

第 3 章 物理层与通信技术

计算机网络是近代电子通信和计算机技术的融合,传统通信以语音通信为主,通信技术比较成熟,这自然是计算机通信的基础;计算机网络以数据通信为主,要对语音通信进行改造,形成基于数据通信的现代通信技术。目前传统的公用电话网络已经被计算机网络融合改造成为计算机网络的一部分。

物理层是网络体系中的底层,其主要任务是完成信号传输(或比特传输),解决通信问题,涉及通信技术,在继承和发展了语音通信技术的基础上形成以数据传输为主体的现代网络通信技术。物理层学习路线图如图 3-1 所示。

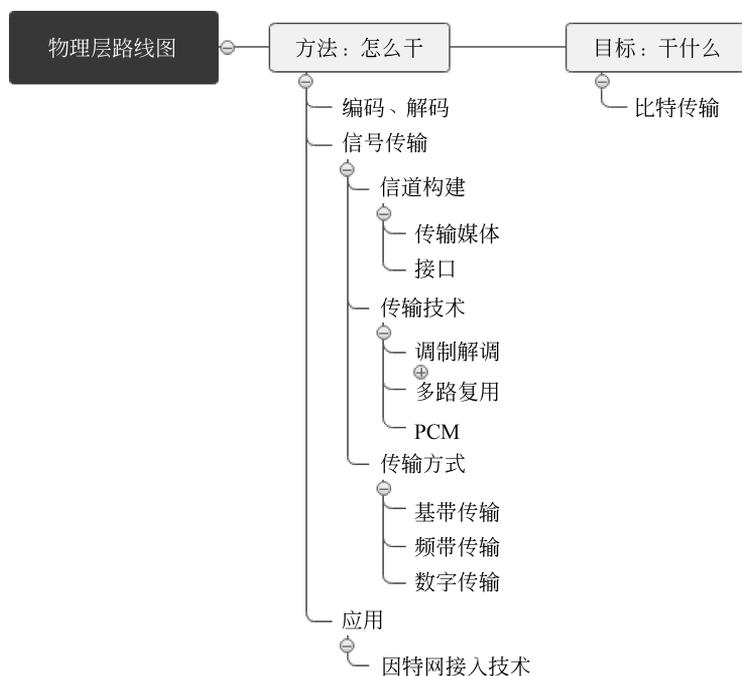


图 3-1 物理层学习路线图

物理层处于信息交换网的底层,通过信号传递实现了以比特为单位的数据传输。它的基本功能是信号传递,要解决“怎么能传递信号”及“如何高质量传输”等问题。因此,在物理层里要研究构建信道、信号传输技术、数据的信号表示等问题。信道构建涉及传输媒体和线路接口等问题;传输技术是为了实现信号“多、快、好、省”地传输,主要的传输技术有调制解调、多路复用、数/模转换等。这些问题决定了本章的内容,此外,通信的同步、抗干扰等技术限于篇幅没有讲解,作为应用案例,本章教材最后介绍了因特网接入技术。

物理层考虑的是怎样利用各种传输媒体上的比特流。从实现上看,由于传输媒体、性

能要求及光电传输形式的不同,物理层有多种实现方法,但对上层提供的功能服务是一样的,即比特传输。在计算机网络体系上,由于分层的独立性,物理层上面的数据链路层感觉不到这些差异的存在,这样数据链路层就可以无差别地用统一方式使用物理层,而不必考虑具体的物理网络,从而实现比特流的透明传输。

3.1 数据通信的原理与性能

计算机网络是通信技术和计算机技术相结合的产物,将现代通信、信息处理、行业应用集于一体。计算机网络在使用现代通信技术的同时,也深刻改造了通信技术,推动现代通信技术飞速发展。

从古代的烽火狼烟到近代的电报、电话,通信一直伴随人类社会。以电报、电话通信为代表的近代通信也已有几百年的历史,构建了成熟的通信技术和完善的通信网,为网络化通信奠定了基础。计算机网络是在近代通信技术基础上发展起来的,但它又不同于传统的语音通信,它更需要的是数字通信。近二三十年来,以卫星通信、光纤通信为基础发展起来的数字通信尤为重要,成为现代通信的代表,是计算机网络的基础。

3.1.1 数据通信与信号

使用计算机网络的目的是交换信息。信息交换是通过数据交换实现的,数据交换最终靠信号传递实现,如图 2-2 所示。

信息(information)蕴含在数据中,是数据加工的产物。数据(data)是信息的载体,文本、语音、图形、图像等都以数据的形式存储。在计算机中用二进制数 0、1 表示数据。但当这些以二进制代码表示的数据要通过物理线路进行传输时,还需要将其变成信号。信号(signal)是数据的电磁或电子编码,是数据的表示形式。

作为数据的电磁波表示形式,信号用随时间变化的电磁波的某个参量(振幅、频率或相位)表示数据。按表示数据的参量取值是否连续,信号可分为模拟信号和数字信号。模拟信号是指参量随时间连续变化的信号,又被称为连续信号。最典型的模拟信号是语音信号。数字信号是指参量不随时间连续变化的信号,通常表现为离散的脉冲形式,因此也被称作离散信号。数字信号的取值状态是有限的。计算机、数字电话和 DVD 机等处理的都是数字信号。例如,

信息: NETWORK

数据: 1001110 1000101 1010100 1010111 1001111 1010010 1001011(ASCII 码)

数字信号: 离散的方波信号,如图 3-2 所示。

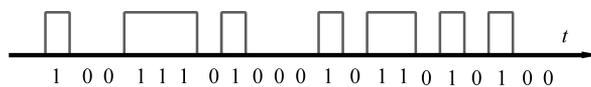


图 3-2 离散的方波信号

虽然模拟信号与数字信号有明显的差别,但两者是可以相互转变的,即模/数、数/模转换。模拟信号可以通过采样、量化、编码等系列步骤转换成数字信号,数字信号则可以通过解码、平滑等处理方法转换成模拟信号。

3.1.2 数据通信模型

一般地,一个点到点的通信系统都可由图 3-3 加以概括。该图反映了通信系统的共性,称为通信系统模型。每个数据通信系统都由信源、信宿和信道三部分组成,并且在信道上存在不可忽略的噪声影响。



图 3-3 通信系统模型

信源的作用是把各种要传送的数据转换成原始的电信号。原始的电信号不宜直接在信道上进行传输,变换器把原始的电信号转换成适合在信道上传输的信号。信道是在信源和信宿之间建立一条传送信号的物理通道。信道建立在传输介质之上,但同时包括了传输介质和附属的通信设备(如中继器等)。从信道上传到远端的信号,先由接收端的反变换器复原成原始的电信号,然后再送给信宿。噪声是信道中噪声及分散在通信系统其他各处噪声的集中表示。

数据通信中的信源、信宿一般是计算机或其他数字终端装置,ITU(国际电信联盟)称其为数据终端设备(Data Terminal Equipment,DTE),变换器和反变换器称为数据端接设备(Data Circuit-terminating Equipment,DCE)。图 3-4 是早期利用公共电话网进行网络通信的例子。



图 3-4 通过公共电话网传输的网络通信

每个信道都有其独特的传输特性,如速率、频率、带宽特性,这是由信道的物理属性决定的。一般地,按照信道中传输的是模拟信号还是数字信号,可以相应地把信道分为两类,即模拟信道和数字信道。习惯上,把使用模拟信道完成的模拟信号传输简称为模拟传输,把使用数字信道完成的数字信号传输简称为数字传输。

模拟通信系统中的模拟放大器将信号放大的同时也放大了噪声。长距离传输中的信号多级模拟放大导致噪声也会越来越大,对远距离通信的质量造成很大的影响。而数字通信系统则是采用再生中继器的方法。中继器根据传输信号识别出比特数据,然后再生成标准数字信号转发出去,过滤掉了噪声干扰,因此,现代数字电话的通话质量要比传统模拟电话的通话质量好得多。

在通信网发展的初期,所有的信道都是模拟信道。由于数字传输可提供更高的通信服务质量,因此,过去建造的模拟信道已被新的数字信道所代替。现在,计算机网络使用的主干通信线路已实现了数字化,但目前大量的用户线基本上还是传统的模拟信道。模拟信道与数字信道并存的局面也使得物理层的内容较为复杂。

如果信源产生的信号与信道上传输信号的类型或参数不同,在发送端就要进行信号类型转换或参数变换。信号变换的类型和方法如图 3-5 所示。

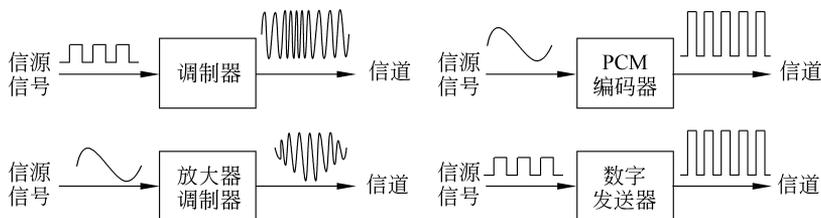


图 3-5 信号变换的类型和方法

3.1.3 通信方式

图 3-3 表示了从信源向信宿的数据传输过程,实际应用中,通信双方可互为信源、信宿,从通信的双方交互的方式看,可以有以下三种传输方式。

单工通信。数据信号只能从信道的一端单方向地传送到另一端,即信息流只能沿一个方向传送,如无线电广播就是一个典型的例子。

半双工通信。数据信号可从信道的一端传到另一端,也可反方向传输,但是不能在两个方向上同时进行传输。

全双工通信。通信的双方可以同时发送和接收数据。支持数据信号在两个方向上同时进行传输。全双工通信必须使用全双工信道,通信效率较高,线路、设备的成本也较高。

3.1.4 信道的性能指标

一个通信信道的性能,一般从信号或数据传输的数量和质量两个方面评价。传输数量用传输速率衡量,传输质量用误码率衡量。

传输速率是衡量信道传输数量的指标,常用信道传输信号或数据的数量表征。

数据传输速率是信道传输数据的速率,即每秒传送数据的二进制位数,又称为比特率或信息速率,其单位是比特每秒(记为 b/s),比 b/s 大的单位还有 kb/s、Mb/s 和 Gb/s。

码元速率是信道传输信号的速率,指每秒传送的码元数,单位为“波特”(Baud),也称波特率。所谓码元,是指单位信号。一个码元就是一个单位的信号,所以码元速率又称为信号速率。

通信中,数据是由信号携带过去的。由于数据在进行信号编码时所采用的编码方案不同,信号携带的数据位数不同,即一个码元所代表的二进制位数也不相同。所以,信道

的码元速率并不一定等于数据速率。

通信中常采用只有高低两种电平的二元码表示二进制数据,这时一个码元携带一个比特,如图 3-6(a)所示。如果采用多元制(又称多进制)编码方案,如图 3-6(b)所示,信号有 4 种状态(-3V 、 -1V 、 $+1\text{V}$ 、 $+3\text{V}$),每种状态要用 2 位二进制数表示,所以,信道上每传过去一个码元,就相当于传过去两个比特,此时比特率是码元率的 2 倍。

一般地,多元制编码的码元状态数为 M (M 为 2 的整数次幂),信息速率 v_b 与码元速率 v_B 的关系是: $v_b = v_B \log_2 M$ 。

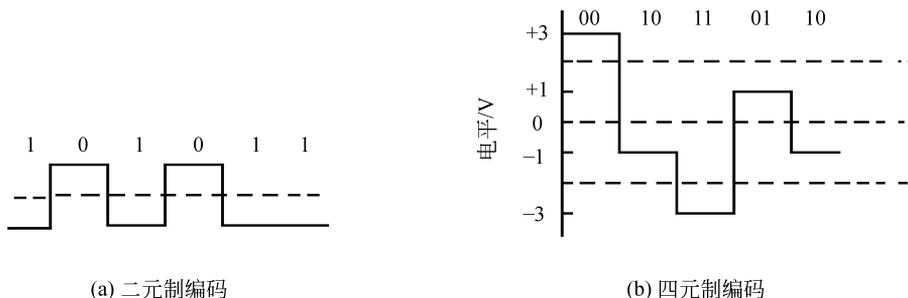


图 3-6 数据编码

误码率是指在一段时间的传输过程中,收到的错误码元数占传输的总码元数的比率。在实际的通信系统中,传输差错是不可避免的。误码率是数据通信系统在正常工作状况下用来衡量传输可靠性的指标。

3.1.5 信道的最大传输速率

为了提高信号的传输效率,我们总是希望能够传输尽可能多的码元。而任何实际的信道都不是理想的,不能无限快地传输码元,现实中信道都有一个最大传输速率。

根据傅里叶级数我们知道,如果一个信号的所有频率分量都能完全不变地通过信道传输到接收端,那么在接收端由这些频率分量叠加起来而形成的信号则和发送端的信号完全一样,即接收端完全恢复了发送端发出的信号。但现实世界上没有任何信道能毫无损耗地通过所有频率分量。

任何实际的信道所能传输的信号频率都有一定的范围,称为信道通频带的宽度,即“带宽”(bandwidth)。例如,一个低通信道,如果对于从 0 到某个截止频率 f_c 的信号通过时振幅不会明显衰减,而超过此截止频率的信号因衰减而不能通过,此信道的带宽就是 f_c 。信道的带宽是制约信道通信能力的根本因素。信道的带宽是由传输媒体和有关的附加设备与电路的频率特性综合决定的。低通信道的通频带如图 3-7 所示。

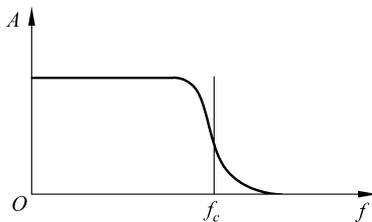


图 3-7 低通信道的通频带

19 世纪初,法国数学家傅里叶(Jean-Baptiste

Fourier)证明:任何一个周期为 T 的函数 $g(t)$ 都是由无穷多个正弦函数和余弦函数合成的。一个持续时间为 T 的数字信号,可看作为一个以 T 为周期的周期函数 $g(t)$ 。 $g(t)$ 可以表示成用正弦函数和余弦函数组成的无穷级数:

$$g(t) = \frac{1}{2}c + \sum_{n=1}^{\infty} a_n \sin(2\pi nft) + \sum_{n=1}^{\infty} b_n \cos(2\pi nft)$$

其中 $f=1/T$ 为基波频率, c 为直流分量, a_n 和 b_n 分别是 n 次谐波的正弦和余弦振幅值, 谐波的次数越高,其频率也越高。

由此可见,一个频率为 f 的方波是由基波的 1 到无穷次谐波叠加而成的。也就是说,方波含有无限高频的正弦波、余弦波成分。单稳脉冲信号的带宽为无穷大。

数字脉冲信号由直流信号和基频、低频、高频等多个谐波分量组成。在脉冲信号的频谱中,从零开始有一段能量相对集中的频率范围被称为基本频带(base band),简称基频或基带。基频等于脉冲信号的固有频率,其他低频和高频谐波的频率等于基频的整数倍,随着频率的升高,高次谐波的幅度减小,直至趋于零。

发送端发出的脉冲波在信道上传输时,由于通频带的限制,只有低频谐波到达接收端,高频谐波不能到达,所以有限的低次谐波合成后的信号不再是标准的方波了,有失真。失真严重到一定程度时因数据不能被正确识别,导致通信失败。

因此,若信道的带宽是固定的,用它直接传输数字信号的码元率越高,可通过的谐波越少,失真越大。换句话说,带宽一定的情况下,信道的码元速率有一个最高上限值,如果信号速率过高,在接收端就不能精确地还原出原始信号,不能识别出数据了,如图 3-8 所示。

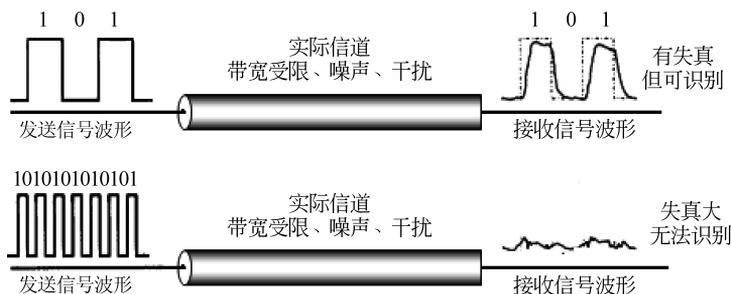


图 3-8 数据传输率与失真

其实,带宽只是导致方波传输失真的一个因素,其他的如噪声、干扰、衰减等也是导致失真的重要因素,也会加大失真。

通过以上分析,得出一个重要结论:数字数据通信时,在任何信道中,码元传输的最大数据速率是一定的,是有上限的。

从以上定性分析我们知道,受信道的带宽制约,信道有一个最大数据速率,但这个速率是多大呢?对这个问题,奈奎斯特和香农先后展开了研究,并给出了定量计算公式。

1924 年,奈奎斯特给出了无热噪声,理想低通信道的最大码元速率计算公式,即奈奎斯特公式。

$$\text{理想低通信道的最大码元速率} = 2W \text{ 码元/秒}$$

其中, W 是信道的带宽(单位为 Hz)。

例 3-1 若理想低通信道带宽为 8kHz, 任何时刻数字信号可取 $-3V$ 、 $-1V$ 、 $+1V$ 和 $+3V$ 四种电平之一, 参见图 3-6, 求信道的最大码元速率与最大数据速率。

解: 理想低通信道不考虑热噪声, 根据奈奎斯特公式, 信道的最大码元速率是 $2 \times 8\text{kHz} = 16000$ 波特, 最大数据速率为 $C = 16 \times \log_2 4 = 32(\text{kb/s})$ 。

由于码元的速率受奈氏准则的制约, 带宽一定时, 若要提高数据传输速率, 可以采用有效的编码技术, 使每个码元都能携带更多的信息。

前面的奈奎斯特公式仅考虑了无噪声的理想信道。对于有噪声的信道, 情况将会迅速变坏。1948 年, 香农进一步研究了受噪声干扰时的信道情况, 并给出了受噪声干扰时信道最大数据速率的公式, 即香农公式。

$$C = W \log_2(1 + S/N)$$

其中, C 是信道的最大数据速率(单位: b/s); W 是信道的带宽(单位: Hz); S 为信号功率, N 为噪声功率, S/N 为信噪比。

注意, 信噪比常用分贝(dB)表示, 信噪比的分贝数 $= 10\lg(S/N)$ 。例如, 当 $S/N = 1000$ 时, 信噪比是 30dB。

例如, 对于一个带宽为 3kHz, 信噪比为 30dB 的信道, 无论其使用多少个量化电平, 也不管采样速度多快, 其数据传输率不可能大于 30 000b/s。香农的结论是根据信息论推导出来的, 适用的范围非常广。值得注意的是, 香农的结论仅给出了一个理论极限, 而实际上, 要接近这个极限也是相当困难的。

3.2 数据传输方式及传输技术

如何理解数据传输方式? 为什么有多种传输方式?

早期的电话网是专为语音通信设计的模拟传输; 为提高通信质量, 后期电话网的干线改造成了数字信道, 使用数字传输, 计算机网络是基于数字传输的; 在近距离的计算机网络通信中, 基带传输扮演着重要的角色。

3.2.1 基带传输与数据编码

什么是基带传输? 它有什么特点? 适用于哪些场合?

1. 基带传输

最直接、简单的方法就是把计算机使用的数字数据 1 或 0 直接以两种不同的电压表示, 然后送到信道上传输, 也就是基带传输方式。计算机使用基带传输方式传输数据最直接、最方便。

数字数据转换的数字脉冲信号由直流信号和基频、低频谐波、高频谐波等多种谐波分量组成。在脉冲信号的频谱中, 从零开始有一段能量相对集中的频率范围被称为基本频带(base band), 简称基频或基带。基频等于脉冲信号的固有频率, 其他低频谐波和高频

谐波的频率等于基频的整数倍,随着频率的升高,高次谐波的幅度越来越小,直至趋于零。与基频对应的数字信号被称为基带信号。由于信道带宽的限制,在数字信道上传输时,数字信号的直流、基频、低频和高频分量不可能全部都传输到对端,只要将占据脉冲信号大部分能量的基带信号传送出去,就可以在接收端还原出有效的原始数据信息。我们将这种在数字信道中以基带信号形式直接传输数据的方式称为基带传输。

基带传输是一种非常基本的数据传输方式,适合传输各种速率要求的数据,且传输过程简单,设备投资少。基带传输一般使用了传输介质的整个频带范围,但是,由于信道带宽的限制,数字信号的高频成分衰减掉了,并且,基带信号的能量在传输过程中也很容易衰减,所以在没有信号再放大的情况下,基带信号的传输距离一般不会大于 2.5km。因此,基带传输被较多地用于短距离的数据传输,如局域网中的数据、近距离设备间的数据传输。

2. 数据编码

要在信道上传输数字数据,必须先把数据变成数字信号。将数字数据变换为数字传输信号的过程称为编码(coding),逆过程称为解码(decoding)。

在该基带传输系统中要解决的关键问题是数字数据的编解码问题,即在发送端,要将二进制数据序列通过编码转换为适合在数字信道上传送的基带信号;而在接收端,则要将接收到的基带信号通过解码恢复为二进制数据序列。

在实际应用中,为什么不直接将高、低电平加到物理信道上传输,而要按一定的方式进行编码之后再传输呢?

(1) 编码更有利于在接收端区分“1”和“0”。

(2) 编码可以在传输信号中携带时钟,便于接收端提取定时时钟信号。

由于介质所处的环境比较差,杂波干扰比较多,因此数据在传输过程中就会受到它们的干扰。采用合理的编码方式,可以适应信道的传输特性,充分利用信道的传输能力。

下面着重介绍几种常见的数字数据编码方式。

1. 不归零编码

不归零(Non-Return Zero, NRZ)编码分别采用两种高低不同的电平表示两个二进制数“0”和“1”。通常,高电平表示“1”,低电平表示“0”。图 3-9 (a)给出了一个 NRZ 编码的例子。

NRZ 编码实现简单,但其抗干扰能力较差。另外,由于接收方不能准确地判断位的开始与结束,从而收发双方不能保持同步。例如,由于时钟偏移,接收端可能把连续的 15 个 0 识别成 16 个 0。需要采取另外的措施保证发送时钟与接收时钟同步。通常,以提供一个专门用于传送同步时钟信号信道的方式来解决该问题。

2. 曼彻斯特编码

曼彻斯特(Manchester)编码将每比特的信号周期 T 分为前 $T/2$ 和后 $T/2$,用前 $T/2$ 传送该比特的反(原)码,用后 $T/2$ 传送该比特的原(反)码。所以,在这种编码方式中,每

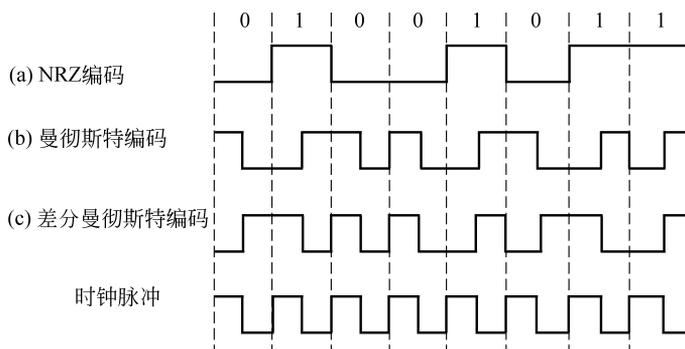


图 3-9 数字信号的三种编码方式

一位波形信号的中间都存在一个电平跳变,如图 3-9(b)所示。由于任何两次电平跳变的时间间隔是 $T/2$ 或 T ,因此提取电平跳变信号就可作为收发双方的同步信号,而不需要另外的同步信号,故曼彻斯特编码又被称为“自含时钟编码”。

曼彻斯特编码用高低电平的两个码元表示一比特数据,编码效率低。所以,在同样带宽的信道上,用 NRZ 编码的数据速率是用曼彻斯特编码的数据速率的 2 倍,这使得信道带宽的利用率降低,不宜在高速链路上使用。

3. 差分曼彻斯特编码

差分曼彻斯特编码是对曼彻斯特编码的一种改进。每比特的取值是根据其开始处是否出现电平的跳变决定的。通常规定有跳变者代表二进制“0”,无跳变者代表二进制“1”,如图 3-9(c)所示。差分曼彻斯特编码比曼彻斯特编码的变化少,因此更适于传输高速的信息,广泛用于宽带高速网。

扩展阅读：编码与应用

不同的编码有不同的特点和优点,适用于在不同的环境下解决特定的应用问题,正如我们习以为常的拖鞋、运动鞋、高跟鞋、水靴各有各的用途。理清归零编码与不归零编码的区别,理解通信人的苦衷与思想情结,需要更多的探索体验。

通过百度查找：归零编码、4B/5B 编码、海明码。

3.2.2 模拟传输与调制解调技术

为什么要用模拟传输？其优缺点各有哪些？其关键技术是什么？

1. 模拟传输

在计算机的远程通信中,不能直接传输原始的基带信号。模拟传输是指用模拟信道传输数据的通信方式。如果信道的带宽大于模拟信号的带宽,则信号衰减小,能远距离传

输;同时,由于模拟信号只在信道的一个频带内传输,所以常称之为频带传输。

早期的模拟传输主要承载语音通信。计算机网络发展初期,因电话网已普及,常借用电话网络传输计算机数据,即利用电话网实现计算机互联或用户接入,如图 3-4 所示。用电话线传输计算机数据时,就是用电话线的语音频带传输数据的。

利用模拟信道传输数字数据就需要把数字信号变成模拟信号,这称作数字调制,是用调制解调技术实现的。通信形式如图 3-4 所示。这种利用模拟信道的一个频带传输数字数据的传输方式称作频带传输。恰当地选择载波的频率,通过频分复用的形式在主干线上可以实现多路数据的传输,从而实现宽带传输。

在计算机网络中,频带传输的关键问题是如何将计算机中的数字信号转换为适合模拟信道传输的模拟信号。

2. 调制解调技术

在发送端,需要将二进制数据变换成能在电话线上传输的模拟信号,即所谓的调制(modulation);而在接收端,则需要将收到的模拟信号重新还原成原来的二进制数据,即所谓的解调(demodulation)。

通常,将在数据发送端承担调制功能的设备称为调制器(modulator),而把在数据接收端承担解调功能的设备称为解调器(demodulator)。由于数据通信是双向的,所以实际上在数据通信的任何一方都要同时具备调制和解调功能,我们将同时具备这两种功能的设备称为调制解调器(modem)。调制解调器俗称为“猫”,当通过传统拨号、XDSL 等基于传统电话网络的方式上网时,都要用到该设备。

调制就是利用调制信号(这里是指携带有信息的基带信号)改变载波的某一参数的波形变换过程。常用的载波是正弦波,可用 $A \sin(2\pi ft + \varphi)$ 表示,它的振幅、频率和相位三个参量在调制前是常量。使这三个参量分别随调制信号有规律地变化,就构成了调幅(AM)、调频(FM)和调相(PM)三种基本的调制方式,如图 3-10 所示。经过调制以后的信号称为已调制信号,它仍然是模拟信号。

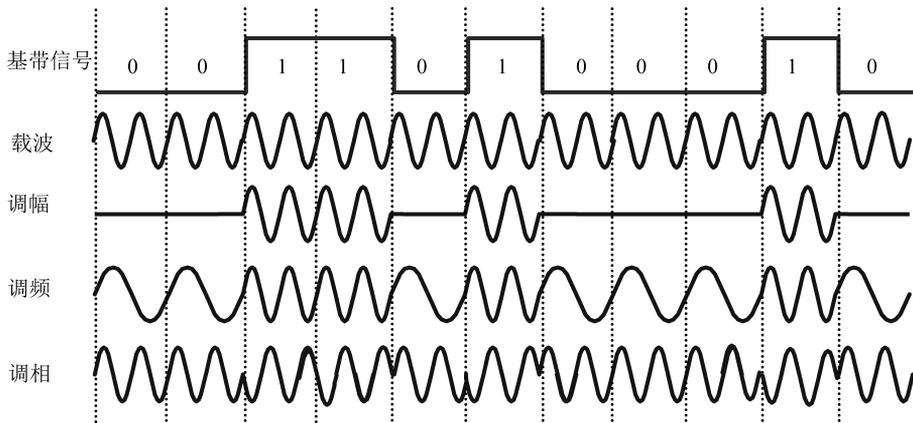


图 3-10 数字数据的 3 种调制方法

调幅,即载波的振幅随基带数字信号而变化。例如,0 对应无载波输出,1 对应有载波输出。

调频,即载波的频率随基带数字信号而变化。例如,0 对应频率 f_1 ,1 对应频率 f_2 。

调相,即载波的初始相位随基带数字信号而变化。例如,0 对应相位 0° ,1 对应相位 180° 。

对于数字信号,调频也叫频移键控(FSK),调相也叫相移键控(PSK)。

在实际应用中,各种调制方式可适当地组合。最常用的有调相与调幅的结合,例如,既调幅又调相,载波有 4 种相位(0° 、 90° 、 180° 、 270°)变化和两种振幅变化,调制后的信号就可有 8 种状态,这样每个码元可传送 3 比特的信息,从而在相同的调制速率下就可达到更高的数据传输速率。

3.2.3 数字传输与脉码调制技术

数字传输有哪些优点? 关键要解决什么问题?

近年来,数字传输无论在理论上,还是在技术上,都有突飞猛进的发展。

数字传输可实现高质量的远距离通信。在模拟传输过程中,长距离传输要使用放大器来放大信号,这在放大信号的同时也放大了噪声,多级放大会引起噪声的积累,导致接收端的信号质量较差。数字传输过程中,方波脉冲式的数字信号由于噪声和信道带宽的有限也会发生衰减和失真,需要用中继器进行恢复、转发。中继器不同于放大器,它通过阈值识别出原来信号代表的“0”或“1”,并重新产生一个标准的方波脉冲转发出去,从而过滤掉了干扰,不会造成噪声累加,通信质量高。因此,现代通信中常采用数字传输。

与模拟传输相比,数字传输还具有抗干扰能力强、可以再生中继、便于加密、数字设备易于集成化等一系列优点。另外,各种通信业务,无论是语音、电报,还是数据、图像等信号,经过数字化后都可以在数字传输网中传输、交换并进行处理,这就更显示出数字传输的优越性。因此,后期电话网的干线都改造成了数字信道,计算机网络的广泛应用更推动了数字传输的快速发展。通信网数字化后,电话语音等模拟信号要在发送端先变换成数字信号,然后再进行数字传输,在接收端再复原成模拟信号,如图 3-11 所示。

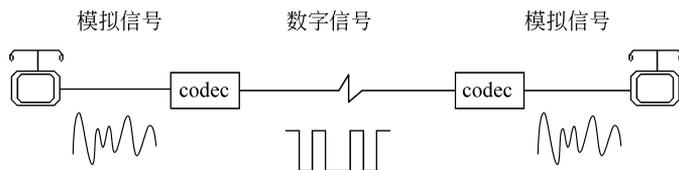


图 3-11 模拟信号的数字传输

数字传输从技术上首先要解决数模转换问题,其次,为适应海量网络数据的高速传输,借用时分复用技术形成国际通用、高次群速率的数字传输系统。

在发送端将模拟信号变换为数字信号的设备称为编码器(coder)。在接收端将收到的数字信号复原成模拟信号的设备称为解码器(decoder)。在双向通信系统中,每端都要

使用既能编码又能解码的设备,即编码解码器(codec)。

下面借用图 3-12 说明模拟信号的数字传输原理。在发送端以时间 t (足够小) 为周期测定模拟信号在各时刻的幅值 a 、 b 、 c , 通信系统只要把这些值传给接收端, 接收端就可以根据这些幅值, 用描点法恢复出波形, 这就相当于完成了模拟信号的传输; 而这些幅值如果用二进制数值表示, 就可以用数字传输完成, 这样就相当于用数字传输把模拟信号传递到接收端了。

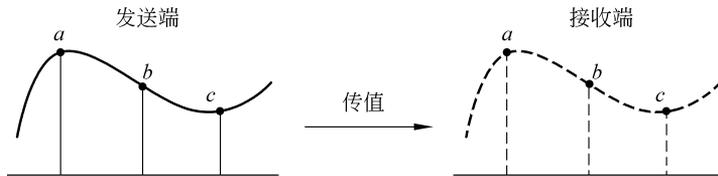


图 3-12 模拟信号的数字传输原理示意图

脉冲编码调制 (Pulse Code Modulation, PCM) 常简称为 PCM 编码或脉冲调制。PCM 体制最初是为了在电话局之间的中继线上传送多路的电话, 还广泛用在声卡、手机上, 实现音频的数字化。

PCM 编码的过程要经过三步: 取样、量化和编码。模拟语音信号转变为数字信号的过程大致如下(参见图 3-13)。

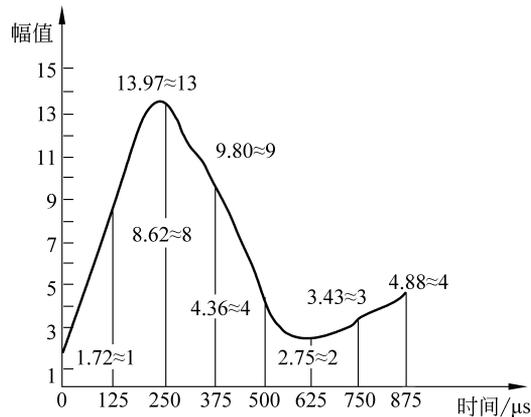


图 3-13 脉冲编码调制示例

第一步: 必须对语音信号进行取样。取样就是按照一定的时间间隔测量模拟信号的幅值(即样本值), 在时间上把模拟信号离散化。根据采样定理, 只要采样频率不低于语音信号最高频率的 2 倍, 就可以从采样脉冲信号无失真地恢复出原来的语音信号。标准的电话信号的最高频率为 3.4kHz, 为方便起见, 对语音的采样频率就定为 8kHz, 相当于采样周期 $t=125\mu\text{s}$ 。在图 3-13 所示的例子中, 可得到一系列的信号样本值 1.72、8.62、13.97……

第二步: 对样本值量化。量化就是把在取样点测量到的幅值(样本值)分级取整的过程, 在幅度值上把模拟信号离散化。图 3-13 中, 预先把最大幅值分为 16 级, 舍去样本值

的小数部分,对样本值取整,得到样本值的整数序列 1、8、13……

第三步:编码,把整数的样本值序列用 4 比特的二进制数表示,得到可以在数字信道上传输的数字序列 0001**1000**1101**1001**0100……

很显然,在脉冲编码调制过程的采样、量化环节都会导致失真,关于减少失真的改进技术,请读者参考其他文献进一步思考。

在实际应用中,语音的取样频率是 8000Hz,即每秒获得 8000 个样本值,每个样本采用 256 级量化,编码成 8 位二进制码元。可见,一个标准话路的模拟电话信号转换出的 PCM 信号的速率是每秒 8000 个 8 位二进制码元,即 64kb/s。请注意,这个速率是最早制定出的语音编码的标准速率。

为了有效地利用传输线路,通常是将许多个话路的 PCM 数据用时分复用(TDM)的方法装成帧(即时分复用帧),然后再送往线路上一帧接一帧地传输。应用中因复用的具体话路数的不同形成了不同的数字传输系统,承担着 Internet 主干网的数据传输,详见 3.3 节数字传输系统。

时分复用是多个用户在不同的时间片(分配给用户的专用时隙)占用信道传输数据,从而共享信道的技术,各用户使用的信道频率范围是一样的,具体参见 3.2.4 节的内容。

3.2.4 信道复用技术

为何开发了多种复用技术,它们分别适用于哪些传输?

信道复用技术是计算机网络中广泛使用的通信技术,各种传输方式中都有可用的信道复用技术。信道复用提高了信道利用率,节省成本。

在远距离通信中,主干信道的容量、带宽都比较大,为了提高通信线路传送信息的效率,通常采用在一条物理线路上建立多条通信信道的多路复用(multiplexing)技术。多路复用技术使得在同一传输介质上可传输多个不同信源发出的信号,从而可充分利用通信线路的传输容量,提高传输介质的利用率。特别是在远距离传输时,使用多路复用技术可以节省大量的电缆成本及后期的线路维护投资。

图 3-14 展示了多路复用的原理。常用的多路复用方式主要有频分多路复用(Frequency Division Multiplexing, FDM)、时分多路复用(Time Division Multiplexing, TDM)、波分多路复用(Wavelength Division Multiplexing, WDM)和码分多路复用(Code Division Multiplexing, CDM)等。

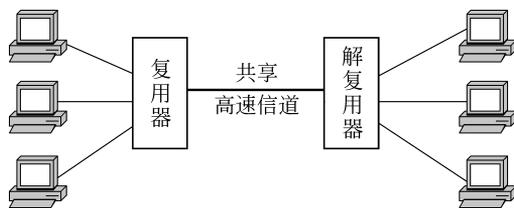


图 3-14 多路复用技术示意图

1. 频分多路复用

频分多路复用是模拟传输方式中使用的信道复用技术。它的使用条件是各路信号频率范围(带宽)是有限的,而信道的带宽比一个信号的带宽大得多。

频分多路复用的原理是将线路的带宽划分成若干段较小的子频带,每个子频带来传输一路信号,如图 3-15 所示。当有多路信号输入时,发送端将各路信号分别调制到所分配的频带范围内的载波上,合成后送到信道上;传输到接收端后,利用接收滤波器再把各路信号区分开并恢复成原来信号的波形。为了防止相邻两个信号频率覆盖造成干扰,在相邻两个信号的频率段之间通常要留有一定的频率间隔。

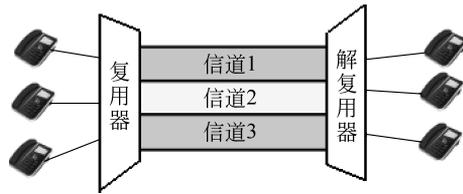


图 3-15 频分多路复用技术示意图

频分多路复用的方法起源于电话系统,所以下面就利用电话系统这个例子进一步说明频分多路复用的原理。现在一路电话的标准频带是(0.3~3.4)kHz,高于 3.4kHz 和低于 0.3kHz 的频率分量都将被衰减掉。如果在一对导线上同时传输若干路这样的电话信号,接收端就无法把它们区分开。若利用频率变换,将三路电话信号搬到频段的不同位置,如图 3-16 所示这样,就形成了一个带宽为 12kHz 的频分多路复用信号。

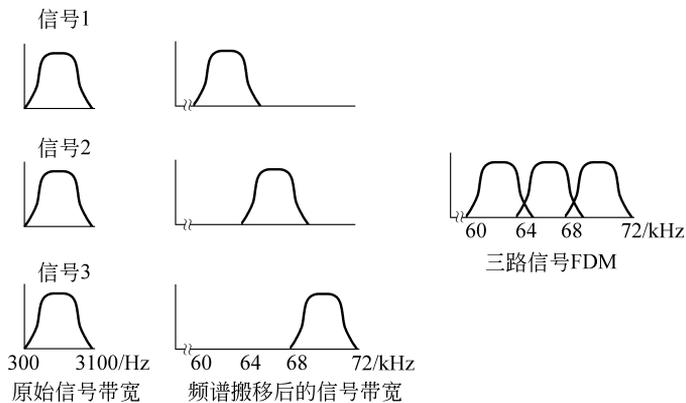


图 3-16 频分多路复用实现原理示意图

图 3-16 中,一路电话信号共占有 4kHz 的带宽。由于每路电话信号占有不同的频带,所以到达接收端后,就可以将各路电话信号用滤波器区分开。

2. 时分多路复用

时分多路复用(TDM)是数字传输方式中使用的信道复用技术。它的使用条件是信

道的数据传输速率远大于一路数据的速率。通过时分多路复用,多路低速数字信号可复用一条高数据速率的信道。

频分多路复用技术在数字传输中适用吗?

信号的频宽与信道的带宽相当时,就不能使用频分多路复用技术了。时分多路复用访问(Time Division Multiplexing Access, TDMA)就是将一条物理的传输线路按时间分成若干时间片,一路数据占用一时间片,时间片轮转。每个信号在自己的时间片内独占带宽,不像 FDMA 那样各路信号分享同一带宽。

时分多路复用又可进一步分为同步时分多路复用(Synchronous Time Division Multiplexing, STDM)和异步时分多路复用(Asynchronous Time Division Multiplexing, ATDM)两类。

1) 同步时分多路复用

同步时分多路复用如图 3-17 所示。多路复用器将线路的传输时间片固定地分配给各信源,即使在某个时间片内某个信源没有信号发送,该时间片也不能被其他信源所使用,因此各个信道的发送与接收必须是同步的。

显然,当时分复用系统中的某些信源没有数据要发送或发送的数据量太少时,这种固定时间片的方式会造成很大的带宽浪费。

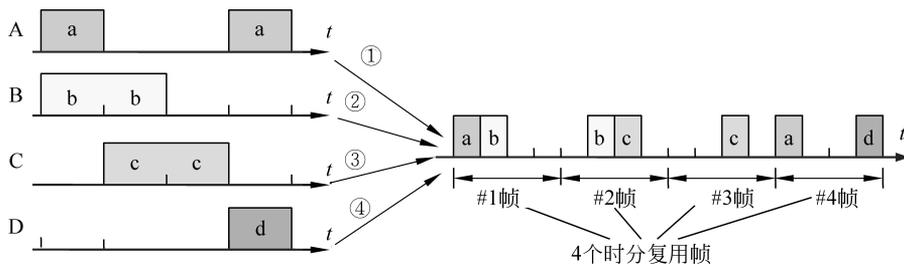


图 3-17 同步时分复用原理示意图

2) 异步时分多路复用

异步时分多路复用也称统计时分多路复用,如图 3-18 所示。

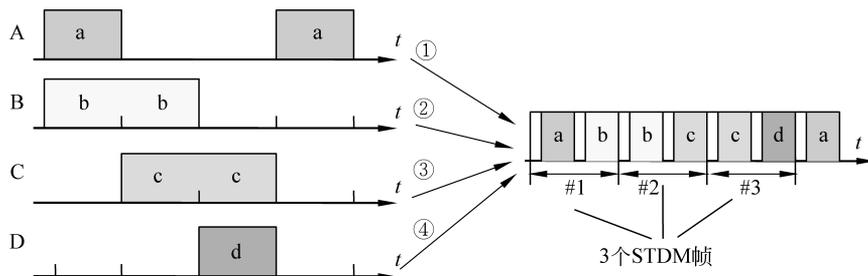


图 3-18 异步时分多路复用原理示意图

ATDM 不给每个信源分配固定的时间片,而是根据信源的需要动态地按需分配时间片,即有数据要发送的信源才分得时间片,没有数据发送的信源则不分配时间片;若占有

时间片的信源提前发送完数据,那么其他有数据要发送的信源可提前使用自己的时间片。

ATDM 方式中,为了接收端能正确接收和区分各信源的数据,各路数据块必须附加地址信息,这也不可避免地增加了一些开销。

最后说明的是,同步 TDM 与统计 TDM 帧是在物理层传送比特流中所划分的帧,与数据链路层中所讲的帧不是一个概念。

3. 波分多路复用

在光纤中,为了实现多路复用,我们采用了波长分隔的多路复用方法,简称波分多路复用。由于波长和频率之间的固有关系,因此可以把波分多路复用看成频分多路复用技术在光纤信道上使用的一个变种。光纤技术的应用使得数据的传输速率空前提高。目前,一根单模光纤的传输速率可达到 2.5Gb/s,再提高传输速率就比较困难了。

如图 3-19 所示,WDM 系统的核心器件是衍射光栅。在 WDM 中使用的衍射光栅是无源的,因此其可靠性非常高。

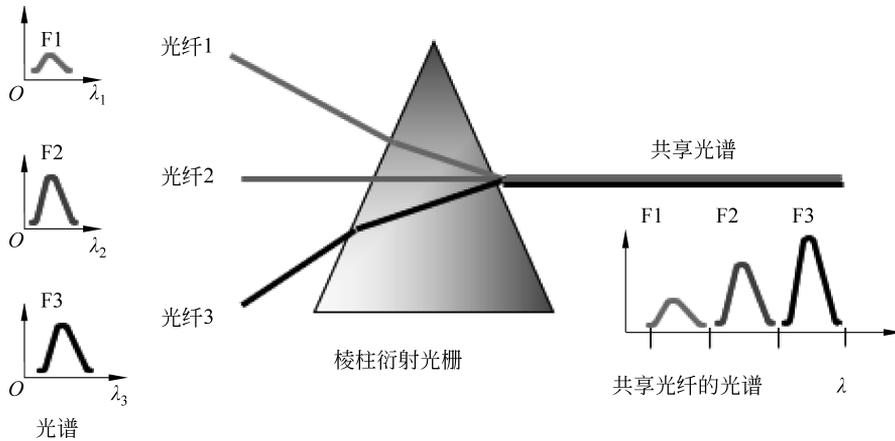


图 3-19 波分多路复用原理示意图

最初,人们只能在一根光纤上复用两路光载波信号,这种复用方式称为波分复用。随着技术的发展,在一根光纤上复用的光载波信号路数越来越多。现在已能做到在一根光纤上复用 80 路或更多路数的光载波信号,于是就使用了密集波分复用(Dense Wavelength Division Multiplexing,DWDM)这一名词。图 3-20 说明了波分复用的概念。

8 路传输速率均为 2.5Gb/s 的光载波(其波长均为 1310nm),经光的调制后,分别将波长变换到 1550~1557nm,每个光载波相隔 1nm(密集波分复用光载波的间隔一般是 0.8nm 或 1.6nm)。这 8 个波长很接近的光载波经过光复用器后,就在一根光纤中传输。因此,在一根光纤上数据传输的总速率就达到了 $8 \times 2.5\text{Gb/s} = 20\text{Gb/s}$,但光信号传输一段距离后就会衰减,因此对衰减了的光信号必须进行放大才能继续传输。现在已经有了很好的掺铒光纤放大器(Erbium Doped Fiber Amplifier,EDFA)。EDFA 不需要进行光电转换,而直接对光信号进行放大。两个光纤放大器之间的光缆线路长度可达 120km,而光复用器和光分用器之间无光电转换的距离可达 600km(只需放入 4 个光纤放大器)。

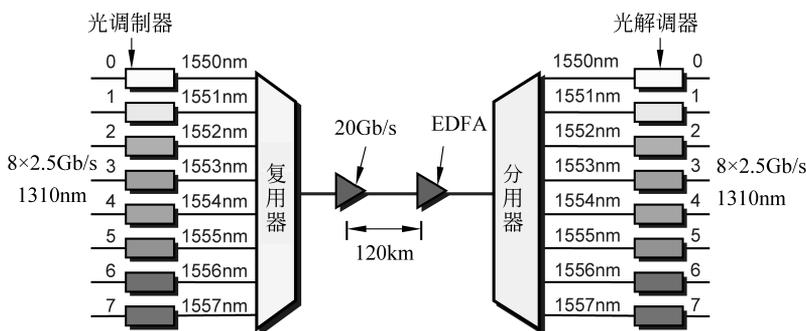


图 3-20 密集波分复用技术原理示意图

在地下铺设光缆是耗资很大的工程。因此，人们总是在一根光缆中放入尽可能多的光纤（例如，放入 100 根以上的光纤），然后对每一根光纤使用 16 倍的密集波分复用技术，这样一根光缆的总数据率可达 $100 \times 40\text{Gb/s}$ ，或 4Tb/s 。

4. 码分多路复用

码分多路复用是一种用于移动通信的复用技术，它的出现来自人们对更高通信质量的需求。第二次世界大战期间因战争的需要而研究开发出的 CDMA 技术，其思想初衷是防止敌方对己方通信的干扰，在战争期间广泛应用于军事抗干扰通信，后来由美国高通公司更新称为商用蜂窝电信技术。

码分多路复用目前多用于移动通信，它的复用原理是基于码型区分用户。系统给每个用户分配一个相互不重叠的地址码，通过不同的编码区分各路原始信号。在 CDMA 的发送端，对要传输的数据地址码进行编码，然后实现信道复用；在 CDMA 接收端，要用与发送端相同的地址码进行解码。

码分多址系统中，各发送端用各不相同的、相互正交的地址码调制其发送的信号。在接收端，利用码型的正交性，通过地址识别（相关检测）从混合信号中选出相应的信号。

各用户使用经过挑选的不同码型，并且彼此不会造成干扰。将一个窄带信号扩展到很宽的频带上，允许来自不同用户的多个信号共享相同的频带。

在 CDMA 中，每一个比特时间再划分为 m 个短的间隔，称为码片。通常， m 的值是 64 或者 128。在本节中，为了讲述简便，将 m 的值设置为 8。

码片序列：使用 CDMA 的每个站被指派一个唯一的 8b 码片序列。一个站如果要发送比特 1，则发送它自己的 8b 码片序列。如果要发送比特 0，则发送该码片序列的二进制反码。例如，S 站的 8b 码片序列是 00011011（0 是低电平，用 -1 表示；1 是高电平，用 $+1$ 表示）。发送比特 1 时，就发送序列 00011011；发送比特 0 时，就发送序列 11100100。为了方便，按惯例将码片中的 0 写为 -1 ，将 1 写为 $+1$ ，因此 S 站的码片序列： $(-1 -1 -1 +1 +1 -1 +1 +1)$ 。

每个站分配的码片序列不仅必须各不相同，并且还必须互相正交，即向量 \mathbf{S} 和 \mathbf{T} 的规格化内积都是 0；令向量 \mathbf{S} 表示站 S 的码片向量， \mathbf{T} 表示其他任何站的码片向量。两个不同站的码片序列正交，就是向量 \mathbf{S} 和 \mathbf{T} 的规格化内积(inner product)都是 0：

$$\mathbf{S} * \mathbf{T} = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m S_i T_i = 0$$

令向量 \mathbf{S} 为 $(-1 -1 -1 +1 +1 -1 +1 +1)$, 向量 \mathbf{T} 为 $(-1 -1 +1 -1 +1 +1 +1 -1)$ 。把向量 \mathbf{S} 和 \mathbf{T} 的各分量值对应位相乘再相加的代数和为 0, 由此可以看出这两个码片序列是正交的。

如图 3-21 所示, 假如现在有两个手机用户 S 和 T 都要发送数据 110, 每个站在发送比特 1 的时候, 就是发送了自己的码片序列, 发送 0 的时候, 发送的是自己的码片序列的反码。因为所有的用户都使用相同的频率发送数据, 作为第三方的接收方会同时收到两个用户发送信号的叠加 $S_x + T_x$, 当接收方打算接收 S 站发送的信号, 就用 S 站的码片序列与收到信号的对应位相乘再相加再除以 m , 即求规格化内积, 这相当于分别计算 $S \cdot S_x$ 和 $S \cdot T_x$, 然后再求它们的和。显然, 后者是零, 前者就是 S 站发送的数据序列。

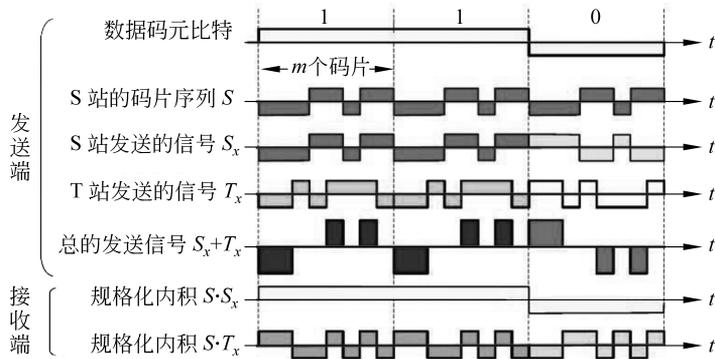


图 3-21 CDMA 原理示意图

这种通信方式类似于在一个大会议室中两两互相交谈, 但由于使用的是不同的码片序列, 所以仍然可以清楚地听到其他同伴在说什么, 可以做到互不干扰。

码分多路复用, 各路通信在时间、频带上都是共享的, 这是它的优点。但可以看出, 数字信号频率远高于数据速率, 也是有代价的。

3.3 数字传输系统

互联网的城市间远程传输都是怎么实现的? 使用了哪些技术? 海底光纤是怎么通信的?

数字传输有许多优点, 在后期的电话干线及计算机网络主干网中广泛使用, 用来传输语音、文字、数据、图像和视频等网络数据。为了充分利用高速传输线路的带宽, 通常将多路 PCM 数据用 TDM 方式汇集成时分复用帧, 按某种固定的复用结构进行长途传输, 形成数字传输系统。

1. 准同步数字系列

历史上曾经形成两个不同的 PCM 复用速率标准, 即欧洲 EI 标准和北美 T1 标准, 我

国使用的是 E1 标准,互不兼容的速率标准给跨地区通信带来不便。

语音 PCM 脉冲编码调制中,国际上通用 8kHz 的取样频率、256 级量化、8 位编码,形成 64kb/s 的语音标准速率。在欧洲,将 32 路语音数据作为一个基群进行复用,32 路数据组成一个帧。1 个传输周期分成 32 个时隙,每个时隙传输 1 路语音的数据,其中第 0 号时隙用于帧同步,第 16 号时隙为信令,所以 E 系列的一次群(基群)的速率 $E1 = 8 \times 8000 \times 32 = 2.048(\text{Mb/s})$,4 个一次群复用构成二次群,速率达到 8.448Mb/s。北美、日本使用的 T1 系统共有 24 个话路。每个话路的采样用 7b 编码,然后再加上 1 位信令码元,因此一个话路也是占用 8b。帧同步码是在 24 路的编码之后加上 1b,这样每帧共有 193b。因此,T1 一次群的数据率为 1.544Mb/s。E 系列和 T 系列数字系统的速率情况见表 3-1。

表 3-1 数字传输系统的群和数据速率

群	欧洲、中国			北美、日本		
	类型	话路数	速率/(Mb/s)	类型	话路数	速率/(Mb/s)
一次群	E1	30	2.048	T1	24	1.544
二次群	E2	120	8.448	T2	96	6.312
三次群	E3	480	34.368	T3	672	44.736
四次群	E4	1920	139.264	T4	4032	274.176

以上数字传输系统存在着许多缺点,其中最主要的是以下两个。

(1) 速率标准不统一。由于多路复用的速率体系有 E1 速率、T1 速率两个互不兼容的国际标准,使得国际通信困难,如果不对高次群的数字传输速率进行标准化,国际范围的高速数据传输就很难实现,影响了基于光纤的高速率通信的发展。

(2) 不是同步传输。是准同步复用方式,相应的数字复用系列称为准同步数字系列(Plesiochronous Digital Hierarchy,PDH)。在数字通信发展的初期,为了适应点到点通信的需要,大量的数字传输系统都是准同步数字体系。准同步是指各级的比特率相对于其标准值有一个规定的容量偏差,而且定时用的时钟信号并不是由一个标准时钟发出来的,通常采用正码速调整法实现准同步复用。由于各支路信号的时钟频率有一定的偏差,给时分复用和分用带来许多麻烦。当数据传输的速率较低时,各路信号的时钟频率的微小差异并不会带来严重的不良影响。但是,当数据传输的速率不断提高时,时钟同步的问题就成为迫切需要解决的问题。

2. 同步数字系列

为了解决上述问题,美国国家标准协会(ANSI)在 1988 年推出了在光纤传输基础上的数字传输标准,即同步光纤网(Synchronous Optical Network,SONET)。整个同步网络的各级时钟都来自一个非常精确的主时钟(通常采用昂贵的铯原子钟,其精度优于 $\pm 1 \times 10^{11}$),SONET 为光纤传输系统定义了同步传输的线路速率等级结构。

国际电信联盟电信标准化部门(ITU-T)的前身——国际电报电话咨询委员会

(CCITT)以 SONET 为基础,制定出国际标准同步数字系列(Synchronous Digital Hierarchy,SDH)。1988年通过的 G707~G709 三个建议书,涉及复用速率、网络结点接口、复用结构、复用设备、网络管理、线路系统、光接口、信息模型、网络结构等内容,对其速率系列、信号格式和复用结构等基本内容做出了规定。随后又陆续通过了一系列建议,对 SDH 的各个方面逐步加以规范,形成一套完整的全球统一的同步数字传输网标准,使之成为不仅适用于光纤,而且也适用于微波和卫星传输的通用技术体制,命名为 SDH。SDH 已经确立了在数字传输方面的主导地位。SDH 采用的信息结构等级称为同步传送模块 STM-N(Synchronous Transport Mode, $N = 1, 4, 16, 64$)。SDH 的基本速率为 155.52Mb/s,称为第 1 级同步传递模块 STM-1,其他等级的速率见表 3-2。SDH 在物理层定义了帧结构,SDH 的帧结构是以 STM-1 为基础的,更高的等级是用 N 个 STM-1 同步复用组成 STM-N,如 4 个 STM-1 构成 STM-4,16 个 STM-1 构成 STM-16。

表 3-2 SDH 的四种等级

SDH 等级	数据速率(Mb/s)	SDH 等级	数据速率(Mb/s)
STM-1	155.52	STM-16	2488.32
STM-4	622.08	STM-64	9953.28

从 OSI 模型的观点看,SDH 属于其最底层的物理层,并未对其高层有严格的限制,便于在 SDH 上采用各种网络技术,支持 ATM 或 IP 传输。

SDH 是一种标准的同步 TDM 多路复用网络,可以方便地为其他业务网络提供各种所需带宽的电路,并复用底层传输媒体的带宽,其中最典型的传输媒体就是光纤。SDH 并不专属于某种传输介质,它可用于双绞线、同轴电缆,但 SDH 用于传输高数据率时则需用光纤。这一特点表明,SDH 既适合用作干线通道,也可作支线通道。例如,SDH 可以很方便地为两个因特网主干路由器之间提供一条点对点的高速链路。

现在 SDH 已成为全球公认的数字传输网体制的标准,是为当前因特网提供点对点远程高速链路的重要技术,在广域网领域和专用网领域得到了巨大的发展。中国移动、电信、联通、广电等电信运营商都已经大规模建设了基于 SDH 的骨干光传输网络。利用大容量的 SDH 环路承载 IP 业务、ATM 业务或直接以租用电路的方式出租给企、事业单位。

扩展阅读：光网络

传统的 SDH 传输网络由光传输系统和交换结点的电子设备组成。光纤用于两个交换结点之间的点对点的数据传输。在每个交换结点中,光信号都被转换成电信号后再进行交换处理。网络应用对传输带宽的需求是永无止境的,随着波分复用(WDM)和光交换技术的发展,人们提出全光网(All Optical Network, AON)的概念,用光网络结点代替原来交换结点的电子设备,组成以端到端光通道为基础的全光传输网,避免因光电转换所带来的带宽瓶颈,充分发挥光传输系统的容量和光结点的巨大处理能力,而路由器等电信