

第 3 章 数据通信基础与物理层

学习目的

数据通信技术是网络技术发展的基础。本章将对数据通信的基本概念、主要的传输介质、数据编码技术、数据传输技术、多路复用技术与差错控制技术进行系统的分析。学习本章内容将对网络中最基本的数据通信技术、广域网中数据传输原理与实现方法的理解有很大的帮助,为以后的学习打下坚实的基础。

学习要求

理解:数据通信的基本概念。

掌握:传输介质类型及主要特性。

掌握:数据编码的类型和基本方法。

掌握:基带传输与频带传输的基本概念。

掌握:数据传输方式的基本概念。

掌握:多路复用的分类与特点。

掌握:宽带接入技术。

3.1 物 理 层

物理层处于网络参考模型的最底层,它的上一层是数据链路层,它向下直接和传输介质相连。物理层不仅仅指与计算机相连接的物理设备或者具体的传输介质,主要考虑的是如何在连接开放系统的不同传输介质上传输各种数据的比特流。

我们知道,现有计算机网络中的硬件设备和传输媒体的种类非常繁多,通信手段也有许多不同方式,存在着很大的差异;与此同时,各种新的通信技术又在快速发展,因此网络设计中,试图通过设计物理层来尽可能屏蔽这些差异,使数据链路层只需考虑本层的服务和设计,而不需要考虑物理层具体使用了哪些传输介质和物理传输设备。用于物理层的协议也称为物理层规程(Procedure)。只是在“协议”这个名词出现之前人们就先使用了“规程”这一名词。

物理层的主要任务描述为确定与传输媒体接口有关的一些特性,具体如下。

(1) 机械特性:指明接口所用接线器的形状和尺寸、引线数目和排列、固定和锁定装置等。这很像平时常见的各种规格电源插头的尺寸都有严格的规定。

(2) 电气特性:指明在接口电缆的各条线上出现的电压的范围。

(3) 功能特性:指明某条线上出现的某一电平的电压表示何种意义。

(4) 规程特性:指明对于不同功能的各种可能事件的出现顺序。

数据在计算机中多采用并行传输方式,但数据在通信线路上的传输方式一般都是串行传输(这是出于经济上的考虑),即逐个比特按照时间顺序传输,因此物理层还要完成传输方式的转换。

具体的物理层协议种类繁多,这是因为物理连接的方式很多(如可以使用点对点的,也可以采用多点连接或广播连接),而传输媒体的种类也非常多(双绞线、同轴电缆、光缆以及各种波段的无线信道等)。因此在学习物理层时,应将重点放在掌握基本概念上。

考虑到使用本书的一部分读者可能没有学过有关数据通信方面的课程,因此我们利用下面的 3.2 节简单地介绍一下有关现代通信的一些最基本的知识和最重要的结论(不给出证明过程)。对于已具有这方面知识的读者可略过这部分内容。

3.2 数据通信

从某种意义上讲,计算机网络是建立在数据通信系统之上的资源共享系统。计算机网络的主要功能是为了实现信息资源的共享与交换,而信息是以数据形式来表达的,所以计算机网络必须解决数据通信的问题。

3.2.1 数据通信的基本概念

1. 信息、数据和信号

信息是指有用的知识或消息,计算机网络通信的目的就是为了交换信息。而数据则是运送信息的实体,是信息的表达方式,可以是数字、文字、声音、图形和图像多种不同形式。在计算机系统中,统一以二进制代码表示数据的不同形式。而当这些二进制代码表示的数据要通过物理介质和器件进行传输时,还需要将其转变成物理信号,信号(Signal)是数据在传输过程中的电磁波表达形式。

2. 模拟信号与数字信号

作为数据的电磁波表达形式,信号一般以时间为自变量,以表示数据的某个参量如振幅、频率或相位为因变量,并且按其因变量对时间的取值是否连续被分为模拟信号和数字信号。模拟信号是指信号的因变量随时间连续变化的信号,如图 3.1 所示。电视图像信号、语音信号、温度压力传感器的输出信号以及许多遥感遥测信号都是模拟信号。数字信号是指信号的因变量不随时间连续变化的信号,通常表现为离散的脉冲形式,可表示为 $x(nt)$,如图 3.2 所示。显然,在数字信号中,因变量取值状态是有限的。计算机数据、数字电话和数字电视等都可看成是数字信号。

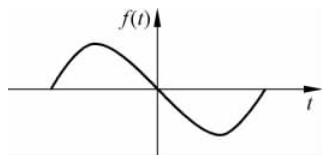


图 3.1 模拟信号

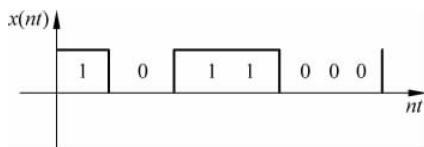


图 3.2 数字信号

虽然模拟信号与数字信号有着明显的差别,但二者之间在一定条件下是可以相互转换的,转换可以通过调制解调器来完成。模拟信号可以通过采样、编码等步骤转换成数字信号,而数字信号也可以通过解码、平滑等步骤转换成模拟信号。

3. 数据通信

发送方将要发送的数据转换成信号通过物理信道传输到数据接收方的过程称为数据通信。由于信号可以是离散变化的数字信号,也可以是连续变化的模拟信号,所以与之相对应,数据通信被分为模拟数据通信和数字数据通信。所谓模拟数据通信,是指在模拟信道上以模拟信号形式来传输数据;而数字数据通信则是指利用数字信道以数字信号形式来传输数据。

4. 源点、终点和信道

在数据通信中,通常将数据的发送方称为源点,而将数据的接收方称为终点。源点和终点一般是计算机或其他一些数据终端设备。

为了在源点和终点之间实现有效的数据传输,必须在源点和终点之间建立一条传输信号的物理通道,这条通道被称为物理信道,简称信道。信道建立在传输介质之上,但包括了传输介质和附属的通信设备。通常,同一传输介质上可提供多条信道,一条信道允许一路信号通过。按传输介质的类型来划分,信道被分为有线信道和无线信道;按信道中所传输的信号类型来划分,信道被分为模拟信道和数字信道。

3.2.2 数据通信系统的模型

数据通信系统是指通过通信线路和通信控制处理设备将分布在各处的数据终端设备连接起来,执行数据传输功能的系统。图 3.3 给出了数据通信系统的模型。

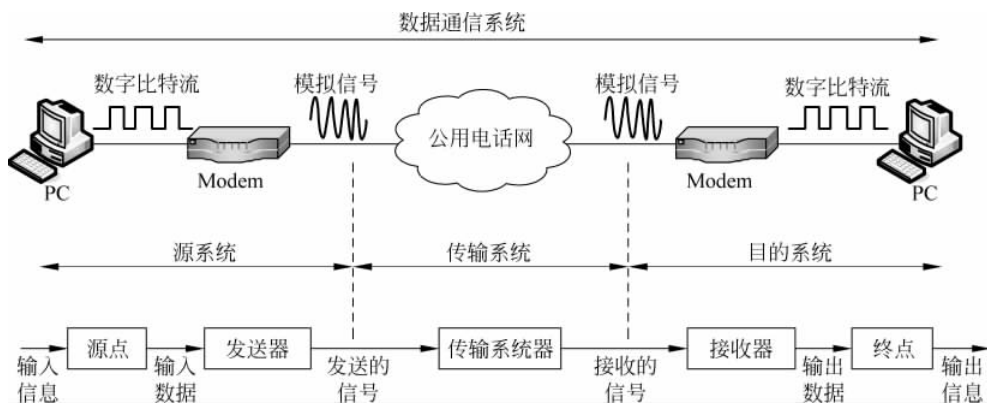


图 3.3 数据通信系统的模型

一个数据通信系统由源系统(或发送端)、传输系统(或传输网络)和目的系统(或接收端)3 个部分组成。

源系统一般包括以下两部分。

- (1) 源点: 源点设备发送要传输的数据,又称源站,发送输出的数字比特流。
- (2) 发送器: 通常源点发送的数据要通过发送器编码后才能够进行传输。

输。发送器把源点所要发送的数据转换成适合于在信道上传输的信号。

目的系统一般包括以下两部分。

(1) 接收器: 接收传输系统传输过来的信号, 并将其转换为能够被目的设备处理的信息。把从信道上接收的信号转换成终点所能识别的数据。

(2) 终点: 终点设备从接收器获取传输来的数据, 又称目的站。

源点和终点分别是数据的出发点与目的地, 又称为数据终端设备(Data Terminal Equipment, DTE)。DTE 通常属于资源子网的设备, 如资源子网中的计算机、数据输入/输出设备和通信处理机等。

发送器和接收器又称为数据线路端接设备(Data Circuit-terminating Equipment, DCE)。DCE 为 DTE 提供了入网的连接点, 通常被认为是通信子网中的设备。

3.2.3 数据通信系统的主要质量指标

衡量和评价一个系统的好坏, 必须涉及系统的主要性能指标问题。数据通信的主要质量指标是衡量数据传输的有效性和可靠性的参数。有效性是指传输一定的信息量所消耗的信息资源(带宽或时间), 主要由数据传输的数据速率、调制速度、传输延迟、信道带宽和信道容量等指标来衡量; 而可靠性是指接收信息的准确程度, 一般由数据传输的误码率指标来衡量。有效性和可靠性这两个要求通常是矛盾的, 因此只能根据需及技术发展水平尽可能取得适当的统一。例如, 在一定的可靠性指标下, 尽可能提高信息的传输速率; 或者在一定有效性条件下, 使消息的传输质量尽可能提高。模拟通信和数字通信对这两个指标要求的具体内容有较大差异。

1. 模拟通信系统的质量指标

(1) 有效性。模拟通信系统的有效性是用有效传输带宽来度量, 同样的信息采用不同的调制方式, 则需要不同的频带宽度。频带宽度越窄, 有效性越好。

(2) 可靠性。模拟通信系统的可靠性是用接收端最终的输出信噪比来度量, 信噪比越大, 通信质量越高。如普通电话要求信噪比在 20dB 以上, 电视图像则要求信噪比在 40dB 以上。

2. 数字通信系统的质量指标

数字通信系统中, 有效性用传输速率来表示, 可靠性用差错率(误码率)来衡量。

信道是通信双方以传输介质为基础的传输信息的通道, 它是建立在通信线路及其附属设备(如收发设备)上的。表面上看, 信道与传输介质好像差不多, 但信道又不能等同于传输介质, 同一条传输介质可以同时存在多条信号通道, 即一条通信介质构成的线路上往往包含了多条信道。与信号的分类相似, 信道也可分为传送模拟信号的模拟信道和传送数字信号的数字信道两大类。但数字信号经过数/模变换后就可以在模拟信道上进行传送, 而模拟信号经过模/数变换后也可以在数字信道上进行传送。由有线传输介质(如双绞线、同轴电缆、光缆等)构成的通信信道叫作有线信道; 由无线传输介质(如微波、卫星)构成的通信信道叫作无线信道。信道带宽或信道容量是描述信道的主要指标之一, 由信道的物理特性所决定。

信道带宽是指信道中能够传送的信号的频率范围。当信号的带宽超过信道带宽时, 信号就不能在该信道上传送, 或者传送的信号将会失真。为计算带宽, 需要在频率范围内用最

高频率减去最低频率。例如,最高频率为 5000Hz,最低频率为 1000Hz,则带宽即为 4000Hz。

信道容量是指单位时间内信道所能传输的最大信息量,即一个信道能够达到的最大的传输速率,它表示信道的传输能力。在通信领域中,信道容量常指信道在单位时间内可传输的最大码元数(码元是承载信息的基本信号单位,一个表示数据有效值状态的脉冲信号就是一个码元,其单位为波特),信道容量以码元速率(或波特)来表示。由于数据通信主要是计算机与计算机之间的数据传输,而这些数据最终又以二进制位的形式表示,因此,信道容量有时也表示为单位时间最多可传输的二进制的位数(也叫信道的数据传输速率),以位/秒(b/s)形式表示,简称为 bps。

按信道频率范围的不同,通常可将信道分为 3 类:窄带信道(带宽为 0~300Hz)、音频信道(带宽为 300~3400Hz)和宽带信道(带宽为 3400Hz 以上)。

(1) 数据传输速率(Rate)。数据传输速率是指通信系统单位时间内传送的二进制代码的位数(比特数),因此又称比特率,单位用比特/秒表示,记为 b/s 或 bps。

数据传输速率的高低,由每位数据所占的时间来决定,一位数据所占的时间宽度越小,其数据传输速率就越高。设 T 为传输的电脉冲的宽度或周期, N 为一个脉冲信号所有可能的状态数,则数据传输速率为

$$R_s = \frac{1}{T} \log_2 N \quad (\text{bps})$$

式中, $\log_2 N$ 是每个电脉冲信号所表示的二进制数据的位数(比特数)。如电信号的状态数 $N=2$,即只有 0 和 1 两个状态,则每个电信号只传送 1 位二进制数据,此时, $R_s=1/T$ 。

(2) 调制速率。调制速率又称波特速率或码元速率,它是数字信号经过调制后的传输速率,表示每秒传输的电信号单元(码元)数,即调制后模拟电信号每秒钟的变化次数,它等于调制周期(即时间间隔)的倒数,单位为波特(Baud)。若用 T (秒)表示调制周期,则调制速率为 $R_b=1/T$ (Baud),即 1 波特表示每秒钟传送一个码元。

显然,上述两个指标有如下的数量关系: $R_s=R_b \log_2 N$ (bps),即在数值上“波特”单位等于“比特”的 $\log_2 N$ 倍,只有当 $N=2$ (即双值调制)时,两个指标才在数值上相等。但是,在概念上两者并不相同,Baud 是码元的传输速率单位,表示单位时间传送的信号值(码元)个数,波特速率是调制速度,而 bps 是单位时间内传输信息量的单位,表示单位时间传送的二进制数的个数。

误码率是衡量通信系统在正常情况下的传输可靠性的指标。误码率是指二进制码元在传输过程中被传错的概率。显然,它就是错误接收的码元数在所传输的总码元数中所占的比例。误码率的计算公式为

$$P_e = N_e/N$$

式中, P_e 表示误码率; N_e 表示被传错的码元数; N 表示传输的二进制码元总数。上式在 N 取值很大时才有效。在计算机网络通信系统中,要求误码率低于 10^{-6} 。如果实际传输的不是二进制码元,需要折合成二进制码元来计算。在通信系统中,系统对误码率的要求应权衡通信的可靠性和有效性。

信道的带宽是由硬件设备改变电信号的跳变响应时间决定的。尽管信号的传输速率为 300 000km/s,但由于发送和接收设备存在响应时间,特别是计算机网络系统中的通信子网

还存在中间转发等待时间,以及计算机系统的发送和接收处理时间,所以,在系统的信息传输过程中存在着延迟(传输延迟)。

在计算机网络中由于不同的通信子网和不同的网络体系结构采用不同的中转控制方式,因此,在通信子网中存在的中转延迟只能依据网络状态而定。由电信号响应带来的延迟时间则是固定的。显然,响应时间越小,延迟就越小。也就是说,信道的带宽越大,延迟就越小。

传输延迟是指由于各种原因的影响,使得系统信息在传输过程中存在着不同程度的延迟或滞后的现象。信息的传输延迟时间包括发送和接收处理时间、电信号响应时间、中间转发时间和信道传输时间等。传输延迟通常又分为传输时延和传播时延。

传输时延:是指发送一组信息所用的时间,该时间与信息传输速率和信息格式有关。

传播时延:是指信号在物理媒体中传输一定距离所用的时间,它与信号传输速率和距离有关。人们都知道,在理想的情况下,电磁波的传输速率为 $300\,000\text{km/s}$ (即光速)。通常认为电磁波在光纤、卫星信道中的传输速率可达到光速,而在一般电缆中的传输速率约为光速的 $2/3$ 。用下面的例题来更好地理解传输时延和传播时延。

例:在相隔 1000km 的两地传输 3Kb 的数据,可以通过电缆以 20Kbps 的速率传输或通过卫星信道以 60Kbps 的速率传输,问从发送方开始到接收方接收到全部数据用哪种方式时间较短?(假定信息在电缆中传输速率为 $200\,000\text{km/s}$,而在卫星信道中的传输速率是 $300\,000\text{km/s}$,卫星距离地面 $36\,000\text{km}$)。

数据在电缆中的传输时延为 $3\text{Kb}/20\text{Kbps} = 150\text{ms}$,而其传播时延为 $1000\text{km}/(2 \times 10^5\text{km/s}) = 5\text{ms}$,因此使用电缆传输数据的总时延为 $150 + 5 = 155(\text{ms})$;数据在卫星中的传输时延为 $3\text{Kb}/60\text{Kbps} = 50\text{ms}$,而其传播时延为 $36\,000\text{km} \times 2/(3 \times 10^5\text{km/s}) = 240\text{ms}$ (注意:卫星传输数据不是地面直接传输,而是要通过空中的卫星转发器转发,因此,卫星传输的距离近似为卫星距离地面高度的 2 倍);因此使用卫星传输数据的总时延 $50 + 240 = 290(\text{ms})$ 。因此本例使用电缆传输数据时间较短。

3.3 数据传输方式

在数据通信系统中,通信信道为数据的传输提供了各种不同的通路。对应于不同类型的信道,数据传输采用不同的方式,如并行传输和串行传输方式,单工、半双工和全双工通信方式,异步传输和同步传输方式,基带传输和频带传输方式等。

3.3.1 并行传输和串行传输

在计算机内部各部件之间,计算机与各种外部设备之间以及计算机与计算机(或终端)之间都是以数据传输的方式实现通信的。依据传输线数目的多少,可以将数据传输方式分为并行传输和串行传输,并行传输用于短距离、高速率的通信,串行传输用于长距离、低速率的通信。

1. 并行传输

在并行传输中,一般至少有 8 个数据位同时在两台设备之间进行传输,如图 3.4 所示。

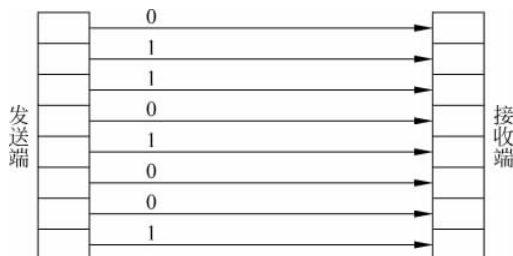


图 3.4 并行传输

并行传输是指数字信号以成组的方式在多个并行信道上进行的传输,数据由多条数据线同时传送与接收,每个比特使用单独的一条线路。

并行传输的优点在于传输速率快,发收双方不存在字符同步的问题;缺点是需要多个并行信道,增加了设备的成本,而且并行线路的电平相互干扰也会影响传输质量,不适合做较长距离的通信。并行传输主要用于计算机内部或同一系统设备间的通信。常见的并行传输如计算机与打印机之间的数据传输。

2. 串行传输

并行传输需要 8 条以上的数据线,这对于近距离的数据传输来说,其费用还可以负担,但当进行远距离数据传输时,采用这种方式费用就太高了。所以,在数据通信系统中,较远距离的通信采用的是另一种传输方式——串行传输方式。

在串行传输中,发送端和接收端有一条数据线相连,各数据位依次串行通过该线路。如图 3.5 所示,源数据站向目的数据站发出 01101001 的串行比特流。发收两端一次只能发送或接收一个数据位,因此所需数据线数目大大减少,各数据位依次串行地通过通信线路。由于在计算机内部总线上传输的是并行数据,要与外部设备进行串行通信,在发送端就需要把并行数据转换成串行数据,在接收端还需将串行数据转换成并行数据,计算机内部的串行通信适配器负责进行串行数据和并行数据的转换。在计算机局域网中,计算机之间也是串行传输,网卡就负责串行数据和并行数据的转换工作。

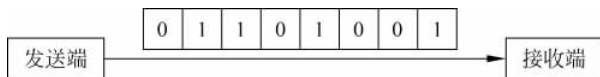


图 3.5 串行传输

相对于并行传输,串行传输的效率低,传输速率慢,但由于只有一条信道,减少了设备的成本,且易于实现和维护。串行传输适用于覆盖面很广的公共电话网络系统,所以在现行的计算机网络通信中,串行通信应用非常广泛。

3.3.2 单工、半双工和全双工通信

1. 单工通信

单工通信是指在两个通信设备间,信息只能沿着一个方向传输。

采用单工通信时,在通信设备双方中,一方为发送设备,另一方为接收设备,如图 3.6(a)所

示。广播和电视节目的传送以及寻呼系统都属于单工通信的例子。

2. 半双工通信

半双工通信是指两个通信设备间的信息交换可以双向进行,但不能同时进行。也就是说,在同一时刻仅能使信息在一个方向上传输,如图 3.6(b)所示。

半双工通信设备的两端要求既要有发送设备,又要有接收设备,因此该方式需要具有信道转换能力,通常用软件控制换向,换向过程中存在换向的延迟时间问题,也可以采用人工操作机械开关的方法进行控制。典型的例子是对讲机或计算机与终端的通信。

3. 全双工通信

全双工通信是指两个通信设备间可以同时进行两个方向上的信息传输,如图 3.6(c)所示。

通信双方应同时具有发送和接收的功能,与通信站相接的传输设备和传输控制协议必须提供全双工的工作方式,同时还应对缓存器作特殊的考虑。平时使用的手机类似于全双工通信。

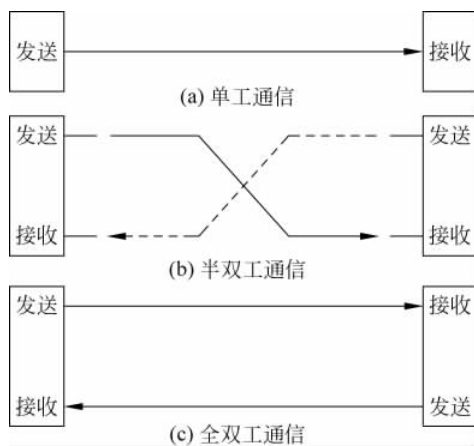


图 3.6 三种通信方式

3.3.3 异步传输和同步传输

在数据通信中,有一个问题是必须解决的,那就是同步问题。同步问题就是发送方发出数据后,接收方如何从接收到的连续不断的信号中识别出数据的开始位置和结束位置。目前,在串行传输中所采用的同步方式有两种:一是异步传输方式;二是同步传输方式。

1. 异步传输方式

异步传输方式又称为起止式同步方式,它是以字符为单位进行传输的,即每个字符都独立传输。每个字符在传输时都在字符前加上起始位和在字符后加上结束位,以表示一个字符的开始和结束。

一般起始位信号的长度规定为 1b(位)的宽度,极性为 0,结束位信号可以为 1b、1.5b 或 2b 的宽度,极性为 1,其长度的选取与所采用的传输代码类型有关。起始位和结束位的作用是实现字符同步,字符之间的间距是任意的,但发送一个字符时,每个字符包含的位数都是相

同的,且每一位占用的时间长度是双方约定好的,并且保持各位都恒定不变,如图 3.7 所示。

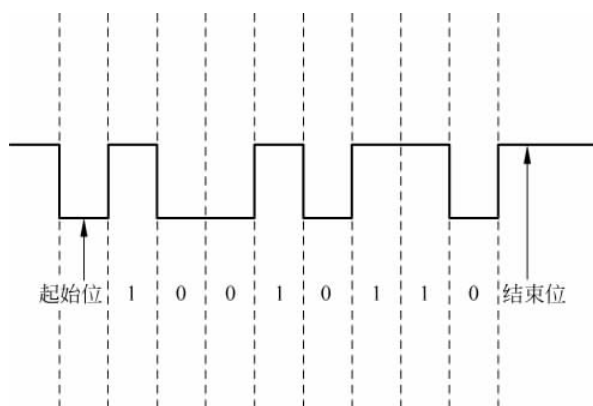


图 3.7 异步传输方式

在异步传输方式中字符可以被单独发送或连续发送,字符与字符的间隔期间可以连续发送 1 状态,当不传字符时,不要求收发时钟同步,仅在传输字符时,收发时钟才需要在字符的每一位上同步。同步的具体过程是:若发送端有信息要发送时,即将信号从不发送信息的 1 状态转到起始态 0,接收端检测出这种信号状态的改变时,就利用该信号的反转启动接收时钟,以实现收发时钟的同步。同理,接收端一旦收到结束位,就将定时器复位以准备接收下一个字符。

异步传输方式的优点是每一个字符本身就包括了本字符的同步信息,不需要在线路两端设置专门的同步设备;缺点是每发送一个字符就要添加一对起止信号,增加了线路开销,传输速率低。异步传输方式常用于小于或等于 1200bps 的低速率数据传输中,目前仍在广泛使用。

2. 同步传输方式

同步传输方式是以固定的时钟节拍来连续串行发送数字信号的一种方法。在数字信息流中,各位的宽度相同,且字符顺序相连,字符之间没有间隙。为使接收方能够从连续不断的数据流中正确区分出每一位(比特),则需要先建立收发双方的同步时钟。实际上,在同步传输方式中,不管是否传送信息,要求收发两端的时钟都必须在每一位上保持一致。因此,同步传输方式又常被称为比特或位同步。

在同步传输中,数据的发送一般是以一组字符或比特流为单位进行的。为了使接收方容易确定数据组的开始和结束,需要在每组数据的前后加上特定字符作为起始标志和结束标志,同时还可以用这些标志来区分和隔离连续传输的数据。特定标志字符一般随不同的规程而有所不同。例如,在面向比特的高级数据链路控制规程 HDLC 中,采用比特串 01111110 作为起始标志和结束标志,如图 3.8 所示。在暂时没有信息传输时,连续发送 01111110 使接收端可以一直保持和发送端同步。

实现同步传输方式中的收发时钟同步的方法有两种:外同步法和自同步法。外同步法就是在传输线中增加一根时钟信号线以连接到接收设备的时钟上,在发送数据信号前,先向接收端发一串同步时钟脉冲,接收端则按照这个频率来调整自己的内部时钟,并把接收时钟重复频率锁定在同步频率上,该方法适用于近距离传输。自同步法是让接收方从接收的数



图 3.8 HDLC 中的同步传输方式

据流中直接提取同步信号,以获得与发送时钟完全相同的接收时钟,该方法常用于远距离传输。

同步传输克服了异步传输方式中的每一个字符都要附加起始信号和结束信号的缺点,具有较高的效率,但实现较为复杂,常用于大于 2400bps 速率的传输。

3.3.4 基带传输和数字信号编码

1. 基带传输

在数据通信中,由计算机或终端等数字设备产生的、未经调制的数字数据相对应的电脉冲信号通常呈矩形波形式,即表示计算机中二进制数据比特序列的数据信号是典型的矩形脉冲信号,这个矩形脉冲信号就是基带信号。基带信号所占有(固有)的频率范围称为基本频带,简称基带。在通信信道中直接传输这种基带信号的传输方式就是基带传输,它将占用线路的全部带宽,也称为数字基带传输。

2. 数字数据的数字信号编码

数字数据的数字信号编码问题就是要解决数字数据的数字信号表示问题,数字数据可以由多种不同形式的电脉冲信号的波形来表示,数字信号是离散的电压或电流的脉冲序列,每个脉冲代表一个信号单元(或称码元)。最普遍且最容易的方法是用两种码元分别表示二进制数字符号 0 和 1,每位二进制符号和一个码元相对应。表示二进制数字的码元的形式不同,产生的编码方法也不同,这里主要介绍曼彻斯特编码和差分曼彻斯特编码。

曼切斯特编码的编码方法是将每一个码元再分成两个相等的间隔,在时刻中间发生跳变。当为 0 时,在间隔的中间时刻,从低电平变为高电平;当为 1 时,在间隔的中间时刻,从高电平变为低电平。这种编码的特点就是在每一个码元时间间隔内,都有一次电平的跳转,对提取位同步信号非常有利。以太网中采用的就是这种编码技术。

差分曼切斯特编码的编码方法是在每一个码元时间间隔内,无论为 0 或为 1,在间隔的中间都有电平的跳转。但当为 0 时,间隔开始时刻有跳转;当为 1 时,间隔开始时刻无跳转。与曼切斯特编码的不同之处在于每位中间的跳转作为同步时钟信号,而取值是 0 还是 1 则根据每一位的起始处有没有变化来判断。令牌环网中采用的就是这种编码。曼切斯特编码和差分曼切斯特编码分别如图 3.9(a)和图 3.9(b)所示。

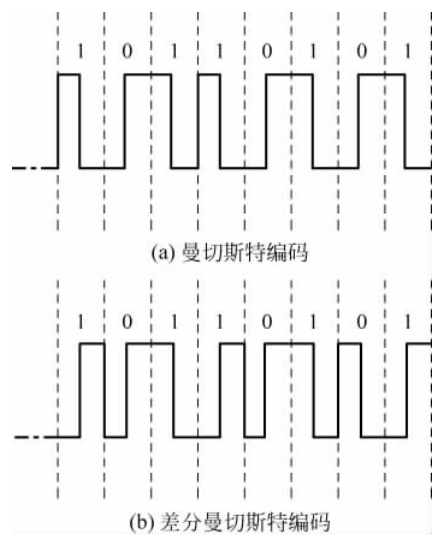


图 3.9 曼切斯特编码和差分曼切斯特编码