

第5步中 DHCP ACK 返回的 DNS 服务器地址) 和源 IP 地址 68.85.2.101 的 IP 数据报中。

9) Bob 便携机则将包含 DNS 请求报文的数据报放入一个以太网帧中。该帧将发送(在链路层寻址)到 Bob 学校网络中的网关路由器。然而,即使 Bob 便携机经过上述第5步中的 DHCP ACK 报文知道了学校网关路由器的 IP 地址(68.85.2.1),但仍不知道该网关路由器的 MAC 地址。为了获得该网关路由器的 MAC 地址, Bob 便携机将需要使用 ARP 协议(6.4.1 节)。

10) Bob 便携机生成一个具有目的 IP 地址 68.85.2.1 (默认网关)的 ARP 查询报文,将该 ARP 报文放置在一个具有广播目的地址 (FF:FF:FF:FF:FF:FF) 的以太网帧中,并向交换机发送该以太网帧,交换机将该帧交付给所有连接的设备,包括网关路由器。

11) 网关路由器在通往学校网络的接口上接收到包含该 ARP 查询报文的帧,发现在 ARP 报文中目标 IP 地址 68.85.2.1 匹配其接口的 IP 地址。网关路由器因此准备一个 ARP 回答,指示它的 MAC 地址 00:22:6B:45:1F:1B 对应 IP 地址 68.85.2.1。它将 ARP 回答放在一个以太网帧中,其目的地址为 00:16:D3:23:68:8A (Bob 便携机),并向交换机发送该帧,再由交换机将帧交付给 Bob 便携机。

12) Bob 便携机接收包含 ARP 回答报文的帧,并从 ARP 回答报文中抽取网关路由器的 MAC 地址 (00:22:6B:45:1F:1B)。

13) Bob 便携机现在(最终!)能够使包含 DNS 查询的以太网帧寻址到网关路由器的 MAC 地址。注意到在该帧中的 IP 数据报具有 IP 目的地址 68.87.71.226 (DNS 服务器),而该帧具有目的地址 00:22:6B:45:1F:1B (网关路由器)。Bob 便携机向交换机发送该帧,交换机将该帧交付给网关路由器。

6.7.3 仍在准备: 域内路由选择到 DNS 服务器

14) 网关路由器接收该帧并抽取包含 DNS 查询的 IP 数据报。路由器查找该数据报的目的地址 (68.87.71.226),并根据其转发表决定该数据报应当发送到图 6-32 的 Comcast 网络中最左边的路由器。IP 数据报放置在链路层帧中,该链路适合将学校路由器连接到最左边 Comcast 路由器,并且该帧经这条链路发送。

15) 在 Comcast 网络中最左边的路由器接收到该帧,抽取 IP 数据报,检查该数据报的目的地址 (68.87.71.226),并根据其转发表确定出接口,经过该接口朝着 DNS 服务器转发数据报,而转发表已根据 Comcast 的域内协议(如 RIP、OSPF 或 IS-IS, 5.3 节)以及因特网的域间协议 BGP (5.4 节)所填写。

16) 最终包含 DNS 查询的 IP 数据报到达了 DNS 服务器。DNS 服务器抽取出 DNS 查询报文,在它的 DNS 数据库中查找名字 www.google.com (2.4 节),找到包含对应 www.google.com 的 IP 地址 (64.233.169.105) 的 DNS 源记录。(假设它当前缓存在 DNS 服务器中。)前面讲过这种缓存数据源于 google.com 的权威 DNS 服务器 (2.4.2 节)。该 DNS 服务器形成了一个包含这种主机名到 IP 地址映射的 DNS 回答报文,将该 DNS 回答报文放入 UDP 报文段中,该报文段放入寻址到 Bob 便携机 (68.85.2.101) 的 IP 数据报中。该数据报将通过 Comcast 网络反向转发到学校的路由器,并从这里经过以太网交换机到 Bob 便携机。

17) Bob 便携机从 DNS 报文抽取出服务器 www.google.com 的 IP 地址。最终,在大量工作后, Bob 便携机此时准备接触 www.google.com 服务器!

6.7.4 Web 客户 – 服务器交互: TCP 和 HTTP

18) 既然 Bob 便携机有了 `www.google.com` 的 IP 地址, 它能够生成 TCP 套接字 (2.7 节), 该套接字将用于向 `www.google.com` 发送 HTTP GET 报文 (2.2.3 节)。当 Bob 生成 TCP 套接字时, 在 Bob 便携机中的 TCP 必须首先与 `www.google.com` 中的 TCP 执行三次握手 (3.5.6 节)。Bob 便携机因此首先生成一个具有目的端口 80 (针对 HTTP 的) 的 TCP SYN 报文段, 将该 TCP 报文段放置在具有目的 IP 地址 64.233.169.105 (`www.google.com`) 的 IP 数据报中, 将该数据报放置在 MAC 地址为 00:22:6B:45:1F:1B (网关路由器) 的帧中, 并向交换机发送该帧。

19) 在学校网络、Comcast 网络和谷歌网络中的路由器朝着 `www.google.com` 转发包含 TCP SYN 的数据报, 使用每台路由器中的转发表, 如前面步骤 14 ~ 16 那样。前面讲过支配分组经 Comcast 和谷歌网络之间域间链路转发的路由器转发表项, 是由 BGP 协议决定的 (第 5 章)。

20) 最终, 包含 TCP SYN 的数据报到达 `www.google.com`。从数据报抽取出 TCP SYN 报文并分解到与端口 80 相联系的欢迎套接字。对于谷歌 HTTP 服务器和 Bob 便携机之间的 TCP 连接生成一个连接套接字 (2.7 节)。产生一个 TCP SYNACK (3.5.6 节) 报文段, 将其放入向 Bob 便携机寻址的一个数据报中, 最后放入链路层帧中, 该链路适合将 `www.google.com` 连接到其第一跳路由器。

21) 包含 TCP SYNACK 报文段的数据报通过谷歌、Comcast 和学校网络, 最终到达 Bob 便携机的以太网卡。数据报在操作系统中分解到步骤 18 生成的 TCP 套接字, 从而进入连接状态。

22) 借助于 Bob 便携机上的套接字, 现在 (终于!) 准备向 `www.google.com` 发送字节了, Bob 的浏览器生成包含要获取的 URL 的 HTTP GET 报文 (2.2.3 节)。HTTP GET 报文则写入套接字, 其中 GET 报文成为一个 TCP 报文段的载荷。该 TCP 报文段放置进一个数据报中, 并交付到 `www.google.com`, 如前面步骤 18 ~ 20 所述。

23) 在 `www.google.com` 的 HTTP 服务器从 TCP 套接字读取 HTTP GET 报文, 生成一个 HTTP 响应报文 (2.2 节), 将请求的 Web 页内容放入 HTTP 响应体中, 并将报文发送进 TCP 套接字中。

24) 包含 HTTP 回答报文的数据报通过谷歌、Comcast 和学校网络转发, 到达 Bob 便携机。Bob 的 Web 浏览器程序从套接字读取 HTTP 响应, 从 HTTP 响应体中抽取 Web 网页的 html, 并最终 (终于!) 显示了 Web 网页。

上面的场景已经涉及许多网络基础! 如果你已经理解上面例子中的大多数或全部, 则你也已经涵盖了许多基础知识, 因为前面已经学过 1.1 节, 其中我们谈道“本书的大部分内容与计算机网络协议有关”, 并且你也许想知道一个协议实际是什么样子! 上述例子看起来是尽可能详尽, 我们已经忽略了一些可能的附加协议 (例如, 运行在学校网关路由器中的 NAT, 到学校网络的无线接入, 接入学校网络或对报文段或数据报加密的安全协议, 网络管理协议), 以及人们将会在公共因特网中遇到的一些考虑 (Web 缓存, DNS 等级体系)。我们将在本书的第二部分涉及一些这类主题和更多内容。

最后, 我们注意到上述例子是一个综合、完整的例子, 还观察了本书第一部分所学习过的许多协议的十分“具体的细节”。该例子更多地关注“怎样做”而不是“为什么做”。

对于想开阔视野的读者来说，有关网络协议设计更为深思熟虑的一般观点可参见 [Clark 1988; RFC 5218]。

6.8 小结

在这一章中，我们学习了链路层，包括它的服务、支撑它操作的原则和许多重要的特定协议，它们使用这些原则实现了链路层服务。

我们看到链路层的基本服务是将网络层的数据报从一个节点（主机、交换机、路由器，WiFi 接入点）移动到一个相邻的节点。我们看到，在通过链路向相邻节点传输之前，所有链路层协议都是通过将网络层数据报封装在链路层帧中来操作的。然而，除了这个共同的成帧功能之外，我们知道了不同的链路层协议提供截然不同的链路接入、交付和传输服务。造成这些差异的部分原因是链路层协议必须工作在很多种链路类型上。一个简单的点对点链路具有单个发送方和接收方，并通过单一“线路”通信。一个多路访问链路在许多发送方和接收方之间共享；因此，对多路访问信道的链路层协议有一个协调链路接入的协议（它的多路访问协议）。在 MPLS 的情况下，连接两个相邻节点（例如，在 IP 意义上的两台相邻的 IP 路由器，它们是到某个目的地的下一跳 IP 路由器）的“链路”，其本身可能实际上就是一个网络。从某种意义上来说，将一个网络视为一条“链路”的想法没有什么可奇怪的。例如，连接家庭调制解调器/计算机到远端调制解调器/路由器的一条电话链路，实际上是一条穿过精密而复杂的电话网络的路径。

在链路层通信所依据的原理中，我们研究了差错检测和纠正技术、多路访问协议、链路层寻址、虚拟化（VLAN）以及扩展的交换局域网和数据中心网络的构造方法。今天对链路层的许多关注在于这些交换网络。在差错检测/纠正场景中，为了对帧通过链路传输时可能发生的比特翻转进行检测并在某些情况下进行纠正，我们研究了在帧的首部增加附加比特的方法。我们讨论了简单的奇偶校验和校验和方案，以及更健壮的循环冗余检测。然后我们转向多路访问协议主题。我们确定和学习了协调访问广播信道的 3 大类方法：信道划分方法（TDM、FDM）、随机接入方法（ALOHA 协议和 CSMA 协议）和轮流方法（轮询和令牌传递）。我们学习了电缆接入网，发现它使用了多种这些多路访问方法。我们看到让多个节点共享单个广播信道的结果，是需要在链路层提供节点地址。我们知道物理地址和网络层地址是非常不同的，而且在因特网场景中，一个专门的协议（ARP，即地址解析协议）用于在这两种寻址形式之间进行转换，并且详细学习了极为成功的以太网协议。然后我们研究了共享一个广播信道的节点是怎样形成一个局域网的，以及多个局域网怎样能够互联形成一个更大的局域网，即互联这些本地节点完全不需要网络层路由选择的干预。我们也知道了多个虚拟局域网是怎样能够产生一个单一的物理局域网体系结构的。

通过关注当 MPLS 网络互联 IP 路由器时是如何提供链路层服务的和展望今天用于大型数据中心的网络设计，我们结束了链路层的学习。通过识别在获取一个简单的 Web 网页时所需要的许多协议，我们完成了本章（和前 5 章）。在学习了链路层后，我们沿协议栈向下的旅程现在结束了！当然，物理层位于数据链路层之下，但是物理层的细节也许最好留给另外一门课程（例如，在通信理论而不是计算机网络课程中）去学习。然而我们在本章和第 1 章（在 1.2 节中讨论了物理媒体）中已经接触了物理层的几个方面。当我们在下一章中学习无线链路特性时，将再次考虑物理层。

尽管我们沿协议栈向下的旅程已结束，但我们计算机网络的学习仍然没有结束。在后面的 3 章中我们将讨论无线网络、网络安全和多媒体网络。这 3 个主题不便放进任何一层中；实际上每个主题跨越了多个层次。因此理解这些主题（在某些网络教材中被列为高级主题）需要对协议栈所有层次都有坚实的基础，我们对链路层的学习已经完成了这样的基础！

课后习题和问题



复习题

6.1~6.2 节

- R1. 考虑在 6.1.1 节中的运输类比。如果一个乘客类比为数据报，什么类比为链路层帧？
- R2. 如果在因特网中的所有链路都提供可靠的交付服务，TCP 可靠传输服务将是多余的吗？为什么？
- R3. 链路层协议能够向网络层提供哪些可能的服务？在这些链路层服务中，哪些在 IP 中有对应的服务？哪些在 TCP 中有对应的服务？

6.3 节

- R4. 假设两个节点同时经一个速率为 R 的广播信道开始传输一个长度为 L 的分组。用 d_{prop} 表示这两个节点之间的传播时延。如果 $d_{\text{prop}} < L/R$ ，会出现碰撞吗？为什么？
- R5. 在 6.3 节中，我们列出了广播信道的 4 种希望的特性。这些特性中的哪些是时隙 ALOHA 所具有的？令牌传递具有这些特性中的哪些？
- R6. 在 CSMA/CD 中，在第 5 次碰撞后，节点选择 $K=4$ 的概率有多大？结果 $K=4$ 在 10Mbps 以太网上对应于多少秒的时延？
- R7. 使用人类在鸡尾酒会交互的类比来描述轮询和令牌传递协议。
- R8. 如果局域网有很大的周长时，为什么令牌环协议将是低效的？

6.4 节

- R9. MAC 地址空间有多大？IPv4 的地址空间呢？IPv6 的地址空间呢？
- R10. 假设节点 A、B 和 C（通过它们的适配器）都连接到同一个广播局域网上。如果 A 向 B 发送数千个 IP 数据报，每个封装帧都有 B 的 MAC 地址，C 的适配器会处理这些帧吗？如果会，C 的适配器将会把这些帧中的 IP 数据报传递给 C 的网络层吗？如果 A 用 MAC 广播地址来发送这些帧，你的回答将有怎样的变化呢？
- R11. ARP 查询为什么要在广播帧中发送呢？ARP 响应为什么要在一个具有特定目的 MAC 地址的帧中发送呢？
- R12. 对于图 6-19 中的网络，路由器有两个 ARP 模块，每个都有自己的 ARP 表。同样的 MAC 地址可能出现在两张表中都出现吗？
- R13. 比较 10BASE-T、100BASE-T 和吉比特以太网的帧结构。它们有什么不同吗？
- R14. 考虑图 6-15。在 4.3 节的寻址意义下，有多少个子网呢？
- R15. 在一个支持 802.1Q 协议交换机上能够配置的 VLAN 的最大数量是多少？为什么？
- R16. 假设支持 K 个 VLAN 组的 N 台交换机经过一个干线协议连接起来。连接这些交换机需要多少端口？评价你的答案。



习题

- P1. 假设某分组的信息内容是比特模式 1110 0110 1001 1101，并且使用了偶校验方案。在采用二维奇偶校验方案的情况下，包含该检验比特的字段的值是什么？你的回答应该使用最小长度检验和字段。

- P2. 说明（举一个不同于图 6-5 的例子）二维奇偶校验能够纠正和检测单比特差错。说明（举一个例子）某些双比特差错能够被检测但不能纠正。
- P3. 假设某分组的信息部分（图 6-3 中的 D ）包含 10 字节，它由字符串“Networking”的 8 比特无符号二进制 ASCII 表示组成。对该数据计算因特网检验和。
- P4. 考虑前一个习题，但此时假设这 10 字节包含：
- 数字 1 到 10 的二进制表示。
 - 字母 B 到 K（大写）的 ASCII 表示。
 - 字母 b 到 k（小写）的 ASCII 表示。
- 计算这些数据的因特网检验和。
- P5. 考虑 5 比特生成多项式， $G = 10011$ ，并且假设 D 的值为 1010101010。 R 的值是什么？
- P6. 考虑上一个习题，这时假设 D 具有值：
- 1001010101。
 - 0101101010。
 - 1010100000。
- P7. 在这道习题中，我们探讨 CRC 的某些性质。对于在 6.2.3 节中给出的生成多项式 $G(=1001)$ ，回答下列问题：
- 为什么它能够检测数据 D 中的任何单比特差错？
 - 上述 G 能够检测任何奇数比特差错吗？为什么？
- P8. 在 6.3 节中，我们提供了时隙 ALOHA 效率推导的概要。在本习题中，我们将完成这个推导。
- 前面讲过，当有 N 个活跃节点时，时隙 ALOHA 的效率是 $Np(1-p)^{N-1}$ 。求出使这个表达式最大化的 p 值。
 - 使用在（a）中求出的 p 值，令 N 接近于无穷，求出时隙 ALOHA 的效率。（提示：当 N 接近于无穷时， $(1-1/N)^N$ 接近于 $1/e$ 。）
- P9. 说明纯 ALOHA 的最大效率是 $1/(2e)$ 。注意：如果你完成了上面的习题，本习题就很简单了。
- P10. 考虑两个节点 A 和 B，它们都使用时隙 ALOHA 协议来竞争一个信道。假定节点 A 比节点 B 有更多的数据要传输，并且节点 A 的重传概率 p_A 比节点 B 的重传概率 p_B 要大。
- 给出节点 A 的平均吞吐量的公式。具有这两个节点的协议的总体效率是多少？
 - 如果 $p_A = 2p_B$ ，节点 A 的平均吞吐量比节点 B 的要大两倍吗？为什么？如果不是，你能够选择什么样的 p_A 和 p_B 使得其成立？
 - 一般而言，假设有 N 个节点，其中的节点 A 具有重传概率 $2p$ 并且所有其他节点具有重传概率 p 。给出表达式来计算节点 A 和其他任何节点的平均吞吐量。
- P11. 假定 4 个活跃节点 A、B、C 和 D 都使用时隙 ALOHA 来竞争访问某信道。假设每个节点有无限个分组要发送。每个节点在每个时隙中以概率 p 尝试传输。第一个时隙编号为时隙 1，第二个时隙编号为时隙 2，等等。
- 节点 A 在时隙 5 中首先成功的概率是多少？
 - 某个节点（A、B、C 或 D）在时隙 4 中成功的概率是多少？
 - 在时隙 3 中出现首个成功的概率是多少？
 - 这个 4 节点系统的效率是多少？
- P12. 对 N 的下列值，画出以 p 为函数的时隙 ALOHA 和纯 ALOHA 的效率。
- $N = 15$ 。
 - $N = 25$ 。
 - $N = 35$ 。
- P13. 考虑具有 N 个节点和传输速率为 R bps 的一个广播信道。假设该广播信道使用轮询进行多路访问（有一个附加的轮询节点）。假设从某节点完成传输到后续节点允许传输之间的时间量（即轮询时延）是 d_{poll} 。假设在一个轮询周期中，一个给定的节点允许至多传输 Q 比特。该广播信道的最大吞

吐量是多少?

P14. 如图 6-33 所示, 考虑通过两台路由器互联的 3 个局域网。

- 对所有的接口分配 IP 地址。对子网 1 使用形式为 192.168.1.xxx 的地址, 对子网 2 使用形式为 192.168.2.xxx 的地址, 对子网 3 使用形式为 192.168.3.xxx 的地址。
- 为所有的适配器分配 MAC 地址。
- 考虑从主机 E 向主机 B 发送一个 IP 数据报。假设所有的 ARP 表都是最新的。就像在 6.4.1 节中对单路由器例子所做的那样, 列举出所有步骤。
- 重复 (c), 现在假设在发送主机中的 ARP 表为空 (并且其他表都是最新的)。

P15. 考虑图 6-33。现在我们用一台交换机代替子网 1 和子网 2 之间的路由器, 并且将子网 2 和子网 3 之间的路由器标记为 R1。

- 考虑从主机 E 向主机 F 发送一个 IP 数据报。主机 E 将请求路由器 R1 帮助转发该数据报吗? 为什么? 在包含 IP 数据报的以太网帧中, 源和目的 IP 和 MAC 地址分别是什么?
- 假定 E 希望向 B 发送一个 IP 数据报, 假设 E 的 ARP 缓存中不包含 B 的 MAC 地址。E 将执行 ARP 查询来发现 B 的 MAC 地址吗? 为什么? 在交付给路由器 R1 的以太网帧 (包含发向 B 的 IP 数据报) 中, 源和目的 IP 和 MAC 地址分别是什么?

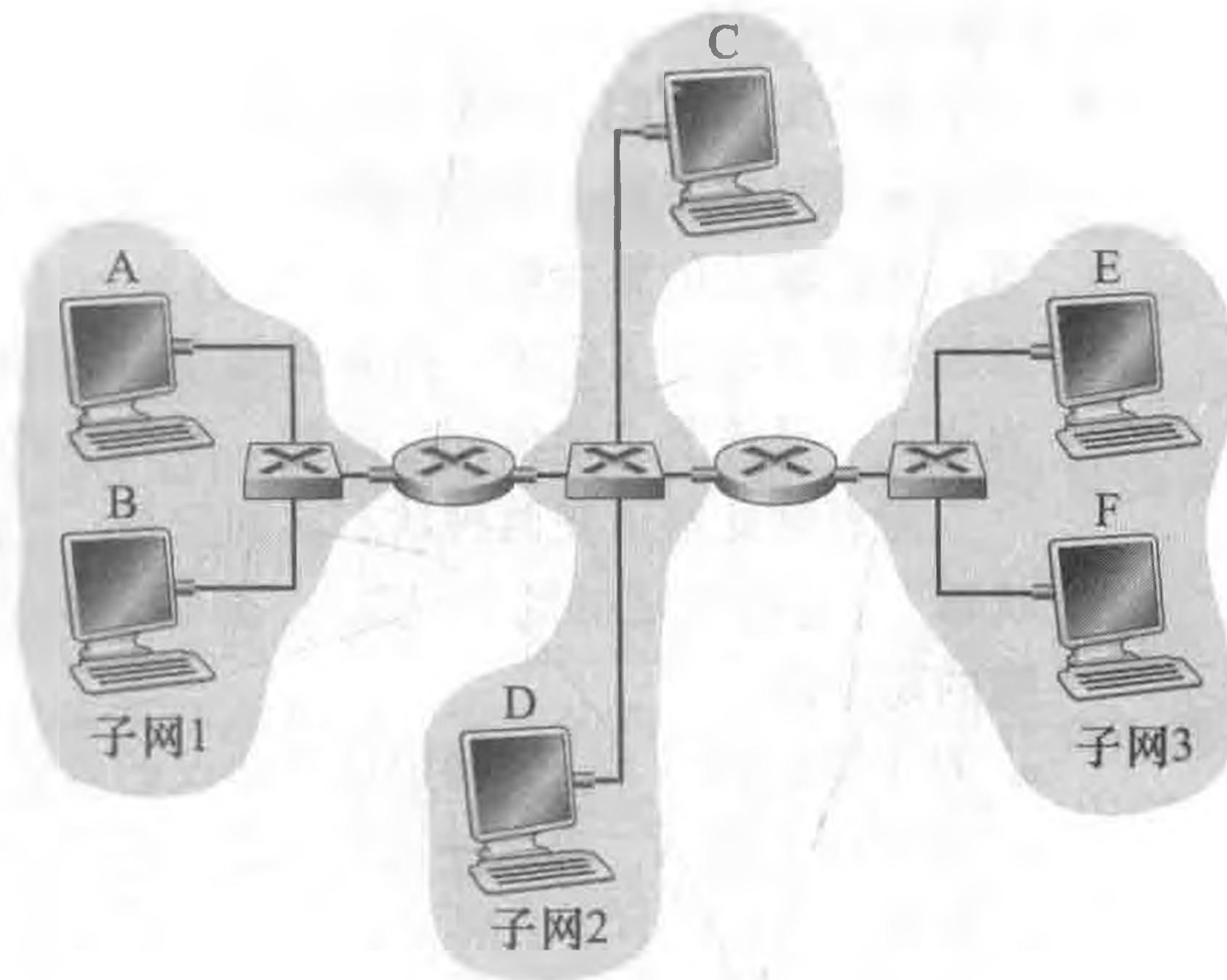


图 6-33 由路由器互联的 3 个子网

- 假定主机 A 希望向主机 B 发送一个 IP 数据报, A 的 ARP 缓存不包含 B 的 MAC 地址, B 的 ARP 缓存也不包含 A 的 MAC 地址。进一步假定交换机 S1 的转发表仅包含主机 B 和路由器 R1 的表项。因此, A 将广播一个 ARP 请求报文。一旦交换机 S1 收到 ARP 请求报文将执行什么动作? 路由器 R1 也会收到这个 ARP 请求报文吗? 如果收到的话, R1 将向子网 3 转发该报文吗? 一旦主机 B 收到这个 ARP 请求报文, 它将向主机 A 回发一个 ARP 响应报文。但是它将发送一个 ARP 查询报文来请求 A 的 MAC 地址吗? 为什么? 一旦交换机 S1 收到来自主机 B 的一个 ARP 响应报文, 它将做什么?

P16. 考虑前面的习题, 但是现在假设用一台交换机代替子网 2 和子网 3 之间的路由器, 在这种新的场景中回答前面习题中的问题 (a) ~ (c)。

P17. 前面讲过, 使用 CSMA/CD 协议, 适配器在碰撞之后等待 $K \cdot 512$ 比特时间, 其中 K 是随机选取的。对于 $K = 100$, 对于一个 10Mbps 的广播信道, 适配器返回到第二步要等多长时间? 对于 100Mbps 的广播信道来说呢?

P18. 假设节点 A 和节点 B 在同一个 10Mbps 广播信道上, 这两个节点的传播时延为 325 比特时间。假设对这个广播信道使用 CSMA/CD 和以太网分组。假设节点 A 开始传输一帧, 并且在它传输结束之前节点 B 开始传输一帧。在 A 检测到 B 已经传输之前, A 能完成传输吗? 为什么? 如果回答是可以, 则 A 错误地认为它的帧已成功传输而无碰撞。提示: 假设在 $t = 0$ 比特时刻, A 开始传输一帧。在最坏的情况下, A 传输一个 $512 + 64$ 比特时间的最小长度的帧。因此 A 将在 $t = 512 + 64$ 比特时刻完成帧的传输。如果 B 的信号在比特时间 $t = 512 + 64$ 比特之前到达 A, 则答案是否定的。在最坏的情况下, B 的信号什么时候到达 A?

P19. 假设节点 A 和节点 B 在相同的 10Mbps 广播信道上, 并且这两个节点的传播时延为 245 比特时间。假设 A 和 B 同时发送以太网帧, 帧发生了碰撞, 然后 A 和 B 在 CSMA/CD 算法中选择不同的 K 值。假设没有其他节点处于活跃状态, 来自 A 和 B 的重传会碰撞吗? 为此, 完成下面的例子就足以说明问题了。假设 A 和 B 在 $t = 0$ 比特时间开始传输。它们在 $t = 245$ 比特时间都检测到了碰撞。假设

$K_A = 0$, $K_B = 1$ 。B 会将它的重传调整到什么时间？A 在什么时间开始发送？（注意：这些节点在返回第 2 步之后，必须等待一个空闲信道，参见协议。）A 的信号在什么时间到达 B 呢？B 在它预定的时刻抑制传输吗？

P20. 在这个习题中，你将对一个类似于 CSMA/CD 的多路访问协议的效率进行推导。在这个协议中，时间分为时隙，并且所有适配器都与时隙同步。然而，和时隙 ALOHA 不同的是，一个时隙的长度（以秒计）比一帧的时间（即传输一帧的时间）小得多。令 S 表示一个时隙的长度。假设所有帧都有恒定长度 $L = kRS$ ，其中 R 是信道的传输速率， k 是一个大整数。假定有 N 个节点，每个节点都有无穷多帧要发送。我们还假设 $d_{prop} < S$ ，以便所有节点在一个时隙时间结束之前能够检测到碰撞。这个协议描述如下：

- 对于某给定的时隙，如果没有节点占有这个信道，所有节点竞争该信道；特别是每个节点以概率 p 在该时隙传输。如果刚好有一个节点在该时隙中传输，该节点在后续的 $k-1$ 个时隙占有信道，并传输它的整个帧。
- 如果某节点占用了信道，所有其他节点抑制传输，直到占有信道的这个节点完成了该帧的传输为止。一旦该节点传输完它的帧，所有节点竞争该信道。

注意到此信道在两种状态之间交替：“生产性状态”（它恰好持续 k 个时隙）和“非生产性状态”（它持续随机数个时隙）。显然，该信道的效率是 $k/(k+x)$ ，其中 x 是连续的非生产性时隙的期望值。

- 对于固定的 N 和 p ，确定这个协议的效率。
- 对于固定的 N ，确定使该效率最大化的 p 值。
- 使用在 (b) 中求出的 p （它是 N 的函数），确定当 N 趋向无穷时的效率。
- 说明随着帧长度变大，该效率趋近于 1。

P21. 现在考虑习题 P14 中的图 6-33。对主机 A、两台路由器和主机 F 的各个接口提供 MAC 地址和 IP 地址。假定主机 A 向主机 F 发送一个数据报。当在下列场合传输该帧时，给出在封装该 IP 数据报的帧中的源和目的 MAC 地址：(i) 从 A 到左边的路由器；(ii) 从左边的路由器到右边的路由器；(iii) 从右边的路由器到 F。还要给出到达每个点时封装在该帧中的 IP 数据报中的源和目的 IP 地址。

P22. 现在假定在图 6-33 最左边的路由器被一台交换机替换。主机 A、B、C 和 D 和右边的路由器以星形方式与这台交换机相连。当在下列场合传输该帧时，给出在封装该 IP 数据报的帧中的源和目的 MAC 地址：(i) 从 A 到左边路由器；(ii) 从左边路由器到右边的路由器；(iii) 从右边的路由器到 F。还要给出到达每个点时封装在该帧中的 IP 数据报中源和目的 IP 地址。

P23. 考虑图 6-15。假定所有链路都是 100Mbps。在该网络中的 9 台主机和两台服务器之间，能够取得的最大总聚合吞吐量是多少？你能够假设任何主机或服务器能够向任何其他主机或服务器发送分组。为什么？

P24. 假定在图 6-15 中的 3 台连接各系的交换机用集线器来代替。所有链路是 100Mbps。现在回答习题 P23 中提出的问题。

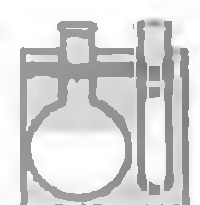
P25. 假定在图 6-15 中的所有交换机用集线器来代替。所有链路是 100Mbps。现在回答在习题 P23 中提出的问题。

P26. 在某网络中标识为 A 到 F 的 6 个节点以星形与一台交换机连接，考虑在该网络环境中某个正在学习的交换机的运行情况。假定：(i) B 向 E 发送一个帧；(ii) E 向 B 回答一个帧；(iii) A 向 B 发送一个帧；(iv) B 向 A 回答一个帧。该交换机表初始为空。显示在这些事件的前后该交换机表的状态。对于每个事件，指出在其上面转发传输的帧的链路，并简要地评价你的答案。

P27. 在这个习题中，我们探讨用于 IP 语音应用的小分组。小分组长度的一个主要缺点是链路带宽的较大比例被首部字节所消耗。基于此，假定分组是由 P 字节和 5 字节首部组成。

- 考虑直接发送一个数字编码语音源。假定该源以 128kbps 的恒定速率进行编码。假设每个源向网

- 络发送分组之前每个分组被完全填充。填充一个分组所需的时间是分组化时延 (packetization delay)。根据 L ，确定分组化时延 (以毫秒计)。
- 大于 20 毫秒的分组化时延会导致一个明显的、令人不快的回音。对于 $L = 1500$ 字节 (大致对应于一个最大长度的以太网分组) 和 $L = 50$ 字节 (对应于一个 ATM 信元)，确定该分组化时延。
 - 对 $R = 622\text{Mbps}$ 的链路速率以及 $L = 1500$ 字节和 $L = 50$ 字节，计算单台交换机的存储转发时延。
 - 对使用小分组长度的优点进行评述。
- P28. 考虑图 6-25 中的单个交换 VLAN，假定一台外部路由器与交换机端口 1 相连。为 EE 和 CS 的主机和路由器接口分配 IP 地址。跟踪从 EE 主机向 CS 主机传送一个数据报时网络层和链路层所采取的步骤 (提示：重读课文中对图 6-19 的讨论)。
- P29. 考虑显示在图 6-29 中的 MPLS 网络，假定路由器 R5 和 R6 现在是 MPLS 使能的。假定我们要执行流量工程，使从 R6 发往 A 的分组要经 R6-R4-R3-R1 交换到 A，从 R5 发向 A 的分组要过 R5-R4-R2-R1 交换。给出 R5 和 R6 中的 MPLS 表以及在 R4 中修改的表，使得这些成为可能。
- P30. 再次考虑上一个习题中相同的场景，但假定从 R6 发往 D 的分组经 R6-R4-R3 交换，而从 R5 发往 D 的分组经 R4-R2-R1-R3 交换。说明为使这些成为可能所有路由器中的 MPLS 表。
- P31. 在这个习题中，你将把已经学习过的因特网协议的许多东西拼装在一起。假设你走进房间，与以太网连接，并下载一个 Web 页面。从打开 PC 电源到得到 Web 网页，发生的所有协议步骤是什么？假设当你给 PC 加电时，在 DNS 或浏览器缓存中什么也没有。(提示：步骤包括使用以太网、DHCP、ARP、DNS、TCP 和 HTTP 协议。) 明确指出在这些步骤中你如何获得网关路由器的 IP 和 MAC 地址。
- P32. 考虑在图 6-30 中具有等级拓扑的数据中心网络。假设现在有 80 对流，在第 1 和第 9 机架之间有 10 个流，在第 2 和第 10 机架之间有 10 个流，等等。进一步假设网络中的所有链路是 10Gbps，而主机和 TOR 交换机之间的链路是 1Gbps。
- 每条流具有相同的数据率；确定一条流的最大速率。
 - 对于相同的流量模式，对于图 6-31 中高度互联的拓扑，确定一条流的最大速率。
 - 现在假设有类似的流量模式，但在每个机架上涉及 20 台主机和 160 对流。确定对这两个拓扑的最大流速率。
- P33. 考虑图 6-30 中所示的等级网络，并假设该数据中心需要在其他应用程序之间支持电子邮件和视频分发。假定 4 个服务器机架预留用于电子邮件，4 个服务器机架预留用于视频。对于每个应用，所有 4 个机架必须位于某单一的二层交换机之下，因为二层到一层链路没有充足的带宽来支持应用内部的流量。对于电子邮件应用，假定 99.9% 时间仅使用 3 个机架，并且视频应用具有相同的使用模式。
- 电子邮件应用需要使用第 4 个机架的时间比例有多大？视频应用需要使用第 4 个机架的时间比例有多大？
 - 假设电子邮件使用和视频使用是独立的，这两个应用需要其第 4 个机架的时间比例有多大 (等价地，概率有多大)？
 - 假设对于一个应用服务器短缺的时间具为 0.001% 或更少 (引起用户在极短时间内性能恶化)。讨论在图 6-31 中的拓扑能够怎样使用，使得仅 7 个机架被共同地分配给两个应用 (假设拓扑能够支持所有流量)。



Wireshark 实验

在与本教科书配套的 Web 站点 (<http://www.pearsonhighered.com/cs-resources/>) 上，你将找到一个 Wireshark 实验，该实验研究了 IEEE 802.3 协议的操作和以太网帧格式。第二个 Wireshark 实验研究了在家庭网络场景下所获取的分组踪迹。

人物专访

Simon S. Lam 是位于奥斯丁的 T 得克萨斯大学计算机科学系的教授和董事会主席。1971~1974 年,他在 UCLA 的 ARPA 网络测量中心工作,从事卫星和无线电分组交换方面的工作。他领导的研究组于 1993 年发明了安全套接字及其原型,这是第一个安全套接字层(称为安全网络编程),为此赢得了 2004 年 ACM 软件系统奖。他的研究兴趣在于网络协议和安全服务的设计和分析。他从华盛顿州立大学获得了电气工程学士(BSEE)学位,从 UCLA 获得了硕士和博士学位。他于 2007 年当选美国国家工程院院士。



Simon S. Lam

• 为什么您决定专注于网络?

当我于 1969 年秋季作为一名研究生新生来到 UCLA 时,我原来的意图是研究控制论。后来我参加了 Leonard Kleinrock 的排队论课程,他给我留下了深刻印象。不久后,我以排队系统的自适应控制作为可能的论文题目进行了研究。在 1972 年初, Larry Roberts 启动了 ARPAnet 卫星系统项目(后来称为分组卫星)。Kleinrock 教授请我参加该项目。我们做的第一件事是为时隙 ALOHA 协议引入一个简单而实用的回退算法。不久后,我发现了许多有趣的研究问题,如 ALOHA 的不稳定性问题和对自适应回退的需求,这些形成了我学位论文的核心。

• 20 世纪 70 年代您开始了在 UCLA 的学生生涯,活跃于因特网的早期阶段。那时的情况怎样?那时人们对因特网将变成什么样有哪些大致想法?

那时的环境与我曾在产业界和学术界所见到的其他系统构建项目的确没什么不同。ARPAnet 初始规定的目标是相当谨慎的,即提供从远程位置接入昂贵的计算机的手段,使许多科学家能够使用这些计算机。然而,随着分组卫星项目于 1972 年和分组无线电项目于 1973 年启动,ARPA 的目标有了相当大的扩展。到了 1973 年,ARPA 同时建造了 3 个不同的分组网络,对 Vint Cerf 和 Bob Kahn 来说研发互联策略变得有必要了。

回顾过去,所有这些网络方面的进步和进展被视为(我相信)符合逻辑的而不是虚幻的。没有人能够想象到今天的因特网规模和个人计算机的能力。在第一台 PC 出现之前有十多年时间。那时为了正确地做处理,多数学生以一系列穿孔卡片的形式提交他们的计算机程序以进行批处理。仅有某些学生能够直接接触计算机,而计算机通常位于一个受限的区域中。调制解调器速度缓慢且稀有。作为一名研究生,在书桌上我仅有一部电话机,使用铅笔和纸从事我的大部分工作。

• 您认为网络 and 因特网未来将往何处发展?

在过去,因特网 IP 协议的简单性是它在竞争上取胜的最大法宝,并且成为网络互联事实上的标准。与它的竞争对手如 20 世纪 80 年代的 X.25 和 20 世纪 90 年代的 ATM 不同,IP 能够在任何链路层联网技术之上运行,因为它仅提供尽力而为的数据报服务。因此,任何分组网络都能够连接到因特网上。

今天,IP 的最大长处实际上成了一种缺点。IP 目前像一件紧身衣,限制了因特网向特定方向发展。近年来,许多研究人员仅将他们的努力重新定向到应用层上。在无线自组织网络、传感网络和卫星网络方面也做了大量研究工作。这些网络能够看作独立的系统或链路层系统,因为位于 IP 的紧身衣之外,所以它们能够繁荣发展。

许多人对于 P2P 系统可能作为新奇的因特网应用的平台而感到欢欣鼓舞。然而,P2P 系统在使用因特网资源方面效率很低。我关注的一个问题是,随着因特网不断互联各种设备和支持未来的 P2P 使能的应用,因特网核心的传输和交换能力比起对因特网流量的需求来说,前者是否将更快地不断增加。没有大量的容量预留,在面临恶意攻击和拥塞时,确保网络稳定性将是一项重要的任务。

因特网的急剧增长也要求以高速率为全世界的网络操作者和企业分配新的 IP 地址。以当前速度,未分配的 IP 地址池将在几年内消耗殆尽。当该事件发生时,仅能从 IPv6 地址空间中分配大量地址空间

的相邻块了。因为 IPv6 采用的启动缓慢，由于对早期用户缺乏激励，所以 IPv4 和 IPv6 将很有可能在今后的因特网上共存很多年。从 IPv4 主宰的因特网向 IPv6 主宰的因特网迁移将需要全球做出巨大的努力。

- 您的工作最具挑战性的部分是什么？

我的工作最具挑战性的部分是，作为一名教授传授和激发我课堂上的每个学生以及我所指导的每个博士研究生，而不只是获得重要的成就。非常聪明和有学习动力的人可能要求少量的引导而非许多其他东西。我经常从学生那里学到很多东西，比他们从我这里学到的多。教育和激励学术上落后的学生是一项重要的挑战。

- 您能预见到技术对未来学习方面有哪些影响？

最终几乎所有的人类知识将可以通过因特网得到，因特网将成为最为强有力的学习工具。这种巨大的知识库将具有为全世界的学生们提供公平竞争环境的潜力。例如，任何国家的有上进心的学生将能够访问最好课程的 Web 站点、多媒体演讲和教学材料。据说 IEEE 和 ACM 数字图书馆已经加速了中国的计算机科学研究的发展。与此同时，因特网将超越所有学习的地理障碍。

无线网络和移动网络

在电话技术领域，过去的 20 年无疑可认为是蜂窝电话技术的黄金发展期。全球范围的移动蜂窝电话用户数量从 1993 年的 3400 万增长到 2014 年的超过 70 亿，同时蜂窝电话用户数量现在也超过了有线电话用户数量。现在移动电话的订购数量比我们地球上的人口数量还要多。蜂窝电话的许多优点是显而易见的，通过一个移动性强、重量轻的设备，能在任何地方、任何时间无缝地接入全球电话网络。最近，便携机、智能手机和平板电脑能够以无线方式经过蜂窝网或 WiFi 网络连接到因特网，而且，如游戏机、恒温调节器、家庭安全系统、家用器具、手表、眼镜、汽车、流量控制系统等设备也越来越多地以无线方式连接到因特网。

从网络的观点来说，由这些无线和移动设备联网所引发的挑战，特别是在数据链路层和网络层，与传统的有线网络的差别非常大，适合用单独一章（即本章）的篇幅来专门讨论无线网络和移动网络。

在本章中，我们首先讨论移动用户、无线链路和网络，以及它们与所连接的更大网络（通常是有线网络）之间的关系。我们将指出以下两方面的差别：一个是在该网络中由通信链路的无线特性所带来的挑战，另一个是由这些无线链路使能的移动性。在无线和移动性之间做重要区分，使我们能更好地区分、标识和掌握在每个领域中的重要概念。值得注意的是，确实在许多网络环境中网络节点是无线的而不是移动的（例如具有固定工作站和大显示器的无线家庭或办公网络），而有限的移动性也并不要求用无线链路（例如，一个在家里使用便携机的员工，关闭便携机，开车去工作，然后将该便携机连接到公司的有线网络上）。当然，许多最让人激动的网络环境是那些让用户同时具有无线和移动性的网络环境。例如在下列情况下，一个移动用户（不妨假设其正坐在汽车后座上）维持一个 IP 语音呼叫和多个进行中的 TCP 连接，同时又以每小时 160 公里的速度飞驰在高速公路上。正是在这种具有无线和移动的交集的场合中，我们将会发现最有趣的技术挑战。

首先我们将说明用于考虑无线通信和移动性的环境，即无线（并可能是移动）用户通过位于网络边缘的无线链路连接进更大的网络基础设施的网络。然后在 7.2 节中，我们考虑这种无线链路的特性，还将包括一个对码分多址接入（Code Division Multiple Access, CDMA）的简要介绍。CDMA 是一个在无线网络中经常使用的共享媒体接入协议。在 7.3 节中，我们将更为深入地分析 IEEE 802.11（WiFi）无线 LAN 标准的链路级方面；同时我们还将对蓝牙和其他无线个人域网络做简要描述。在 7.4 节中，我们概述蜂窝因特网接入，其中包括 3G 和正在兴起的 4G 蜂窝技术，这些技术能够同时提供语音和高速因特网接入。在 7.5 节，我们将注意力转向移动性，关注于移动用户的定位问题、对移动用户的路由选择以及“切换”（handing off）移动用户（即在网络中从一个接入点动态地移动到另一点的用户）等问题。在 7.6 节和 7.7 节中，我们将分别考察如何在企业 802.11 网络和 LTE 蜂窝网络中用移动 IP 标准实现这些移动服务。最后，我们将在 7.8 节中考虑无线链路和移动性对运输层协议和网络应用程序的影响。

7.1 概述

图 7-1 显示了我们将要讨论无线数据通信和移动性主题的环境。为使讨论具有一般性以覆盖各种各样的网络，将包括像 IEEE 802.11 这样的无线局域网和像 4G 网络这样的蜂窝网络来开始我们的讨论；然后在后续各节中，我们将对特定的无线体系结构进行更加详细的讨论。我们能够看到无线网络的下列要素：

- 无线主机。如同在有线网络中一样，主机是运行应用程序的端系统设备。无线主机（wireless host）可以是便携机、掌上机、智能手机或者桌面计算机。主机本身可能移动，也可能不移动。
- 无线链路。主机通过无线通信

图例：

- 无线接入点
- 无线主机
- 运动中的无线主机
- 覆盖区域

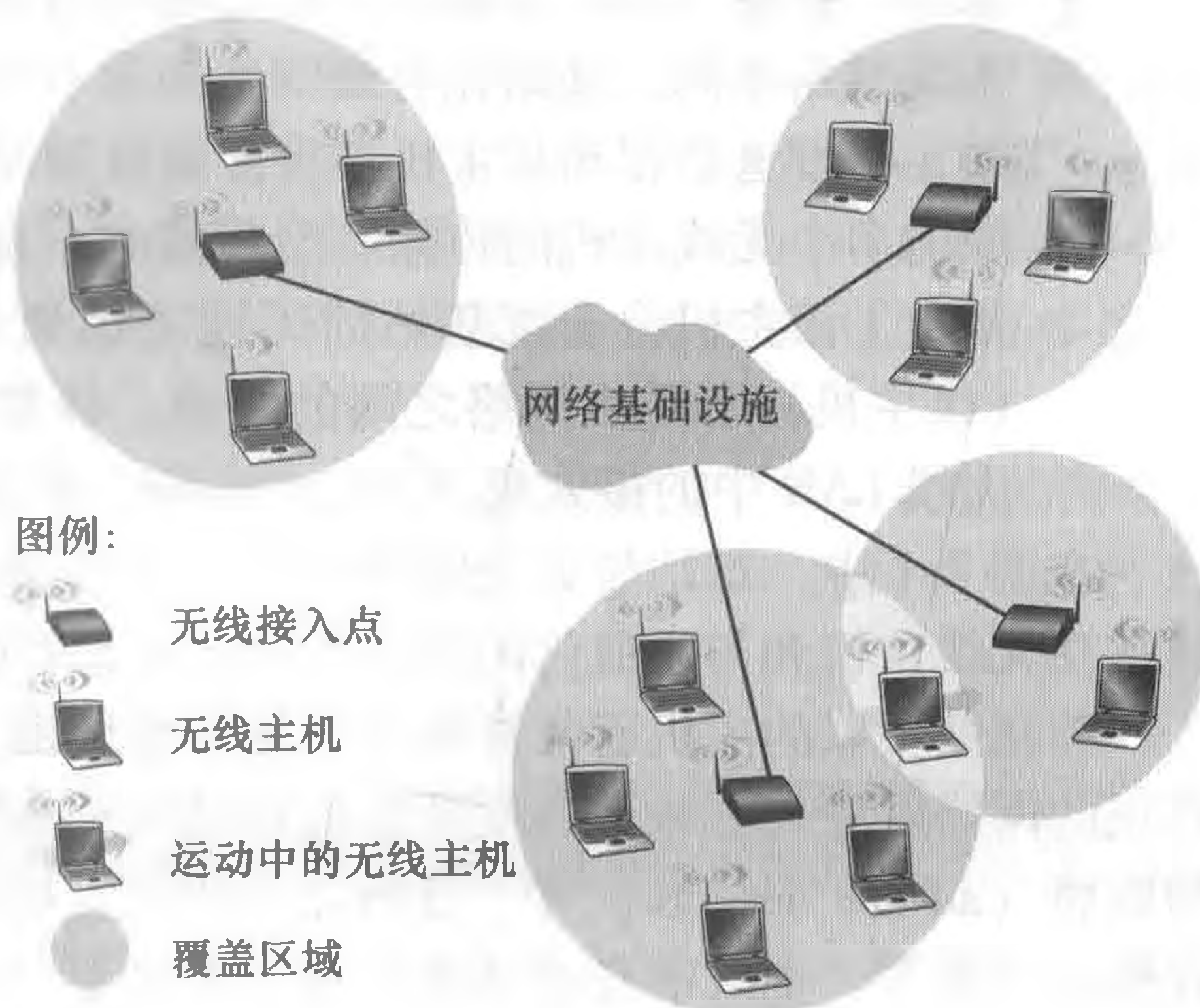


图 7-1 无线网络的要素

链路（wireless communication link）连接到一个基站（定义见下文）或者另一台无线主机。不同的无线链路技术具有不同的传输速率和能够传输不同的距离。图 7-2 显示了较为流行的无线链路标准的两种主要特性（覆盖区域和链路速率）。（该图仅表示了提供这些特性的大致概念。例如，这些类型中的某些网络现在只是在部署，某些链路速率取决于距离、信道条件和在无线网络中的用户数量，能够比显示的值更高或更低些。）我们将在本章的前半部分讨论这些标准。在 7.2 节中，我们也考虑其他无线链路特性（如它们的比特差错率及其原因）。

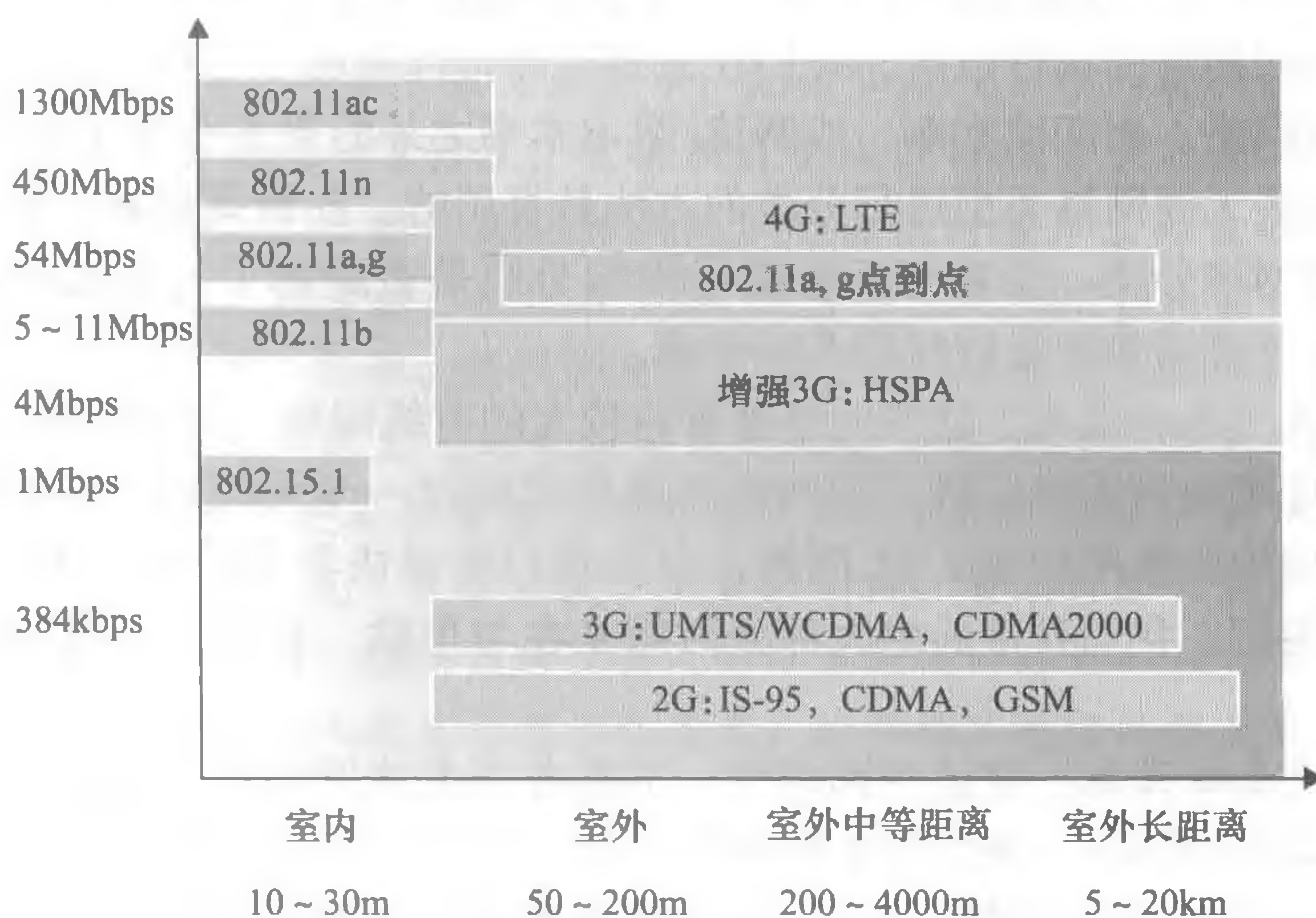


图 7-2 部分无线网络标准的链路特性

在图 7-1 中，无线链路将位于网络边缘的主机连接到更大的网络基础设施中。我

们要马上补充的是，无线链路有时同样应用在一个网络中以连接路由器、交换机和其他网络设备。然而，在本章中我们关注的焦点是无线通信在网络边缘的应用，因为许多最为振奋人心的技术挑战和多数增长就发生在这里。

- **基站。**基站 (base station) 是无线网络基础设施的一个关键部分。与无线主机和无线链路不同，基站在有线网络中没有明确的对应设备。它负责向与之关联的无线主机发送数据和从主机那里接收数据 (例如分组)。基站通常负责协调与之相关联的多个无线主机的传输。当我们说一台无线主机与某基站“相关联”时，则是指：①该主机位于该基站的无线通信覆盖范围内；②该主机使用该基站中继它 (该主机) 和更大网络之间的数据。蜂窝网络中的蜂窝塔 (cell tower) 和 802.11 无线 LAN 中的接入点 (access point) 都是基站的例子。

在图 7-1 中，基站与更大网络相连 (如因特网、公司或家庭网、电话网)，因此这种连接在无线主机和与之通信的其他部分之间起着链路层中继的作用。

与基站关联的主机通常被称为以**基础设施模式** (infrastructure mode) 运行，因为所有传统的网络服务 (如地址分配和路由选择) 都由网络向通过基站相连的主机提供。在**自组织网络** (ad hoc network) 中，无线主机没有这样的基础设施与之相连。在没有这样的基础设施的情况下，主机本身必须提供诸如路由选择、地址分配、类似于 DNS 的名字转换等服务。

当一台移动主机的移动超出一个基站的覆盖范围而到达另一个基站的覆盖范围后，它将改变其接入到更大网络的连接点 (即改变与之相关联的基站)，这一过程称作**切换** (handoff)。这种移动性引发了许多具有挑战性的问题。如果一台主机可以移动，那么如何找到它在网络中的当前位置，从而使得数据可以向该移动主机转发？如果一台主机可以位于许多可能位置中的一个，那么如何进行编址？如果主机在一个 TCP 连接或者电话呼叫期间移动，数据如何路由选择而使连接保持不中断？这些以及许多 (许多!) 其他问题使得无线网络和移动网络成为一个让人振奋的网络研究领域。

- **网络基础设施。**这是无线主机希望与之进行通信的更大网络。

在讨论完无线网络的构件以后，我们注意到这些构件能够以多种不同方式组合以形成不同类型的无线网络。当阅读本章，或阅读/学习本书之外的更多有关无线网络的内容时，你可能发现对这些无线网络类型进行分类的方法是有用的。在最高层次，我们能够根据两个准则来对无线网络分类：①在该无线网络中的分组是否跨越了一个无线跳或多个无线跳；②网络中是否有诸如基站这样的基础设施。

- **单跳，基于基础设施。**这些网络具有与较大的有线网络 (如因特网) 连接的基站。此外，该基站与无线主机之间的所有通信都经过一个无线跳。你在教室、咖啡屋或图书馆中所使用的 802.11 网络，以及我们将很快学习的 4G LTE 数据网络都属于这种类型。我们日常的绝大部分时间是在与单跳、基于基础设施的无线网络打交道。
- **单跳，无基础设施。**在这些网络中，不存在与无线网络相连的基站。然而，如我们将要见到的那样，在这种单跳网络中的一个节点可以协调其他节点的传输。蓝牙网络 (该网络连接诸如键盘、扬声器和戴在头上的耳机等小型无线设备，我们将在 7.3.6 节中学习) 和具有自组织模式的 802.11 网络是单跳、无基础设施的网络。
- **多跳，基于基础设施。**在这些网络中，一个基站表现为以有线方式与较大网络相

连。然而，某种无线节点为了经该基站通信，可能不得不通过其他无线节点中继它们的通信。某些无线传感网络和所谓无线网状网络（wireless mesh network）就属于这种类型。

- 多跳，无基础设施。在这些网络中没有基站，并且节点为了到达目的地可能必须在几个其他无线节点之间中继报文。节点也可能是移动的，在多个节点中改变连接关系，一类网络被称为移动自组织网络（mobile ad hoc network, MANET）。如果该移动节点是车载的，该网络是车载自组织网络（vehicular ad hoc network, VANET）。如你可能想象的那样，为这种网络开发协议是一种挑战，这是许多进行中的研究主题。

在本章中，我们将把主要学习内容限制在单跳网络，并且大多数是基于基础设施的网络。

现在我们更深一步地研究无线网络和移动网络面临的挑战。我们将首先讨论单独的无线链路，而在本章稍后部分讨论移动性。

历史事件

公共 WiFi 接入：路灯方案很快将实现吗？

WiFi 热区（即用户能够找到 802.11 无线接入的公共位置）在全世界的旅馆、机场和咖啡屋变得日益常见。大多数大学校园提供了无所不在的无线接入，找一个不提供无线因特网接入的旅馆也很难。

在过去的十年中，一些城市已经设计、部署和运行了市政的 WiFi 网络。作为公共服务（非常像街灯）提供无所不在的 WiFi 接入到社区的前景引人入胜，通过向所有居民提供因特网接入，有助于填平数字鸿沟，并能促进经济发展。世界上的许多城市，包括费城、香港、明尼阿波利斯、伦敦和奥克兰，已经计划在城市中提供无所不在的无线，或者已经在不同程度上做到了这一点。美国宾夕法尼亚州费城的目标是“将费城变为国家最大的 WiFi 热区，有助于改善教育，填平数字鸿沟，增强邻居交往，以及减少政府成本”。这项雄心勃勃的规划依据该城市、无线费城（一个非营利组织）和因特网服务提供商 Earthlink 达成的一项协议，这将在覆盖城市 80% 区域的街道路灯杆和交通控制设备上建设一个 802.11b 热区的运行网络。而由该网络产生的金融和运行股份在 2008 年出售给了一群私人投资者，他们在 2010 年再将该网络回售给该城市。其他城市如明尼阿波利斯、多伦多、香港、伦敦和奥克兰已经取得了较小规模的成功。

运行在无须许可证的频谱上（因此能够在无须购买昂贵的频谱使用权的情况下部署）的 802.11 网络看起来使其在资金上具有吸引力。然而，802.11 接入点（参见 7.3 节）比起 4G 蜂窝基站（参见 7.4 节）缺少大量的频段，要求部署大量的端点来覆盖相同的地理区域。在另一方面，提供因特网接入的蜂窝数据网络运行在许可证频谱上。蜂窝提供商为其网络的频谱接入权支付数十亿美元，使得蜂窝数据网络是商务而不是市政事务。

7.2 无线链路和网络特征

我们开始考虑用一台有线以太网交换机互联主机的一个简单有线网络，如一个家庭网

络（参见 6.4 节）。如果我们用无线 802.11 网络代替该有线以太网，用无线网络接口代替主机的有线以太网接口，用接入点代替以太网交换机，但实际上在网络层及其以上层次中不需要有任何变化。这提示我们当寻找有线和无线网络的重要区别时，应该重点关注链路层。我们的确能够发现有线链路和无线链路间的许多重要区别：

- 递减的信号强度。电磁波在穿过物体（如无线电信号穿过墙壁）时强度将减弱。即使在自由空间中，信号仍将扩散，这使得信号强度随着发送方和接收方距离的增加而减弱（有时称其为路径损耗（path loss））。
- 来自其他源的干扰。在同一个频段发送信号的电波源将相互干扰。例如，2.4GHz 无线电话和 802.11b 无线 LAN 在相同的频段中传输。因此，802.11b 无线 LAN 用户若同时利用 2.4GHz 无线电话通信，将会导致网络和电话都不会工作得特别好。除了来自发送源的干扰，环境中的电磁噪声（如附近的电动机、微波）也能形成干扰。
- 多径传播。当电磁波的一部分受物体和地面反射，在发送方和接收方之间走了不同长度的路径，则会出现多径传播（multipath propagation）。这使得接收方收到的信号变得模糊。位于发送方和接收方之间的移动物体可导致多径传播随时间而改变。

对于无线信道特征、模型和测量的详细讨论请参见 [Anderson 1995]。

上述讨论表明，无线链路中的比特差错将比有线链路中更为常见。因此，无线链路协议（如我们将在下面一节中讨论的 802.11 协议）不仅采用有效的 CRC 错误检测码，还采用了链路层 ARQ 协议来重传受损的帧。

考虑了在无线信道上可能出现的损伤后，我们将注意力转向接收无线信号的主机。该主机接收到一个电磁信号，而该信号是发送方传输的初始信号的退化形式和环境中的背景噪声的结合，其中的信号退化是由于衰减和我们前面讨论过的多路径传播以及其他一些因素所引起的。信噪比（Signal-to-Noise Ratio, SNR）是所收到的信号（如被传输的信息）和噪声强度的相对测量。SNR 的度量单位通常是分贝（dB），有人认为这个主要由电气工程师所使用的度量单位会使计算机科学家迷惑不解。以 dB 度量的 SNR 是下列比值的 20 倍，即接收到的信号的振幅与噪声的振幅的以 10 为底的对数的比值。就我们的讨论目的而言，我们仅需要知道较大的 SNR 使接收方更容易从背景噪声中提取传输的信号。

图 7-3（该图选自 [Holland 2001]）显示了三种不同的调制技术的比特差错率（BER）（大致说来，BER 是在接收方收到的有错传输比特的概率）与 SNR 之比，这些调制技术用于对信息进行编码以在理想信道上传输。调制和编码理论以及信号提取和 BER 都超出了本书的范围（对这些主题的讨论参见 [Schwartz 1980]）。尽管如此，图 7-3 显示了几种物理层的特征，这些特征对于理解较高层无线通信协议是重要的：

- 对于给定的调制方案，SNR 越高，BER 越低。由于发送方通过增加它的传输功率就能够增加 SNR，因此发送方能够通

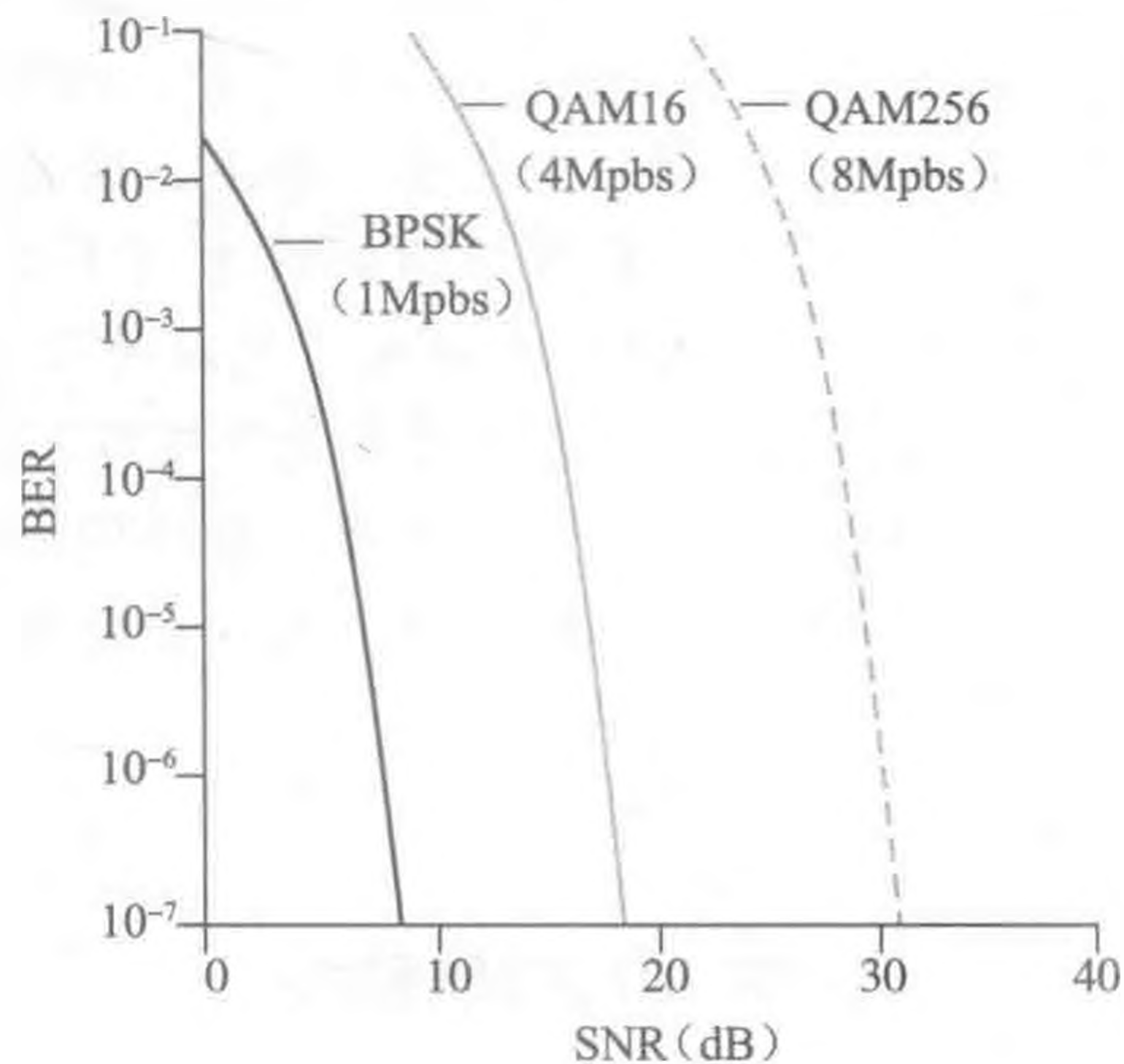


图 7-3 比特差错率、传输率和 SNR