

互联网早期发展与启示

- 诞生阶段的启发
 - 有战略背景和传统技术无法解决的**重大需求**
 - **分组交换**的**理论突破**和**原型系统实验**并举
 - 有政府的不断支持：从1969开创至今
- 成长壮大阶段
 - **简单实用**的技术路线**TCP/IP**诞生和发展
 - 教育和科研的示范网络为**起点**：
具有实验物理学的研究特点
 - ARPAnet、NSFNET、ANS、vBNS
 - **联合协作的开放式研究**：IETF/RFC
 - 在不断试错中快速成长壮大

互联网诞生的两种说法

- 1、1969年ARPANET诞生
- 2、1983年ARPANET采用TCP/IP



互联网诞生50周年之际，清华大学于2019年在北京承办网络领域顶会
ACM Sigcomm

互联网的新发展与启示

- 1993年Mosaic浏览器诞生, 开启了互联网广泛商用之路
- 94年万维网联盟W3C成立
- 互联网进入高速发展期: 雅虎、AOL、谷歌、亚马逊、EBay、Netflix、腾讯、阿里、百度、京东
- 95年NSFnet退役, 转商业, 网景上市, 达29亿美元
- Netscape/微软IE世纪之争
- 2000年, 互联网泡沫破灭, 进入低调发展阶段
- Myspace、Skype、Safari、Facebook、Twitter、youtube、土豆、youku
- 2007年, 3G+iPhone, 谷歌收购安卓, 即将进入移动互联网
- 各种应用: Uber, airbnb, 滴滴, 抖音, 头条, 美团, 拼多多...
- 云为基础的互联网平台
- 新技术爆发: 高速网络, 云, SDN, 大数据/AI, VR/AR
- 2010年, 4G LTE部署
- IoT
- 车联网
- 5G+进入各行业

Web 1.0 (1993-1999)

浏览器、门户、电子商务

ISDN上网, ~64Kbps

Web 2.0 (2000-2007)

博客、社交媒体、视频

DSL/LAN, ~10Mbps

移动互联 (~2018)

导航, 网购, 互联网+

WIFI+4G+, ~100Mbps

智能互联 (~)

万物互联

5G+, 一体化网络

数据以下载为主, 下行带宽要求高

直播应用用户开始产生数据, 开始对上行带宽提出更高要求

互联网的新发展与启示

商业需求是核心驱动力，技术创新提供重要基础

- 有远见的**企业**参与并不断投入：MCI、IBM、Qwest, CISCO.....
- 有线=>无线=>广覆盖：便捷程度决定了用户使用方式和在线时间
- 网络性能决定了应用体验，成了互联网应用发展的必要条件
- 网络带宽决定了应用能传什么：
文本=>图片（静图->动图）=>音频=>视频（低清->高清，短视频->直播）
- **网络性能提升、延迟降低**：快速响应？可靠性？计算、存储、传输的互换？

Web 1.0 (1993-1999)

浏览器、门户、电子商务

ISDN上网，~64Kbps

Web 2.0 (2000-2007)

博客、社交媒体、视频

DSL/LAN，~10Mbps

移动互联 (~2018)

导航，网购，互联网+

WIFI+4G+，~100Mbps

智能互联 (~)

万物互联

5G+，一体化网络

数据以下载为主，下行带宽要求高

直播应用用户开始产生数据，开始对上行带宽提出更高要求

2. 物理层关键技术

本章目标

- 理解物理层基本概念、功能和基本特性
- 掌握数据通信的基本术语、不同传输方式的特点和传输性能的刻画与度量
- 理解不同传输介质的特点
- 理解无线与卫星通信的特点和属性
- 掌握不同多路复用技术的基本原理和特点

本章内容

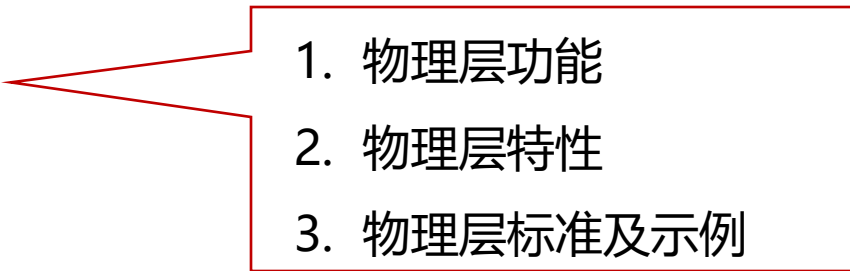
2.1 物理层基本概念

2.2 数据通信基础

2.3 传输介质

2.4 无线与卫星通信

2.5 多路复用技术

- 
1. 物理层功能
 2. 物理层特性
 3. 物理层标准及示例

物理层功能

- **位置：**物理层是网络体系结构中的最低层
 - 是连接计算机的具体物理设备吗？ ×不是
 - 是负责信号传输的具体物理媒体吗？ ×不是
- **功能：**如何在连接各计算机的传输媒体上**传输数据比特流**
 - 数据链路层将数据比特流传送给物理层
 - 物理层将比特流按照传输媒体的需要进行编码
 - 然后将信号通过传输媒体传输到下一个节点的物理层
- **作用：**尽可能地**屏蔽掉不同传输媒体和通信手段的差异**
 - 为数据链路层提供一个统一的数据传输服务



TCP/IP 5层模型

物理层基本概念

- **数据终端设备(DTE)**

- 一种具有一定的数据处理和转发能力的设备
- 可以是数据的源点或终点

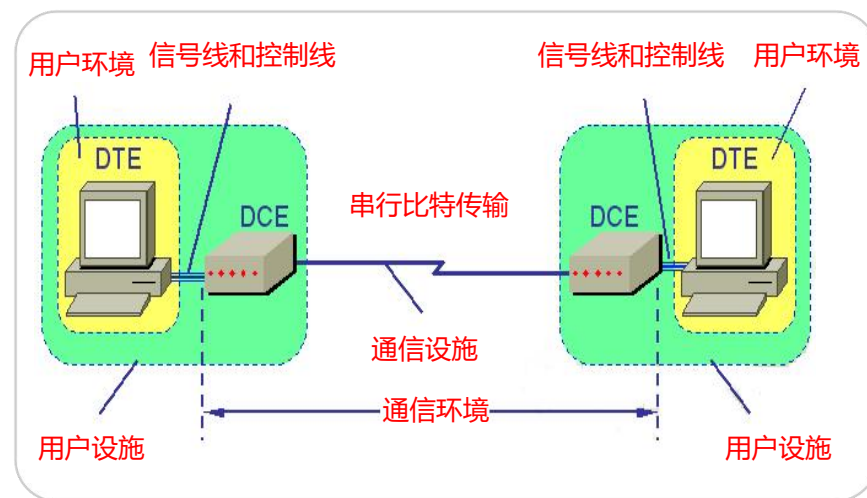
- **数据电路终结设备(DCE)-modem**

- 在DTE和传输线路之间提供信号变换和编码的功能
- 负责建立、保持和释放数据链路

- 标准化的DTE/DCE接口具有

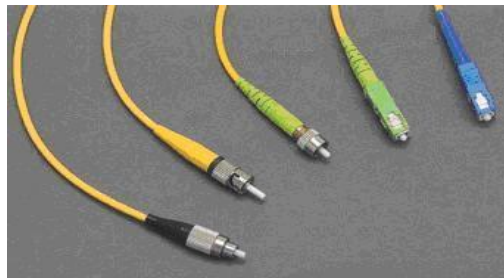
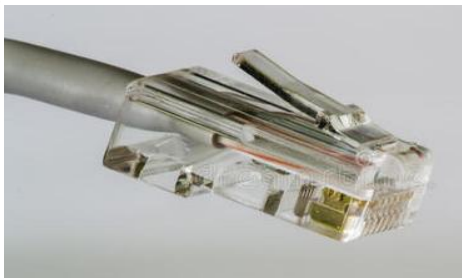
- 机械特性、电气特性
- 功能特性、过程特性

➤ 物理层协议是DTE和DCE间的约定，规定了两者之间的接口特性



数据通信系统组成

- 涉及接口的物理结构，通常采用接线器来实现机械上的连接
- 定义接线器的**形状和尺寸**、**引线数目和排列**、**固定和锁定装置**等



各种类型物理接口

物理层基本概念

- 规定了DTE/DCE之间**多条信号线的电气连接及有关电路特性**
 - 发送器和接收器的**电压范围、阻抗匹配、传输速率和连接距离**等
 - 如**发送信号电平、发送器和接收器的输出阻抗、平衡特性**等

- 电气特性举例

- 普通电话交换网接口

电气特性的主要规定

- ITU-T V/X系列有关

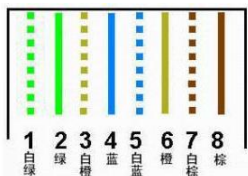
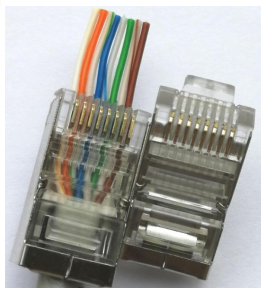
建议的某些电气特性

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

物理层基本概念

- 描述接口执行的功能，定义接线器的每一引脚(针，Pin)的作用



| 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 |

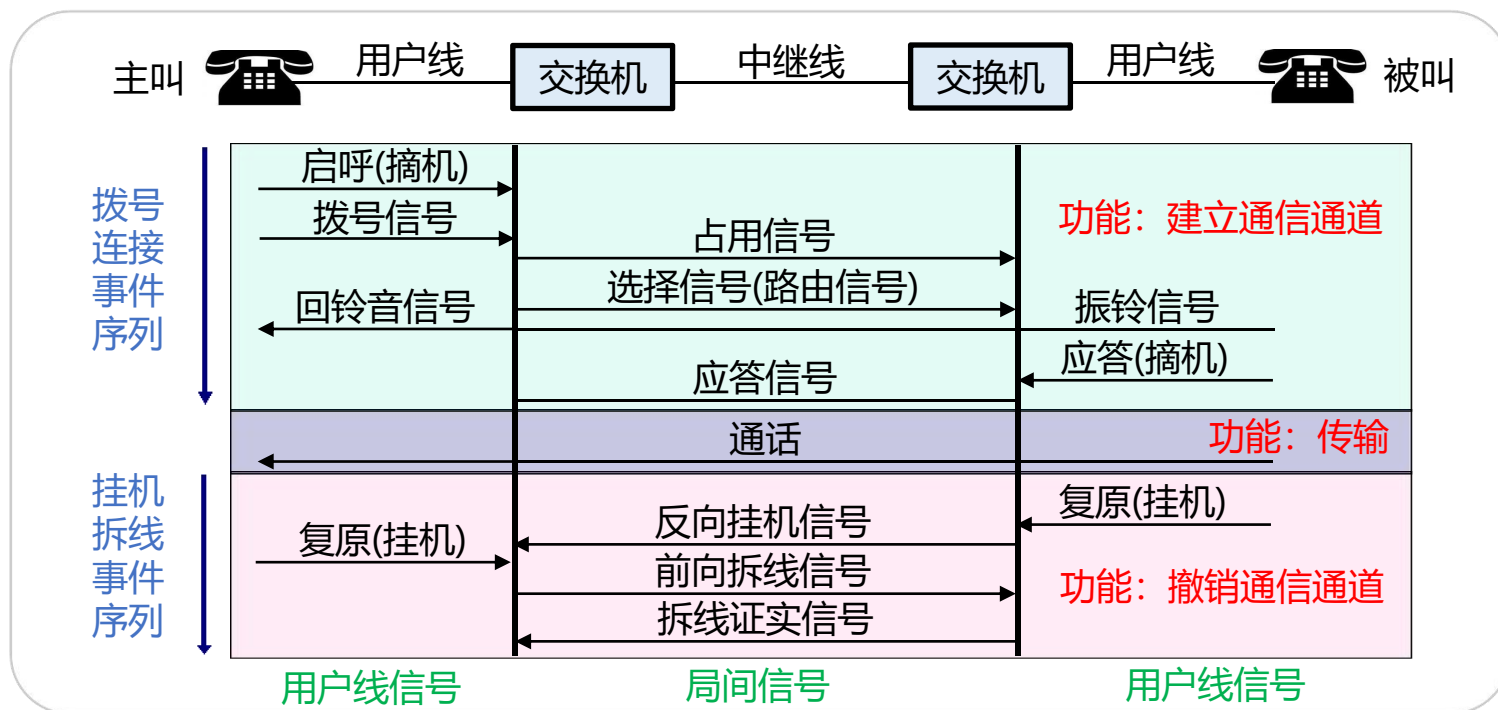
10BASE-T RJ-45 接口功能特性

| 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

- 指明对于不同功能的各种可能事件的出现顺序



过程特性示例：电话通信

物理层基本概念

物理层常用标准

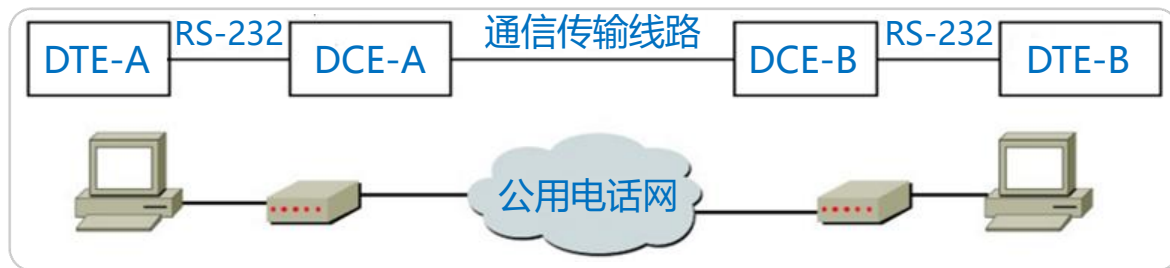
- 点对点通信线路用于直接连接两个结点
- 点对点通信线路的物理层标准
 - EIA RS-232-C标准

- 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



美国电子工业协会(EIA)创建于1924年, 它广泛代表了设计生产电子元件、部件、通信系统和设备的制造商以及工业界、政府和用户的利益, 在提高美国制造商的竞争力方面起到了重要的作用。

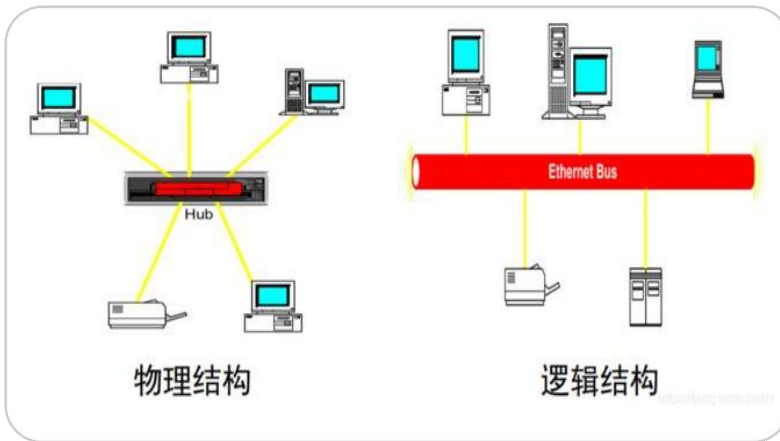
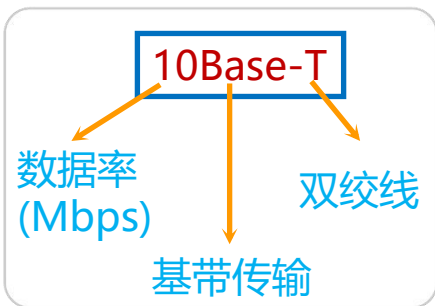
物理层基本概念



点对点通信线路和RS-232-C标准

物理层常用标准

- **广播通信线路**：一条公共通信线路连接多个结点
- 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



广播通信线路的物理层标准

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

物理层基本概念

本章内容

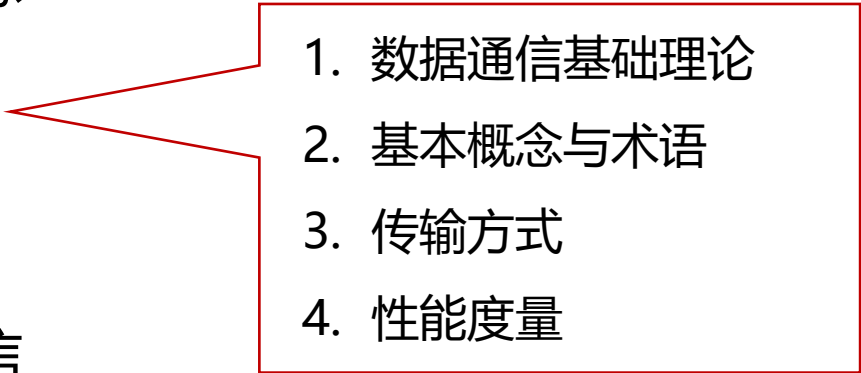
2.1 物理层基本概念

2.2 数据通信基础

2.3 传输介质

2.4 无线与卫星通信

2.5 多路复用技术

- 
1. 数据通信基础理论
 2. 基本概念与术语
 3. 传输方式
 4. 性能度量

- 主要内容
 - 研究信号在通信信道上传输时的数学表示及其所受到的限制
- 傅立叶分析
 - 在网络通信中，信息是以电磁信号（或简称信号）的形式传输的
 - 电磁信号是时间的函数（时域观）
 - 也可以表示成频率的函数（频域观）
 - 对于理解数据传输来讲，信号的频域观比时域观更重要
- 时域观
 - 从时间函数的角度来看，电磁信号分为模拟信号和数字信号
 - 模拟信号的信号强度随着时间平滑变化，或者说信号中没有突变或不连续的地方。
 - 数字信号的信号强度在一段时间内保持一个恒定值，然后又变成另外一个恒定值
- 频域观
 - 基本定义
 - 当一个信号的所有频率成分是某一个频率的整数倍时，该频率被称为基本频率
 - 信号的周期等于基本频率的周期
 - 傅立叶分析

- 傅立叶分析
 - 任何一个周期为T的有理周期性函数 $g(t)$ 可分解为若干项（可能无限多项）正弦和余弦函数之和

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

- 基本频率： $f = 1/T$
- a_n, b_n : n 次谐波项的正弦和余弦振幅值

- 已知 $g(t)$, 求 c, a_n, b_n :
- 将等式两边从 0 到 T 积分可得 c

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

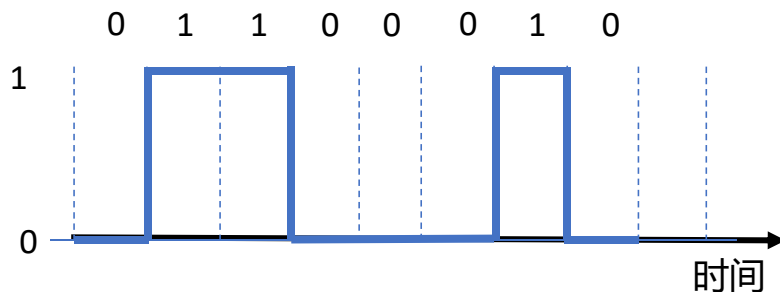
- 用 $\sin(2\pi kft)$ 乘等式两边, 并从 0 到 T 积分, 可得 a_n

$$a_n = \frac{2}{T} \int_0^T g(t) \sin(2\pi nft) dt$$

- 用 $\cos(2\pi kft)$ 乘等式两边, 并从 0 到 T 积分, 可得 b_n

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

- 对于二进制编码 0 1 1 0 0 0 1 0，其输出电压波形为：



$$g(t) = \begin{cases} 0 & 0 < t \leq \frac{T}{8} \\ 1 & \frac{T}{8} < t \leq \frac{3T}{8} \\ 0 & \frac{3T}{8} < t \leq \frac{6T}{8} \\ 1 & \frac{6T}{8} < t \leq \frac{7T}{8} \\ 0 & \frac{7T}{8} < t < T \end{cases}$$

- 其傅立叶分析的系数为

- $a_n = [\cos(\pi n/4) - \cos(3 \pi n/4) + \cos(6 \pi n/4) - \cos(7 \pi n/4)]$

- $b_n = [\sin(3\pi n/4) - \sin(\pi n/4) + \sin(7 \pi n/4) - \sin(6 \pi n/4)]$

- $c = 3/8$

傅立叶分析

- 根据傅立叶分析，任何电磁信号可以由若干具有不同振幅、频率和相位的周期模拟信号（正弦波）组成
- 反过来，只要有足够的具有适当振幅、频率和相位的正弦波，就可以构造任何一个信号

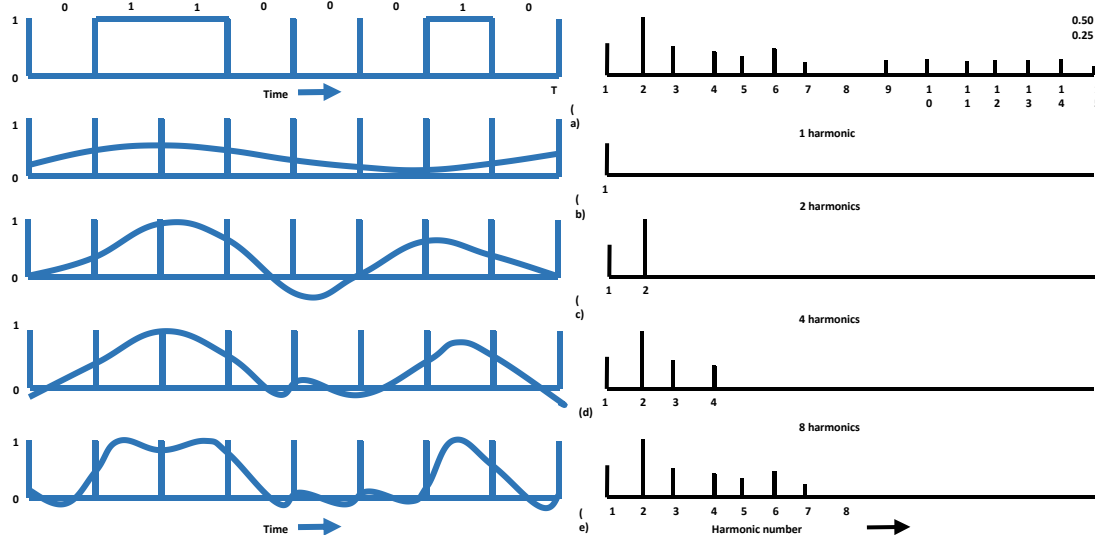


图2-1

有限带宽信号

- 频谱 (spectrum) 是一个信号所包含的频率的范围
 - 图2-1 (e) 中信号的频谱从 f 到 $8f$
- 信号的绝对带宽等于频谱的宽度
 - 图2-1 (e) 中信号的带宽为 $8f - f = 7f$
- 许多信号的带宽是无限的, 然而信号的主要能量集中在相对窄的频带内, 这个频带被称为有效带宽, 或带宽 (bandwidth)
- 信号的信息承载能力与带宽有直接关系, 带宽越宽, 信息承载能力越强

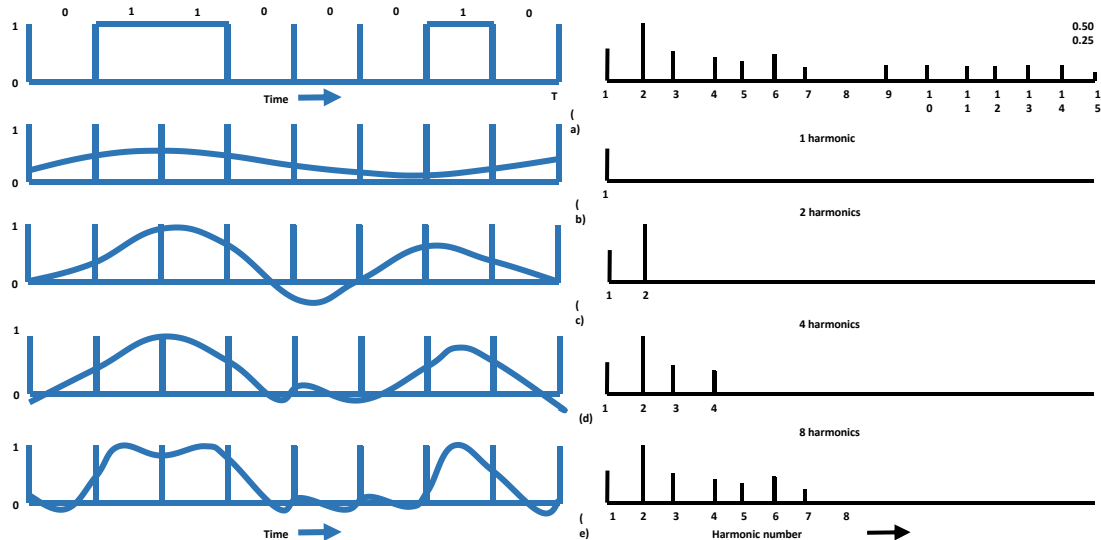


图2-1

有限带宽信号

- 信号在信道上传输时的特性
 - 对不同傅立叶分量的衰减不同，引起输出失真
 - 信道有截止频率 f_c , $0 \sim f_c$ 的振幅衰减较弱, f_c 以上的振幅衰减厉害, 这主要由信道的物理特性决定, $0 \sim f_c$ 是信道的有限带宽
 - 实际使用时, 可以接入滤波器, 限制用户的带宽
 - 通过信道的谐波次数越多, 信号越逼真
- 波特率 (baud) 和比特率 (bit) 的关系
 - 波特率: 每秒钟信号变化的次数, 也称调制速率
 - 比特率: 每秒钟传送的二进制位数
 - 波特率与比特率的关系取决于信号值与比特位的关系
 - 例: 每个信号值可表示3位, 则比特率是波特率的3倍; 每个信号值可表示1位, 则比特率和波特率相同

有限带宽信号

- 对于比特率为 B bps的信道，发送8位所需的时间为 $8/B$ 秒，若8位为一个周期 T，则一次谐波的频率是： $f_1 = B/8$ Hz
- 能通过信道的最高次谐波数目为： $N = f_c / f_1$
 - 音频线路的截止频率为 3000Hz
 - $N = f_c / f_1 = 3000/(B/8) = 24000/B$

| Bps | T (msec) | First harmonic (Hz) | # Harmonics sent |
|-------|----------|---------------------|------------------|
| 300 | 26.67 | 37.5 | 80 |
| 600 | 13.33 | 75 | 40 |
| 1200 | 6.67 | 150 | 20 |
| 2400 | 3.33 | 300 | 10 |
| 4800 | 1.67 | 600 | 5 |
| 9600 | 0.83 | 1200 | 2 |
| 19200 | 0.42 | 2400 | 1 |
| 38400 | 0.21 | 4800 | 0 |

Fig. 2-2. Relation between data rate and harmonics.

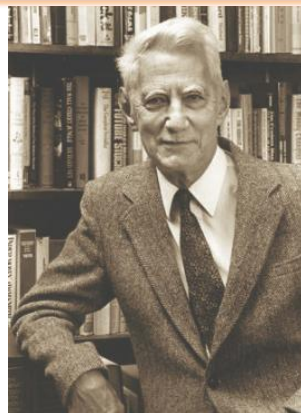
- 结论：即使对于完善的信道，有限的带宽限制了数据的传输速率

信道的最大数据传输速率

- 1924年，奈奎斯特(H. Nyquist)推导出无噪声有限带宽信道的最大数据传输率公式
- 奈奎斯特定理
 - 最大数据传输率 = $2H\log_2 V$ (bps)
 - 任意信号通过一个带宽为H的低通滤波器，则每秒采样2H次就能完整地重现该信号，信号电平分为V级

信道的最大数据传输速率

- 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
- 随机噪声出现的大小用信噪比（信号功率S与噪声功率N之比）来衡量， $10\log_{10}S/N$ ，单位：分贝
 - 电话系统的典型信噪比为30db
- 香农定理
 - 带宽为 H 赫兹，信噪比为S/N的任意信道的最大数据传输率为： $H\log_2(1 + S/N)$ (bps)
 - 此式是利用信息论得出的，具有普遍意义
 - 与信号电平级数、采样速度无关
 - 此式仅是上限，难以达到



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

信道的最大数据传输速率

• 信息量

- 根据香农理论，一条消息包含信息的多少称为信息量
- 信息量的大小与消息所描述事件的出现概率有关
- 一条消息所荷载的信息量等于它所表示的事件发生的概率 p 的倒数的对数 $I = \log_a \frac{1}{p} = -\log_a p$
通常用比特作为信息量的单位

a表示
进制

a=2时，I的单位为比特；
a=自然数e，I的单位为奈特

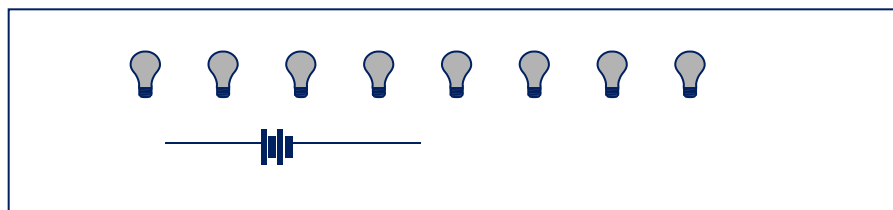
- ✓ 得到信息的过程就是获得新知识的过程
- ✓ 概率信息是指一个随机事件发生之后，它所带给人们的新知识，或者说是原来该事件不定度的解除量；是指事物运动状态和状态变化方式的客观反映

- 如消息表示的事件是必然事件(概率为1)，则该消息不含有任何信息量
- 如消息表示的事件根本不可能发生(概率为0)，则该消息含有无穷的信息量

信道的最大数据传输速率

举例：二元判断信息量

有8只灯泡，只知其中有1只灯丝已断，用1节电池来测，问只需测几次就可接除其不定度



每1次判断后我们可得到一个是否信息，亦称二元信息。由于它是解除不定度的最小单位，由此定义出信息量的最小单位比特(bit = Binary Digits)。

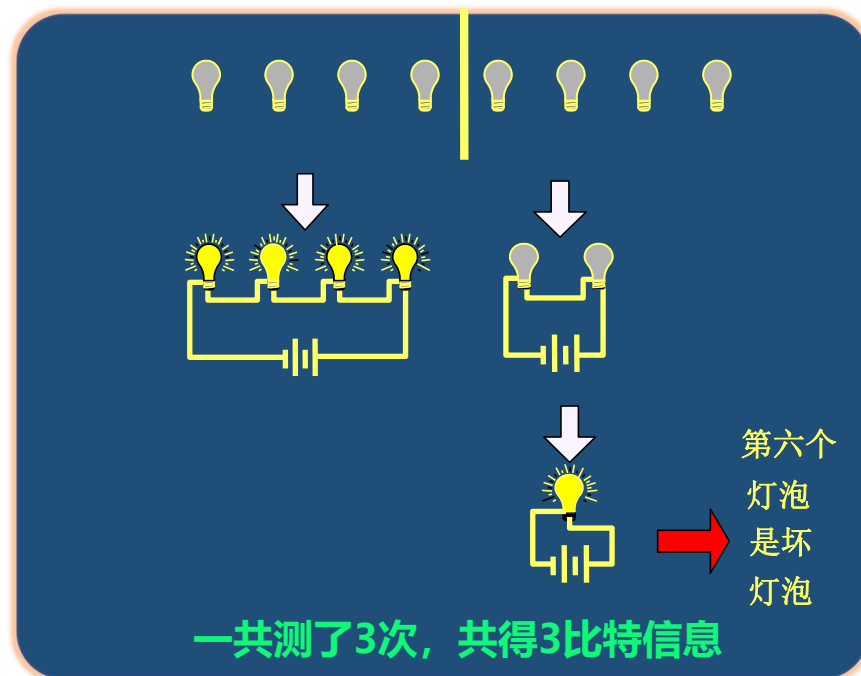
对于8只中任意一只灯泡都有可能断丝，因此这是一个等概率随机事件，故其概率为：

$$p(x) = \frac{1}{8}$$

该事件不确定度的大小为：

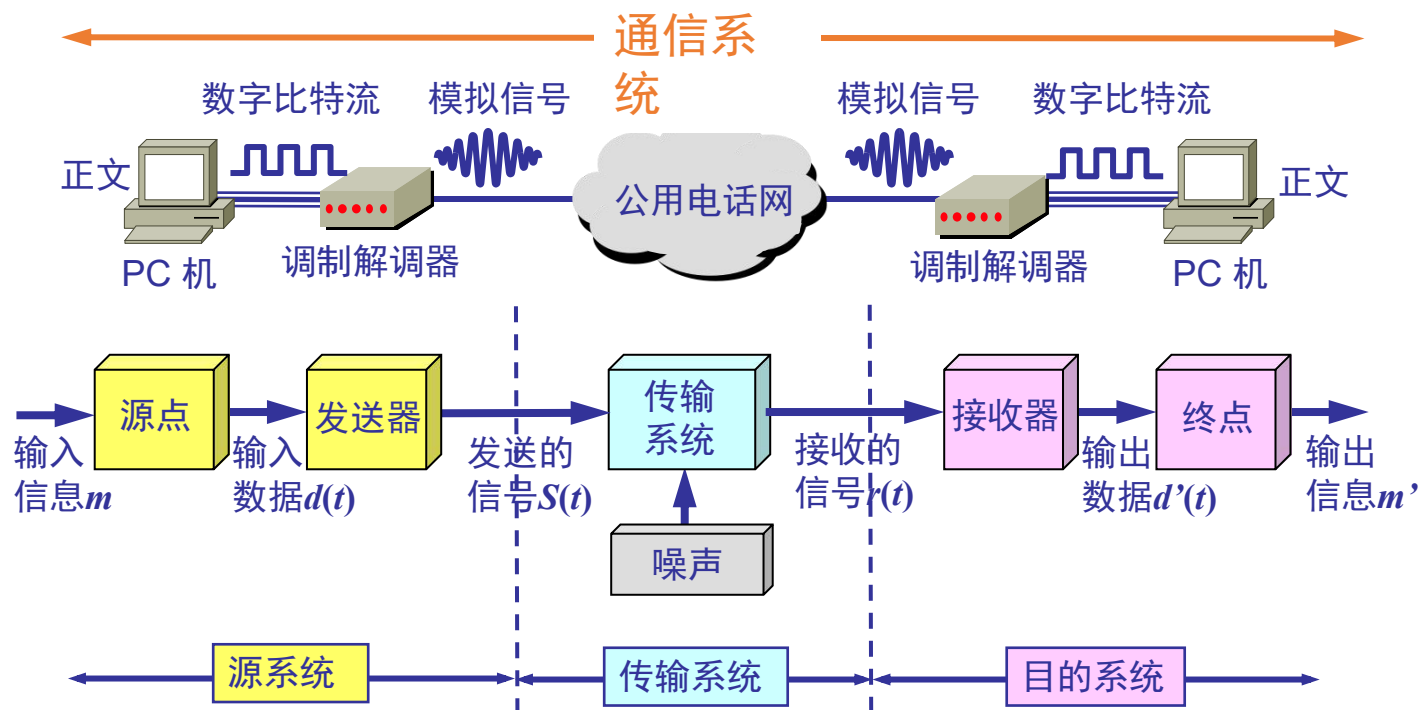
$$-\log_2 p(x) = \log_2 8 = 3 \text{ bit}$$

数据通信基础



【思考】有27个大小形状相同小球，知其中有1重球。问若用无砝码天平来判断，最多称几次可找出此重球？当完全解除不定度后所得信息量是否要比上述例自大？

数据通信系统模型



数据通信系统模型

数据通信离不开计算机，因此常把数据通信与计算机通信这两名词混用。

通信、消息、信息、数据、信号

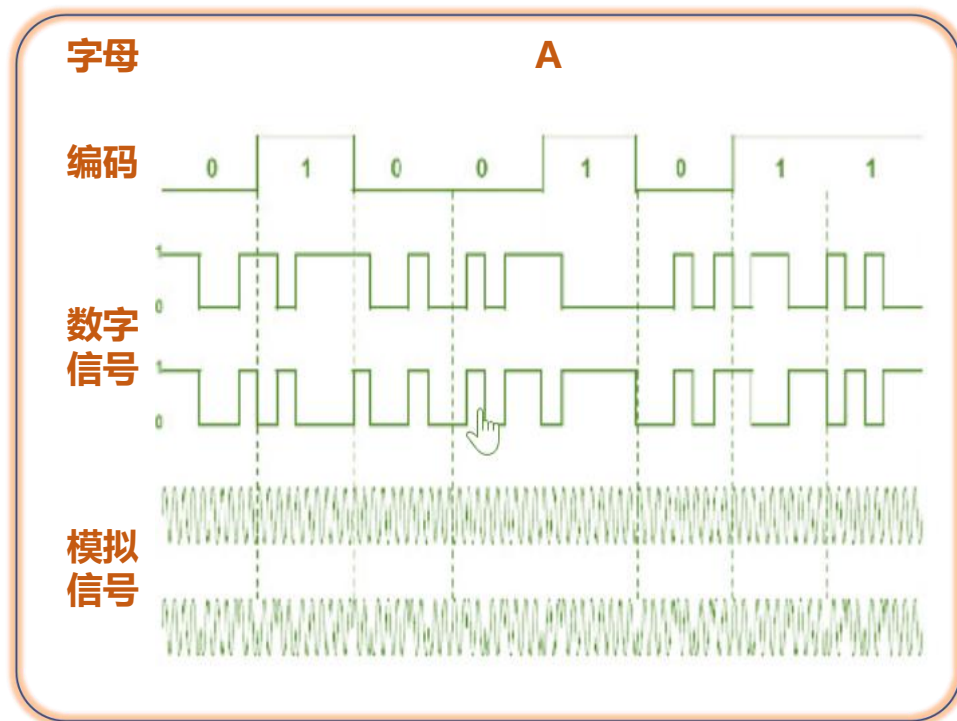
- **通信**是在源点与终点之间传递消息或者信息，但信息和消息有着不同的概念
- **消息**是指能向人们表达客观物质运动和主观思维活动的文字、符号、数据、语音和图像等
- 消息两个特点：
 - ①能被通信双方所理解
 - ②可以相互传递
- **信息**是指包含在消息中对通信者有意义的那部分内容
- 消息是信息的载体，消息中可能含有信息



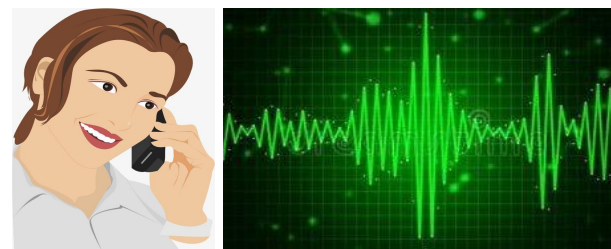
举例：比如一个人想要学计算机网络的课程，那么无论是书本，还是老师上课的视频，或者上课的音频，这都是消息，而转化到学习者大脑里就是知识了，他可以通过以上各种方式学习，到大脑里就是信息。而将电子书、视频或音频传给他的过程就是数据传输的过程。

通信、消息、信息、数据、信号

- **数据**是对某一事实的不经解释并赋予一定含义的数字、字母、文字等符号及其组合的原始表达
- 数据是消息的一种表示形式，是传达某种意义或信息的实体。
- 在通信系统中，消息是通过电信号来传递的
- **信号是消息的载体**（比如电信号、光信号等）



- 当信息被表示为数据时，数据中就包含了信息
- 信息可以通过解释数据来产生
- 信息强调“处理”和“使用”两个方面，尤其是“使用”。一份资料在使用之前其中的内容隶属于数制范畴，仅当它被使用之后才转化为信息
- 数据分为**模拟数据**和**数字数据**。模拟数据在一段时间内具有连续的值(如声音等)，而数字数据则具有离散的值(如文本等)



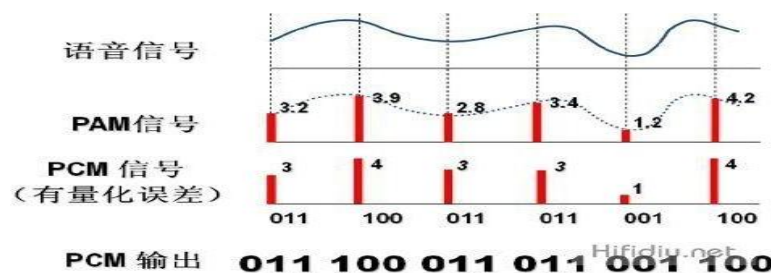
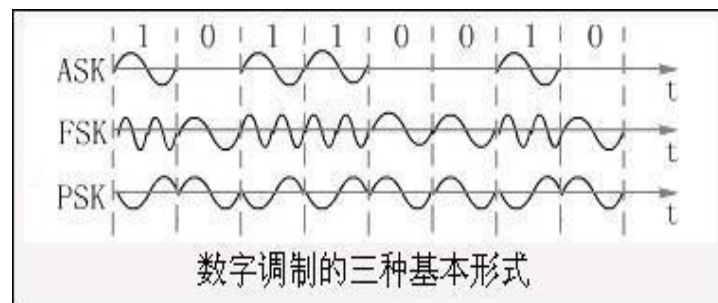
模拟数据



数字数据

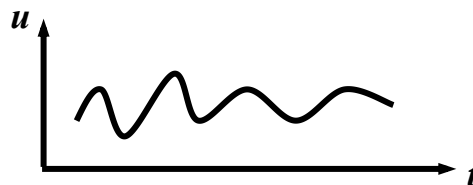
数据的信号表示

- 通信系统中的电信号有模拟信号和数字信号，而数据又有模拟数据和数字数据
- 无论是模拟数据还是数字数据都能编码成模拟信号或数字信号
- 选择何种编码方式取决于需满足的要求和可能提供的传输媒体和通信设施
- 数据和信号的四种组合：
 - 数字数据，数字信号(如0/1表示负电平/正电平，一串离散的、非连续的电压脉冲序列)
 - 数字数据，模拟信号(如ASK、FSK和PSK)
 - 模拟数据，数字信号(如话音信号的PCM调制)
 - 模拟数据，模拟信号(如AM、FM和PM)

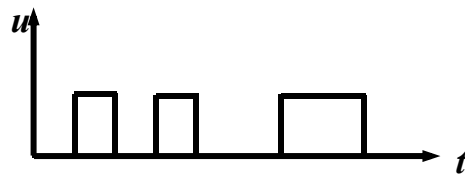


- 数字通信和模拟通信

- 以模拟信号来传送消息的通信方式称为模拟通信，而传输模拟信号的通信系统称为模拟通信系统
- 以数字信号来传送消息的通信方式称为数字通信，而传输数字信号的通信方式称为数字通信系统
- 模拟信号和数字信号在传输过程中可以相互变换，即A/D和D/A



模拟信号



数字信号

串行传输和并行传输

按照传输数据的时空顺序，传输方式可分为两类：

- **串行传输** 指数据在一个信道上按位依次传输的方式

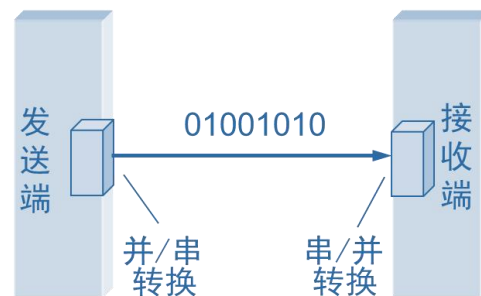
其特点是：

- 所需线路数少，投资省，线路利用率高
- 在发送和接收端需要分别进行并/串和串/并转换
- 收发之间必须实施同步。适用于远距离数据传输

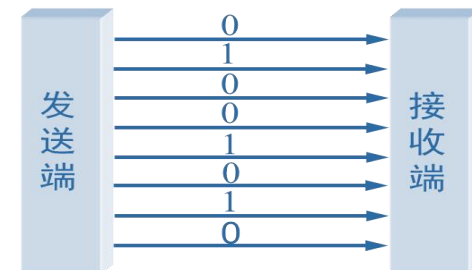
- **并行传输** 指数据在多个信道上同时传输的方式

其特点是：

- 在终端装置和线路之间不需要对传输代码作时序变换
- 需要 n 条信道的传输设施，故其成本较高，适用于要求传输速率高的短距离数据传输



串行传输

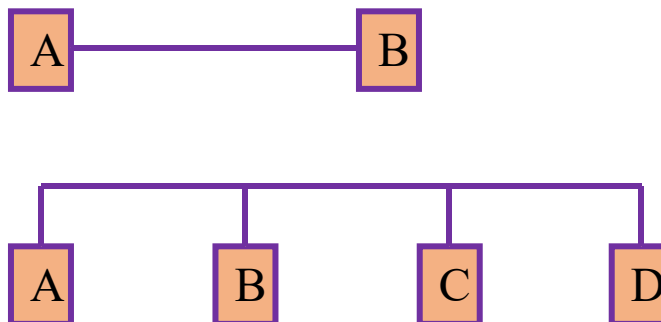


并行传输

点到点传输/点到多点传输

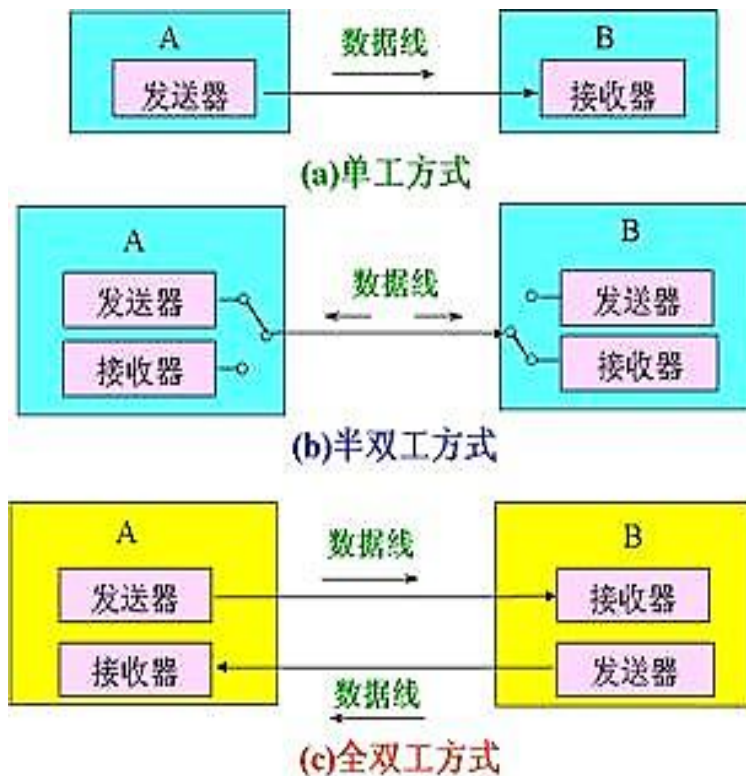
- 连接方式 为适应不同的需要，通信线路采用不同的连接方式

- 点到点传输
- 点到多点传输



单工、半双工和全双工

- 按照数据信号在信道上的传送方向与时间的关系，传输方式可分为三类：
- 单工** 指两个站之间只能沿一个指定的方向传送数据信号
- 半双工** 指两个站之间可以在两个方向上传送数据信号，但不能同时进行，又称“双向交替”模式，发/收之间的转向时间为20~50ms
- 全双工** 指两个站之间可以在两个方向上同时传送数据信号

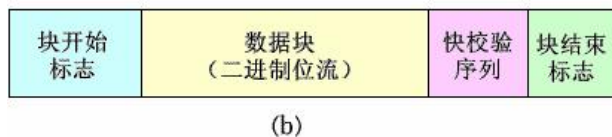
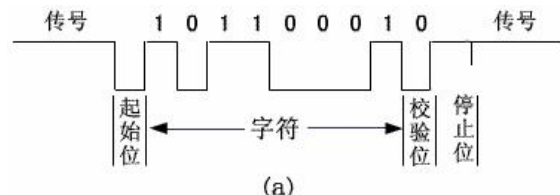


异步传输和同步传输

按照发/收两端实现同步的方法，传输方式可分为两类：

• 异步传输

- 被传送的每一个字符一般都附加有1个起始位和1个停止位，起始位与停止位的极性不同，为了保证正确接收，利用一个频率为传输比特率的 n 倍的时钟，在每一个比特周期的中心采样



• 同步传输

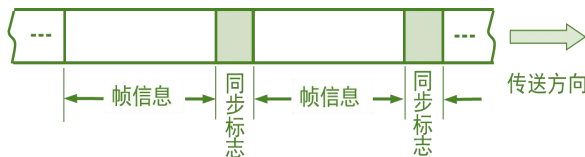
- 每一个字符使用起止位按位进行传送，数据块以帧作为整体传输，并做到：

①发/收之间的位同步

②每一帧建立同步标志，建立帧同步

区别：

异步传输的发送器的接收器的时钟是不同步的，而同步传输两者的时钟是同步的



基带传输和频带传输

按照传输系统在传输数据信号过程中是否搬其频谱，传输方式可分两类：

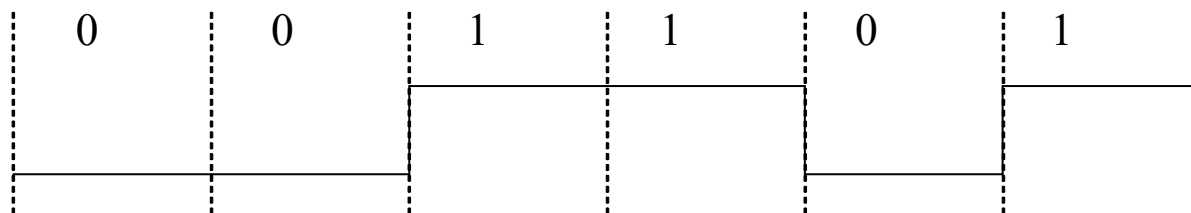
- **基带传输**

- 指未对载波调制的待传信号称为基带信号，它所占的频带称为基带。基带传输，指一种不搬移基带信号频谱的传输方式
- 基带传输是一种最简单最基本的传输方式，一般用低电平表示“0”，高电平表示“1”
- 适用范围：低速和高速的各种情况
- 限制：因基带信号所带的频率成分很宽，所以对传输线有一定的要求

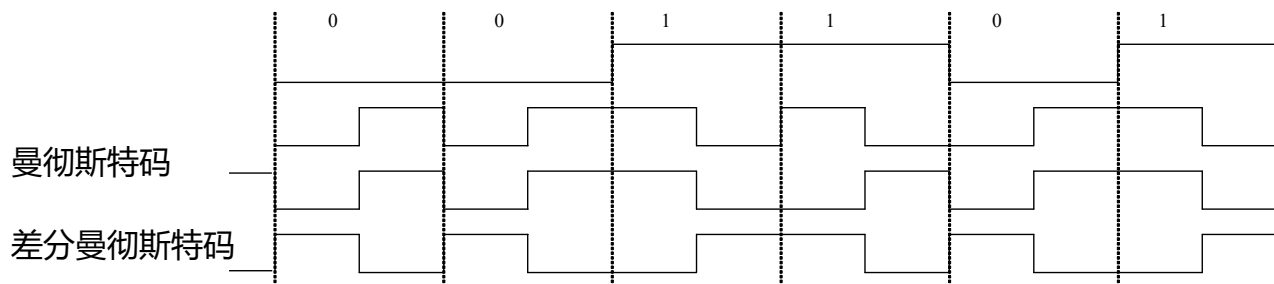
- **频带传输**

- 指利用调制解调器搬移信号频谱的传输体制
- 搬移频谱的目的是为了适应信道的频率特性

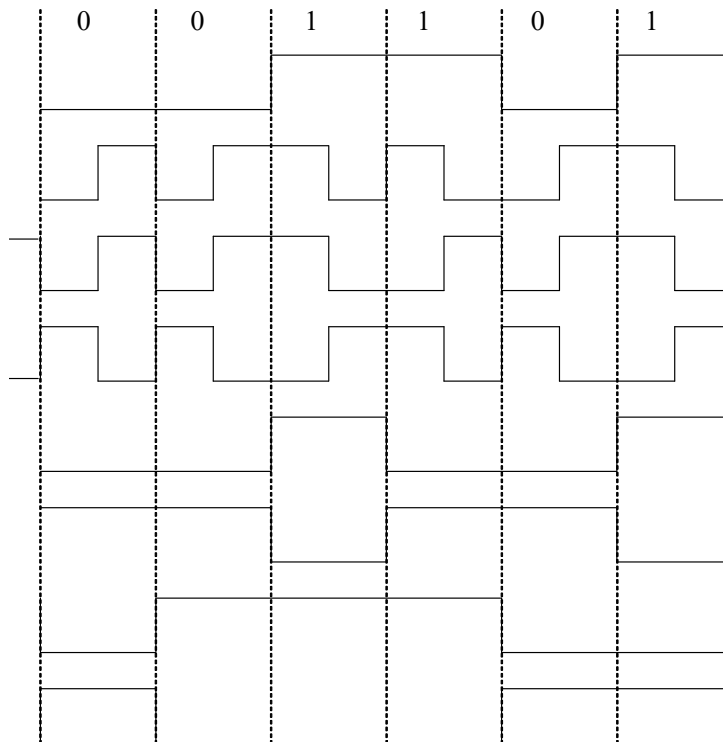
- 研究数据在信号传输过程中如何进行编码(变换)
- 常用的几种编码方式
 - 不归零制码 (NRZ: Non-Return to Zero)
 - 原理: 用两种不同的电平分别表示二进制信息 “0” 和 “1” , 低电平表示 “0” , 高电平表示 “1”
 - 缺点:
 - 难以分辨一位的结束和另一位开始
 - 发送方和接收方必须有时钟同步
 - 若信号中 “0” 或 “1” 连续出现, 信号直流分量将累加
 - 结论: 容易产生传播错误



- 曼彻斯特码 (Manchester) , 也称相位编码
 - 原理: 每一位中间都有一个跳变, 从低跳到高表示 “0” , 从高跳到低表示 “1”
 - 优点: 克服了NRZ码的不足。每位中间的跳变即可作为数据, 又可作为时钟, 能够自同步
- 差分曼彻斯特码 (Differential Manchester)
 - 原理: 每一位中间都有一个跳变, 每位开始时有跳变表示 “0” , 无跳变表示 “1” 。位中间跳变表示时钟, 位前跳变表示数据
 - 优点: 时钟、数据合并, 便于提取



- 逢“1”变化的NRZ码
 - 原理：在每位开始时，逢“1”电平跳变，逢“0”电平不跳变
- 逢“0”变化的NRZ码
 - 原理：在每位开始时，逢“0”电平跳变，逢“1”电平不跳变



NRZ

曼彻斯特

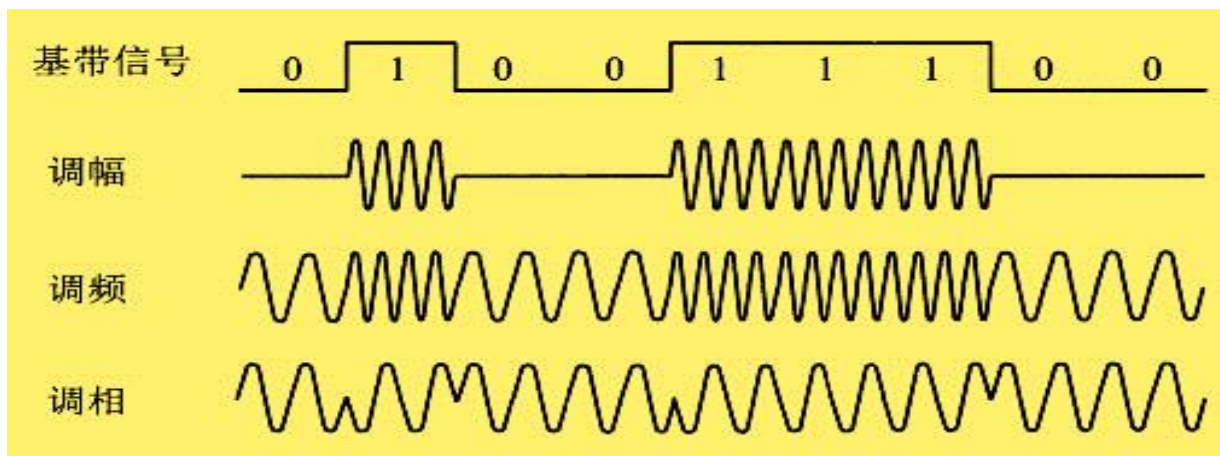
差分曼彻斯特

逢“1”变化NRZ

逢“0”变化NRZ

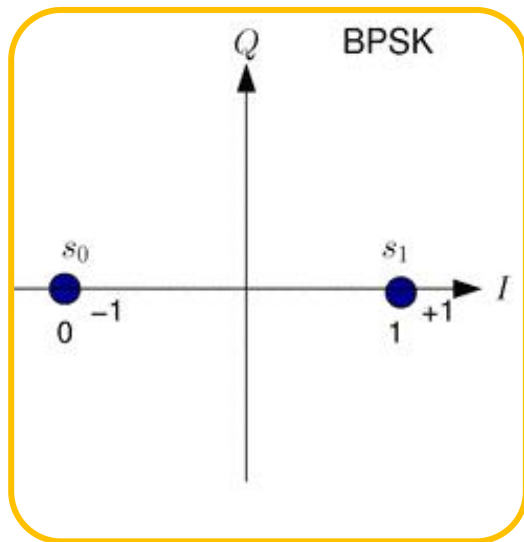
- 数字数据的模拟传输，也称频带传输
 - 指在一定频率范围内的线路上，进行载波传输。用基带信号对载波进行调制，使其变为适合于线路传送的信号
 - 调制 (Modulation)：用基带脉冲对载波信号的某些参量进行控制，使这些参量随基带脉冲变化
 - 解调 (Demodulation)：调制的反变换
 - 调制解调器MODEM (modulation-demodulation)

- 三种调制技术：载波 $A\sin(\omega t + \varphi)$ 的三个特性幅度、频率、相位
 - 幅移键控法（调幅） Amplitude-shift keying (ASK)
 - 幅移就是把频率、相位作为常量，而把振幅作为变量
 - 频移键控法（调频） Frequency-shift keying (FSK)
 - 频移就是把振幅、相位作为常量，而把频率作为变量
 - 相移键控法（调相） Phase-shift keying (PSK)
 - 相移就是把振幅、频率作为常量，而把相位作为变量

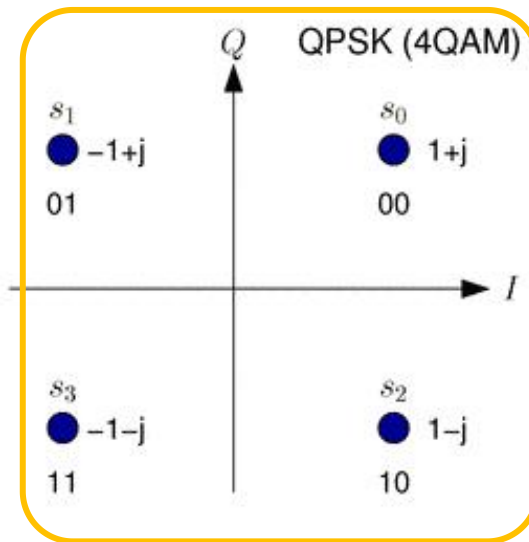


不仅仅是180度，
更多的相位变化

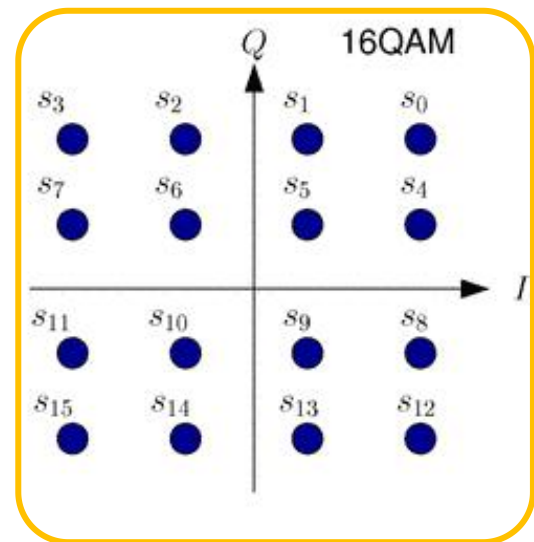
常见不同进制调制方式举例



BPSK使用了基准的正弦波和相位反转的波浪，使一方为0，另一方为1，从而可以同时传送接受2值(1比特)的信息



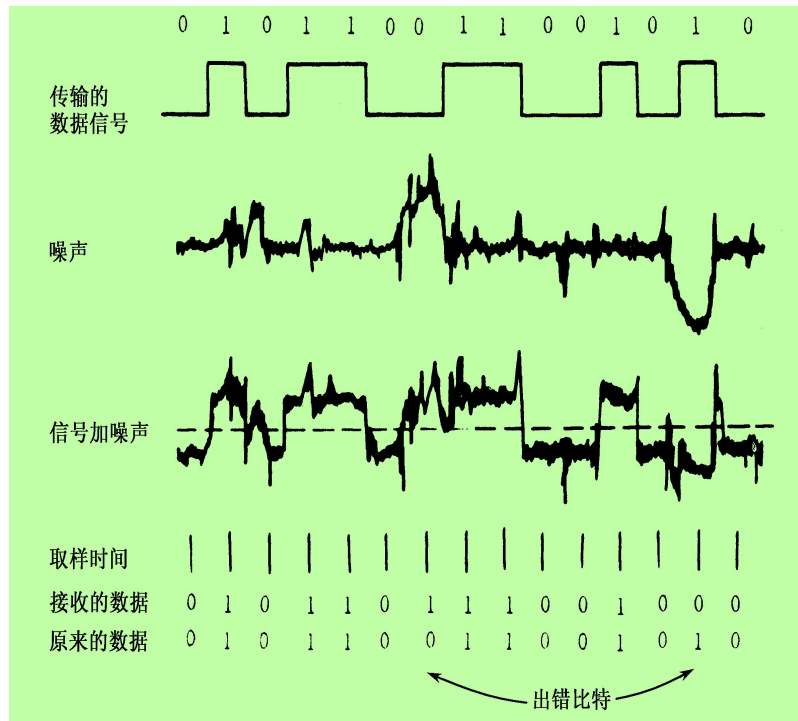
QPSK是一种四进制相位调制，采用移相方式QaPSK，每个点2比特信息，具有良好的抗噪特性和频带利用率通信业务



QAM全称正交幅度调制是一种数字调制方式，产生的方法有正交调幅法和复合相移，16QAM是指包含16种符号的QAM调制方式

- 数据信号在数据通信系统的端到端连接的每个环节都可能受到伤害，ITU称之为传输损伤。并推荐用误码、抖动、漂移、滑动和时延来表示

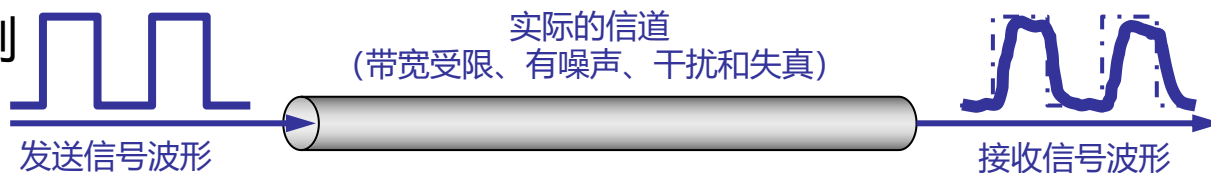
- 误码(Error)** 指信号在传输过程中码元发生的差错，即接收与发送数字信号的单个数字之间的差异
- 抖动(Jitter)** 指码元出现的时刻随时间频繁地变化，也就是各有效瞬间相对于理想时间位置的短时间偏移
- 漂移(Wander)** 指码元各有效瞬间相对于理想时间位置的长期缓慢偏移
- 滑动(Slip)** 指一个信号序列在传输过程中，不可恢复地丢失或增加若干码元
- 时延(Delay)** 指信号的各有效瞬间相对于理想时间位置的滞后或推迟



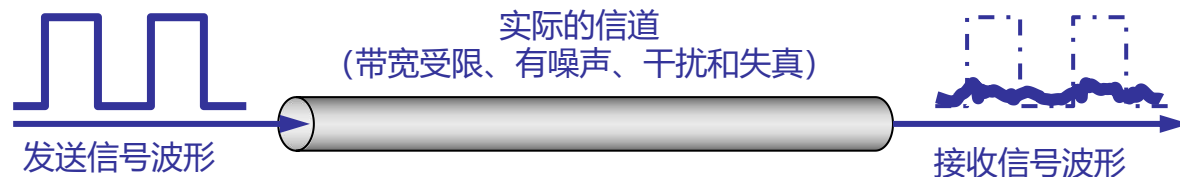
噪声对数据信号传输的影响

数字信号通过实际信道的情况

□ 有失真，但可识别



□ 失真大，无法识别



• 干扰

- 环境干扰 指大气干扰(如雷电、电离层闪烁等)、城区人为干扰(如工业干扰、汽车干扰等)和非恶意的邻道干扰等
- 人为恶意干扰 指带有恶意或敌意的人为干扰

传输速率

➤ **传输速率** 指单位时间内传送的信息量，是衡量数据通信系统传输能力的一个重要指标。常用的传输速率有两种：

- **调制速率**(或波特率、码元速率) 指单位时间内调制信号波形的变换次数，其单位是波特：

$$R_B = 1/T(s) \quad (\text{Bd/s})$$

- **数据信号速率**(或传信率、比特率) 指单位时间内通过信道的信息量，其单位是比特/秒：

$$R_b = \sum_{i=1}^n \frac{1}{T_i} \log_2 M_i \quad (\text{b/s})$$

➤ **调制速率与数据信号速率的关系：** $R_b = R_B \log_2 M$

M代表进制数

- **带宽(bandwidth)** 带宽有两种不同的意义
 - 在通信领域（模拟传输），带宽指某个信号具有的频带宽度。单位是赫(或千赫、兆赫、吉赫、太赫等)。如话音信号的带宽是3.1kHz (300Hz ~ 3400Hz)。
 - 在计算机领域（数字传输），带宽指计算机网络的通信线路所能传送数据的能力，即在单位时间内从网络中的某一点到另一点所能达到的“最高数据速率”。单位是b/s (bit/s)
- **数字通信与模拟通信相比较**
 - 优点：抗干扰性强，保密性好，设备易于集成，便于计算机处理等。
 - 缺点：占用较多的带宽，信道利用率低。

模拟信道的容量

- 香农定律指出：在信号平均功率受限的高斯白噪声信道中，计算信道容量的理论公式为

$$C = B \log_2 \left(1 + \frac{S}{N} \right)$$

- 式中 B 是信道带宽(单位为Hz), S/N 是平均信号噪声功率比, S 为接收信号功率, N 为噪声功率(指正态分布的加性高斯白噪声)
- 高斯白噪声在整个频域具有均匀分布的功率谱密度及噪声的概率密度函数服从高斯分布(正态分布)

➤ 提升模拟信道容量方式：**增加系统带宽、提升源端信号发射功率、降低噪声等**

练习题

- 基于香农公式 $C = H \log_2(1 + S/N)$ ，考虑一个通频带为 1k Hz 的信道，极限数据传输率是 4 kbit/s，当我们用 1 波特传递 1 比特的信息时，信道容量被

A. 充分利用

☒ B. 浪费了

□ 讨论：如何充分的利用信道容量？

让每一个码元携带更多比特的信息，比如将每 4 个比特的信息组成一组，1001, 1101 等，共有 16 种排列，可以使用 16 种不同的振幅、频率、或相位组合进行调制。

致谢



熊轲

北京交通大学



赵阿群

北京交通大学



王健

北京交通大学



刘强

北京交通大学



孙延涛

北京交通大学



梁满贵

北京交通大学



崔勇

清华大学

《计算机网络：自顶向下方法(原书第7版)》，库罗斯 罗斯，机械工业出版社，2018年6月
《计算机网络（第5版）》，Tanenbaum & Wetherall，清华大学出版社，2012年3月
《计算机网络（第7版）》，谢希仁，电子工业出版社，2017年1月
《计算机网络教程（第6版）》，吴功宜，电子工业出版社，2018年3月
《计算机网络（第3版）》，徐敬东、张建忠，清华大学出版社，2013年6月
《宽带接入技术》，通信行业国家职业资格认证培训授课专用讲义
《EPON技术交流》.ppt，华为

特别致谢：
部分内容取材于此