

计算机网络 (第 8 版)

第 2 章
物理层



| | |
|-----|------------|
| 2.1 | 物理层的基本概念 |
| 2.2 | 数据通信的基础知识 |
| 2.3 | 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。
 - 用于物理层的协议也常称为物理层**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。

| | | |
|----------------------|-------|-------------|
| 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 |



常用术语

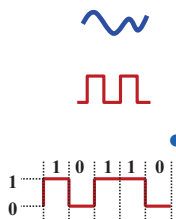


- 信息/消息 (message)**：如语音、文字、图像、视频等。
- 数据 (data)**：运送消息的实体。有意义的符号序列。

```
11001001
00110011
11010110
11001110
.....
```

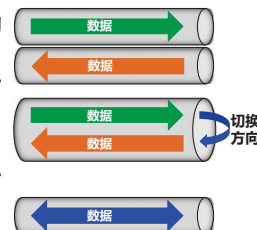
常用术语

- **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。
 - ◆ 使用二进制编码时, 只有两种不同的码元: 0 状态, 1 状态。



2.2.2 有关信道的几个基本概念

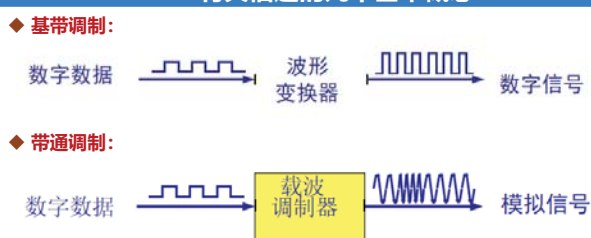
- **信道**: 一般用来表示向某一个方向传送信息的媒体。
- **单向通信 (单工通信)**: **只能有一个方向**的通信, 没有反方向的交互。
- **双向交替通信 (半双工通信)**: 通信的双方都可以发送信息, 但双方**不能同时**发送 (当然也就不能同时接收)。
- **双向同时通信 (全双工通信)**: 通信的双方可以**同时发送和接收**信息。



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。(许多信道不能传输此低频或直流信号)
- **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)。

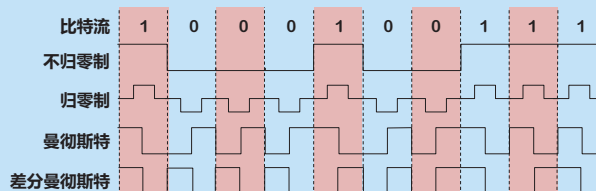
2.2.2 有关信道的几个基本概念



(1) 常用编码方式

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

(1) 常用编码方式



数字信号常用的编码方式

作业: 画出每种编码方式前一位分别是0和1的样子

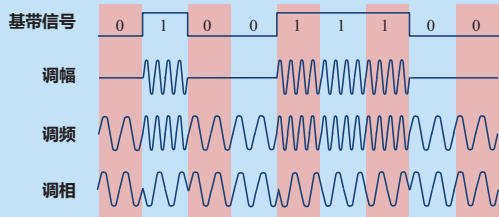
(1) 常用编码方式

- **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。
 2. **调频 (FM)**: 载波的频率随基带数字信号而变化。
 3. **调相 (PM)**: 载波的初始相位随基带数字信号而变化。

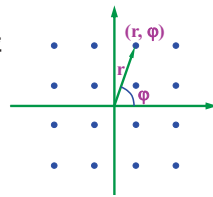
(2) 基本的带通调制方法



最基本的三种调制方法

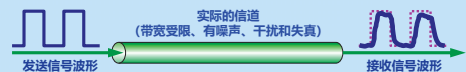
正交振幅调制 QAM (Quadrature Amplitude Modulation)

- 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。

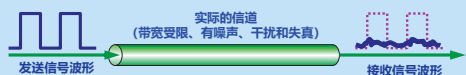


2.2.3 信道的极限容量

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 ，并用分贝 (dB) 作为度量单位。即：

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

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

香农公式

- 信道的极限信息传输速率 C 可表达为：

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

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。

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

将信号中的每 3 个比特编为 1 组：

101 011 000 110 111 010

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

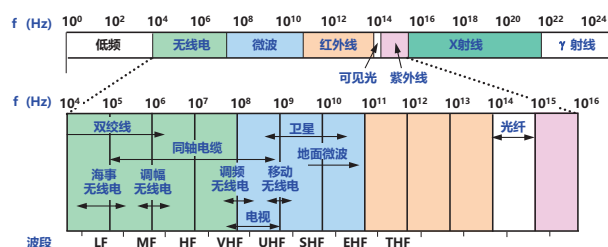
2.3.2 非导引型传输媒体

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**：电磁波被引导沿着固体媒体（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

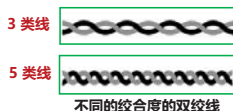
电信领域使用的电磁波的频谱：



2.3.1 导引型传输媒体

1. 双绞线

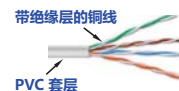
- 最古老但又最常用的传输媒体。
- 把两根互相绝缘的铜导线并排放在一起，然后用规则的方法**绞合 (twist)** 起来就构成了双绞线。
- 绞合度越高，可用的数据传输率越高。
- 2 大类：
 - ◆ 无屏蔽双绞线 UTP。
 - ◆ 屏蔽双绞线 STP。



1. 双绞线

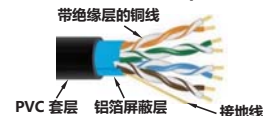
- **无屏蔽双绞线 UTP (Unshielded Twisted Pair)** :

- ◆ 无屏蔽层。
- ◆ 价格较便宜。



- **屏蔽双绞线 STP (Shielded Twisted Pair)**:

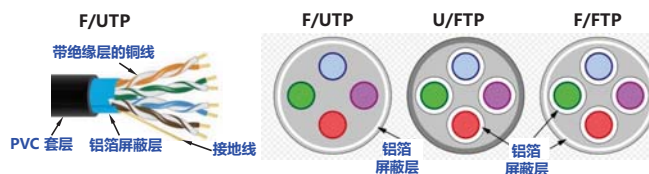
- ◆ 带屏蔽层。
- ◆ 都必须有接地线。



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。

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

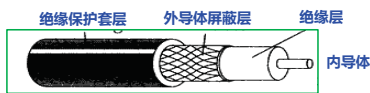
常用绞合线的类别、带宽和典型应用

| 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 | 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 |

- 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。

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。

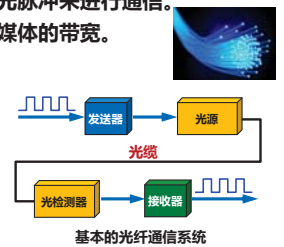


- 具有很好的抗干扰特性, 被广泛用于传输较高速率的数据。

3. 光缆

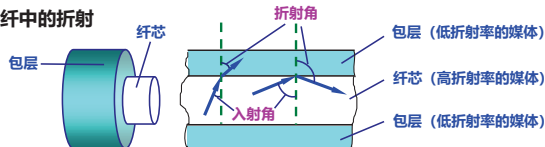
- 光纤是光纤通信的传输媒体。通过传递光脉冲来进行通信。
- 其传输带宽远远大于目前其他各种传输媒体的带宽。

- 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。



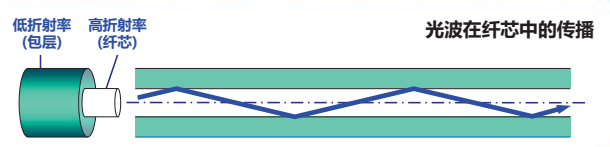
光波在纤芯中的传播

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

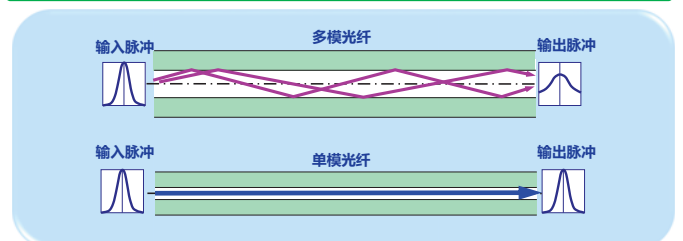


光线在纤芯中传输的方式是不断地**全反射**

多模光纤与单模光纤

- 多模光纤**
 - 可以存在**多条**不同角度入射的**光线**在一条光纤中传输。
 - 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, 但损耗较小。
 - 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

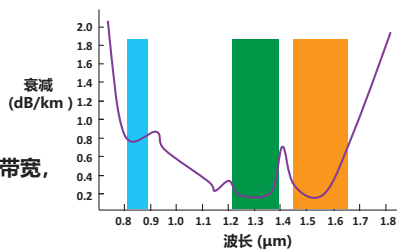


光纤通信中使用的光波的波段

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。



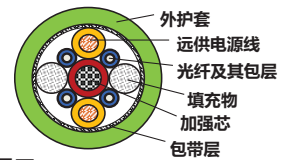
作业：850 nm, 1300 nm, 1550 nm 的光纤有什么区别

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。



纤芯：最内层是光纤，通常由硅制成，细如发丝，利用全内反射原理传输光信号，能够高效地传输数据超过数千里。
保护层：从内到外，依次是绝缘聚乙烯层、聚酯树脂薄膜带或沥青层、钢绞线层、铝制防水层、聚碳酸酯层、铜管或铝管（用于供电），以及石蜡或烷烃层。这些层层保护旨在抵抗海水腐蚀、高压、自然灾害和人为破坏。
铠装保护：为了增强光缆的抗压和抗拉强度，外层通常有多层金属铠装，最外层是聚乙烯保护套，以防止物理损伤和海水侵蚀。

作业：海底光缆里有什么

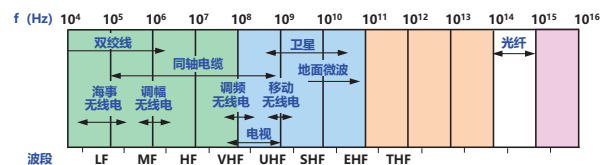
光纤优点

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

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。

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)



无线电微波通信

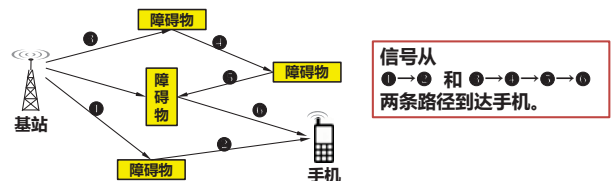
- 占有特殊重要的地位。
- 微波频率范围：
 - ◆ 300 MHz~300 GHz (波长1 m ~ 1 mm)。
 - ◆ 主要使用：2 ~ 40 GHz。
- 在空间主要是直线传播。
 - ◆ 地球表面：传播距离受到限制，一般只有 50 km 左右。
 - ◆ 100 m 高的天线塔：传播距离可增大到 100 km。



空警-3000预警机

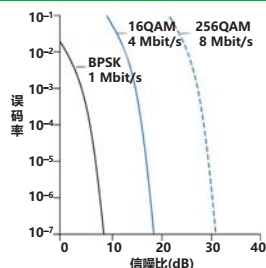
多径效应

- 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**。



误码率（即比特错误率）不能大于可容许的范围

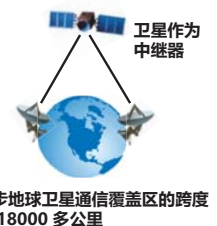
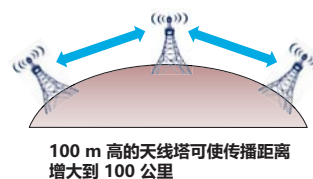
- 对于给定的调制方式和数据率，信噪比越大，误码率就越低。
- 对于同样的信噪比，具有更高数据率的调制技术的误码率也更高。
- 如果用户在进行通信时不断改变自己的地理位置，就会引起无线信道特性的改变，因而信噪比和误码率都会发生变化。



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。



远距离微波通信：微波接力

主要特点：

- ◆ (1) 微波波段频率很高，频段范围很宽，其通信信道的容量很大。
- ◆ (2) 工业干扰和天气干扰对微波通信的危害小，微波传输质量较高。
- ◆ (3) 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：

- ◆ (1) 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。
- ◆ (2) 有时会受到恶劣气候的影响。
- ◆ (3) 与电缆通信系统比较，微波通信的隐蔽性和保密性较差。
- ◆ (4) 对大量中继站的使用和维护要耗费较多的人力和物力。

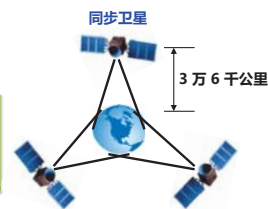
卫星通信

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。

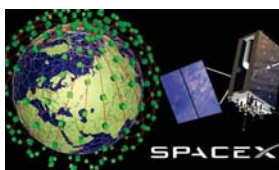
但传播时延较大：在 250~300 ms 之间。

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”。——何解？

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

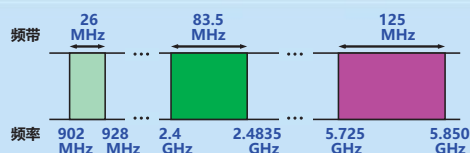
低轨道卫星通信系统（卫星高度在 2000 公里以下）已开始使用。目前，大功率、大容量、低轨道宽带卫星已开始在空中部署，并构成了空间高速链路。

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。

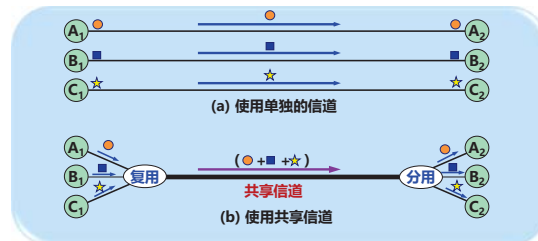
无线电频段：通常必须得到无线电频谱管理机构的许可证。

ISM 频段：可以自由使用。



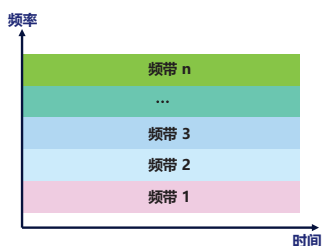
2.4.1 频分复用、时分复用和统计时分复用

- 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)

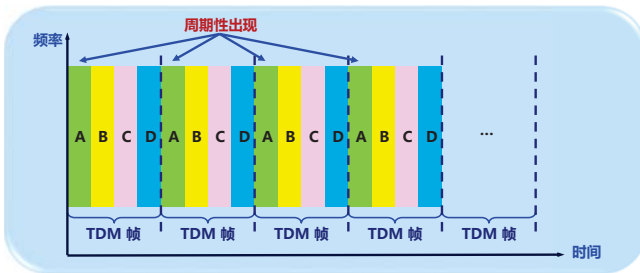
- 最基本。
- 将整个带宽分为多份，用户在分配到一定的频带后，在通信过程中自始至终都占用这个频带。
- 所有用户在同样的时间占用不同的带宽（即频带）资源。



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

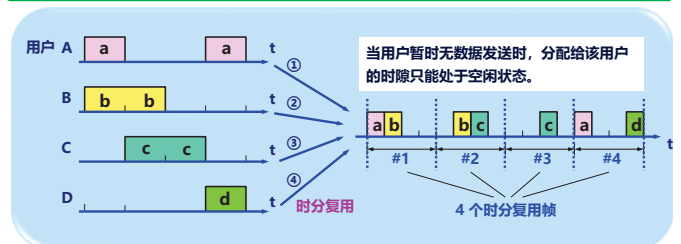
- 可让 N 个用户各使用一个频带，或让更多的用户轮流使用这 N 个频带。这种方式称为**频分多址接入 FDMA** (Frequency Division Multiple Access)，简称为**频分多址**。
- 可让 N 个用户各使用一个时隙，或让更多的用户轮流使用这 N 个时隙。这种方式称为**时分多址接入 TDMA** (Time Division Multiple Access)，简称为**时分多址**。

复用器 (multiplexer) 和分用器 (demultiplexer)

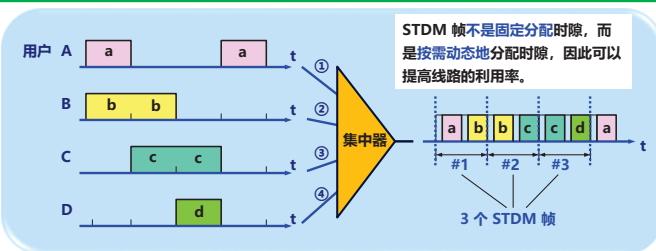
- 成对使用。



时分复用会导致信道利用率不高

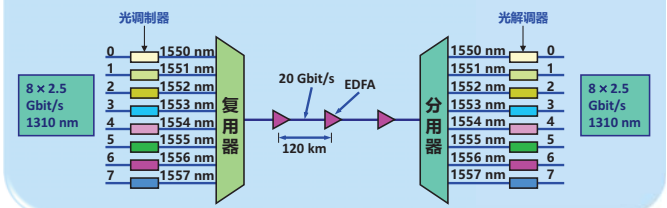


统计时分复用 STDM (Statistic TDM)



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。



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 \rightarrow 00011011
 0 \rightarrow 11100100
 码片序列：(-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 = $b \text{ bit/s}$, 实际发送的数据率 = $mb \text{ bit/s}$, 同时, 所占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:

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

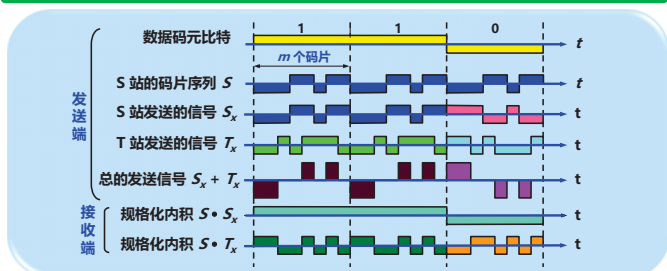
- 任何一个码片向量和该码片向量自己的规格化内积都是 1。

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

- 一个码片向量和该码片反码的向量的规格化内积值是 -1。

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

CDMA 工作原理



CDMA 举例说明

| 站 | 双极型码片序列 | | | | | | | | 发送比特序列 | | | |
|---|---------|----|----|----|----|----|----|----|--------|---|---|---|
| A | -1 | -1 | -1 | +1 | +1 | -1 | +1 | +1 | - | - | 1 | 1 |
| B | -1 | -1 | +1 | -1 | +1 | +1 | -1 | - | 1 | 0 | 0 | 1 |
| C | -1 | +1 | -1 | +1 | +1 | -1 | -1 | 1 | 1 | - | 1 | 0 |
| D | -1 | +1 | -1 | -1 | -1 | +1 | -1 | - | - | - | 1 | 1 |

| | | | | |
|----|---------|----|------|----------------|
| S1 | C | t1 | S1·C | (C)·C=1 |
| S2 | B+C | t2 | S2·C | (B+C)·C=1 |
| S3 | A+B | t3 | S3·C | (A+B)·C=0 |
| S4 | A+B+C | t4 | S4·C | (A+B+C)·C=1 |
| S5 | A+B+C+D | t5 | S5·C | (A+B+C+D)·C=1 |
| S6 | A+B+C+D | t6 | S6·C | (A+B+C+D)·C=-1 |

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语音、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)。我国采用欧洲标准
- 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)

- 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 40 Gbit/s (即 OC-768/STS-768) 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

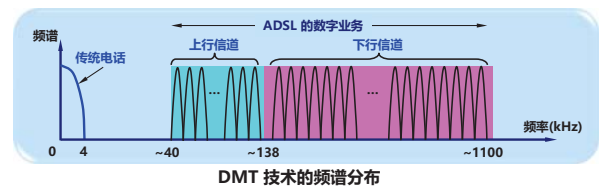
- 宽带：**标准在不断提高。
- 美国联邦通信委员会 FCC 定义：
宽带下行速率达 25 Mbit/s，宽带上行速率达 3 Mbit/s。
- 从宽带接入的媒体来看，划分为 2 大类：
 - 有线宽带接入。
 - 无线宽带接入。

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

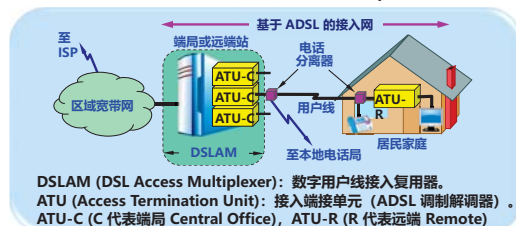
- 采用离散多音调 DMT (Discrete Multi-Tone) 调制技术。
- DMT 调制技术采用频分复用 FDM 方法。
- 相当于在一对用户线上使用许多小的调制解调器并行地传送数据。
- ADSL 不能保证固定的数据率。



ADSL 的组成

3 大组成部分：

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。

第二代 ADSL

- 包括 ADSL2 (G.992.3 和 G.992.4) 和 ADSL2+ (G.992.5)。
- 主要改进：**
 - (1) 通过提高调制效率得到了更高的数据率。
 - (2) 采用了无缝速率自适应技术 SRA (Seamless Rate Adaptation)。
 - (3) 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。



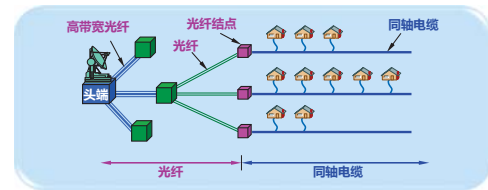
xDSL

- 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)

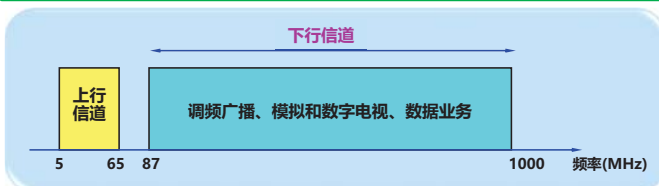
- HFC (Hybrid Fiber Coax) 网基于有线电视网 CATV 网。
- 改造: 把原有有线电视网中的同轴电缆主干部分更换为光纤



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。

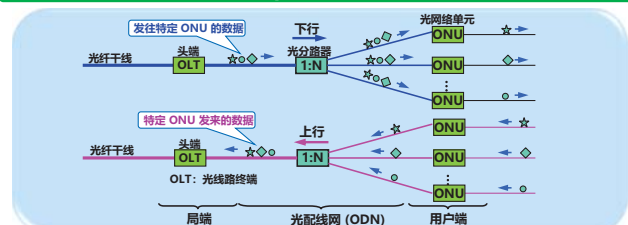


2.6.3 FTTx 技术

- 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 FTTT (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。