

Shuju Chuanshu Yuanli

数据传输原理 上

北京邮电学院数字通信教研室编著

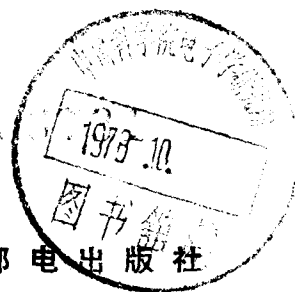
人民邮电出版社



数 据 传 输 原 理

上 册

北京邮电学院数字通信教研室编著



人 民 邮 电 出 版 社

内 容 提 要

本书分上、下册,讲数据通信系统中的传输问题。上册除扼要地介绍数字通信系统、信道、数字信号的分析外,以较大的篇幅较详细地讲述了数字信号的波形形成及基带传输系统,这是本书讲法上的一个特点。下册包括线性调制、数字调频、数字调相、载波信号的传送与提取、位定时、数字通信系统中的测试问题,由浅入深地阐述各种调制、解调方式的重要原理,说明实现发送和接收数字信号的具体方法,理论联系实际,可供高等院校通信专业的教师、学员、从事数字通信研究和设备生产的人员参考。

0024/17

数 据 传 输 原 理

上 册

北京邮电学院数字通信教研室编著

*

人民邮电出版社出版

北京东长安街27号

天津市第一印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行

各地新华书店经售

*

开本: 787×1092 1/16 1978年7月第一版

印张: 17⁴/16 页数: 138 1978年7月天津第一次印刷

字数: 445 千字 印数: 1—34,000册

统一书号: 15045·总2230—无647

定 价: 1.60 元

前 言

新中国成立以来,在伟大领袖和导师毛主席的领导与殷切关怀下,在“鼓足干劲,力争上游,多快好省地建设社会主义”总路线的指引下,全国各族人民和广大科学技术工作者,艰苦奋斗,辛勤劳动,在科学技术理论方面获得了许多创造性成就,建立和发展了一系列新兴科学技术。在短短的十几年中,我国电子计算机已经发展到了较高的水平。

自从粉碎“四人帮”以来,我国社会主义革命和社会主义建设进入了一个新的发展阶段。全国人民响应英明领袖华主席和党中央抓纲治国的号召,大搞三大革命运动,为在本世纪内把我国建设成为具有现代化工业、现代化农业、现代化国防和现代化科学技术的社会主义强国而奋斗。邮电通信,作为党和国家的神经系统,在为实现四个现代化的伟大斗争中,担负着繁重的任务。国民经济各部门的发展日益对通信提出新的要求,促进通信事业迅速改变面貌,向着本身的现代化迈进。

数据通信是现代通信系统中的一个重要组成部分,它通常是指传送电子计算机、处理机之类输入或输出数据信息的通信。数据通信是在五十年代以后随着电子计算机在军事和国民经济各部门的广泛应用而发展起来的一种新的通信方式。随着计算技术和控制技术的突飞猛进,数据通信的应用也在向着多方面发展。现在,各种科学研究、工程技术的设计,都广泛地利用电子计算机进行模拟与计算;现代工业生产、交通运输、邮电通信、银行会计、商店仓库都采用电子计算机进行控制、计算,或者用计算机辅助的方法进行生产管理和经营;现代化的国防,举凡:防空、武器控制、训练、调度、计划等,更是不能离开电子计算机。这些自动控制、模拟、计算过程都产生大量的数据,它们常常需要从一个地方传送到另一个地方,有效和可靠地把各个计算机和控制、管理对象联系起来,形成一个有机的整体。这种数据信息的传递,近的就同一城市范围内,远的则要横越大陆、海洋,以至深入宇宙太空。这样的数据通信与过去的通信方式不同,它不是人与人之间的直接通信,而是人对电子计算机或其他机器设备(人——机),或计算机对其他的机器(包括计算机)的通信(机——机)。由于通信对象的特点,与过去的通信方式相比较,数据通信在可靠性和传输效率方面都有着高得多的要求。从而,数据通信的发展就对通信和电子技术提出了许多新的科学技术问题。

在数据通信系统中,除应充分发挥计算机的功用外,数据的传输是一个极为重要的环节。尤其是我国当前并没有专为传输数据的通信网,还要利用现有的、本来为传输模拟信号而设计的通信网来进行数据传输,从技术角度看,当前所需解决的核心问题是传输。这也就是本书专讲数据通信中的传输原理的原因。在模拟信道中传输数字信号,要解决的问题有三个,即:信号波形的形成、调制与解调、信道特性的自动或自适应均衡。这些内容当然就成为本书讨论的重点。将来数字通信网建立以后,在数字信道中传输数据,问题要简单得多,讨论的重点就与此不同了。

本书的篇幅较大,为了便于阅读,下面把各章的内容和各章之间的联系作扼要的说明。

第一章扼要地叙述了数字通信系统和系统的各个环节的作用。第二章是信道,主要阐述信道的组成方式,信道本身的质量指标和数字传输终端机与信道的连接等。至于信道的模式表示方法,信道特性对于传信率和误码率所加的极限限制等理论问题,因为多属通信论或信息

论的范围,并未深入讨论。

第三章为信号分析,以分析周期信号作引入性讨论,介绍分析非周期信号的数学工具——富里叶变换——是这一章的重要内容。富氏变换的一些性质分散在本章和以后两章内结合具体应用引出。取样定理和线性四端网络的频率响应与时间响应及两者之间的关系,是数字通信的基本概念和分析方法,均作为富氏变换的应用来叙述。第三章的主要内容还有脉冲信号的波形与频带的关系和无失真传输的条件。随机脉冲序列的分析对从信息内提取载波或定时基准很有意义,我们以一个基带随机脉冲序列为例,给读者说明一种分析的方法。第四章在简单地说明波形形成的必要性和形成网络的作用后,即从矩形低通信号的形成引入符号间干扰问题和奈依奎斯特第一准则。然后,由对矩形低通信号的缺点的讨论引伸到信号幅度频谱的滚降,从而讨论到实际通信系统的波形形成问题。继幅度滚降以后,从双二进制信号的波形形成引入奈依奎斯特第二准则。由于波形形成技术与数字传输系统的发展是相互促进的,所以在第四章中没有在双二进制系统以后把低通信号的形成方法推广到部分响应信号。第四章的其他内容是某些有代表性的波形形成方法和带通脉冲信号的波形形成。第五章一开始就定义了基带系统,说明了研究基带系统的重要性,从而引出基带系统的组成和各部件的作用。然后讲解发送和接收滤波器协同形成所要求的波形,以及传递函数的最佳分解方案这样一个重要原则,并由此导出误码率与接收信噪比的关系。由于模拟通信与数字通信在现有通信网中需要兼容,以及为了便于从信息中提取定时基准等原因,近几年出现的数据传输机中均有扰乱器和解扰器,所以,对它们的原理和实现方法作了必要的阐述。改进的双极制信号没有直流成分,可以应用于脉码电话信号在市内电话网中的传输和数据传输单边带系统,所以把这种波形的形成和接收也作为重点。在此以后,从双二进制和改进的双极制的波形形成,谈到部分响应波形的形成和性能。除此以外,在这一章中还有横截滤波器和它的应用,在时域的自动均衡与自适应均衡。

第六、七、八三章论述调制问题,依次是线性调制、数字调频和数字调相。第六章在引入线性调制的基本概念以后,着重阐述了各种线性调制信号的表示方法,并对它们的特点进行了较详细的分析。接着,讨论了线性调制信号的解调和相干载波相位误差对解调质量的影响。其后,讨论了单边带、残余边带和正交双边带三种调制方式以及相应的传输系统;在残余边带调制系统中还引入了这种已调信号用数字电路的直接形成方法。最后,把数字形成方法推广到一般线性调制方式,并与第四章的数字回波调制相呼应。第七章在引入了数字调频的基本概念以后,讨论了调频信号的产生方法和已调信号的频谱,阐述了已调信号的建立过程,后者对于解调有一定意义。接着介绍了数字调频电路和一些解调方法,给出了误码率的计算公式。最后,简单地叙述了二进和多进数字调频系统。第八章在引入调相概念以后,讨论数字调相信号的频谱和数字调相信号的产生方法;论证了相干检测的原理、导出了最佳接收机的概念,并把这个原理应用于数字调相的接收。其后,在第四和第五节分别阐述了四相和八相调制系统,包括目前采用的这些调制的实现和接收的各种方法。最后,讲解了动态滤波器和它在调相系统中的应用。动态滤波器也可以应用于调频信号的接收,但是,我们认为结合调相系统来讨论这个问题较为适宜,所以,把有关动态滤波器的理论放在这一章里。

第九章是载波信号的传送和提取。由于锁相环是提取相干载波时的一个重要部件,所以用相当的篇幅阐述了它的基本原理、特性和实现方法,但是,本书并不是论述锁相技术的专著,

因而只讲述了与数据通信有关的原理部分。然后，介绍了常用的相干载波的传送和提取的方法。第十章是数据传输系统中的位定时，主要讲述了位定时信息的传送和提取的方法。第十一章是数字通信系统的测试。这方面的内容较多，限于篇幅，我们只介绍了作为数据传输信道的单路频分电话电路的幅度、群迟延和噪声的测试以及误码率测试的方法。

本书是在我院数字通信专业适应教学需要所编讲义的基础上改写的。近几年来，在毛主席的教育革命路线的指引下，我们在数据通信的科学研究和生产方面取得了点滴成果，本着教学、生产、科研三结合的精神，改写时，把部分成果纳入了本书的内容；此外，应有关单位的要求，对讨论的三个重点问题都增加了相当多的内容。但是，对变参信道的特性和变参信道传输系统，仍未能包括在内。由于编写本书的素材是在这几年来内逐步形成的，所以不可避免地带来各章节在深度以及对数学基础的要求上稍不平衡，敬希读者鉴谅。

本书各章的内容提纲系由我院数据传输课程教学小组讨论确定。第一至第五章、第六和第八章、第七章及第九至第十一章分别由蔡长年、乐光新、倪维桢、李文海执笔。书中的缺点和错误不少，希望读者指正。

《数据传输原理》编写小组

1977年8月

目 录

第一章 数字通信概说	1
第一节 电报通信和数据通信.....	2
第二节 模拟通信的数字化.....	4
第三节 数字通信系统.....	8
第四节 数字通信系统的质量指标.....	12
第五节 小结.....	13
第二章 信道	14
第一节 频分信道和时分信道.....	16
第二节 实线信道.....	18
第三节 载波信道.....	23
第四节 短波信道.....	34
第五节 数字信道.....	36
第六节 信道容量.....	40
第七节 小结.....	42
第三章 数字信号的分析	44
第一节 周期信号的频谱.....	44
第二节 非周期信号的频谱.....	51
第三节 取样定理的证明.....	56
第四节 线性四端网络的频率响应和时间响应.....	59
第五节 不同波形的脉冲的频谱.....	67
第六节 频带受限的传输特性对于脉冲波形的影响.....	74
第七节 无失真和有失真的传输.....	79
第八节 基带随机脉冲序列的分析.....	84
第九节 小结.....	92
附记 富里叶变换的一些性质.....	94
第四章 脉冲信号的波形形成	95
第一节 矩形低通信号.....	95
第二节 幅度特性的滚降.....	99
第三节 形成滤波器的设计.....	118
第四节 余弦频谱低通信号, 奈依奎斯特第二准则.....	133
第五节 升余弦波形信号的形成.....	137
第六节 带通信号的形成.....	148
第七节 小结.....	170
附记 关于图4·31所示形成滤波器的设计公式和方法.....	172
第五章 基带传输系统	175

第一节	基带传输系统	175
第二节	基带传输系统的质量	178
第三节	部分响应系统	196
第四节	自动增益控制电路	207
第五节	判决电路	211
第六节	扰乱器和解扰器	213
第七节	时域均衡原理	227
第八节	自动均衡器	241
第九节	自适应均衡器	253
第十节	小结	261
附记(一)	第七节中定理 1 的证明	263
附记(二)	最大似然估计	265

第一章 数字通信概说

“对于某一现象的领域所特有的某一种矛盾的研究，就构成某一门科学的对象。”通信这一门技术所研究的矛盾，就是在通信系统一端的发信者要把在对端的受信者所不知道的消息“告诉”对端的受信者；并且要使这种消息的传递过程尽可能迅速和引起的差错尽可能地少。正如其他科学和技术一样，通信技术起源于人们的实践，它又为社会实践服务；而社会实践进一步推动它由低级向高级、由个别方面向更多方面发展。

我国古代的“举烽火为号”——以高处的一堆燃火表示敌人的入侵，需要救援，无火表示平静无事——就是远距离通信的原始形式。在世界的其他地方，也曾经有过类似的通信方式。从近代通信的角度看，“烽火”还是一种数字通信。有火是一种状态，例如可称它为“1”，表示敌人入侵；无火是另一种状态，对应地称它为“0”，表示平静无事。所以这就是二进制的数字通信，但它所传递的消息内容很简单。在这里不能讲述通信技术史，但在“烽火”与近代通信间，还可以举一个例子，即“旗语”。在“旗语”通信中，发信者用两面旗子的不同位置向受信者表示不同的字母或数码。这也是一种数字通信，不过它不是用二进数字，而是多进制；不是发送两个数字，而是可以发任意多的数字，所以可以传递消息的内容比“烽火”复杂多了。

在人类有了文字以后，就逐渐出现了书信。在社会实践的推动下，到了十九世纪三十年代初，由于电在导体内流动现象的发现，就出现了电报，通信在速度上出现了一个飞跃。四十多年以后又出现了电话。消息的形式从文字扩展到语言，通信的双方相互对话，于是在发信者与受信者之间，构成了直接的双向通信。广播的出现使一点对多点、一人对多人的单向通信成为现实，并且消息的内容从语声扩展到音乐。传真电报实现了画面的远距离迅速传递，电视则使被传递的消息从静止画面发展到活动画面。到目前，通信的形式已经难于一一列举了。

近代通信需要在人与机器或机器与机器之间进行，而不限于人与人之间的通信。电子计算机的广泛应用促进了数字通信、主要是数据通信的迅速发展。工业厂矿、油田的生产已进入需要用电子计算机控制生产数量、精度、质量；安排和计算加工程序、生产计划；统计工人的生产数量与质量……等的阶段。这些厂、矿、田的科学实验数据常常需要送到电子计算机进行加工、计算，并将其结果送到相应单位。这些数据在个别机器与计算机之间、计算机与计算机之间、计算机与控制中心之间、基层单位与管理中心之间的交换，都是数据通信。交通、油、气管、电力网等的运转、营业、遥测和控制，对于计算机、数据通信的要求与工业厂矿相似。气象数据在全国和世界范围内的迅速交换，是准确预报气象所不可缺少的一环，这就要求建立稳定可靠的数据通信网。国家计划部门对于各省（区）、各地方、各生产部门的生产情况的收集；计划和指标等的下达，日益要求数据通信，报表与电报已显得不能适应生产的迅速发展了。银行、财政部门的帐目、收付等管理的集中（利用电子计算机）也要求数据通信。地面对人造地球卫星、飞船或其它飞行体的轨道观测数据，这些飞行体所测量的科学实验数据与探测到的其他情报，往往都要送到电子计算中心进行加工、计算，因而数据传输也是必不可少的一环。数字（包括数据）通信在军事通信中日益重要的地位，已为人们所熟知。为了协同利用多个电子计算机

或计算中心和发挥它们的效率,须在它们之间传递数据,甚至建立专用数据通信网。在这里我们不算一一列举数字通信的应用场合,事实上也难以列举无遗。目前也还看不出数字通信将要完全取代模拟通信的趋势,两者都要继续向前发展。不过,应该认识到数字通信的发展要比模拟通信迅速;它的应用范围将很快地扩大,并将取代一部分模拟通信;数字通信的比重将日益增大。所以,对于数字通信的研究应给予足够的重视。

第一节 电报通信和数据通信

1. 数字通信是由电报发展起来的,电报可以看作是慢速的数字通信。目前电报多采用电传打字机。当发报端的报务员按下打字机的一个键时,在本端和接收端的打字机纸页或纸条上,就可以印出一个与该字键对应的字符(字母、标点符号或数字)。这种电报的电码是所谓均匀码,就是说传输任一个字符的时间是等长的。一个字符所占的时段被分为五个等长的单位。在通信距离不长时,通常可用直流电报。在发报时,电传打字机的发送器根据所揆的字键,在每个单位时间把电压接到传输线上或切断。接上时称为传号,切断时称为空号,所以每一个单位时间可能为这两种状态之一,五个单位时间便可组成 $2^5 = 32$ 种状态组合。这32种组合对应于32个字符。在传号时,本端和对端的电传打字机的接收继电器中有线路电流通过;在空号时没有。电传打字机的接收器按不同的电流组合印出相应的字符。传号和空号这两种状态显然可以分别用1和0表示(或者倒过来,0代表传号,1代表空号)。在通信距离长时,不论是“有线”或“无线”电报,上述直流信号均须经过调制后才能传输。这时在线路上传输的是交流电,这个交流电被称为载波。交流电通常有三个参量:幅度、频率和相位。用频率恒定、相位任意、两个不同幅度(例如一个为1,一个为零)的载波分别代表传号和空号的称为调幅电报。用幅度恒定、相位任意、两个频率不同的载波分别代表传号和空号的称为调频电报。用幅度恒定、频率一定、两个相位(例如0和 π)不同的载波分别代表传号和空号的称为调相电报。

电传机的发报器和收报器是由马达驱动的,但在平时尽管马达不停地转动,而发报器和收报器却停止不动,不发出信号。当报务员揆一个字键后,发报器通过一个被称作“离合器”的机件,被马达驱动,转一圈后自动停止。报务员再揆一键,它又转动一圈。在发报器转一圈的过程中顺次发出与所揆字键对应的五个传号与空号,也可以说发出一个5位的二进制数字。例如发A,即送出11000;发R,即送出01010。通常我们也说发出五个脉冲,其中的0被说成是零脉冲。

不难想象,如果连续发出若干字符,而不附加任何措施,收报器就有可能不能正确区分哪五个脉冲对应于一个字符。这就是说有把前一字符的尾巴(例如2个脉冲)与后一字符的头(例如3个脉冲)错误地组合成一个字符的可能。图1.1(a)和(b)分别表明收报器正确与错误动作的情况。接收端的收报器把接收一个字符的五个单位时间与发送端发来的五个脉冲对齐的情况,在电报通信中称为同步。

在电报通信中是采取下列措施来保证同步的。在发报器开始转动以后及送出五单位码以前,先送出一个起动信号,通常是一个0或空号。这个起动信号传到收端以后,使对方电传机的收报器通过离合器被马达驱动一次。没有这个起动信号,收报器不能起动。这样,就给收报

器指出一个五单位码的起始时间。起动信号以后,发报器发出一个五单位码,收报器依次接收五个脉冲或一个五位的二进数字,并选择出对应的字符,印在纸上。在五单位码以后,发报器还须发一个停止信号,通常是一个1或传号(以示与起动信号有区别),使收报器转动一圈后停止。因此,传送一个字符要发7个脉冲,但是因为停止信号所占时间为信号脉冲的1.5倍,所以一个字符占7.5单位时间。

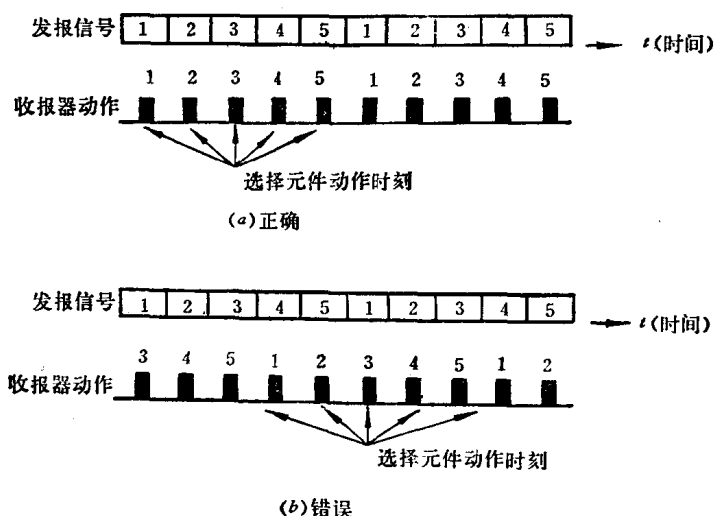


图 1-1 发、收报器运转的时间关系

电传打字机的发报极限速度决定于马达的转速。我国邮电系统,现在通用电传机的马达转速规定为400转/分。若发报器转完一圈后,立刻发出第二个字符,即紧接着又转一圈,两个字符间毫无停歇时刻,那么每分钟所发字符数与马达转速相同。这时就达到了极限速度。在极限速度下,相当于每秒钟送出

$$N = \frac{7.5 \times 400}{60} = 50$$

个信号脉冲。在电报通信中称这个速率为50波特。在现代数字通信中也常沿用波特为信号传输速率的单位。每秒送出几个脉冲,称为几波特。不难看出,极限速率只有在任何相邻两个符号首尾紧紧衔接、不留任何时间空隙的情况下才能达到,而一般由报务员直接发报时很难达到。

在这里,我们要着重地指出:电传机的信号虽然包含“起动”与“停止”信号,但它们只起使一个字符所含的五个脉冲信号同步的作用;由于字符与字符间的间歇不同,所以,在数字通信系统里并不认为电传机通信是同步通信,仍称它为异步通信。在数字通信系统中,每秒钟传输的脉冲数是严格地相等的,我们称这种通信为同步通信。在用电传机的电报通信中,只有对其发出的信号进行恰当的加工以后,才能使它成为同步通信。

2. 从前面的讨论可以看出,近代电报通信所传送的消息是由具有一定长度(即一定位数)的二进数字(码字)组成的。当发汉文电报时,先将每个汉字编为十进制的四位数字,再把每一个十进数字编为二进制的五位数字。在用拼音文字时,可以把每个字母编为二进制的五位数字。用汉文或拼音文字所写成的消息在形式上是有所不同的。对于通信系统说,要无区别地传送两者,必须找出它们的共同点。很明显,这个共同点就是通过编码(以后会知道,准确地说应

称为信源编码),使它们都成为二进或多进数字序列。在通信论中,常把所有的汉字、数码0至9以及标点等合起来(连同在这些字符(汉字、数码、标点)上的概率分布),称为信息源,简称信源。在拼音文字的场所(例如英文),所有字母、数码、标点等合起来(连同在这些符号上的概率分布),也是一个信源。这些信源有一共同点,即它们所发出的消息是离散的,常称它们为离散信源。在这里离散有两重意义。第一,信源发出上述符号的过程在时间上是离散的。第二,代表这些符号的物理量在数值上也是离散的。

上面已经讲过,现代通信不限于人与人之间,也可以是人与机器或机器与机器之间的通信。这样,电报通信就跃变为数据通信,但人们已认为它们是两种不同的通信手段。在各种机器中最易与数字这一概念联系起来的就电子计算机。电子计算机如作为信源,它发出的消息是一串数字或一个数字序列(当然这个序列应该划分为字);如作为受信者,它要接受的也是类似的数字。在引言中所列举的需要通信的工业、电力、交通运输、气象、科学实践部门,银行、计划、管理部门,……等所要传输的消息,除数字以外,无非是模拟遥测信号或兼有文字与数字的表格等。如所周知,模拟遥测信号可以取样、编码为数字序列。表格,实际上也可以把它们编码为数字序列。因此,可以说,这些人与机器或机器与机器之间的通信都是数据通信。

数据通信是意义更广的数字通信的一个方面。数字通信的另一个方面是数字化的模拟通信,在下一节说明其简单概念。

第二节 模拟通信的数字化

1. 信息源所发出的消息不全是离散的,它们可能是时间的连续函数。例如,最常见的、在电话系统中发送的消息是声压的时间函数。但是,因为每次通话的话语不同,所以这些函数是随机函数。把所有这些可能的函数视为整体,就是随机过程。当对着电话机的话筒讲话时,声波被转换为电信号。人们发出的不同音节有不同的音调,所以电话信号不是单一的正弦波,而是包含许多频率成分、占据一定频带的。对于广播、传真、电视、模拟遥测等,与电话相似,消息也是一些时间函数,它们也各占据一定的频带。还有许多与这些相类似的消息。这一类消息的共同特点,就是就某一特定的消息说,可以认为它是通常的连续函数,所以把这类消息称为连续消息。与此相应,前面所说的与所有语声消息组成的整体对应的随机过程是一个连续信源。广播、传真、电视、模拟遥测等或其他类似系统的信源与电话的相似,都是连续信源。

从连续信源发送的消息转换过来的信号是连续信号。但是,不能用静止和片面的观点去看世界,不能把一切事物、一切事物的形态和种类,看成是永远彼此孤立和永远不变化的。连续信号也可以变换为离散信号来传输。图1·2(a)是某种连续信号的一段。我们把时间原点取在这一段信号的开始,在这一段时间以外的波形没有画出。为了方便,把这个函数限制在 ± 1 之间,并设它为电压,这些都不会使我们的讨论失去一般性。这个信号在每一时刻的数值,均可以在 -1 与 $+1$ 之间取任何值。这就是模拟信号,因为它时时刻刻模拟着它所反映的消息的数值。

现在来作一个设想:能否不传输信号 $s(t)$ 的全部,只在相邻间隔 Δt 的一系列时刻 $t_1, t_2, t_3, \dots$ 或 $t_1, t_1 + \Delta t, t_1 + 2\Delta t, \dots$,传输在各该时刻的函数值 $s(t_1), s(t_2), s(t_3), \dots, s(t_i), \dots$,而在信道的接收端把 $s(t)$ 还原呢?(这里还原的条件是指在信道没有失真和噪声的情况)。我们说,还原是肯定能够做到的。如果信号 $s(t)$ 的频带被限制在 W 赫以下,即信号不包含高于

W赫的成分,那么,只要 Δt 不大于 $\frac{1}{2W}$ 秒,即至少每间隔 $\frac{1}{2W}$ 秒传输一个信号值就足够了。

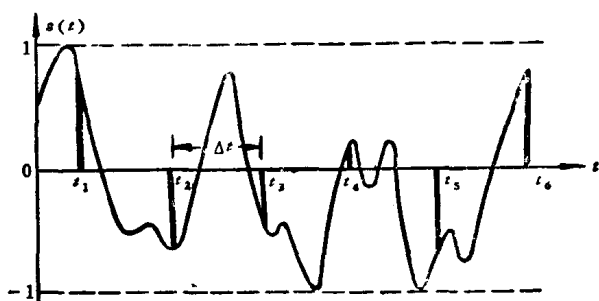
如果 Δt 取得更小些,则不但可以还原出原信号,而且对以后将要讲的“量化”这一处理过程更为有利。这个方法,称为“取样”。取样后的信号见图1·2(b)。注意这里把每一取样时刻 $t_i (i=1,2,3,\dots)$ 的样点值或取样值 $s(t_i)$ 用一个窄脉冲来代表。到接收端,只要使取样后的信号——图1·2(b)的脉冲序列,通过一个截止频率为W的低通滤波器,就可以把原来的 $s(t)$ 还原。这个方法并不限于用在最高频率为W的低通信号,也可以引伸到带通信号。如果一个信号的频带宽度为W赫,不论它的频带在什么位置,都可以用取样的方法把这信号离散化后再传输,只要平均取样间隔不超过 $1/2W$,在传输过程中不受到失真,到接收端就可以把它无失真地还原。

对于一个带宽为W赫的信号可以用平均间隔不超过 $1/2W$ 秒的样点值来代替,并可以用取样后的信号无失真地复原信号这样一个原则,称为取样定理。在第三章中将通过低通信号对取样定理给予证明。要通过数字通信系统传送的连续信号,都要经过“取样”这一过程。

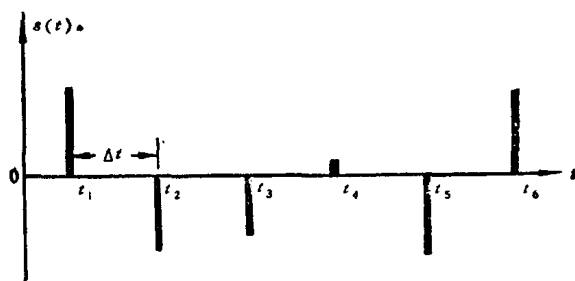
连续信号 $s(t)$ 经取样后,在时间上被离散化了,它就变成了一个离散信号,不过因为在任何一个时刻 t_i 的信号瞬时值 $s(t_i)$ 仍可以取 -1 到 $+1$ 之间的任何数值,所以它还是一个模拟信号,不是数字信号。现在把注意力集中到信号的某一个瞬时值——样点值 $s(t_i)$, 看实际通信系统中是否必须精确地把它的数值传输出去。在图1·3(a)中重新画出图1·2(b)的取样信号。如果把 -1 到 $+1$ 这一区间分割为若干等分,比方说,8等分。现在我们试图在传输这一信号时,不去精确地送出任一样点值 $s(t_i)$ ——注意它是一个模拟量,而是采取一种“近似”的方法,当信号值 $s(t_i)$ 落在任何一等分中,都以这个等分的中间值替代。例如,若 $-\frac{1}{2} \leq s(t_i) < \frac{3}{4}$, 就

把 $s(t_i)$ 当作 $5/8$; 若 $-\frac{1}{2} \leq s(t_i) \leq -\frac{1}{4}$, 就把 $s(t_i)$ 当作 $-3/8$; 如此等等。在图1·3(a)

中,凡是信号的绝对值大于一级的中间值时,就把送出脉冲的高度全部填黑,空白部分表示被舍弃的“零头”;当信号的绝对值小于一级的中间值时,就只把送出脉冲的“顶部”填黑,填黑的部分表示补足的部分。还故意把脉冲画得较宽,使这种近似看得更清楚些。经过这样一个过程,信号所可能取的数值就不是 ± 1 之间的任意值了,而是仅可取8个数值之一;也就是说,我们把信号的大小分为8个等级了。这个过程称为信号的“量化”或“分级”。因为没有确



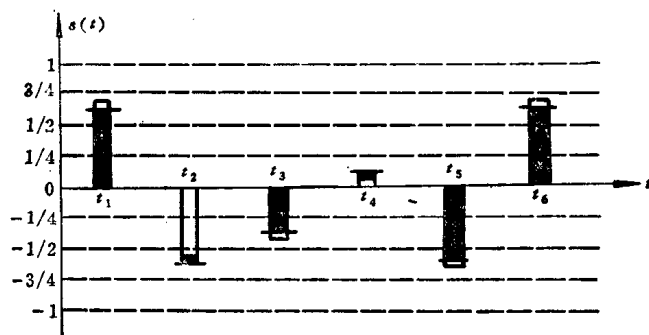
(a) 电话信号



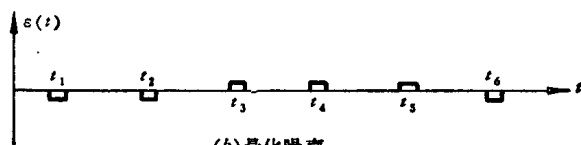
(b) 电话信号的取样

图 1·2 连续信号的离散化原理

定信号值的单位,故可把上述 8 个等级说成是 $-7, -5, -3, -1, 1, 3, 5, 7$ 级。若原来的信号在 -1 伏和 $+1$ 伏之间, 级差就是 $\frac{1}{4}$ 伏。信号经过量化之后就不再严格地模拟它所反映的消息的数值, 而是一些等级的数值。显然, 经过取样和量化以后, 信号就变成数字信号了。在图 1·3



(a) 量化



(b) 量化噪声

图 1·3 信号的量化

信号的灵敏度也不能无限制,就是说,不能区别两个数值相差无穷小的物理量。所以,任何信号都可以量化,不过量化为多少级,或级差取多大,须由所要求的通信质量决定。对于测量或控制信号,则须由对它们要求的精度确定。第二,通信系统内总是有噪声的,所以即使送出信号的精确值,噪声迭加上,到接收端后的信号值不再是原值,而是大些或小些,也可以说噪声把信号的精确值模糊了。噪声在任何时刻所取的值是一个随机变量,在接收端被噪声模糊后的信号值是不能确知的。由此可见,若信号经过量化,只要在接收端,它与噪声值的代数和还在一个量化级内,或者说,噪声在取样时刻的绝对值不大于半个级差,都起不了改变信号的作用。这两点理由说明,模拟信号可以量化,使之变为数字信号。至于量化后的信号,与原信号比较,的确有了一些失真;但是这种失真,我们可以预先安排,把它控制在质量指标所容许的范围内。量化,就相当于在信号的原值上加一个很小的正值或负值(参阅图 1·3)。例如,在 t_1 , 信号的原值比量化值大,就等于在原信号上加了一个小的负脉冲(图 b);在 t_3 , 信号的原值比量化值小,就等于在原信号上加了一个小的正脉冲,等等。总起来讲,连续信号 $s(t)$ (图 1·2a) 经过取样以后,变为一串离散的脉冲(图 1·2b),在时间上被离散化了(图 1·3a);再经过量化,在数值上也被离散化了。从取样与量化后的脉冲序列逐个减去仅仅取样后的序列,就得到量化所引起的误差序列(图 1·3b)。在信道中传送量化后的脉冲序列,就等效于传送量化前的脉冲序列,附加上述误差脉冲序列。通常把这附加的部分称为量化噪声。所以,为了量化,付了一定的代价。量化不仅使模拟信号变为数字信号,还使这后一信号在传输中增加了抗噪声干扰的能力。关于这一点在下一段阐述。

正如前一节末尾所说的,数字通信的一个方面是数据通信,另一个方面就是本段所说的模

的情况下,取样时刻的信号值为 8 个状态中的任一状态,可以用一位的 8 进数字代表,并可化为 3 位的二进数字。现在还剩下一个颇为重要的问题,就是信号经过量化或分级以后再传输到对方,从保证通信质量看,是否允许。

有两条理由说明将信号量化或分级是可行的。第一,接受者的感觉器官不能区别两个相差无穷小的数值。例如:人耳不能区别响度相差无穷小的两个声音;人眼不能区别亮度相差无穷小的两个光点,即使是机器,感受输入

拟通信数字化后的传输。

2. 现在将模拟通信系统与数字通信系统作一简单的比较。首先,从信号频带方面比较。在第一节中已经讲过,一般从消息转换过来的信号,都要占据一个频带,不是单一的正弦波。设它为一个低通信号,频带宽度为 W 。但是一个信道可供利用的频带常常比 W 宽,例如 nW 赫。在第二章中我们将要讲述一个称为频率变换的原理和方法,它能把低通信号的频谱搬移到频谱的任何位置,而不增加它的带宽^①。利用频率多工的原理,就可以在上述信道中同时传送 n 个信号,而互相没有干扰。方法是这样:把 n 个低通信号搬移到信道提供的频带(带宽为 nW 赫)的不同位置,并使它们一个挨着一个(参阅图1·4),那么这 n 个信号就可以同时在此信道内传送了。由此可见,信号的频带越窄,在同一信道内可以同时传输的信号越多,通信系统的效率越高。一个带宽为 W 的连续信号经过取样后,每秒钟至少有 $2W$ 个脉冲,或说信号速率为 $2W$ 波特。后面将阐明,这样速率的脉冲信号在信道内传送时,至少要占据 W 赫的带宽。这样看来,模拟信号数字化以后,好象不会增加带宽,也就是说,通信系统的效率不会降低。但这是不符合实际的,原因是我们还没有考虑分级问题。按现在的技术水平,要数字信号比较可靠地传输,脉冲的分级数不超过8,常常是2级或4级,这就是说,现在在实践中,数字信号最多是8进制。对于多数模拟信号说,量化为8级常常是不够的。以电话信号为例,它的名义带宽为4千赫,每秒须取样8000个,如果量化级数为128,并把信号转换为二进制传送(实践中常这样做),原来的每一脉冲要变为7个脉冲,那么信号速率就是 $7 \times 8000 = 56000$ 波特,所需信道的带宽至少为28千赫。以八进制信号传输,至少也需要 $28/3$ 千赫,效率比数字化前降低了。尽管数字通信系统比模拟通信系统在其它方面有某些优越性,但一般地说,它在频带利用效率方面常常远比模拟通信低,这就是数字通信一时还不能代替模拟通信的重要原因。

其次,从对噪声的抗干扰能力方面比较。迄至目前为止,这种比较都针对白噪声进行。这种噪声在信道中是与距离成比例地按功率累积的。所以,在模拟通信系统中,混在信号中的相加噪声的功率与线路长成正比。在数字通信系统中,当噪声在取样时刻的绝对值超过半个级差时,才有可能改变信号的值,即附加了噪声。例如,在二进制系统中,若代表1与0的电压差为 V 伏,同时在接收端以中间电压值作为1与0的分界,即当电压大于中间值时,判定所收到的是1,小于中间值时,判定所收到的是0(见图1·5);那么,当噪声的值为正,并大于 $V/2$ 伏

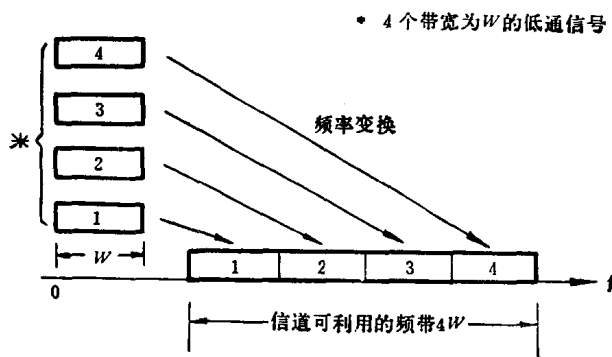


图 1·4 频率变换示意图

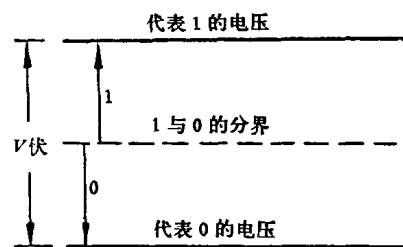


图 1·5 二进制系统的判决示意图

注① 不是所有频带搬移的方法都不增加原来的信号带宽。

时,才有可能使0错成1;当噪声值为负,并小于 $-V/2$ 伏时,才有可能使1错成0。这样看来,如果数字信号自发送端传输一定距离后,再生一次,也就是把受噪声破坏了的脉冲波形整形一次,那么,除去在再生以前已经错传的脉冲以外,其他的都恢复了在发送端的原形,好象没有传输过一样。这种再生的方法可以每隔大致相同的距离,再进行一次。这样,就可以大大提高信号对于噪声的抗干扰性。白噪声在一定时刻的值是正态随机变量,其统计均值为零,方差等于噪声功率。因此,若再生距离足够短,自信道输入接收机的噪声功率就足够小,方差也足够小,那么迭加于信号的噪声的绝对值超过半个级差的概率就会足够小,误码将比较少见。因此,在长距离的通信系统中,可以利用这种再生的原理,使信号多次受到整形,从而使来自信道的噪声比相同距离的模拟通信系统小得多。这就是通常人们所说的数字通信系统的抗干扰性高的道理。然而,从抗干扰性的观点看,数字系统是否一定比模拟系统优越呢?不一定。任何事物都是一分为二的。前已说明,模拟信号在数字化时,已付出了相当的代价,即附加了量化噪声,而且这种量化噪声的大小与通信系统的长度无关。由此看来,若通信距离很长,把原来的模拟信号数字化以后传输,到接收端还原,就提高抗干扰性说是合算的。有时通信距离虽然很长,但由于转接或其他原因,信号须还原后再次数字化,又付一次量化噪声的代价,也有可能并不合算。但是,这并不意味着,只有在甚长距离的通信系统中,才能考虑模拟通信的数字化传输问题。事实上,数字通信同样地也实用于短距离。例如大城市与其远郊区的通信,矿(油)田、交通、管道运输线、电力网等的专用通信,距离不长,很少与全国或国际通信网连接,有时采用数字通信更便利、更经济、更便于维护(特别是在微波信道上)。此外,有时同轴电缆或微波信道所可利用的频带,在已被模拟通信所占用的以外,尚有富余,利用这个原来弃之不用的部分建立数字通信,也是经济的。在多转发器的频分制卫星通信系统中,这个方法也是可行的。为了节约有色金属(铜),在距离较远的市内电话局间的中继线上,安装时间多工的数字化电话设备,能在一定限度内,不增加耗铜量而达到增加中继线的目的。总之,模拟通信信号值得数字化后再传输的情形是很多的。但是,也要注意,是否值得这样做,须从要求的质量以及具体的信道条件来分析,若无条件地说数字通信系统在抗干扰性方面绝对优于模拟通信系统,将是片面性的观点。

第三,半导体器件和数字技术的发展为数字通信设备的生产提供了良好的条件。现在,数字电路的集成化与固体化发展迅速,几乎对所有数字单元电路都可以实现集成化,大面积的数字集成电路将普遍应用。适应于这方面的发展,是数字通信系统的另一优点,也是近十余年来数字通信系统有很大发展的重要原因。可以认为这一原因对数字通信迅速发展的影响,比抗干扰性高对其发展的影响更大。模拟电路的集成化与固体化,由于生产技术上的一些困难,比数字电路缓慢,除运算放大器这一类电路以外,投入生产的其他电路是屈指可数的。但是,近几年来,模拟电路的集成化日益受到重视,势必会有相当的发展,但要估计它对通信系统的重大影响,还为时过早。

第三节 数 字 通 信 系 统

1. “就人类认识运动的秩序说来,总是由认识个别的和特殊的事物,逐步地扩大到认识一般的事物。”我们已经把数字通信的许多形式划为两个分支,即数据通信和数字化的模拟信

号的传输。从各种数字通信形式的共同点来看,还可以把它们概括为一个数字通信系统模型(图1·6)。下面阐述这个模型各部分的意义。

信息源——简称信源。因为在通信系统的发送端,发信者可能是人,也可能是机器或设备,所发送的消息形式不同,为了便于作统计研究,通常把它概括为信源。关于信源的概念前面已有说明,这里仅需指出:根据它所发出的消息 m 的形式,可以分为离散信源或连续信源。

信源编码器——信源编码器把消息 m 转换为下一环节所需的信息序列 I 。如果信息源所给出的消息是数据序列,并且这个序列适合于下一环节,那么,也可以省去信源编码器(例如消息是计算机或其他设备所输出的二进制序列,并且下一环节所要求的输入也是二进制序列)。

如果消息 m 是时间的连续函数或离散的模拟量,信源编码器对它取样和量化,或仅量化,使它变为数字信号;若这个数字信号的级数不适合于下一环节的输入,还要把它转换为适合于下一环节的输入信号。例如,脉冲编码电话系统的发送器就起着信源编码器的作用。有时为了某种目的(节省信号频带,加强抗扰性,高度加密等),须将消息进行处理。近几年来用数字方式的处理特别受到重视,例如声码器、电视信号的比特率的压缩、从记录的声音信号中去除混响的设备之类,也都属于信源编码器。不同目的的信源编码器在设备的繁简和技术指标上可以有很大的差别,但是,从数字通信系统对它的要求说,只有两点:(1)每一单位时间内所需的(代表同一单位时间的消息的)数字位数尽量地少;(2)从信息序列 I 逆变换为消息 m 是可能的。

信道编码器的输入与输出常是二进数字序列。信道通常是暴露于各种噪声干扰(自然的或人为的)之下,终端设备内也存在噪声,通信系统的各个环节也不可能完全不使信号不失真,噪声对信号的干扰与信号的失真,均可以导致数字的错误,即发生误码。信道编码器将输入的(二进)序列或码字 I 变换为更长一些的(二进)序列或码字 C 。变换的目的是要使码字 C 在传送到对端以后,如有误码,可以自动纠正或指出有错,这就是纠正错误或检查错误的编码(通常称为纠错编码)。信道编码器针对输入序列 I ,按照某些规律,计算出一些附加的码位——称为监督位,加入到输出序列中。使它变换为序列或码字 C 。在传输到对端以后,信道译码器再按照对应的规律,检查出错误或自动纠正错误。由于码字 C 的平均长度比 I 长,所以每秒钟所能传送的码字经信道编码以后要减少,所以纠错或检错能力是用通信效率来换取的。所增加的监督位越多,可以检查或纠正的位数越多。信道编码器和信道译码器这一对环节不是每一数字通信系统都必须具备的。

调制器——从信道编码器输出的二进制序列,一般不适宜于在信道内传输,除了一部分在市内电信网或类似信道中的数字通信系统外,通常总有调制器和解调器这一对环节。调制器将来自前一环节的每一位不同数字变换为在时间上等长的不同波形,以便于在信道内传输。第一节中提到调幅、调相、调频都是调制的例子。

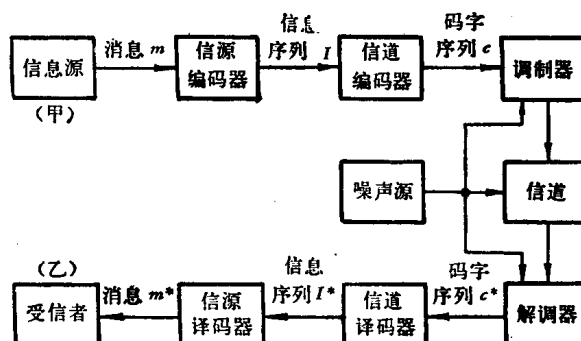


图 1-6 数字通信系统