

数字通信基础

蒋自明 编

武汉大学出版社

内 容 简 介

本书是作者根据自己在武汉大学空间物理学系和无线电子信息工程系讲授《数字通信原理》的讲义修改而成的。全书共十章，分为四个部分，讲述了数字通信系统的基本概念、编码原理、数字传输和数字通信网等内容。可以作为理工科院校无线电类专业的教材，也可供从事数字通信工作的科技人员参考。

数字通信基础

蒋自明 编

*

武汉大学出版社出版

(武昌 珞珈山)

新华书店湖北发行所发行 武汉大学印刷厂印刷

*

850×1168毫米 1/32 14.375印张 365千字

1987年11月第一版 1987年11月第一次印刷

印数：1—3000

ISBN 7—307—00165—9/O·15

统一书号：13279·53 定价：2.85元

目 录

第一章 数字通信概说	(1)
§1.1 数字通信发展简史.....	(1)
§1.2 数字通信系统模型.....	(4)
§1.3 数字通信系统的主要性能指标.....	(7)
习题.....	(13)
第二章 模拟信号的数字化原理	(16)
§2.1 抽样定理.....	(16)
§2.2 幅度量化原理.....	(23)
2.2-1 均匀量化.....	(24)
2.2-2 量化噪声.....	(26)
2.2-3 非均匀量化.....	(29)
§2.3 PCM 编码.....	(36)
2.3-1 编码码型.....	(36)
2.3-2 线性 PCM 编码.....	(40)
2.3-3 非线性 PCM 编码.....	(40)
§2.4 预测编码.....	(48)
2.4-1 预测编码的基本原理.....	(48)
2.4-2 增量调制 (ΔM) 编码.....	(53)
2.4-3 改进型增量调制编码.....	(58)
2.4-4 前值 DPCM 编码.....	(63)
§2.5 PCM 与 ΔM 通信系统的性能.....	(65)

2.5-1	PCM 通信系统的性能	(66)
2.5-2	ΔM 通信系统的性能	(71)
2.5-3	PCM 与 ΔM 通信系统的性能比较	(75)
	习题	(78)
第三章 数字信号的码变换		(84)
§3.1	引言	(84)
§3.2	增量调制到差分脉码调制的数码变换 (ΔM -DPCM)	(86)
§3.3	ΔM -DPCM 信码的解调	(91)
§3.4	ΔM -DPCM 信号的量化信噪比	(95)
	习题	(98)
第四章 纠错编码		(100)
§4.1	引言	(100)
§4.2	纠错编码的基本原理	(102)
§4.3	线性分组码	(111)
4.3-1	汉明码	(111)
4.3-2	线性分组码的一致监督矩阵	(115)
4.3-3	校验子	(117)
4.3-4	线性分组码的生成矩阵	(120)
§4.4	循环码	(124)
4.4-1	循环码的生成多项式和生成矩阵	(126)
4.4-2	循环码的编码	(131)
4.4-3	循环码的译码	(135)
4.4-4	缩短循环码	(140)
§4.5	卷积码	(142)
4.5-1	卷积码的基本概念	(142)
4.5-2	卷积码的生成矩阵和基本生成矩阵	(145)

4.5-3 编码速率为 $\frac{1}{2}$ 的非系统卷积码	(149)
4.5-4 维特比算法译码原理	(153)
习题	(159)

第五章 信道与噪声 (162)

§5.1 信道的基本概念	(162)
§5.2 调制信道和编码信道模型及其一般表述	(164)
§5.3 调制信道的特性及其对信号传输的影响	(167)
§5.4 信道内干扰	(174)
§5.5 白噪声及其抽样值之间的相互关系	(175)
§5.6 窄带高斯白噪声	(180)
§5.7 正弦波加窄带高斯白噪声	(187)
§5.8 信道容量	(193)
习题	(194)

第六章 基带传输原理 (198)

§6.1 引言	(198)
§6.2 基带随机脉冲序列的频谱分析	(200)
§6.3 数字信息的基带传输码型	(210)
§6.4 数字基带传输系统的传输特性	(217)
6.4-1 基带传输中的码间串扰	(217)
6.4-2 无码间串扰的基带传输特性	(219)
§6.5 部分响应系统	(229)
§6.6 信道噪声对信号传输的影响	(237)
§6.7 最佳基带系统	(244)
6.7-1 输出信噪比最大的最佳线性滤波器 (匹配滤波器)	(245)
6.7-2 理想信道下的最佳基带系统	(251)

6.7-3 非理想信道下的最佳基带系统.....	(254)
§6.8 横向滤波器均衡原理.....	(257)
§6.9 眼图.....	(263)
§6.10 基带传输 PCM 时分多路通信系统.....	(264)
习题.....	(266)
第七章 数字调制系统.....	(275)
§7.1 二进制数字调制.....	(275)
§7.2 二进制数字调制信号的频谱分析.....	(279)
§7.3 噪声对相干解调二进制数字调制系统的 影响.....	(282)
7.3-1 噪声对相干解调二进制 ASK 系统的影响.....	(282)
7.3-2 噪声对相干解调二进制 PSK 系统的影响.....	(285)
7.3-3 噪声对相干解调二进制 FSK 系统的影响.....	(288)
§7.4 噪声对非相干解调二进制数字调制系统 的影响.....	(291)
7.4-1 噪声对包络检波二进制 ASK 系统的影响.....	(291)
7.4-2 噪声对包络检波二进制 FSK 系统的影响.....	(294)
7.4-3 噪声对 DPSK 系统的影响.....	(297)
§7.5 最佳接收机及其抗噪声性能.....	(302)
7.5-1 最佳接收机的结构.....	(302)
7.5-2 最佳接收机的抗噪声性能.....	(307)
§7.6 二进制数字调制系统的性能比较.....	(310)
§7.7 多进制数字调制系统及其性能分析.....	(312)
7.7-1 多进制数字振幅调制系统.....	(312)
7.7-2 多进制数字频率调制系统.....	(318)
7.7-3 多进制数字相位调制系统.....	(323)
7.7-4 多进制信号的最佳接收.....	(329)
§7.8 实用中调制技术的选择.....	(335)

习题	(338)
第八章 数字信号的复接	(342)
§8.1 数字复接的基本概念	(342)
§8.2 同步复接	(346)
8.2-1 同步复接原理	(346)
8.2-2 同步复接的帧结构	(349)
§8.3 正码速调整异步复接	(353)
8.3-1 正码速调整的基本原理	(354)
8.3-2 正码速调整的帧结构	(356)
8.3-3 正码速调整的基本关系式	(358)
8.3-4 正码速调整的工作过程	(359)
8.3-5 正码速调整缓冲存储器的容量设计	(365)
§8.4 正/负码速调整异步复接	(366)
习题	(369)
第九章 通信网	(372)
§9.1 引言	(372)
§9.2 电路交换	(376)
§9.3 报文交换	(379)
§9.4 包交换	(383)
9.4-1 包交换的基本原理	(383)
9.4-2 包交换的路由选择和网络协议	(386)
9.4-3 包交换的特点	(391)
§9.5 通信量	(392)
9.5-1 纯丢失系统	(394)
9.5-2 纯延迟系统	(397)
§9.6 数字通信网	(399)
习题	(403)

第十章 定时系统	(406)
§10.1 定时系统概述	(406)
§10.2 比特同步	(410)
10.2-1 外同步方式	(410)
10.2-2 自同步方式	(414)
10.2-3 比特同步系统的技术指标	(422)
10.2-4 比特定时的时间偏差对系统性能的影响	(425)
§10.3 帧同步	(427)
10.3-1 帧同步系统的技术要求	(428)
10.3-2 集中插入式帧同步码型的选择	(429)
10.3-3 集中插入式帧同步码组的识别及其性能	(434)
10.3-4 帧同步保护	(437)
10.3-5 分散插入式帧同步系统	(439)
§10.4 网同步	(442)
10.4-1 主从同步法	(442)
10.4-2 相互同步法	(443)
10.4-3 独立时钟法	(444)
习题	(447)
参考书目	(449)

第一章 数字通信概说

§1.1 数字通信发展简史

世界上一切事物都包含着三个基本方面，即材料、能量和信息。信息既不是材料，也不是能量，但却依赖于材料和能量，它是材料、能量的某种可能状态及其运动规律所表示的知识。有信息，就离不开信息的处理和传输，从广义上讲，信息的处理和传输称为通信。在长期的实践中，为了信息处理和传输的方便，人们通常把需要的信息抽象成信号，例如符号、语言、文字、图象等，并形成了多种多样的通信手段。在所有的通信手段中，用电来实现信息的处理和传输有着很多优越性，因此，在现代自然科学中，所谓通信主要是指用电信号表示的信息的处理和传输。在本书中，我们所说的信号就是信息变换成的电信号，而通信，也仅仅是指用电信号进行的信号处理和传输，即电通信。

通信处理和传递的是信号。任何信号，不管它代表的是符号、文字、语言、图象，或者是数据，都可归结为两类：一类是状态连续变化的模拟信号，另一类是状态离散突变的数字信号。因此，按处理和传输的信号类型来分，通信可分为模拟通信和数字通信。

在过去一段时期内，由于模拟通信广泛地应用于社会生活，一些人误认为它比数字通信更来得源远流长。其实不然，最早的通信应是数字通信。远在公元前700年，我国人民就使用了烽火台传递消息。它以台上燃烧火焰表示敌人侵犯，需要救援；以无火焰表示平安无事，各守疆土。如果我们将有火焰的状态看作“1”，

无火焰的状态看作“0”，则它就是数字通信的雏形。到公元前300年欧洲国家相继出现了火把阵列、旗语等通信方式，它们实际上也属于数字通信。而原始的电通信也是以19世纪30年代出现的低级的有线电报通信为开端，用数字形式传输的。历史上，从1837年到1880年这段时间里，初级的数字通信系统——电报网遍及全世界。

1876年，A. G. 贝尔在研究“谐音电报”的过程中，发明了电话。电话是一种快速的、不用训练就能直接亲身使用的方便的通信手段，因而立即普及开来。当时的电话传输的是模拟信号，而随后出现的实用电子管放大器也证明是适用于处理模拟信号的。这样一来，模拟通信方面的技术和器件迅速提高，模拟通信便蓬勃发展起来。所以，在1880年后，世界上的通信网都设计成模拟传输形式。而作为数字通信的代表——电报，在电话发明的冲击下，随着模拟通信的发展日益处于次要地位。

数字通信虽然受到电话发明的冲击，但其研究工作并未停止。在理论上，从本世纪30年代开始，特别是50年代后，先后形成了“调制理论”、“仙农信息论”、“纠错编码理论”、“信号和噪声理论”、“信号检测理论”等，这些理论，不仅使模拟通信得到高度发展，也为数字通信的发展奠定了基础。尔后，又进一步形成了“数字信号处理理论”，使数字通信理论更加完善。在技术上，本世纪30年代中期，出现了脉冲编码技术。脉冲编码技术在电报通信的基础上，将话音信号、图象信号等各种模拟信号数字化，使几乎所有的通信内容都可以在数字通信系统内实现，从而为数字通信开辟了广阔的领域。1947年，人们制成了第一个脉冲编码调制（PCM）系统，为高一级的数字通信系统的实现，提供了实验依据。

由于世界性大工业生产、商业贸易的发展，信息交流日趋重要，社会上越来越需要大容量、高质量的通信网络来提供日益增

多的通信服务。计算机应用也要求使信息数字化。60年代出现的光纤通信和卫星通信，为数字通信提供了大容量信道。特别是大规模集成电路的成就，为数字通信提供了良好的器件基础，使得数字通信系统实现起来甚至比模拟通信系统更为容易。因此，70年代以来，数字通信的理论和技术的突飞猛进，数字通信在通信业务中占的比重越来越大。

由于数字通信的发展和电子计算机的广泛运用，计算机与数字通信已紧密结合在一起。目前已经不仅仅是人与人之间的通信，实际上已实现了人与机器，机器与机器之间的通信，从而对现代科学，对人类文明起着重大作用。

比起模拟通信来，数字通信有着明显的优越性，表现为：一、数字信号传输的抗干扰能力强。在长距离传输中，可以采用中继的办法再生信号，以消除噪声的积累。二、可以采用纠错编码技术进一步提高传输的可靠性。三、便于与计算机配合对信息进行各种快速处理。四、数字信号易于加密，且保密性强。五、数字通信使信息的处理、传输和交换一体化成为可能，从而可发展成为高效而经济的综合通信方式。六、数字通信可以传输各种信号，使通信系统通用、灵活。

不过，世界上的事情总不是十全十美的，一般说来，数字通信的许多优点都是用比模拟通信占据更宽的系统频带而换得的。以电话为例，一路模拟电话通常只占据4千赫带宽，而一路数字电话可能要占据约20~60千赫的带宽。在系统频带紧张场合，这一缺点往往限制了数字通信的使用。然而，随着社会生产的发展，对通信的速率、容量、可靠性、保密性以及计算机配合使用的要求越来越高，故往往不得不宁可牺牲频带而采用数字通信。而且，由于一方面近年来发展起来的光纤通信、卫星通信，其频带十分宽；另一方面，信源编码中的频带压缩技术水平大大提高，从而使频带紧张的问题并不显得突出。所以，数字通信是现

代通信的发展趋势。可以预料，不久的将来，数字通信方式将在通信中处于主导地位。

在已经进入信息时代的今天，通信的作用显得日益重要，虽然数字通信的发展使通信技术提高到了一定的高度，但还有许多理论和实践问题尚未得到解决，当前系统中受到的某些限制，也许正是由于我们还没有发现一些基本原理，没有开发一些基本技术的缘故。随着社会发展的需要，新的通信理论、通信体制、通信手段将不断被发现，通信科学的水平将不断提高。

§1.2 数字通信系统模型

通信的目的是将一个地方的信息传输到另一个地方，从这个简单的意义出发，数字通信系统的模型如图1.1所示。

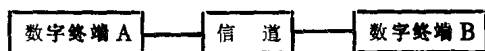


图1.1 数字通信系统的简单模型

在图1.1中，数字终端是指具有信号处理、信号发送和信号接收能力的设备的总体。信道是连接数字终端、传输信号的通道。通信的发方把信源产生的信号，经数字终端进行某些处理和变换后，然后送入信道。通信的收方则把信道传输过来的信号接收下来，并进行适当的处理和反变换，还原为原信号，从而完成通信的任务。

图1.1的模型是点对点通信的模型，在实际通信中，通信系统同时连接着分布在各个地方的成千上万个用户，并需要完成其中任意两点或多点间的信号传输。为达到这样的目的，必须建立通信网。在近代通信中，数字通信网的系统原理结构可以用图1.2来说明。在图1.2中，数字终端设置在各个用户处，如前述，它们负责信号的处理和变换作用。数字终端之间通过交换设备完成信

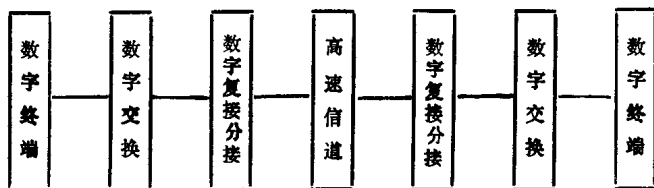


图1.2 近代数字通信系统原理结构

号的目的地选通。近代的数字交换设备实际上是一台专用计算机，它既可以在信道不拥挤时，立即进行线路交换、时分转接等，以达到实时通信，又可以在信息传输高峰时间，采用存贮转发的方式，先把发方无法及时传输的信号存贮起来，在信道空闲时送到收方，以充分利用信道容量，并且使整个通信过程显得机动灵活。在数字通信网中，特别是在当前信息传输业务日益增多的情况下，系统中传输的信息量是十分巨大的，为了扩大传输容量，提高传输效率，常常需要把若干个单路信号合并成多路信号，把若干个低速数字信号合并成高速数字信号，将其在高速信道中传输。数字复接的作用就是将各个用户或各个终端送来的大量信号安排在不同的时隙，使它们在同一信道中传输。数字分接是数字复接的反过程，它负责把高速信道中传输过来的多路信号分开，以便送到不同的目的地。附带指出，由于数字通信中传输、复接、交换的都是离散的数字信号，各路信号对设备是时分复用的，因此可以直接交换，避免了过去在模拟信号交换中传统的反复调制解调的徒劳工作，减少了交换中信噪比的降低，提高了通信效率，实现了系统的全数字化。这种信息的数据处理、数据传输、数据交换一体化的综合信息处理系统，就是前面提到过的综合通信系统。

尽管现代数字通信系统的结构是十分复杂的，但不难看出，点对点的通信是组成任何形式的数字通信系统的基础。或者更确切地说，点对点的单向通信是组成任何形式的数字通信系统的基础。因此，我们有必要详细地了解点对点单向数字通信系统的结

构。

在点对点单向通信中,发送端(例如终端 A)必定包含信息源。信息源有各种各样,有离散的数字信源,也有连续的模拟信源。对于连续的模拟信源,必须将其数字化后才能采用数字通信的手段。即使已经是数字化的信源,为了适合传输的某些要求,也要变换为恰当的数字信号。因此,在绝大部分场合,信源发出的信号要经过编码,这一过程称为信源编码。

如前所述,数字通信的优点之一是便于保密且保密性强。为达到保密的目的,通常要对信源编码器输出的基带信号进行人为的“搅乱”,这一过程称为加密。

信号在传输过程中,必定要受到不需要的随机干扰信号——噪声的损害。由于噪声的影响,收端的信号不可能总是与发端一一对应,即可能出现差错。为减少传输中引起的差错,必须采取抗干扰措施,即所谓纠错编码,或称差错控制编码、信道编码。

从信道编码器输出的数字序列,属于基带信号。这些信号可以以基带传输方式传送,但在许多场合,为了与信道配合,必须变换成频带信号传输,这就是大家早已熟知的调制。

信号被调制以后便可送入信道,被调信号在信道中还会叠加上噪声,接收数字终端(例如终端 B)收到的是信号与噪声的混合。因此,在接收数字终端 B,与发送终端 A 对应,将设有解调器、信道解码器、解密器、信源解码器。

由于发送端发出的是数字信号,这些信号是按一定的时间间隔逐个传输的,并且在传输中要受到失真和噪声的影响,所以到达接收端时波形变了样。因此,在接收端对信号加噪声进行适当处理后,必须按与发送端相同的时间间隔选择最佳时刻来逐个判定收到的一个个信号的数值,这一判定时间的选择称为“比特同步”或“码元同步”及“位同步”。还有,在信源编码中,常常用一组码元来表示某一信号或某一抽样值。在数字复接中,常常

要把多路信号合群。只有准确区别各组码元，或各群码组的起始时刻，才能恢复原始信号，这一分组时刻的确定称为“帧同步”、“群同步”或“码组同步”。此外，在数字通信网中，只有保持网内各地时钟的一致，才能实现信息的复接和交换，这种保持网内时钟一致的功能称为“网同步”。“比特同步”、“帧同步”、“网同步”统称为“同步定时”。

综上所述，较详细的点对点单向数字通信系统模型如图 1.3 所示。

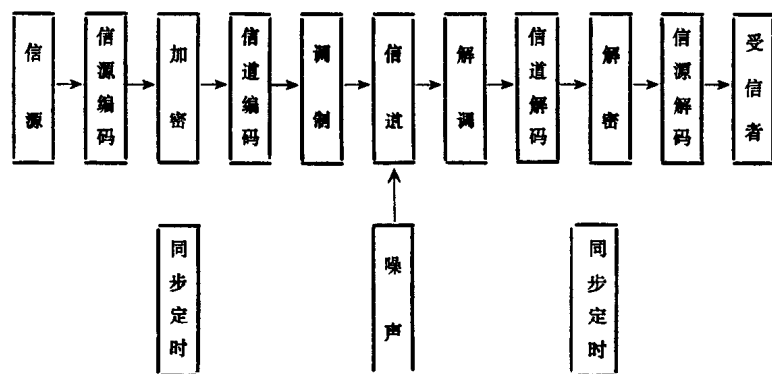


图 1.3 点对点单向数字通信系统模型

当然，对于特定的数字通信系统，并不是所有的环节都是必须具有的，在不同的运用场合，往往可以省掉不同的部件。而且在一般情况下，各个数字终端都同时具有发方和收方应具有的功能，以便完成双向通信。

由于点对点通信是组成任何形式通信网的基础，因此，在本书中，我们将首先详细讨论点对点数字通信中的各种问题，然后在这个基础上再对数字通信网的主要问题进行讨论。

§ 1.3 数字通信系统的主要性能指标

数字通信系统中要研究的问题很多（如信源编解码问题、纠

错编解码问题、保密问题、数字调制解调问题、信道与噪声的特性及其对信号传输的影响问题、数字复接分接问题、信息交换问题、同步问题等等），因此，衡量数字通信系统的技术质量指标势必也很多，在评价系统的性能时，如果要把所有因素都考虑进去，这常常是不可能的，所以，我们往往只考虑通信系统的主要性能指标，或者在特殊用途上，重点考虑某一方面的性能指标。

在一般情况下来考虑，通信的有效性和可靠性是最重要的两项指标。对数字通信来说，从信号传输的角度看，有效性主要是指传输速率，同一信道的传输速率越高，则有效性越好。而可靠性，主要是指传输的差错概率，差错概率越小，可靠性越高。实际上，有效性和可靠性是相互矛盾的两个方面，因此，在实际设计时，必须根据具体要求来确定，例如，在满足一定差错概率的情况下，尽量提高传输速率；或者在维持一定的传输速率下，使传输的差错概率尽量小。

为了表述传输速率和差错概率的确切含义，必须先介绍数字通信中的几个基本物理量。

首先介绍信息的量度问题。同样一句话，或同样长一段文章，对听者和读者来说，会有不同的感觉。也就是说，一些消息比另一些消息具有更多的信息量。例如，某人说：“今年夏天将和去年夏天一样热。”另一个人说：“今年夏天将和去年冬天一样冷。”两句话虽然字数相同，但给人感觉就大不相同。前一事件完全可能，听到的人不以为怪，而后一事件很难发生，听到的人会同大为惊奇。因此，后面一句话显然比前一句话包含更多的信息量。由此看来，信息量的大小与事件出现的概率有关。不难想象，对于一定发生的事件，其信息量等于零。事件发生的可能性越小，包含的信息量越大。对于不可能事件，其信息量为无穷大。这就提示我们，信息量 I 与事件出现概率 P 应有如下关系：