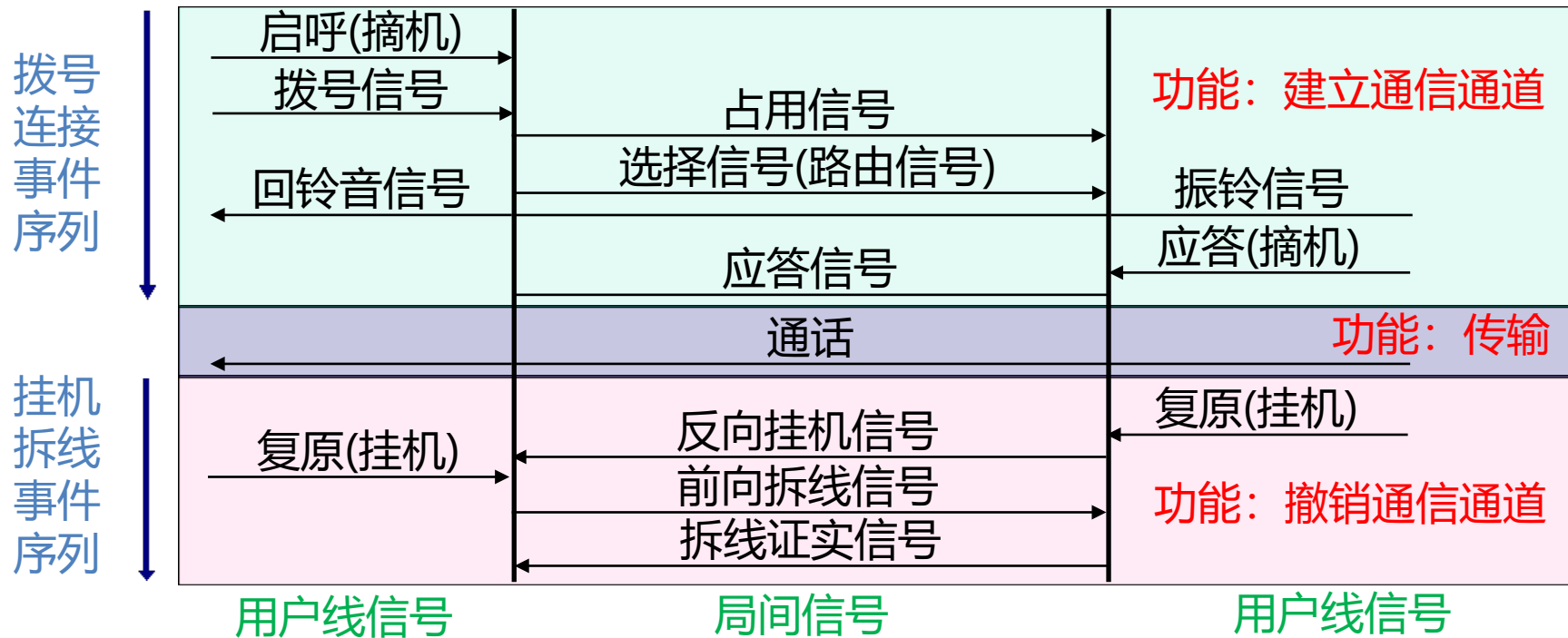
针脚	符号	方向	说明
1	DCD	输入	数据载波检测
2	RXD	输入	接收数据
3	TXD	输出	发送数据
4	DTR	输出	数据终端准备好
5	GND	-	信号地
6	DSR	输入	数据装置准备好
7	RTS	输出	请求发送
8	CTS	输入	允许发送
9	RI	输入	振铃指示



RS-232-C DB-9接口功能特性



物理层的过程特性：电话通信





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

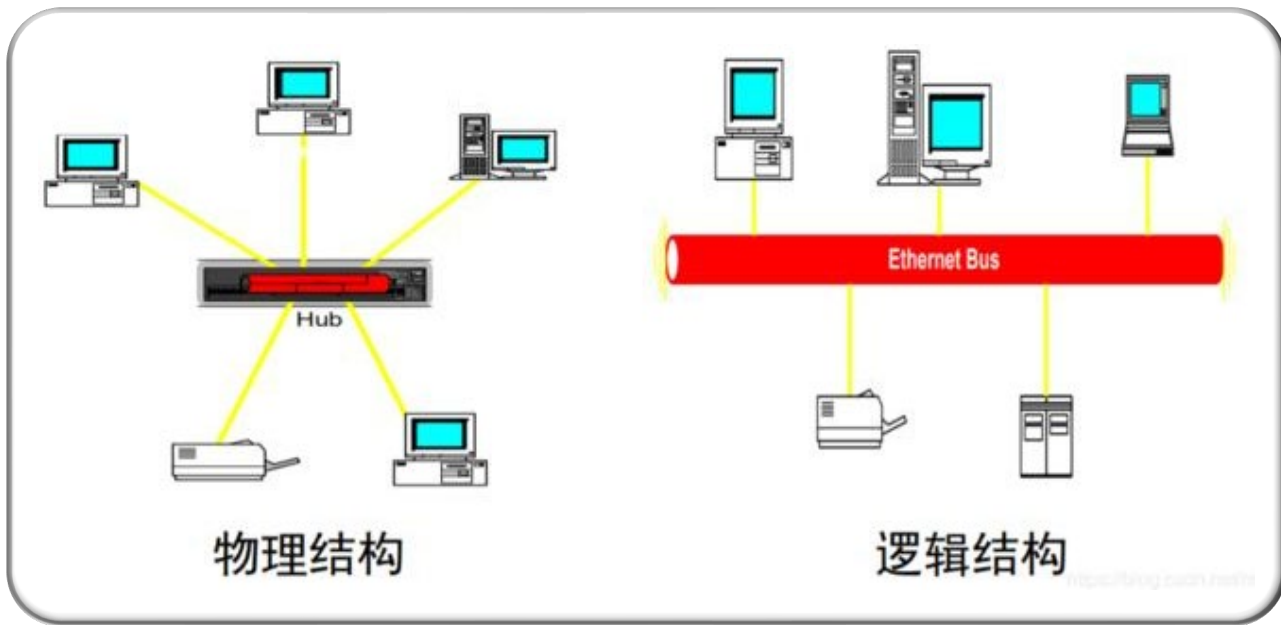
- ◆ 传统以太网
- ◆ 快速以太网
- ◆ 千兆以太网
- ◆ 万兆以太网
- ◆ 无线局域网

10Base-T

数据率
(Mbps)

双绞线

基带传输



广播通信线路(以太网)



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

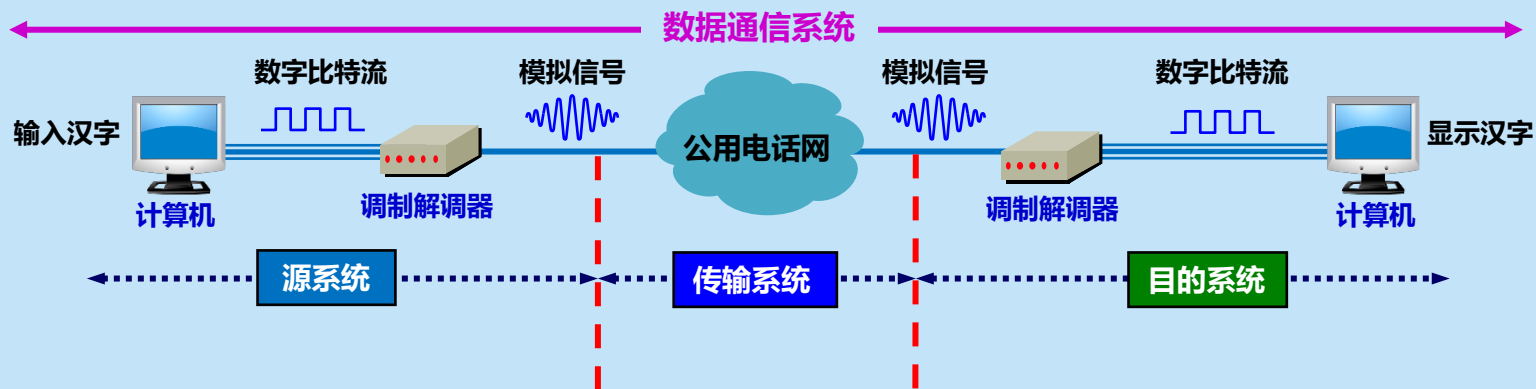
三大部分：**源系统**（或发送端、发送方）、**传输系统**（或传输网络）和**目的系统**（或接收端、接收方）。





2.2.1 数据通信系统的模型

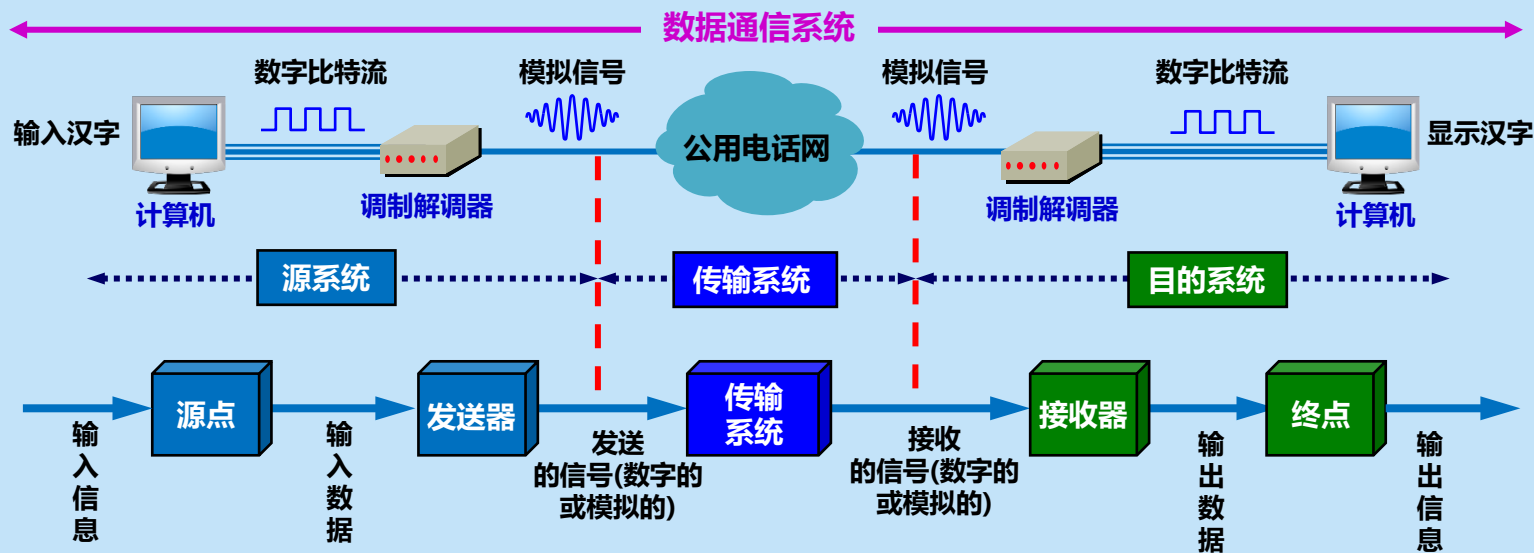
三大部分：**源系统**（或发送端、发送方）、**传输系统**（或传输网络）和**目的系统**（或接收端、接收方）。





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。

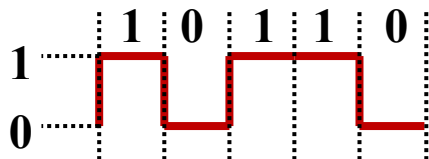


- ◆ **模拟信号** (analogous signal): 代表消息的参数取值是**连续**的。



- ◆ **数字信号** (digital signal): 代表消息的参数取值是**离散**的。

- **码元**: 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。

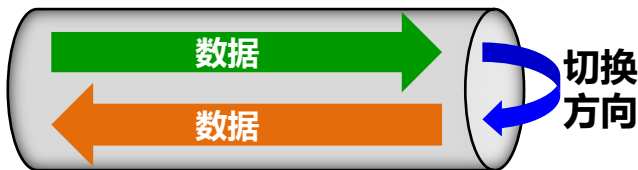


- ◆ 一个码元所携带的信息量不是固定的, 由调制方式和编码方式决定。



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移到较高的频段，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）。

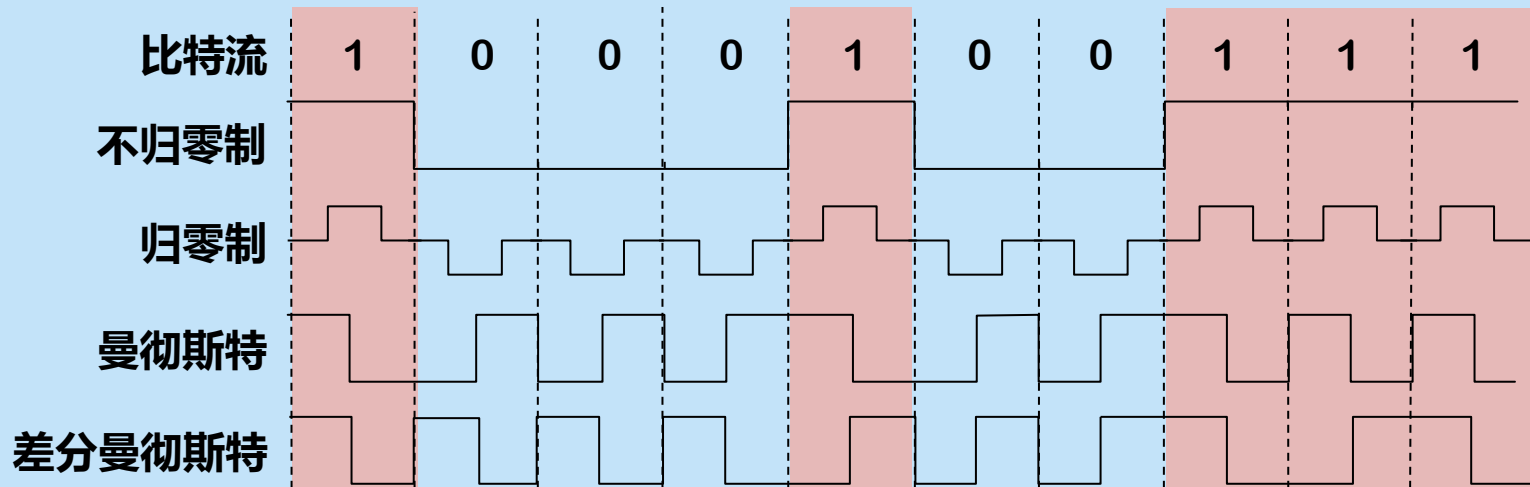


(1) 常用编码方式

- **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**。



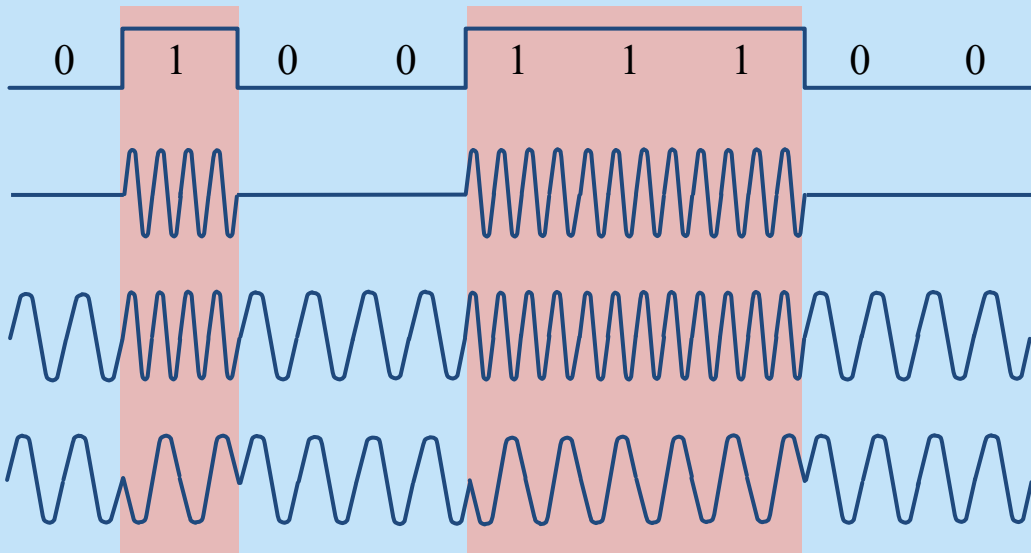
(2) 基本的带通调制方法

- 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

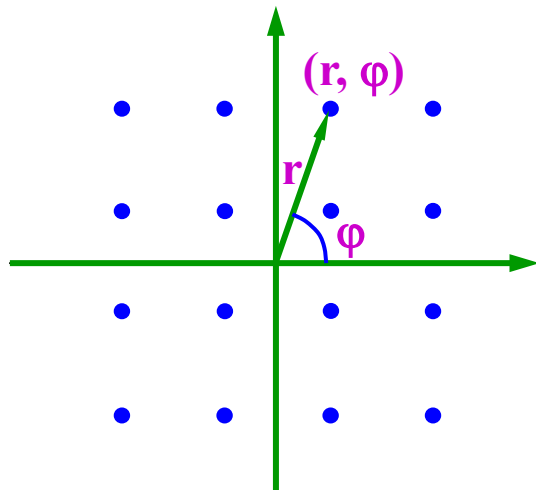


最基本的三种调制方法



正交振幅调制 QAM (Quadrature Amplitude Modulation)

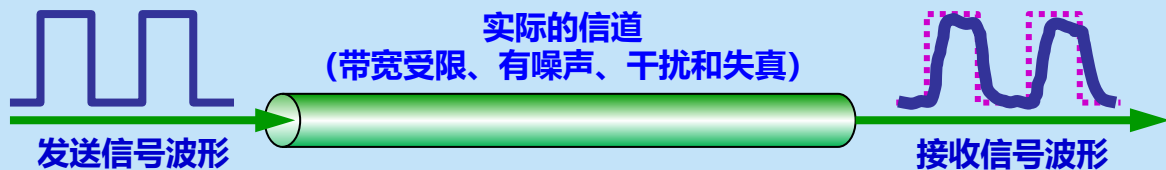
- 一种多元制的振幅相位混合调制方法，以达到更高的信息传输速率。
- 例如：
 - ◆ 可供选择的相位有 12 种，而对于每一种相位有 1 或 2 种振幅可供选择。总共有 16 种组合，即 16 个码元。
 - ◆ 由于 4 bit 编码共有 16 种不同的组合，因此这 16 个点中的每个点可对应于一种 4 bit 的编码。数据传输率可提高 4 倍。



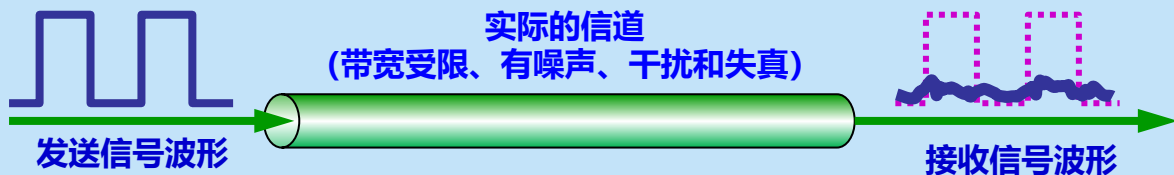


2.2.3 信道的极限容量

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：

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

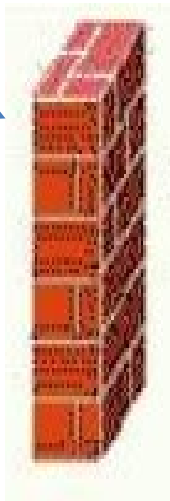
- 例如：当 $S/N = 10$ 时，信噪比为10dB，而当 $S/N = 1000$ 时，信噪比为30dB。
- 电话系统的典型信噪比为30dB。

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



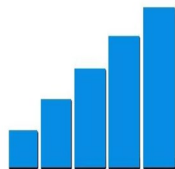
WIFI设备



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：

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

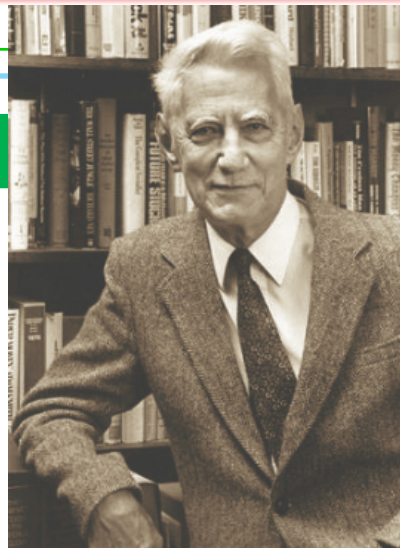
其中：

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。



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 $M = 101011000110111010\dots\dots$ -----> 1 bit/码元

将信号中的每 3 个比特编为 1 组：

101 011 000 110 111 010

$M1 = \varphi_5 \ \varphi_3 \ \varphi_0 \ \varphi_6 \ \varphi_7 \ \varphi_2$ -----> 3 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



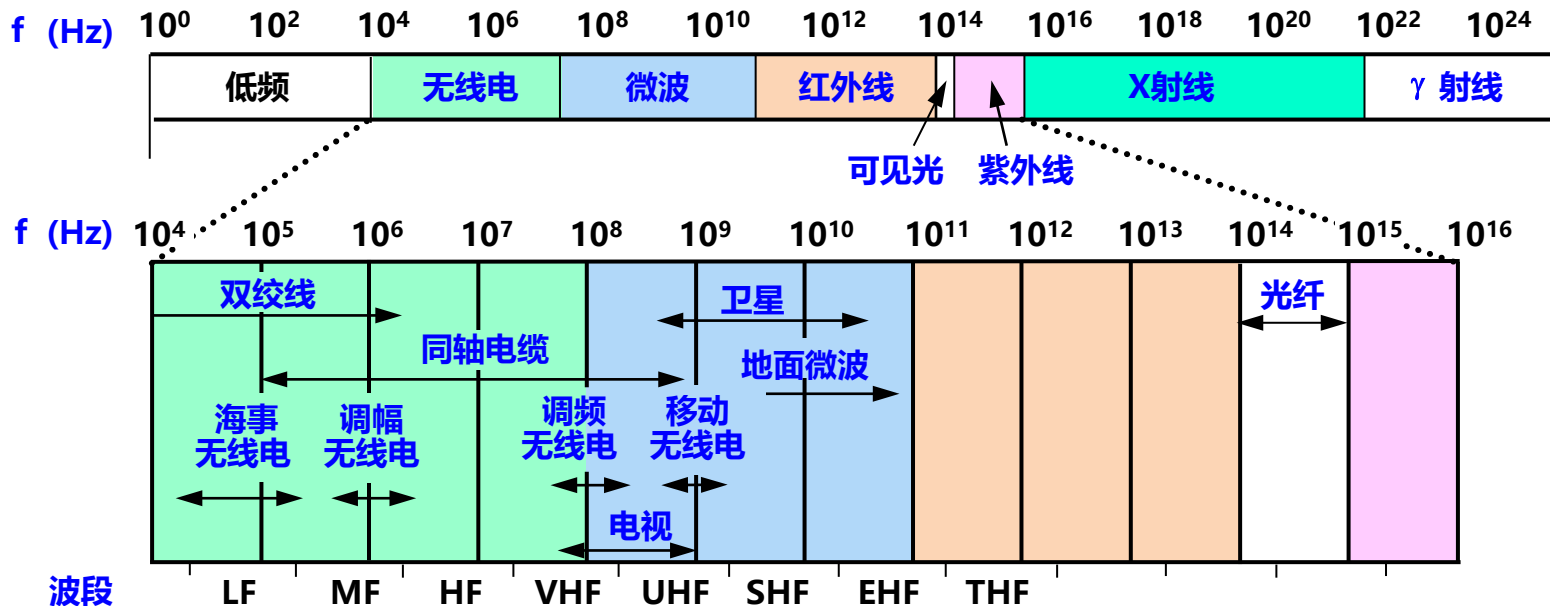
2.3 物理层下面的传输媒体

- 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

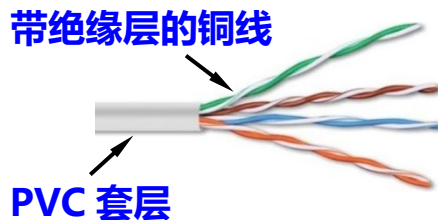


不同的绞合度的双绞线

1. 双绞线

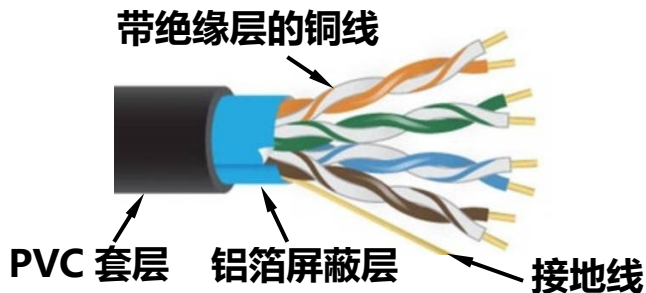
- **无屏蔽双绞线 UTP** (Unshielded Twisted Pair) :

- ◆ 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。



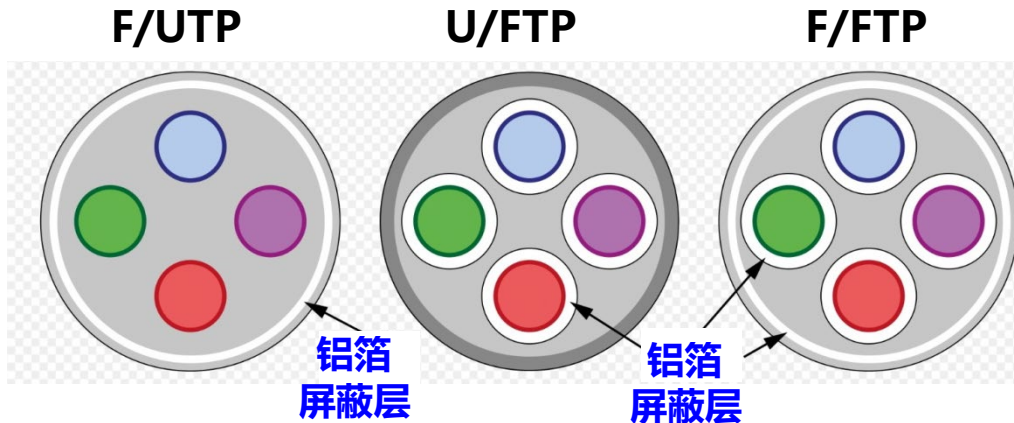
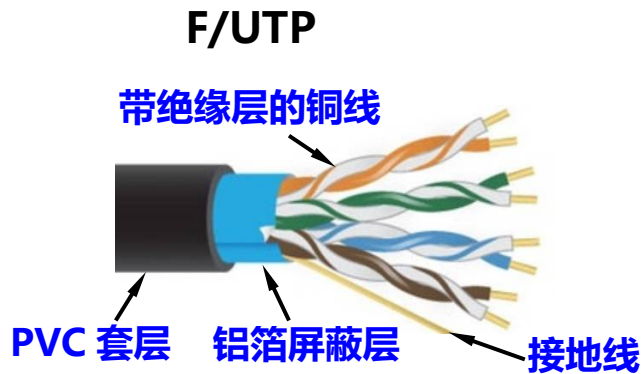


屏蔽双绞线 STP

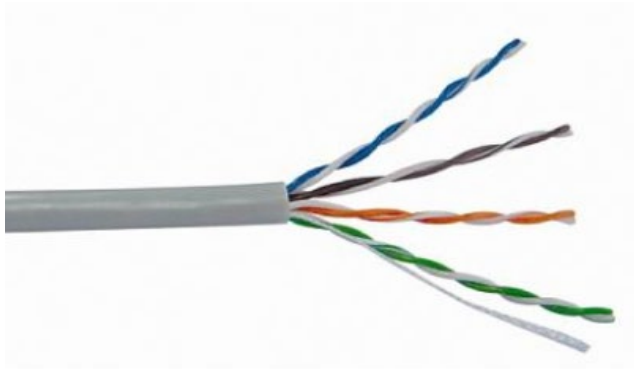
- **x/UTP：对整条双绞线电缆进行屏蔽。**
 - ◆ **F/UTP (F= Foiled)：表明采用铝箔屏蔽层。**
 - ◆ **S/UTP (S=braid Screen)：表明采用金属编织层进行屏蔽。**
 - ◆ **SF/UTP：表明在铝箔屏蔽层外面再加上金属编织层的屏蔽。**
 - ◆ **FTP 或 U/FTP：把电缆中的每一对双绞线都加上铝箔屏蔽层。U表明对整条电缆不另增加屏蔽层**
 - ◆ **F/FTP：在 FTP 基础上对整条电缆再加上铝箔屏蔽层。**
 - ◆ **S/FTP：在 FTP 基础上对整条电缆再加上金属编织层的屏蔽。**



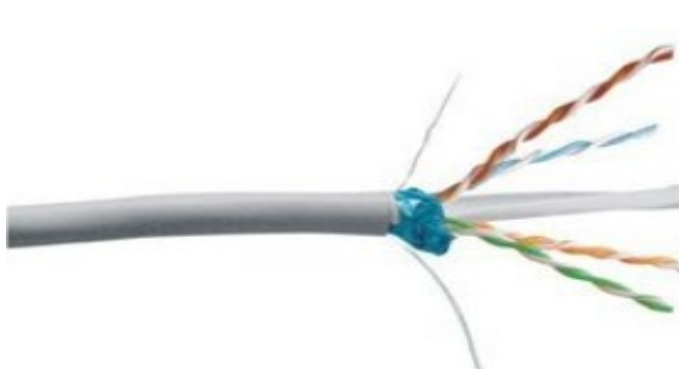
屏蔽双绞线 STP



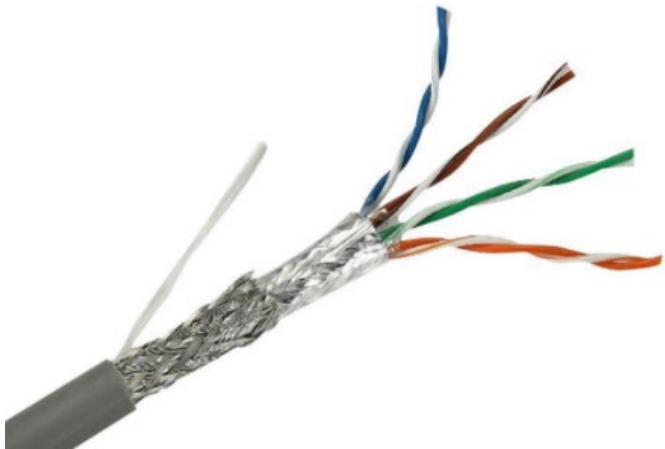
在抗干扰能力上，U/FTP 比 F/UTP 好，而 F/FTP 则是最好的。



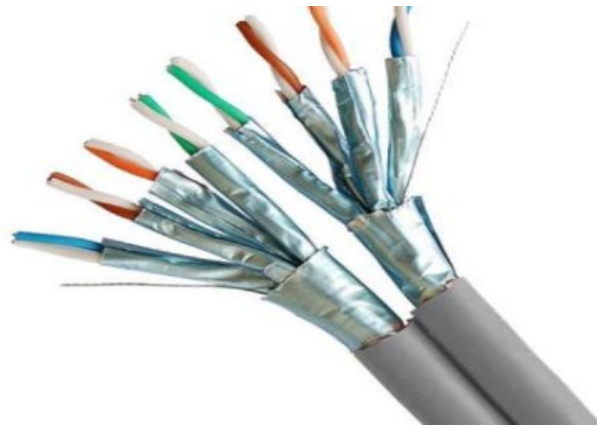
UTP无屏蔽双绞线



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

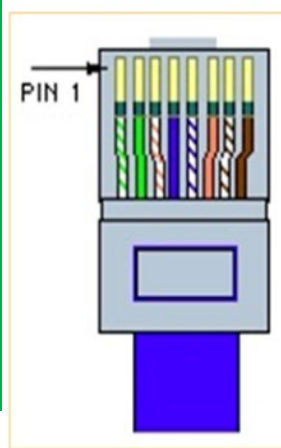


1、剪线

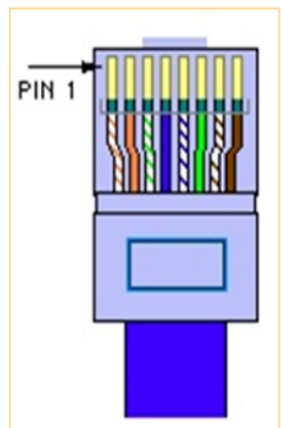


2、插入接头

3、压线钳压紧



EIA/TIA568A



EIA/TIA568B

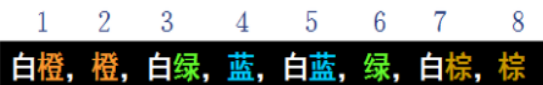


水晶头塑料弹片突起的一面朝下，
棕线在最右边

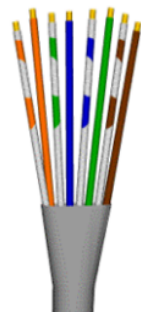


Crossover
Cable Order

EIA/TIA568A



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



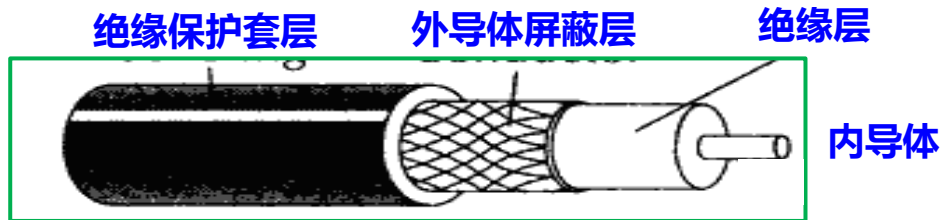
双绞线标准 EIA/TIA-568

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">● 无论是哪种类别的双绞线，衰减都随频率的升高而增大。● 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。		
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 55 ~ 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。



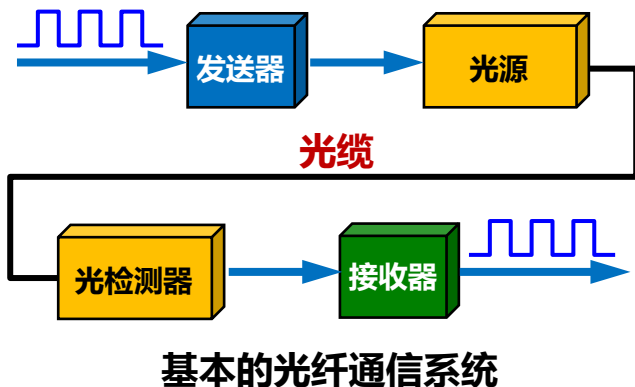
- 具有很好的抗干扰特性，被广泛用于传输较高速率的数据。
- 主要用在有线电视网的居民小区中，高质量同轴电缆的带宽接近1GHz。





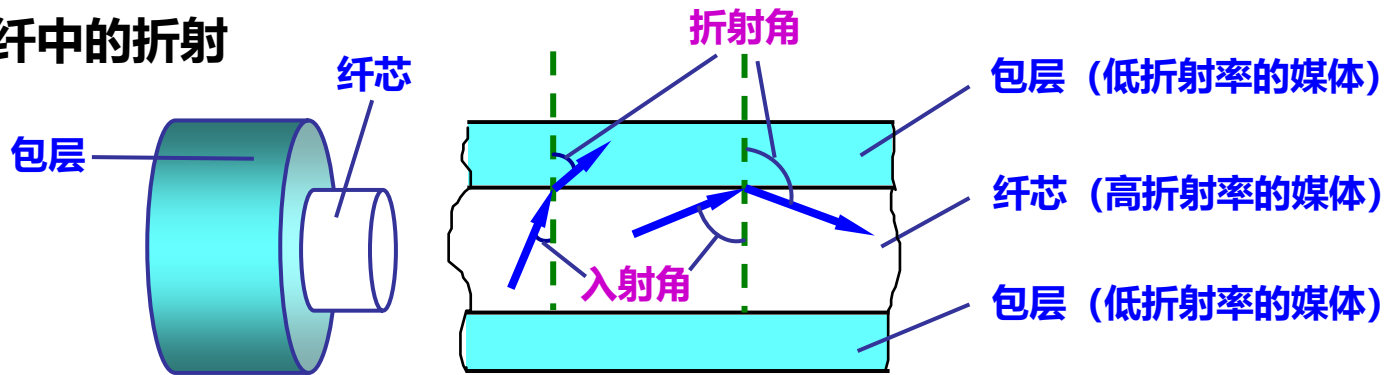
3. 光缆

- 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。



光波在纤芯中的传播

光线在光纤中的折射



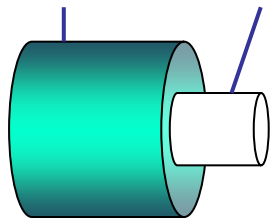
光纤通常由非常透明的石英玻璃拉成细丝，主要由**纤芯**和**包层**构成双层通信圆柱体。当光线从高折射率的媒体射向低折射率的媒体时，其折射角将大于入射角。如果入射角足够大，就会出现**全反射**，光也就沿着光纤传输下去。



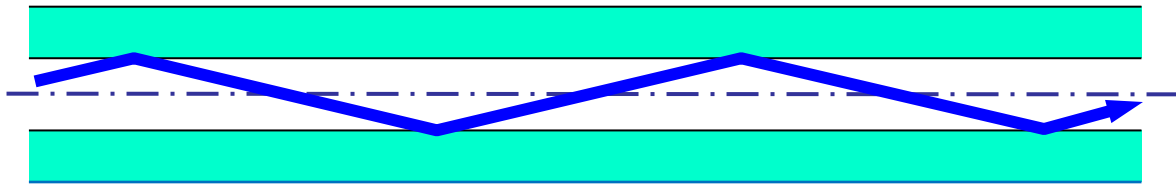
光波在纤芯中的传播

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

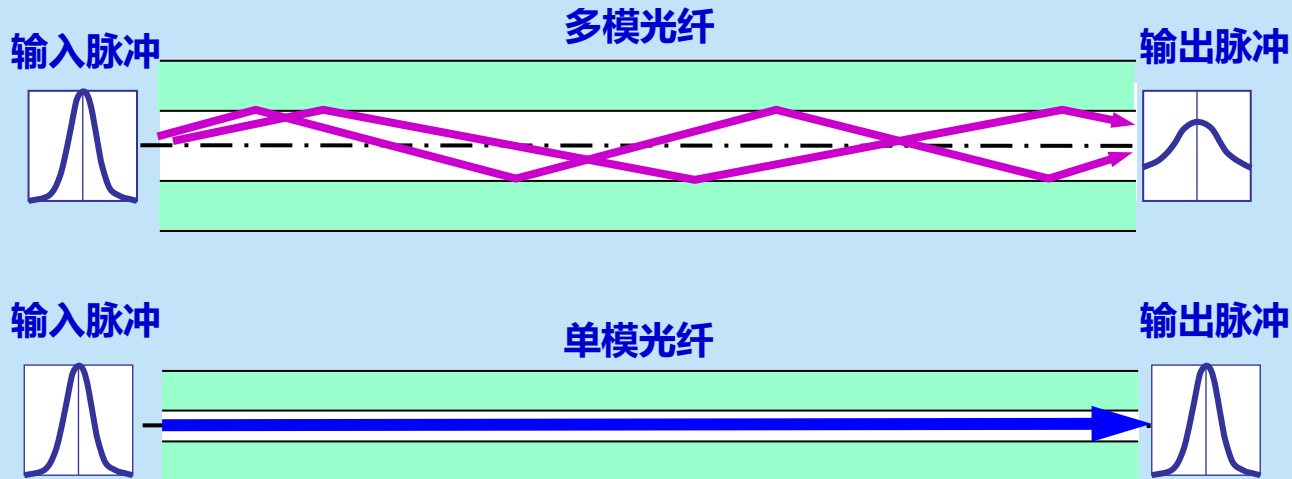
- ◆ 可以存在**多条**不同角度入射的**光线**在一条光纤中传输。
- ◆ 光脉冲在多模光纤中传输时会逐渐展宽，造成失真，只适合于近距离传输。

● 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。



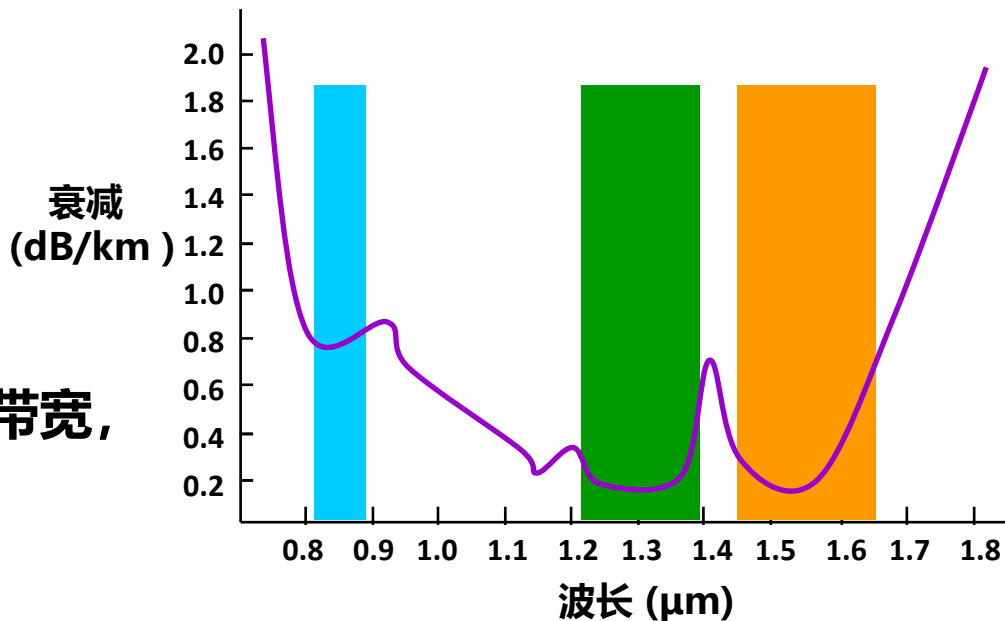
多模光纤与单模光纤





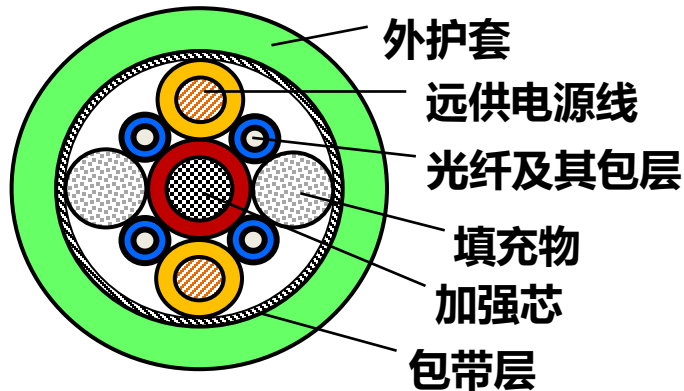
光纤通信中使用的光波的波段

- 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。





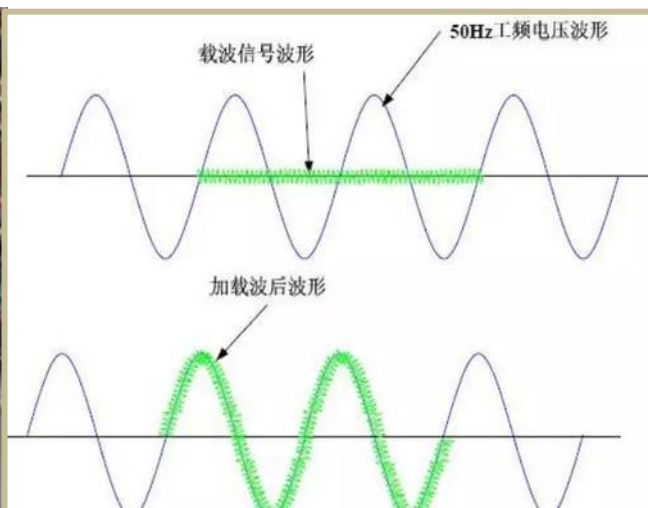
光纤优点

- **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

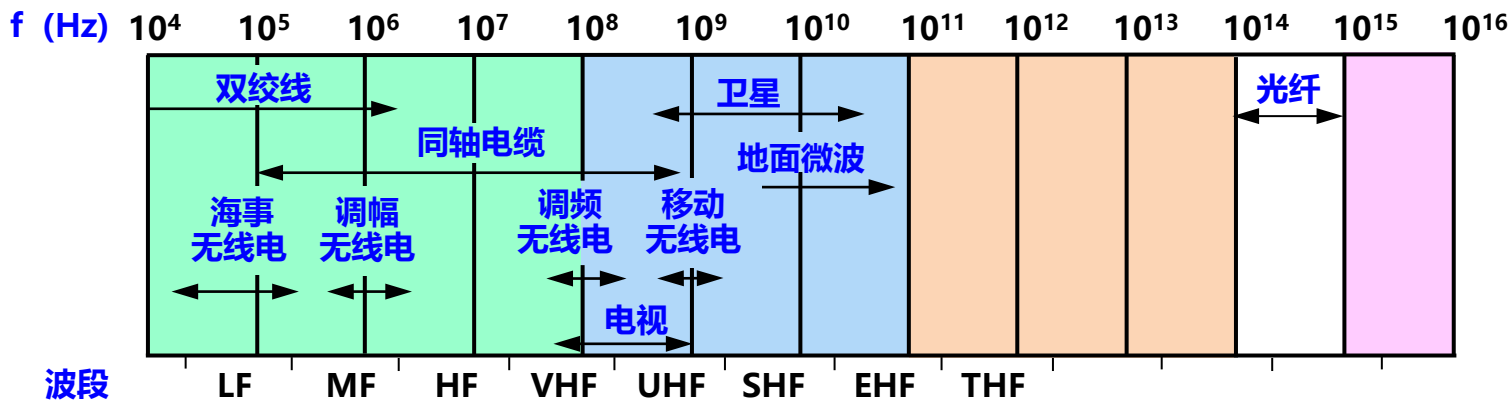
- 电力载波是电力系统特有的通信方式
 - 利用现有电力线，通过载波方式将模拟或数字信号进行高速传输
- 电力线是指输送电能的电力线路
 - 按结构形式的不同，输电线路分架空输电线路和电缆线路
 - 架空输电线由线路杆塔和电力线组成





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 ~ THF (30 kHz ~ 3000 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





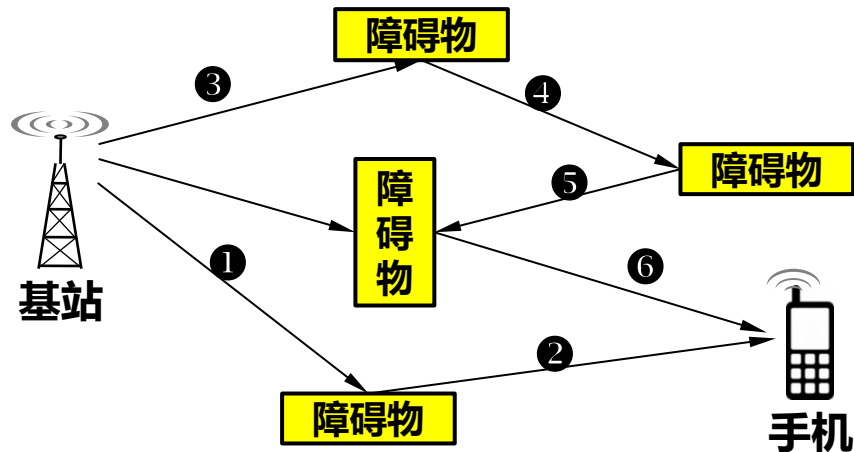
无线电微波通信

- 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**。



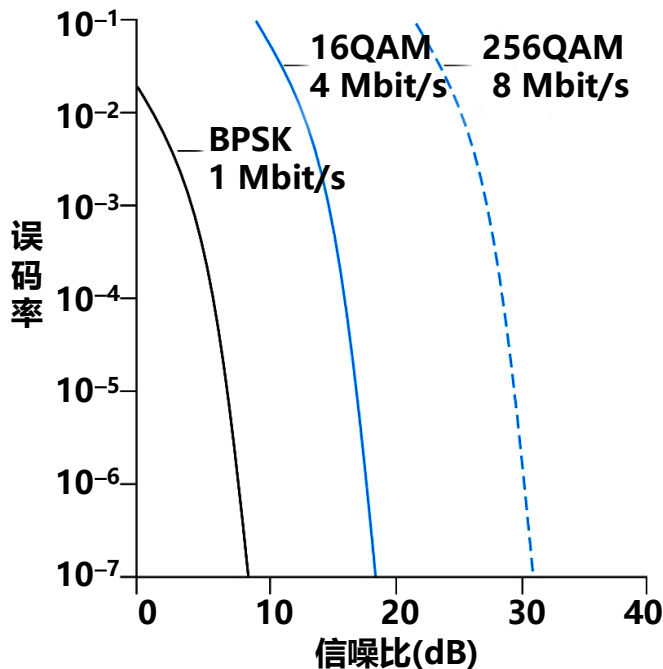
信号从

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

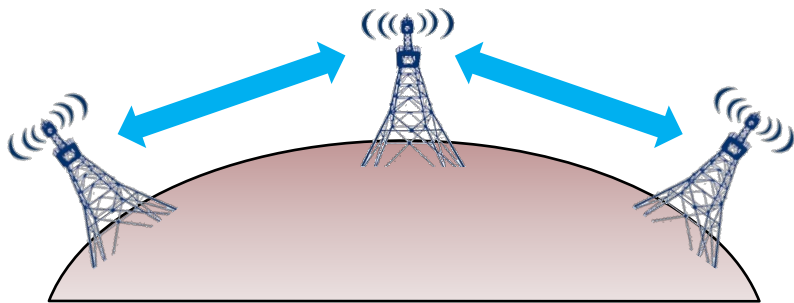
- 对于给定的调制方式和数据率，信噪比越大，误码率就越低。
- 对于同样的信噪比，具有更高数据率的调制技术的误码率也更高。
- 如果用户在进行通信时不断改变自己的地理位置，就会引起无线信道特性的改变，因而信噪比和误码率都会发生变化。



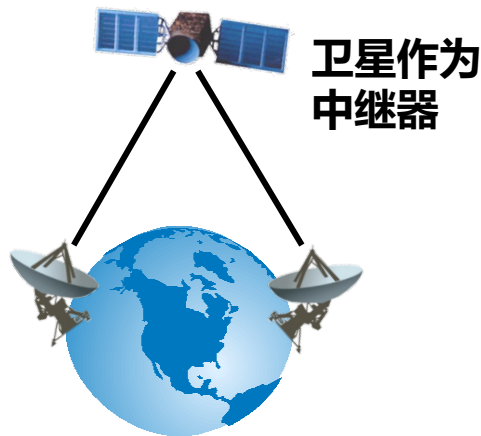
理想无线信道的误码率与信噪比、调制方式、数据率的关系

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：

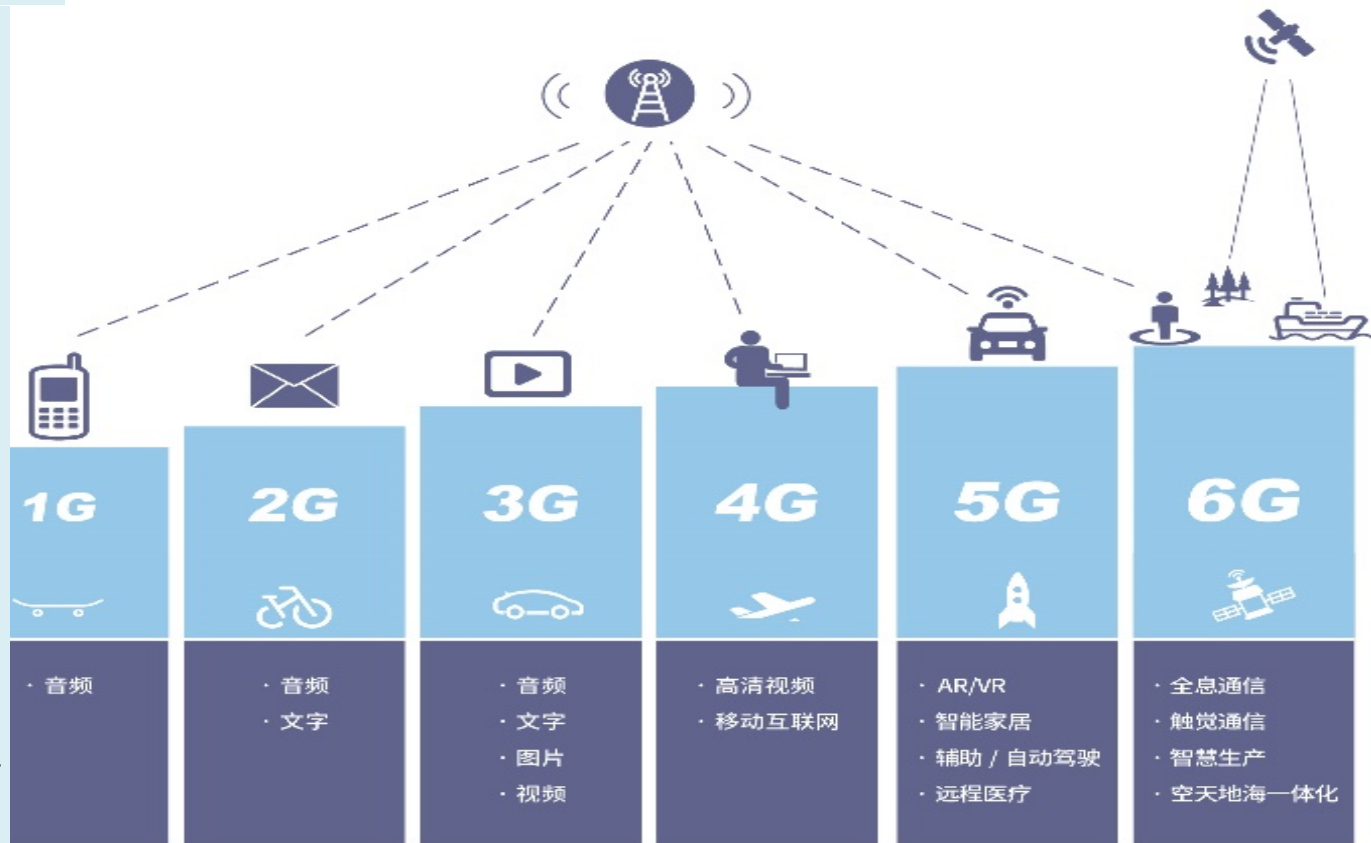
- ◆ 相邻站之间必须直视（常称为视距 LOS (Line Of Sight)），不能有障碍物，存在多径效应。
- ◆ 有时会受到恶劣气候的影响。
- ◆ 与电缆通信系统比较，微波通信的隐蔽性和保密性较差。
- ◆ 对大量中继站的使用和维护要耗费较多的人力和物力。



无线通信系统：从1G到6G

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

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”



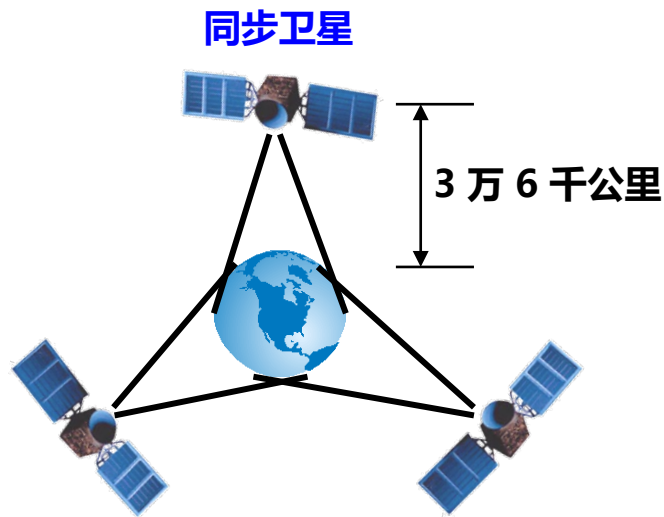


卫星通信

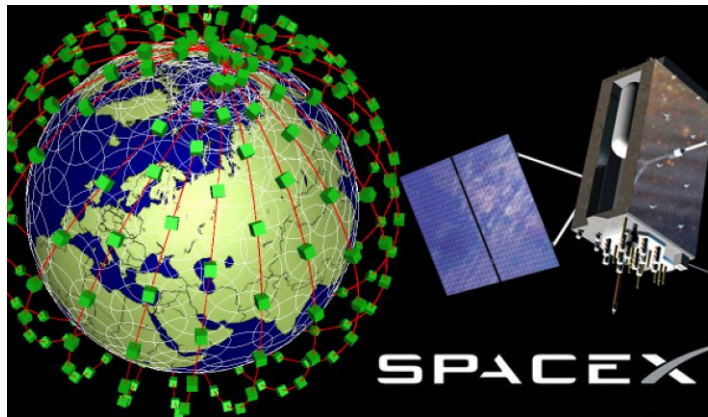
- 通信容量大，通信距离远，通信比较稳定，通信费用与通信距离无关。
- 但传播时延较大：在 250~300 ms 之间。

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**”。

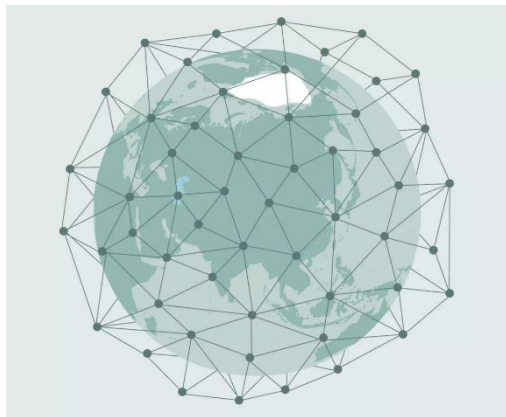
- 保密性相对较差。
- 造价较高。



卫星通信



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

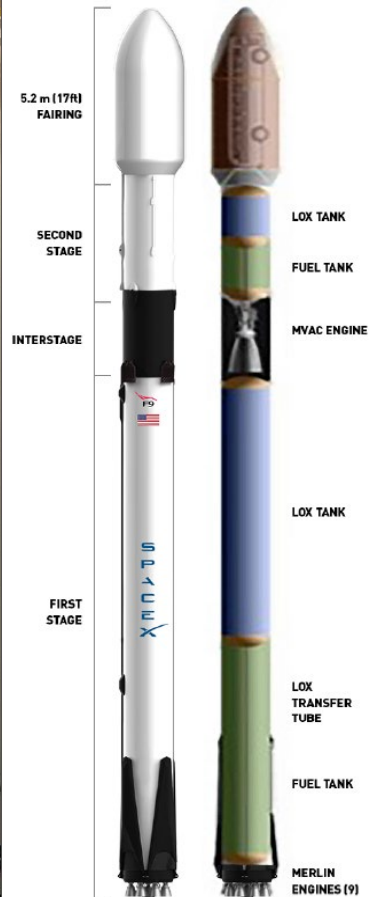


鸿雁卫星星座通信系统

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。

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

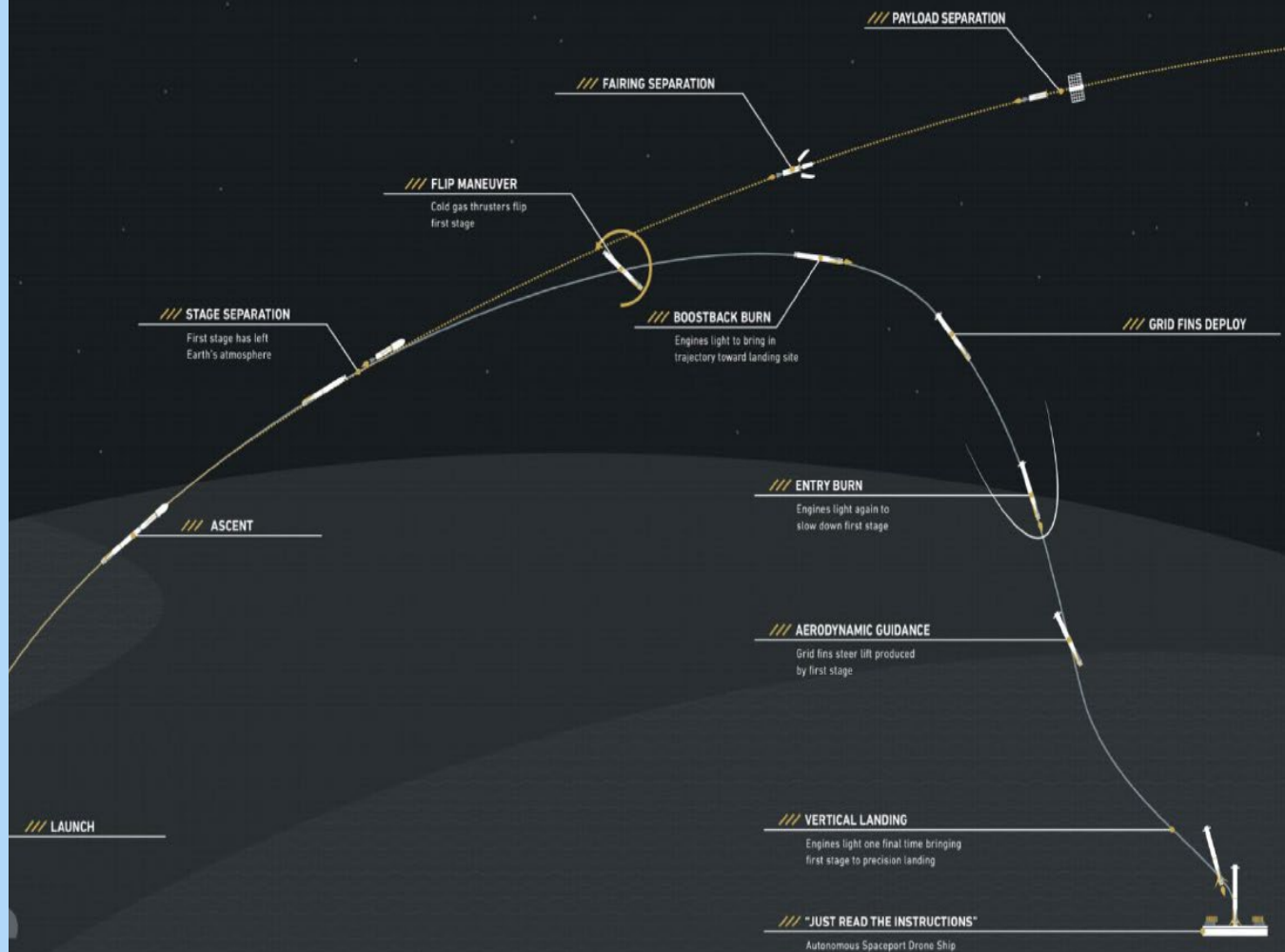
务所需的性能，猎鹰将

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。



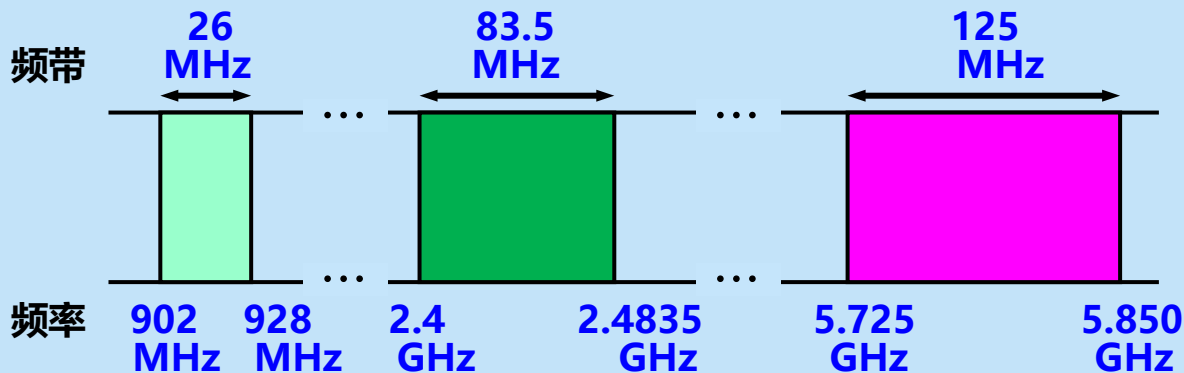


无线局域网使用的 ISM 频段

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

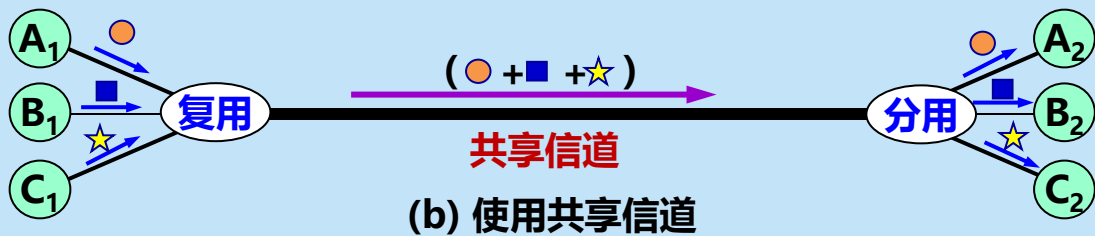
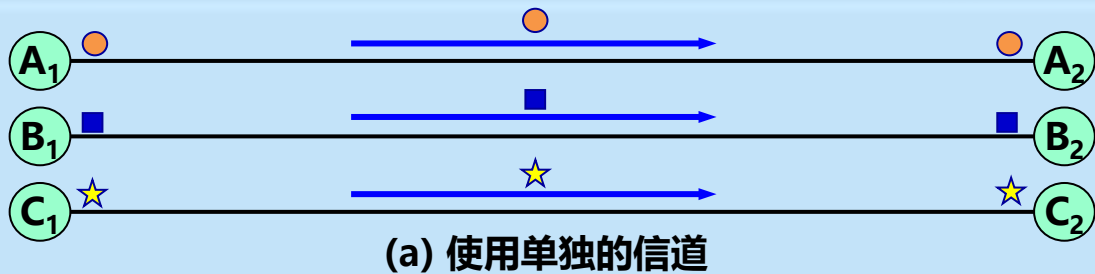
2.4.3

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。



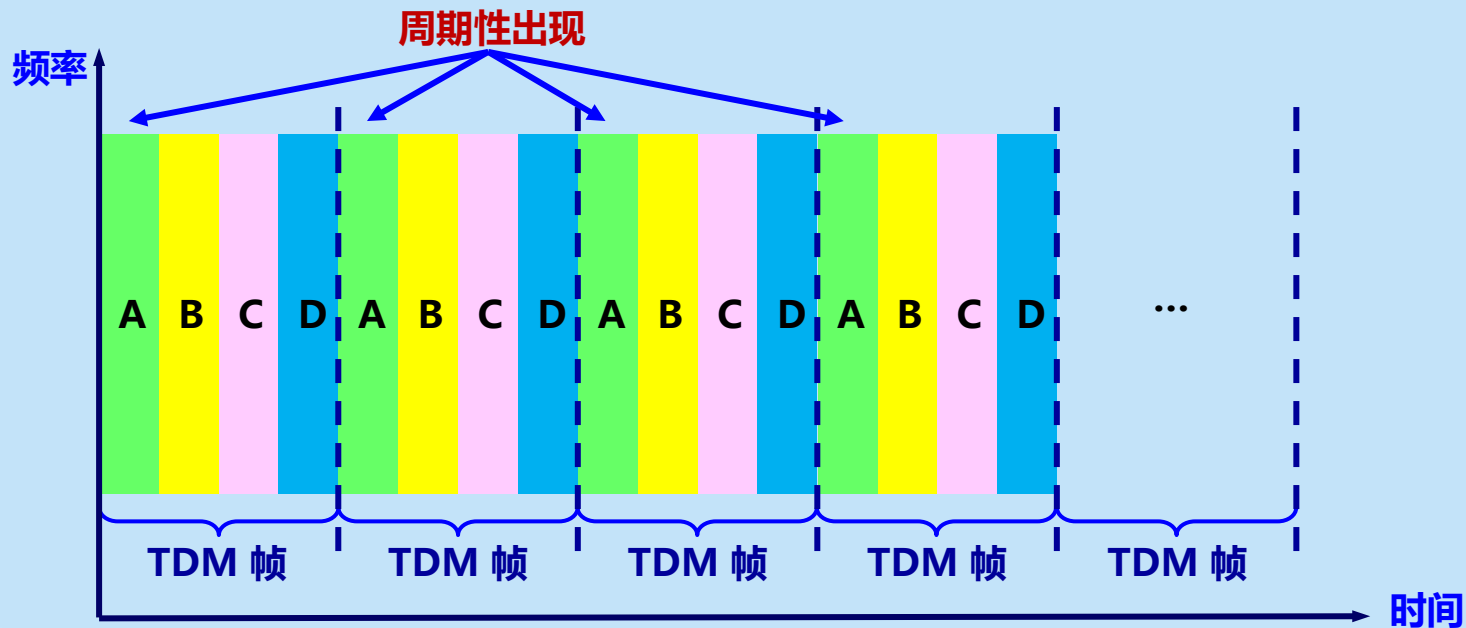


时分复用 TDM (Time Division Multiplexing)

- 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)





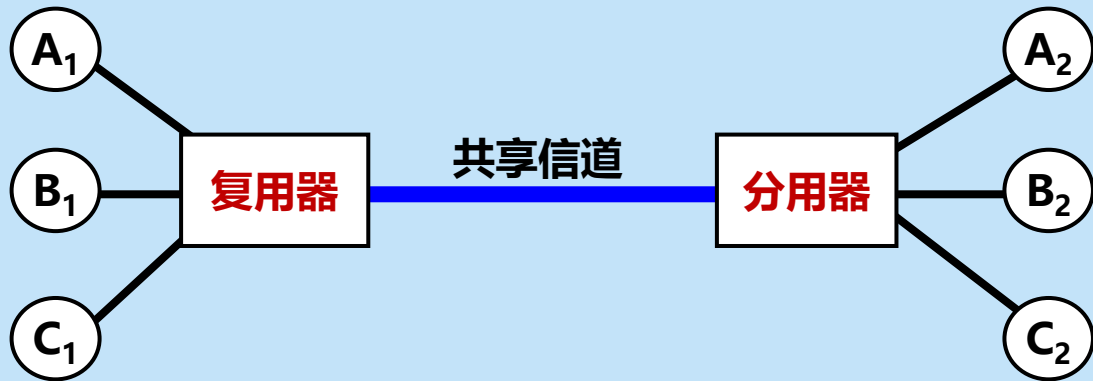
频分多址与时分多址

- 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**。



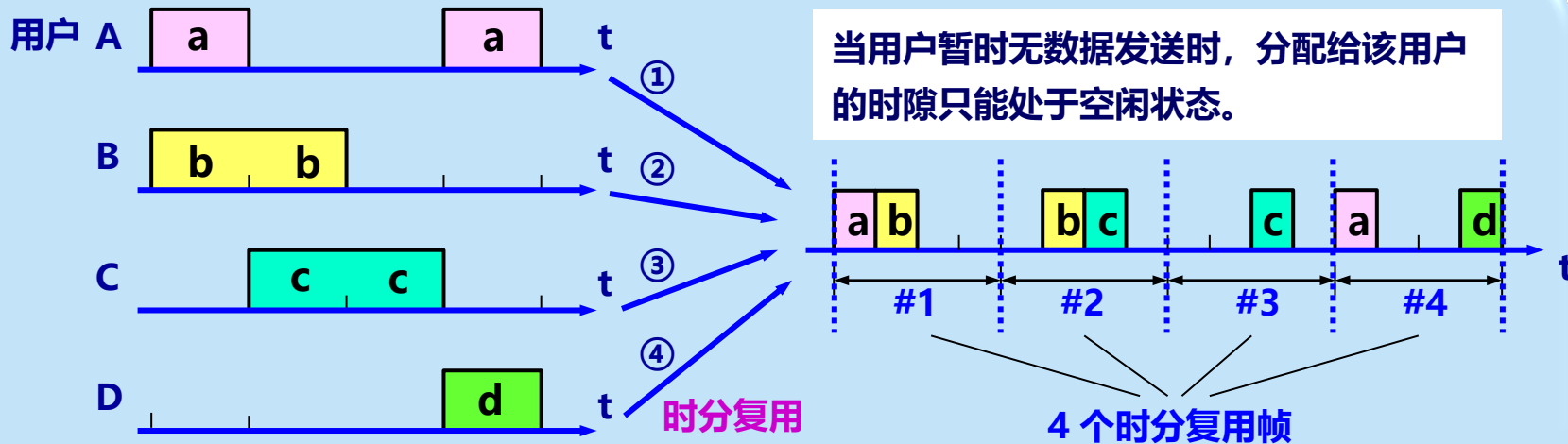
复用器 (multiplexer) 和分用器 (demultiplexer)

- 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。



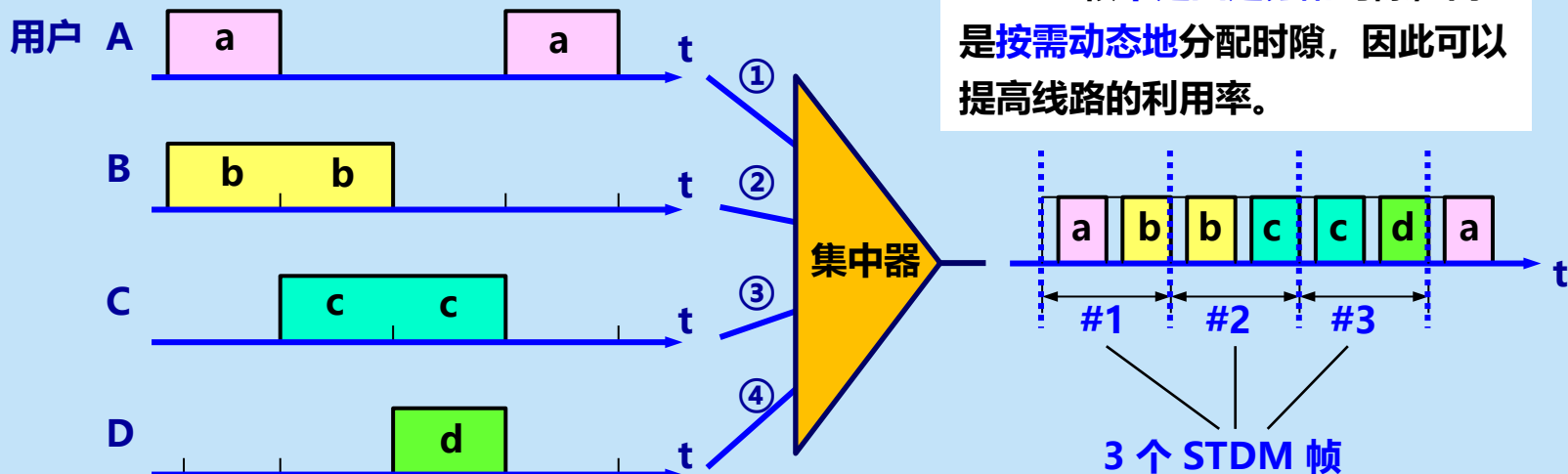


时分复用会导致信道利用率不高





统计时分复用 STDM (Statistic TDM)



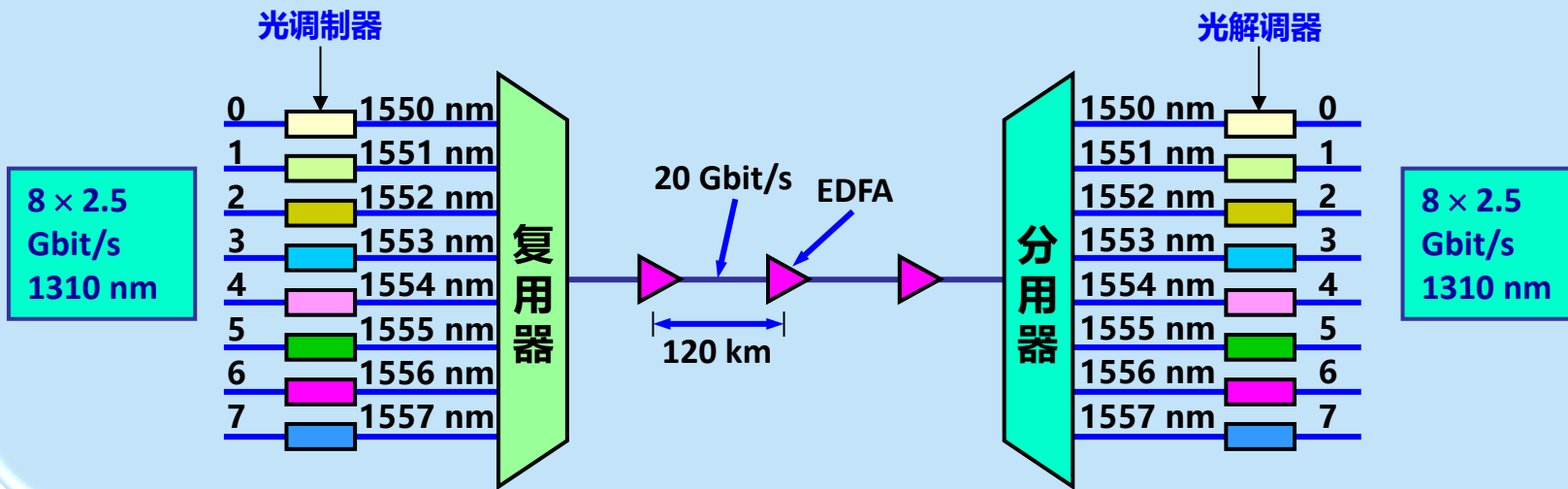
各用户有了数据就随时发往集中器的输入缓存，然后集中器按顺序依次扫描输入缓存，当一个帧的数据放满了，就发送出去。

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 。

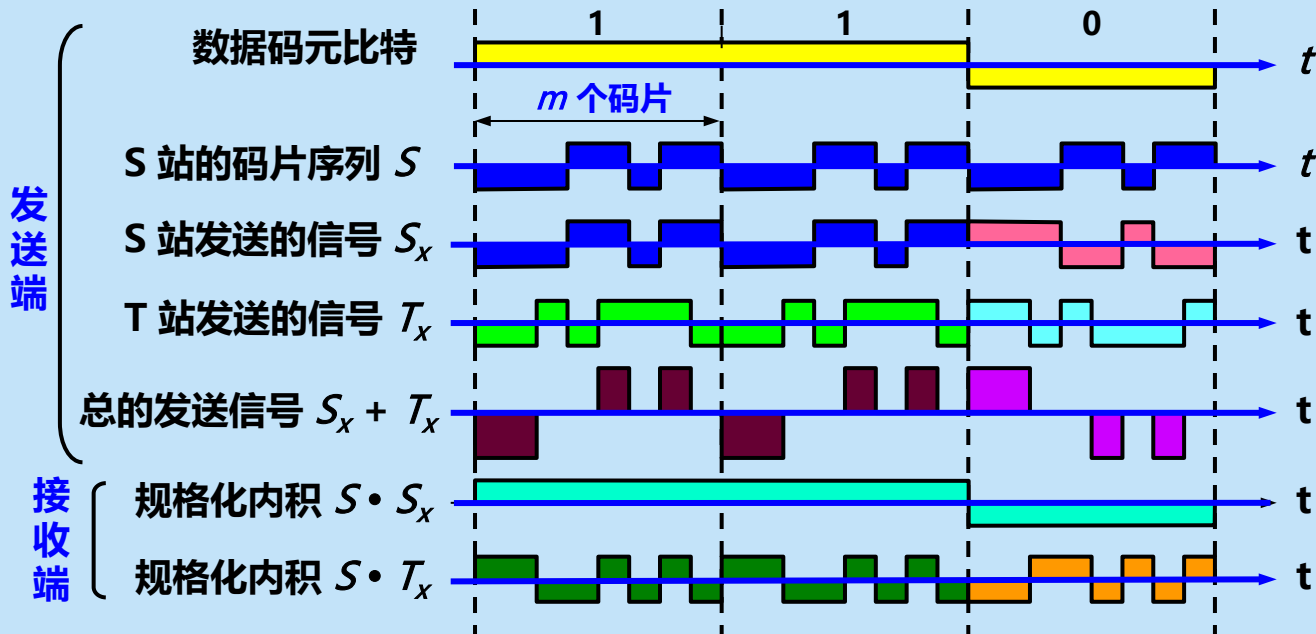
$$S \bullet S = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m S_i S_i = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m S_i^2 = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m (\pm 1)^2 = 1$$

- 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。



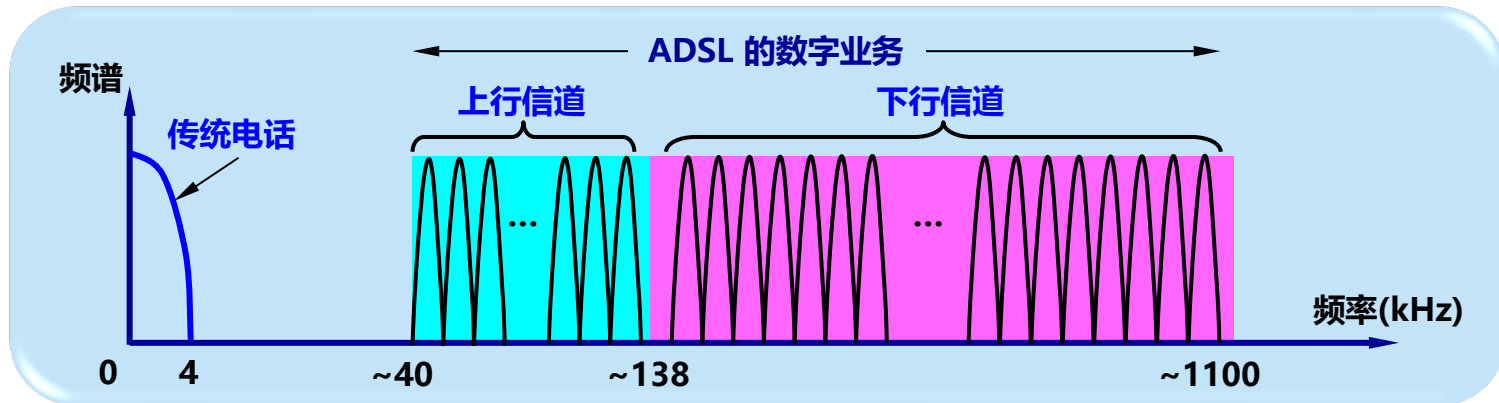
2.6.1 ADSL 技术

- **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

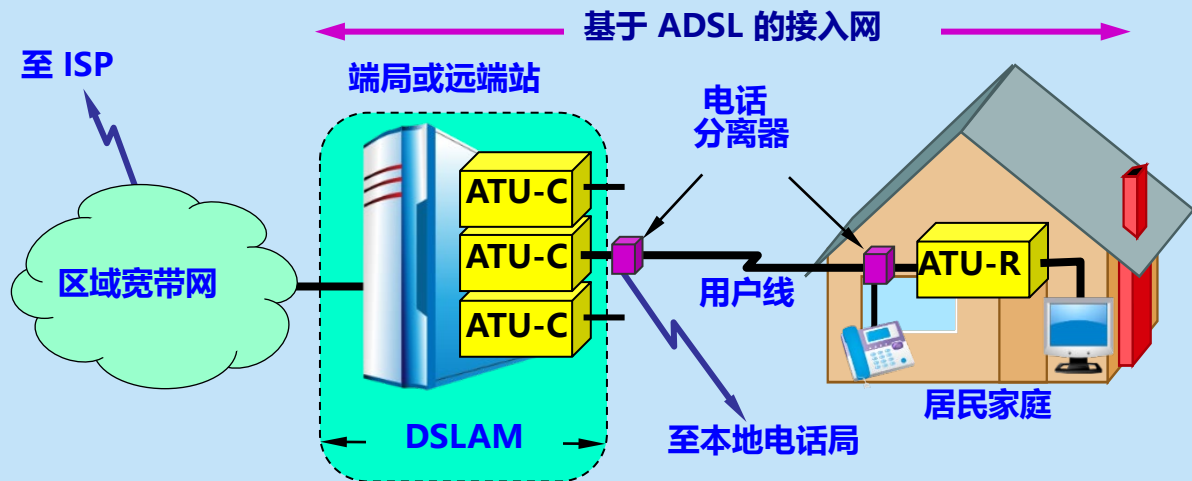
- 采用**离散多音调 DMT** (Discrete Multi-Tone) 调制技术。
- DMT 调制技术采用**频分复用 FDM** 方法。
- 相当于在一对用户线上使用许多小的调制解调器**并行地**传送数据。
- 用户线的具体条件相差很大，因此ADSL**不能**保证固定的数据率。



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。



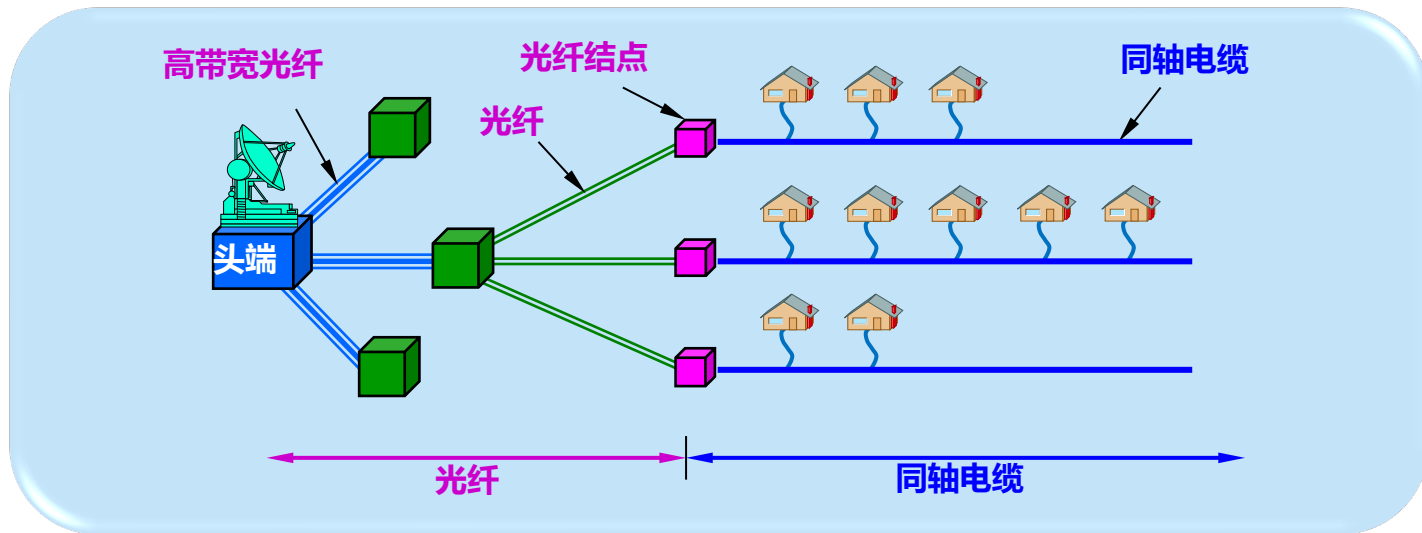
xDSL

- 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)

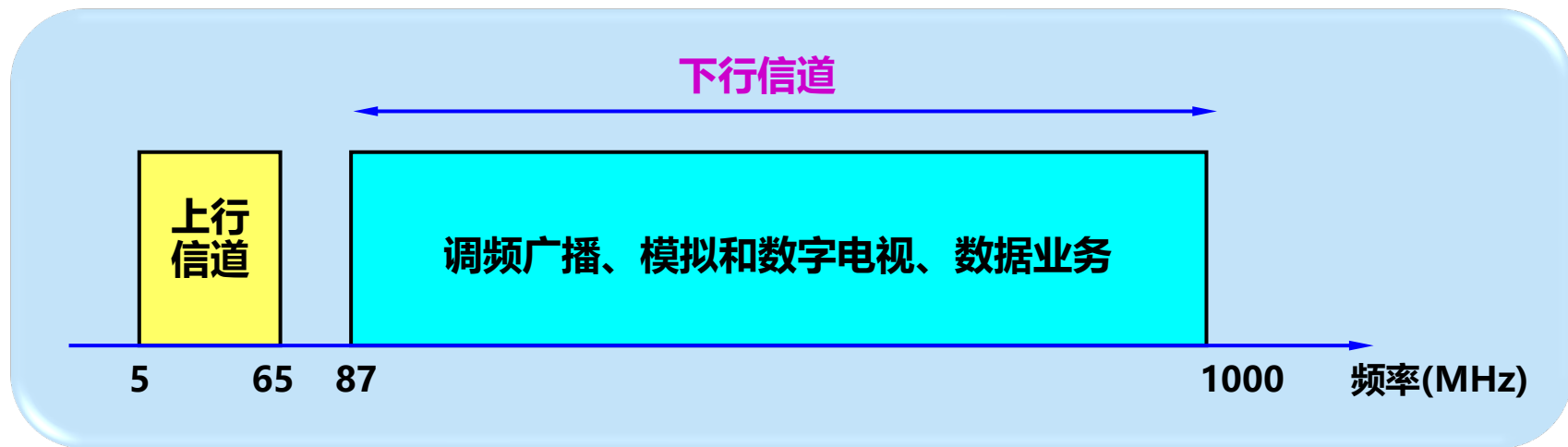
- HFC (Hybrid Fiber Coax) 网基于有线电视网 CATV 网。
- **改造：**把原有线电视网中的同轴电缆主干部分改换为光纤



HFC 网的结构



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。

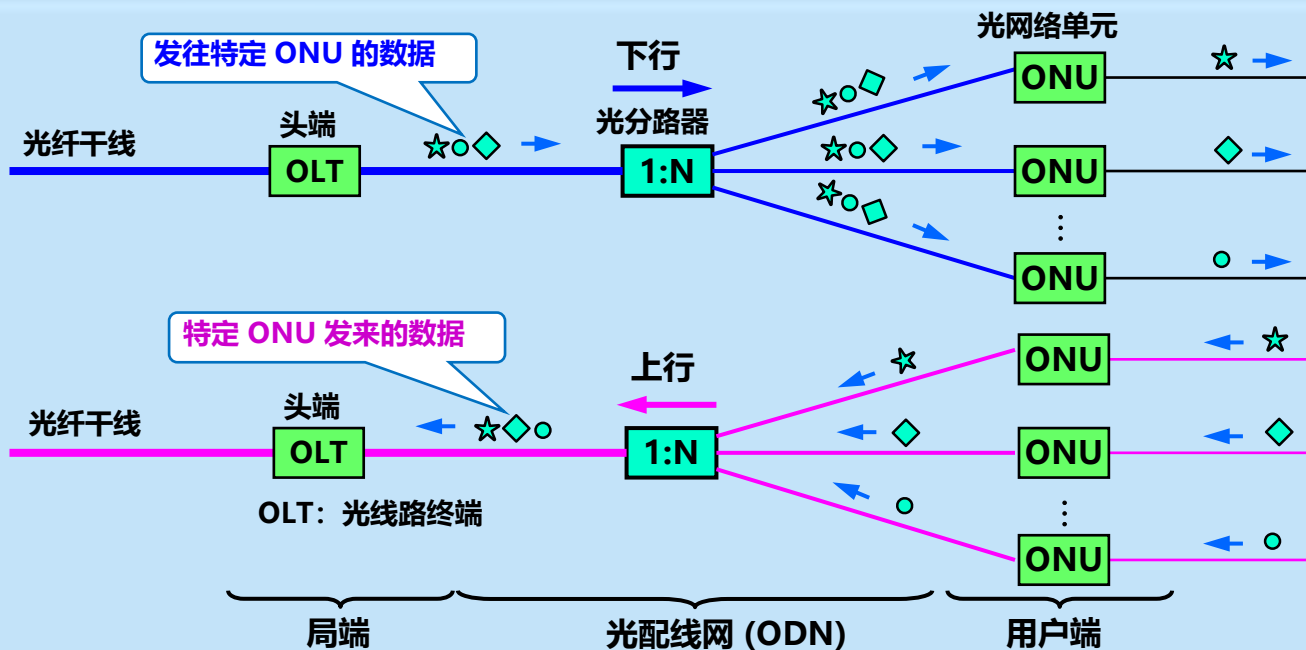


2.6.3 FTTx 技术

- 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。