

数字通信简述

樊昌信 编 著

人 民 邮 电 出 版 社

数 字 通 信 简 述

樊 昌 信 编 著

人 民 邮 电 出 版 社

内 容 提 要

本书主要是向具有一般通信技术知识的读者介绍数字通信的一些基本原理和基础知识，并重点地讲述数字信号传输问题，可供自学或结合典型数字通信设备进行学习时参考。

数 字 通 信 简 述

樊 昌 信 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 1/32 1977年8月第一版

印张：4²⁸/₃₂ 页数 78 1977年8月天津第一次印刷

字数：100千字 印数：1——17,000册

统一书号：15045·总2134—无623

定价：0.47元

毛 主 席 语 录

中国人民有志气，有能力，一定要在不远的将来，赶上和超过世界先进水平。

我们不能走世界各国技术发展的老路，跟在别人后面一步一步地爬行。我们必须打破常规，尽量采用先进技术，在一个不太长的历史时期内，把我国建设成为一个社会主义的现代化的强国。

出版说明

无产阶级文化大革命以来，广大邮电职工意气风发，邮电战线工业学大庆的群众运动正在深入发展。独立自主、自力更生的革命精神进一步发扬，邮电通信事业达到新的水平。广大邮电职工正沿着毛主席指引的无产阶级革命路线胜利前进。

随着我国电信事业的发展，数字通信在我国也得到了一定的发展。在通信技术领域内，数字通信已经形成一个独立的分支，它具有自己特殊的理论和技术问题。本书主要是向具有一般通信技术知识的读者，介绍数字通信的一些基础知识和基本原理，重点叙述数字通信中有关数字信号传输的一些基本问题。

本书内容大部分曾刊登在《无线电技术》刊物上，这次整理时只作了少许修改和补充；结束语是新增加的。本书可供自学参考，有条件的最好结合典型数字通信设备进行阅读。

目 录

第一章 概 论	1
1-1 数字信号与数字通信	1
1-2 数字通信的优点和应用	5
1-3 数字通信系统的模型	8
1-4 二进制数字及比特的概念	10
1-5 数字信号的传输要求	12
第二章 判决理论及其实现	17
2-1 判决理论	17
2-2 典型判决问题	18
2-3 最佳接收的实现	25
第三章 误码率分析	35
3-1 信道的影响	35
3-2 最佳误码率	40
3-3 信号的相关系数	45
3-4 结论的应用	49
第四章 基带传输系统	51
4-1 概述	51
4-2 基带信号	52
4-3 基带传输原理	53
4-4 最佳基带传输系统	59

4-5 码间串扰与眼图	62
4-6 均衡	64
第五章 线性调制系统	68
5-1 概述	68
5-2 双边带振幅调制	69
5-3 单边带调制	75
5-4 残留边带调制	80
5-5 相干载波的产生	80
第六章 非线性调制系统	86
6-1 频率调制系统	86
6-2 相位调制系统	97
第七章 同 步	110
7-1 同步的意义	110
7-2 码元同步	111
7-3 起止式系统中的同步	119
7-4 群同步	120
第八章 误差控制	128
8-1 目的和方法	128
8-2 检(纠)错编码基本原理	129
8-3 检错重发(ARQ)法与分组码	131
8-4 前向纠错(FEC)法	139
结束语	144
参考资料	147

第一章 概 论

1-1 数字信号与数字通信

通信线路中所传输的信号，是以其某个参量的变化来代表消息的。按照此参量的取值和反映消息的方式，我们将信号分为两类，即模拟信号与数字信号。

凡信号的某一参量可以取无限多个数值且直接与消息相对应的，称为模拟信号。例如，电话单机输出的电压，其幅值随发话人的语言而连续变化（图1-1a）；普通广播电台的射频振荡，其振幅随着要播送的语言和音乐而连续变化（图1-1b）。这两种信号，就都是模拟信号。通常，模拟信号都是时间的连续函数；其每一瞬间的值，又可以在无穷个数值中任取其一。因此，在一定的时间或数值范围内，可以有无限多个不同的取值。除上述语言和音乐信号外，图片传真、电视图象的信号以及许多物理量的遥测信号，都属于模拟信号。

不过，也应当指出，模拟信号并非一定是连续的，例如脉冲幅度调制（图1-1c）和脉冲相位调制信号（图1-1d），在时间上就不连续。但由于脉冲的幅度或相位有可能取无限多个数值，而且在取样时刻幅度或相位均直接反映消息的量值，所以仍应视作模拟信号。

凡信号的某一参量只能取有限个数值，并且常常不直接或不准确与消息相对应的，称为数字信号。例如，早期莫尔斯机拍发的脉冲信号，其宽度只能有 τ 和 3τ 两个取值，表示点和划（图1-2a）；电传机送出的脉冲信号，其高度只能有0和A两

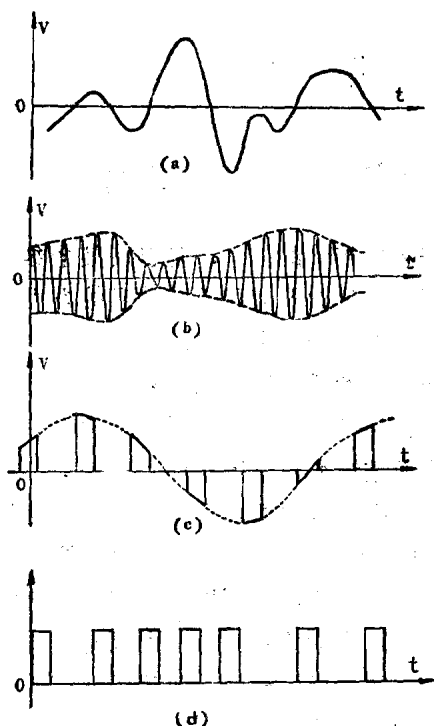


图1-1 模拟信号

个取值，表示空号和传号（图1-2b）。一般说来，数字信号是离散的，不仅在取值上是离散的，而且在时间上也是离散的。在每个时间间隔内，发送它所可取的有限个离散值中的一个取值，称为一个码元。这类信号通常都须经过取样和量化或者还进行编码，所以不准确或不直接与消息相对应。除上述两种电报信号以外，脉码调制和增量调制*信号，某些遥测和遥控信

* 脉码调制和增量调制是将模拟信号变为数字信号的两种常用方法，其原理可参看文汕编“数字电话通信”，国防工业出版社，1975。

号，存储在电子计算机内的操作和运算指令等，都属于数字信号。

然而，并非所有数字信号都是离散的，例如普通移频电报在时间上就不离散（图1-2c）。尽管如此，但由于它的瞬时频率只能取 f_1 和 f_2 两个数值，所以仍应视作数字信号。

我们不仅把传输数字信号的通信称为数字通信，传输模拟信号的通信称为模拟通信。对于通信系统，也相应地分为数字通信系统与模拟通信系统。

值得注意的是，模拟信号并非必须用模拟通信系统传输。例如，在某些情况下，我们希望将语言信号数字化，然后以数字信号形式在数字通信系统中传输，这就是通常所说的“数字电话”。后面我们将要说明，这样处理好处是很多的。模拟通信系统不一定是传输模拟信号的最佳系统。

那末，这两类通信系统究竟有什么本质上的区别呢？现在我们来简要地分析一下这个问题^[1]。

在模拟通信系统中，传输的是一个连续变化的波形，我们关心的是这个波形的某个取值连续变化的参量，同时要求接收端能以高保真度来复现原发送的波形。这里，衡量系统传输质量的准则是输出波形与输入波形之间的均方误差——通常用输出信噪

比度量。此均方误差愈小，或输出信噪比愈大，则传输的质量愈高。所以，模拟系统中信号传输的基本问题是如何对一个连续

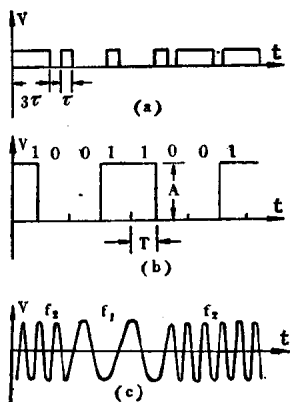


图1-2 数字信号

波形的参量进行估值，而研究这个问题的基础理论主要是参量估值理论。

在数字通信系统中，每时传输的是信号有限个离散取值之一，我们要求接收端能在各种干扰条件下正确判决（检测）发送端某时发出的是其中哪一个取值。至于接收波形的失真，只要它还不足以影响接收端的正确判决，就没有什么关系。这里，衡量传输质量的准则主要是错误判决的概率，错误判决的概率愈小，传输质量愈高。因此，适用于研究数字信号传输的基本理论主要是判决理论。

由于衡量两种通信系统传输质量的准则不同，我们关心的系统性能参数也随之不同。在模拟通信系统中，我们关心的是输出信噪比、输入信噪比和频带扩展因数（已调信号和调制前信号的带宽比）等；而在数字通信系统中，我们关心的是错误概率、输入信噪比、传输速率和传输带宽等。

此外，在数字通信系统中，接收端须对每个发送来的码元进行判决，故在发送端和接收端之间需要建立时间轴的“同步”。于是，同步也成为一个问题。同步不良，会使错误判决的概率增大，甚至造成全部接收消息无法识别。

前面我们谈到的两种电报信号，实际上就是早期的数字信号。远在一百多年以前，就有人工电报通信了。目前广泛使用的电传打字机，在五十年前已经开始应用。可是，长时期以来，电报通信基本上限于传输人们书写的文字消息。直到近十多年，电报通信才迅速发展成为现在的所谓数字通信，其主要原因如下：

1) 随着雷达、遥控和遥测等技术的发展，特别是数字式电子计算机和各种数据处理设备的广泛应用，要求传输数字信号的种类和数量都大大增加，同时要求更高的传输速率。由于

数字通信优点甚多，不少原来的模拟信号，现在也希望数字化以后再传输，这就使得数字信号在全部通信业务中所占的比重进一步增加。

2) 出于迫切的客观需要，促使数字通信理论和技术的研究逐步成熟。关于数字通信系统的极限性能、统计判决理论、编码理论、各种最佳数字通信系统的性能与结构等方面的最新研究成果，都被人们用来指导实际系统的设计和研制，转而促使系统的性能不断改进与提高。

3) 半导体技术的飞速发展，尤其是集成电路的出现，为数字通信设备的小型化和高可靠性提供了必要的条件，这就使得需用成千上万个有源器件的复杂设备，有可能被实际采用。

与传统的电报通信相比，数字通信的主要标志在于：能够实现机器与机器之间（如电子计算机之间）或机器与人之间的通信，传输数字的速率更高，对传输可靠性（数字错误率）的要求更严格，能通过交换网络进行更广泛的转接，能够进行保密通信和实时传输（例如在防空通信体系中传输警报信号或在数字电话线路中两端用户对讲时，就要求实时传输）。自然，就某个特定的数字通信系统而言，并不一定对上述各方面都提出要求。

最后附带说明，在有的书刊中“数字通信”又称为“数据通信”。实际上，完全的提法似乎应当是“数字数据通信”，因为也存在模拟数据（即用模拟信号传输的实验数据）。我们现在简称为“数字通信”。

1-2 数字通信的优点和应用

如前所述，数字通信迅速发展是客观需要所促使的，一方

面由于象电子计算机一类输出输入数字信号的设备，使用日益广泛，另方面由于象语言一类的模拟信号现在也逐渐希望将其数字化，然后以数字信号形式传输。这是因为数字通信本身，或者说与模拟通信比较，具备很多优点，现在我们扼要归纳如下：

1) 在多次转发的线路上(例如微波视距中继线路)，数字信号可以在各中继站整形，以消除噪声(波形失真)积累，从而提高了线路终端的信噪比。

2) 数字信号的传输容易获得更高的精确度。

3) 数字信号容易进行高保密度的加密，有利于传输保密电话一类信号。

4) 数字信号便于处理、存储和交换。

5) 在同样的通信质量下，数字信号容许的线路噪声较大，因而常可节省发送信号的功率。

6) 数字通信设备便于生产和固体化。

7) 输出信噪比在数字通信系统中随信号带宽按指数规律增加，而在模拟通信系统中仅随信号带宽成正比地增加^[2]。

8) 数字通信系统中，传输的指令(呼叫)和消息具有相同的信号形式，便于统一处理。

数字通信系统除了可以用来传输电报报文、数字电话和数字传真等信号外，更为重要的是，当数字通信系统和电子数字计算机、数据处理设备以及自动控制系统等配合在一起后，可以构成一个自动化集中数据处理体系，广泛应用于国民经济和国防体系的各个领域，完全超出了人们之间的一般通信范畴。

在国民经济中，集中数据处理体系可应用于铁路(航空)业务的调度和定票，油田勘探数据的集中处理，电力网负荷的集中控制，集中银行业务，商业存货控制，大型冶金、化工、

机械制造等工厂的配电、供水和供气系统的集中控制，电报自动交换网，以及天气预报等许多方面。以火车订票为例，这种系统可使用一部中央电子计算机来保存一条或数条铁路线所有各次列车预售票的记录。沿途各站售票所的设备则通过数字通信线路联至中央计算机，并可进行实时通信。当一个旅客来到某地售票所时，售票员可以很快向计算机询问并察明任意一次列车的售票情况，售票给该旅客或提出改乘车次的建议。这样，就能合理地按各地实际需要情况预售对号座席或卧铺客票。

在国防体系中，随着敌方攻击武器的快速机动能力和破坏能力的增长，要求尽量缩短敌情的获取、传输、判断以及指挥己方武器等各个环节所需要的时间。例如，在自动防空体系中就特别需要集中数据处理系统。图1-3是一个自动防空体系的示意图^[8]。防空监视所的雷达备有自动数据处理装置，可以

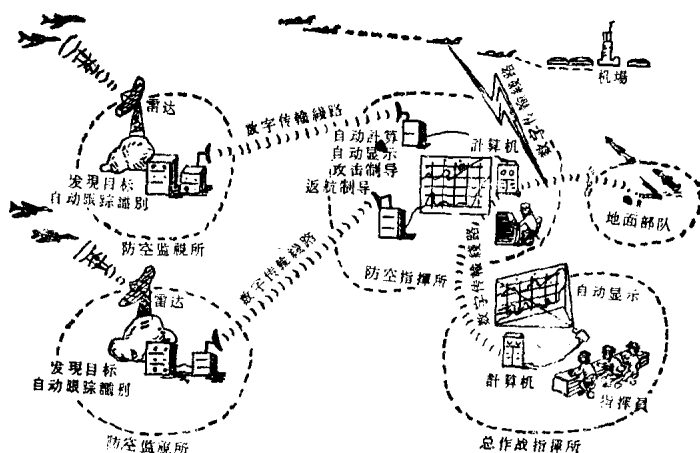


图1-3 自动防空系统



图1-4 数字通信系统模型

自动地进行目标的发现、跟踪和识别等。防空指挥所的电子计算机通过数字传输线路接受防空监视所自动传来的雷达数据，并自动计算出目标的参数、攻击战斗的命令和攻击目标的分配等，再经过数字通信线路为歼击机制导和向地对空防空导弹发送必需的指令。与此同时，各防空指挥所之间以及和上级指挥所之间还需要数字通信线路传输有关敌我双方作战目标的数据。

1-3 数字通信系统的模型

实际数字通信系统的组成，因不同的用途而异。综合各种数字通信系统可得图1-4所示的模型。有了这个模型，我们以后讨论数字通信系统的各个部分就比较方便了。

图中信源是送出待传输信号的装置，其输出可以是模拟信号，也可以是数字信号。例如，电话机的话筒是送出模拟信号的信源；送出数字信号的信源装置有电传机、纸带读出机、磁心存储器、磁鼓、磁盘、卡片读出机和拨号盘等。

信源编码器的功用是进行降低信号多余度(减少码元数目)的编码。如果信源送出的是模拟信号，则信源编码器还应当包含一模拟/数字变换器，将模拟信号变为数字信号以后，再进行编码。

信道编码器的功用是在它的输入数字序列中加入多余码元，以利于在接收端正确识别信号，降低错误率。初看起来，此编码器似乎与信源编码器降低多余度的编码功能互相抵消，实则不然。因为信源编码器消除的是输入数字序列中的自然多余度，它不能有效地用来在接收端降低错误率；而信道编码器的多余码元是按一定规则加入的，这种规则能有效地提高数字序列的抗干扰性。

调制器的功用是将信道编码器的输出变成适合信道传输的波形。通常此波形为一振幅、频率或相位受调制的正弦波。

信道是指信号在各种有线电或无线电媒质中传输的通路。例如架空明线，地下（水下）电缆，短波电离层传播，微波视距传播，对流层散射传播和人造卫星中继信道等等。

在接收端，图 1-4 中各方框的功用和发送端的相应部分恰好相反。**解调器**将接收波形变成数字序列，并由**信道译码器**译码。在信道译码器中可以发现或纠正信号在传输过程中引入的错误。**信源译码器**则将其输入变换为信源送出的原始信号。受信者可以是人，也可以是与信源类型相对应的电子或机械装置。

在接收端，解调器输出的信号上还叠加了不希望有的噪声，它们主要来自信道和接收设备的前级，现在将其表示为集中加于解调器的输入端上。

这里需要提及的是，为了使发送至信道的信号具有足够的功率，以及接收端收到的微弱信号适于解调，通信系统中自然应当具有一些放大器和（或）变频器。信号在传输时，可能还通过交换设备。此外，为了实现保密通信，密码在信道编码器之前或后加入，在接收端的相应位置解密，此类加密和解密装置合称保密机。但是，上面这些部分与主题关系不大，今后我们

不准备专门讨论，所以在图1-4内全部省略了。

1-4 二进制数字及比特的概念

我们将只能取两种不同状态的信号称为二进制信号，这是数字信号的一种基本形式。前面谈过的电传机送出的信号便属于二进制信号，因为它的电压只能是0或A伏。

在数学上，与这种二进制信号对应的数字是二进制数字，它只有“0”和“1”两个符号。对于二进制信号的处理常常可以用二进制数字的运算来表示。

普通的十进制记数法中，共用十个符号：0, 1, 2, …, 9，逢十进位。例如一千九百七十四写为1974，它表示

$$1 \times 10^3 + 9 \times 10^2 + 7 \times 10^1 + 4 \times 10^0$$

而在二进制记数法中，仅用两个符号：0和1。这时，逢二进制。例如，二十五在二进制中记为11001，它表示

$$1 \times 2^4 + 1 \times 2^3 + 0 \times 2^2 + 0 \times 2^1 + 1 \times 2^0$$

仿此，上面的1974若用二进制表示则应为

$$11110110110,$$

共十一位，显然书写远比十进制冗长。不过，二进制数字却便于表示电压（或电流）的有无以及触发器、移位寄存器、磁心等装置的两个状态，而且运算十分简单，故在电子技术中获得广泛的用途。

这样，图1-2(b)所示信号，可用二进制数字表示为10011001，即用“1”表示电压A伏，用“0”表示电压0伏。

二进制数字的英文缩写为“bit”，通常音译为“比特”。一个二进制码元（或一位二进制数字）又称为1个比特。图