

# 计算机网络

Cynthia

# Table of Contents

<b>1. 绪论 .....</b>	<b>3</b>
1.1. 计算机网络与互联网 .....	3
1.1.1. 什么是计算机网络 .....	3
1.1.2. 互联网和万维网 .....	3
1.1.2.1. 什么是互联网 .....	3
1.1.2.2. 什么是万维网 .....	4
1.2. 感受身边的网络 .....	4
1.2.1. 网络应用 .....	4
1.2.2. 网络终端和接入网络 .....	4
1.2.3. 影响用户上网体验的指标 .....	4
1.3. 计算机网络的发展历史 .....	5
1.4. 计算机网络的体系结构 .....	5
1.4.1. 计算机网络的体系结构概述 .....	5
1.4.2. OSI 参考模型 .....	6
1.4.3. TCP/IP 参考模型 .....	7
1.5. 练习 .....	7
<b>2. 物理层 .....</b>	<b>9</b>
2.1. 数据通信基础 .....	9
2.1.1. 常见的数据通信概念 .....	9
2.1.2. 信号的傅里叶分析 .....	9
2.1.3. 信道的最大数字带宽 .....	10
2.2. 信号的传输技术 .....	10
2.2.1. 复用技术 .....	10
2.3. 传输介质 .....	10
2.3.1. 导引性传输介质 .....	10
2.4. 接入网络 .....	11
2.4.1. 公共交换电话网络(PSTN) .....	11
2.4.2. 蜂窝移动网络 .....	11
2.4.3. 有线电视网络 .....	12
2.4.4. 卫星通信网络 .....	12
2.5. 物理层设备 .....	12
2.5.1. 收发器 .....	12
2.5.2. 中继器 .....	12
2.5.3. 集线器 .....	12
2.6. 习题 .....	12
<b>3. 数据链路层 .....</b>	<b>14</b>
3.1. 数据链路层的主要功能 .....	14

3.2. 成帧方法 .....	14
3.2.1. 字节计数法 .....	14
3.2.2. 带字节填充的字节标志法 .....	14
3.2.3. 带位填充的位标志法 .....	14
3.2.4. 物理层编码违例法 .....	14
3.3. 检错与纠错 .....	14
3.3.1. 检错 .....	14
3.3.2. 纠错 .....	15
3.4. 可靠传输数据帧的技术 .....	15
3.4.1. 流量控制 .....	16
3.4.2. 肯定确认与重传 .....	16
3.4.3. 传输效率评估和提升 .....	16
3.4.4. 滑动窗口协议 .....	16
3.5. 练习 .....	17
<b>4. 介质访问控制和局域网 .....</b>	<b>20</b>
4.1. 局域网概述 .....	20
4.2. 介质访问控制 .....	20
4.2.1. 信道的静态分配 .....	20
4.2.2. 多路访问协议 .....	20
4.3. 以太网 .....	21
4.3.1. 经典以太网和交换式以太网 .....	21
4.3.2. 以太网数据帧格式 .....	21
4.3.3. 越来越快的以太网 .....	22
4.4. 数据链路层交换和交换机 .....	22
4.4.1. 数据链路层交换 .....	22
4.4.2. 交换机 .....	22
4.5. 虚拟局域网和生成树协议 .....	22
4.5.1. 虚拟局域网 .....	22
4.5.2. 生成树协议 .....	23
4.6. 无线局域网 .....	23
4.7. 练习 .....	23
<b>5. 网络层 .....</b>	<b>25</b>
5.1. 通信网络及提供的服务 .....	25
5.1.1. 无连接的服务 .....	25
5.1.2. 面向连接的服务 .....	25
5.2. IPv4 协议 .....	25
5.2.1. IPv4 分组 .....	25
5.2.2. IPv4 地址 .....	26
5.2.3. 子网划分 .....	27

5.2.4. IP 地址的获取 .....	27
5.2.5. IP 寻址和 MAC 寻址 .....	27
5.2.6. 无类域间路由 ( CIDR ) .....	27
5.3. 与 IP 相关的协议 .....	28
5.3.1. ARP 协议 .....	28
5.3.2. 互联网控制消息协议 ( ICMP ) .....	28
5.3.3. 网络地址转换 ( NAT ) .....	28
5.4. IPv6 协议 .....	28
5.4.1. IPv6 分组 .....	28
5.4.2. IPv6 地址 .....	29
5.4.3. ICMPv6 .....	29
5.4.4. 邻居发现 ( ND ) .....	29
5.4.5. IPv6 过渡技术 .....	29
5.5. 路由选择协议 .....	29
5.5.1. 距离矢量路由协议 .....	29
5.5.2. 链路状态路由协议 .....	29
5.5.3. 边界网关协议 ( BGP ) .....	29
5.5.4. IP 组播 .....	29
5.5.5. 路由器 .....	29
5.6. 练习 .....	29

# Chapter 1: 绪论

## 1.1. 计算机网络与互联网

### 1.1.1. 什么是计算机网络

计算机网络(Computer Network, CN)是计算机的网络，是为了共享信息和资源，使用链路和交换设备将自治的计算机互相连接在一起的系统。

链路：分别有无线链路与有线链路，都是传输信息的介质，称为传输介质。

交换设备：接受、处理并转发信息的设备，包括中继器、集线器、交换机、路由器、网关等。

按拓扑划分，计算机网络可以分为总线型、环型、星型、树型、蜂窝、网状型等。(以太网主要采用了星型拓扑，中心由集线器转为交换机。移动网络采用蜂窝拓扑)

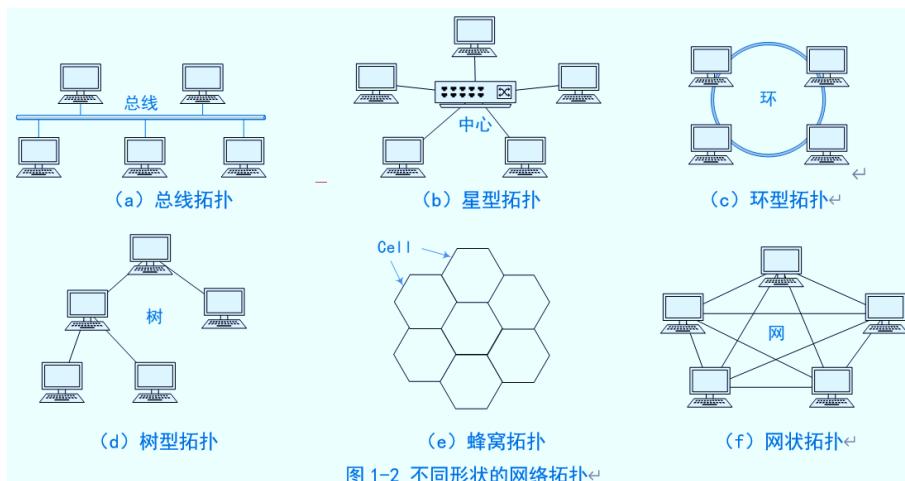


图 1-2 不同形状的网络拓扑

图 1.1 计算机网络的拓扑结构

### 1.1.2. 互联网和万维网

#### 1.1.2.1. 什么是互联网

c.f 以太网和互联网

比较	以太网	互联网
定义	一种局域网 ( LAN ) 技术，用于连接同一网络内的设备	全球范围的计算机网络，用于连接全球范围内的设备
传输介质	有线或无线	有线
传输协议	主要使用 IEEE 802.3 标准	TCP/IP
应用	局域网	全球范围内的网络

表 1.1 以太网和互联网的比较

互联网是网络的网络，分成边缘网络与骨干网络（按网络作用划分）。

- 边缘网络是由终端（主机）组成。用于接入用户和端设备。
- 骨干网络是由交换设备和长途光纤组成。汇聚接入网络的流量，并进行高速运输。

互联网的特点：

- 无状态路由器
- 层次化和扁平化
- 开放和包容

### 1.1.2.2. 什么是万维网

万维网（World Wide Web, WWW），指信息资源的网络。

通信子网由网络节点和通信链路组成

## 1.2. 感受身边的网络

### 1.2.1. 网络应用

- 间接网络应用
  - ▶ 重定向器
- 直接网络应用
  - ▶ C/S（客户/服务器）应用
    - B/S（浏览器/服务器）
  - ▶ P2P（对等通信）应用。每个主机都是客户端和服务器端

### 1.2.2. 网络终端和接入网络

### 1.2.3. 影响用户上网体验的指标

1. 带宽：表示信道承载数据的能力，一种物理性质。
  - 物理带宽：信号占据的频率范围
  - 数字带宽：单位时间流经的信息总量
2. 吞吐量：实际的、可测得的带宽(bps)
3. 时延：数据从源端到目的端所需的时间
  - 传输时延：一台网络设备将待传输的比特推向链路的时间
  - 传播时延：数据在传输介质（链路）上传播所需的时间
  - 设备时延：数据在设备（路由器...）上处理所需的时间



图 1.2 时延示意图

$$T_{\text{总}} = T_{\text{传输}} + 3 \times T_{\text{传播}} + 2 \times T_{\text{设备}} \quad (1.1)$$

4. 丢包率: 指一台网络设备在一定时间内, 其丢弃的报文在所处理的报文中的占比
5. 信道利用率: 信道的使用效率, 可以用信道的使用时间除以一段总时间来表示

$$\text{信道利用率} = \frac{\text{信道上传输的数据量}}{\text{信道可容纳的总数据量}} \rightarrow U = \frac{L}{L + 2BD} \quad (1.2)$$

$BD$  为带宽时延积。从发送到确认接受, 需两倍时延。

$$\text{带宽时延积} = \text{带宽} \times \text{传播时延} \quad (1.3)$$

$L$  为报文长度

### 1.3. 计算机网络的发展历史

ARPANET 是最早的互联网, 特点:

- 分组交换
- 分布式控制
- 网络控制协议 NCP(后演化为 TCP/IP)

IANA 是 ICANN 的前身

IAB 包含了 IETF 和 IRTF

### 1.4. 计算机网络的体系结构

#### 1.4.1. 计算机网络的体系结构概述

分层模型的三要素:

- 服务
- 协议 协议作用于同层的对等实体 (软件/硬件) 之间, 完成虚拟通信 (对等通信)
- 接口

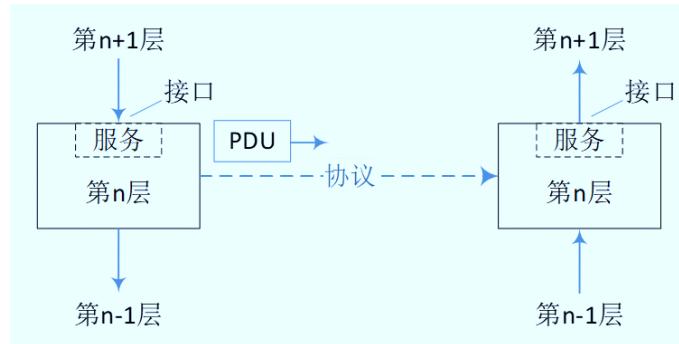


图 1.3 分层模型的三要素

### 1.4.2. OSI 参考模型

	层数	层名	协议数据单元 (PDU)	每一层的功能
主机层	7	应用层	数据流 (data stream)	高层接口, 包含信息共享、远程文件访问
	6	表示层		数据表示, 包含字符编码、压缩/解压缩、加密/解密
	5	会话层		协调两个节点间通信, 建立、维护和拆除会话
	4	传输层		提供端到端 (进程到进程) 之间的可靠数据段传输
媒介层	3	网络层	分组(packet)	构造和管理多节点网络, 包括编址、路由(寻找分组交付的最优路径)和流量控制
	2	数据链路层	帧(frame)	提供两个节点间 (点到点) 可靠帧传送(实现两个节点间的流量控制)
	1	物理层	比特流(bits)	在物理上提供透明的比特流传输

表 1.2 OSI 参考模型的分层

每一层的 PDU 由载荷 (数据) 和报头 (有时有报尾) 组成。PDU 由控制信息和用户数据组成

网络宽带的利用率 = 载荷 / 报文总长度

OSI 参考模型的封装和解封装:

- 封装: 信息 → 数据流 → 段 → 分组 → 帧 → 比特流
- 解封装: 比特流 → 帧 → 分组 → 段 → 数据流 → 信息
- 虚拟通信 (对等通信)
- 真实路径: U型

协议栈顺序与封装顺序相反, 自顶向下。

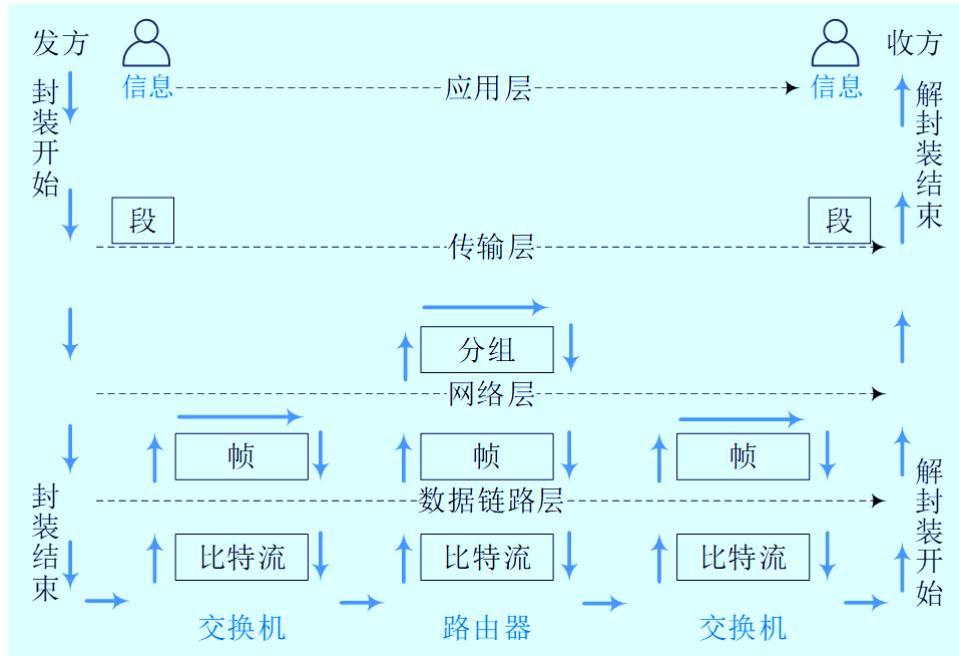


图 1.4 U 型数据流示意图

可见，协议是工作在对等实体之间的

#### 1.4.3. TCP/IP 参考模型

特点：核心简单，边缘复杂

TCP/IP 参考模型（4 层）：

层数	层名	功能
4	应用层	参考模型的最高层，直接面向用户提供各式各样的应用
3	传输层	供端到端（End to End）的数据段传输
2	网络层	找到最优路径到达目的主机，提供了主机到主机的分组传输
1	网络接口层	物理传输

一些协议对应层

层名	协议
WiFi 以太网协议	数据链路层和物理层
TCP/IP	网络层
UDP	传输层
DNS	应用层

## 1.5. 练习

1. 通信子网的主要组成是什么？

- A. 主机和局域网
- B. 网络节点和通信链路

- C. 网络体系结构和网络协议
  - D. 通信链路和终端
2. ARPAnet 是什么网络?
- A. 线路交换
  - B. 分组交换
  - C. 虚电路
  - D. 报文交换
3. Internet 最早起源于哪个网络?
- A. ARPAnet
  - B. MILnet
  - C. NSFnet
  - D. ANSnet
4. 在网络上有一个 1250 字节的传输单元(已经封装好的 PDU), 它是利用 DNS, UDP, IP, PPP, 和 SONET 协议栈的一次用户发送消息的结果。每个协议报头是 20 字节长。携带此消息将使网络带宽的利用率达到多少?
- A. 9%
  - B. 92%
  - C. 98%
  - D. 50%
5. TCP/IP 参考模型的网络层提供的是:
- A. 无连接不可靠的数据报服务
  - B. 无连接可靠的数据报服务
  - C. 有连接不可靠的虚电路服务
  - D. 有连接可靠的虚电路服务
6. 消息 M 是由 UDP, IP 和以太网协议封装, 以此顺序沿着协议栈向下。在数据链路层上, 协议数据单元(PDU)是怎样的( )?
- 使用 U 代表的 UDP 数据段, 使用 I, E 和 M 分别表示 IP 分组、以太帧和消息(信息)。这些部分以它们被发送的顺序来写, 最左边为最先发送。

EIUM

因为封装自顶向下, 在下面的层的报头会加在数据前面

## Chapter 2: 物理层

物理层功能：提供透明的比特流(0 1 流)传输。

设备	工作层名
集线器、中继器	第一层：物理层
交换机、网桥	第二层：数据链路层
路由器	第三层：网络层

表 2.1 联网中继设备与其工作层

冲突域：连接到同一导线上所有工作站集合。

集线器和中继器是进行简单复制信号的设备，连接相同的冲突域，会**扩大冲突规模**

交换机与网桥隔断冲突域，不阻断广播域，即不同冲突域的主机能接收到信息

路由器阻断冲突域和广播域。

### 2.1. 数据通信基础

通信是数据、信息的交换，涉及 3 部分：发送方、接收方和信道。

#### 2.1.1. 常见的数据通信概念

##### 1. 模拟通信和数字通信 物理层上数据的传输：信号

- 模拟信号 对应时域的信号取值是连续的
- 数字信号 对应时域的信号是**离散的**

数字通信优势：

- 传输内容丰富
- 抗干扰能力强
- 差错率低

##### 2. 并行通信与串行通信

- 串行通信 只需一条信道
- 并行通信一次可传输 N 位（传输宽度）

##### 3. 同步通信和异步通信

- 同步通信 严格的时钟控制，传输大块数据
- 异步通信 不同步时钟，低速传输

##### 4. 当数字信号在模拟传输系统中传送时，在发送端和接收端分别需要调制器和解调器

- 调制器：将数字信号转换为模拟信号
- 解调器：将模拟信号转换为数字信号

#### 2.1.2. 信号的傅里叶分析

##### 1. 物理带宽（带宽，单位 Hz）表示信号能通过的频率范围

2. 数字带宽（单位 b/s） 单位时间内传输的比特数

信号通过傅里叶分析可以分解成不同频率的谐波

### 2.1.3. 信道的最大数字带宽

1. 奈奎斯特定理（对理想信道）

$$R_{\max} = S_{\max} \times \log_2 L \quad (2.1)$$

其中,  $S_{\max} = 2 \times B$

$B$  表示物理带宽,  $S_{\max}$  表示最大采样率（波特率）,  $L$  表示信号的离散级别

2. 香农定理（对有噪声信道）

$$R_{\max} = B \times \log_2 \left( 1 + \frac{S}{N} \right) \quad (2.2)$$

$\frac{S}{N}$  (dB) =  $10 \times \lg \frac{S}{N}$  (信噪比) 用于量度信道质量

## 2.2. 信号的传输技术

### 2.2.1. 复用技术

1. 时分复用(Time Division Multiplexing, TDM)

用户在属于自己的时间间隔占用整条共享信道。TDM 受时间控制，需要插入保护时间

统计时分多路：通过给用户提供更少的容量来降低网络成本

2. 频分复用(Frequency Division Multiplexing, FDM)

将共享物理带宽均分

3. 波分复用

4. 码分复用(CDM)

将一个比特时间分成  $m$  个极短的时间间隔，即码片，由 0, 1 构成

- 点积，为归一化内积

- 码分复用信号为码片求和

- 发送信息为码片序列与复用信号的点积映射值

  - ▶ 点积为 1 → 发送 1

  - ▶ 点积为 0 → 未发送

  - ▶ 点积为 -1 → 发送 0

## 2.3. 传输介质

### 2.3.1. 导引性传输介质

导引性传输介质主要指铜和光纤。

铜介质主要包括同轴电缆和双绞线

1. 同轴电缆

## 2. 双绞线

- 屏蔽双绞线(STP), 屏蔽电磁信号的干扰
- 非屏蔽双绞线(UTP), 广泛用于局域网

## 3. 电力线

分布在城市各个角落。不仅传输电力, 还传输数据。

## 4. 光纤

内折射率 > 外折射率

光纤主要用于**骨干传输**

同步光纤网络(SONET)

- 单模光纤 提供长距离传输和较高带宽, 成本高 (LED 产生光)
- 多模光纤 传输距离短和传输速率低, 成本低 (半导体激光器产生光)

## 2.4. 接入网络

### 2.4.1. 公共交换电话网络(PSTN)

#### 1. PSTN 的构成

##### a. 本地回路

本地回路上传输的是模拟信号, 经过调制解调器转为数字信号

本地回路一端连接电话机, 另一端连接端局和编解码器。编解码器使用**脉冲编码调制**将模拟信号->数字信号

##### b. 干线

##### c. 交换局

比较内容	电路交换	分组交换
有无连接	有	无
独立寻径	否	是
乱序到达	否	是
共享宽带	否	是
传播时延	确定	不确定
拥塞发生	建立连接时	寻径途中
收费方式	按时长	按数据量大小

表 2.2 电路交换与分组交换的区别

### 2.4.2. 蜂窝移动网络

- 1G 采用频分复用(FDM)的模拟语音电话系统
- 2G 采用频分复用和时分复用, 模拟语音 → 数字语音, 可发短信
- 3G 提供多媒体服务, 同时采用电路交换与分组交换

4. 4G 使用分组交换
5. 5G 高带宽、低时延和全连接

#### 2.4.3. 有线电视网络

有线电视(Cable TV, CATV)。有线电视网络的头端类网关，负责所辖范围所有家庭用户的资源共享，也与外面的 IP 骨干网络连接。

#### 2.4.4. 卫星通信网络

卫星通信的介质是**微波**，卫星通信的中继是**卫星**

### 2.5. 物理层设备

#### 2.5.1. 收发器

收发器(transceiver)是发送器(transmitter, Tx)和接收器(receiver, Rx)的合体，主要用于接收和发送信号，连接传输介质。

#### 2.5.2. 中继器

电信号与光信号都会在传输过程中衰减，同时产生不同类型的噪声。

中继器(repeater)是一个两端口的物理设备，主要作用是从一个接口接收信号，对信号进行去噪和放大(也称“再生信号”)，再从另一个接口转发出去

#### 2.5.3. 集线器

集线器(hub)是多接口的中继器，主要功能与中继器一样。

集线器的每个接口可挂接一台设备，构成以集线器为中心、成辐射状的星型拓扑。集线器虽扩展了网络覆盖范围，但同时扩大了冲突域

冲突域的边界是交换机

### 2.6. 习题

1. 一根物理带宽是 3MHz 的传输信道，如果使用了 8 级(离散级别)的数字信号，每秒可以发送多少数据(假设信道无噪声)

$$R = 2 \times B \times \log_2 L = 2 \times 3 \text{MHz} \times \log_2(8) = 18 \text{Mbps}$$

$$R = 18 \text{Mbps}$$

2. 32 个用户共享 2.048Mbps 的链路，使用 TDM。每个用户当轮使用时，以全速发送 8 位。

多久用户才能发送一次。每个用户要过一个周期才能够再发一次

$$t = \frac{8 \text{ bits}}{2.048 \text{ Mbps}} = 3.90625 \mu\text{s}$$

$$T = 32 \times t = 125 \mu\text{s}$$

3. 一个调制解调器使用幅移键控和相移键控波特率为 1000 波特时数据速率为 3000bps。采用 4 种相位，每个相位有几个不同幅度值

每个符号携带信息量为:  $\frac{R_b}{R_s} = \frac{3000}{1000} = 3$ , 则数据级别为  $2^3 = 8$  因此每个相位有 2 个不同的幅度值( $2 \times 4 = 8$ )

4. 主机 H1 H2 通过路由器互联，2 段链路的带宽均为 100Mbps，时延带宽积为 1000bits。若 H1 像 H2 发送大小为 1MB 的文件，分组长度为 1000B，从 H1 发送到 H2 全部接收为止，所需时间至少为？

$$T_{\text{传输}} = \frac{1MB}{100M \text{ bps}} = 80ms \quad (2.3)$$

$$T_{\text{传播}} = 2 \times \frac{BD}{B} = 2 \times \frac{1000 \text{ bits}}{100M \text{ bps}} = 0.02ms \quad (2.4)$$

$$T_{\text{路由还在传的最后一个分组}} = \frac{1000B}{100M \text{ bps}} = 0.08ms \quad (2.5)$$

$$T_{\text{total}} = T_{\text{传输}} + T_{\text{传播}} + T_{\text{设备}} = 80 + 0.02 + 0.08 = 80.1ms \quad (2.6)$$

整个报文分成分组传输完毕后，最后一个分组到达路由，所以还要再传这个分组到 H2，可以画图来看。两个错位的平行四边形。

## Chapter 3: 数据链路层

### 3.1. 数据链路层的主要功能

1. 成帧: 把从物理层获得的二进制流拆分为分离的数据帧
2. 错误处理: 检测或纠正传输中发生的错误, 及处理错误
3. 流量控制: 协调发送方与接收方的数据收发速度

数据链路层为网络层提供三类服务:

1. 无确认无连接
2. 有确认无连接
3. 有确认有连接

### 3.2. 成帧方法

当数据链路层从网络层获得数据分组时, 对其封装, 加上帧头与帧尾

数据帧是数据链路层的 PDU, 是错误处理的单元

#### 3.2.1. 字节计数法

字节计数法利用在帧头的一个字段记录该帧包含的字符数, 从而知道何处停止  
易出错, 且数据无法恢复

#### 3.2.2. 带字节填充的字节标志法

用特殊字节 FLAG 作为帧界标志。且定义了转义字节 ESC。能够使得数据链路层  
传输任何数据, 体现其“透明传输”的特性

可恢复

#### 3.2.3. 带位填充的位标志法

用特殊位串作为帧界, 约定的帧界为“01111110”。当出现连续 5 个 1 时, 在 1 后  
加上 0 进行截断。所以在扫描到连续 5 个 1 时, 去掉后面的 0 (如果是 0)

#### 3.2.4. 物理层编码违例法

用连续的高电平或低电平表示一个数据帧的开始与结束, 电平突变表示二进制  
数。

### 3.3. 检错与纠错

通信中存在噪声和干扰, 导致传输错误。

#### 3.3.1. 检错

##### 1. 奇偶校验

- 码字, 数据帧有  $m$  位消息,  $r$  位校验码,  $n = m + r$  为一个码字
- 海明距离, 对两个字段异或, 结果中 1 的个数为海明距离

- ▶ 海明距离为  $d$  的编码方案，最多实现  $d - 1$  位检测
  - ▶ 实现  $\frac{d-1}{2}$  位纠错
  - ▶ 多个码字之间取  $d_{\min}$  为海明距离
2. 循环冗余校验(CRC)
- 广泛用于局域网
- 具体步骤：
- 1) 发送方：
    - a) 数据传输前，双方确认生成多项式  $G(x)$ ，为  $r$  阶多项式
    - b) 对于数据帧  $M(x)$ ，其后添加  $r$  个 0，为  $x^r M(x)$
    - c) 按照模 2 除法，得到余数  $c = x^r M(x) \div G(x)$
    - d) 按照模 2 减法，得到码字  $T(x) = x^r M(x) - c$
  - 2) 接收方：
 

若  $G(x) \mid T(x)$ ，则未发生错误

若  $G(x) \nmid T(x)$ ，则发生错误

### 3.3.2. 纠错

#### 1. 纠 1 位错的海明码

海明码校验位数计算公式为

$$(m + r + 1) \leq 2^r \quad (3.1)$$

- 1) 发送方的编码步骤：
- a) 校验位为编号是 2 的幂次方的位
  - b) 校验位的数值：由对某组位进行奇偶校验得到

校验位:	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	✓		✓		✓		✓		✓
2		✓	✓			✓	✓		
4				✓	✓	✓	✓		
8								✓	✓

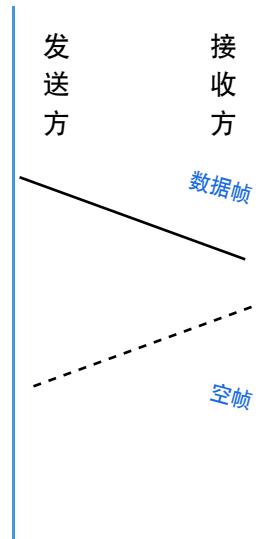
- c) 形成最终海明码
- 2) 接收方对码字进行校验和纠错
- a) 初始化计数器  $c = 0$
  - b) 对每个校验位  $r$  进行奇偶校验，判断与所给值是否一致
  - c) 不一致时， $c = c + r$
  - d) 若  $c \neq 0$ ，将码字第  $c$  位取反

### 3.4. 可靠传输数据帧的技术

数据传输从网络本身的物理属性看，是不可靠的。

### 3.4.1. 流量控制

停-等协议（半双工）



基于反馈机制，发送方向接收方发送数据帧，接收方完成接收并成功提交给网络层后，向发送方反馈一个空帧（也称“哑帧”）

仅当当前帧的  $ACK$  是 sent 时，发送方发送下一帧

### 3.4.2. 肯定确认与重传

自动重传请求(Automatic Repeat reQuest)协议

在发送方设置一个计时器，每发送一个数据帧，就开始计时。

若超时，则重新发送数据帧。但有重复帧的问题，由此在帧头附加数据帧的序列号，标识连续两个数据帧

### 3.4.3. 传输效率评估和提升

假设如下

符号含义	符号	单位
数据帧长度	$f$	位
传输信道的带宽	$b$	bps
信号在信道之间来回传递的时延	$r$	s

表示传输效率的信道利用率：

$$\frac{f}{f + rb} \quad (3.2)$$

### 3.4.4. 滑动窗口协议

滑动窗口协议通常分为两种：回退 n 帧(GBN)和选择性重传协议。

- 在 GBN 协议中，确认是累计确认，如果有任何一帧丢了，其后的所有帧都要重传。
- 为保证连续发送，发送窗口大小必须容纳整个往返时间段内的帧数，否则会等确认（空等）

e.g. 使用回退 n 帧 在一条 3000 公里长的 T1 骨干线路被用来传输 64 字节的帧。如果传播速度为 6 微秒/千米，试问序列号应该有多少位？

已知 T1 骨干线路的传播速率为 1.544Mbps

$$t_{\text{prop}} = \frac{3000 \text{ km}}{6 \mu\text{s}/\text{km}} = 18 \text{ ms}$$

$$t_{\text{trans}} = \frac{64 \times 8}{1.544 \text{ Mbps}} \approx 0.33 \text{ ms}$$

$$t_{\text{all}} = t_{\text{trans}} + t_{\text{prop}} = 18.33 \text{ ms}$$

$$\therefore n = \frac{t_{\text{all}} + 18 \text{ ms}}{t_{\text{trans}}} \approx 110$$

$$\text{窗口大小 } w \geq \lfloor \log_2(110) \rfloor$$

$2^n \geq \lfloor \log_2(110) \rfloor$  因此序列号应该有 7 位

如果是选择性重传，则  $2^{n-1} \geq \lfloor \log_2(110) \rfloor$

$$\therefore n = 8$$

两者区别有：

1. 回退 N 帧协议需要重传所有未确认的帧，选择性重传协议只重传丢失的帧
2. 回退 N 帧协议接收窗口大小为 1，选择性重传协议接收窗口大小通常大于 1
3. 回退 N 帧协议效率较低，选择性重传协议效率较高

回退 n 帧：最大发送窗口  $w = \text{帧的最大序列号 MAX_SEQ}$

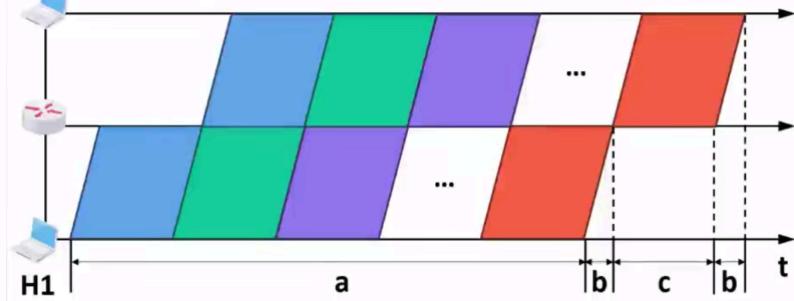
选择性重传：最大发送窗口  $w = \frac{\text{MAX_SEQ} + 1}{2}$

### 3.5. 练习

1. 在分组交换网络中，主机 H1 和 H2 通过路由器互连，2 段链路的带宽均为 100Mbps、时延带宽积(即单向传播时延×带宽)均为 1000bits。若 H1 向 H2 发送 1 个大小为 1MB 的文件，分组长度为 1000B，则从 H1 开始发送时刻起到 H2 收到文件全部数据时刻止，所需的时间至少是()。(注： $M = 10^6$ )

80.10ms

**【解析】**  
 a: 构成文件的所有分组的发送时延  
 b: 一段链路的传播时延  
 c: 一个分组的发送时延



$$\begin{aligned}
 T_{\text{total}} &= T_{\text{transmission}} + T_{\text{propagation}} + T_{\text{routing}} \\
 &= \frac{1MB}{100Mbps} + \frac{1000B}{100Mbps} + 2 \times \frac{1000bits}{100Mbps} = 80.1ms
 \end{aligned} \quad (3.3)$$

2. 异步通信系统采用 PPP 协议，收方收到 10 20 7D 5E 30 5E 7D 5D，发放发送的应该是？

10 20 7E 30 5E 7D

在异步通信 PPP 中，采用带字节填充的帧标记法，其中 7E 为帧标记，7D 为转义字节。

- 1) 7E 会被转义为:  $7D + 0x20 \oplus 7E = 7D5E$
- 2) 7D 会被转义为:  $7D + 0x20 \oplus 7D = 7D5D$

3. 使用 50Mbps WiFi 链路从你的计算机发送一系列的 1250B 的信息到一个附近 AP，采用 ARQ 技术(自动请求重传)。此链路的传播延迟(D)是 250ns。通过该链路传递数据的最大速率是什么()?

4988 messages/s

$$\text{信道利用率} = \frac{1250B}{1250B + 2 \times BD} \approx 99.8\%$$

$$\therefore R_{\text{max}} = 50Mbps * 0.998 = 49.9Mbps \approx 4988 \text{ messages / s}$$

4. Internet 校验和 (4 位字) 处理消息 1001110010100011，校验和是？

1011

- 1) 先将消息分成 4 位一组: 1001110010100011
- 2) 进行求和(将最高位产生的进位向最低位循环加):  $1001 + 1100 + 1010 + 0011 = 0100$
- 3) 求和后取反: 1011

5. 两台主机之间的数据链路层采用了回退 n 帧协议 ( GBN ) 传输数据, 数据传输速率为 16kbps, 单向传播延迟是 270ms, 数据帧长度为 128~512B, 接收方总是以数据帧等长的帧进行确认, 为使得信道利用率达到最高, 帧序号的比特数至少为多少位?

4

设至少为  $n$  位, 则  $\text{MAX\_SEQ} = 2^n - 1$

$$\therefore w \leq 2^n - 1$$

信道利用率最高为  $\frac{w \cdot L}{L + 2BD} = 1$

$$\therefore 2^n = \frac{2BD}{L(128\text{B})} + 2 \approx 10.4$$

$$\therefore n \geq 4$$

## Chapter 4: 介质访问控制和局域网

### 4.1. 局域网概述

目前，主流的局域网为以太网和无线局域网，皆采用广播式信道，需要解决信道分配和使用问题，这就是介质访问控制（MAC）问题。

**MAC 协议提供无连接不可靠的服务：**发送帧前不建立连接，冲突的发生导致丢帧而不可靠。

数据链路层分为 MAC 子层和 LLC 子层。

MAC 子层负责对物理信道的访问控制，LLC 子层起到承上启下的作用。

以太网协议覆盖物理层和数据链路层，IEEE802.x 覆盖物理层和 MAC 子层。

网桥接受信号，再生信号，转发信号，工作在物理层；同时，检查帧头，根据目的 MAC 地址做出决策，工作在数据链路层。

### 4.2. 介质访问控制

#### 4.2.1. 信道的静态分配

如 TDM 和 FDM，都是根据工作站数量，预分配信道。

#### 4.2.2. 多路访问协议

多路访问协议提供动态访问共享信道的机制。按照是否产生冲突划分：随机访问控制协议、受控访问协议和有限竞争协议。

##### 1. 随机访问协议

- ALOHA 协议
  - ▶ 纯 ALOHA 协议

“想发就发”易受冲突期为  $2D$  ( $D = L/C$ )，当前帧不能与前一帧重叠，也不能在当前帧发送的  $D$  时间内发送新帧

- ▶ 时隙 ALOHA 协议

要发新帧，必须等到时槽起点 标准帧时：  $D$

- CSMA
  - 先听后发，边发边听
  - ▶ 非持续 CSMA
    - 有待发送数据帧->侦听信道->信道空闲->发送数据帧
    - 信道忙->等待随机时间再侦听
  - ▶ P-持续 CSMA
    - 侦听信道->信道空闲->按  $p$  概率发送数据帧
    - 信道忙->持续侦听
  - ▶ CSMA/CD
    - 带冲突检测的载波侦听协议

使用以太网卡( 内有发送器 Tx 和接收器 Rx ), 检测 Rx 与信道信号是否一致, 从而得知是否冲突

**时隙宽度 = RTT**

**发送帧的有效时间 >= 时隙宽度**

## 2. 受控访问协议

- 位图协议
- 二进制倒计数协议 (举手)
- 令牌环协议

## 3. 有限竞争协议

### 4.3. 以太网

#### 4.3.1. 经典以太网和交换式以太网

现在广泛使用的局域网为交换式以太网。

##### 1. 经典以太网

经典以太网主要指 10Base-5、10Base-2 和 10Base-T。其中 10 指带宽为 10Mbps, Base 指基带信号, 5、2 和 T 分别指最大传输距离为 5/100m、2/100m 和 100m。T 表示传输介质为铜双绞线。

10Base-T 采用星型物理拓扑, 三者逻辑都是总线拓扑

二进制指数退避 (BEB) 算法

$$RD = \begin{cases} \tau \times \{0, 1, \dots, 2^i - 1\} & \text{if } i < 10 \\ \tau \times \{0, 1, \dots, 1023\} & \text{if } 10 \leq i < 16 \end{cases} \quad (4.1)$$

其中, 冲突次数为  $i$   $\tau$  为时隙宽度,  $RD$  为随机延迟时间  
到 16 次后报错

##### 2. 交换式以太网

采用交换机的以太网。交换机工作在数据链路层, 冲突域由物理层设备(中继器、集线器等扩大), 因此其可以分隔冲突域。

#### 4.3.2. 以太网数据帧格式



**数据帧最短长度 (不含前导码) 为 64, 因此分组最小长度为 46B**

**MAC 地址有 48 位, 其本质表示一个适配器, 必须是单播地址。**但是目的地址可以是单播、广播或组播。MAC 地址前 24 位为组织唯一标识符(OUI), 后 24 位为设备标识符。

### 4.3.3. 越来越快的以太网

名称	线缆	编码方式
10Base-FX	光纤	4b/5b

## 4.4. 数据链路层交换和交换机

数据帧从交换机的一个端口进入，经处理后，从其他端口离开的过程称为交换（[二层交换](#)，[L2 交换](#)）。

### 4.4.1. 数据链路层交换

“三选一”决策

1. 转发

当查到目的地址

2. 丢弃

当查到目的地址，但是转出端口与转入端口是同一个

3. 泛洪

当找不到目的地址

MAC 地址表来源——交换机进行[逆向地址学习](#)

如果源地址不在地址表中，则记录 MAC 和 PORT；如果目的地址不在表中，泛洪，若在，则从对应端口转发。

### 4.4.2. 交换机

交换机是冲突域的边界

交换机每收到一帧都会学习，并根据 MAC 地址表做出转发/广播/丢弃三选一的决策

局域网中的交换机实现多对端口间帧的并发传输

## 4.5. 虚拟局域网和生成树协议

### 4.5.1. 虚拟局域网

一个物理 LAN 是一个广播域，路由器是广播域的边界。

一个虚拟局域网(VLAN)，对应一个广播域，好处：

1. 控制广播域

将大 LAN 分成小 LAN，平衡通信流量

2. 安全边界

3. 管理灵活

4. 逻辑分组

#### 4.5.2. 生成树协议

生成树协议是链路管理协议。

物理拓扑有冗余，为防止广播风暴等问题，采用生成树协议(STP)，使逻辑拓扑是一个无闭环的树。

#### 4.6. 无线局域网

无线局域网(WLAN)是指以无线信道作为传输介质的局域网。

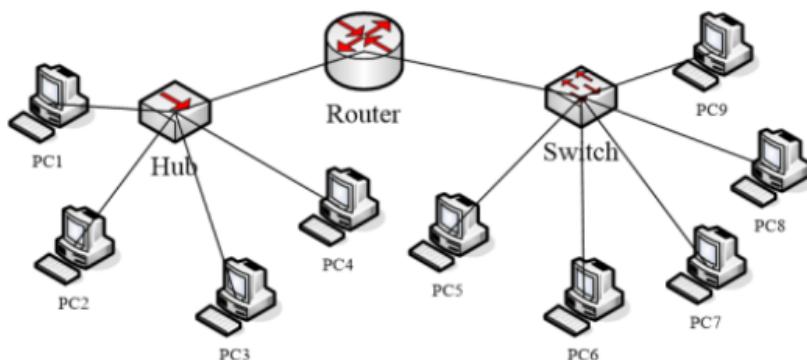
#### 4.7. 练习

- 一台交换机具有 24 个 100Mbps 全双工端口和 2 个 1000Mbps 全双工端口，如果所有的端口都工作在全双工状态，那么交换机的总带宽为\_\_？

由于全双工是收发同时进行，所以端口带宽需要  $\times 2$

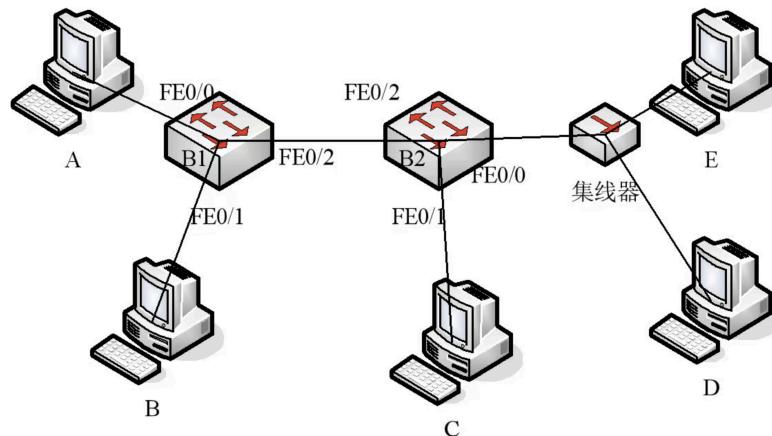
$$\begin{aligned} \text{总带宽} &= 24 \times 100Mbps \times 2 + 2 \times 1000Mbps \times 2 \\ &= 8.8Gbps \end{aligned}$$

- 在启用了 VLAN 的局域网中，当帧通过干线时，通常采用 IEEE 802.1Q 协议
- 在经典以太网中，有 A、B、C 三个站点，采用 CSMA/CD 和 BEB，设初始没有站点发信息。当以下时间按顺序发生时，哪些正确？
  - A 成功发送了一帧
  - A 和 B 都发帧，冲突
  - A 成功发送了一帧
  - A B 处于不同的工作状态
  - B 已经等待了至少两个时隙
  - A 成功重传，无需等待，B 等待了
  - B 在冲突发生和选择 1 时隙时等待，已等待两个时隙
- 下图中，有多少广播域，多少冲突域？



- a. 交换机(Switch)是冲突域的边界
- b. 路由器是广播域的边界 (广播域: 2)
- c. 交换机和路由器之间是冲突域 冲突域:  $1 + 5 + 1 = 7$
- d. 交换机和交换机之间是广播域

5. 写出下列数据帧正常发送后，两个交换机内部的 MAC 地址表



- $A \rightarrow D$
- $E \rightarrow A$
- $D \rightarrow E$

B1 的 MAC 地址表		B2 的 MAC 地址表	
MAC 地址	端口	MAC 地址	端口
A	FE0/0	E	FE0/2
A	FE0/2	E	FE0/0
		D	FE0/0

## Chapter 5: 网络层

### 5.1. 通信网络及提供的服务

#### 5.1.1. 无连接的服务

数据报网络提供无连接的服务。  
数据报网络提供的数据分组传输服务，无须在传输前建立连接，每个分组独立寻径。

- 特点：
1. 无连接
  2. 独立寻径
  3. 乱序到达
  4. 重组
  5. 无状态：路由器无需保留过往分组的状态，只是尽力地转发
  6. 抗毁性：单点故障不会导致网络瘫痪

#### 5.1.2. 面向连接的服务

虚电路网络提供面向连接的分组传输服务。

- 特点：
1. 按路径传输：分组按序沿虚连接传输
  2. 无需独立寻径：分组携带连接号，不需要携带目的机地址
  3. 按序到达
  4. 有状态：路由器需要保留过往分组的状态
  5. 连接损坏：连接中断，需要重新搭建虚连接

### 5.2. IPv4 协议

#### 5.2.1. IPv4 分组

IPv4 分组由头部和载荷组成。

4b	4b	8b	16b		
版本	头部长度	服务类型	总长度		
		标识	DF MF 片偏移		
生存时间	协议	头部校验和			
源 IP 地址					
目的 IP 地址					
选项/填充					
载荷					

- 版本: 表示这是 IPv4 (0100) 还是 IPv6 (0110)
- 头部长度: 单位为 4 bytes, 最小字段为 5。  
报头的固定长度部分为 20 个字节。因此, 分组头长度字段最小值为 5 ( $5 \times 4 = 20$ )
- 总长度: 单位为 bytes
- 标识: 用来标记分组的序号
- 标记位
  - ▶ DF(Don't fragment): 不分片标志, 1 表示不分片, 0 表示可以分片
  - ▶ MF(More fragment): 更多分片标志, 1 表示后面还有分片, 0 表示没有更多分片
- 片偏移: 长 13 位, 单位是 8 字节。值指明当前分片在原分组的起始位置, 0 表示当前分片为第一分片; 最大值为  $2^{13} - 1$ , 为 8191, 表示分片最多数量。

### 分片及分片表示

最大传输单元 (MTU), 设入境分组长  $L$  字节, 转出网络的 MTU 为  $M$  字节, 触发路由器分组的条件有两个:

1. 分组的长度大于转出网络的 MTU, 即  $L > M$
2. 分组的标记位  $DF = 0$ , 即允许分片

分组的分片依据如下:

设需要分片的总片数为  $n$ , 分组头部长 20 bytes, 分片载荷长度上限为  $d$ ,

$$1. \quad d = \lfloor \frac{M - 20}{8} \rfloor \times 8 \quad (5.1)$$

$$2. \quad n = \lceil \frac{L - 20}{d} \rceil \quad (5.2)$$

除了最后一个分片, 其余必须满载, 长度为  $d$ 。

由于分片偏移的单位为 8 字节, 因此分片的长度必须是 8 的整数倍。

设  $F_i$  为第  $i$  个分片的片偏移,  $L_i$  为第  $i$  个分片的长度, 则

$$F_i = \frac{d}{8} \times (i - 1), \quad 1 \leq i \leq n \quad (5.3)$$

$$L_i = \begin{cases} d + 20, & 1 \leq i < n \\ L - d \times (n - 1), & i = n \end{cases} \quad (5.4)$$

### 5.2.2. IPv4 地址

#### IP 地址的表示和分类

IP 地址用 32 位表示, 采用点分 10 进制表示。将 32 位分成 4 个 8 位。

IP 地址分为网络部分和主机部分 (至少有两位)

- 受限广播地址: 32 位 1 (255.255.255.255), 不会被路由器转发, 为本地广播地址
- 环回地址: 127.x.x.x, 只能用作 IP 分组的目的地址, 不会流出本机
- 定向广播: 向某个网络下的所有主机广播
- A 类地址的子网掩码为 255.0.0.0/8

- B 类地址的子网掩码为 255.255.0.0/16
- C 类地址的子网掩码为 255.255.255.0/24

### 5.2.3. 子网划分

#### 1. 子网划分

原始网络位 借位 剩余主机位

2. 子网掩码 子网掩码指示了对应 IP 地址所在的网络以及这个网络的规模。 ( 1 是 网络位, 0 是主机位 )

子网掩码可以采用前缀表示法表示 ('/25': 25 位网络位)

3. 可变长的子网掩码 ( VLSM )

网络位数不是定长的

求解时, 先算主机需求数量最多的, 计算需要的主机位, 再计算借位, 从而不断划分子网。

### 5.2.4. IP 地址的获取

#### 5.2.5. IP 寻址和 MAC 寻址

IP 寻址: 根据 IP 地址定位到目的主机所在的子网, 发生在网络层

MAC 寻址: 定位到目的主机, 发送在数据链路层

确定目的地址的方法: 将, 目的 IP 地址与子网掩码进行“按位与”, 得到目的网络地址

#### 5.2.6. 无类域间路由 ( CIDR )

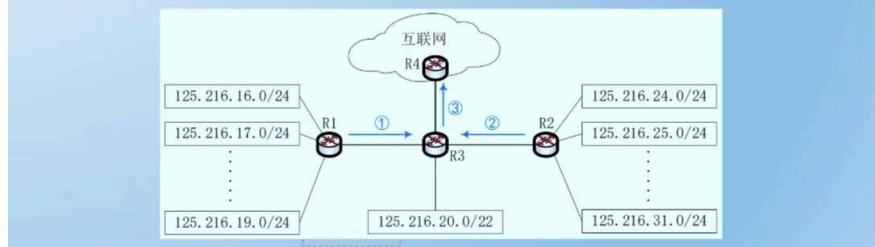
##### 1. 无类地址分配

CIDR 提供“按需分配”IP 地址, 几乎不会造成 IP 地址的浪费。

##### 2. CIDR 路由汇聚和实施效果

使用路由汇聚, 缩小路由表规模。路由汇聚的结果是超, 超网可以采用“基地租/网络位数”表示

■一个网络的拓扑如图所示, 路由器 R1 直接连接了 4 个“/24”的网络, 路由器 R2 直接连接了 8 个“/24”的网络, 路由器 R3 连接了 1 个“/22”的直连网络, 还连接了路由器 R1 和 R2; R1 向 R3 通告时发生了路由汇聚, 用①表示; R2 向 R3 通告时发生了路由汇聚, 用②表示; R3 向 R4 通告时, 也发生了路由汇聚, 用③表示。请分别写出汇聚①、②、③发生后产生的超网。



a. 不变的位

16: 125.216.0001 00|00

17: 125.216.0001 00|01

18: 125.216.0001 00|10

19: 125.216.0001 00|11

**超网为 125.216.16.0/22**

b. 不变的位

24: 125.216.0001 1|000

25: 125.216.0001 1|001

...

30: 125.216.0001 1|110

31: 125.216.0001 1|111

**超网为 125.216.24.0/21**

c.

16: 0001 | 00

...

30: 0001 | 1

31: 0001 | 1

**超网为 125.216.16.0/20**

因此汇聚 1, 2, 3 发生后, 产生的超网为 125.216.16.0/20

### 5.3. 与 IP 相关的协议

#### 5.3.1. ARP 协议

地址解析 ARP 的主要功能是: 通过 IP 地址找到 MAC 地址

#### 5.3.2. 互联网控制消息协议 ( ICMP )

#### 5.3.3. 网络地址转换 ( NAT )

基本的 NAT 是将一些私人的 IP 地址映射为另一些公有 IP 地址的方法; 对终端用户是透明的。

### 5.4. IPv6 协议

IPv6 地址位数为 128 位, 分成 8 个 16 位组

#### 5.4.1. IPv6 分组

IPv6 处理的协议数据单元为分组, 分组包括基本头部、扩展头部和净数据。其中, 基本头部长度固定, 为 40 Bytes。IPv6 可以有多个扩展头, 也可以无扩展头。

### 5.4.2. IPv6 地址

冒分十六进制

1. 忽略前导零
2. 最多只有一个“::”（用于表示最多的连续 0）

### 5.4.3. ICMPv6

#### 5.4.4. 邻居发现（ND）

#### 5.4.5. IPv6 过渡技术

### 5.5. 路由选择协议

#### 5.5.1. 距离矢量路由协议

#### 5.5.2. 链路状态路由协议

#### 5.5.3. 边界网关协议（BGP）

#### 5.5.4. IP 组播

#### 5.5.5. 路由器

### 5.6. 练习

1. 一个分组长 4000B，其中头部长 20B，头部标识字段为 8580，标记位  $DF = 0$ ，当分组到达路由器，其 MTU 为 1500B。
  - (1) 路由器是否要进行分片？
  - (2) 若分片，应分为多少片？
  - (3) 每片的总长度、头部标识、标记位 DF 和 MF 以及片偏移值是多少？

(1)

- $4000B > 1500B$
- $DF = 0$

要分片

$$(2) d = \lfloor \frac{1500-20}{8} \rfloor \times 8 = 1480B \quad n = \lceil \frac{4000-20}{d} \rceil = 3$$

分成 3 片

(3)

字段名	分组	总长度 / B	标识	DF	MF	片偏移
原分组		4000	8580	0	0	0
分片 1		1500	8580	0	1	$\frac{d}{8} \times (i - 1) = 0$

分片 2	1500	8580	0	1	185
分片 3	1040	8580	0	0	370

2. 下面列出的前缀中，哪一个是匹配 136.127.4.1 的最长前缀 )?

1. A. 136.127.0.0/21
2. B. 136.127.4.0/21
3. C. 136.127.0.0/22
4. D. 136.127.0.0/20

A

136.127.0000 0100.1 在 136.127.0000 | 0000.0/20 中，  
在 136.127.0000 0|0000.0/21 中，  
在 136.127.0000 01 | 00.0/22 中

1. IPv4, IPv6, MAC 地址分别用多少位表示

32 128 48