

# 《计算机网络》

## 一、概述

**ISP** 互联网服务供应商

**IXP** 互联网交换点

**C/S 方式** Client Server

**P2P方式** Peer-to-Peer

**电路交换 报文交换 分组交换**

**速率**

**带宽** 最高数据率 bit/s

**吞吐量** 实际数据量

**时延 delay/latency**

**发送时延** 数据发送时间

$$\text{发送时延} = \frac{\text{数据帧长度 (bit)}}{\text{发送速率 (bit/s)}}$$

**传播时延** 数据传播时间

$$\text{传播时延} = \frac{\text{信道长度(m)}}{\text{电磁波在信道上的传播速率(m/s)}}$$

**处理时延**

**排队时延**

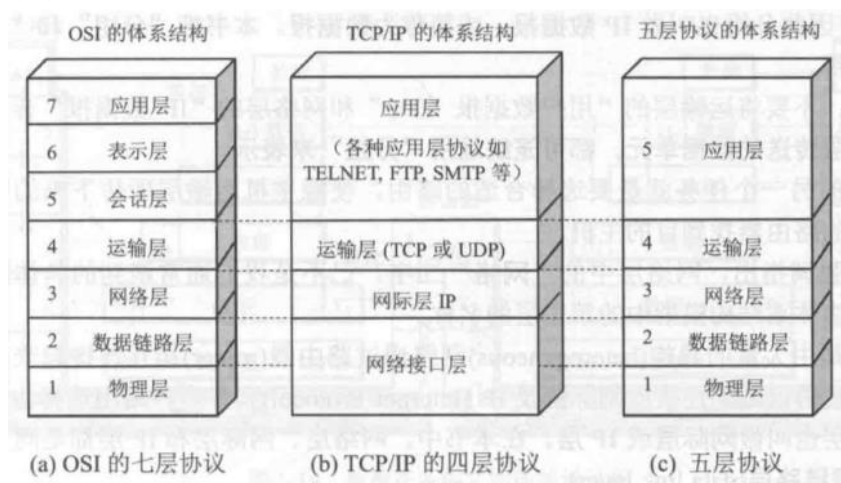
加起来就是总时延

**时延带宽积** 以bit为单位我的链路长度

**往返时间** RTT

**利用率**

### 1. 协议体系结构



应用层 应用进程间通信和交互的规则 DNS HTTP SMTP 报文message

运输层 提供数据传输服务 UDP TCP

网络层 不同主机间通信服务 IP

链路层 组装成帧 控制信息（同步信息，地址信息，差错控制）

物理层 比特 01

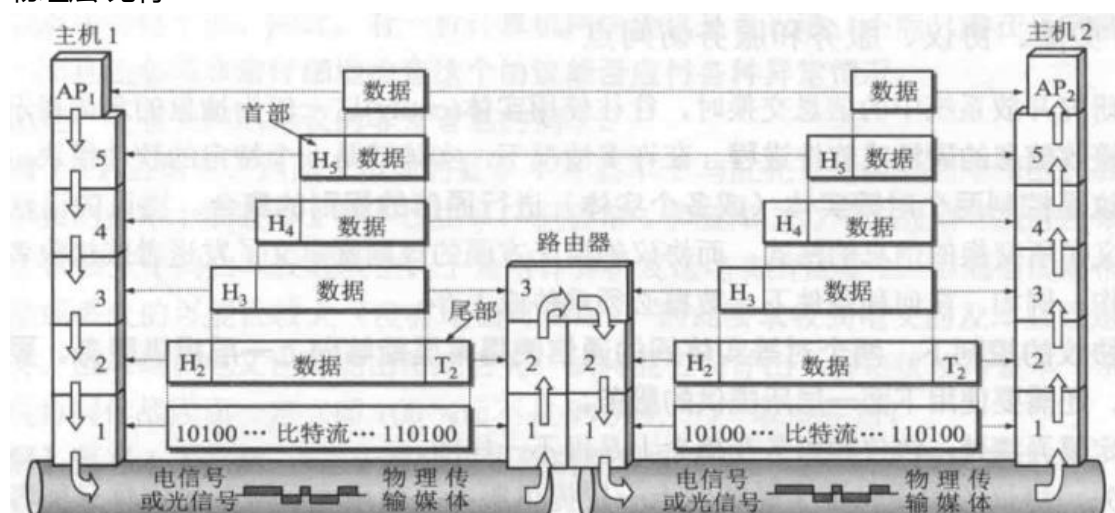


图 1-19 数据在各层之间的传递过程

协议水平，服务竖直

## 二、物理层

### 1. 物理层协议 物理层规程procedure

串行传输

### 2. 数据通信系统

源系统/发送端 传输系统 目的系统/接收方

源系统：源点 发送器 接收器 终点

### 3. 单向通信/单工通道 双向交替通信/半双工通道 双向同时通信/全双工通道

基带信号 调制 基带调制 编码

载波 带通信号 带通调制

### 4. 编码方式

不归零制 归零制 曼彻斯特编码（自同步能力） 差分曼彻斯特编码

### 5. 奈奎斯特准则，信道传输频率上限

$$f_s > 2 * f_N$$

信噪比

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

香农公式

在 1948 年，信息论的创始人香农(Shannon)推导出了著名的香农公式。香农公式指出：信道的极限信息传输速率  $C$  是

$$C = W \log_2(1+S/N) \text{ (bit/s)} \quad (2-2)$$

式中， $W$  为信道的带宽（以 Hz 为单位）； $S$  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。香农公式的推导可在通信原理教科书中找到。这里只给出其结果。

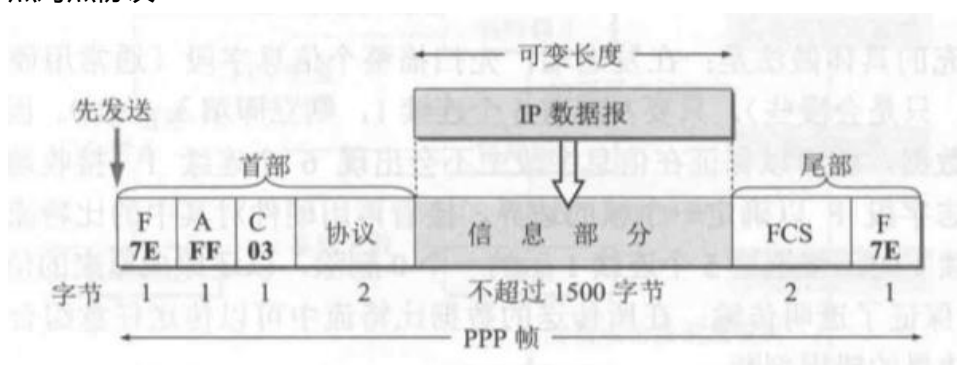
信道的带宽或者信噪比越大，信息的极限传输速率就越高

### 6. 传输媒介 双绞线 同轴电缆 光缆

7. 信道复用技术
  - 频分复用 FDM
  - 时分复用 TDM 等时信号
  - 统计时分复用 STDM 异步时分复用
  - 波分复用 光的频分复用
  - 码分复用 CDM 码分多址 CDMA 码片序列正交 伪随机码序列

### 三、链路层

1. 点对点信道
  - 广播信道
2. 帧 网络层交下来的数据构成帧
  - 封装成帧 framing 最大传送单元MTU 控制字符 SOH EOT
  - 透明传输 传输帧中 SOH EOT 进行转义操作
  - 差错检测 误码率 Bit Error Rate 循环冗余检验 CRC 帧检测序列FCS Frame Check Sequence
  - 无差错接收! =可靠传输
  - 帧丢失 帧重复 帧失序 通过上层, 例如运输层的TCP协议完成
3. 点对点协议 PPP



F 标志位 进制

A 规定为0xFF

C 规定为0x03

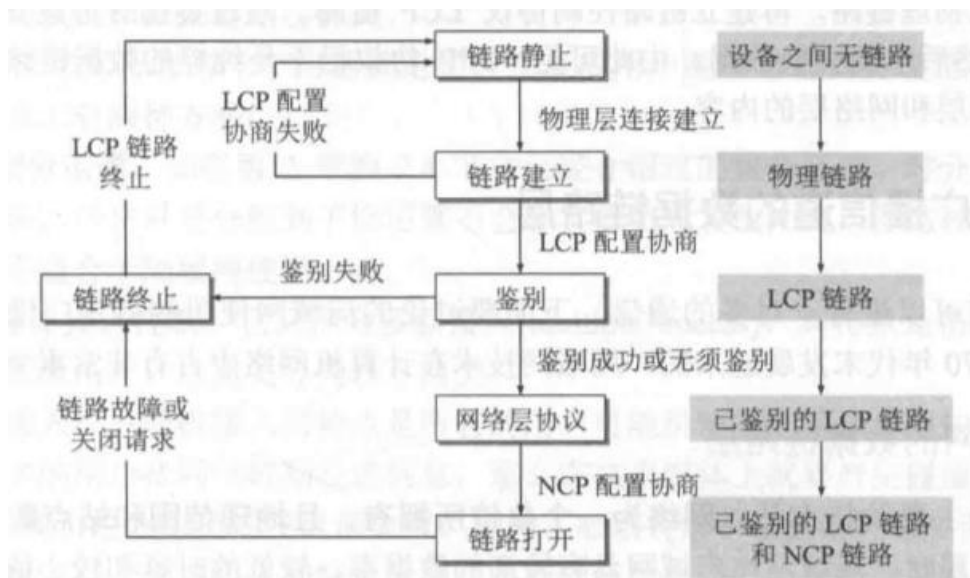
第四个 两个字节的协议字段

尾部的第一个字段 (2字节) 是使用CRC的FCS

**字节填充** 转义字符 信息字段修改出现的标志字段 异步传输

**零比特填充** 五个连续的1就加个0 转义

4. PPP协议状态图



鉴别 Authenticate

口令鉴别协议 PAP

口令握手鉴别协议 CHAP

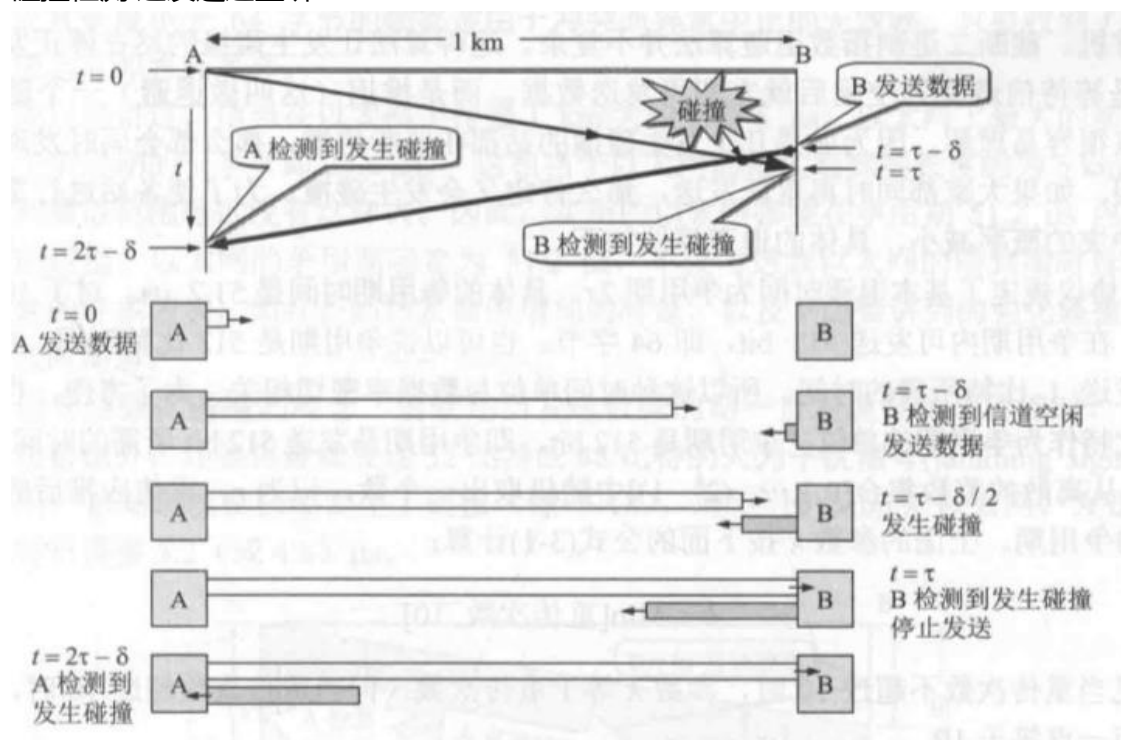
## 5. 广播信道的链路层

CSMA/CD协议 载波监听多点接入/碰撞检测

多点接入 总线型网络

载波监听 发送前发送中都在检测信道

碰撞检测 边发送边监听



不能同时发送或者接收，双向交替通信/半双工通信

截断而二进制指数退避

争用期为512bit

$$k = \text{Min}[\text{重传次数}, 10] \quad (3-1)$$

可见当重传次数不超过 10 时，参数  $k$  等于重传次数；但当重传次数超过 10 时， $k$  就不再增大而一直等于 10。

(3) 当重传达 16 次仍不能成功时（这表明同时打算发送数据的站太多，以致连续发生冲突），则丢弃该帧，并向高层报告。

使重传需要推迟的平均时间随着重传次数而增大 动态退避

人为干扰信号

根据以上所讨论的，可以把 CSMA/CD 协议的要点归纳如下：

(1) 准备发送：适配器从网络层获得一个分组，加上以太网的首部和尾部（见后面的 3.4.3 节），组成以太网帧，放入适配器的缓存中。但在发送之前，必须先检测信道。

(2) 检测信道：若检测到信道忙，则应不停地检测，一直等待信道转为空闲。若检测到信道空闲，并在 96 比特时间内信道保持空闲（保证了帧间最小间隔），就发送这个帧。

(3) 在发送过程中仍不停地检测信道，即网络适配器要边发送边监听。这里只有两种可能性：

①发送成功：在争用期内一直未检测到碰撞。这个帧肯定能够发送成功。发送完毕后，其他什么也不做。然后回到(1)。

②发送失败：在争用期内检测到碰撞。这时立即停止发送数据，并按规定发送人为干扰信号。适配器接着就执行指数退避算法，等待  $r$  倍 512 比特时间后，返回到步骤(2)，继续检测信道。但若重传达 16 次仍不能成功，则停止重传而向上报错。

以太网每发送完一帧，一定要把已发送的帧暂时保留一下。如果在争用期内检测出发生了碰撞，那么还要在推迟一段时间后再把这个暂时保留的帧重传一次。

## 6. 集线器工作在物理层

从图 3-21 可看出，要提高以太网的信道利用率，就必须减小  $\tau$  与  $T_0$  之比。在以太网中定义了参数  $a$ ，它是以太网单程端到端时延  $\tau$  与帧的发送时间  $T_0$  之比：

$$a = \frac{\tau}{T_0} \quad (3-2)$$

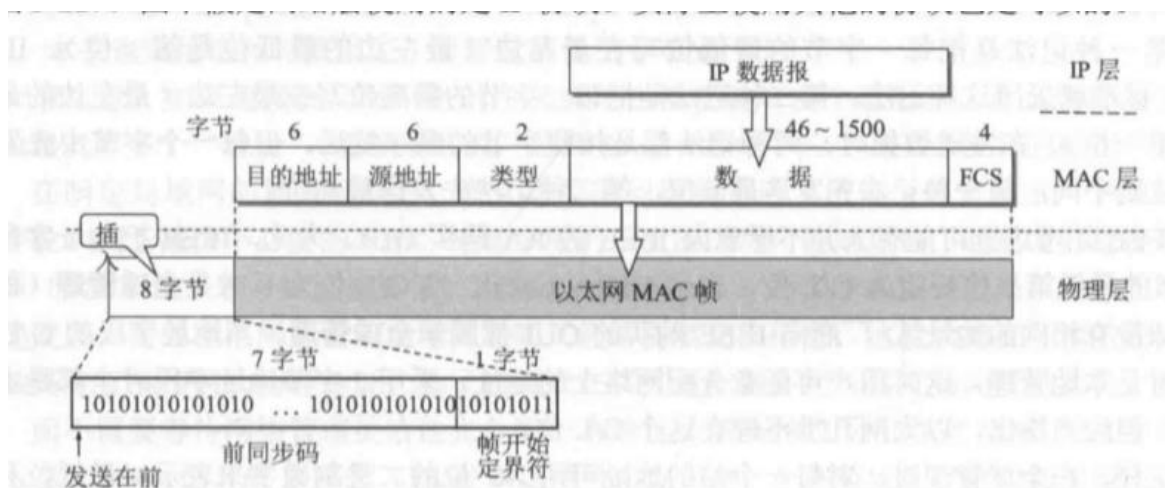
7. 当  $a \rightarrow 0$  时，表示只要一发生碰撞，就立即可以检测出来，并立即停止发送，因而信道资源被浪费的时间非常非常少。反之，参数  $a$  越大，表明争用期所占的比例越大，这就使得每发生一次碰撞就浪费了不少的信道资源，使得信道利用率明显降低。因此，以太网的参数

使得单程传播时间尽可能的短

极限信道利用率

$$S_{\max} = \frac{T_0}{T_0 + \tau} = \frac{1}{1 + a}$$

## 8. MAC层 硬件地址/物理地址



### 无效MAC帧

IEEE 802.3 标准规定凡出现下列情况之一的即为无效的 MAC 帧:

- (1) 帧的长度不是整数个字节;
- (2) 用收到的帧检验序列 FCS 查出有差错;
- (3) 收到的帧的 MAC 客户数据字段的长度不在 46 ~ 1500 字节之间。考虑到 MAC 帧首部和尾部的长度共有 18 字节, 可以得出有效的 MAC 帧长度为 64 ~ 1518 字节之间。

对于检查出的无效 MAC 帧就简单地丢弃。以太网不负责重传丢弃的帧。

### 9. 交换机工作在链路层

交换表 生成树协议 STP 记录MAC地址和端口

### 10. VLAN 虚拟局域网 利用VLAN标记 增加了四个字节

## 四、网络层

### 1. 网络层不提供服务质量的承诺

网际协议IP

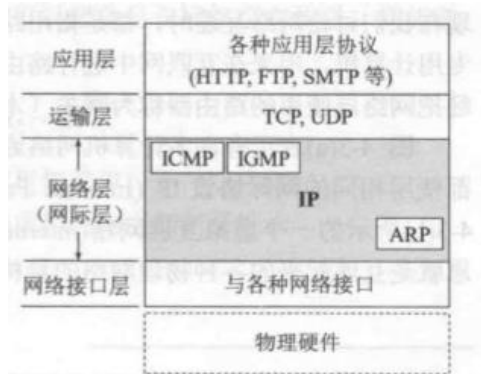


图 4-2 网际协议 IP 及其配套协议

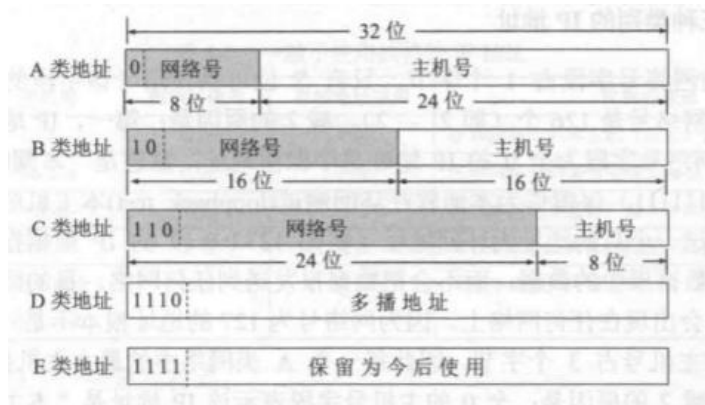
- 地址解析协议 **ARP** (Address Resolution Protocol)
- 网际控制报文协议 **ICMP** (Internet Control Message Protocol)
- 网际组管理协议 **IGMP** (Internet Group Management Protocol)

### 2. 中间设备

- (1) 物理层使用的中间设备叫做转发器(repeater)。
- (2) 数据链路层使用的中间设备叫做网桥或桥接器(bridge)。
- (3) 网络层使用的中间设备叫做路由器(router)<sup>①</sup>。
- (4) 在网络层以上使用的中间设备叫做网关(gateway)。用网关连接两个不兼容的系统需要在高层进行协议的转换。

互联网可以由多种异构网络互联而成

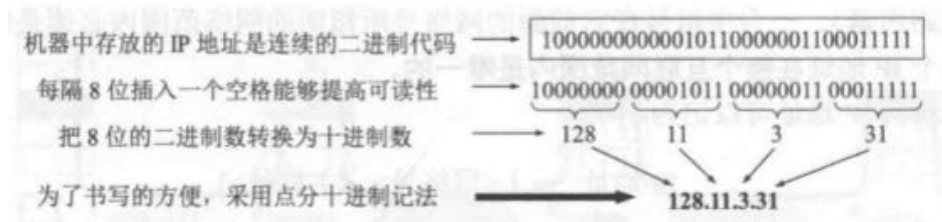
### 3. IP地址



A、B、C都为单播地址

D类地址用于多播

点分十进制记法



### 4. 常用网络IP

A类网络 7位: 126个

全0 this 本网络

127 环回测试

B类中 128.0.0.0不使用

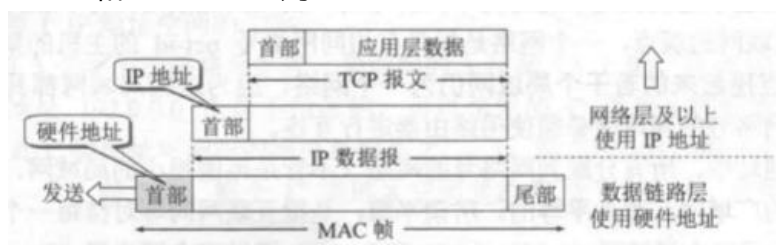
C类中 192.0.0.0不使用

网络类别	最大可指派的网络数	第一个可指派的网络号	最后一个可指派的网络号	每个网络中的最大主机数
A	$126 (2^7 - 2)$	1	126	16777214
B	$16383 (2^{14} - 1)$	128.1	191.255	65534
C	$2097151 (2^{21} - 1)$	192.0.1	223.255.255	254

不使用网络

网络号	主机号	源地址使用	目的地址使用	代表的意思
0	0	可以	不可	在本网络上的本主机（见 6.6 节 DHCP 协议）
0	host-id	可以	不可	在本网络上的某台主机 host-id
全 1	全 1	不可	可以	只在本网络上进行广播（各路由器均不转发）
net-id	全 1	不可	可以	对 net-id 上的所有主机进行广播
127	非全 0 或全 1 的任何数	可以	可以	用于本地软件环回测试

### 5. IP地址和MAC地址区别





IP层上只能看到IP数据报

路由器只根据目的站的IP地址的网络号进行路由选择

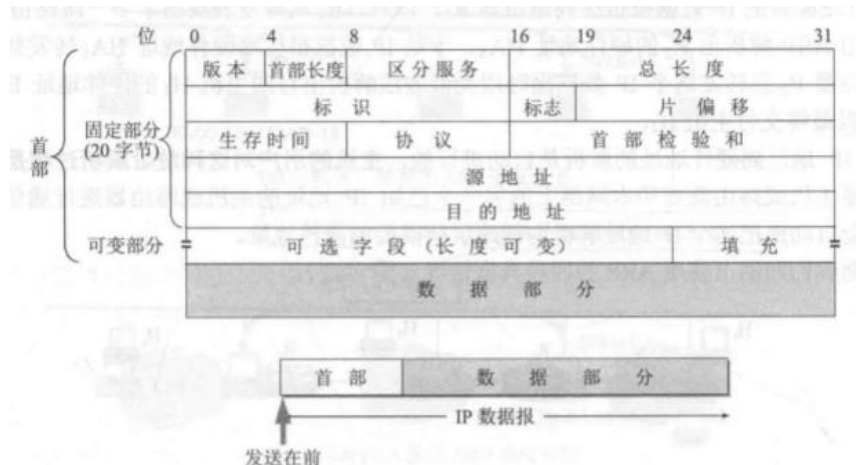
局域网的链路层，只能看见MAC帧

## 6. ARP协议 地址解析协议

构建IP到硬件地址的映射

(因为硬件地址多种多样，所以进行IP编址简化)

## 7. IP数据报



**版本** 4位

**首部长度** 4位

**区分服务** 8位

**总长度** 16位 最大长度为 $2^{16}-1$  字节

MTU 最大传送单元 以太网规定MTU为1500字节 分片处理

总长度为 分片后每个分片首部长度与该分片数据长度的总和

**标识** 16位 每产生一个数据报 计数器+1

**标志** 3位 后两位有意义

最低位MF MF=1 表示后面还有分片 MF=0表示是最后一个

中间位DF DF=1 不能分片 反之亦然

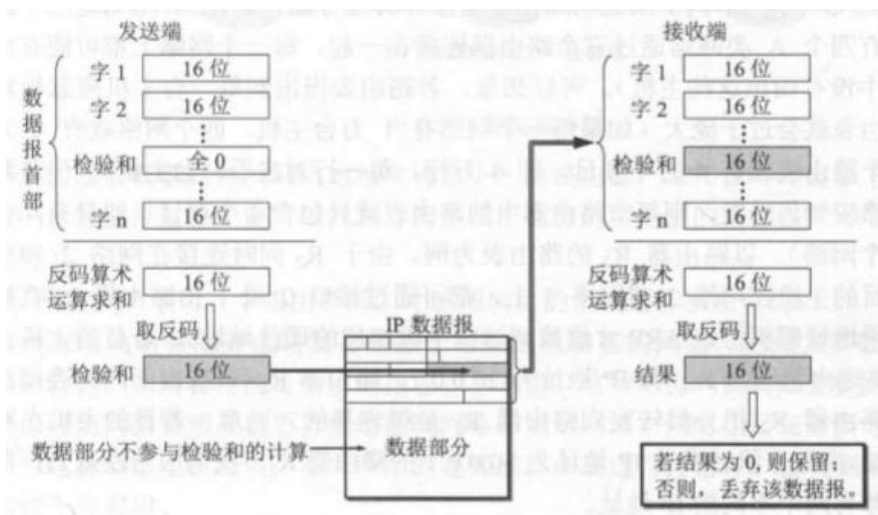
**片位移** 13位 分片后某片的相对位置 8个字节为偏移单位 所以分片长度一定是8字节整数倍

**生存时间** 8位 TTL 转发一次就是一跳 跳数限制 最大255

**协议** 8位

**首部检验和** 16位 只检验数据报首部 不包括数据部分 每路过一个路由器重新计算





**源地址** 32位

**目的地址** 32位

**可变部分** 1-40字节 增加功能 在IPv6中首部长固定

## 8. 分组转发流程

路由器表：（目的网络地址，下一跳地址）

特定主机路由

默认路由（只要是其他网络就发送）

分组转发算法

- (1) 从数据报的首部提取目的主机的 IP 地址  $D$ ，得出目的网络地址为  $N$ 。
- (2) 若  $N$  就是与此路由器直接相连的某个网络地址，则进行**直接交付**，不需要再经过其他的路由器，直接把数据报交付目的主机（这里包括把目的主机地址  $D$  转换为具体的硬件地址，把数据报封装为 MAC 帧，再发送此帧）；否则就是间接交付，执行(3)。
- (3) 若路由表中有目的地址为  $D$  的特定主机路由，则把数据报传送给路由表中所指明的下一跳路由器；否则，执行(4)。
- (4) 若路由表中有到达网络  $N$  的路由，则把数据报传送给路由表中所指明的下一跳路由器；否则，执行(5)。
- (5) 若路由表中有一个默认路由，则把数据报传送给路由表中所指明的默认路由器；否则，执行(6)。
- (6) 报告转发分组出错。

## 9. 子网划分

{<网络号>,<子网号>,<主机号>}

子网掩码 逐位与 AND

A 类地址	网络地址	网络号	主机号为全 0
	默认子网掩码 255.0.0.0	11111111	000000000000000000000000
B 类地址	网络地址	网络号	主机号为全 0
	默认子网掩码 255.255.0.0	1111111111111111	0000000000000000
C 类地址	网络地址	网络号	主机号为全 0
	默认子网掩码 255.255.255.0	11111111111111111111	00000000

子网分组转发

目的网络地址、子网掩码、下一跳地址

- (1) 从收到的数据报的首部提取目的 IP 地址  $D$ 。
- (2) 先判断是否为直接交付。对路由器直接相连的网络逐个进行检查：用各网络的子网掩码和  $D$  逐位相“与”（AND 操作），看结果是否和相应的网络地址匹配。若匹配，则把分组进行直接交付（当然还需要把  $D$  转换成物理地址，把数据报封装成帧发送出去），转发任务结束。否则就是间接交付，执行(3)。
- (3) 若路由表中有目的地址为  $D$  的特定主机路由，则把数据报传送给路由表中所指明的下一跳路由器；否则，执行(4)。
- (4) 对路由表中的每一行（目的网络地址，子网掩码，下一跳地址），用其中的子网掩码和  $D$  逐位相“与”（AND 操作），其结果为  $N$ 。若  $N$  与该行的目的网络地址匹配，则把数据报传送给该行指明的下一跳路由器；否则，执行(5)。
- (5) 若路由表中有一个默认路由，则把数据报传送给路由表中所指明的默认路由器；否则，执行(6)。
- (6) 报告转发分组出错。

## 10. 无分类编址CIDR

消除ABC类地址和划分子网的概念 使用网络前缀 无分类两级编址

{<网络前缀>,<主机号>}

斜线记法

128.14.35.7/20 = 10000000 00001110 00100011 00000111

网络前缀相同的最为CIDR地址块

32位地址掩码

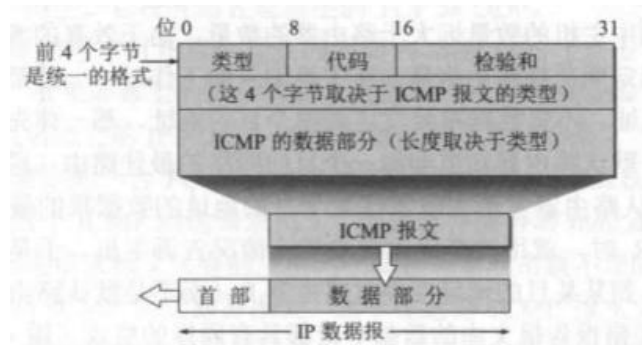
路由聚合 构成超网

最长前缀匹配 在路由匹配中选择具有最长网络前缀的路由

## 11. 路由表查找

二叉线索 先找出唯一前缀

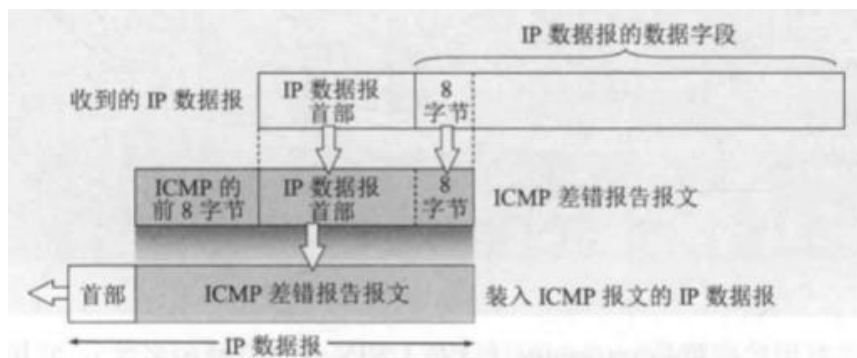
## 12. ICMP 网际控制报文协议



报文种类

ICMP 报文种类	类型的值	ICMP 报文的类型
差错报告报文	3	终点不可达
	11	时间超过
	12	参数问题
	5	改变路由(Redirect)
询问报文	8 或 0	回送(Echo)请求或回答
	13 或 14	时间戳(Timestamp)请求或回答

差错报文格式



不应该发送ICMP差错报文的情况

- 对 ICMP 差错报告报文，不再发送 ICMP 差错报告报文。
- 对第一个分片的数据报片的所有后续数据报片，都不发送 ICMP 差错报告报文。
- 对具有多播地址的数据报，都不发送 ICMP 差错报告报文。
- 对具有特殊地址（如 127.0.0.0 或 0.0.0.0）的数据报，不发送 ICMP 差错报告报文。

### 13. ICMP应用

分组网间监测PING 没有通过运输层TCP或UDP

Traceroute/Tracert 追踪路径

经过路由器数量 —— 花费时间 有关但是不绝对 因为拥塞程度随时变化

### 14. 路由算法选择

静态路由选择策略 非自适应路由选择

动态路由选择策略 自适应路由选择

**自治系统 AS**

**路由选择协议**

内部网关协议IGP RIP和OSPF协议

外部网关协议EGP BGP-4 边界网关协议

**域间路由选择** 自治系统之间的路由选择

**域内路由选择** 自治系统内部的路由选择

### 15. 内部网关协议 RIP 实现简单 开销小

基于距离向量的路由选择协议 适用于小型互联网

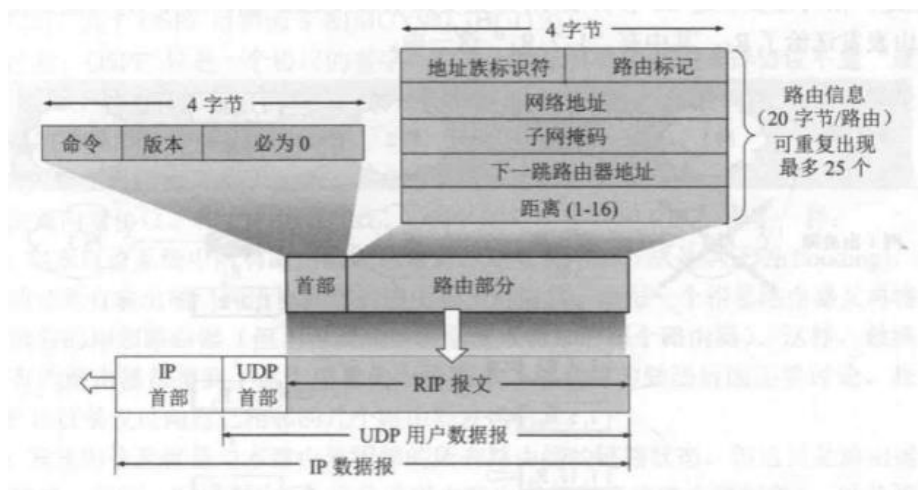
距离：跳数

- 1) 仅和相邻路由器交换信息
- 2) 交换路由表 即为本路由器知道的所有信息
- 3) 按固定时间间隔交换路由信息

距离向量算法：弗洛伊德算法

超过3min没有收到相邻路由器更新 记为不可达 距离16

报文格式



运输层 使用UDP 端口520

路由信息需要20字节

一个RIP报文最多包括25个路由

RIP最大长度为 $4 + 20 \times 25 = 504$ 字节

**问题：**网络出现故障 传递信息过慢

**好消息传的快 坏消息传的慢**

## 16. OSPF协议