

第 1 章 调制解调器概述

调制解调器对许多人来说是比较陌生的,人们对它的认识仅仅局限于名称。这一章我们将从数字信号的基本特征开始,通过对整个数据传输过程所涉及到的各个主要环节的介绍,把调制解调器的作用及基本工作原理概要介绍一下,为后续各章打一个基础。同时,通过这一章可以了解数据传输的基本原理以及调制解调器的基本操作过程。

1.1 数字信号的基本特征

众所周知,电信号通常分为模拟信号和数字信号两大类。大家熟悉的话音信号是模拟信号,而传真机、计算机等产生的则是数字信号。例如,计算机给出的是原始二进制数据,用有一定规则的电信号来代表。要在通信信道上传输计算机的数据,实质上就是要在通信信道上传输这些代表二进制数据的电信号。这些代表二进制数据的电信号就是通常所说的数字信号。常用的数字信号有多种,图 1.1 所示是数字信号的一例。

研究数字信号的详细特性,超出了本书范围。但数字信号有一个共同的特性,即都是由基本脉冲波形组成的。这些表征数据通信的最基本单元——脉冲波形,其特性对通信信道有严格的要求。为描述脉冲波形通过信道以后的变化,首先要了解脉冲波形的频率成分。

脉冲波形的频率成分含有奇次谐波。事实上,一个脉冲波形可以由其所有各奇次正弦波的幅度叠加而被综合起来,如图 1.2 所示。这种综合必须保持各次谐波的正确幅度和相位。从图上可以

双工调制解调器	(37)
3.1.4 V.23 公共交换电话网中使用的标准化 600/ 1200 波特调制解调器	(39)
3.1.5 V.26 四线租用电话型电路上使用的标准化 2400bps 调制解调器	(40)
3.1.6 V.26bis 公共交换电话网中使用的标准化 2400/ 1200bps 调制解调器	(41)
3.1.7 V.26ter 公共交换电话网和点对点两线租用电话 型电路上使用的标准化 2400bps 使用回波消除 技术的双工调制解调器	(42)
3.1.8 V.27 租用电话型电路上使用的标准化 4800bps 带人工均衡器的调制解调器	(44)
3.1.9 V.27bis 租用电话型电路上使用的标准化 4800/ 2400bps 带自动均衡器的调制解调器	(45)
3.1.10 V.27ter 公共交换电话网中使用的标准化 4800/2400bps 调制解调器	(47)
3.1.11 V.29 点对点四线租用电话型电路上使用的 标准化 9600bps 调制解调器	(48)
3.1.12 V.32 公共交换电话网和租用话路上使用的、 以高达 9600bps 的数据传信率操作的两线双工 调制解调器系列	(52)
3.1.13 V.33 点对点租用型电话电路上使用的标准化 14400bps 调制解调器	(59)
3.2 Bell System 标准	(64)
3.2.1 Bell System 103/113	(65)
3.2.2 Bell System 212A	(66)
3.2.3 Bell System 202	(67)
3.2.4 Bell System 208	(67)
3.3 关于纠/检错及数据压缩的建议与标准	(68)
3.3.1 V.42 使用异步-同步变换 DCE 用的错误校正规程	(68)
3.3.2 MNP 标准	(69)
3.4 同步数据传输的数据传信率标准	(71)

们的直流电压成分大于 0V。

为了在信道上不失真地传输这些数字信号,就要求线路对每次谐波分量(从直流分量到最高次谐波频率分量)的衰减都应是相同的。当然这个要求对避免波形失真还不是充分条件。第二个要求是所有谐波频率分量的相位延时都应当完全一致,因为如果对各频率成分延时不一致时,它们就不能同时到达接收端,也就不能正确恢复出原信号波形,从而导致信号波形失真。

从数字信号的上述特点看,要保证其在传输过程中不失真,就要求信道特性在整个信号频率范围内的衰减系数和相位延时保持常数。但是,上述要求对一个实际信道是不可能的,必须在成本、距离、速率和允许失真等方面做折中考虑。

1.2 信道

数据传输系统包括三大部分:发送设备、接收设备和传输信道。数据通信的任务就是以一定的速度和准确度,将数据(二进制数字序列——比特流)从数据源传送给数据宿。信道是为通信双方提供的电通路,它可能是由电缆或光纤等构成的有线线路,也可能是由地面微波接力或卫星中继等构成的无线线路,还可能是有线与无线的混合线路。信道为数据信号提供通道,同时又会使数字信号产生畸变并增加噪声与干扰。结果使数据在到达接收端时产生错误,最终结果是限制数字信号的传输速率。

目前,在数据传输中最常用的信道是有线(包括明线、对称电缆和光纤)及微波中继(地面微波接力与卫星中继)等。

解决数据传输的信道问题有二个基本的途径。其一是设计建造专门传输数据的网络,例如综合业务数字网(ISDN);其二是利用现有的电话信道。目前,比较现实的方法是利用已有的电话信道传输数据,它是非常方便和经济的。利用现有电话信道传输数据会带来一系列的技术问题,这些都要在调制解调器中加以解决。

现有的以电话业务为主的公共交换电话网(PSTN)拥有大量的信道可供传输数据。公共交换电话网由用户终端设备、用户回路、交换机和中继线四个部分组成。终端设备是电话机也可以是音频带数据终端。用户回路提供用户到交换机的电连接,一般采用音频电话电缆中的双线。交换机按照用户的要求实现一个用户回路与网内另一个用户回路的接续。中继线提供交换机之间的相互连接,中继线又分为市话中继线(市话局之间用来连接各交换机)、长途中继线(用来连接长途局)和用来连接长途局和市话局的中继线。长途中继线一般采用载波传输多路复用的四线制,主要使用同轴电缆,也有用微波无线线路的。市话中继线及连接长途局和市话局的中继线采用音频传输二线制的对称电缆,在与市话局连接的长途局内实现二线与四线的转换。这样便构成国际国内四通八达的通信网。

由上所述可知,有线信道的大部分传输媒质容许的传输频带是相当宽的,其中对称电缆可达到 $100\sim 240\text{kHz}$,同轴电缆超过 10MHz ,因此都可用来传输高速数据。问题是传输数据往往都安排在一个话路内进行,这样较方便的是既通话又传输数据,其典型速率在 $1200\sim 2400\text{bps}$,能满足一般用户的要求。通过均衡及采用高效调制解调器,传输速率可提高到 $4800\sim 9600\text{bps}$ 。公共电话网本来是为了传输话音而设计的,对传输数据会产生一些不利影响,主要有:

衰减

信号在公共交换电话网上传输一般要经过交换机的多次转接,信号在传输中要受到衰减。尽管在网中有增音器放大信号,但因传输路径是随机的,因此衰减是影响数据传输的主要因素。CCITT 规定数据传输最大净损耗不得超过 28dB 。

衰减-频率失真

信号通过信道不仅幅度被衰减,而且波形也可能产生畸变,波形畸变又称失真。上面讨论过数据脉冲波形是由多种不同频率分

量构成的,接收信号可视为这些分量分别通过信道后的叠加。如果这些不同的频率成分的分量分别受到不同的衰减或不同的时延,就会引起失真,这种失真主要来源于音频电缆及各种滤波器。图 1.3 给出一个话路频带的典型频率特性。这种失真限制了一个话路的带宽只能在 300~3400Hz 范围内。

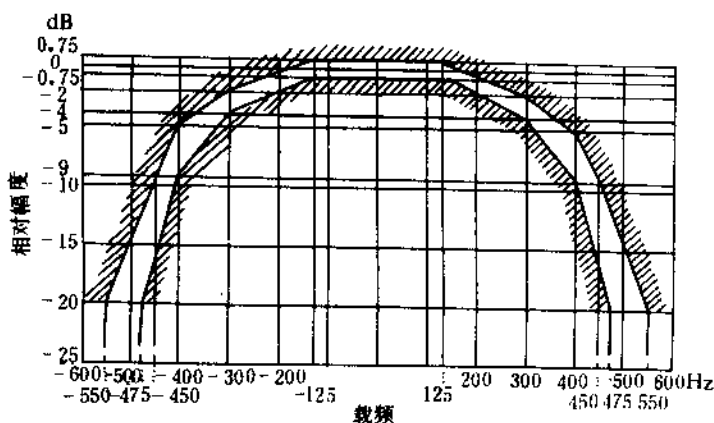


图 1.3 典型话路频率特性

相位-频率失真

由相位-频率特性的非线性或不同频率分量传输速度不同引起的失真,称为相位-频率失真。这种失真主要由网络中大量的滤波器和音频通路引起的。因为人耳对相位失真不敏感,所以对电话通话影响不大;但对数据来说是非常敏感的,主要是展宽码元信号波形,造成码元的码间干扰,直接限制了码元传输速率。

此外,还有噪声因素的影响。以上这些因素决定了数据在公共交换电话网上传输不能采用基带传输方法,只能借助某种变换,即调制解调来完成。

1.3 调制解调器的作用

本书主要介绍用于公共交换电话网(PSTN)中的调制解调器,这是目前应用最为普遍的领域。下面我们看一下公共交换电话网的拓扑结构以及调制解调器在其中所处的位置,见图 1.4。通过这个网络拓扑结构我们可以很直观地了解调制解调器的基本作用。

因为电话线是用于声音传输的,所以电话网的频带宽度有限,如图 1.5 所示。这些有限的频带使电话网难以直接传输数字信号。传输数字脉冲信号的信道带宽必须有比脉冲信号更宽的频带,否则,高频分量将被滤掉,使方波出现毛刺而变形。如果频带过窄,数字脉冲将完全变形,接收一方的数字脉冲信号的逻辑电平会变得模糊不清,从而导致通信失败。图 1.6 示出了一个 2000bps 的脉冲数字信号在不同频带下的变形,可以看出信道频带在 2500Hz 和 4000Hz 时比较好。

调制解调器的基本作用就是解决如何利用有限频带的问题。既然在话音频带(300~3400Hz)内不能直接传送数字脉冲信号,那么要传输这些数字脉冲信号就必须设法将数字脉冲信号变换成(映射)适合在信道频带范围内传输的波形信号组。这种变换实际上就是将不适合在特定信道上传输的数字脉冲进行相应的变换,使之与信道相匹配。当然,在接收端必须做相应的反变换以恢复出发送端的原发信息。这种变换过程就是调制,而反变换过程称为解调。完成这种变换与反变换作用的设备就叫调制解调器。

调制解调器的英文表示为 MODEM,是由 Modulation(调制)和 Demodulation(解调)合并缩写得来的。

从原理上来说要把数字脉冲变换成适合信道传输的波形,一般是用一个单频正弦波作为载波,而将数字信号的内容(变换规律,即信息)变成载波参数的变化(调制),接收端再把这些参数的变化还原出来(解调)。

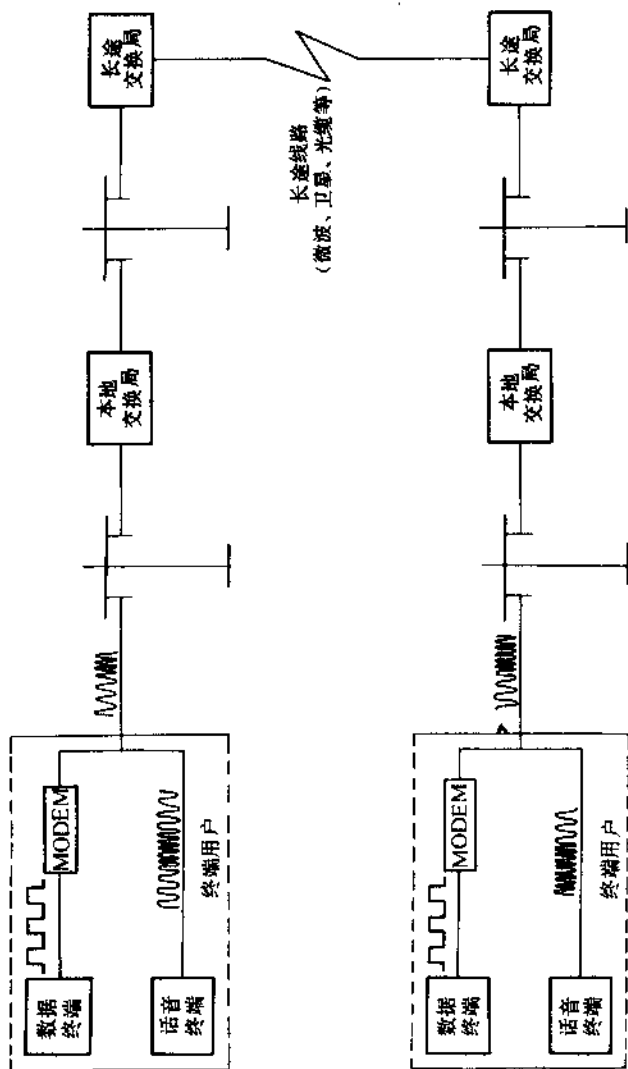


图 1.4 公共交换电话网的网络拓扑结构

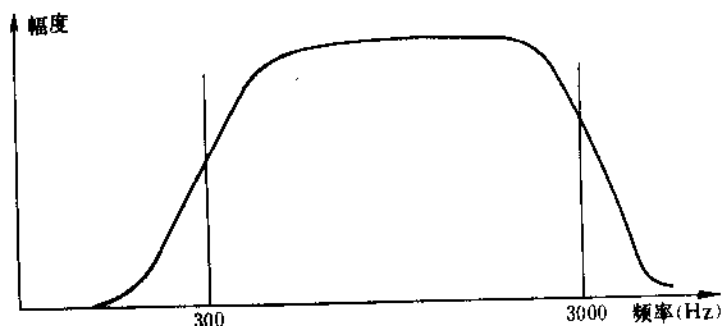


图 1.5 公共电话网的频带

由于正弦波有幅度、频率和相位三个参量可以用来携带信息，因此可以构成调幅、调频和调相三种形式。

载波作为被调信号，而数字信号作为调制信号，这时载波的某个参数（幅度、频率、相位）受数字信号调制而呈现离散状态变化，这种调制称为数字调制。

相应地，如果用连续模拟信号（如声音）作为调制信号去调制载波信号，这时载波的某个参数（幅度、频率、相位）受模拟信号调制呈现连续变化，这种调制方式称为模拟调制。本书主要讨论数字调制。

数字调制根据已调信号频谱结构的不同，可以分为线性调制和非线性调制。线性调制中，已调信号频谱结构与调制信号频谱相同，只不过搬移了一个频率位置，没有新的频率成分出现。在非线性的调制中，已调信号频谱结构与调制信号频谱结构不同，不是简单的频率搬移，而是有新的频率成分出现。数字调制信号又称为键控信号。在二进制情况下，振幅数字调制称为振幅键控或幅移键控（ASK），频率数字调制称为频率键控或频移键控（FSK），相位数字调制称为相位键控或相移键控（PSK）。关于各种调制方法的详细

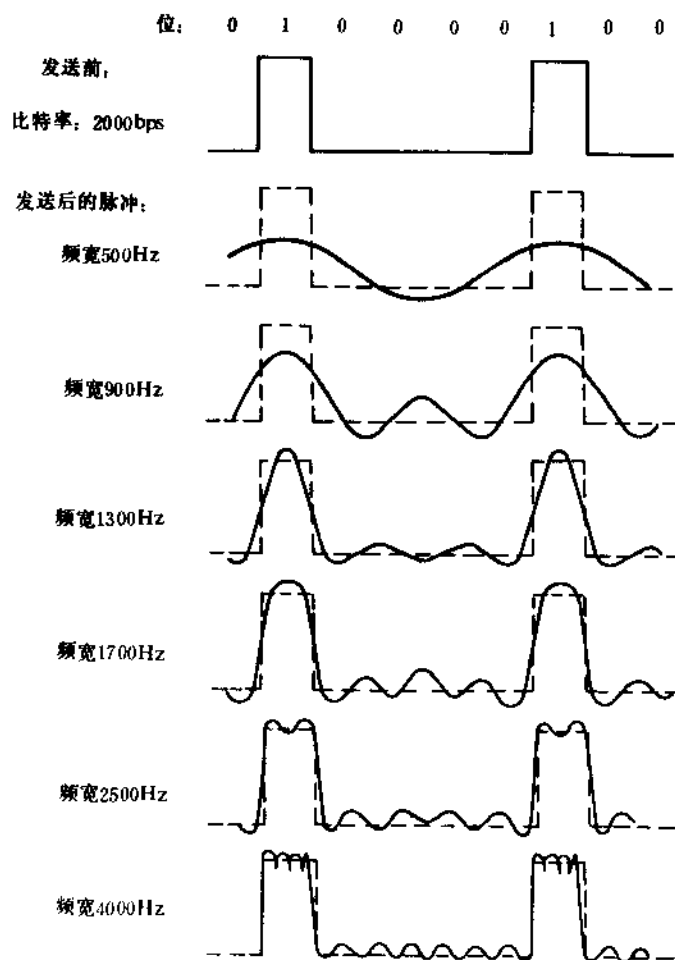


图 1.6 频带对方波数字信号的影响

讨论, 请见第 2 章。

调制解调器除了起上述匹配作用外, 随着调制解调技术的发展, 它还有如下一些作用:

(1)信道的自适应均衡

为了长距离传输信号,信道中增设了许多增音放大设备,而这些设备一般都是非线性的,对传输信号会产生有害的失真,所谓信道均衡就是对这些非线性失真进行校正。随着 VSLI 技术的发展,使得信道的均衡可以放在 MODEM 中。由于可以把 MODEM 做得智能化,所以,可以对信道特性作自动均衡。有些类型的调制方式经过数次音频转接后会产生严重的码间串扰,信道经过均衡以后,则可以大大减少这种串扰。

(2)提高传输速率和变换速率

原始数字脉冲信号的基带传输速率受信道频带宽度和噪声等因素的限制,传输速率不会太高,而采用调制解调技术以后,特别是一些先进的调制解调方式,可使传输速率显著提高。如,采用 QAM 和网格编码调制(TCM)技术(见第 2 章),信息传输速率可达到 9600bps、14400bps 甚至 19200bps。还有许多 MODEM 为适应设备或信道变化而需要进行速率变换,这种变换可任用户选择,也可以设置成自动变换速率。

(3)自动呼叫/应答

对于公共交换电话网上的计算机通信,自动呼叫与自动应答功能是无人值守的必要条件。具有自动呼叫/应答功能的 MODEM 可以在终端程序的控制下自动拨号呼叫对方或是自动响应外来的振铃呼叫,从而自动适应电话网上的接续,使得通信过程自动进行。

(4)多路复用

目前有些速率较高的 MODEM 具有多路复用的功能,如 V. XMODEM 可允许多达 4 部数据终端同时接入。

(5)控制传输差错

目前已有不少 MODEM 本身带有差错控制功能,为数据终端设备(DTE)提供无差错数据链路。

(6)流量控制

数据的流量控制是数据通过接口时的一种基本要求。目前有些 MODEM 已具有流量控制功能,这将对平滑全程数据流量和提高效率起重要作用。

第2章 调制方法及其性能

这一章我们介绍主要的几种数字调制方法及其性能,通过这一章可以了解数字信号在信道中的传输原理,使我们能更透彻地理解调制解调器的工作原理。

2.1 信号调制的基本原理

在人类社会中,每时每刻都会产生大量的信息。例如说一句话、写一段文字、做一个动作等等,这些都表达了人的某种确定的思维结果。这些信息一般是要传达给另外的人或记录下来以备过段时间再使用。无论这些信息是要传达给另外的人还是以某种形式记录下来,都必须有适当的载体。例如,某人向另一人说一句话,空气就是载体,振动的空气就是带有信息的载体,因为声音本质上就是空气的振动。我们称这些信息载体为信号,信息蕴含于信号之中,或者说信号是信息的具体表现形式。

人类自身产生的信号在传输过程中受到了极大的限制,因为人类感知自然信号主要是靠视觉、听觉和触觉。无论是视觉、听觉还是触觉都受距离、环境等因素的制约,要想直接长距离传输这些人类能够感知的信号几乎是不可能的。因此,为了解决长距离传输信号的问题,必须将各种各样的信号进行一次变换,将其变成易于长距离传输的形式,这种变换我们就称其为信号调制,待调制的信号我们称其为调制信号,新的信号载体我们称其为载波信号。调制只是将信息的载体改变了,并没有改变信息的本质,即:无论信息的载体——信号是什么样的形式,它所表述的信息内容没有变。人们经过不懈的努力,终于找到了一种有效的信息载体,即电信号。

用电信号来表达一定的信息内容有各种各样的方法。在我们比较熟悉的电信号中,我们可以用电压幅度随时间的变化来表达一定的信息内容(如语音随时间的变化)。理论分析表明,任何一种连续的时间信号都可以用适当的正交信号集线性地表示出来,我们可以用正交信号集中某些随时间变化的参数来表示信息。正弦信号集 $\{A(t)\sin(\int \omega(t)dt + \theta_0), A(t)\cos(\int \omega(t)dt + \theta_0)\}$ 无论从理论到实践都是非常成熟的,是应用最为广泛的正交信号集,所以目前我们最常用的载波信号都是正弦信号。在正弦信号中,有三个可以表征信号的时间参数,它们是幅度 $A(t)$,角频率 $\omega(t)$ 及相角 $\int \omega(t)dt$,相应地就有三种基本的调制方式,即:调幅(Amplitude Modulation, AM),调频(Frequency Modulation, FM)及调相(Phase Modulation, PM)。

2.2 基本数字调制方法

这一节讲述最基本的数字调制方法。所谓数字调制是指调制信号为数字信号,一般指二进制信号,即只有两种状态,我们称其为“0”与“1”。对于非数字信号调制(模拟信号调制)已超出本书范围,有兴趣的读者可参阅有关著作,本书不予介绍。

2.2.1 幅移键控(ASK)

在幅移键控调制方式中,载波信号的幅度是随调制信号的变化而变化的,这是最简单的一种调制方式,但它的性能也是最差的。一般的波形如图 2.1 所示。

在 ASK 中,载波信号是靠其幅度来携带调制信息的,而信号幅度对各种干扰是十分敏感的,在传输过程中很容易受干扰,所以 ASK 的性能是比较差的。但 ASK 实现起来比较简单,所以在早期的一些场合还是得到了一定的应用,随着电子技术的不断发展,这

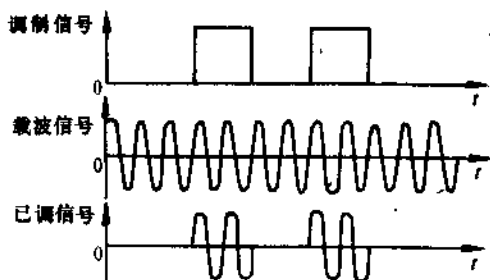


图 2.1 ASK 调制波形图

种调制方式已逐渐被其它性能优越的调制方式所取代。

2.2.2 频移键控(FSK)

在频移键控调制方式中,载波频率随调制信号变化而变化。当调制信号为二进制信号时,载波频率只有两种取值,它的典型波形如图 2.2 所示。

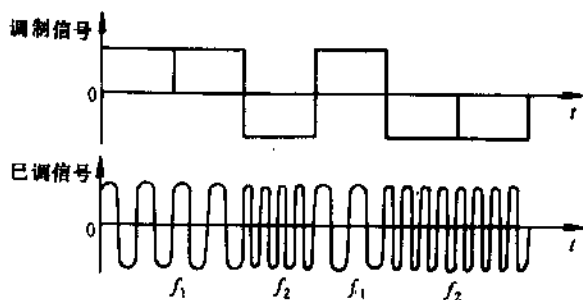
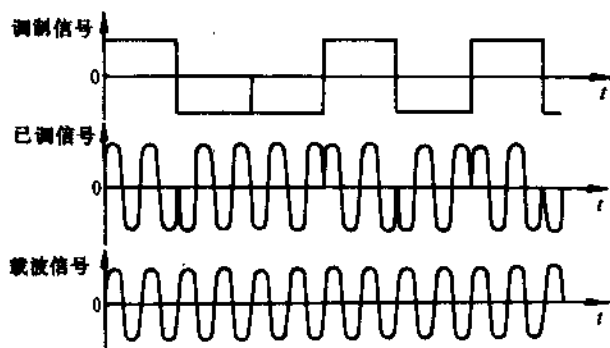


图 2.2 FSK 调制波形图

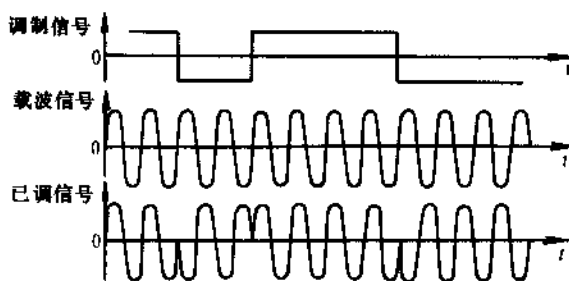
FSK 调制方式是靠载波频率的变化来携带信息的,由于频率对于干扰不是十分敏感,所以它的性能优于 ASK,但实现起来相对要复杂一些。另外它所占用的传输频带也比较宽。

2.2.3 相移键控(PSK,BPSK,DPSK)

在PSK调制方式中,载波相位随调制信号的变化而变化。由于相位是相对某一个参考点而言的,所以参考点选取得不同,调制的结果也不同。对参考点的选取,目前常用的有两种,一是以载波



(a) BPSK 调制波形



(b) DPSK 调制波形图

图 2.3 BPSK 与 DPSK 调制波形图

相位为参考点,称为二进制绝对相移键控,记为 BPSK (Binary Phase Shift Keying);另一种则是以前一个码元的相位为参考点,称

为相对相移键控或称差分相移键控,记为 DPSK(Differential Phase Shift Keying)。它们的典型波形如图 2.3 所示。

PSK 是靠载波信号的相位变化来携带调制信号信息的,相位对干扰更不敏感,所以它的性能比 FSK 还要好,但其实现起来就更复杂了。

2.3 其它调制方法

从本质上说,数字调制只有 2.2 节介绍的三种基本形式,但由于这些调制方法的性能受各种各样因素的限制,已无法满足当今数据通信的要求。对此,人们对各种基本调制方法进行了不同程度的改进,以改善某一方面的性能(如传输速率、误码率等),由此又派生出另外一些调制方法,这一节我们就介绍其中常用的几种。

2.3.1 多进制调制

在 2.2 节中介绍的基本数字调制方法中,一个最突出的缺点是信息传输速率低。信息传输速率主要由两个因素决定,一是表征信息的载波信号参数的变化率及这种变化所代表的信息量的多少。例如,在 FSK 中,利用载波频率的变化来表示相应的信息,用频率 f_0 表示“0”,用 f_1 表示“1”,这样,载波频率每变化一次(由 f_0 变到 f_1 或由 f_1 变到 f_0)就相应地表示了一个比特的信息量。为了提高信息传输速率,只有提高载波信号参数的变化率或者提高每次变化所携带的信息量。在一般应用场合,载波信号参数(幅度、频率、相位)的变化受信道性能的限制,不能太快,否则将产生失真。这样,为在信道确定的情况下提高信息传输速率,只有想办法使载波信号参数的每次变化能携带更多的信息量。多进制调制的思想就是基于这种原理而产生的。根据这个思想,多进制调制可分为多进制幅度调制、多进制相位调制及多进制频率调制。虽然多进制调制提高了信息传输速率,但同时也带来了新的问题,最主要的问题

是多进制调制增大了信息接收方解调时的误码率,在下面各种具体的多进制调制方式中我们将详细讨论这个问题。

这里我们先统一一下二进制调制与多进制调制的记号。二进制幅移键控记为 2ASK,多进制幅移键控记为 MASK(一般取 $M=2^L$, L 为大于 1 的正整数);二进制频移键控记为 2FSK,多进制频移键控记为 MFSK(一般取 $M=2^L$, L 为大于 1 的正整数);二进制相移键控记为 BPSK(Binary Phase Keying),多进制相移键控一般记为 MPSK(一般取 $M=2^L$, L 为大于 1 的正整数)。这些是基本调制方式的一般记法,后面出现其它调制方法时,我们再随时介绍它们的记号。

2.3.1.1 多进制幅移键控(MASK)

在二进制幅移键控调制方式中,载波幅度只取两个值,在多进制幅移键控中,载波幅度可以取 M 个值,一般取 $M=2^L$ 。当 $L=1$ 时,MASK 就变成了二进制幅移键控。在调制过程中,载波幅度随调制信息的变化可以取 M 个值中的某一个。我们以 $M=4$ 为例来说明 MASK 的工作原理。当 $M=4$ 时,载波幅度有四种取值可供选择,这四个幅度我们可以记为 A, B, C, D 。那么每个幅度对应什么样的调制信息呢?我们可以为此作一个编码表。由于有四个幅度,所以必须用两个比特的信息去对应一个幅度,见表 2.1。

表 2.1 4ASK 调制编码表

载波幅度	调制信息编码
A	00
B	01
C	10
D	11

这种码表可以由通信双方任意约定。

我们看到,在 4ASK 调制方式中,载波幅度每变化一次可以代表调制信号二比特的信息,所以在载波幅度变化率相同的情况下,4ASK 调制的信息传输速率是 2ASK 调制的信息传输速率的二倍,