计算机网络

Computer Network

10

# IP编址和报文

理论课程

厦門大學

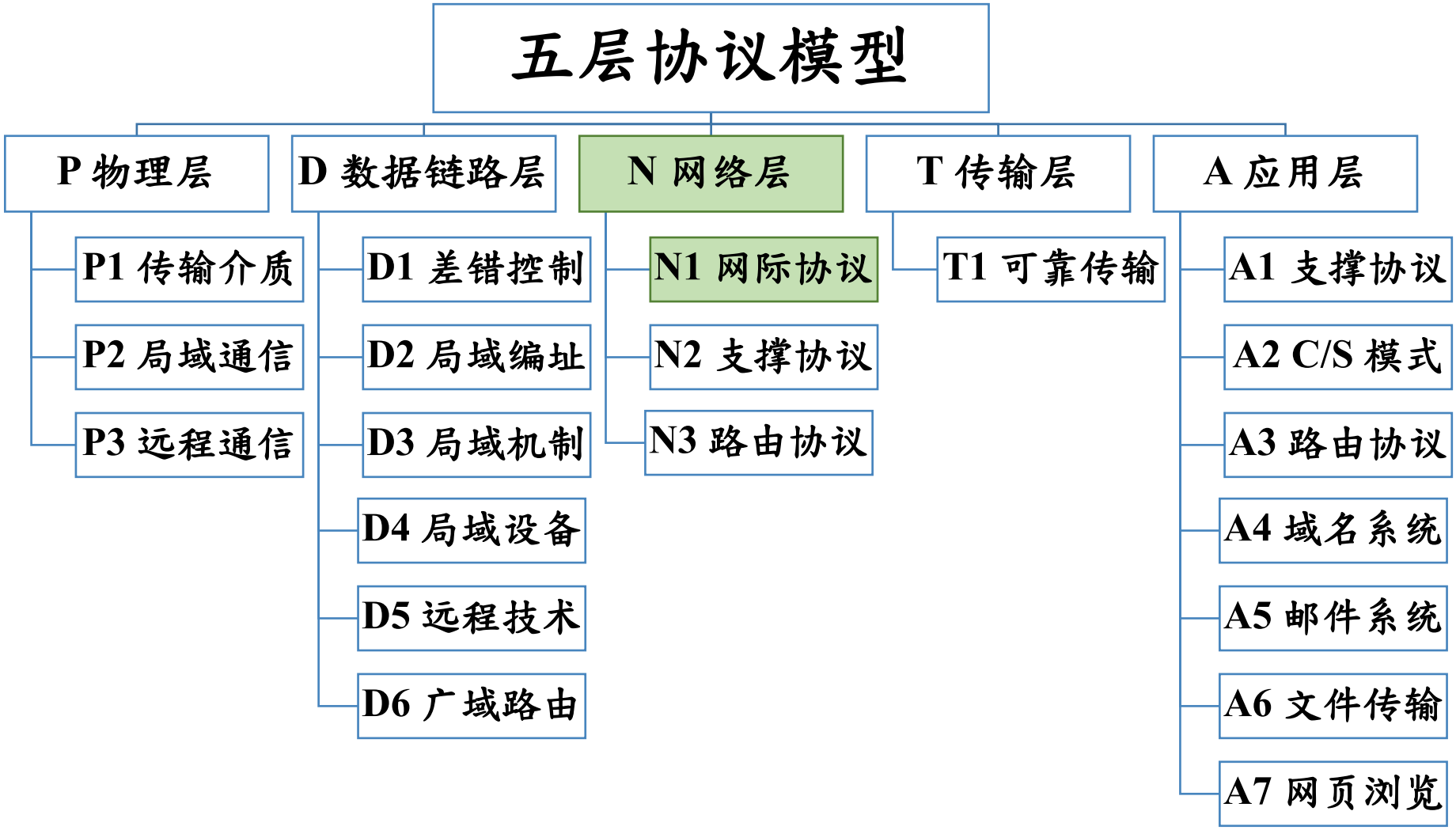
XIAMEN UNIVERSITY

信息学院 黄 炜

（国家示范性软件学院） 博士，副教授

School of Informatics Dr. Wei Huang

# 知识框架


五层协议模型
P 物理层
D 数据链路层
N 网络层
T 传输层
A 应用层
P1 传输介质
P2 局域通信
P3 远程通信
D1 差错控制
D2 局域编址
D3 局域机制
D4 局域设备
D5 远程技术
D6 广域路由
N1 网际协议
N2 支撑协议
N3 路由协议
T1 可靠传输
A1 支撑协议
A2 C/S 模式
A3 路由协议
A4 域名系统
A5 邮件系统
A6 文件传输
A7 网页浏览

# 主要内容

- 世界互联的概念和结构、虚拟网络
- IP（互联网协议）
  - IP编址方案、点分十进制表示法、CIDR表示法
  - 有类地址、无类地址
  - 子网划分（原则）、子网掩码
  - 特殊IP地址
- IP数据报的报头格式：组成和作用（不要求顺序）

# 主要内容

- IP数据报和数据报转发
  - IP路由表和路由转发的原理
- IP封装、分段与重组
  - IP封装：报文跨互联网传输时的数据链路层行为
  - MTU、IP分段与重组

# 对应课本章节

- **PART IV Internetworking**
  - **Chapter 20 Internetworking: Concepts, Architecture, and Protocols**
  - **Chapter 21 IP: Internet Addressing**
  - **Chapter 22 Datagram Forwarding**

# 内容纲要

# 世界互联的动机

- 世界互联的困难
  - 底层网络（机制、帧格式）、主机性能各异
- 统一网络技术 还是 多个网络技术、统一网络服务？
  - 网络间的不兼容使得仅通过导线连接不同网络是不可能的
- 网络互联（ Internetworking ）
  - 由此产生的连通物理网络的系统称为互联网（ internetwork ，或者小写 internet ）
  - 当前正在使用的互联网络：因特网（ 首字母大写 Internet ）

# 路由

- 路由（Routing）
  - 为单网络中、多网络间或跨多网络的流量选择路径的过程。
    - 两个局域网；局域网和广域网；或两个广域网
  - 广义上，路由在许多类型的网络中执行，包括：
    - 电路交换网络，例如公共交换电话网（PSTN）。
    - 计算机网络，例如因特网。
  - 狭义上，路由通常指IP路由。
  - 路由：大型网络中的结构化寻址
  - 桥接：局域网中的非结构化寻址

# 路由器

- 路由器（ Router ）
  - 路由器是在计算机网络之间转发数据包的网络设备。
- 网关（Gateway）
  - 允许数据从一个离散网络流向另一个离散网络的网络硬件。
  - 被配置来执行网关任务的计算机或计算机程序。
- 在RFC文档中，路由器和网关是同一个概念。
- 包含：处理器和内存以及所连接网络的单独I/O接口

# 虚拟网络

- 互联网提供了表面上单一的无缝通信系统
- 硬件和软件的结合提供了一个统一的网络系统的错觉
  - 互联网软件隐藏细节物理网络连接物理地址路由信息
  - 应用不需要知道底层物理硬件或路由器的存在

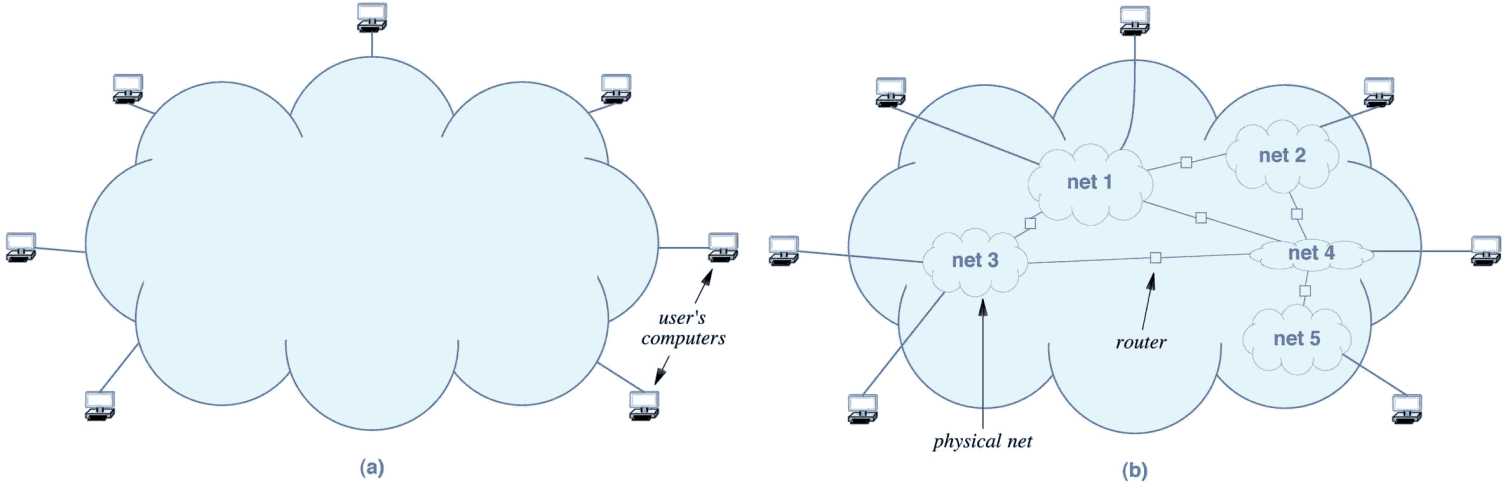



**Figure 20.3** The Internet concept. (a) The illusion of a single network provided to users and applications, and (b) the underlying physical structure with routers interconnecting networks.

# Internet协议（IP）

- Internet协议（ Internet Protocol ）
  - 协议族中用于跨网络边界中继数据报的主要通信协议。
- 版本
  - 实验版本：IPv0～IPv3；历史版本：IPv5，IPv8
  - 第一个主要版本：IPv4；继任版本：IPv6
  - 愚人节笑话（1994）版：IPv9；保留版本：IPv15

# 内容纲要

# 虚拟互联网的地址：从硬件到软件

- 因特网是由设计师想象的完全由协议软件实现的
  - 物理层：异构网络的编址“各自为政”
  - 软件层：需要一个编址来隐藏异构的物理细节
- 与物理层独立、统一的编址

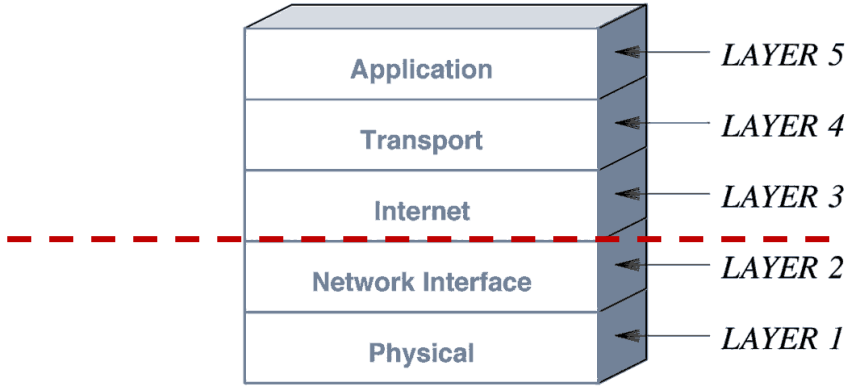



**Figure 1.1** The layering model used with the Internet protocols (TCP/IP).

# IP地址（IPv4地址）

- Internet协议地址（IP地址）
  - 分配给连接到使用IP协议进行通信的每个设备的数字标签。
  - 主要功能：主机或网络接口标识；位置寻址
- 地址所有权
  - 互联网名称与数字地址分配公司（ICANN）是处理地址分配和裁决争端的机构
    - ICANN授权注册商分配个人前缀
    - ISP向用户提供地址获取前缀（公司通常与ISP联系）

# IP地址编址

- 点分十进制记数法（Dotted decimal notation）
  - 每8位作为无符号十进制值（0~255）并用点分隔
- IP地址（或互联网地址）：全球唯一的32位数字
  - 网络号，标识主机附加的物理网络，全球协调
  - 主机号，标识网络上的特定计算机，局域网内协调

二进制：11000000 00000101 00110000 00000011

十进制： 192 . 5 . 48 . 3

# IP地址编址方法

- 分类IP地址（1981～1993）
  - 将IP地址空间分为5大类，是最基本的编址方法。
- 子网划分（1985～）
  - 主机号的部分位用于表示子网号，对分类地址方法的改进。
- 无分类IP地址（1993～）
  - 灵活调整网络大小。

# 传统分类地址：ABCDE类

- 机制：根据最前的位内容来确定具体属于哪一类
- 存续时间：1981-1993

| 类 | 位前缀 | 网络位 | 主机位 | 网络容量 | 网络中主机容量 | 起始地址 | 结束地址 | 子网掩码 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| A | 0 | 8 | 24 | 128 ($2^7$) | 16,777,216 ($2^{24}$) | 0.0.0.0 | 127.255.255.255 | 255.0.0.0 |
| B | 10 | 16 | 16 | 16,384 ($2^{14}$) | 65,536 ($2^{16}$) | 128.0.0.0 | 191.255.255.255 | 255.255.0.0 |
| C | 110 | 24 | 8 | 2,097,152 ($2^{21}$) | 256 ($2^8$) | 192.0.0.0 | 223.255.255.255 | 255.255.255.0 |
| D | 1110 | | | 多播地址 | | 224.0.0.0 | 239.255.255.255 | 无 |
| E | 1111 | | | 保留地址 | | 240.0.0.0 | 255.255.255.255 | 无 |

# 特殊的IP 地址

- 主机号全0代表网络，主机号全1代表广播
- 一些IP地址是保留的，不分配给主机

| 名词 | 英文名词 | 规则 | 示例 |
| --- | --- | --- | --- |
| 网络地址 | Network address | 主机号全0 | 59.0.0.0 |
| 直接广播地址 | Directed Broadcast Address | 主机号全1 | 59.255.255.255 |
| 有限广播地址 | Limited Broadcast Address | 地址全1 | 255.255.255.255 |
| 本机地址 | This Computer address | 全0 | 0.0.0.0 |
| 回送地址 | Loopback address | 127.0.0.0/8 | 127.0.0.1 |

# 地址掩码（Address Masks）

- 地址掩码指示IP地址中主机所在子网地址的位掩码
- 由连续的$N$位1和连续的$32-N$位0构成，共有33种
- 作用：求取网络地址（网络号）

$$N = (D \,\&\, M)$$

| 名称 | 变名 | 二进制表示 | | | | 点分十进制表示 |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 网络地址 | $N$ | 10000000 | 00001010 | 00000000 | 00000000 | 128.10.0.0 |
| 网络掩码 | $M$ | 11111111 | 11111111 | 00000000 | 00000000 | 255.255.0.0 |
| 目标地址 | $D$ | 10000000 | 00001010 | 00000010 | 00000011 | 128.10.2.3 |

# 无类域间路由（CIDR）表示法

- 无类域间路由（Classless Inter-Domain Routing ）
  - 用于分配地址与路由汇总时表示地址块
  - 形式：网络号/网络号长度 ddd.ddd.ddd.ddd/m
    - d为网络号，m为掩码中1的个数（不一定是8的倍数）
    - 示例：192.5.48.64/26（正确）；192.168.1.1/24（错误）

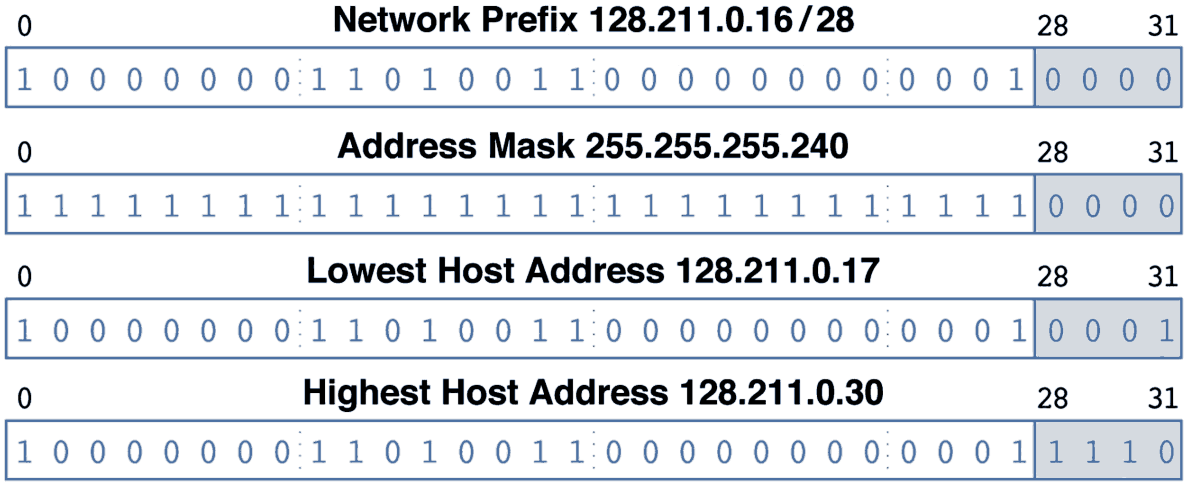
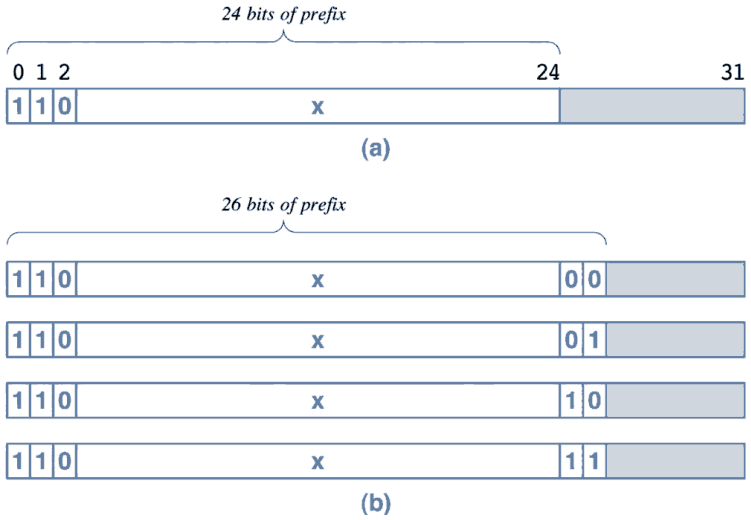



**Figure 21.6** Illustration of CIDR addressing for an example /28 prefix.

# 内容纲要

# 子网划分

- 在 ARPANET 的早期，IP 地址的设计确实不够合理。
  - IP 地址空间利用率有时很低。
  - 每个物理网络分配一个网络号会使路由表太大从而网络性能变坏

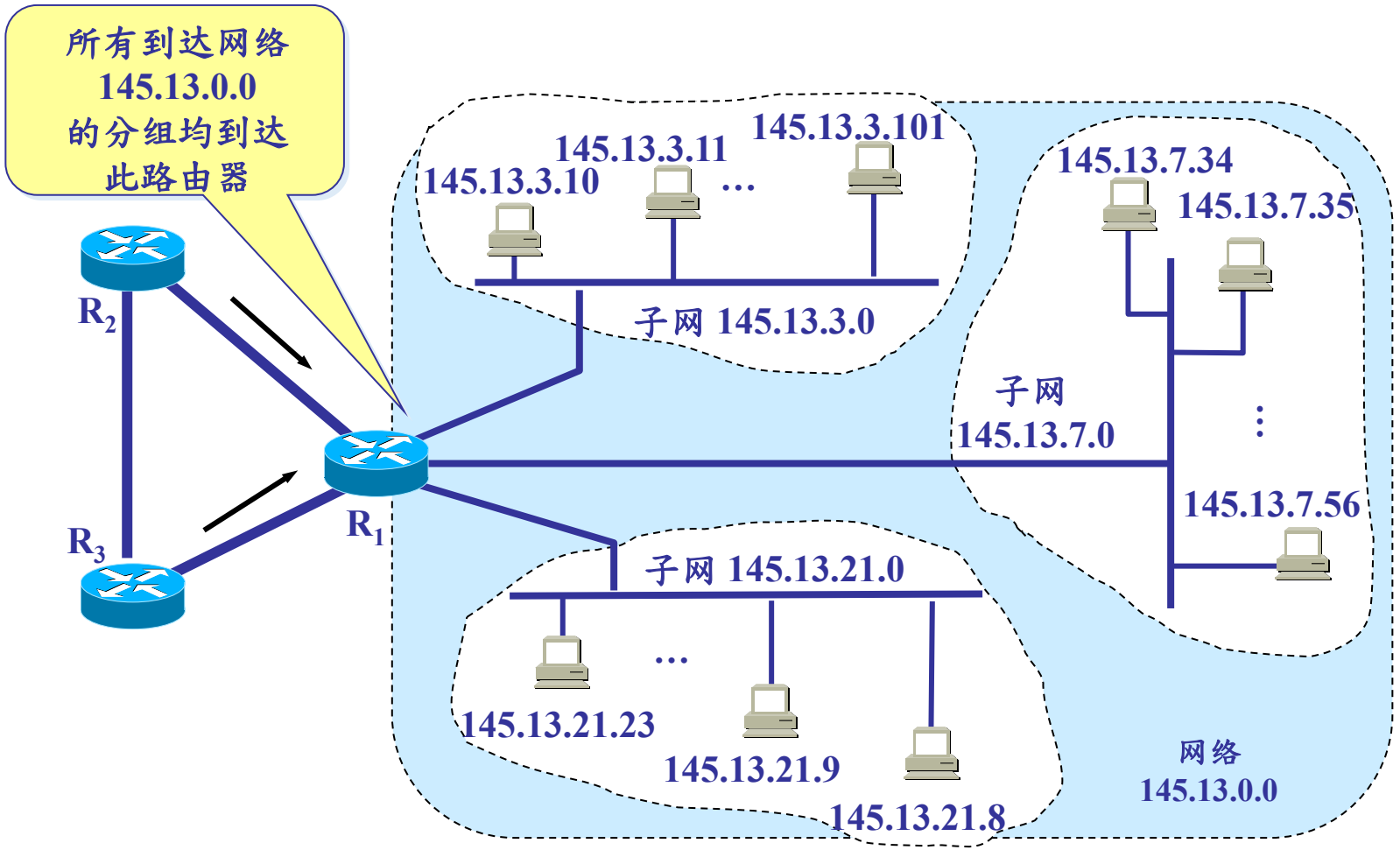



- 两级 IP 地址变为三级 IP 地址
  - 1985 年起增加 “子网号字段”
  - 将网络进一步划分成子网，可以便于管理
  - 从主机号借若干位作为子网号，主机号相应减少位
    - IP地址 ::= {<网络号>, <子网号>, <主机号>}

# 划分子网的基本思路

- 划分子网是单位内部事务，单位对外仍然表现为没有划分子网的网络。
  - 从一个 IP 数据报的首部并无法判断源主机或目的主机所连接的网络是否进行了子网划分。
- 从其他网络发送给本单位某个主机的 IP 数据报，仍根据其目的网络号，找到本单位的路由器。
- 此路由器收到数据报后，提取子网号找到目的子网。
- 最后将 IP 数据报直接交付目的主机。

# 划分子网的基本思路


所有到达网络
145.13.0.0
的分组均到达
此路由器
R2
R3
R1
145.13.3.10
145.13.3.11
…
145.13.3.101
子网 145.13.3.0
145.13.7.34
145.13.7.35
子网
145.13.7.0
145.13.7.56
子网 145.13.21.0
…
145.13.21.23
145.13.21.9
145.13.21.8
网络
145.13.0.0

# 子网掩码（subnet mask）

- 分组转发算法必须做相应的改动
  - 路由器在和相邻路由器交换路由信息时，必须把自己所在网络（或子网）的子网掩码告诉相邻路由器。
  - 路由器的路由表中的每一个项目，除了要给出目的网络地址外，还必须同时给出该网络的子网掩码。
  - 若一个路由器连接在两个子网上就拥有两个网络地址和两个子网掩码。
- 使用子网掩码可以找出 IP 地址中的子网部分。
- 子网划分应剔除主机号或网络号全0全1两种情形
  - RFC 1878 废止：现代软件将能够利用所有可定义的网络。

# 路由器与IP寻址原理

- 每个路由器有两个或多个IP地址
  - 路由器与多个物理网络有连接，每个IP地址包含特定网络的前缀
- IP地址不标识特定计算机
  - 标识计算机和网络之间的连接
  - 多个网络连接的计算机必须为每个连接分配一个IP地址

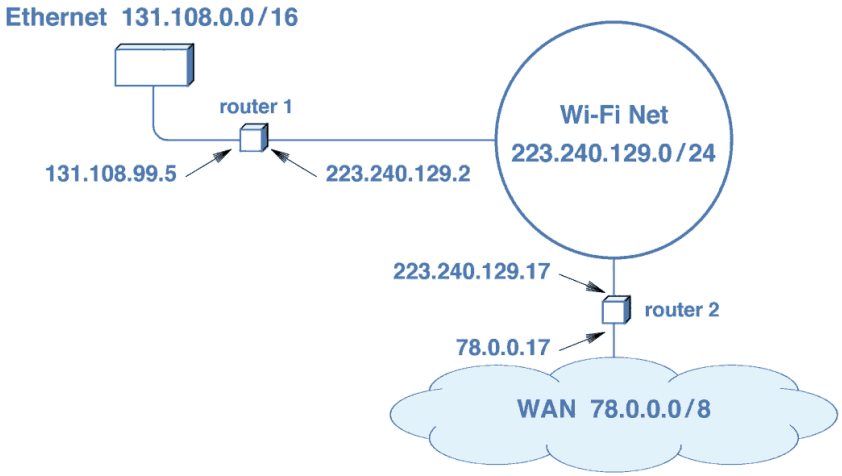



**Figure 21.8** An example of IP addresses assigned to two routers.

# 多穴主机（Multi-Homed Hosts）

- 多穴有时用于提高可靠性
  - 如果一个网络失效，主机仍可以通过第二连接到达互联网
  - 连接到多个网络可以直接发送流量，避开拥塞的路由器
- 多宿主主机有多个IP地址，每个网络连接一个地址
  - 有多重连接的原因：负载平衡和速度冗余提高网络可靠性

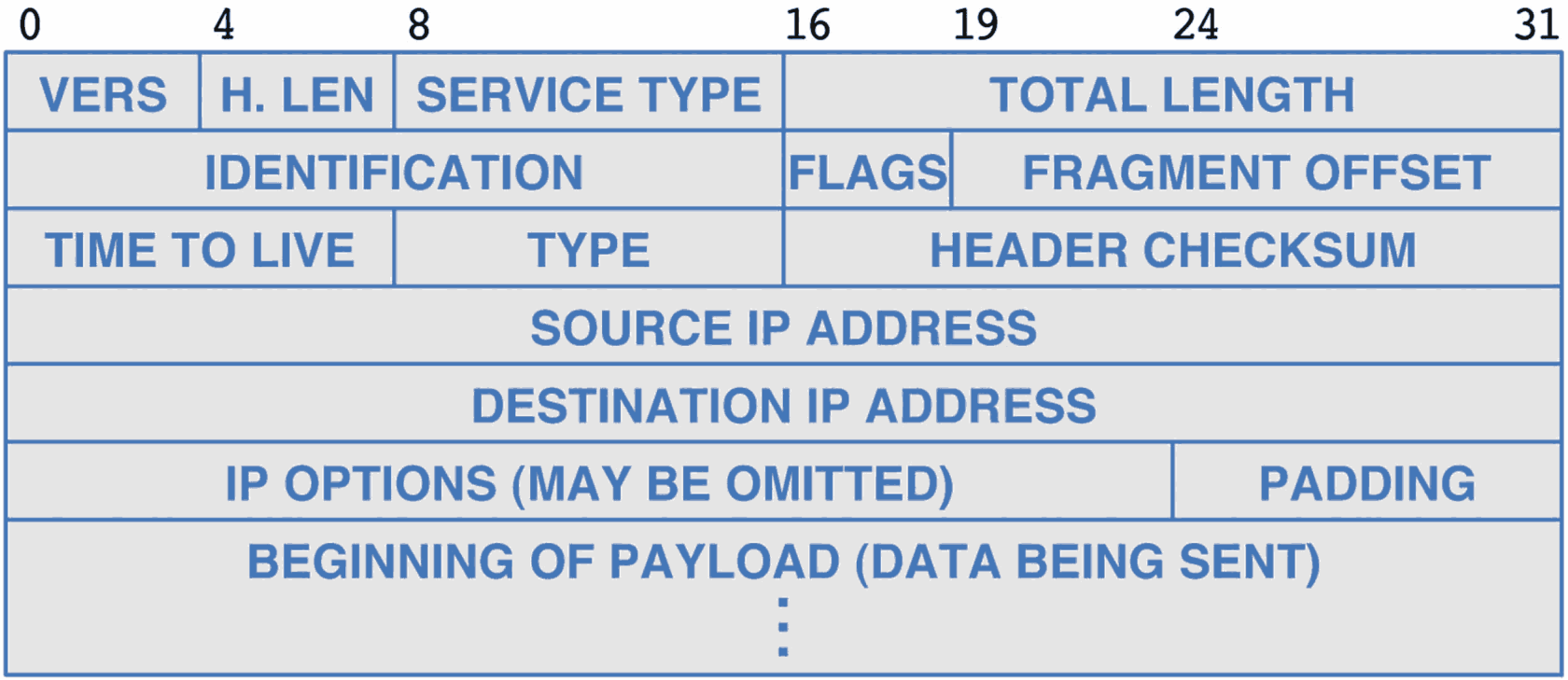
# 内容纲要

# 虚拟分组（ Virtual Packet ）

- 网络互联协议定义独立于底层硬件的“分组”格式
  - 为解决异构问题，其结果是一个通用的，虚拟的数据包。
- 底层硬件不理解，路由器和主机（软件）理解
  - 底层硬件不理解或不识别Internet包格式。
  - 因特网中每个主机或路由器都包含理解因特网数据包的协议软件。
- IP数据报（datagram）是Internet数据分组的术语。

# IP数据报（ IP Datagram ）

- IPv4数据报总长（包括头部）为20B至64KB。



# IP报文头格式

- IP报文头格式的组成（基本长度：20B）
  - 版本：4bits，取值：4或6
  - 报头长度：4bits，单位为4Bytes
  - 服务类型：8bits，未实际使用
  - 报文总长度：16bits，单位为字节
  - 标识：16bits，IP软件在存储器中的计数器在产生一个数据报后自增1，并将值赋给标识字段。标识在分片时复制。
  - 分片标志：3bits，高到低位：无意义、不分片、还有分片
  - 片偏移：13bits，分片在原始报文的位置，单位为8Bytes

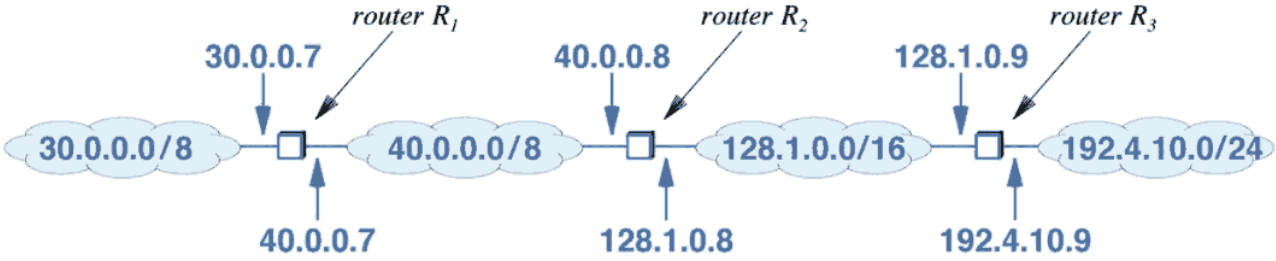
# IP报文头格式

- IP报文头格式的组成（基本长度：20B）
  - 生存时间（TTL）：8bits，单位为秒，路由器减去在其环节所消耗时间，直至零丢弃。
  - 协议类型：8bits，可能的取值有：ICMP、IGMP、TCP、UDP、OSPF等，用于将数据交给第四层的哪个软件。
  - 报头校验和：16bits，检验报头的完整性，不含数据部分。
  - 源IP地址：32bits
  - 目标IP地址：32bits
  - 选项内容： 1～40bits，用来支持排错、测量和安全等措施。
  - 填充部分：长度可变，为了使报文头部是4Bytes的整数倍。

# 内容纲要

# 路由：转发IP报文

- 路由表的组成：目标网络号、子网掩码、下一跳
  - 下一跳：直接传送标志、子网IP地址
  - 默认路由：0.0.0.0/0




(a)

| Destination | Mask | Next Hop |
|---|---|---|
| 30.0.0.0 | 255.0.0.0 | 40.0.0.7 |
| 40.0.0.0 | 255.0.0.0 | deliver direct |
| 128.1.0.0 | 255.255.0.0 | deliver direct |
| 192.4.10.0 | 255.255.255.0 | 128.1.0.9 |

(b)

# IP子网掩码与数据转发

- 通过子网掩码进行计算的路由表匹配
  - 获得IP报文的目标IP地址D
  - 用D顺序逐条匹配路由表各个条目T[0]，T[1]，T[2]
  - 如果 D & T[i].m == T[i].d ，则下一跳为T[i].n
    - D ：目标端地址
    - T[i] ：路由表中第 *i* 条目标
    - d 子网网络号；m ：子网掩码；n ：下一跳IP地址
- 最长前缀匹配（ Longest Prefix Match ）
  - 设路由表有以下两个网络前缀：128.10.0.0/16; 128.10.2.0/24
  - 对于报文的IP地址128.10.2.3，选择128.10.2.0/24

# 内容纲要

# 尽力而为的传输

- IP要适应不同硬件的需要，但底层硬件可能不起作用
- IP提供一种尽力而为的传输 (Best-Effort Delivery)
  - IP数据报可能会丢失、重复、延迟、乱序，或数据损坏。
  - 需要高层协议软件来处理上述每一个错误

# 数据报传输与帧

- IP 软件选择下一站，并通过物理网络发送
  - 网络硬件不理解数据报文格式和因特网地址
    - 每个网络格式都有自己的硬件地址
  - 发送方和接收方必须就帧型字段中所使用的值协商一致。
- 发送者必须指定下一接收主机的物理地址
- 封装（ Encapsulation ）

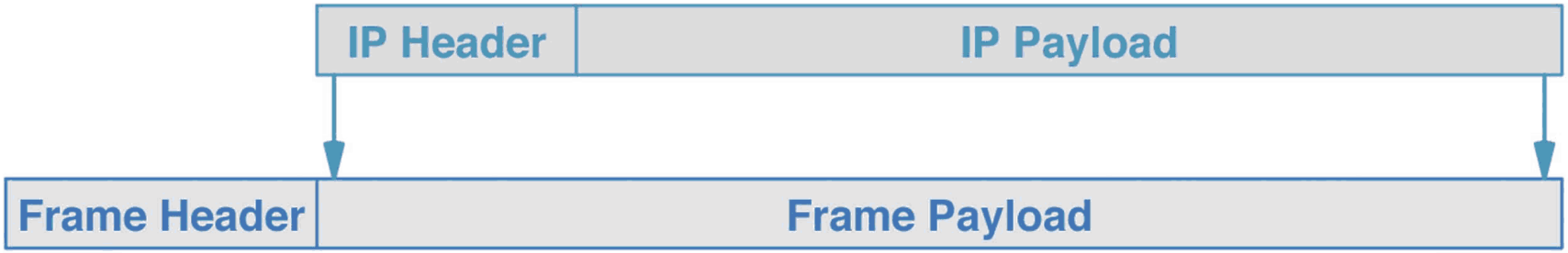
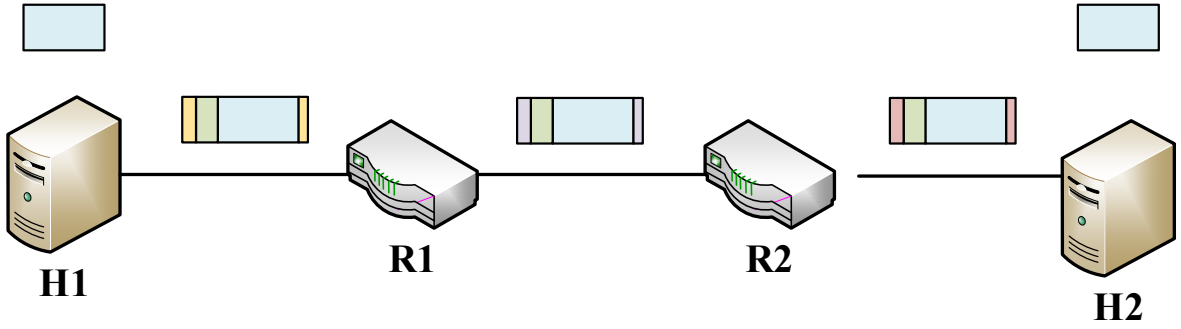



**Figure 22.4** Illustration of an IP datagram encapsulated in a frame.

# 跨互联网传输

- 帧到达下一跳，接收方软件提取IP数据报并丢弃帧头
  - 若还需转发，则再封装
  - 帧头部不积累，主机和路由器不存储额外的头部




| 项目 | 值（H1-R1） | 值（R1-R2） | 值（R2-H2） |
|---|---|---|---|
| 源MAC | MAC(H1) | MAC(R1,R) | MAC(R2,R) |
| 目的MAC | MAC(R1,L) | MAC(R2,L) | MAC(H2) |
| 源IP | IP(H1) | IP(H1) | IP(H1) |
| 目的IP | IP(H2) | IP(H2) | IP(H2) |

# 最大传输单元（MTU）

- 最大传输单元：数据链路层帧支持的最大传输字节数
- 当前链路MTU小于IP报文长时，分成较小分片传输
  - 路由器将数据报分成更小的碎片称为分片。
  - 原始数据报首部被复制为各数据报片的首部，但必须修改有关字段的值。
  - 每个分片以IP数据报格式独立发送。

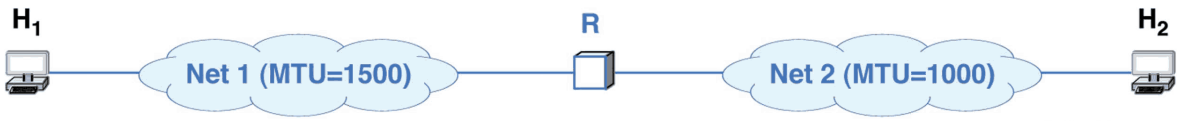
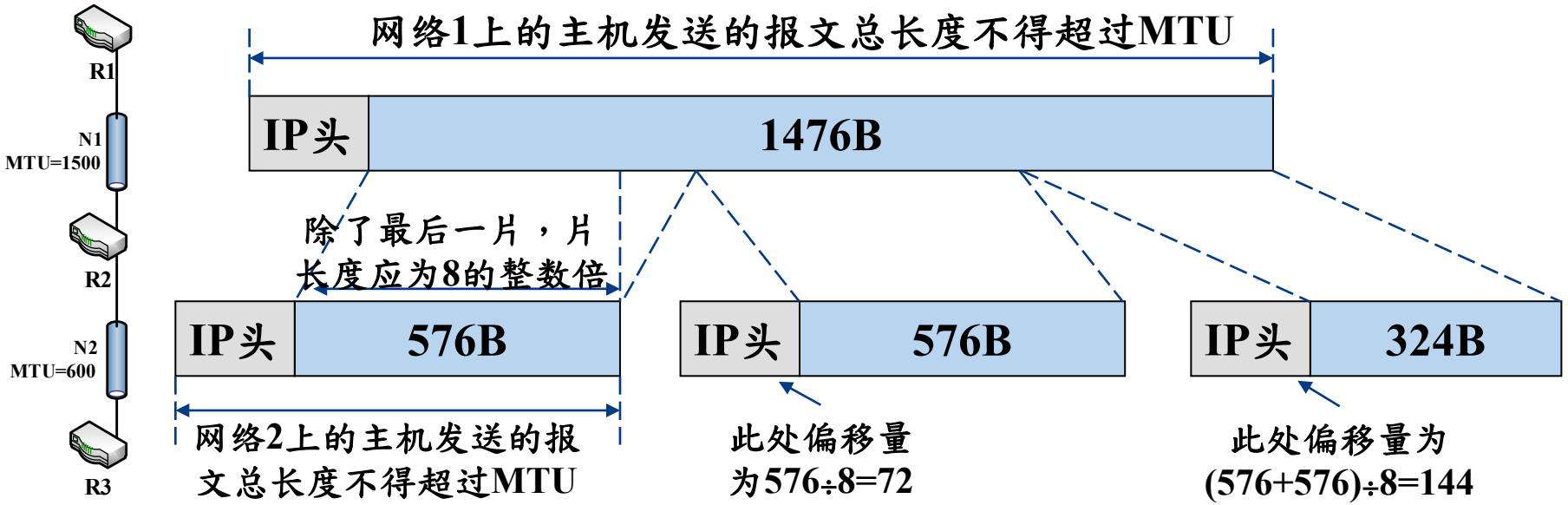



**Figure 22.6** Illustration of a router that connects two networks with different MTUs.

| Protocol | MTU |
|---|---|
| Token ring (16Mbps) | 17914 |
| Token ring (4Mbps) | 4464 |
| FDDI | 4352 |
| Ethernet | 1500 |
| X.25 | 576 |
| PPP | 296 |

# IP报文的分片策略

- IP报文传输的分片原则
  - 各片尽可能大，尽量少分片，但每片不能超过MTU
  - IP头部固有长度（基本长度20字节），也在帧的载荷内
  - 分片应使得后续片偏移量为8的整数倍

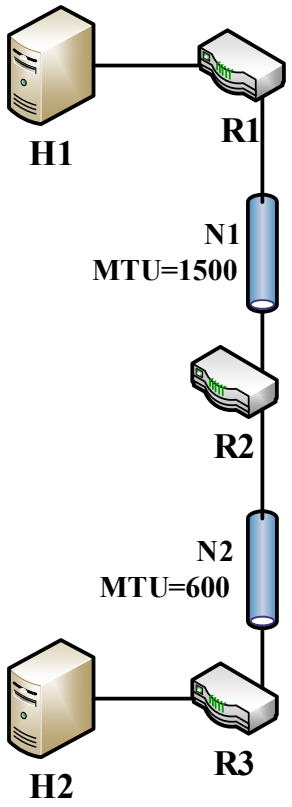


# 分片信息表示

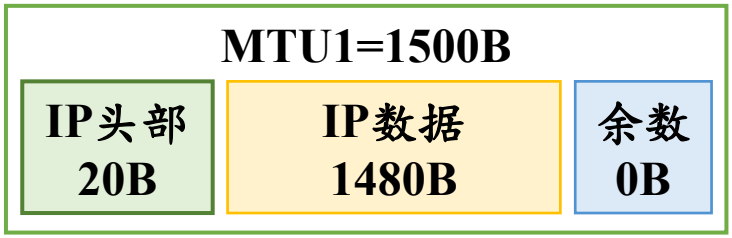
- IP报文中的相关信息
  - IP报文中的ID：分片时复制，始终保持初始ID不变
  - 标志位：若第一次分片，则修改“是否分片”相应位
  - 片偏移量：表示当前分片在初始IP包中有效数据的偏移位置（8字节为单位）
    - 标志 MF(more fragment), MF=1 表示后面还有分片；MF=0 表示这是最后一个分片；DF(don’t fragment), DF=1 表示不允许分片；DF=0 表示允许分片。

# IP报文的分片策略

- 例题：某主机H1上的IP数据报文长度为3820字节（含固定报文头20字节），发送给主机H2。途经网络N1、N2的MTU如右图所示，请写出其在N1和N2上的分片情况，DF=0。



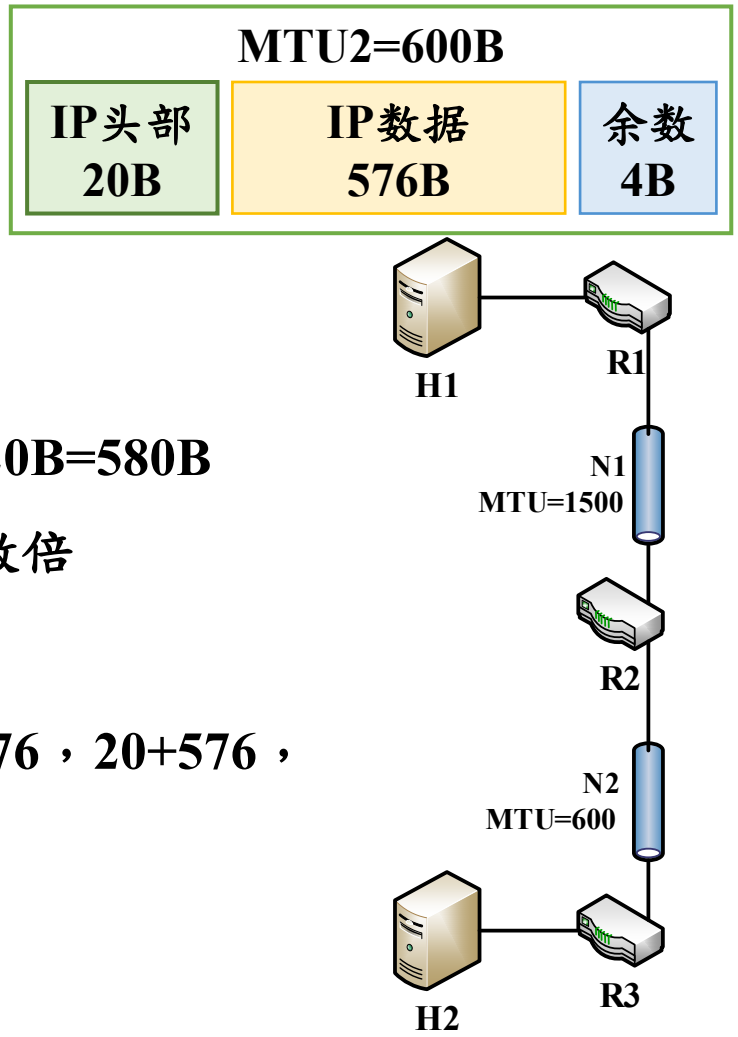

- 解：
  - R1对报文的分片




    - 分片的数据总长度应为3820B－头部20B=3800B
    - 每片数据长度不超过MTU－头部20B=1480B
    - 除最后一片其余各片应为8B的整数倍

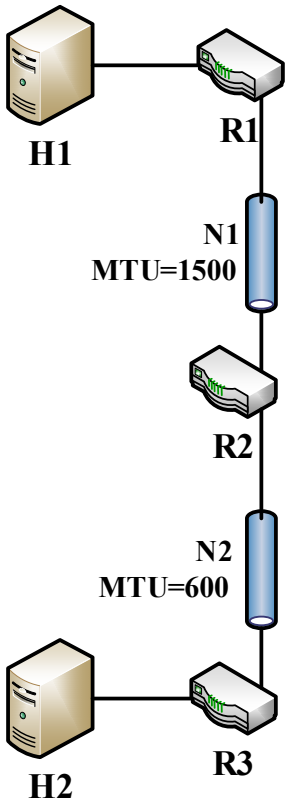
# IP报文的分片策略

- R1对报文的分片结果
  - 20+1480，20+1480，20+840
- R2对报文的分片情况
  - 分片不重组，分片再分片
  - 每片数据长度不超过MTU－头部20B=580B
  - 除最后一片其余各片应为8B的整数倍
- R2对报文的分片结果
  - 20+576，20+576，20+328， 20+576，20+576，20+328， 20+576，20+264



# IP报文的分片策略

- 答案




| 类别 | 序号 | 总长度 | 数据长度 | MF | 片偏移 |
|---|---|---|---|---|---|
| 原数据报 | 1 | 3820 | 3800 | 0 | 0 |
| R1发给R2（在N1）的数据报 | 1 | 1500 | 1480 | 1 | 0 |
| | 2 | 1500 | 1480 | 1 | 185 |
| | 3 | 860 | 840 | 0 | 370 |
| R2发给R3（在N2）的数据报 | 1 | 596 | 576 | 1 | 0 |
| | 2 | 596 | 576 | 1 | 72 |
| | 3 | 348 | 328 | 1 | 144 |
| | 4 | 596 | 576 | 1 | 185 |
| | 5 | 596 | 576 | 1 | 257 |
| | 6 | 348 | 328 | 1 | 329 |
| | 7 | 596 | 576 | 1 | 370 |
| | 8 | 284 | 264 | 0 | 442 |

# 重组（ Reassembly ）

- 报文重组策略
  - 源端到目标端数据传输过程中可能有多次分片
  - 所有分片重组在目标端进行，中间路由设备不做分片重组
    - 减少中间节点的数据处理过程
  - 碎片还可以再分片(further fragment a fragment)

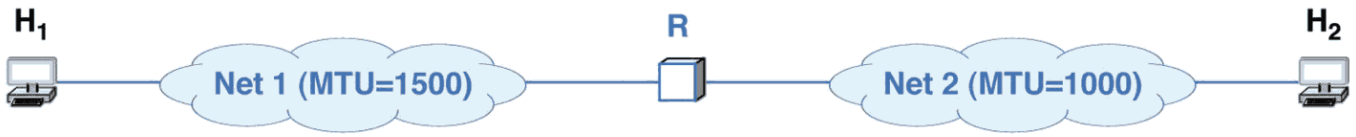



**Figure 22.6** Illustration of a router that connects two networks with different MTUs.

# IP报文丢失问题

- IP报文丢失判断
  - 目标端对IP报文分片作重组处理的时候进行丢失判断
  - 对应于源端发出的每一个报文，在收到第一个分片的时候，给出一个等待的有限时间T-out，如果T-out之后还没有收到全部分片，则为超时
  - 任何一个分片丢失或数据出错，则丢弃整个报文

计算机网络

Computer Network

10

# 谢谢观看

理论课程

厦門大學

XIAMEN UNIVERSITY

信息学院 黄 炜

（国家示范性软件学院） 博士，副教授

School of Informatics Dr. Wei Huang