

通信工程丛书

数字通信传输系统

李乐民 赵梓森 翁则贵
杨知行 吴慕龙 骆正彬 等编著

主编：李乐民

数字通信



中国通信学会主编 • 人民邮电出版社

73.4616
255

数字通信(2)

数字通信传输系统

李乐民 赵梓森
翁则贵 杨知行 等编著
吴慕龙 骆正彬
主编: 李乐民

人民邮电出版社

8810134

D006/20

内 容 提 要

本书阐述数字通信中的传输系统。全书分八章。第一到四章是基础知识，包括基带传输码型与频谱、数字调制与解调以及抗干扰性能分析等。第五到八章分别介绍数字电缆、光缆、微波中继以及其他的传输系统。可供从事数字通信方面的工程技术人员阅读，也可作为大专院校有关专业的教学参考书。

数字通信(2)

数 字 通 信 传 输 系 统

李乐民 赵梓森

翁则贵 杨知行 等编著

吴慕龙 骆正彬

主编：李乐民

*

人 民 邮 电 出 版 社 出 版

北京东长安街27号

河北省邮电印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行

各 地 新 华 书 店 经 售

*

开本：850×1168 1/32 1986年10月第 一 版

印张：17 页数：272 1986年10月河北第一次印刷

字数：450千字 印数：1—3,200 册

统一书号：15045·总3262—无6383

定价：4.15元

1986.12.28

丛 书 前 言

为了帮助我国通信工程技术人员有系统地掌握通信学科有关专业的基础理论知识,提高解决专业科技问题、做好实际工作的能力,了解通信技术的新知识和发展趋势,以便为加快我国通信建设、实现通信现代化作出应有的贡献,我会与人民邮电出版社协作,组织编写这套“通信工程丛书”,准备陆续出版。

这套丛书的主要读者对象是从事通信工作不久的大专院校通信学科各专业毕业生、各通信部门的助理工程师、工程师和其他通信工程技术人员。希望能够有助于他们较快地实际达到通信各专业工程师所应有的理论水平和技术水平。

这套丛书的特点是力求具有理论性、实用性、系统性和方向性。丛书内容从我国实际出发,密切结合当前通信科技工作和未来发展的需要,阐述通信各专业工程师应当掌握的专业知识,包括有关的系统、体制、技术标准、规格、指标、要求,以及技术更新等方面。力求做到资料比较丰富完备,深浅适宜,条理清楚,对专业技术发展有一定的预见性。这套丛书不同于高深专著或一般教材,不仅介绍有关的物理概念和基本原理,而且着重于引导读者把这些概念和原理应用于实际;论证简明扼要,避免繁琐的数学推导。

对于支持编辑出版这套丛书的各个通信部门和专家们,我们表示衷心感谢。殷切希望广大读者和各有关方面提出宝贵的意见和建议,使这套丛书日臻完善。

中国通信学会

一九八五年九月二十日

前 言

数字通信与模拟通信相比，有抗干扰性强、可用再生中继避免干扰积累、便于加密、便于交换及设备易集成化等等优点。近年来，光纤通信进入实用化，成本低于同轴电缆通信，而最适合光纤传输的信号形式是数字的。由于大规模集成电路和计算技术的发展，用程序控制的数字电话时分交换机也已实用化。这种交换机改善了服务质量、体积小、维护管理方便、可以方便地与数字传输系统相配合。随着信息社会的发展，除电话服务外，还需要有数据、电报、传真、电视会议等服务，迫切需要建立综合业务数字网。因此，数字通信必将加速发展。

数字通信包括终端（模拟信号数字化、时分复用等）、传输、交换等方面的内容。本书目的是讲传输系统，阐述数字信号传输以及系统方面的知识。

评价一个数字通信传输系统，频谱利用效率和抗干扰性能是两个重要的方面。传输一路脉冲编码调制数字电话信号所需的频带常比传输一路模拟电话信号宽。这是不利的。但是，由于数字通信抗干扰性强，可以利用模拟通信不宜使用的频带。例如，扩展市话中继电缆的使用频带，传送多路数字电话；发展11吉赫以上的数字微波中继通信等。近年来，数字微波中继通信还采用了频谱利用率很高的数字调制方式，使每兆赫传送的数字电话路数与模拟传输时的路数相当。对于传输数据，用数字信道与用模拟信道（附加调制解调器）相比，在相同带宽内前者常能传输更高的数据速率。这样，不能笼统地说数字通信的频谱利用效率没有模拟通信高。本书前面部分着重讲解频谱利用率和抗干扰性能。

第一章介绍数字通信概况。第二章讲基带传输，第三章讲数字

调制与解调，这两章着重说明基本原理和频谱利用率，而抗干扰性能分析则集中在第四章。第二到四章是了解有关数字传输系统所需的基本知识。对于均衡、定时恢复等方面的知识，则在介绍有关传输系统时结合起来讲解。定时恢复在第五章中讲，但这部分内容对其他各章的传输系统也是有用的。

第五到八章从系统的角度，讲各种数字传输系统。内容包括信道特性、系统构成、系统设计考虑等。从发展方向来看，地面通信系统，特别是大城市间，将以光纤通信为主，并用微波中继通信相配合。长距离通信，特别是国际通信，卫星通信起着重要作用。国内卫星通信可解决边远地区通信。除了光纤、微波中继、卫星通信外，在目前已存在的市话电缆上采用多路数字电话传输，是有经济价值的。本书重点讲数字电缆传输（第五章）、数字光纤传输（第六章）和数字微波中继传输（第七章），而把其他的数字传输系统合并为第八章。本书对数字卫星通信叙述较简，并不是因为它不重要，而是因为篇幅限制。近年来已有一些数字卫星通信书籍出版（见第八章参考文献），可供进一步参考。

本书第一到四章由李乐民编写。第五章5.2、5.3-5.7及其余各节分别由张乘风、李正元、翁则贵编写初稿。第六章由赵梓森编写。第七章由杨知行编写，姚彦和孔宪正审阅。第八章8.1、8.2节分别由吴慕龙、骆正彬编写。全书由李乐民主编。

本书若有不妥之处，请读者指正。

目 录

第一章 数字通信概述	(1)
1.1 信号的各种形式	(1)
1.2 模拟通信与数字通信	(6)
1.3 模拟信号的数字化与时分复用	(9)
1.4 数字信号传输	(11)
第一章参考文献.....	(13)
第二章 基带传输码型与频谱	(15)
2.1 数字信号的电脉冲表示	(15)
2.2 归零码与不归零码的功率谱	(19)
2.3 限制频带运用	(25)
2.4 多电平码	(34)
2.5 部分响应编码	(38)
2.6 选用线路传输码型应考虑的问题	(45)
2.7 扰码与解扰	(51)
2.8 两电平线路码	(54)
2.9 三电平线路码	(67)
第二章附录.....	(77)
第二章参考文献.....	(87)
第三章 数字调制与频谱	(90)
3.1 数字调幅	(90)
3.2 正交调幅	(104)
3.3 数字调相	(112)
3.4 差分调相	(120)
3.5 数字调幅调相	(125)

3.6	数字调频	(127)
3.7	参差四相相移键控与最小频移键控	(136)
3.8	适用于非线性信道的节省频带的调制	(146)
	第三章附录	(155)
	第三章参考文献	(154)
第四章	数字传输系统的误码率	(157)
4.1	概述	(157)
4.2	热噪声的特性	(159)
4.3	数字信号的最佳接收	(161)
4.4	发送和接收滤波器的频率响应要求	(173)
4.5	多电平传输	(179)
4.6	部分响应传输	(182)
4.7	多相信号的相干接收	(185)
4.8	差分调相信号的接收	(188)
4.9	非相干接收	(189)
4.10	MSK信号的接收	(191)
4.11	纠错编码的应用	(192)
4.12	多元正交波形传输	(195)
4.13	扩频通信	(197)
4.14	各种不完善因素对误码率的影响	(202)
4.15	各种数字调制的比较	(209)
	第四章参考文献	(212)
第五章	数字电缆传输系统	(214)
5.1	概述	(214)
5.2	电缆及其特性	(216)
5.3	线路码型选择	(226)
5.4	数字信号的传输与再生	(228)
5.5	定时信号的提取	(242)
5.6	误码率	(261)

5.7 再生中继器实例	(265)
5.8 PCM电缆传输系统工程设计要点	(271)
5.9 用户线数字传输	(279)
第五章附录	(283)
第五章参考文献	(288)
第六章 数字光纤传输系统	(289)
6.1 概述	(289)
6.2 光纤线路的传输特性及其测量	(297)
6.3 光源	(319)
6.4 光电检测器	(330)
6.5 数字光接收机	(337)
6.6 线路码型	(363)
6.7 数字光纤传输系统的考虑	(372)
第六章参考文献	(388)
第七章 数字微波中继传输系统	(389)
7.1 概述	(389)
7.2 传输系统性能指标	(390)
7.3 数字微波中继通信系统构成	(400)
7.4 视距传播特性及均衡技术	(409)
7.5 调制方式的选择	(435)
7.6 数字微波中继收发信设备	(438)
7.7 数字微波中继系统性能估算	(454)
7.8 数字微波中继通信设备实例	(463)
第七章参考文献	(477)
第八章 其他数字传输系统	(479)
8.1 数字卫星传输系统	(479)
8.2 数字对流层散射传输系统	(500)
8.3 其他数字传输系统概述	(531)
第八章参考文献	(533)

第一章 数字通信概述

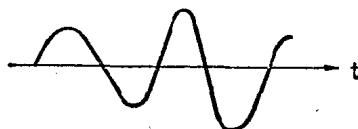
1.1 信号的各种形式

人们在日常工作和生活中，需要交流思想和传递消息。例如，用书信、电报、传真、电话通消息，用广播、电视报道消息。消息的处理、传递和交换属于通信。随着电子计算机的广泛使用，还需要有人与计算机或计算机与计算机间的通信。用电的方法来进行通信，称为电通信，有时简称通信或电信。

用电信号表示消息，有各种形式。按照时间与幅度的取值情况来分有：

(1) 时间与幅度都连续的信号

例如，电话机话筒输出的电话信号和电视摄像机输出的电视信号属于这种信号。它在时间上是连续的，也就是在不同的时间都可能有信号变化；在幅度上也是连续的，也就是幅度可在连续的区间内取值。图1.1(a)示出这种信号波形。



(a) 时间与幅度都连续的信号



(b) 时间离散 幅度连续的信号

图 1.1 (a) 时间与幅度都连续的信号 (b) 时间离散、幅度连续的信号

(2) 时间离散、幅度连续的信号

将图1.1(a)的信号送到一个取样开关, 开关每隔时间 T 连通很短的时间, 输出信号波形如图1.1(b)所示。如果连通时间 τ 很小, 则图1.1(b)中单个窄脉冲可近似为平顶的。图1.1(b)的信号又称为脉冲幅度调制信号。可以证明^[1-3], 如果取样频率选得足够高, 将取样后的信号通过低通滤波器, 能还原得原来的时间连续信号。

(3) 时间连续、幅度离散的信号

在电报通信中, 如果用电传打字机, 打一个字键后, 输出一串电流脉冲。我们称有电流为传号, 无电流为空号。在等待状态, 电传机输出传号。例如, 对于用国际五单位电码表的电传机, 按 F 键后, 输出电流波形如图1.2所示。先送出一个起动信号(空号, 持续一个单位时间), 接着是五单位电码, 每个“1”或“0”持续

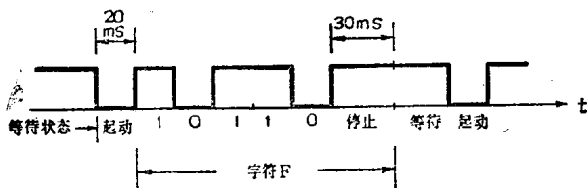


图 1.2 电传电报信号

一个单位时间, 后面还有一个停止信号(传号, 持续1.5单位时间)。启动和停止信号是供接收端控制电传打字机机械部分起动和停止用的。若电传机按每秒钟送出50个传号或空号工作, 通常称工作速率是50波特, 而一个单位时间是20毫秒。图1.2信号的特点是只有二种幅度, 即有电流或无电流。由于按键时间是随机的, 在任何时间都可能产生幅度变更。我们称这种信号是一种时间连续、幅度离散的信号。幅度离散是指幅度取值为有限的, 图1.2是只有二种幅度的例子。

另一个时间连续、幅度离散的例子是脉冲位置调制信号〔2、3〕。上面讲过的图1.1(b)中，用脉冲幅度代表传送的消息。可以将幅度变化的脉冲序列变换为位置变化的脉冲序列，即以脉冲位置偏离未调脉冲位置的距离来表示消息，称为脉冲位置调制信号，如图1.3所示。位置偏离与幅度有对应关系，所以，在接收端可以反变

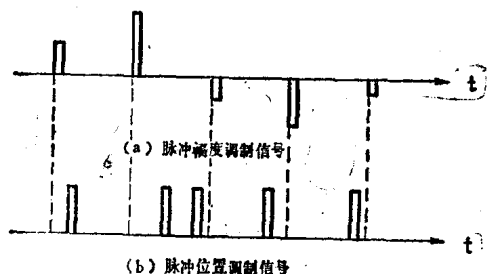


图 1.3 脉冲位置调制信号

换为幅度调制信号，再经低通滤波得取样前的信号。

(4) 时间与幅度都离散的信号

图1.4示出一种电码波形的例子。在时间段 kT 到 $kT + \tau$ ($k =$

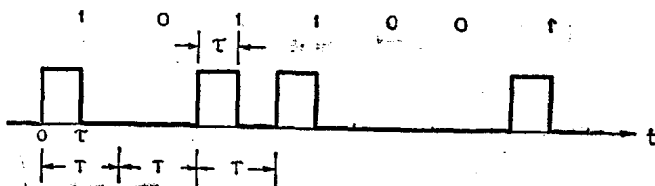


图 1.4 单极性归零码

..., 0, 1, 2, 3, ...) 内，信号幅度等于 A 或 0 ；在别的时间段内，幅度恒为 0 。图1.4中的 τ 小于 T ，我们称这种电码为单极性归零码，这里单极性指的是只有正极性。若 $\tau = T$ ，则称单极性不归零码。图1.4与图1.2信号的不同点是前者在离散时间 kT 或 $kT + \tau$ 有幅度跃变，后者则在任何时间都可能

质上, 图1.4波形可以用离散幅度的时间序列来表示。计算机与计算机间进行高速通信时, 通常送出的就是这种信号。

上面按时间与幅度取离散或连续值, 说明了四种信号形式。下面再说明信号形式是可以变换的。

时间与幅度都连续的信号可以经过窄脉冲取样, 变换为时间离散、幅度连续的信号(见图1.1)。我们有时称后者为取样数据信号, 一个样值可以在连续的幅度范围内取值。用低通滤波器可以进行反变换。

如果将取样数据信号通过一个量化器, 即将它的幅度取值变为有限的几种, 例如, 将幅度限制为 0、1、2、 $\dots$ 7 共 8 种, 原来的幅度是 1.3 变为接近的 1, 则得到幅度离散的取样信号。当然, 量化会引起失真, 幅度种数分得愈多, 量化失真愈小。如果我们用 3 位二进制码代表上例的 8 种幅度, 每一种码的排列表示一种幅度, 则可将上例量化后的取样信号变为二进制码(或称二进制码), 就得时间与幅度都离散的信号。上述取样、量化与二进制编码的过程如图 1.5 所示。图中, 二进制码采用了不归零形式。

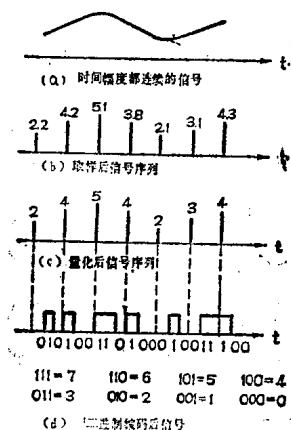


图 1.5 时间与幅度都连续的信号变换为时间与幅度都离散的信号

时间连续、幅度离散的信号也可以变换为时间与幅度都离散的信号。例如，对于图1.2的电传电报信号，最简单的方法是直接取样法。将图1.2的电压波形送到一个D触发器的D端，取样定时脉冲送到cP端。若D触发器是在cP脉冲下降沿起移位作用的，则在每一个取样脉冲下降沿，输出Q就改变为此时的输入幅度，并保持不变，直到下一个取样脉冲下降沿到来。这样，输出是时间与幅度都离散的信号。图1.6示出有关波形。输入波形是在任意时间都可能有幅度跃变，而输出波形只可能在取样脉冲的下降沿有跃变。这种变换相当于将信号跃变的时间进行量化，当然，这会引入畸变。增加取样频率，可减小畸变。但是，取样频率愈高，相当于输出不归零码的速率愈高（传号为连1码，空号为连0码），传输时所需带宽也愈大。有时，为了不过多地增加输出码的速率，采用将量化后的跃变时间用一组二进制编码来表示。对于电传电报信号，除了上述的取样法和时间编码法外，也可以将电传机输出的信号先储存起来，然后按固定速率再传送出去。在存储转发中，可以将起动和停止信号去掉，但在输出信号中应加帧同步码，使接收端知道五单位码是从哪个码起算的。这种方法对带宽利用最经济。

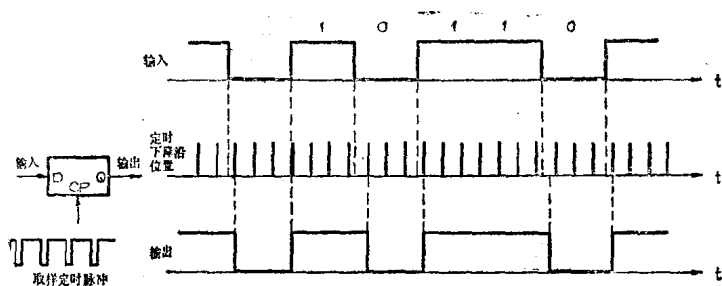


图 1.6 电报信号的取样变换

1.2 模拟通信与数字通信

我们常称时间与幅度都连续的信号为模拟信号。“模拟”两字是从模拟计算机而来的，模拟计算机中，用连续变化的电压或电流模拟实际系统中的变量。模拟信号的传输和交换属于模拟通信。

我们常称时间与幅度都离散的信号为数字信号。当幅度只有两种取值时，为二元数字信号。数字信号的传输和交换属于数字通信。

数字信号的传输，在中继站可以再生，避免畸变和噪声的累积。例如，发送的数字信号如图1.7(a)所示，是采用正、负电压的不归零码，正电压表示“1”，负电压表示“0”。经过传输、中继站放大后的波形如图1.7(b)所示，波形发生畸变，并叠加有噪声。图1.8示出一种再生方法，用一个比较器和一个D触发器(移位寄存器)。比较器输出的是数字电压(即高低电压)，当输入波

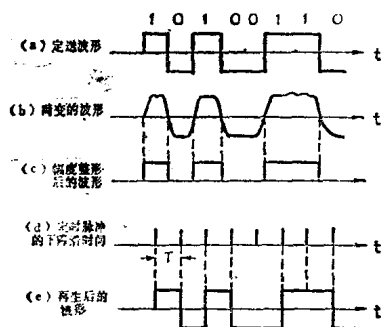


图 1.7 数字信号再生的有关波形

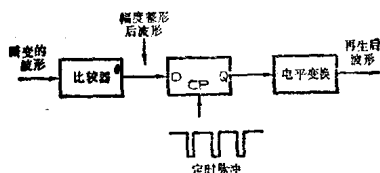


图 1.8 数字信号再生的一种实现方法

形大于零电压时输出高电压，当输入波形小于零电压时输出低电压，得图1.7(c)波形（图中采用TTL电路接口电压）。比较器输出的幅度恢复为两种状态，但是，幅度跃变时间仍不是等间隔的，所以，还需要重新定时。送到D触发器CP端的是定时脉冲，其周期等于一个码的宽度 T ，其下降沿在时间上对准了输入码的中心部分（若D触发器在定时脉冲的下降沿进行移位），相当于在中心部分取样。当下降沿到来时，输出Q成为输入D的状态，然后保持不变直到下一个下降沿到来。这样，再经电平变换，就得到再生后的用正负电压表示的不归零数字信号，如图1.7(e)。

实际运用中，如果在移位时刻，噪声幅度超过了有用信号幅度，则本来是正电压幅度会变成负电压或本来是负电压变成正电压，再生出来的码就有错误，称为误码。产生的二代码误码数与总的发送二代码数相比，称为二代码的误码率。误码率是数字信号传输中的一个重要指标。此外，再生时用的定时脉冲可能有相位抖动（见5.5.3节），即其周期不是严格地等于 T ，则再生出来的信号，其跃变时间也有抖动。对于相位抖动，也有规定的要求。

模拟信号传输在有多个中继站时，因不能再生，畸变和噪声会累积。

时间离散、幅度连续的信号不能作幅度上的再生。时间连续、幅度离散的信号可以作幅度上的再生，但是，例如脉冲位置调制信号，幅度跃变时间受畸变和噪声影响后不能再生复原。因此，还不是完全的数字通信。采用脉冲位置调制和脉冲幅度调制的通信属于模拟脉冲通信。

电传信号的起动时间是连续随机变量，所以在有干扰和畸变时不能精确地确定。由于一个单位时间是固定的，所以可将畸变信号整形为单位时间符合规定的信号。电传信号是用离散幅度来代表有用信息的，所以有的文献中也将它归类为数字信号。

数字通信可以分为三个方面：

(1) 数字通信终端。将消息变换为数字信号与反变换，包括必

要的处理。例如，在发送端将代表消息的模拟信号（电话、电视、传真等）用编码方法变换为数字信号，接收端进行反变换的设备；用时间划分方法，将多路数字信号进行合路和分路的复接设备；用于保密通信的加密设备等。

（2）数字信号传输。将数字信号从一处传送到另一处。为了保证传输质量，长距离传输时每隔一定距离要设置中继站。本书内容属于这一个方面。

（3）数字交换。将散布在很大范围内的很多用户联结起来，实现消息的交换。

数字终端设备、数字传输系统与数字交换系统合起来，可以组成一个综合数字网。用综合数字网建立各种服务（如电话、数据、会议电视等），成为综合业务数字网（*Integrated Services Digital Network*，简称ISDN）。

数字通信发展很快，在通信中的比重逐年增加，其原因有下列各点：

（1）电子计算机的应用和自动化的发展，使要传送的数字信号增多。

（2）将各种模拟信号变为数字信号再传送，则通信网要传送的信号都是数字的，使得调度方便。

（3）数字信号传输在中继站可以再生，避免干扰和畸变的累积。

（4）数字电路容易集成化，使设备体积减小，成本降低。

（5）对于数字化信号可以进行高保密处理。

（6）数字化后可以提高精度。例如，电压用数字方法表示，精度比用模拟方法高。

下面两节再对数字通信终端和数字信号传输的有关问题作些介绍。