

5.1 信道复用

5.1.1 概述

广域网在互联网中承担着远距离扩展通信范围的重要作用,是互联网覆盖全球的基石。由于距离很远,所以其技术考虑有着明显的不同,经济性要求高。广域网不能在信道上只走一路信号,一方面是因为目前的广域网带宽大,只走一路信号太浪费;另一方面不利于共享。



信道复用

4.1.3 节中提到,可把多路频带传输通过信道复用技术形成宽带传输,如图 5-1 所示。信道复用技术通过信号的变换,可以将若干彼此独立的信号合并为可在一个信道上同时传输的复合信号,而接收方需要能够采用相反的过程分离出独立的、正确的信号。

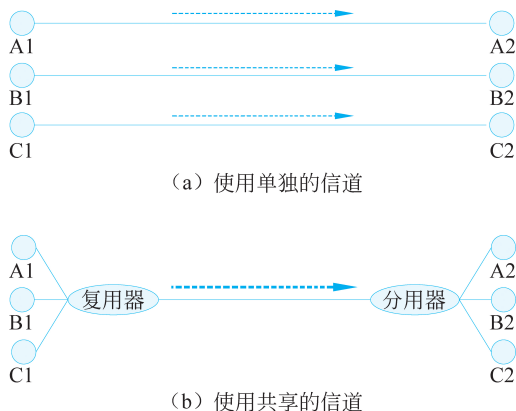


图 5-1 单独信道和共享信道示意图

信道复用技术的硬件建设成本低,可有效地降低总体成本、提高信道利用率。距离越远,建设成本越节省。

复用技术在事先需要安排、调度好相关资源(如频带、时间、空间、代码序列等),可以分为:频分复用、波分复用、时分复用、统计时分复用、空分复用、码分复用等。

信道复用技术和多址技术是从不同角度描述的不同技术,如果强调复用,就是 xx Division Multiplexing(如 Code DM,CDM),如果强调多址就是 xx Division Multiple Access(如 Code DMA,CDMA)。本章先介绍一些容易理解的复用技术,

随后对码分复用技术进行介绍。关于多址技术的描述见 6.1.1 节。

5.1.2 信道复用技术

1. 频分复用

频分复用(Frequency Division Multiplexing, FDM)把总的信道分为若干子信道,每个子信道的频率范围是信道频率范围的子集,且互无交集(还有一定的间隔),每一对用户使用其中一个子信道,这样也可以以不同的频带实现对通信用户的区分(复用)。典型的技术如不同频道的广播电台在大气中进行广播。

频分复用的原理如图 5-2 所示。这种方式使用调制技术很容易实现,不同用户对之间使用的载波频率不同即可。

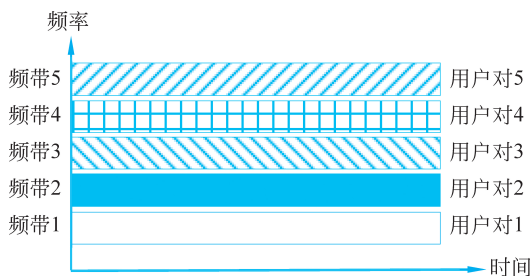


图 5-2 频分复用

2. 波分复用

波分复用(Wavelength Division Multiplexing, WDM)就是光的频分复用。光纤技术的应用使得数据传输速率大幅度提高,受到越来越高的重视。由于光载波的频率很高,因此习惯上用波长(而不用频率)来表示,进而产生了波分复用这一名词。

最初只能在一根光纤上复用两路光信号,并将这种复用方式称为波分复用。但随着技术的发展,在一根光纤上复用的光信号的路数越来越多,于是就产生了密集波分复用(Dense WDM, DWDM)这一名词。

3. 时分复用

时分复用(Time Division Multiplexing, TDM)的主要思想是,不同用户轮流使用信道,如图 5-3 所示。

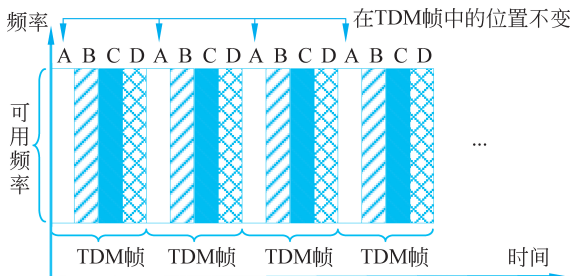


图 5-3 时分复用

时分复用把时间分成周期,称为 TDM 帧(和数据链路层的帧毫不相干),在 TDM 帧内把时间划分成若干时隙(slot),每一对用户使用一个时隙,且该时隙在 TDM 帧中的位置固

定不变。

通信过程中,信道的全部频率资源全部给某一对用户使用,但是用户对只能在属于自己的时隙内使用,时隙结束后必须让给后续用户使用。当所有用户都发送完毕,开始下一个 TDM 帧,再轮流使用。

如果知道了时隙在 TDM 帧中的位置,也就知道了这是哪一对用户在通信了。

4. 统计时分复用

时分复用有一个缺点,如果有些用户发送数据少,会给系统造成很大的浪费,如图 5-4 所示,B、C、D 的数据少,它们的时隙被白白浪费了,而 A 产生的数据较多,却被强行划分在 4 个 TDM 帧中,有数据,信道空着也不能用。为此产生了统计时分复用(Statistical TDM, STDM)。

统计时分复用的 STDM 帧长不再固定,根据数据发送的情况动态调整。在每一个 STDM 帧,对所有发送者进行轮询,如果发送者有数据就发送,如果没有数据就轮空,所属时隙让给后方有数据的发送者使用。如图 5-5 所示,第一个 STDM 帧中就只发送了 A 的数据,其他发送者被轮空,该帧就结束了,进入第二个 STDM 帧,该 STDM 帧只发送了 B 和 D 的数据就结束了,以此类推。

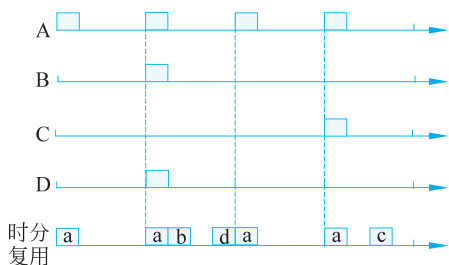


图 5-4 时分复用的缺点

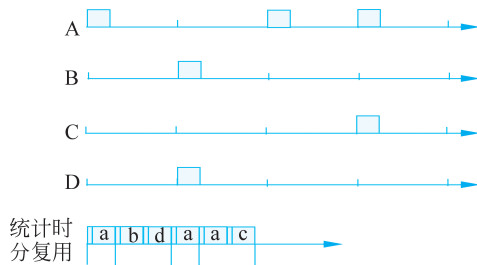


图 5-5 统计时分复用的思想

可见,发送者在 STDM 帧中的位置不再固定(因此统计时分复用又称为异步时分复用,相对应地,时分复用又称为同步时分复用),为此,应该给每一个数据增加地址信息,方便对端设备根据地址来判断最终的接收者。

在发送方不都是批量发送数据的情况下,统计时分复用可显著地增加信道的利用率。

5. 空分复用

空分复用(Space Division Multiplexing, SDM)是以不同空间的信号实现对共享信道的共用。该机制下用户占用不同空间(如位置、角度等)的传输介质,形成自己独享的信道。如图 5-6 所示,基站 A 可以向两个方向发出相同频率的射频信号,同时与 B 和 C 进行通信。

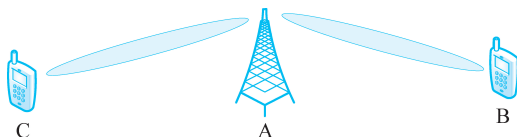


图 5-6 空分复用

5.1.3 码分复用

1. 码分复用的基础——码片序列

码分复用(Code Division Multiplexing, CDM)利用一组相互正交的码字来实现对共享信道的共用。美国的 GPS 和我国的北斗导航系统都使用了 CDM 体制,使很多通信用户能在共享的信道中同时通信而不相互干扰。

首先给每个用户安排一个设计良好的伪随机码字,又称为码片序列(实际上构成了向量)。通信过程中,发送方使用码字对数据进行转换。

- 用自己的码字代表比特 1。
- 用码字的反码代表比特 0。

如图 5-7 所示,设结点 S 的 8b(实际可能更长)码字为 00011011。S 发送 1 时就发送码字 00011011,即 $(-1, -1, -1, +1, +1, -1, +1, +1)$,发送 0 时就发送其反码 11100100,即 $(+1, +1, +1, -1, -1, +1, -1, -1)$ 。

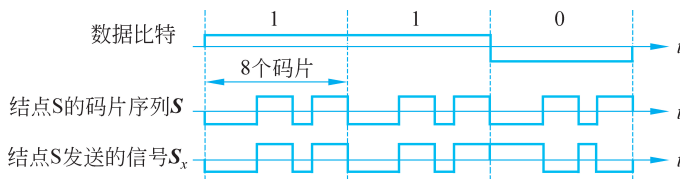


图 5-7 CDM 发送数据示例

2. 码片序列的特性

CDM 中码字的选取有着严格的规定:

- 分配给结点的码字必须互不相同,以便对结点进行区分,如同身份证。
- 不同结点的码字必须相互正交。

令向量 $\mathbf{S}_v$ 表示结点 S 的码字, $\mathbf{T}_v$ 表示结点 T 的码字。所谓**正交**,就是 $\mathbf{S}_v$ 和 $\mathbf{T}_v$ 的规格化内积等于 0,即满足下列公式:

$$\mathbf{S}_v \cdot \mathbf{T}_v \equiv \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m S_i T_i = 0 \quad (5-1)$$

其中, m 为 $\mathbf{S}_v$ 和 $\mathbf{T}_v$ 的维数。

举例来说,设 T 的码字为 00101110,则 $\mathbf{S}_v \cdot \mathbf{T}_v = [(-1 \times -1) + (-1 \times -1) + (-1 \times 1) + (1 \times -1) + (1 \times 1) + (-1 \times 1) + (1 \times 1) + (1 \times -1)]/8 = 0$ 。即 $\mathbf{T}_v$ 和 $\mathbf{S}_v$ 满足正交关系。

如果两个码字正交,则其中一个码字与另一个码字的反码也正交。即

$$\mathbf{S}_v \cdot (-\mathbf{T}_v) \equiv \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m S_i (-T_i) = -\frac{1}{m} \sum_{i=1}^m S_i T_i = 0 \quad (5-2)$$

任何一个码字和自己的规格化内积是 1。

$$\mathbf{S}_v \cdot \mathbf{S}_v = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m S_i S_i = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m S_i^2 = 1 \quad (5-3)$$

一个码字和自己的反码的规格化内积是 -1。

$$\mathbf{S}_v \cdot (-\mathbf{S}_v) = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m S_i (-S_i) = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m -S_i^2 = -1 \quad (5-4)$$

3. 如何区分用户以实现复用

任意两个结点 S 和 T 可以同时共享信道上发送数据,即便两者的信号在空间进行了叠加,也不影响接收方对自己想要的数据的接收。

如图 5-8 所示,为了发送 1,S 发送的是 $S_x = S_v$,T 发送的是 $T_x = T_v$,两者叠加的信号 $S_x + T_x = (-2, -2, 0, 0, +2, 0, +2, 0)$,实际信号的处理很复杂,这里简单理解即可。

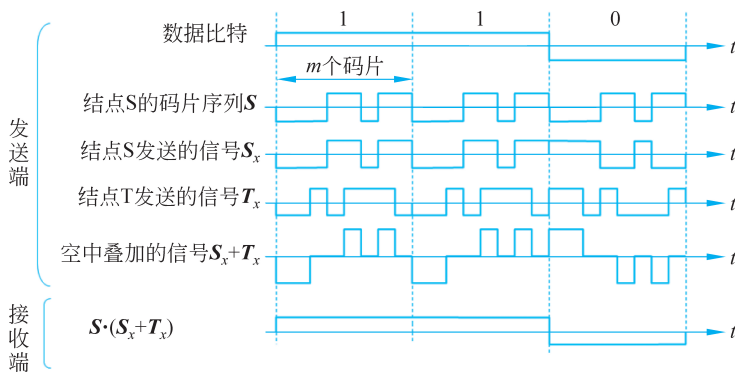


图 5-8 CDM 发送举例

接收者必须持有发送者的码字(如 S 的码字 S_v),在得到信号($S_x + T_x$)后,将其与 S_v 规格化内积,即 $S_v \cdot (S_x + T_x)$ 。读者可以自己证明,这个计算过程满足分配律,即

$$S_v \cdot (S_x + T_x) = S_v \cdot S_x + S_v \cdot T_x \quad (5-5)$$

此时 $S_v \cdot (S_x + T_x) = S_v \cdot S_v + S_v \cdot T_v = 1 + 0 = 1$,则接收者恢复出的数据为 1。

为了发送 0,S 发送 $-S_v$,T 发送 $-T_v$,接收方进行同样的处理,最后得出的结果为 -1,代表接收方恢复出的数据为 0。

其他两种情况(S 发送 1 而 T 发送 0,S 发送 0 而 T 发送 1)同样。

4. 结论

码片序列其实相当于硬件加密的密码,只有截获了用户的码片序列,才能截获用户的数据。因此,CDM 技术具有良好的安全性,在军事和其他需要保密的业务中,具有良好的应用。

5.2 SDH

5.2.1 概述

1. 背景和特点

20 世纪 70~80 年代出现了众多的网络技术,但这些技术扩展复杂,带宽不高,且相互不兼容,同时计算机也需要传输多种业务的数据。SDH(Synchronous Digital Hierarchy)改变了这个现状。目前,SDH 是一种成熟、标准的技术,在骨干网中被广泛采用,且价格越来越低,甚至在接入网中也采用了 SDH 技术。

SDH 的概念来自于美国的同步光网络(SONET),ITU-T(国际电信联盟电信标准分局)对其加以修改并命名为 SDH。SDH 可用双绞线、同轴电缆、微波和卫星等传输,但 SDH 用于传输高数据率则需用光纤。

SDH 具有灵活的网络拓扑,在网络性能监视、故障恢复(自愈功能强大)及可靠性方面有着相当的优势,可以提供各种数字业务,且满足电信级别的高性能通信要求(适合语音业务)。SDH 第一次在骨干网上真正实现了数字传输体制上的世界性标准,为网络的自动化、智能化以及降低网络的运维费用方面起到了积极作用。

由于以上特性,SDH 在广域网领域和专用网领域得到了巨大的发展和广泛的应用。中国移动、中国电信、中国联通等电信运营商都已大规模建设了基于 SDH 的骨干光传输网络。

2. SDH 拓扑

当前 SDH 用得最多的网络拓扑是链形和环状。其中,环状拓扑是现代大容量光纤通信网络的主要基本结构。通过链形和环状的灵活组合,可构成更加复杂的网络,例如,环带链、支路跨接网络、相切环、相交环等,如图 5-9 所示。可以说,SDH 所组成的网络非常灵活,使网络运营灵活。

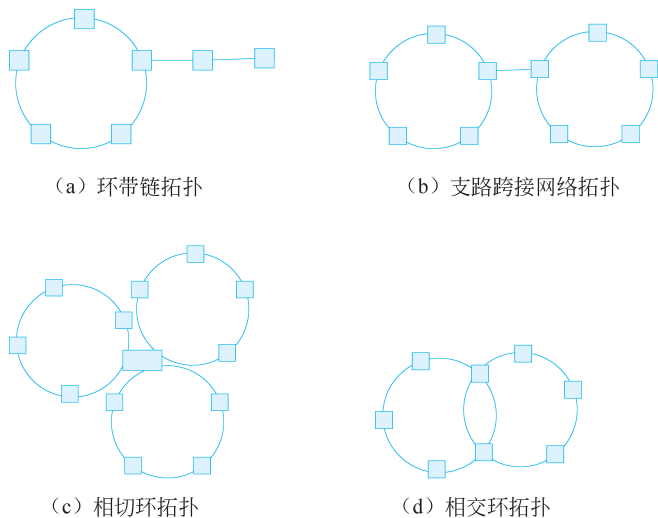


图 5-9 一些典型的 SDH 拓扑

5.2.2 通信技术

从 ISO/OSI 模型的观点来看,SDH 的主要工作属于物理层,未对高层有严格的限制,方便在 SDH 上采用各种上层网络技术。

如图 5-10 所示,上层数据作为载荷,通过打包成为合适的信息包,在 SDH 网络中传输。到另一端再解包,取出载荷,复原成原信号。

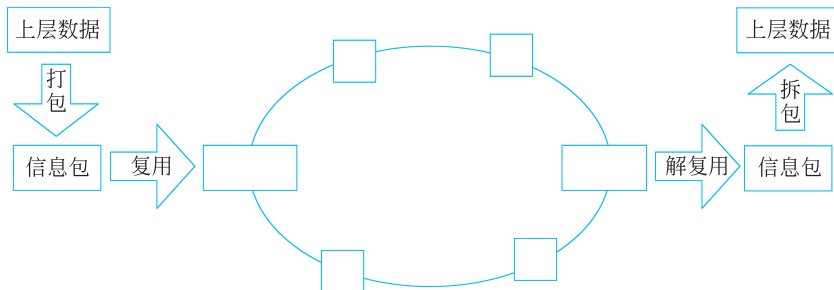


图 5-10 SDH 传输过程

1. 复用模型

为了支持各种业务的传输,SDH 确定了由低速速率经过复用获得高速速率,再由高速速率经过复用获得更高速率的方式来获得各种通信速率。

SDH 可以实现自身数据的复用,也可以将其他(支路)网络的数据进行复用,由此可以将复用分为两类。

- 低阶的 SDH 信号复用成高阶的 SDH 信号。
- 低速支路信号复用成 SDH 信号。

SDH 采用的信息结构等级称为同步传送模块 STM- n (n 为级数,等于 1,4,16,64,...)。最基本的模块为 STM-1(155.52Mb/s),4 个 STM-1 同步复用构成 STM-4,4 个 STM-4 同步复用构成 STM-16,4 个 STM-16 同步复用构成 STM-64……依照这样的规定,可以画出 SDH 的复用模型,如图 5-11 所示。

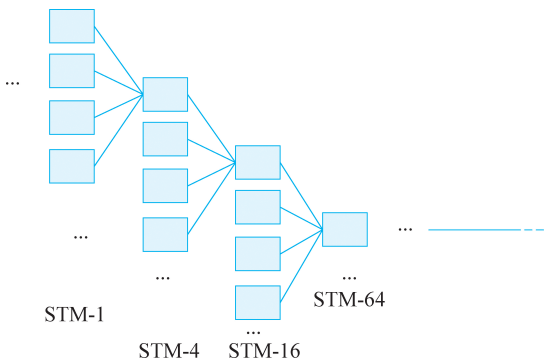


图 5-11 SDH 的复用模型

2. 复用技术

为了方便组织传输信息和复用信道,SDH 也提出了帧的概念(一般认为帧是数据链路层中的概念)。SDH 采用块状的帧结构来承载用户的信息,STM-1 帧中,净载荷由 9 行组成,每行由 270B 组成。

STM-4 是对 4 个 STM-1 进行复用,即 STM-4 的帧包含 4 个 STM-1 的帧,每帧还是由 9 行组成,但是通过**字节交错间插复用**方式,使得每行包含 270×4 (1080)B。同样,STM-16 的帧中,每行包含 270×16 B,以此类推,从而实现从低阶 SDH 到高阶 SDH 的复用。

例如,从 STM-1 到 STM-4 的复用过程中,采用字节交错间插复用方式,如图 5-12 所示。其实这个过程符合时分复用的模式。

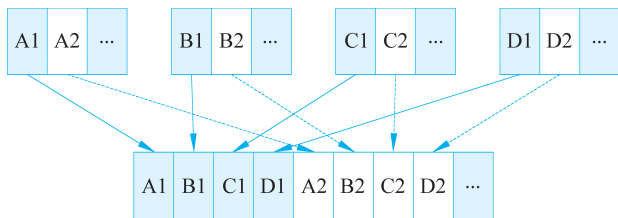


图 5-12 字节交错间插复用方式

4 个 STM-1 帧按照图 5-11 的规律被整合到 1 个 STM-4 帧中,STM-4 的数据传输速率为 STM-1 的 4 倍,向高阶的再复用与此类似,这就是 STM 复用的本质。

SDH 不同级别的码流在帧结构净负荷区内的排列非常有规律,并且网络是同步的,中间结点或接收方可以将高速信号根据在帧中的位置直接分拆出低阶/低速支路信号,实现解复用。

SDH 每秒传输 8000 帧,对 STM-1 而言,传输速率为 $9 \times 270 \times 8 \times 8000 = 155.52 \text{ Mb/s}$; STM-4 的传输速率为 $4 \times 155.52 \text{ Mb/s} = 622.08 \text{ Mb/s}$,STM-16 的传输速率为 2488.32 Mb/s ,..., STM-256 的传输速率可达 39 Gb/s 。



5.3 PPP

SDH 的主要工作属于物理层,还需规定上层的相关协议后才能使用。而 PPP(Point to Point Protocol)是一个较好的选择。

1. 概述

PPP 最初的设计目标是为两个对等结点之间的数据传输提供一种数据链路层的封装协议,目前已成为互联网上应用最广泛的协议之一。

PPP 具有以下特点。

- (1) 支持多种网络协议,目前主要是 IP。
- (2) 具有错误检测能力,但不具备纠错能力,也不需要重传来保证正确性,所以 PPP 是一种不可靠的协议,网络开销小,速度快。
- (3) 可用于多种类型的介质上,包括串口线、电话线、移动电话和光纤(如 SDH)等。
- (4) 实现全双工传输模式。

2. 成帧 & 透明传输

PPP 支持两种模式,一种是异步的面向字节的模式,另一种是同步的面向比特的模式。

1) 面向字节的协议

PPP 采用 $0x7E$ (即二进制的 01111110)作为帧的开始符和结束符。以 $0x7D$ 作为转义符。

- 如果在帧数据中出现了 $0x7E$,则 PPP 将其转变成为两个字符($0x7D, 0x5E$)。
- 如果在帧数据中出现了 $0x7D$,则 PPP 将其转变成为两个字符($0x7D, 0x5D$)。
- 如果帧数据中出现小于 $0x20$ 的字符(控制字符),则 PPP 将在其前加上 $0x7D$ 后,将原有的字符值加上 $0x20$ 形成新的字符,例如,将 $0x03$ 转换为($0x7D, 0x23$)。

2) 面向比特的协议

PPP 用在 SDH 链路时,使用同步传输(一连串的比特连续传送)方式,把数据内容按照比特的形式进行成帧,此时依然使用二进制串 01111110 作为帧的定界标识。为了实现透明传输,PPP 采用 4.2.2 节中的零比特填充法。

3. PPP 的连接建立

最初 PPP 的另一个作用是支持用户通过拨号或专线方式接入互联网:用户连接 ISP(如中国电信、中国移动等),由 ISP 对用户认证后,分配 IP 地址给用户,用户只有获得 IP 地址后,才能进入互联网遨游。因此 PPP 还必须具有以下功能。

- (1) PPP 具有动态分配 IP 地址的能力。
- (2) PPP 具有身份验证功能。

出于以上考虑,PPP 建立了一整套连接建立和网络控制的流程。

PPP 的连接建立过程如图 5-13 所示。首先,当用户由静止状态开始申请接入互联网时,接入服务器对请求做出确认,并建立起一条物理连接。

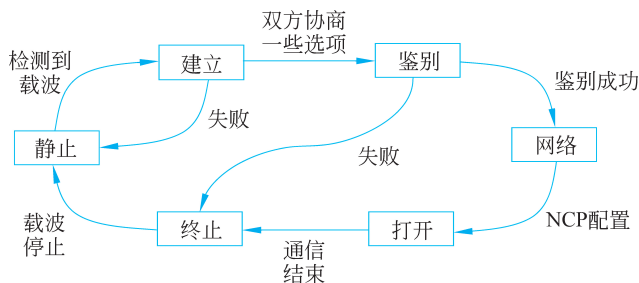


图 5-13 PPP 的连接建立过程

在建立状态下,PPP 使用 LCP(链路控制协议)来协商所需的链路配置,主要是发送一些配置报文来配置数据链路,之后的鉴别阶段使用哪种鉴别方式也是在这个协商过程中确定下来的。鉴别成功后,就进入了网络的状态。

网络状态下,使用 NCP(网络控制协议)来协商相关的网络配置,NCP 给新接入的结点分配一个临时的 IP 地址,使结点成为互联网上的一个合法设备。

经过网络阶段后,PPP 进入打开状态,PPP 链路上即可正常通信了。

通信完毕,NCP 释放网络层连接,收回原来分配出去的 IP 地址。接着,LCP 释放数据链路层连接。一次上网过程就结束了。

习 题

- 在下列多路复用技术中,()具有动态分配时隙的功能。
 - 同步时分多路复用
 - 码分多路复用
 - 统计时分多路复用
 - 频分多路复用
- [2014 研]站点 A、B、C 通过 CDM 共享链路,A、B、C 的码片序列分别是(1,1,1,1)、(1,-1,1,-1)和(1,1,-1,-1),若 C 从链路上收到的序列是(2,0,2,0,0,-2,0,-2,0,2,0,2),则 C 收到 A 发送的数据是()。
- 四个站使用 CDM 共享链路,码片序列分别为
 - (-1 -1 -1 +1 +1 -1 +1 +1)
 - (-1 -1 +1 -1 +1 +1 +1 -1)
 - (-1 +1 -1 +1 +1 +1 -1 -1)
 - (-1 +1 -1 -1 -1 -1 +1 -1)
 现收到这样的码片序列(-1 +1 -3 +1 -1 -3 +1 +1)。问哪个站没有发送数据?哪个站的码片是错误的?为什么?写出详细过程。
- 比特串 0001111100111111001 用 PPP 传输,经过零比特填充后的比特串是什么?此时使用的是 PPP 的同步传输方式还是异步传输方式?
- [2013 研]HDLC 协议对 0111110001111110 组帧后对应的比特串是什么?