

第 4 章 局域网

局域网是日常人们接触最多的网络类型之一，是接入因特网的主要手段。在一个企业、学校、政府部门等内部构成的网络就是局域网，它为单位内部的资源共享和与外部的连接提供了平台。由于局域网的覆盖范围和用户的需求特征，对局域网的物理层和数据链路层提出了新的要求。而广域网作为局域网在覆盖范围的延拓，就必须解决网络的互连和数据的传输问题。

本章将重点介绍局域网工作原理以及所涉及的技术。对于局域网技术，首先简要介绍局域网基本概念和工作原理，详细讨论以太网和 IEEE802.3 局域网使用的 CSMA/CD 协议、MAC 帧的结构等相关内容。接着介绍在物理层和数据链路层扩展局域网的方法。最后对高速局域网技术和无线局域网技术进行了讨论。

通过本章的学习，要了解局域网的相关标准、拓扑结构、局域网的介质访问控制方法和局域网技术的发展等。了解虚拟局域网技术的概念及其标准。掌握以太网技术的工作原理、CSMA/CD 协议的工作过程、以及以太网的组网方式。了解令牌环和令牌总线等其它局域网介质访问控制方法，了解高速局域网、无线局域网技术的发展及其应用。

4.1 局域网概述

4.1.1 局域网的定义

上个世纪 70 年代中期，由于大规模和超大规模集成电路技术的发展，使得计算机在功能上大大增强的同时，价格也不断下降，一个单位拥有多台计算机成为了可能，这时，人们开始关注如何将属于一个单位且分散在小范围的多台计算机互连起来，从而达到资源共享和相互通信的目的，于是就出现了局域网(Local Area Network, LAN)这一新的研究领域。

局域网是指将分散在一个局部地理范围(如一栋大楼等)的多台计算机通过传输媒体连接起来的通信网络。

美国电气和电子工程师协会(IEEE)于 1980 年 2 月成立了局域网标准化委员会(简称 802 委员会)，专门对局域网的标准进行研究，提出了关于局域网的一系列标准，其中一部分已经被国际标准化组织 ISO 采纳而成为 ISO 正式标准。

最初的局域网，覆盖范围很有限，如数公里距离；速率也较低，如几兆比特每秒。随着数据通信技术和局域网技术的发展，局域网的覆盖范围和传输速率也在不断增大。特别是光纤通信的广泛应用，局域网已可以支持相隔数十公里的计算机之间的通信，局域网的数据传输速率也在不断提高。目前，速率高达千兆比特每秒、万兆比特每秒的局域网已经得到广泛应用。

4.1.2 局域网的特点

局域网具有以下特点：

- (1) 网络覆盖范围较小，通常局限于一个部门或单位，归该部门或单位所有。
- (2) 由于网络覆盖范围较小，传输媒体可获得较好的传输特性，即可以达到高传输速率和低误码率。
- (3) 由于传输特性较好，使得局域网设计时一般很少考虑信道利用率的问题，从而可以在相应的软硬件设施和协议设计方面有所简化。
- (4) 由于接入的计算机较少，媒体访问控制方法相对简单，并因此出现了很多专用局域网的协议标准。
- (5) 局域网大多采用广播方式传输数据，一个站发出数据，其它所有站都能接收到。因此，局域网不需要考虑路由选择问题。

4.1.3 局域网的四个技术特性

局域网技术一经提出便得到了广泛应用，各计算机和网络设备生产厂商纷纷提出自己的局域网标准，试图抢占和垄断局域网市场。因此，局域网标准一度呈现出特有的多样性。局域网标准的多样性体现在局域网的四个技术特性：

(1)传输媒体 传输媒体指用于连接网络设备的介质类型，常用的有双绞线、同轴电缆、光纤，以及微波、红外线和激光等无线传输媒体。目前广泛应用的传输媒体是双绞线。随着无线局域网的广泛应用，无线正得到越来越多的应用。

(2)传输技术 传输技术指借助传输媒体进行数据通信的技术，常用的有基带传输和宽带传输两种。传输技术主要包括信道编码、调制解调以及复用技术等，属于物理层研究的范畴。

(3)网络拓扑 网络拓扑指组网时计算机和通信线缆连接的物理结构和形状。常用的有星形、总线形和环形。不同的网络拓扑需要采用不同的数据发送和接收方式。

(4)媒体访问控制方法 访问控制方法指多台计算机对传输媒体的访问控制方法，这里的访问，是指通过传输媒体发送和接收数据。常用的有随机争用、令牌总线和令牌环等访问控制方法。目前局域网中广泛采用的是一种受控的随机争用方法，即后面将要讨论的载波监听多点接入/冲突检测(CSMA/CD)方法。

4.1.4 局域网的拓扑结构

局域网的基本拓扑结构可分为三类：总线形、星形和环形，如图 4-1 所示。

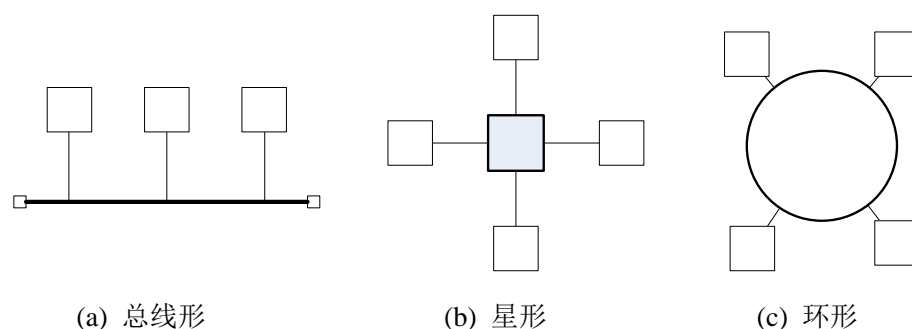


图 4-1 局域网的拓扑

图 4-1(a)为总线形拓扑结构的局域网。网络上的各个站(计算机)都连接到共享的总线上。总线形网可使用两种协议，一种是传统以太网使用的 CSMA/CD，另一种是令牌传递总线网，即物理上是总线网而逻辑上是令牌环形网。

图 4-1(b)是星形网。由于集线器(hub)的出现和双绞线大量用于局域网中，星形以太网及多级星形结构的以太网获得了非常广泛的应用。

图 4-1(c)是环形网。最典型的的就是令牌环网，通过在环中不断传递的令牌来协调各个站对传输媒体的访问，只有获得令牌的站才能获得发送数据的权限。

局域网的上述三种基本拓扑结构可以组合形成较为复杂的拓扑结构，如对总线形局域网进行级联扩展，便构成树形拓扑结构。

4.1.5 局域网的相关标准

局域网技术的发展与其标准化工作是分不开的。局域网技术的相关标准主要对应于 ISO OSI/RM 中的物理层、数据链路层和网络层。

从局域网采用的传输媒体、传输技术、网络拓扑以及访问控制方法上看，局域网具有多种类型，而且每种类型都各有其特点，具有不同的应用背景。为了规范局域网的设计，IEEE 802 委员会针对各种局域网的特点，并参照 ISO OSI 参考模型，制定了有关局域网的标准，称为 IEEE 802 系列标准。该标准中的一部分已被 ISO 采纳，对应于 ISO 8802 系列标准。

由于局域网采用广播方式发送信息，一个站点发出的信息可以为局域网上的所有站点接收，因此，局域网内不需要路由功能。局域网在设计时，将流量控制、差错控制等部分功能归并到数据链路层解决。

由于局域网存在多种传输媒体，以及多种解决媒体共享的控制方法，所以将局域网的数据链路层分为两个子层加以设计，分别为逻辑链路控制子层(LLC)和媒体访问控制子层(MAC)。其中，MAC 子层是与具体的传输媒体和媒体共享的控制方法相关的。而 LLC 子层则与具体的传输媒体和媒体共享的控制方法无关。

有关局域网的标准化工作主要集中在 OSI 体系结构的低两层，已制定了一系列的标准，如：

IEEE 802.1 a——综述和体系结构；

IEEE 802.1b——寻址、网络管理和网络互连；

IEEE 802.1d——生成树协议

IEEE 802.1q——虚拟局域网(VLAN)标记协议

IEEE 802.2 ——逻辑链路控制协议(LLC)；

IEEE 802.3 ——载波监听多点接入/冲突检测(CSMA/CD)访问控制方法和物理层规范；

IEEE 802.3u——快速以太网(Fast Ethernet)

IEEE 802.3z——千兆以太网(Gigabit Ethernet)

IEEE 802.3ae——万兆以太网(10 Gigabit Ethernet)

IEEE 802.4 ——令牌总线(Token Bus)访问控制方法和物理层规范；

IEEE 802.5 ——令牌环(Token Ring)访问控制方法和物理层规范；

IEEE 802.6——城域网(Metropolitan Area Networks, MAN)

IEEE 802.7 ——宽带局域网(Brandband LAN)；

IEEE 802.8 ——光纤局域网；

IEEE 802.9 ——等时以太网(Isochronous Ethernet)；

IEEE 802.10——网络安全(Network Security)

IEEE 802.11——无线局域网

IEEE 802.12——100VG-AnyLAN 局域网

IEEE 802.14——基于有线电视网的城域网

IEEE 802.15——无线个人局域网(Wireless Personal Area Network, WPAN)

IEEE 802.16——宽带无线局域网

IEEE 802.17——弹性分组环网

IEEE 802.20——移动宽带无线访问

以上仅仅列出了 IEEE 802 委员会制定的关于局域网/城域网的标准的一部分。上述部分标准之间的逻辑关系如图 4-2 所示。



图 4-2 IEEE 802 系列标准之间的逻辑关系

4.1.6 局域网的传输介质

局域网的传输媒体（即传输介质）包括有线媒体和无线媒体两类。有线传输媒体有同轴

电缆、双绞线、光纤。无线传输媒体有微波、红外线和激光等。

需要说明的是，不同的传输媒体的价格、容量、可靠性以及适合的应用场景有所不同。因此，在组建局域网时，通常要综合考虑用户的应用需求和不同传输媒体和传输技术的特性，选择合适的传输介质和传输技术。在第二章中，我们对各种传输媒体的特性进行了详细的介绍。

同轴电缆曾经是局域网中应用最多的一种传输媒体。采用同轴电缆的局域网，在物理上呈直观的总线形拓扑结构。同轴电缆的优点是抗干扰能力强，传输速率高。缺点是同轴电缆连接方式不便于主机搬移，且连接之处经常出现接触不良，甚至引起整个局域网的通信中断。

随着结构化布线技术的推广，双绞线，特别是无屏蔽双绞线 UTP，在局域网中得到了越来越多的应用。双绞线的优点是价格便宜、易于布线，而且单台机器的连接故障不致对整个局域网造成影响。当采用双绞线作为传输媒体时，局域网在物理上呈星形拓扑结构。

光纤具有抗干扰能力强、传输速率高、误码率低等优良特性，在数据通信中具有越来越重要的地位。光纤常用于高速主干链路和组建高速局域网。当采用光纤作为传输媒体时，局域网在物理上可呈环形或星形拓扑结构(如 FDDI 环网、千兆以太网等)。

无线传输媒体可以用于各种不便铺设电缆的场合。随着笔记本电脑、个人数字助理 PDA 等移动终端设备的日益普及，人们迫切要求享受无处不在、无时不在的网络通信服务。无线接入方式，可以满足这种特殊的服务需求。无线传输媒体的缺点是，具有潜在的电磁干扰、误码率高、带宽受限等。其优点是，支持移动环境、组网场地简洁清爽，还支持特殊应用环境(如会场、灾难营救场地、战场组网等)。随着无线局域网技术的不断发展和成熟，无线组网方式正得到越来越多的应用。

4.2 局域网信道的介质访问控制

4.2.1 介质访问控制基本概念

局域网的媒体访问控制，又称为介质访问控制，是为了协调多个站点对共享的传输媒体资源的使用，即规定局域网中的站点什么时间能向网络中发送数据的问题。有三类媒体访问控制方法。

(1) 基于信道划分的媒体访问控制

可以采用频分多路复用、时分多路复用、波分多路复用和码分多路复用等。基于信道划分的媒体访问控制方法的优点在于，用户使用各自划分的信道通信，不会和别的用户发生冲突。其缺点是，代价较高，不适合于局域网和某些广播信道的网络使用。频分多路复用、时分多路复用、波分多路复用、码分多路复用的概念和基本原理请参见物理层中的信道复用技术章节。

(2) 基于随机访问的媒体访问控制

基于随机访问的媒体访问控制方式下，信道并非固定分配给用户，所有的用户可随机地向信道中发送信息。其优点是信道共享性好，代价较小，控制机制简单。其缺点是，用户在发送数据时可能发生冲突(也称碰撞)。

(3) 基于轮询的媒体访问控制

基于轮询的媒体访问控制方式下，通过令牌环或者集中式轮询方式管理网络中多个用户对信道的使用权。

4.2.2 基于随机访问的介质访问控制

4.2.2.1 ALOHA 协议

1970 年代，夏威夷大学的 Norman Abramson 等人设计了一种新的信道分配算法，即 ALOHA 系统。该系统是用于基于地面的无线广播通信，但其基本思想适用于任何无协调关系的多用户竞争单信道使用权的系统。ALOHA 有两个版本，即纯 ALOHA 和时隙 ALOHA。纯 ALOHA 无需全局时间同步，而时隙 ALOHA 将时间分为离散的时隙，需要时间同步。

纯 ALOHA 系统的基本思想：用户只要有数据要发送，就发送。这样，不可避免地会发生冲突。利用广播的反馈性，发送方通过侦听信道判断发出的帧是否被破坏。对于 LAN，反馈信息很快就可以得到，对于卫星网，发送方在延迟 270ms 后才可确认是否发送成功。如果帧被冲突破坏，发送方等待一段随机时间后重发该帧。这种有多个用户以某种可能导致冲突的方式共享公用信道的系统被称为竞争系统。

在 ALOHA 系统中，帧产生和随机发送的示意图如图 4-3 所示。研究表明，当各帧长度相同时，ALOHA 系统取得最大吞吐率。

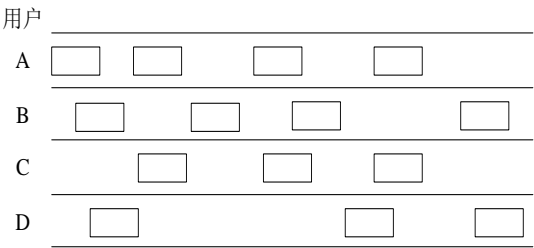


图 4-3 纯 ALOHA 系统中帧的发送示意图

ALOHA 信道的效率问题

首先考虑有无限多个交互式用户通过他们的计算机相互通信的情况，每个用户总是处于下述两种状态之一：信息输入或等待回复。开始时，所有的用户都在进行信息输入，输入完一行按下回车键后，就等待回复。计算机负责传输包含输入行的数据帧，并检查传输是否成功。如果成功，用户就会看到回复并继续输入信息；如果不成功，用户就继续等待，计算机的重传该帧直至发送成功。

用帧时（frame time）表示发送一个标准长度的帧需要的时间。假定无限多用户产生的新帧服从泊松分布，平均每帧时产生 S 个新帧，其中 $0 < S < 1$ 。此外，各站还要产生受到冲突

的重传帧。假设每帧时内发送帧的总数的平均值为 G 。显然 $G \geq S$ 。则信道的吞吐率 $S=G \cdot P_0$ 。其中, P_0 是发送的帧不会产生冲突的概率。

在任一帧时内产生 K 帧的概率服从泊松分布, 有:

$$P_r[k] = \frac{G^k e^{-G}}{K!} \quad (4-1)$$

由此可知, 在任一帧时内产生 0 帧的概率为 e^{-G} , 两个帧时内产生的帧数平均为 $2G$, 在整个冲突危险区内无任何其他帧产生的概率为 $P_0=e^{-2G}$, 得:

$$S = G e^{-2G} \quad (4-2)$$

因此, 当 $G=0.5$ 时, 吞吐率达到最大, 为 $S = \frac{1}{2e} \approx 0.184$ 。即, 纯 ALOHA 的信道利用率最大为 18%。

1972 年, Roberts 提出了一种对纯 ALOHA 的改进方法, 即时隙 ALOHA。其基本思想是, 把时间分成一个个离散的时间段, 每段时间对应一帧, 并设置一个特殊的站点, 在每段时间的开始发送时钟同步信号用于用户时间的同步。时隙 ALOHA 能够在纯 ALOHA 的基础上将冲突危险区域减少为原来的一半。研究表明, 时隙 ALOHA 的吞吐率的最大值为 $1/e \approx 0.368$, 是纯 ALOHA 最大吞吐率的两倍。

4.2.2.2 CSMA 协议

时隙 ALOHA 的最大信道利用率仅为 $1/e$, 因为各站可任意发送, 从不考虑其他站是否在发送数据, 不可避免地会造成冲突。

在局域网中, 一个站点可以检测到其他站点是否在发送数据, 从而相应地调整自己的动作, 以提高网络的吞吐率。载波侦听多点接入 (CSMA, Carrier Sense Multiple Access) 就是用于局域网的访问控制协议。

1975 年, Kleinrock 和 Tobagi 分析了几种典型的 CSMA 情形。

第一种 CSMA 协议为 1-持续 CSMA。当一个站点要发送数据时, 它首先侦听信道, 判断是否有其他站点正在发送数据。如果信道正忙, 就持续等待直到侦听到信道空闲时, 将数据发送出去。若发生冲突, 站点就等待一个随机长的时间, 然后重新开始。这里的 1 指的是站点一旦侦听到信道空闲, 其发送数据的概率为 1。这种协议中, 因站点发送数据前先侦听信道, 减少了对前面发送数据的站的冲突, 其性能较纯 ALOHA 和时隙 ALOHA 要好。

第二种 CSMA 协议为非持续 CSMA。在该协议中, 站点在发送数据之前, 侦听信道是否空闲, 如果没有其他站点发送数据, 就开始发送。如果信道忙, 则站点不再继续侦听信道, 而是等待一个随机的时间后, 再重复上述过程。与 1-持续 CSMA 相比, 该协议降低了站点间冲突概率, 具有较高的信道利用率, 但增大了发送延时。

第三种 CSMA 协议为 p-持续 CSMA, 用于分时隙信道。站点在发送数据之前, 首先侦听信道, 如果信道空闲, 就以概率 p 传送, 而以概率 $q=1-p$ 把该次发送推迟到下一时隙。如果下一时隙仍然空闲, 便再次以概率 p 发送而以概率 q 把该次发送推迟到下一时隙。此

过程一直重复，直到发送成功或者另外一站开始发送为止。若发生冲突，则等待一随机时间后重新开始。若站点一开始就侦听到信道忙，就等到下一时隙，然后开始上述过程。

4.2.2.3 CSMA/CD 协议

CSMA/CD 即带冲突检测的 CSMA 协议。当两个侦听到信道空闲并同时开始发送数据时，就会检测到冲突。一旦检测到冲突，就立即终止冲突帧的发送，然后等待一个随机的时间后，重新尝试发送。CSMA/CD 协议中，有争用、传输和空闲三种状态。

CSMA/CD 在局域网中的一个重要协议，将在以太网的 MAC 层章节中对 CSMA/CD 协议的工作过程、信道利用率等进行详细分析。

4.2.2.4 CSMA/CA 协议。

CSMA/CA 即带冲突避免的 CSMA 协议。该协议用于无线局域网。无线局域网存在隐藏终端和暴露终端的问题，不能像以太网那样采用 CSMA/CD 协议。

例如，当所有的站点不全在相互之间的无线范围内时，网络内部分站点发送的信息另一部分站点接收不到，于是就错误地以为信道空闲而开始发送。

CSMA/CA 是无线局域网中的重要 MAC 协议，实现在 IEEE802.3 标准中，将在无线局域网章节对其工作原理进行详细介绍。

4.2.3 基于轮询访问的介质访问控制

基于轮询访问的介质访问控制通常采用令牌传递的方法，包括令牌总线和令牌环两种。

4.2.3.1 令牌总线访问控制

在基于总线的 CSMA/CD 协议中，站点发送一帧的总延时具有很强的不确定性，难以用于实时系统和具有优先级要求的系统。而环网中站点发送帧的最长等待时间确知，但只要环中一个站点发生故障，整个环网就会瘫痪。令牌总线（Token Bus）就是在物理总线上实现令牌传递控制的一个介质访问控制协议。IEEE802.4 标准对令牌总线作了详细规定。

令牌总线网中，各个站点连接到总线式电缆上。在逻辑上，所有站点构成一个环，每个站点都知道自己左边和右边的站点的地址。逻辑环初始化后，站号最大的站点可以发送第一帧。然后发送一个令牌给其后的邻站，把发送权交给邻站，令牌是一个代表发送权的控制帧。令牌绕逻辑环传送，站点只有获得令牌才能够发送帧。在令牌沿着逻辑环传递时，任一时刻只有一个站点获得令牌，因此，令牌总线网中不会产生冲突。

需要注意的是，逻辑环上的站点次序与总线上的站点的实际顺序无关。因为总线是一个广播信道，每个站点都能接收到所有的帧，但是会把不能发给自己的帧丢弃掉。令牌环协议中还实现了增加和删除站点的功能，以实现网络中站点的加入和退出。

4.2.3.2 令牌环网

环网自上世纪 70 年代提出以来，长期应用于广域网和局域网。环网中，通过站点以及相邻站点之间连接电缆，构成一个圆环。环不是一个广播信道，而是单个的点到点连接所构成

的。令牌环的一个重要优点是，信道访问时间具有确切的上界。正是因为令牌环网具有的优点，IBM 公司将其作为专有局域网技术。IEEE802.5 标准对令牌环网的作了详细规定。

在令牌环中，当所有的站点都空闲时，令牌在环网中绕环传递。令牌是一种特殊的比特组合。一个站点想要发送数据，必须先获得令牌，并将令牌从环中删除。整个环中只有一个令牌，因此，一个时刻只有一个站点在发送数据，从而实现了无冲突的信道访问。

4.3 以太网技术

在局域网中，以太网技术发展迅猛，其数据率从每秒几兆比特很快演进到每秒百兆比特、吉比特甚至 10 吉比特。本节将详细讨论以太网的工作原理。

4.3.1 以太网概述

以太网是美国 Xerox 公司的 Palo Alto 研究中心于 1975 年研制成功的。最初的以太网采用同轴电缆这一无源传输媒体作为总线来传输数据，并以历史上用于表示传播电磁波的物质——以太(Ether)命名。以太网是以 CSMA/CD 方式工作的一种总线式局域网。

随后，在 1980 年 9 月，DEC 公司、Intel 公司和 Xerox 公司联合提出了以太网的工业标准，即以太网规范 V1.0，该规范定义了以太网数据链路层和物理层规范。由于以太网规范由 DEC、Intel 和 Xerox 三个公司提出，所以又称为 DIX 规范。1982 年又公布了以太网规范 V2.0。同年年底，3Com 公司率先向市场推出其以太网产品，其后，DIX 规范为工业界广泛接受，成为事实上的局域网工业标准。

在此基础上，IEEE802 委员会的 802 工作组于 1983 年制订了第一个 IEEE 的局域网标准 IEEE 802.3，定义的数据率为 10Mb/s。802.3 局域网标准采用 CSMA/CD，并定义了 LLC 子层，允许基于这两种标准实现的局域网可以互操作。以太网标准 DIX v2 与 IEEE 802.3 标准在帧格式上存在较小的差别。

当时，有多种类型的局域网，如 802.4 令牌总线网、802.5 令牌环网等。为了使数据链路层能更好地适应多种局域网标准，IEEE 802 委员会在局域网的数据链路层定义了两个子层，即逻辑链路控制 LLC (Logical Link Control)子层和媒体接入控制 MAC (Medium Access control)子层。与接入传输媒体有关的内容放在 MAC 子层，而与传输媒体无关的链路控制部分放在 LLC 子层。这样可以通过 LLC 子层来屏蔽底层传输媒体和访问控制方法的异构性，实现多种类型局域网之间的互操作。

随着以太网技术的发展，以太网得到了越来越广泛的应用。到了 20 世纪 90 年代后，以太网在局域网市场中取得了垄断地位。实际应用的局域网类型日趋单一化，因此 LLC 子层的作用已经不大，很多厂商生产的网卡上仅实现了 MAC 协议。

以太网实际上是一种总线式局域网。总线式拓扑结构如图 4-3 所示。

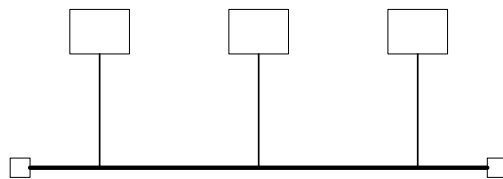


图 4-3 总线式局域网的拓扑结构

总线式局域网中的计算机通过网卡(即网络适配器)连接到一条总线上,并采用基于总线的广播方式进行通信。其中任一台计算机向总线中发送数据,网络上所有计算机都能接收到。

早期,总线式局域网通常采用同轴电缆作为传输媒体。为了防止信号发射,总线的两端采用匹配电阻作为信号终接器。总线式局域网采用分布式方式工作,网络上所有主机是对等的,不存在主从关系。

随着局域网技术和结构化布线技术的发展,目前正广泛采用双绞线作为传输媒体。这时,局域网在物理上呈现以集线器为中心的星形拓扑结构。但需要注意的是,这种用双绞线连接的局域网,虽然在物理上呈星形拓扑,但在逻辑上仍然属于总线式的,我们可以把集线器看作是总线的汇聚。

在这种总线式局域网中,至少有两个需要解决的问题:

(1) 总线式广播信道中,如何实现计算机之间一对一的通信?

为了在总线上实现一对一的通信,可以使每一台计算机拥有一个与其他计算机都不同的地址。在发送数据帧时,在帧的首部写明接收站的地址。仅当数据帧中的目的地址与计算机的地址一致时,该计算机才能接收这个数据帧。计算机对不是发送给自己的数据帧,则一律丢弃。

(2) 总线式广播信道中,如何协调多台计算机对总线传输媒体的访问控制问题?

其实,局域网的媒体访问控制 MAC 协议就是围绕这个问题展开来的。我们将重点介绍以太网使用的载波监听多点接入/冲突检测(CSMA/CD)的媒体访问控制方法。

4.3.2 以太网工作原理

1. 载波监听多点接入/冲突检测(CSMA/CD)

CSMA/CD 采用分布式控制方法,总线上的各个计算机通过竞争的方式,获得总线的使用权。只有获得总线使用权的计算机才能向总线上发送数据,而发送的数据能被连在总线上的所有计算机接收到。

CSMA/CD 的具体含义解释如下:

(1) 载波监听 是指每个计算机在发送数据之前先要检测总线上是否有其他计算机在发送数据,如果有,则暂时不发送数据,以减少发生冲突的机会。

(2) 多点接入 是指在总线式局域网中,有多台计算机连接在一根总线上,共享总线的信道资源。

(3) 冲突检测 是指发送数据的计算机在发送数据的同时,还必须监听传输媒体,判断

是否发生了冲突。因为如果存在多个计算机都在发送数据，就会形成信号的叠加，即冲突，从而造成接收方无法接收到正确的数据。一旦检测到冲突，发送方应立即停止发送，等待一个随机时间间隔后重发。

需要注意的是，当一台计算机监听到总线上没有数据信号时，情况可能有两种。

一种情况是，确实没有其它计算机在向总线上发送数据。

另一种情况是，总线上正在传输其它计算机发送的数据，只不过数据信号此时还没有传播到该计算机的网络接口。

由此可知，如果只有载波监听，并不能完全避免冲突的发生。因为当一台计算机监听到总线处于空闲状态时，可能总线并非真正的空闲。实际上，当网络处于轻载时，出现上述第一种情况的概率较大，而当网络处于重载时，出现第二种情况的概率较大。

冲突检测正是为了弥补载波监听的不足而设计的。在检测到发生冲突时，发送方应立即停止发送，以免浪费总线信道资源。冲突检测的改进方案规定：在总线上的计算机检测到冲突时，不仅立即停止发送数据，而且还向总线上发送一个一定长度的冲突加强信号，以让其它的计算机(包括正在发送的和正在监听的)都确知此时总线上已经发生了冲突。

CSMA/CD 中的载波监听并不能完全避免冲突，而冲突检测只是为了让总线上的所有计算机能及时感知到冲突的发生。无论如何，冲突必然会造成总线上传输的一部分数据被白白地浪费掉，形成很多无用的残帧，从而影响总线式局域网的信道有效利用率的提高。而降低总线式局域网上的发生冲突的概率，是提高局域网信道利用率的重要途径。

那么，如何降低总线式局域网上的发生冲突的概率呢？这需从局域网采用的帧长和媒体访问控制方法上进行一些优化设计。

2. 争用期和最短有效帧长

假设有一个以同轴电缆为传输媒体的总线式局域网，其上有A、B两台计算机，两者之间的电缆长度为 $L(m)$ ，总线局域网的数据传输速率 $C(bit/s)$ ，电磁波在同轴电缆中的传播速率为 $v m/s$ ($=2 \times 10^8 m/s$)。我们将总线上的端到端单程传播时延记为 τ 。其中， $\tau = L/v$ 。冲突检测示意图如图4-4所示。

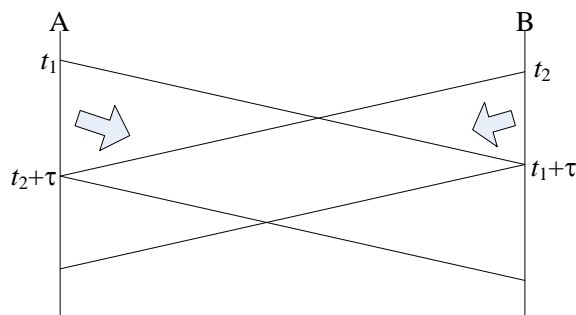


图 4-4 冲突检测示意图

计算机 A 在 t_1 时刻监听到总线为空闲，并开始向总线上发送数据帧。计算机 B 也有数据需要发送，并在 t_2 时刻监听到总线也为空闲，并开始向总线上发送数据帧。有：

$$-\tau < t_2 - t_1 < \tau. \quad (4-1)$$

此时，计算机 A 和 B 发送的数据信号一定会在总线上中间某个位置发送信号叠加(即冲突)，发生过冲突的两路信号沿着原先的方向继续传播，分别于 $t_1 + \tau$ 时刻和 $t_2 + \tau$ 时刻达到计算机 B 和 A。此时，计算机 A 和 B 才知道发生了冲突。

以计算机 A 为例，从开始发送数据的时刻 t_1 到确知发生了冲突的时刻($t_2 + \tau$)，这段时间长度为： $\Delta t = t_2 + \tau - t_1$ 。 (4-2)

由(4-1)和(4-2)可知， $0 < \Delta t < 2\tau$ 。

因此，我们知道，总线式局域网中，一台计算机从开始发送数据起，最多要经过 2τ 时间就可确知是否发生了冲突。

我们将总线式局域网的端到端往返时延 2τ 称为**争用期**，也称为**冲突窗口**。

因为从开始发送数据时刻起，在 $0 \sim 2\tau$ 时间内，存在着冲突的可能。如果发生冲突，则一定会在 $0 \sim 2\tau$ 时间内检测到。发生了冲突的帧其发送时间长度不会超过 2τ 。

而经过 2τ 时间之后(假设需要发送的数据帧足够长)，如果还没有发生冲突，则局域网其它计算机都能感知到总线上有数据在传输。此时，载波监听才开始真正起作用。因为其它计算机都会等待，从而避免冲突的发生。

由此可以知道，如果数据帧长度过短，在争用期 2τ 时间内即可发送完毕，那么，发送方和接收方都无法正确判别此次发送的数据是否发生了冲突。因为在 $0 \sim 2\tau$ 时间内，极有可能发生了冲突。

因此，为了使发送方和接收方都能判别发送和接收的数据帧是否成功，应使得数据帧发送时间长度超过 2τ 。即，局域网的最小有效帧长不能小于争用期内传输的比特数。

争用期，端到端往返时延 2τ ，其物理意义在于：提供了设计总线式局域网中最小有效帧长的计算依据。

例 4-1：假定 100m 长的 CSMA/CD 网络的数据率为 100Mbit/s。设信号在网络上的传播速率为 2×10^8 m/s。求能够使用此协议的最短帧长。

解：争用期 $2\tau = 2 \times 100 / (2 \times 10^8) = 1 \times 10^{-6}$ (s)

最短帧长为争用期内传输的比特数，即：

$$L_{\min} = 2\tau \cdot C = 1 \times 10^{-6} \times 1 \times 10^8 = 100 \text{ (bit)}$$

考虑到端到端传播时延、转发器增加时延、冲突加强信号的持续时间，以及其它多种因素，实际所取的争用期值往往大于端到端传播时延。

对于 10Mbit/s 的局域网，实际取 $51.2\mu\text{s}$ 为争用期的长度，在争用期内可发送 512bit，即 64 字节。如果实际需要发送的数据长度不足 64 字节，则实行填充。规定最短有效帧长为 64 字节，凡长度小于 64 字节的帧都是由于冲突而异常中止的无效帧。

实际上，帧长越长，帧首部的控制信息所占的开销比例就越小，局域网的有效信道利用率就越大。但由于考虑到网络接口缓存大小限制、多点接入的公平性以及其它多种因素，每个局域网都还要规定一个最大传送单元(MTU)的限制。

4.4 以太网的 MAC 层

4.4.1 MAC 地址

局域网中的每台主机必须具有一个可唯一标识其地址的标识符。局域网中可用的地址格式一般有静态分配和动态分配格式两种。

(1)静态分配的地址格式 该地址由网络硬件厂商在生产硬件(如网络接口卡, 或称网卡)时静态指定。因此, 局域网地址又称为物理地址或硬件地址。静态地址通常占 48 位。为了保证地址的全球唯一性, IEEE 成立了局域网全局地址的注册管理机构。该 48 位中的前一部分(一般为 24 位)由 IEEE 局域网全局地址的注册管理机构分配给不同的网络硬件厂商, 另一部分(一般为 16 位)由厂商为其产品编号, 而其它位保留它用。

(2)动态分配的地址格式 该地址是在安装网络时由系统管理员分配给上网的设备, 或者是在主机运行时, 通过网络请求而获得的。这种地址仅适用于单个网络, 地址长度一般为 16 位。

静态地址的优点是永久性, 缺点是地址占用空间较大, 影响通信的效率。

动态地址的优点是地址空间较小, 也不需要专门的机构来管理地址的分配问题, 缺点是地址的临时性, 以及动态获取地址需要消耗一定的网络资源。

以太网采用的地址为扩展的唯一标识符 EUI-48 格式的 MAC 地址, 占 48 位(6 个字节), 分为机构唯一标识符和扩展标识符两部分。并通过特定比特位的设置来区分全局管理和本地管理地址, 以及区分单播地址和组播地址。

网卡从网络上每收到一个 MAC 帧就首先用硬件检查 MAC 帧中的 MAC 地址。如果是发往本站的帧则收下, 然后再进行其他的处理。否则就将此帧丢弃, 不再进行其他的处理。这样做就不浪费主机的处理机和内存资源。

4.4.2 MAC 帧格式

有两种局域网 MAC 帧结构, 一种是以太网 DIX V2 标准定义的 MAC 帧结构, 另一种是 IEEE 802.3 或 ISO 8802/3 标准定义的 MAC 帧结构。两种 MAC 帧结构的不同主要在于地址字段的长度和长度/类型字段的定义上。这两种 MAC 帧结构如图 4-5 所示。

7	1	6	6	2	0—1500	0—46	4 (字节)
P	SFD	DA	SA	T	DATA	PAD	FCS

(a) DIX V2 MAC 帧结构

7	1	2或6	2或6	2	0—1500	0—46	4 (字节)
P	SFD	DA	SA	L	DATA	PAD	FCS

(b) IEEE 802.3 MAC 帧结构

图 4-5 两种 MAC 帧结构

MAC 帧结构内含 8 个字段,即前导符(P)、帧开始标志(SFD)、目的地址(DA)、源地址(SA)、数据类型(T)或数据长度(L)、用户数据(DATA)、填充字段(PAD)、帧校验序列(FCS)。MAC 帧的详细结构定义如图 4-5 所示。

前导符字段(P): 占 7 个字节,格式为“10101010...”,0 和 1 相间,前导符的目的是使接收方进入同步状态,以便做好接收数据的准备。

帧开始标志(SFD): 占 1 个字节,值为“10101011”,SFD 紧接着前导符字段后面,表示本帧的起始。

目的地址(DA)、源地址(SA): DIX V2 标准中规定 MAC 帧中的目的和源 MAC 地址字段各占 6 个字节。而 IEEE 802.3 标准规定目的和源 MAC 地址字段各占 2 个或 6 个字节。目的地址指该帧期望发送的目的地,可以是单播地址(表示本帧只能由地址指定的某个接收结点接收)、组播地址(表示本帧能由地址指定的某些结点接收)或者广播地址(表示本帧可以由特定区域内的所有接收结点接收,该特定的区域也称为广播域)。源地址指发送该帧的发送结点地址。IEEE 802.3 对 CSMA/CD 网络的地址结构进行定义。规定:单播地址的地址字段最高位为 0,表示网络中某个特定的结点;组播地址的地址字段最高位为 1,表示网络中的某些结点;广播地址的地址字段所有位为 1,表示网络中所有结点。地址字段的次高位表示采用的地址为本地地址还是全局地址。本地地址为 2 字节地址,由网络管理员分配;全局地址为 6 字节地址,由 IEEE 分配,要求全球唯一。尽管标准中定义的地址字段可以是 2 个或者 6 个字节,但在同一个局域网中地址结构的长度应当一致。

数据类型字段(T)或数据长度字段(L): 占 2 个字节,DIX V2 标准规定了数据类型字段,而 IEEE 802.3 标准规定了数据长度字段,表示 DATA 字段的实际长度。

用户数据字段(DATA): 长度小于等于 1500 字节。存放高层 LLC 的协议数据单元。

填充字段(PAD): 长度小于等于 46 字节。采用填充无用字符的方式保证整个帧的长度不小于 64 字节。

帧校验序列(FCS): 占 4 个字节。采用循环冗余校验码。

4.4.3 CSMA/CD 的工作过程

CSMA/CD 方式的发送方工作过程为:

(1) 当某个结点的 LLC 协议实体希望发送数据时,将 LLC 帧传给下层的 MAC 协议实体,MAC 协议实体将 LLC 帧封装在用户数据字段,形成 MAC 帧。

(2) MAC 协议实体监听传输媒体,检查是否有信号正在传输。

(3) 如果媒体上有信号在传输,则转(2)继续监听,否则,发送数据,同时对媒体继续监听。

(4) 如果在发送数据过程中没有检测到冲突,则本次发送任务成功完成。否则,立即终止本次发送过程,并向媒体发送一个冲突加强的信号。以使其它结点都能感知到发生冲突,

MAC 协议实体计算发送失败的次数。

(5) 如果在发送失败次数小于等于某个阈值，根据失败次数执行二进制指数退避算法，计算得到某个退避时间值，等待该退避时间，转(2)准备重新发送。否则，停止发送尝试，通知上层 LLC 实体，报告可能出现网络故障。

CSMA/CD 方式的接收方工作过程为：

(1) 局域网上的每个站点的 MAC 协议实体都监听传输媒体，如果有信号传输，则接收信息，得到 MAC 帧；其中，对于因冲突造成的长度不足最小有效帧长的残帧，MAC 实体不予理会。

(2) MAC 实体分析帧中的目的地址，如果目的地址为本站点地址，就复制接收该帧。否则，简单丢弃该帧。特别地，对于具有组播地址和广播地址的数据帧，将会有多个站点复制和接收该帧。

其中，CSMA/CD 方式在发生冲突时采用的二进制指数退避算法如下：

假设重传次数为 rtx_count ，允许的最大重传次数为 rtx_count_max ，通常为 16。如果 $rtx_count \leq rtx_count_max$ ，则算法过程为：

- (1) 计算 $k = \min[rtx_count, 10]$;
- (2) 从 $0, 1, \dots, (2^k - 1)$ 这 2^k 个整数中随机地选择一个数，记为 r ;
- (3) 计算退避时间 $time_backoff = 2\tau \cdot r$ 。

4.4.4 以太网的信道利用率

采用 CSMA/CD 作为媒体访问控制方法，无法避免冲突的发生。冲突必然造成本次发送过程失败，从而浪费网络总线信道资源，造成信道利用率的下降。

那么，从统计平均的角度看，CSMA/CD 方式下信道利用率究竟可以达到多高呢？

为了便于分析，我们进行如下假设：争用期长度为 2τ ，帧长为 L bit，数据发送速率为 C bit/s，帧间间隔为 τ ，即发送成功后要经过时间 τ 使信道转为空闲才发送下一帧。假设检测到冲突后并不发送冲突加强信号。总线局域网上有 N 个站，每个站发送帧的概率都是 p 。帧发送时延为 $T_0 = L/C$ (s)。争用期平均个数为 N_c 。

一个帧从开始发送，然后经过若干次冲突检测和重传，到最后发送成功的整个过程中信道占用时间如图 4-6 所示。

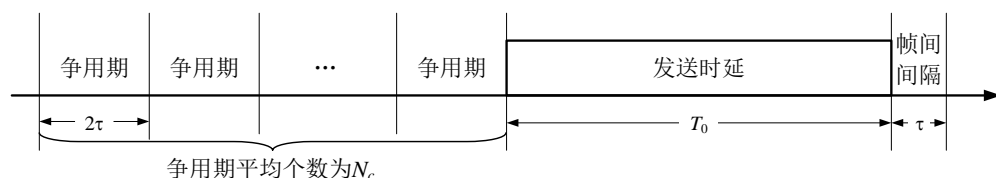


图 4-6 CSMA/CD 的信道占用时间示意图

发送一帧所需的平均时间为 T_{av} ，则

$$T_{av} = 2\tau \cdot N_c + T_0 + \tau \quad (4-3)$$

又因为，一帧的发送时延为 T_0 ，所以 CSMA/CD 方式下局域网平均信道利用率(也称为归一化吞吐量)为：

$$\eta = \frac{T_0}{T_{av}} = \frac{T_0}{2\tau N_c + T_0 + \tau} \quad (4-4)$$

为了计算(4-4)式的值，我们需要先计算争用期的平均个数 N_c 。

令 P_A 为 N 个站中有一个站发送帧，而其它($N-1$)个站均不发送帧，此时，没有冲突，发送数据成功。发送成功的概率为

$$P_A = C_N^1 \cdot p(1-p)^{N-1} = N \cdot p(1-p)^{N-1} \quad (4-5)$$

在成功发送一帧之前，所经过的争用期个数是一个随机变量，其值为 0 到某阈值之间的随机整数，我们可以求出其数学期望值。

争用期个数为 i 的概率为：

$$\begin{aligned} P[\text{争用期个数为 } i] &= P[\text{前}(i-1)\text{次发送失败 且第 } i \text{ 次发送成功}] \\ &= (1-P_A)^{i-1} P_A \end{aligned} \quad (4-6)$$

为了简单起见，假定争用期个数没有限制。那么，可以计算出争用期个数的数学期望(平均个数)为

$$N_c = \sum_{i=1}^{\infty} i P[\text{争用期个数为 } i] = \sum_{i=0}^{\infty} i (1-P_A)^{i-1} P_A = P_A^{-1} - 1 \quad (4-7)$$

将式(4-7)代入式(4-4)，可得 CSMA/CD 方式下局域网平均信道利用率为：

$$\eta = \frac{T_0}{2\tau N_c + T_0 + \tau} = \frac{T_0}{2\tau(P_A^{-1} - 1) + T_0 + \tau} = \frac{1}{1 + a(2P_A^{-1} - 1)} \quad (4-8)$$

其中， $a = \tau/T_0$ ，表示总线的端到端传播时延与帧的发送时延的比值。

在总线式局域网中，端到端传播时延通常是确定的。如果帧长越长，帧的发送时延 T_0 就越大， a 值就越小，由式(5-8)，局域网的平均信道利用率就越大。

因此，帧长取较大的值，使得 a 值较小，对于提高 CSMA/CD 局域网的平均信道利用率是有利的。我们还应该注意到，局域网中的帧长，一方面受到高层 LLC 子层或网络层传递下来的实际数据长度的限制，同时又受到局域网的最大传送单元 MTU 的限制。所以，一旦给定了 MTU 的值， a 值的最小值也就确定了。

从式(4-8)可知，局域网的 CSMA/CD 方式将在 a 值取最小值且 P_A 取最大值的情况下获得最大平均信道利用率。

下面，我们来讨论，在 a 值取某个确定值的情况下，局域网最大平均信道利用率的问题。此时，我们只要计算出 P_A 的最大值即可得到最大平均信道利用率。

根据式(4-5)，以 p 为变量对 P_A 求导，可得，当 $p=1/N$ 时， P_A 取最大值 P_{Amax} 。

$$P_{Amax} = \left(1 - \frac{1}{N}\right)^{N-1} \quad (4-9)$$

由此可见，发送成功的概率 P_A 的最大值 P_{Amax} 与局域网中的站点个数 N 有关。局域网中的站点个数 N 越小，则发送成功的概率 P_{Amax} 越大； N 越大，则 P_{Amax} 越小。 P_{Amax} 随 N 变化的数值对应关系如表 4-1 所示。

表 4-1 P_{Amax} 随 N 变化的数值对应关系

N	2	4	8	16	32	64	128	256	∞
P_{Amax} 对应的 p	0.5	0.25	0.125	0.063	0.031	0.016	0.008	0.004	$\rightarrow 0$
P_{Amax}	0.5	0.422	0.393	0.380	0.374	0.371	0.369	0.369	0.368

进一步，我们可以在给定总线局域网的总线长度、数据传输速率和帧长的情况下，计算出局域网的最大平均信道利用率 η_{max} 随站点个数 N 变化的趋势。

假设总线长度为 1km，信号传播速率为 $2 \times 10^8 \text{m/s}$ ，数据传输速率为 5Mb/s。

对于各种不同的帧长情况，如 128，256，512 和 1024bit，可以计算得到，局域网的最大平均信道利用率 η_{max} 随站点个数 N 变化的趋势如图 4-7 所示。

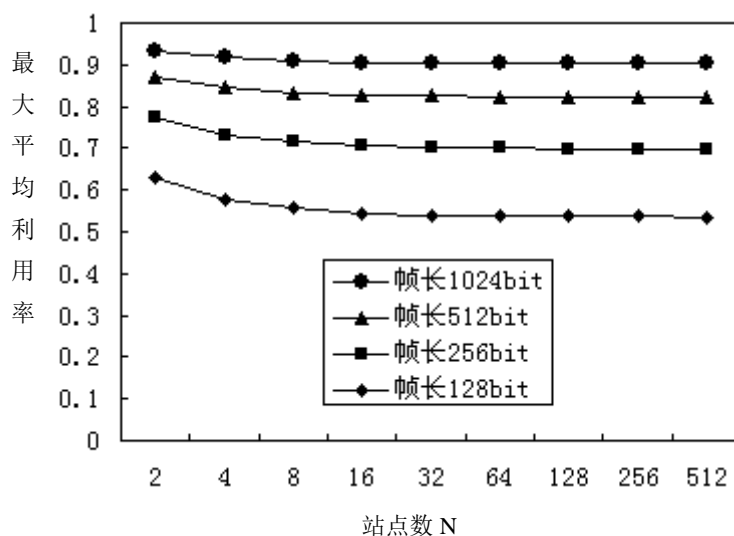


图 4-7 在各种帧长情况下最大平均信道利用率随 N 变化的趋势

从图中可以看出，在站点个数 N 相同的情况下，最大平均信道利用率随帧长的增大而增大，当帧长取 512 比特（即 64 字节）时，局域网最大平均信道利用率可达到 80% 以上。而以以太网规定最小有效帧长为 64 字节，从最大平均信道利用率上看具有一定的合理性。

4.5 以太网的组网方式

4.5.1 连接方式

以太网可以使用同轴电缆、双绞线或光缆作为传输媒体，其中，同轴电缆又分为粗缆和细缆两种。每种传输媒体对应着不同的物理层。以太网的物理层标准有：10BASE5(粗缆)、10BASE2(细缆)、10BASE-T(双绞线)和 10BASE-F(光缆)。这里“BASE”表示电缆上的信号是基带信号，采用曼彻斯特编码。BASE 前面的数字“10”表示数据率为 10Mb/s，而后面的数字 5 或 2 表示每一段电缆的最大长度为 500 米或 200 米。“T”代表双绞线，而“F”代表光纤。目前使用得最广泛的是双绞线传输媒体。

采用粗缆、细缆和双绞线连接的以太网如图 5-7 所示。图 5-7(a)是 10BASE5 以太网的连接方法，为粗缆以太网。图 5-7(b)是 10BASE2 以太网的连接方法，为细缆以太网，图 5-7(c)是使用集线器的双绞线以太网。

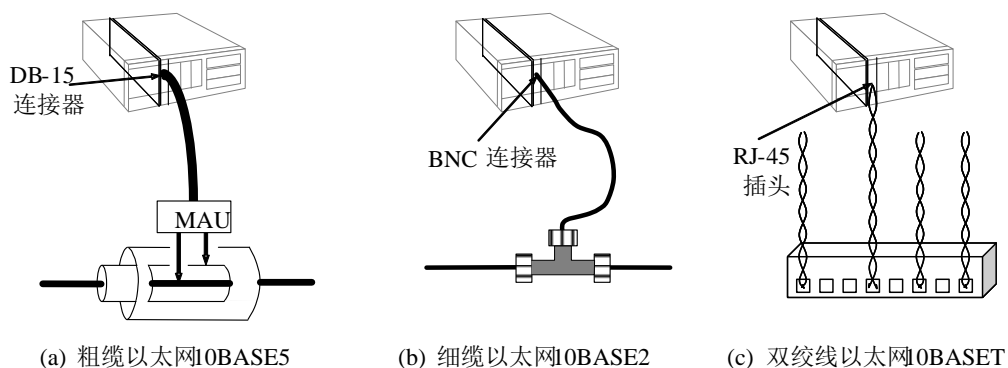


图 4-7 以太网的连接方法

采用粗缆和细缆同轴电缆连接的以太网目前已基本不用了，使用得最多的是双绞线连接的以太网 10BASE-T。1990 年 IEEE 制订了星形网 10BASE-T 的标准，即 802.3i。双绞线通过 RJ-45 接头与集线器和网卡相连，由于集线器使用了大规模集成电路芯片，因此具有成本低，可靠性高的优点，被广泛使用。

4.5.2 以太网级联与扩展

当需要把多个局域网连接成一个更大的局域网时，就要对局域网进行扩展。可以在物理层扩展，也可以在数据链路层扩展。

4.5.2.1 在物理层扩展局域网

如果需要将同一类型的多个局域网连接起来，则可以在物理层对局域网进行扩展，即采用转发器或集线器将多个局域网相连接。

例如，一个学院的三个系各有一个 10BASE-T 局域网，可通过一个主干集线器互相连接起来，成为一个更大的扩展的局域网，如图 4-8 所示。

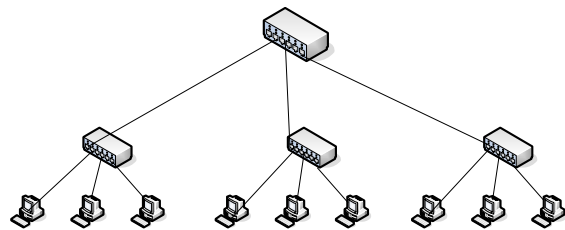


图 4-8 用集线器扩展局域网

用集线器在物理层扩展局域网，扩大了局域网覆盖的地理范围，可以使不同部门局域网的计算机可以相互通信。但需要注意的是，用集线器连接起来的局域网构成了一个更大的冲突域，最大总吞吐量并没有提高。

4.5.2.2 在数据链路层扩展局域网

当连接多个不同类型的局域网时，就需要在数据链路层扩展局域网，使用的设备为网桥。网桥工作在数据链路层，它根据 MAC 帧的目的地址对收到的帧进行转发。网桥具有过滤帧的功能。当网桥收到一个帧时，并不是向所有的端口转发此帧，而是先检查此帧的目的 MAC 地址，然后再确定将该帧转发到哪一个端口。

1. 网桥的内部结构

最简单的网桥有两个端口。网桥的每个端口与一个局域网网段相连。网桥的工作原理如图 4-9 所示。

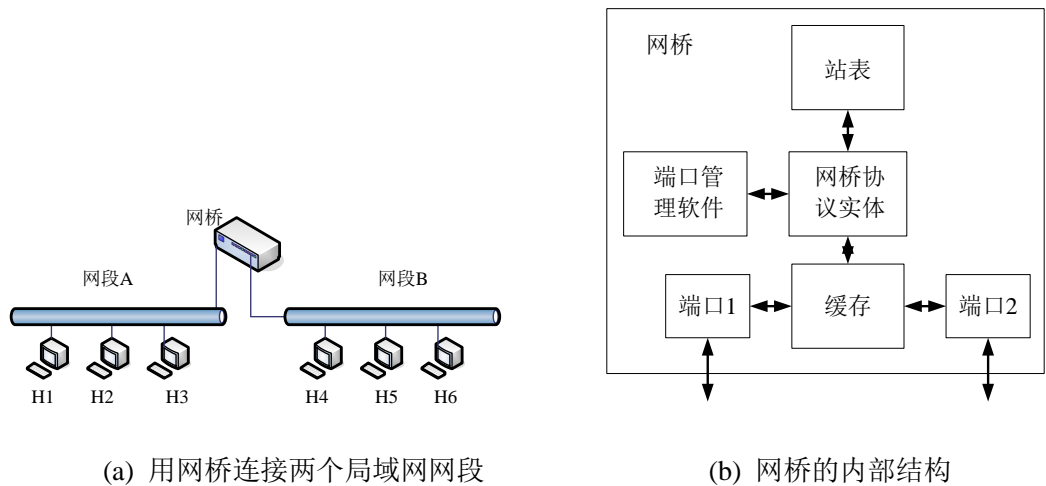


图 4-9 网桥的工作原理图

图中，网桥有两个端口，端口 1 与网段 A 连接，端口 2 与网段 B 连接。网桥从端口接收网段上传送的各种帧。每当收到一个帧时，就先暂存在其缓存中。若此帧未出现差错，且欲

发往的目的站 MAC 地址属于另一个网段, 则通过查找转发表, 将收到的帧送往对应的端口转发出去。若该帧出现差错, 则丢弃此帧。因此, 仅在同一个网段中通信的帧, 不会被网桥转发到另一个网段去, 因而不会加重整个网络的负担。

使用网桥扩展局域网的优点如下:

(1) 过滤通信量。网桥工作在链路层的 MAC 子层, 可以使局域网各网段成为隔离开的冲突域, 从而减轻了扩展的局域网上的负荷, 同时也减小了在扩展的局域网上的帧平均时延。工作在物理层的转发器就没有网桥的这种过滤通信量的功能。

(2) 扩大了物理范围, 因而也增加了整个局域网上工作站的最大数目。

(3) 提高了可靠性。当网络出现故障时, 一般只影响个别网段。

(4) 可互连不同物理层、不同 MAC 子层和不同速率(如 10Mb/s 和 100Mb/s 以太网)的局域网。

使用网桥扩展局域网具有一下缺点:

(1) 由于网桥对接收的帧要先存储和查找转发表, 然后才转发, 不可避免地增加了转发的时延。

(2) 在 MAC 子层并没有流量控制功能。当网络上的负荷很重时, 网桥中的缓存的存储空间可能不够而发生溢出, 以致产生帧丢失的现象。

(3) 具有不同 MAC 子层的网段桥接在一起时, 网桥在转发一个帧之前, 必须修改帧的某些字段的内容, 以适合另一个 MAC 子层的要求, 从而增加了处理时延。

(4) 网桥只适合于用户数不太多(不超过几百个)和通信量不太大的局域网, 否则有时还会因传播过多的广播信息而产生网络拥塞。

2. 透明网桥

目前使用得最多的网桥是透明网桥(transparent bridge)。IEEE 制订了透明网桥的标准 IEEE802.1D。“透明”是指局域网上的站点并不知道所发送的帧将经过哪几个网桥, 因为网桥对各站来说是看不见的。

网桥在刚刚连接到局域网上时, 其转发表是空的。若网桥收到一个帧, 它将按照以下算法处理该帧和建立起自己的转发表。

(1) 从端口 x 收到无差错的帧(如有差错即丢弃), 在转发表中查找目的站 MAC 地址。

(2) 如有, 则查找出到此 MAC 地址应当走的端口 d, 然后进行(3), 否则转到(5)。

(3) 如到这个 MAC 地址去的端口 d=x, 则丢弃此帧(因为这表示不需要经过网桥进行转发)。否则从端口 d 转发此帧。

(4) 转到(6)。

(5) 向网桥除 x 以外的所有端口转发此帧(这样做可保证找到目的站)。

(6) 如源站不在转发表中, 则将源站 MAC 地址加入到转发表, 登记该帧进入网桥的端口号, 设置计时器。然后转到(8)。如源站在转发表中, 则执行(7)。

(7) 更新计时器。

(8) 等待新的数据帧。转到(1)。

这时，网桥就在转发表中登记以下三个信息：(1)站地址：登记收到的帧的源 MAC 地址。(2)端口：登记收到的帧进入该网桥的端口号。(3)时间：登记收到的帧进入该网桥的时间。

网桥在这样的转发过程中就可逐渐将其转发表建立起来。这里特别要注意的是，转发表中的 MAC 地址是根据源 MAC 地址写入的，但在进行转发时是将此 MAC 地址当作目的地址。这是因为网桥的转发表根据的原理就是：如果网桥现在能够从端口 x 收到从源地址 A 发来的帧，那么以后就可以从端口 x 将一个帧转发到目的地址 A。

局域网的拓扑经常会发生变化。局域网上的工作站和网桥可能时而接通电源时而关掉电源。为了使转发表能反映出整个网络的最新拓扑，所以还要将每个帧到达网桥的时间登记下来，以便在转发表中保留网络拓扑的最新状态信息。具体的方法是，网桥中的端口管理软件周期性地扫描转发表中的项目。只要是在一定时间(例如几分钟)以前登记的都要删除。这样就使得网桥中的转发表能反映当前网络拓扑状态。

透明网桥使用了一个支撑树(spanning tree)算法，即互连在一起的网桥在进行彼此通信后，就能找出原来的网络拓扑的一个子集，在这个子集里整个连通的网络中不存在回路，即在任何两个站之间只有一条路径。一旦支撑树确定了，网桥就会将某些接口断开，以确保从原来的拓扑得出一个支撑树。

采用支撑树算法，使得构成的转发路径既连通又不存在回路，从而可以避免帧在网络中不断地兜圈子。

3. 源路由网桥

源路由(source route)网桥是一种由发送帧的源站负责路由选择的网桥，要求源站在发送帧时将详细的路由信息放在帧的首部中。源站以广播方式向欲通信的目的站发送一个发现帧(discovery frame)，以找到合适的路由。发现帧将在整个扩展的局域网中沿着所有可能的路由传送。在传送过程中，每个发现帧都记录所经过的路由。当这些发现帧到达目的站时，就沿着各自的路由返回源站。源站在得知这些路由后，从所有可能的路由中选择一个最佳路由。以后凡从这个源站向该目的站发送的帧的首部，都必须携带源站所确定的这一路由信息。发现帧还有另一个作用，就是帮助源站确定整个网络的最大传送单元 MTU。

源路由网桥的缺点是缺乏透明性。主机必须知道网桥的标识以及连接到哪一个网段上。使用源路由网桥可以利用最佳路由。若在两个局域网之间使用并联的源路由网桥，则可使通信量较平均地分配给每一个网桥，从而能在不同的链路中进行负载均衡。

4. 多端口网桥——以太网交换机

交换式集线器常称为以太网交换机(switch)或第二层交换机，工作在数据链路层，与集线器相比，可明显地提高局域网的性能。

以太网交换机实质上就是一个多端口的网桥，每个端口都直接与一个单个主机或另一个集线器相连，并且一般都工作在全双工方式。当主机需要通信时，交换机能同时连通许多对的端口，使每一对相互通信的主机都能像独占通信媒体那样，进行无冲突地传输数据。通信

完成后就断开连接。由于使用了专用的交换结构芯片，因此，以太网交换机具有较高的吞吐率。

以太网交换机的工作有三种，即：直通(cut-through)交换方式，存储转发方式，和无碎片交换方式。

直通交换不必将整个数据帧先缓存后再进行处理，而是在接收数据帧的同时就立即按数据帧的目的 MAC 地址决定该帧的转发端口，因而提高了帧的转发速度。如果在这种交换机的内部采用基于硬件的交叉矩阵，交换时延非常小。直通交换的一个缺点是它不检查差错就直接将帧转发出去，因此有可能也将一些无效帧转发给其他的站。存储转发方式需要将帧完全接收和缓存下来，然后根据帧头部的目的 MAC 地址进行转发。而无碎片交换方式实际上是直通方式的一种改进，要求交换机只有在收到 64 字节以后才开始以直通方式转发帧，从而避免转发发生冲突而造成的碎片帧。

以太网交换机的发展与建筑物结构化布线系统的普及应用密切相关。在结构化布线系统中，广泛地使用了以太网交换机。

4.6 高速以太网

我们将速率达到或超过 100Mb/s 的以太网称为高速以太网，如 100BASE-T、千兆以太网和万兆以太网等。

4.6.1 100BASE-T 以太网

100BASE-T 是在双绞线上传送 100Mb/s 基带信号的星型拓扑以太网，仍使用 IEEE 802.3 的 CSMA/CD 协议，它又称为快速以太网(Fast Ethernet)。1995 年 IEEE 将 100BASE-T 的快速以太网制定为正式的国际标准，即 IEEE 802.3u，是对现行的 802.3 标准的补充。快速以太网的标准得到了所有的主流网络厂商的支持。

100BASE-T 以太网交换式集线器可以全双工方式工作，而无冲突发生。需要注意的是，以全双工方式工作的快速以太网并不采用 CSMA/CD 控制方法，而仅仅使用了以太网标准规定的帧格式。

快速以太网 IEEE 802.3u 标准对传统以太网的参数进行改动。原因是要在数据发送速率提高时使参数 a 仍保持不变(或保持为较小的数值)。参数 a 表示端到端传播时延与帧的发送时延的比值。即：

$$a = \frac{\tau}{T_0} = \frac{\tau}{L/C} = \frac{\tau \cdot C}{L}$$

可知，当数据率 C 提高到 10 倍时，为了保持参数 a 不变，可以将帧长 L 也增大到 10 倍，也可以将网络电缆长度减小到原有数值的十分之一。100Mb/s 的快速以太网保持最短帧长不变，而将一个网段的最大电缆长度减小到 100m。帧间时间间隔从原来的 $9.6\mu\text{s}$ 改为现在的 $0.96\mu\text{s}$ 。

快速以太网标准只支持双绞线和光缆连接, 不支持同轴电缆。规定了以下三种不同的物理层标准:

(1) 100BASE-TX 使用 2 对 UTP5 类线或屏蔽双绞线(STP), 其中一对用于发送, 另一对用于接收。信号的编码采用“多电平传输 3 (MLT-3)”的编码方法, 使信号的主要能量集中在 30MHz 以下, 以便减少辐射的影响。MLT-3 用三元制进行编码, 即用正、负和零三种电平传送信号。其编码规则是:

- 当输入一个 0 时, 下一个输出值不变。
- 当输入一个 1 时, 下一个输出值要变化: 若前一个输出值为正值或负值, 则下一个输出值为零; 若前一个输出值为零, 则下一个输出值与上次的一个非零输出值的符号相反。

(2) 100BASE-FX 使用 2 根光纤, 其中一根用于发送, 另一根用于接收。信号的编码采用 4B/5B-NRZI 编码。NRZI 即不归零 1 制(当“1”出现时信号电平在正值与负值之间变化一次), 4B/5B 编码就是将数据流中的每 4 bit 作为一组, 然后按编码规则将每一个组转换成为 5bit, 其中至少有 2 个“1”, 保证信号码元至少发生两次跳变。

(3) 100BASE-T4 使用 4 对 UTP3 类线或 5 类线。信号采用 8B6T-NRZ(不归零)的编码方法。8B6T 编码是将数据流中的每 8bit 作为一组, 然后按编码规则转换为每组 6bit 的三元制码元。它同时使用 3 对线同时传送数据(每一对线以 $33\frac{1}{3}$ Mb/s 的速率传送数据), 用 1 对线作为冲突检测的接收信道。

4.6.2 千兆以太网

千兆以太网 (又称为吉比特以太网)产品于 1996 年问世。IEEE 在 1997 年通过了吉比特以太网的标准 IEEE 802.3z, 在 1998 年成为正式标准。吉比特以太网标准 802.3z 的具有一下特点: (1)允许在 1Gb/s 下全双工和半双工两种方式工作; (2)使用 802.3 协议规定的帧格式; (3)在半双工方式下使用 CSMA/CD 协议(全双工方式不需要使用 CSMA/CD 协议); (4)与 10BASE-T 和 100BASE-T 技术向后兼容。

吉比特以太网的物理层共有以下两个标准:

(1)1000BASE-X (802.3z 标准)

1000BASE-X 标准是基于光纤通道的物理层, 即 FC-0 和 FC-1。使用的媒体有三种:

- 1000BASE-SX SX 表示短波长 (使用 850nm 激光器)。使用纤芯直径为 62.5μm 和 50μm 的多模光纤时, 传输距离分别为 275m 和 550m。
- 1000BASE-LX LX 表示长波长(使用 1300nm 激光器)。使用纤芯直径为 62.5μm 和 50μm 的多模光纤时, 传输距离为 550m。使用纤芯直径为 10μm 的单模光纤时, 传输距离为 5km。
- 1000BASE-CX CX 表示铜线。使用两对短距离的屏蔽双绞线电缆, 传输距离为 25m。

(2) 1000BASE-T(802.3ab 标准)

1000BASE-T 是使用 4 对 5 类线 UTP，传送距离为 100m。

吉比特以太网工作在半双工方式时，必须进行冲突检测，采用 CSMA/CD 控制方式。由于数据率提高了，因此只有减小最大电缆长度或增大帧的最小长度，才能使参数 a 保持为较小的数值。若将吉比特以太网最大电缆长度减小到 10m，那么网络的实际价值就大大减小。而若将最短帧长提高到 640 字节，则在发送短数据时开销又嫌太大。因此吉比特以太网仍然保持一个网段的最大长度为 100m，但采用了“载波延伸”(carrier extension)的办法，使最短帧长仍为 64 字节，以保持兼容性，同时将争用期长度增大为 512 字节。凡发送的 MAC 帧长不足 512 字节时，就用一些特殊字符填充在帧的后面，使 MAC 帧的发送长度增大到 512 字节，但这对有效载荷并无影响，如图 4-10 所示。



图 4-10 在短 MAC 帧后面加上载波延伸

接收端在收到以太网的 MAC 帧后，要将所填充的特殊字符删除后才向高层交付。当原来仅 64 字节长的短帧填充到 512 字节时，所填充的 448 字节就造成了很大的开销。

为此，吉比特以太网还增加一种功能称为分组突发(packet bursting)。这就是当很多短帧要发送时，第一个短帧要采用上面所说的载波延伸的方法进行填充。但随后的一些短帧则可一个接一个地发送，它们之间只需留有必要的帧间最小间隔即可。这样就形成了一串分组的突发，直到达到 1500 字节或稍多一些为止，如图 4-11 所示。



图 4-11 分组突发可连续发送多个短分组

当吉比特以太网工作在全双工下方式时，不需要使用冲突检测，也不使用载波延伸和分组突发。

4.6.3 以太网技术的发展

万兆以太网（又称 10 吉比特以太网，10GE)的标准由 IEEE 802.3ae 委员会进行制定，10 吉比特以太网的正式标准已在 2002 年 6 月完成。10 吉比特以太网也就是万兆以太网，其出要特点如下：

10 吉比特以太网的帧格式与 10Mb/s，100 Mb/s 和 1G b/s 以太网的帧格式完全相同。并且保留了 802.3 标准规定的以太网最小和最大帧长，具有较好的向后兼容性

由于数据率很高, 10 吉比特以太网不再使用铜线而只使用光纤作为传输媒体。它使用长距离(超过 40km)的光收发器与单模光纤接口, 以便能够工作在广域网和城域网的范围。10 吉比特以太网也可使用较便宜的多模光纤, 但传输距离为 65~300m。

10 吉比特以太网只工作在全双工方式, 因此不存在争用问题, 也不使用 CSMA/CD 协议。这就使得 10 吉比特以太网的传输距离不再受进行冲突检测的限制而大大提高了。

吉比特以太网的物理层是使用已有的光纤通道技术, 而 10 吉比特以太网的物理层则是新开发的。10 吉比特以太网有两种不同的物理层:

(1)局域网物理层 LAN PHY。局域网物理层的数据率是 10.000Gb/s(这表示是精确的 10 Gb/s), 因此一个 10 吉比特以太网交换机可以支持正好 10 个吉比特以太网端口。

(2)可选的广域网物理层 WAN PHY。广域网物理层具有另一种数据率, 这是为了和所谓的“Gb/s”的 SONET/SDH(即 OC-192/STM-64)相连接。我们知道, OC-192/STM-64 的准确数据率并非精确的 10Gb/s(平时是为了简单就称它是 10Gb/s 的速率)而是 9.95328Gb/s。在去掉帧首部的开销后, 其有效载荷的数据率只有 9.58464Gb/s。因此, 为了使 10 吉比特以太网的帧能够插入到 OC-192/STM-64 帧的有效载荷中, 就要使用可选的广域网物理层, 其数据率为 9.95328Gb/s。显然, SONET/SDH 的“10Gb/s”速率不可能支持 10 个吉比特以太网的端口, 而只是能够与 SONET/SDH 相连接。

需要注意的是, 10 吉比特以太网并没有 SONET/SDH 的同步接口而只有异步的以太网接口。因此, 10 吉比特以太网在和 SONET/SDH 连接时, 出于经济上的考虑, 它只是具有 SONET/SDH 的某些特性, 如 OC-192 的链路速率、SONET/SDH 的组帧格式等, 但 WAN PHY 与 SONET/SDH 并不是全部都兼容的。例如, 10 吉比特以太网没有 TDM 的支持, 没有使用分层的精确时钟, 也没有完整的网络管理功能。

在局域网发展过程中, 也先后出现了其它类型的局域网技术, 如 100VG-AnyLAN、光纤分布式数据接口 FDDI(Fiber Distributed Data Interface)、高性能并行接口 HIPPI(High-Performance Parallel Interface)、以及光纤通道(Fibre Channel)技术等。这些局域网技术采用不同的标准, 适合不同的应用领域, 曾经都发挥过重要作用, 但随着以太网技术的迅猛发展, 而逐渐退出历史舞台。

4.7 虚拟局域网

4.7.1 虚拟局域网的概念

虚拟局域网 VLAN(Virtual LAN)是在现有局域网上提供的划分逻辑组的一种服务, 由 IEEE 802.1Q 标准进行了规定。

虚拟局域网 VLAN 是由一些局域网网段构成的与物理位置无关的逻辑组, 而这些网段具有某些共同的需求。每一个 VLAN 的帧都有一个明确的标识符, 指明发送这个帧的工作站是属于哪一个 VLAN。利用以太网交换机可以很方便地实现虚拟局域网 VLAN。

用四个交换机构成的局域网网络拓扑如图 4-12 所示。

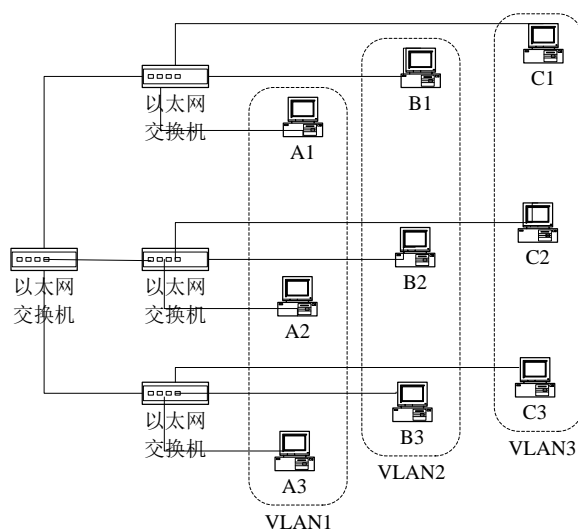


图 4-12 虚拟局域网的构成

设有 10 个工作站分配在三个楼层中，构成了三个局域网，即：LAN1: (A1, B1, C1)，LAN2: (A2, B2, C2)，LAN3(A3, B3, C3)。

利用交换式集线器即以太网交换机可以很方便地将这 9 个工作站划分为三个虚拟局域网：VLAN1, VLAN2 和 VLAN3。即：VLAN1: (A1, A2, A3)，VLAN2: (B1, B2, B3)，VLAN3: (C1, C2, C3)。而这些被划分在同一个虚拟局域网中的计算机，并不一定与同一台交换机相连。

在虚拟局域网上的每一个站部可以听到同一个虚拟局域网上的其他成员所发出的广播。例如，工作站 B1~B3 同属于虚拟局域网 VLAN2。当 B1 向工作组内成员发送数据时，工作站 B2 和 B3 将会收到广播的信息，虽然它们没有和 B1 连在同一个集线器上。相反，B1 发送数据时，工作站 A1 和 C1 都不会收到 B1 发出的广播信息，虽然它们都与 B1 连接在同一个集线器上。交换式集线器不向虚拟局域网以外的工作站传送 B1 的广播信息。这样，虚拟局域网限制了接收广播信息的工作站数，使得网络不会因传播过多的广播信息而引起性能恶化。

4.7.2 虚拟局域网标准

1988 年 IEEE 批准了 802.3ac 标准，这个标准定义了以太网的帧格式的扩展，以便支持虚拟局域网。虚拟局域网协议允许在以太网的帧格式中插入一个 4 字节的标识符，如图 5-13 所示，称为 VLAN 标记(tag)，用来指明发送该帧的工作站属于哪一个虚拟局域网。

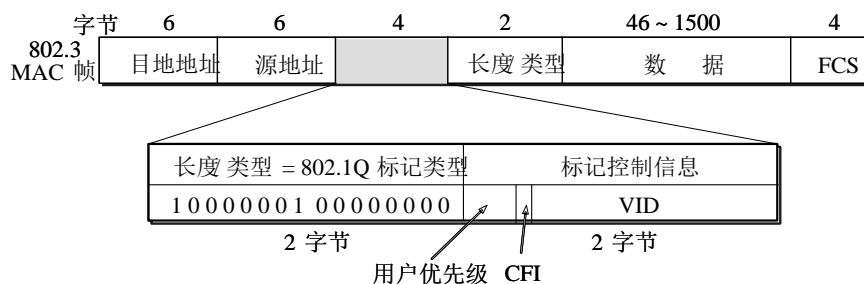


图 4-13 在以太网的帧格式中插入 VLAN 标记

VLAN 标记字段的长度是 4 字节，插入在以太网 MAC 帧的源地址字段和长度类型字段之间。VLAN 标记的前两个字节和原来的长度类型字段的作用一样，但它总是设置为 0x8100(这个数值大于 0x0600，因此不是代表长度)，称为 802.1Q 标记类型。当数据链路层检测到 MAC 帧的源地址字段后面的长度/类型字段的值是 0x8100 时，就知道现在插入了 4 字节的 VLAN 标记。于是就接着检查后两个字节的內容。在后面的两个字节中，前 3 个比特是用户优先级字段，接着的一个比特是规范格式指示符 CFI(Canonical Format Indicator)，最后的 12bit 是该虚拟局域网 VLAN 标识符 VID(VLAN ID)，它唯一地标志了这个以太网帧是属于哪一个 VLAN。

由于用于 VLAN 的以太网帧的首部增加了 4 个字节，因此以太网的最大长度从原来的 1518 字节(1500 字节的数据加上 18 字节的首部)变为 1522 字节。

4.8 无线局域网

4.8.1 无线局域网概述

随着便携式计算机的广泛应用，无线局域网受到越来越多的关注。无线局域网采用无线方式组建，实现多台计算机之间的通信，在一定程度上能满足人们移动办公的需求。

1997 年 IEEE 制订出无线局域网的系列标准 IEEE 802.11，相应的国际标准为 ISO/IEC 8802-11。IEEE 802.11 系列标准较有线局域网复杂，本节将着重介绍其主要特点。

无线局域网可分为两大类。第一类是有固定基础设施的，第二类是无固定基础设施的。所谓“固定基础设施”是指预先建立起来的、能够覆盖一定地理范围的一批固定基站。

在固定基础设施的无线局域网中，802.11 标准规定无线局域网的最小构件是基本服务集 BSS(Basic Service Set)。一个基本服务集 BSS 包括一个基站和若干个移动站，所有的站在本 BSS 以内都可以直接通信，但在和本 BSS 以外的站通信时都必须通过本 BSS 的基站。一个基本服务集 BSS 所覆盖的地理范围叫作一个基本服务区 BSA(Basic Service Area)。基本服务区 BSA 和无线移动通信的蜂窝小区相似。在无线局域网中，一个基本服务区 BSA 覆盖的范围直径可以有几十米。

在 802.11 标准中，基本服务集里面的基站叫做接入点 AP(Access Point)，但其作用和网桥相似。一个基本服务集可以是孤立的，也可通过接入点 AP 连接到一个主干分配系统

DS(Distribution System), 然后再接入到另一个基本服务集, 这样就构成了一个扩展的服务集 ESS(Extended Service Set), 如图 4-14 所示。

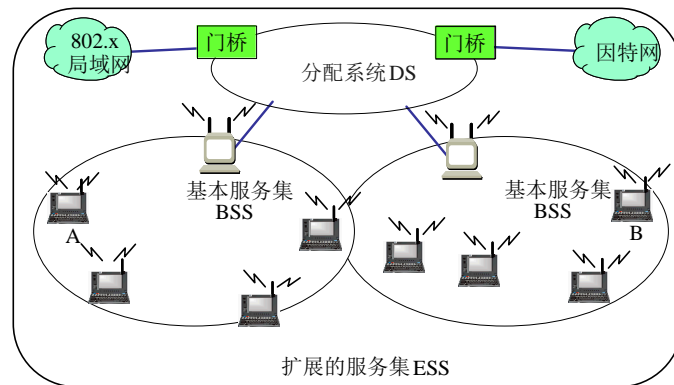


图 4-14 IEEE 802.11 的扩展服务集 ESS

基本服务集的服务范围是由移动设备所发射的电磁波的辐射范围确定的, 图中用一个椭圆来表示基本服务集的服务范围。分配系统的作用就是使扩展的服务集 ESS 对上层的表现就像一个基本服务集 BSS 一样。分配系统可以使用以太网、点对点链路或其他无线网络。扩展服务集 ESS 可为无线用户提供到非 802.11 无线局域网的接入。这种接入是通过叫做门桥的设备来实现的。

802.11 标准并没有定义如何实现漫游, 但定义了一些基本的工具。例如, 一个移动站若要加入到一个基本服务集 BSS, 就必须先选择一个接入点 AP, 并与此接入点建立关联 (association)。此后, 这个移动站就可以通过该接入点来发送和接收数据。若移动站使用重建关联 (reassociation) 服务, 就可将这种关联转移到另一个接入点。当使用分离 (dissociation) 时, 就可终止这种关联。移动站与接入点建立关联的方法有两种。一种是被动扫描, 即移动站等待接收接入点周期性发出的信标帧 (beacon frame)。另一种是主动扫描, 即移动站主动发出探测请求帧 (probe request frame), 然后等待从接入点发回的探测响应帧 (probe response frame)。

另一类无线局域网是无固定基础设施的无线局域网, 它又叫作移动自组网络 (ad hoc network)。这种自组网络没有上述基本服务集中的接入点 AP, 而是由一些处于平等状态的移动站之间相互通信组成的临时网络, 如图 4-15 所示。

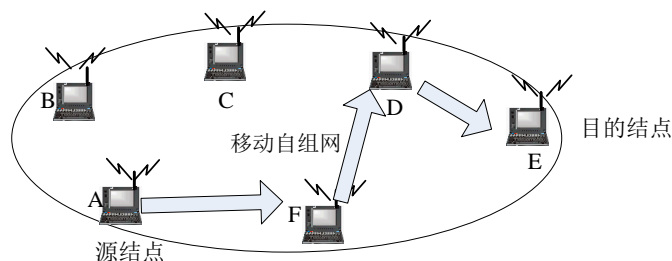


图 4-15 移动自组网络

当移动站 A 和 E 通信时, 经过 A→F→D→E 这样的存储转发过程。自组网中的移动站既是端系统, 同时又可作为路由器为其它移动站进行路由和中继。

移动自组网络在军用和民用领域都有很好的应用前景。在军事领域中，由于战场上往往没有预先建好的固定接入点，但携带了移动站的战士就可以利用临时建立的移动自组网络进行通信。这种组网方式也能够应用到作战的地面车辆群和坦克群，以及海上的舰艇群、空中的机群。由于每一个移动设备都具有路由器的转发分组的功能，因此分布式的移动自组网络的生存性非常好。在民用领域，开会时持有笔记本电脑的人可以利用这种移动自组网络方便地交换信息，而不受笔记本电脑附近没有网络线插头的限制。当出现自然灾害时，在抢险救灾时也可以利用移动自组网络进行及时有效的通信。移动自组网目前已成为一个重要研究热点。

4.8.2 802.11 标准中的物理层

802.11 标准规定的物理层相当复杂，1997 年制订了第一部分，叫做 802.11。在 1999 年又制订了剩下的两部分，即 802.11a 和 802.11b。

(1) 802.11 的物理层有以下三种实现方法：

跳频扩频 FHSS 跳频扩频 FHSS(Frequency Hopping Spread Spectrum)是扩频技术中常用的一种。它使用 2.4GHz 的 ISM 频段(即 2.4000~2.4835GHz)。共有 79 个信道可供跳频使用。第一个频道的中心频率为 2.402GHz，以后每隔 1MHz 一个信道。因此每个信道可使用的带宽为 1MHz。当使用二元高斯移频键控 GFSK 时，基本接入速率为 1Mb/s。当使用 4 元 GFSK 时，接入速率为 2 Mb/s。

直接序列扩频 DSSS 直接序列扩频 DSSS(Direct Sequence Spread Spectrum)是另一种重要的扩频技术。它也使用 2.4GHz 的 ISM 频段。当使用二元相对移相键控时，基本接入速率为 1Mb/s；当使用 4 元相对移相键控时，接入速率为 2 Mb/s。

红外线 IR 红外线 IR(InfraRed)的波长为 850~950nm，可用于室内传送数据。接入速率为 1~2 Mb/s。

(2) 802.11a 的物理层上工作在 5GHz 频带，不采用扩频技术而是采用正交频分复用 OFDM，它也叫做多载波调制技术(载波数可多达 52 个)。可以使用的数据率为 6, 9, 12, 18, 24, 36, 48 和 56 Mb/s。

(3) 802.11b 的物理层使用工作在 2.4GHz 的直接序列扩频技术，数据率为 5.5 或 11 Mb/s。

4.8.3 802.11 标准中的 MAC 层

1. CSMA/CA 协议

无线局域网不能简单地使用有线局域网的 CSMA/CD 协议，主要因为无线局域网具有以下特点。第一，CSMA/CD 协议要求一个站点在发送本站数据的同时还必须不间断地检测信道，以便发现是否有其他的站也在发送数据，这样才能实现“冲突检测”的功能。但在无线局域网的设备中要实现这种功能就花费过大。第二，更重要的是，即使我们能够实现冲突检测的功能，并且当我们在发送数据时检测到信道是空闲的，在接收端仍然有可能发生冲突。

因为无线电波能够向所有的方向传播，并且其传播距离受限，使得在无线局域网中存在隐蔽站问题(hidden station problem)和暴露站问题(exposed station problem)。其示意图如图 4-16 所示。

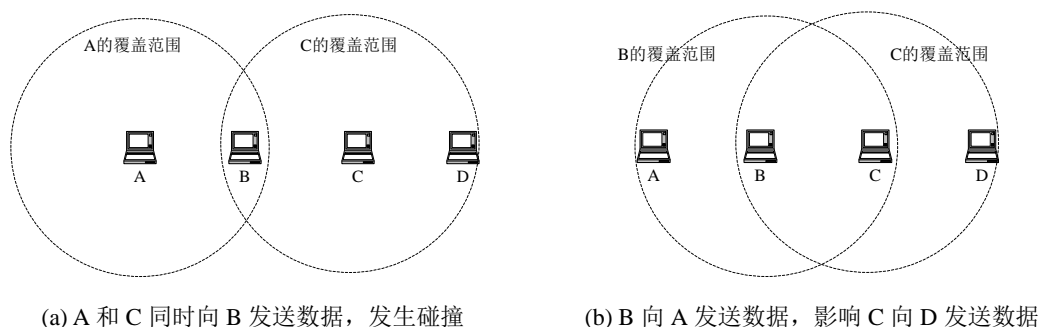


图 4-16 无线局域网的隐蔽站和暴露站问题

图 4-16(a)为隐蔽站问题示意图。假设站 A 和 C 都想和 B 通信，但 A 和 C 相距较远，彼此都接收不到对方发送的信号。当 A 和 C 检测不到无线信号时，就都以为 B 是空闲的，因而都向 B 发送自己的数据。结果 B 同时收到 A 和 C 发来的数据，发生了冲突，可见在无线局域网中，在发送数据前未检测到媒体上有信号还不能保证在接收端能够成功地接收到数据。这种未能检测出媒体上已存在的信号的问题叫做隐蔽站问题。

图 4-16(b)为暴露站问题示意图。站 B 向 A 发送数据，而 C 又想和 D 通信。但 C 检测到媒体上有信号，于是就不会向 D 发送数据。其实 B 向 A 发送数据并不影响 C 向 D 发送数据。这就是暴露站问题。在无线局域网中，在不发生干扰的情况下，可允许同时多个移动站进行通信，这点与总线式局域网有很大的差别。

除以上两个原因外，无线信道还由于传输条件特殊，造成信号强度的动态范围非常大。这就使发送站无法使用冲突检测的方法来确定是否发生了冲突。因此，无线局域网不能使用 CSMA/CD。

无线局域网采用的是 CSMA 的改进协议，在 CSMA 基础上增加了冲突避免(Collision Avoidance)机制和确认机制，即 IEEE 802.11 使用的 CSMA/CA 协议。802.11 标准采用了复杂的 MAC 协议来确定在基本服务集 BSS 中的移动站在什么时间能发送数据或接收数据。其 MAC 协议功能如图 4-17 所示。

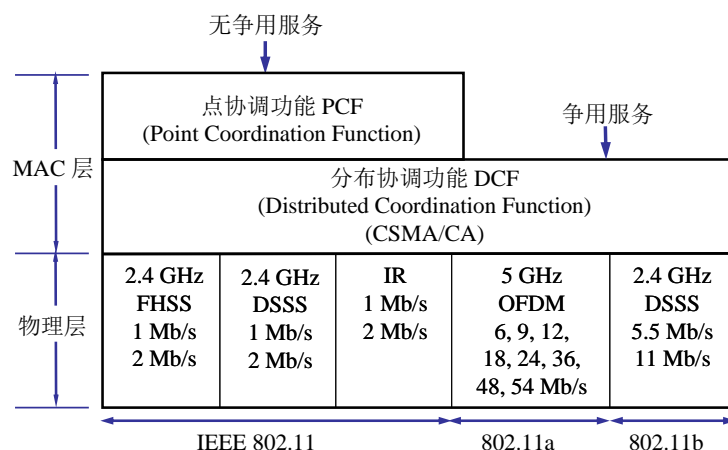


图 4-17 802.11 的 MAC 层

IEEE 802.11 的 MAC 层在物理层的上面，包括两个子层。下面的一个子层是分布协调功能 DCF(Distributed Coordination Function)。DCF 在每一个结点使用 CSMA 机制的分布式接入算法，让各个站通过争用信道来获取发送权。因此 DCF 向上提供争用服务。另一个子层叫做点协调功能 PCF(Point Coordination Function)。PCF 使用集中控制的接入算法，一般在接入点 AP 中实现，用类似于探测的方法将发送数据权轮流交给各个站，从而避免了冲突的产生。对于时间敏感的业务，如分组语音，就应使用提供无争用服务的点协调功能 PCF。其中，PCF 是可选项。在移动自组网络中没有 PCF 子层。

IEEE 802.11 标准规定，所有的站在完成发送后，必须再等待一段很短的时间才能发送下一帧，这段时间称为帧间间隔 IFS (InterFrame Space)。帧间间隔的长短取决于该站打算发送的帧的类型。高优先级帧需要等待的时间较短，因此可优先获得发送权，而低优先级帧就必须等待较长的时间。有以下三种常用的帧间间隔：

(1) SIFS，即短(Short)帧间间隔，长度为 $28\mu\text{s}$ 。SIFS 是最短的帧间间隔，用来分隔属于一次对话的各帧。一个站应当能够在这段时间内从发送方式切换到接收方式。使用 SIFS 的帧类型有：ACK 帧、CTS 帧、分片数据帧，以及所有回答 AP 探测的帧和在 PCF 方式中接入点 AP 发送出的任何帧。

(2) PIFS，即点协调功能帧间间隔，比 SIFS 长，是为了在 PCF 方式下优先接入到媒体。PIFS 的长度是 SIFS 加一个时隙长度(其长度为 $50\mu\text{s}$)，即 $78\mu\text{s}$ 。时隙的长度是这样确定的：在一个基本服务集 BSS 内，当某个站在一个时隙开始时接入到媒体时，那么在下一个时隙开始时，其他站就都能检测出信道已转变为忙态。

(3) DIFS，即分布协调功能帧间间隔，是最长的 IFS，在 DCF 方式中用来发送数据帧和管理帧。DIFS 的长度比 PIFS 再多一个时隙长度，因此 DIFS 的长度为 $128\mu\text{s}$ 。

CSMA/CA 协议的原理如图 4-18 所示。

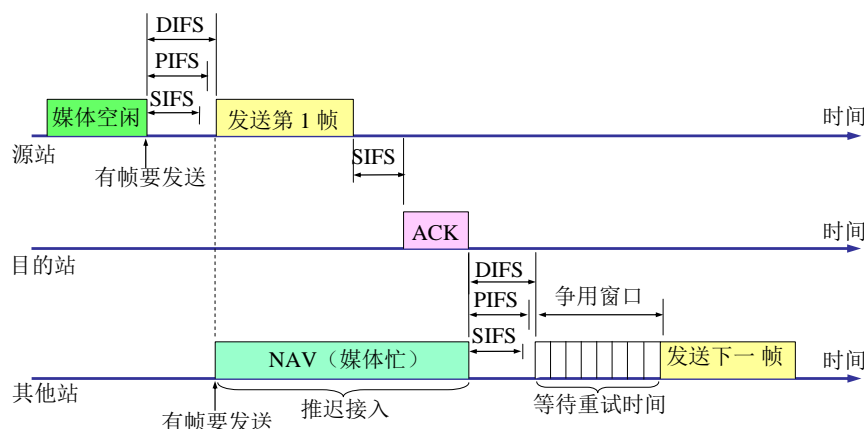


图 4-18 CSMA/CA 协议的工作原理

在 802.11 标准中规定了在物理层的空中接口进行物理层的载波监听。通过收到的相对信号强度是否超过一定的门限值就可判定是否有其他的移动站在信道上发送数据。当源站发送它的第一个 MAC 帧时，若检测到信道空闲，则在等待一段时间 DIFS 后就可发送。等待一段时间是为了让高优先级的帧优先发送。

假定没有高优先级帧要发送，因而源站发送了自己的数据帧。目的站若正确收到此帧，则经过时间间隔 SIFS 后，向源站发送确认帧 ACK。若源站在规定时间内没有收到确认帧 ACK(由重传计时器控制这段时间)，就必须重传此帧，直到收到确认为止，或者经过若干次的重传失败后放弃发送。

802.11 标准还采用了一种叫做虚拟载波监听(Virtual Carrier Sense)的机制，这就是让源站将它要占用信道的时间(包括目的站发回确认帧所需的时间)通知给所有其他站，以便使其他所有站在这段时间都停止发送数据。这样就大大减少了冲突的机会。“虚拟载波监听”表示其他站并没有监听信道，而是由于其他站收到了“源站的通知”才不发送数据。所谓“源站的通知”就是源站在其 MAC 帧首部中的第二个字段“持续时间”中填入了在本帧结束后还要占用信道多少时间(以微秒为单位)，包括目的站发送确认帧所需的时间。

当一个站检测到正在信道中传送的 MAC 帧首部的“持续时间”字段时，就调整自己的网络分配向量 NAV(Network Allocation Vector)。NAV 指出了必须经过多少时间才能完成数据帧的这次传输，才能使信道转入到空闲状态。因此，信道处于忙态，或者是由于物理层的载波监听检测到信道忙，或者是由于 MAC 层的虚拟载波监听机制指出了信道忙。

当信道从忙态变为空闲时，任何一个站要发送数据帧时，不仅都必须等待一个 DIFS 的间隔，而且还要进入争用窗口，并计算随机退避时间以便再次重新试图接入到信道。请读者注意，在以太网的 CSMA/CD 协议中，冲突的各站执行退避算法是在发生了冲突之后；但在 802.11 的 CSMA/CA 协议中，因为没有像以太网那样的冲突检测机制，因此在信道从忙态转为空闲时，各站就要执行退避算法。这样做就减少了发生冲突的概率(当多个站都打算占用信道)。802.11 也是使用二进制指数退避算法，但具体做法稍有不同。这就是：第 i 次退避就在 2^{i+2} 个时隙中随机地选择一个。这就是说，第 1 次退避是在 8 个时隙(而不是 2 个)中随机选择一个，而第 2 次退避是在 16 个时隙(而不是 4 个)中随机选择一个。

当某个想发送数据的站使用退避算法选择了争用窗口中的某个时隙后，就根据该时隙的位置设置一个退避计时器(backoff timer)。当退避计时器的时间减小到零时，就开始发送数据。也可能当退避计时器的时间还未减小到零时而信道又转变为忙态，这时就冻结退避计时器的数值，重新等待信道变为空闲，再经过时间 DIFS 后，继续启动退避计时器(从剩下的时间开始)。这种规定有利于继续启动退避计时器的站更早地接入到信道中。

当一个站要发送数据帧时，仅在下面的情况下才不使用退避算法：检测到信道是空闲的，并且这个数据帧是它想发送的第一个数据帧。除此以外的所有情况，都必须使用退避算法。

2. 对信道进行预约

802.11 允许要发送数据的站对信道进行预约，如图 4-19 所示。

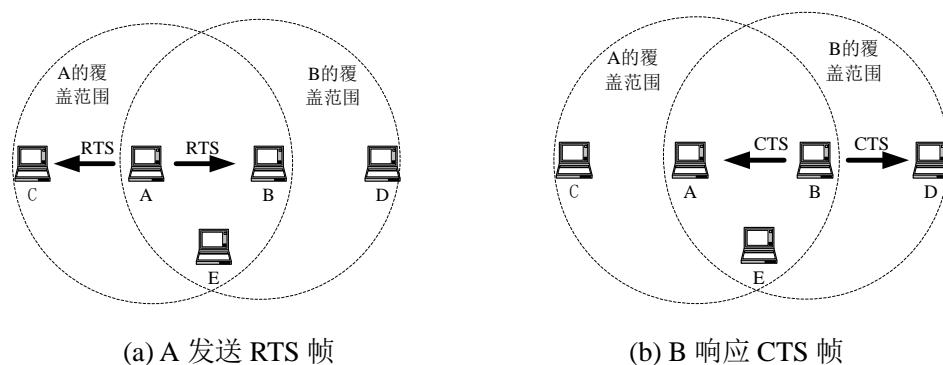


图 4-19 CSMA/CA 协议的 RTS 和 CTS 帧

站 A 在发送数据帧之前先发送一个短的控制帧，叫做请求发送 RTS(Request To Send)，RTS 帧包括源地址、目的地址和这次通信(包括相应的确认帧)所需的持续时间。若信道空闲，则目的站 B 就发送一个响应控制帧，叫做允许发送 CTS(Clear To Send)，CTS 也包括这次通信所需的持续时间。A 收到 CTS 帧后就可发送其数据帧。下面讨论在 A 和 B 两个站附近的一些站将做出的反应。

假设 C 处于 A 的传输范围内，但不在 B 的传输范围内。因此 C 能够收到 A 发送的 RTS，但经过一小段时间后，C 不会收到 B 发送的 CTS 帧。这样，在 A 向 B 发送数据时，C 也可以发送自己的数据给其他的站而不会干扰 B。

D 收不到 A 发送的 RTS 帧，但能收到 B 发送的 CTS 帧。因此 D 知道 B 将要和 A 通信，因此 D 在 A 和 B 通信的一段时间内不能发送数据，因而不会干扰 B 接收 A 发来的数据。

站 E 能收到 RTS 和 CTS，因此 E 和 D 一样，在 A 发送数据帧和 B 发送确认帧的整个过程中都不能发送数据。

因此，这种协议实际上就是在发送数据帧之前先对信道进行预约一段时间。使用 RTS 和 CTS 帧会使整个网络的效率有所下降。但这两种控制帧都很短，其长度分别为 20 字节和 14 字节，与数据帧(最长可达 2346 字节)相比开销不算大。相反，若不使用这种控制帧，则一旦发生冲突而导致数据帧重发，则浪费的时间就更多。虽然如此，但协议还是设有三种情况供用户选择：一种是使用 RTS 和 CTS 帧；另一种是只有当数据帧的长度超过某一数值时才使用

RTS 和 CTS 帧(显然,当数据帧本身就很短时,再使用 RTS 和 CTS 帧只能增加开销):还有一种是不使用 RTS 和 CTS 帧。

虽然协议经过了精心设计,但冲突仍然会发生。例如,B 和 C 同时向 A 发送 RTS 帧。这两个 RTS 帧发生冲突后,使得 A 收不到正确的 RTS 帧因而 A 就不会发送后续的 CTS 帧。这时,B 和 C 像以太网发生冲突那样,各自随机地推迟一段时间后重新发送其 RTS 帧。推迟时间的算法也是使用二进制指数退避。

无线局域网是一个较新的研究领域,感兴趣的读者可在网上查阅到相关的无线局域网标准。

本章总结

本章主要介绍了局域网的基本概念及工作原理,包括以下内容:

1. 介绍了局域网的基本概念、体系结构及其工作原理。根据所采用技术的不同,局域网可分为多种类型,包括 IEEE802.3 局域网、DIXv2 以太网、令牌环网、以及 IEEE 802.11 无线局域网等。本章对各主要类型的局域网的标准和工作原理进行了详细介绍。
2. 介绍了局域网介质访问控制方法。局域网介质访问控制方法包括静态划分信道的介质访问控制方法、动态随机介质访问控制方法和轮询访问介质访问控制方法。其中,静态划分信道的介质访问控制方法包括频分多路复用、时分多路复用、波分多路复用、码分多路复用等;动态随机介质访问控制方法包括 ALOHA、CSMA、CSMA/CD、CSMA/CA 协议等;轮询访问介质访问控制方法包括令牌传递协议等。
3. 重点介绍了以太网工作原理,包括 CSMA/CD 协议、各种类型的高速局域网基本原理、以及基于集线器和以太网交换机进行局域网扩展的方法。此外,还介绍了虚拟局域网的概念和简要工作原理。

练习题

- 4-01 局域网标准的多样性体现在四个方面的技术特性,请简述之。
- 4-02 逻辑链路控制(LLC)子层有何作用?为什么在目前的以太网网卡中没有 LLC 子层的功能?
- 4-03 简述以太网 CSMA/CD 的工作原理。
- 4-04 以太网中争用期有何物理意义?其大小有哪几个因素决定?
- 4-05 有 10 个站连接到以太网上。试计算以下三种情况下每一个站所能得到的带宽。
(1)10 个站都连接到一个 10Mb/s 以太网集线器;

- (2)10 个站都连接到一个 100Mb/s 以太网集线器；
 - (3)10 个站都连接到一个 10Mb/s 以太网交换机。
- 4-06 100 个站分布在 4km 长的总线上。协议采用 CSMA/CD。总线速率为 5Mb/s，帧平均长度为 1000bit。试估算每个站每秒钟发送的平均帧数的最大值。信号传播速率为 2×10^8 m/s。
- 4-07 简述网桥的工作原理及特点。网桥、转发器以及以太网交换机三者异同点有哪些？
- 4-08 为什么需要虚拟局域网（VLAN）？简述划分 VLAN 的方法。