

# 计算机网络概述

网络：由若干结点和连接这些结点的链路构成

互联网 internet（小写，通用名词）：多个网络还可以通过路由器互连在一起，这样构成了一个覆盖范围更大的网络

因特网 Internet（大写，专用名词）：指目前全球最大的、开放的、由众多网络互连而成的特定计算机网络，采用 TCP/IP 协议簇作为通信规则

## 因特网的组成

**边缘部分**：由所有连接在因特网上的主机组成（路由器是专用计算机，但不称为主机）。这部分是用户直接使用的，用来进行通信（传送数据、音频或视频）和资源共享

**核心部分**：由大量网络和连接这些网络的路由器组成。这部分是为边缘部分提供服务（提供连通性和交换）

组成部分：**硬件、软件、协议**

主要功能：**数据通信（基本功能）**，资源共享（目的），分布式处理，提高可靠性，负载均衡

**功能组成**：

**通信子网**：由各种传输介质、通信设备和相应的网络协议组成，使网络具有数据传输、交换、控制和存储能力，实现联网计算机之间的数据通信

**资源子网**：实现资源共享功能的设备以及软件的集合，向网络用户提供共享其他计算机硬件、软件和数据的服务

## 三种交换方式

比较维度	数据报服务	虚电路服务
连接的建立	不需要	必须有（建立后使用短虚电路号替代完整地址）
目的地址	每个分组都有完整的目的地址	仅在建立连接阶段使用完整地址
路由选择	每个分组独立路由选择和转发	建立连接时确定路由，后续分组沿用相同路径
分组顺序	不保证分组的有序到达	保证分组按发送顺序到达
可靠性	不保证可靠通信（由用户主机保证可靠性）	网络提供可靠性保障
对网络故障的适应性	故障结点丢失分组，其他分组正常传输	故障导致虚电路中断，需重新建立连接
差错处理和流量控制	用户主机自行控制流量，不保证数据报可靠性	网络层提供差错检测、重传和流量控制机制

# 计算机网络

## 一些互相连接的、自治的计算机的集合

互连：是指计算机之间可以通过有线或无线的方式进行数据通信

自治：是指独立的计算机，它有自己的硬件和软件，可以单独运行使用

集合：是指至少需要两台计算机

计算机网络主要是由一些通用的、可编程的硬件互连而成的，而这些硬件并非专门用来实现某一特定目的（传送数据或视频信号）。这些可编程的硬件能够用来传送多种不同类型的数据，并能支持广泛的和日益增长的应用

## 计算机网络分类

不同作用范围的网络

广域网 WAN (Wide Area Network)

局域网 LAN (Local Area Network)

城域网 MAN (Metropolitan Area Network)

个人区域网 PAN (Personal Area Network)

从网络的使用者进行分类

公用网 (public network)

专用网 (private network)

按拓扑结构分类（主要取决于它的通信子网）

总线型网络

星型网络

环型网络

网状型网络

从传输介质分类

有线网络

无线网络

## 计算机网络性能指标

**速率：**即数据率 (data rate) 或比特率 (bit rate) 是计算机网络中最重要的一性能指标。速率的单位是 b/s, 或 kb/s, Mb/s, Gb/s 等。往往是指额定速率或标称速率。

**带宽：**是数字信道所能传送的“最高数据率”的同义语，单位是“比特每秒”，或 b/s (bit/s)。

**吞吐量：**在单位时间内通过某个网络（或信道、接口）的数据量。受网络的带宽或网络的额定速率的限制。

## 时延：

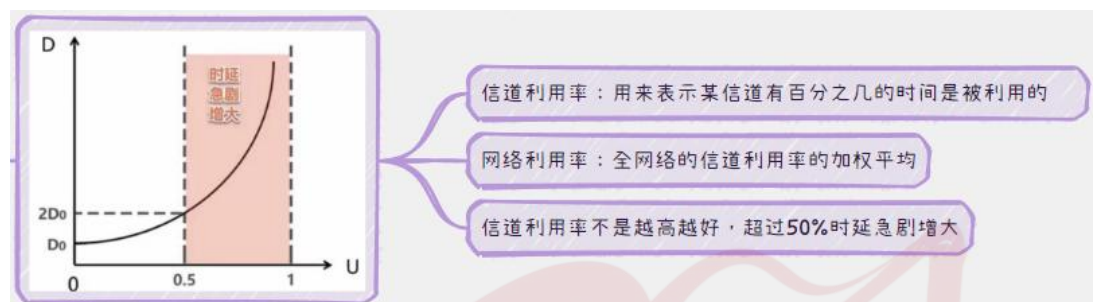
传输时延（发送时延）：发送数据时，数据块从结点进入到传输媒体所需要的时间。也就是从发送数据帧的第一个比特算起，到该帧的最后一个比特发送完毕所需的时间。

传播时延：电磁波在信道中需要传播一定的距离而花费的时间。

处理时延：交换结点为存储转发而进行一些必要的处理所花费的时间。

数据经历的**总时延**就是**发送时延、传播时延、处理时延和排队时延之和**

**时延带宽积**：以比特为单位的链路长度。



## 计算机网络体系结构

OSI 体系结构：理论研究产物，研究出来时候 TCP/IP 体系结构已经抢占大部分市场：服务、接口、协议

TCP/IP 体系结构：实际使用的体系结构：传输层处理关于可靠性、流量控制和错误矫正等问题



# OSI



## 时延的计算

主机甲通过一个路由器（存储转发方式）与主机乙互连，两段链路的数据传输速率均为  $10\text{Mb/s}$ ，主机甲分别采用报文交换和分组大小为  $10\text{kb}$  的分组交换向主机乙发送一个大小为  $8\text{Mb}$  ( $1\text{M}=10^6$ ) 的报文。若忽略链路传播延迟，分组头开销和分组拆装时间，则两种交换方式完成该报文传输所需的总时间分别为（）

- A.  $800\text{ms}$     B.  $1600\text{ms}$     C.  $1600\text{ms}$     D.  $800\text{ms}$

[2023 年] 在下图所示的分组交换网络中，主机 H1 和 H2 通过路由器互连，2 段链路的带宽均为  $100\text{Mb/s}$ ，时延带宽积（单向传播时延  $\times$  带宽）均为  $1000\text{b}$ 。若 H1 向 H2 发送一个大小为  $1\text{MB}$  的文件，分组长度为  $1000\text{B}$ ，则从 H1 开始发送的时刻起到 H2 收到文件全部数据时刻止，所需的时间至少是（）。（注： $1\text{M}=10^6$ ）

- A.  $80.02\text{ms}$     B.  $80.08\text{ms}$     C.  $80.09\text{ms}$     D.  $80.10\text{ms}$





## 物理层

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  
物理层为数据链路层屏蔽了各种传输媒体的差异,使数据链路层只需要考虑如何完成本层的协议和服务,而不必考虑网络具体的传输媒体是什么

**机械特性:**指明接口所用接线器的形状和尺寸、引线数目和排列、固定和锁定装置等等。

**电气特性:**指明在接口电缆的各条线上出现的电压的范围。

**功能特性:**指明某条线上出现的某一电平的电压表示何种意义。

**过程特性:**指明对于不同功能的各种可能事件的出现顺序。

## 物理层的传输媒体

### 导向传输媒体

双绞线:屏蔽双绞线 STP、无屏蔽双绞线 UTP

同轴电缆:50  $\Omega$  同轴电缆、75  $\Omega$  同轴电缆

光缆: **光纤** (工作原理:光线在纤芯中传输的方式是不断地**全反射**)

### 非导向传输媒体

无线传输所使用的频段很广。

短波通信主要是靠电离层的反射,但短波信道的通信质量较差。

微波在空间主要是直线传播。

卫星通信

地面微波接力通信

## 物理层的传输方式

**串行传输:**一个个比特按时间顺序传输,传输距离远

**并行传输:**多个比特通过多条通信信道**同时传输**,速度快、成本高、近距离传输(计算机内部)

**同步传输:**通过**时钟信号**控制不同机器同步通信,字节中的每个比特仍然要同步(各比特的持续时间是相同的),通过每个字节加起始位和结束位实现字节内的同步

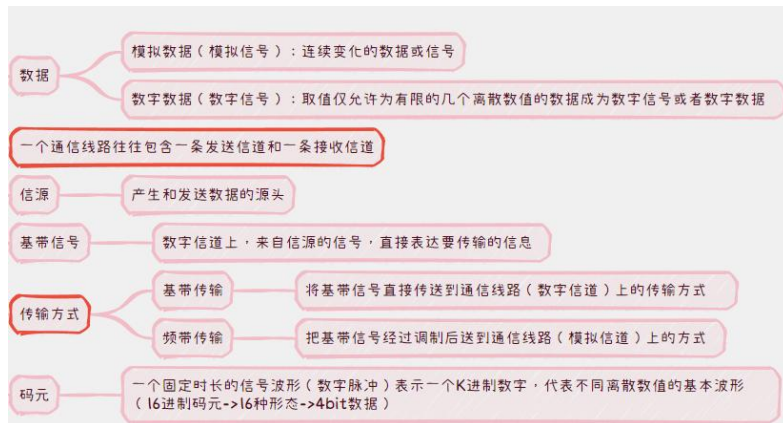
**异步传输:**字节之间异步(字节之间的时间间隔不固定)

**单向通信(单工通信):**只能有一个方向的通信而没有反方向的交互。

**双向交替通信(半双工通信):**通信的双方都可以发送信息,但不能双方同时发送(当然也就不能同时接收)。

**双向同时通信(全双工通信):**通信的双方可以同时发送和接收信息。

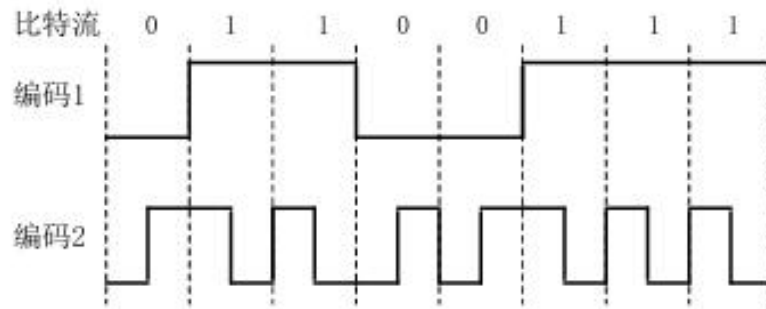
## 调制和解调



### 数字数据的编码（数字数据通过数字发射器编码为数字信号）



[2015 年] 使用两种编码方式对比特流 01100111 进行编码的结果如下图所示，编码 1 和编码 2 分别是什么编码方式？

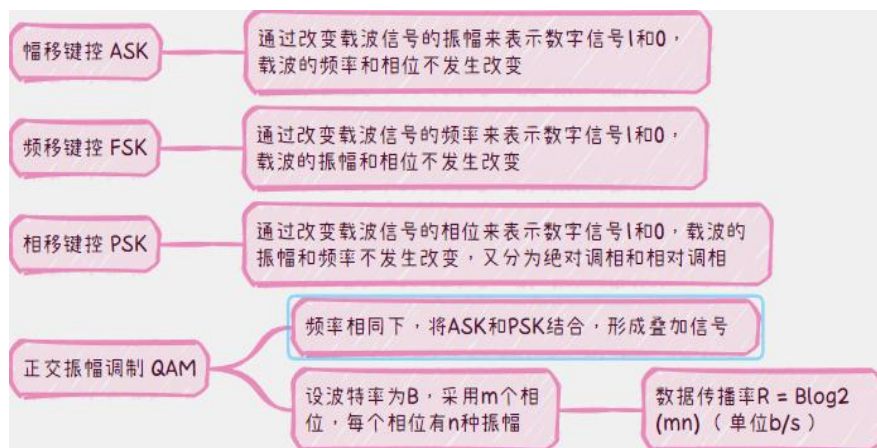
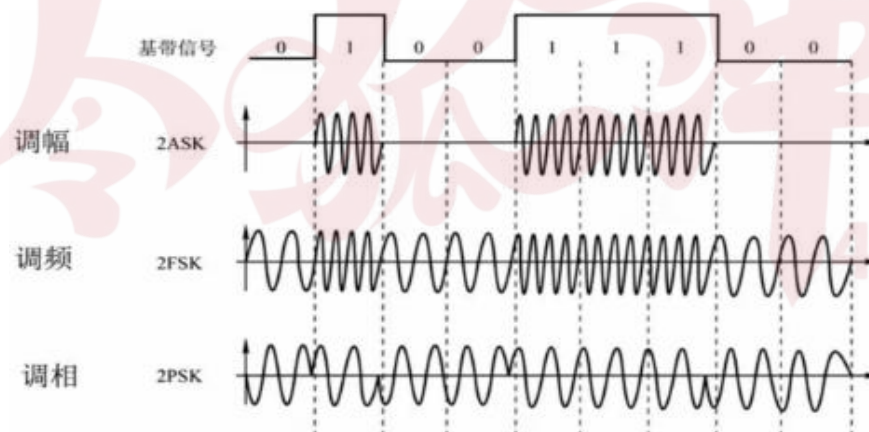


[2021 年]若下图为一段差分曼彻斯特编码信号波形，则其编码的二进制位串是 ( )

- A. 1011 1001
- B. 1101 0001
- C. 0010 1110
- D. 1011 0110



### 数字数据的调制（数字数据通过调制器调制为模拟信号）



## 模拟数据的编码（模拟数据通过 PCM 编码器编码为数字信号）

**采样：**对模拟信号进行周期性扫描，把时间上连续的信号变成时间上离散的信号  
（采样频率  $\geq 2$  倍信号最高频率）

**量化：**把采用取得的电平幅值按照一定的分级标度，转化为对应的数字值并取整数，把连续的电平幅值转换为离散的数字量

**编码：**把量化的结果转化为与之对应的二进制编码

## 信道的极限容量

造成信号失真的因素：码元传输速率、信号传输距离、噪声干扰、传输媒体质量

**波特率/码元传输速率：**单位时间内数字通信系统所传输的码元个数（脉冲个数 / 信号变化次数，单位是波特，Baud）

**比特率/信息传输速率：**表示单位时间内数字通信系统传输的二进制码元个数（比特数）单位是比特/秒（以太网采用曼彻斯特编码，每个比特两个信号周期即波特率是数据率的两倍）

## 奈奎斯特准则

在假定的理想条件下，为了避免码间串扰，码元传输速率是有上限的  
**理想低通信道**下的

极限数据传输速率 =  $2W$  Baud =  $2W$ （码元/秒）=  $2W \log_2 V$ （比特/秒）

极限码元传输速率 =  $2W$  Baud

$W$ ：信道带宽 (Hz)

Baud：波特 (码元/秒)

$V$ ：每个码元离散电平的数目

要提高信息传输速率（比特率），就必须设法使每一个码元能携带更多比特的信息量，需要采用多元制

## 香农公式

**带宽受限且有高斯白噪声干扰**的信道的极限信息传输速率

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

$C$ ：信道的极限信息传输速率 (bit/s)

$S$ ：信道内所传信号的平均功率  $N$ ：信道内的高斯噪声功率

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

$S/N$ ：信噪比

信道带宽或信道中信噪比越大，信息的极限传输速率越高

信道带宽一定的情况下，根据奈氏准则和香农公式，想要提高信息的传输速率就必须采用多元制，和努力提高信道中的信噪比



[2009 年] 在无噪声的情况下，若某通信链路的带宽为 3kHz，采用 4 个相位，每个相位具有 4 种幅度的 QAM 调制技术，则该通信链路的最大数据传输速率是（ ）。

[2011 年] 若某通信链路的数据传输速率为 2400b/s，采用 4 个相位调制，则该链路的波特率是（ ）。

## 物理层设备

**中继器**：将数字信号整形放大（信号再生而非简单放大）再转发出去，消除信号的失真和衰减，进而扩大网络传输的距离

不能连接具有两个不同速率的局域网

中继器出现故障，相邻的两个网段都会产生影响

如果网络设备具有存储转发功能，则可以连接两个不同协议（不同速率的网段）

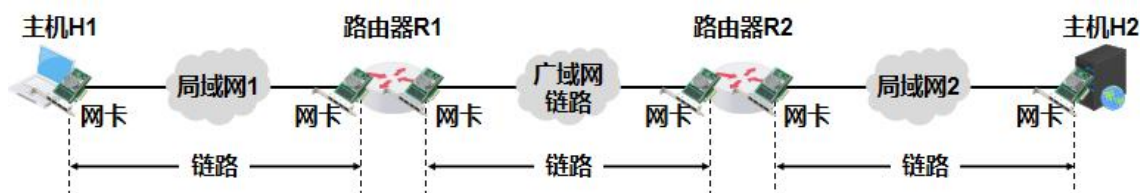
**集线器 HUB**：实质是一个**多端口的中继器**，收到信号后，就将信号从其它端口发出。如果有多端口输入，输入会冲突数据无效

实质是一个多端口的中继器，收到信号后，就将信号从其它端口发出。如果有多端口输入，输入会冲突数据无效

## 链路、数据链路

链路（Link）是指从一个节点到相邻节点的一段物理线路（有线或无线），而中间没有任何其他的交换节点。

**数据链路（Data Link）**是基于链路的。当在一条链路上传送数据时，除需要链路本身，还需要一些必要的通信协议来控制这些数据的传输，把实现这些协议的硬件和软件加到链路上，就构成了数据链路。计算机中的网络适配器（俗称网卡）和其相应的软件驱动程序就实现了这些协议。一般的网络适配器都包含了物理层和数据链路层这两层的功能。



## 数据链路层功能



## 三个问题

**封装成帧：**将网络层传下来的分组添加首部和尾部，用于标记帧的开始和结束。

**透明传输：**透明表示一个实际存在的事物看起来好像不存在一样。

帧使用首部和尾部进行定界，如果帧的数据部分含有和首部尾部相同的内容，那么帧的开始和结束位置就会被错误的判定。需要在数据部分出现首部尾部相同的内容前面插入转义字符。如果数据部分出现转义字符，那么就在转义字符前面再加个转义字符。在接收端进行处理之后可以还原出原始数据。这个过程透明传输的内容是转义字符，用户察觉不到转义字符的存在。

**差错控制：**循环冗余检验 CRC 目前数据链路层广泛使用了循环冗余检验（CRC）来检查比特差错。

## 透明传输

数据链路层对上层交付下来的协议数据单元 PDU 没有任何限制，就好像数据链路层不存在一样。

**面向字节**的物理链路使用**字节填充**的方法实现透明传输。

**面向比特**的物理链路使用**比特填充**的方法实现透明传输。

方法：字符计数法、字符填充的首尾定界法、零比特填充的首尾标志法（01111110）、违规编码法

考虑到差错控制等多种因素，每一种数据链路层协议都规定了帧的数据部分的长度上限，即**最大传送单元 MTU**

[2013 年] HDLC 协议对 0111110001111110 组帧后对应的比特串为（ ）

## 差错控制

实际的通信链路都不是理想的，比特在传输过程中可能会产生差错：1 可能会变成 0，而 0 也可能变成 1，这称为比特差错

使用**差错检测码**（帧格式中 **FCS 字段**）来检测数据在传输过程中是否产生了比特差错，是数据链路层所要解决的重要问题之一

避免帧丢失采用计时器超时重发，避免帧重复采用帧编号机制

**检错编码：**

**奇偶检验码：**  $n-1$  位数据和 1 位校验位（前面）组成，校验位用于调节发送信息中的 1 的个数是偶数还是奇数

**循环冗余码 CRC：** 发送方计算后加入帧中，接收方收到后检验

**纠错编码：海明码**

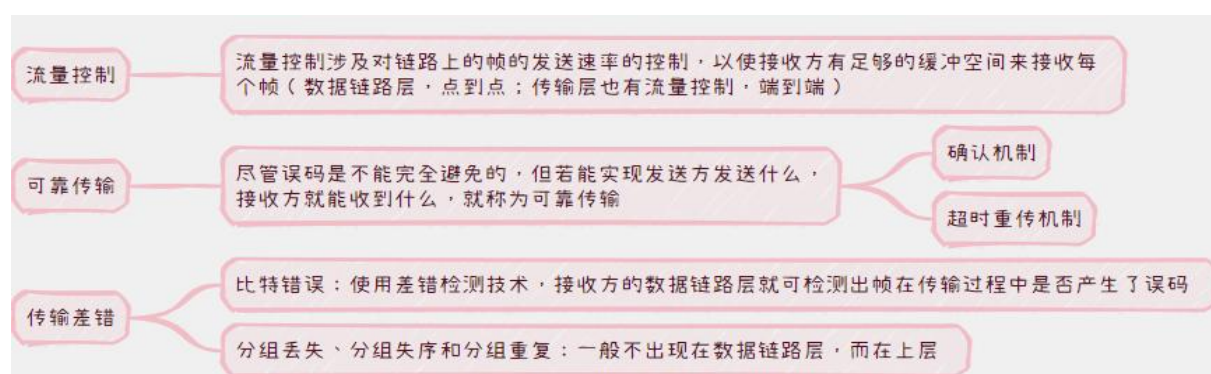
在有效信息位中加入几个校验位形成海明码，并把海明码的每个二进制位分配到几个奇偶校验组中，当某一位出错后，就会引起有关几个校验位的值发生变化，可以发现并确定错位的位置

**海明距离：** 两个合法编码的对应比特取值不同的比特数称为**码距**

一个有效编码集中，任意两个合法编码的海明距离的最小值，称为该编码集的海明距离



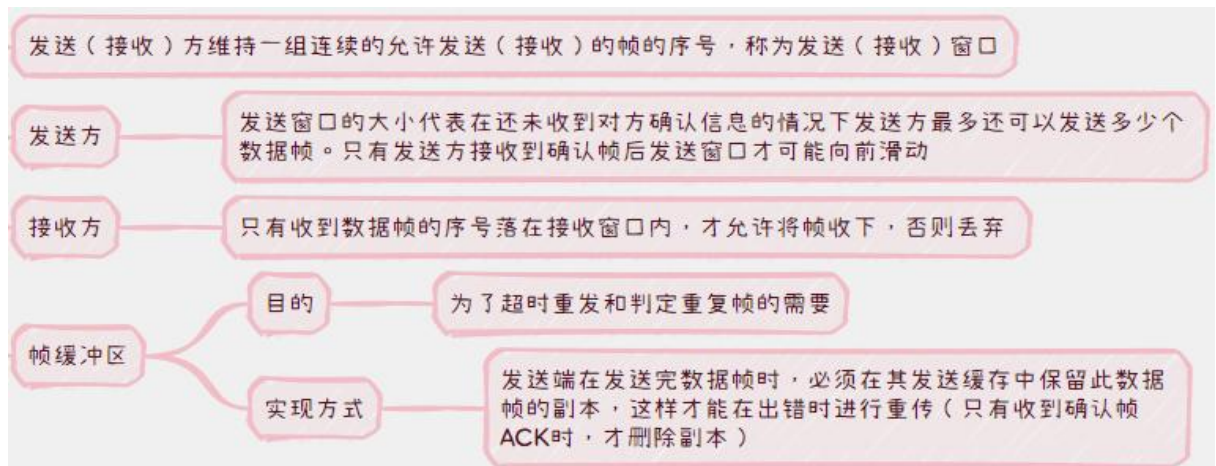
## 数据链路层



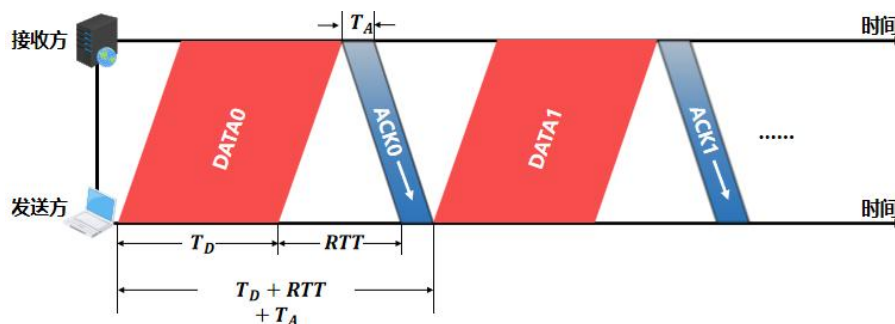
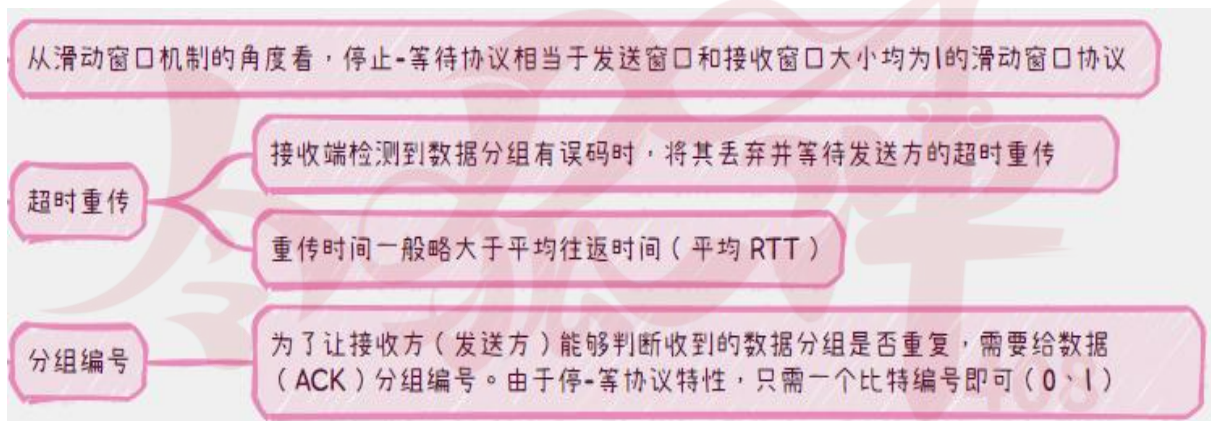
一般情况下，有线链路的误码率比较低，为了减小开销，并不要求数据链路层向上提供可靠传输服务。即使出现了误码，可靠传输的问题由其上层处理。**无线链路**易受干扰，误码率比较高，因此要求数据链路层必须向上层提供**可靠传输**服务



## 滑动窗口的概念



## 停止-等待协议 SW



主机甲采用停-等协议向主机乙发送数据，数据传输速率是 3kbps，单向传播延时是 200ms，忽略确认帧的传输延时。当信道利用率等于 40%时，数据帧的长度为（ ）。



## 回退 N 帧协议 GBN

### 发送方：

发送窗口  $W_T$  的取值范围是  $1 < W_T \leq (2^n - 1)$ ，其中， $n$  是构成分组序号的比特数量。

如果  $W_T = 1$ ，变成了停止-等待协议

如果  $W_T > (2^n - 1)$ ，接收方无法分辨新旧数据分组

可在未收到接收方确认分组的情况下，将序号落入发送窗口内的多个数据分组全部发送出去。

只有收到对已发送数据分组的确认分组时，发送窗口才能向前滑动到相应位置。

收到多个重复确认时，可在重传计时器超时前尽早开始重传，由具体实现决定。

发送窗口内某个已发送的数据分组产生超时重传时，发送窗口内该数据分组的后续已发送的数据分组也必须全部重传，这就是回退 N 帧协议名称的由来。

### 接收方：

接收窗口  $W_R = 1$ ，只能按序接收数据分组。

只接收序号落入接收窗口内且无误码的数据分组，并且将接收窗口向前滑动一个位置，与此同时给发送方发送相应的确认分组。

为了减少开销，接收方不必每收到一个按序到达且无误码的数据分组就给发送方发送一个相应的确认分组。

可以在连续收到多个按序到达且无误码的数据分组后（数量由具体实现决定），才针对最后一个数据分组发送确认分组，这称为累积确认。

或者可以在自己有数据分组要发送时才对之前按序接收且无误码的数据分组进行捎带确认。

接收方收到未按序到达的数据分组后，除丢弃外，还可对之前最后一个按序到达的数据分组进行重复确认，以便发送方尽快重传。

## 选择重传协议 SR

用  $n(n > 1)$  个比特给分组编号，发送窗口  $W_T$  与接收窗口  $W_R$  的关系如下：

$W_R$  超过  $W_T$  没有意义

确保接收窗口向前滑动后，落入接收窗口内的新序号与之前的旧序号没有重叠，避免无法分辨新旧数据分组

当  $W_R$  取最大值  $2^n - 1$  时， $W_T$  能取到的最大值也为  $2^n - 1$

$$\left. \begin{array}{l} 1 < W_R \leq W_T \\ W_T + W_R \leq 2^n \end{array} \right\} 1 < W_R \leq 2^{(n-1)}$$

### 发送方：

可在未收到接收方确认分组的情况下，将序号落入发送窗口内的多个数据分组全部发送出去。

只有按序收到对已发送数据分组的确认分组时，发送窗口才能向前滑动到相应位置。

如果收到未按序到达的确认分组，应对其进行记录，以防止其相应数据分组的超时重发，但发送窗口不能向前滑动。

### 接收方：

可接收未按序到达但没有误码并且序号落入接收窗口内的数据分组。

为了使发送方仅重传出现差错的分组，接收方不再采用累积确认，而需要对每一个正确接收到的数据分组进行逐一确认。

只有在按序接收数据分组后，接收窗口才能向前滑动到相应位置。

## 介质访问控制——划分信道

**静态划分信道：**预先固定分配好信道，这类方法不灵活，对于突发性数据传输信道利用率低

**信道复用：**通过一条物理线路同时传输多路用户的信号，当网络中传输媒体的传输容量大于多条单一信道传输的总通信量时，可利用复用技术在一条物理线路上建立多条通信信道来充分利用传输媒体的带宽

**频分多路复用 FDM：**所有用户同时占用不同的频带资源并行通信，将多路基带信号调制到不同频率载波上，再叠加形成一个复合信号（相邻信道需要隔离频道，防止干扰）

**时分多路复用 TDM：**所有用户在不同的时间占用同样的频带宽度，将一条物理信道按时间分成若干时间片，轮流地分配给多个信号使用

**波分多路复用 WDM：**在一根光纤中传输多种不同波长（频率）的光信号，由于波长（频率）不同，各路光信号互不干扰，最后再用波长分解复用器将各路波长分解出来

**码分多路复用 CDM：**每一个用户可以在同样的时间使用同样的频带进行通信，由于各用户使用经过特殊挑选的不同码型，因此各用户之间不会造成干扰

**码分多址 CDMA：**将每个比特时间再划分为  $m$  个短的间隙，称为码片，每一个站被指派一个唯一的  $m$  bit 码片序列（原则：码片必须各不相同，互相正交）

如果一个站要发送比特 1，则发送它自己的  $m$  bit 码片序列

如果一个站要发送比特 0，则发送它自己的  $m$  bit 码片序列的二进制反码

[2014] 站 A、B、C 通过 CDMA 共享链路，A、B、C 的码片序列分别是 (1, 1, 1, 1)、

(1, -1, 1, -1) 和 (1, 1, -1, -1)。若 C 从链路上收到的序列是 (2, 0, 2, 0, 0, -2, 0, -2, 0, 2, 0, 2)，则 C 收到 A 发送的数据是 ( )。

A. 000    B. 101    C. 110    D. 111

## 局域网

在一个较小的地理范围内, 将各种计算机、外部设备和数据库系统等通过双绞线、同轴电缆等连接介质互相连接在一起, 组成资源和信息共享的计算机互连网络

**逻辑链路控制子层 LLC:** 向网络层提供无确认无连接、面向连接、带确认无连接、高速传送 4 种不同的连接服务类型、差错控制、给帧加序号 (待确认的服务)

**媒体接入控制子层 MAC:** 向上层屏蔽对物理层访问的各种差异, 提供对物理层的统一访问接口, 主要功能包括: 组帧和拆卸帧、比特传输差错控制、透明传输、寻址、竞争处理

### 以太网与 IEEE802.3

无连接, 不可靠 (无编号、不确认), 尽最大努力交付, 差错纠正由高层完成

**逻辑拓扑是总线形结构, 物理拓扑是星形或拓展星形结构**

以太网工作于半双工使用 **CSMA/CD 方式** 对总线进行访问控制, 可以全双工工作



### IEEE802.11 无线局域网

有固定基础设施无线局域网:

802.11 标准规定无线局域网的最小构件是基本服务集 BSS

一个基本服务集包括一个基站和若干移动站

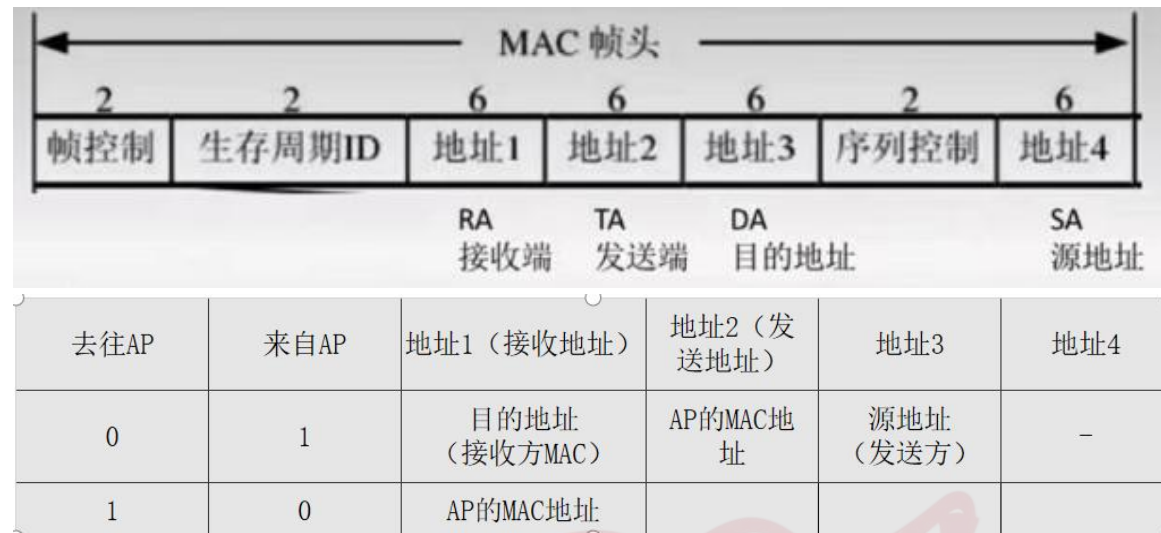
各站在本 BSS 内之间的通信, 或与本 BSS 外部站的通信都必须通过本 BSS 的 AP

无固定基础设施无线局域网自组织网络:

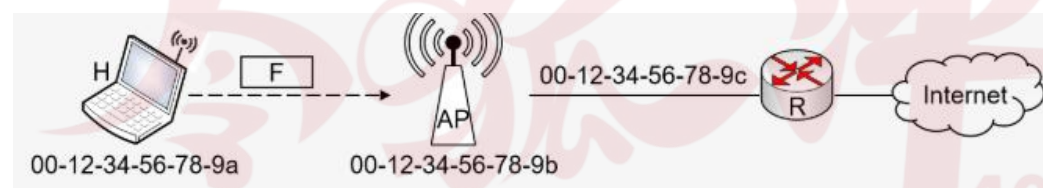
由一些平等状态移动站相互通信组成的临时网络 (各结点之间地位平等, 中

间结点都为转发结点，具有路由器的功能）

移动自组织网络把移动性扩展到无线领域中的自治系统，具有自己特定的路由选择协议，并且可以不和因特网相连



[2017 年] 在下图所示的网络中，若主机 H 发送一个封装访问 Internet 的 IP 分组的 IEEE802.11 数据帧 F，则帧 F 的地址 1、地址 2 和地址 3 分别是（ ）



## VLAN

