

普通高等教育通信类规划教材

肖定中 编 著
肖萍萍

数字通信终端 及复接设备

北京邮电学院出版社

数字通信终端及复接设备

肖定中 肖萍萍 编著

北京邮电学院出版社

内 容 简 介

本书是一本介绍数字通信的基本原理和典型设备的教材,内容新颖、实用性强、自成体系。主要包括脉码调制原理、数字复接原理、传输特性及传输码型的分析、PCM基群和高次群设备的剖析、各项指标的测试、设备的开通及维护方法等,所介绍的设备在国内具有一定的代表性。

本书可作为邮电专科院校及通信部门光纤通信、数字通信工程培训的教材,也可作为通信工程技术人员的参考书。

数字通信终端及复接设备

编 著 肖定中 肖萍萍
责任编辑 郑 捷

北京邮电学院出版社出版
(100088 海淀区学院路42号)
新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售
北京邮电学院出版社印刷厂印刷

787×1092毫米 1/16 印张 21.0 字数 509 千字
1991年6月第一版 1991年6月第一次印刷
印数: 1--2000册
ISBN 7-5635-0062-6/TN·8 定价: 5.10 元

前 言

随着通信理论的不完善和通信技术的不断发展,实用通信系统已逐步由模拟通信系统向数字通信系统过渡。作为数字光纤通信系统和数字微波通信系统的终端设备,PCM基群和数字复接设备在整个数字通信系统中占有十分重要的地位。

本书主要阐述数字通信终端和复接设备,可作为邮电专科院校及光纤通信、数字通信工程培训的教材,也可作为通信工程技术人员的参考用书。书中各章节有一定的独立性,既可连贯选用,又可根据需要选用某些章节。为适应广大读者使用,书中尽量避免繁杂的数学推导。

全书共分八章。第一、二章简单介绍了数字通信的基本原理。第三章介绍了数字复接的基本原理,并对复接抖动的机理进行了详细的分析。第四章介绍了中继传输系统的基本原理,并简单介绍了定时抖动的概念。第五章讨论了用于电缆及光纤传输编码码型。在介绍了各种传输码及其特点之后,以有限状态时序机构(FSSM)为基础,对传输码型(定长码)的功率谱进行了分析,并给出了根据编码表直接计算码型功率谱的计算机程序(由邮电部激光通信研究所郑远桥工程师提供)。第六章剖析了以单路编译码方案为主体的PCM基群设备,对设备的总体结构、各单元电路及目前国际上流行的大规模集成单片编译码器的原理进行了详细的分析。本章还介绍了适用于各种通信领域的接口电路。第七章以“一跳三”数字复接设备为例,剖析了数字复接设备的各部分单元电路。第八章介绍了数字通信设备各项指标的测试方法、设备的开通步骤及日常维护,供设备使用单位参考。

本书所介绍的设备均为邮电部武汉邮电科学研究院近年来研制、生产并大批投入实用的新型数字通信设备。这些设备的性能优良、工作可靠、操作方便、维护简单,具有功耗低、体积小等优点,各项指标均符合CCITT的最新建议。鉴于国内部分厂家生产的设备也采用了武汉邮电科学研究院的技术,故本书所介绍的设备具有一定的代表性。

本书作为教材,整个教学环节为80学时(带有“*”的章节可不作要求)。为巩固教学效果,每章均附有一定数量的习题(带“*”的题可以选作)。各章参考学时如下:第一章2学时,第二章15学时,第三章8学时,第四章5学时,第五章8学时,第六章24学时,第七章14学时,第八章4学时。

本书第六章由肖萍萍、肖定中共同编写,第七章、第八章由肖萍萍执笔,其余章节由肖定中执笔。本书的编写、审校和出版得到了武汉邮电科学研究院、邮电高等院校无线电通信类专业教学指导委员会和北京邮电学院出版社的大力支持和协助,在此表示感谢!

由于作者水平有限,成书仓促,书中若有谬误及不妥之处,敬请读者指正。

作 者

一九九零年八月

于邮电部武汉邮电科学研究院

目 录

第一章 数字通信概述

§ 1 模拟通信和数字通信	(1)
一、电信历史的回顾	(1)
二、脉冲编码调制通信	(2)
三、数字信号的多路复用	(3)
§ 2 数字通信的特点	(5)
一、主要优点	(5)
二、主要缺点	(6)
思考题	(7)

第二章 模拟信号的数字化

§ 1 模拟信号的取样	(8)
一、取样原理	(8)
二、取样保持电路	(12)
三、取样系统的误差	(14)
§ 2 量化理论	(16)
一、均匀量化器	(17)
二、非均匀量化器	(21)
三、非均匀量化器的量化信噪比	(25)
四、折线近似压扩特性	(28)
*五、最佳量化器	(33)
*六、自适应量化器	(35)
§ 3 编译码	(40)
一、编码码型	(40)
二、逐次反馈型编码器	(42)
三、十三折线 A 律 编 码 器	(44)
习 题	(52)
附录 A	(53)
附录 B	(54)
参考文献	(55)

第三章 数字复接原理

§ 1 PCM 的复接原理	(56)
一、为什么要进行数字信号的复接	(56)
二、数字信号的同步和复接	(56)
三、异步复接设备的帧结构	(58)
§ 2 正码速调整式准同步复接器	(60)

一、正码速调整的基本原理和基本关系式·····	(60)
二、码速调整的过渡过程·····	(63)
三、稳定调整过程读写时差的变动范围·····	(65)
四、CCITT 建议·····	(68)
§ 3 正码速调整过程中的抖动分析·····	(69)
一、物理概念·····	(69)
二、抖动峰值的计算·····	(71)
三、抖动的分布·····	(77)
*§ 4 复接抖动的频域分析·····	(79)
一、频谱表达式及其分析·····	(79)
二、复接抖动的功率谱·····	(83)
三、剩余抖动·····	(83)
习 题·····	(84)
参考文献·····	(85)
第四章 中继传输系统	
§ 1 再生中继原理·····	(86)
一、均衡原理·····	(86)
二、再生中继器·····	(92)
§ 2 中继传输系统质量分析·····	(95)
一、信噪比和误码率·····	(95)
二、信道误码对语声质量的影响·····	(96)
§ 3 定时提取及抖动·····	(98)
一、基本概念·····	(98)
二、查普曼 (Chapman) 模型·····	(100)
三、中继链上的输出抖动·····	(101)
习 题·····	(102)
参 考 文 献·····	(103)
第五章 传输码	
§ 1 概 述·····	(104)
一、对传输码的要求·····	(104)
二、传输码功率谱计算的一般方法·····	(105)
§ 2 电缆传输码·····	(108)
一、独立二元码·····	(108)
二、AMI 码·····	(110)
三、HDB ₃ 码·····	(112)
§ 3 光纤通信线路码·····	(114)
一、线路码型概述·····	(114)
二、码型功率谱·····	(119)
*§ 4 分组码功率谱的计算·····	(126)

一、功率谱计算的一般方法	(126)
二、用计算机求功率谱	(139)
三、实例——MS43 码功率谱的计算	(140)
§ 5 码变换电路	(145)
一、mBnB 码编译码器	(145)
二、CMI 码编译码电路	(146)
三、mB1C 码编译码电路	(148)
习 题	(150)
附 录 MS43 码功率谱计算程序	(151)
参 考 文 献	(156)
第六章 PCM 基群设备	
§ 1 设备概况	(157)
一、设备的主要技术性能	(157)
二、帧结构	(158)
三、总体结构	(159)
§ 2 CRC 校验原理	(161)
一、CCITT 有关建议	(161)
二、循环码及 CRC 校验	(162)
三、CRC-4 特性	(167)
§ 3 音频复用系统	(171)
一、音频话路单元	(171)
二、发逻辑与 CRC 编码单元	(177)
三、2M 接口单元	(190)
四、收逻辑单元	(202)
五、收 CRC 单元	(209)
六、64 k 数据接口单元	(218)
§ 4 标志信号系统	(220)
一、接口电路的类型	(222)
二、信号标志编码	(223)
三、适用于局间中继的接口电路	(225)
四、适用于用户环路的接口电路	(226)
五、信令发逻辑单元	(234)
六、信令收逻辑单元	(237)
§ 5 公务系统	(241)
一、监测告警系统	(241)
二、监测单元	(243)
三、总告警电路	(244)
四、业务联络单元	(245)
习 题	(245)

参考文献	(246)
第七章 数字复接设备	
§1 二次群数字复接设备	(248)
一、设备的基本参数	(248)
二、总体结构	(248)
三、设备的主要性能指标	(251)
§2 一跳三数字复接设备	(252)
一、设备概况	(252)
二、34M输出单元	(255)
三、34M复接单元	(255)
四、8M复接定时单元	(262)
五、8M调整单元	(266)
六、34M输入单元	(269)
七、34M分接单元	(271)
八、8M调整分接单元	(277)
九、2M支路	(281)
十、监测告警功能	(281)
习 题	(282)
第八章 数字通信设备的测试与维护	
§1 基群设备主要指标的测试	(284)
一、话路特性指标测试	(284)
二、2048kb/s接口指标测试	(297)
三、信令接口功能测试	(299)
四、告警性能测试	(299)
§2 数字复接设备的指标测试	(299)
一、误码测试	(299)
二、支路输入允许的最大频偏测试	(300)
三、支路输入允许衰减测试	(300)
四、支路输入抖动容限测试	(301)
五、支路输出抖动测试	(301)
六、抖动传递特性测试	(302)
七、支路输入反射衰减测试	(302)
八、支路输入中断时输出比特率测试	(303)
九、输出接口脉冲波形测试	(303)
十、复接器的主振频率测试	(307)
十一、群路输入允许衰减测试	(307)
十二、群路输出抖动测试	(307)
十三、群路输入反射衰减测试	(307)
十四、群路输入最大允许输入抖动测试	(308)

十五、告警性能测试	(308)
§ 3 设备的维护	(309)
一、设备的日常维护	(309)
二、故障的一般判断方法	(310)
三、设备开通的一般步骤	(311)
附 录 常用集成电路的引脚	(312)

第一章 数字通信概述

自远古以来人类就开始以各种手段传递信息（即进行通信），通信是人类进行社交活动的一种手段。随着社会的进步、生产的发展，人们现在已经进入了信息的社会，迫切地要求得到各种高效、高速、高可靠性的通信设备。本书所研究的就是近几十年内发展起来的一种新型的通信方式——数字通信。

数字通信是一种古老而又新型的通信方式。说其古老，是由于它可以追溯到古代战场的烽火狼烟，近代的消息树、灯光报警；说其新型，是由于它是继近代通信（指电信）在模拟通信方式几乎统治了整个通信系统之后提出来的一种全新概念。

§ 1 模拟通信和数字通信

一、电信历史的回顾

早在 19 世纪 30 年代，莫尔斯（Morse）就提出了一个令人瞠目的设想：用导线来传递信息！这在当时的人们看来近乎发疯的设想迈出了电信的第一步，导致了电报的发明。老式的电报通信中，各种信息是用莫尔斯电码发出的。报务员用电键发出长短不同的脉冲给对方，短信号“·”（读作“滴”）占一个单位时间，长信号“—”（读作“嗒”）占三个单位时间。用这些信号的不同组合可以表示出 26 个英文字母和 10 个阿拉伯数字以及各种标点符号。例如：国际通用的船舶失事紧急呼救信号“SOS”，如果用莫尔斯电码发报就是“— — — — —”。

定义：以数字信号携带并传输信息的通信方式叫数字通信。

如果一个信号在时间上是离散的（不连续、有中断），在幅度上也是离散的（仅有有限个特定的幅度值），这个信号就叫做数字信号。显然，莫尔斯电报信号是一种数字信号。由于莫尔斯电报传送的非“·”即“—”，因此，各种能区分“·”和“—”的方法都可以完成“电报”的功能，舰船上用的灯光通信就是一例。

电报的发明和投入实用大大地提高了信息传递的速度，引起了人们的极大兴趣。然而有些人并不以此为满足，着手研究非数字方式的通信技术。其中以亚历山大·G·贝尔（Alexander Graham Bell）的研究成果最为著名，他于 1875 年发明了电话。

电话的发明是电信技术发展过程中的一个重要里程碑。利用电话除了可以进行通话外，还可以从事许多其他的事情。如英国曾建立过音乐电话台，人们可以用电话来聆听音乐。1899 年 5 月，英国女王维多利亚就曾在她的住所用电话欣赏了为庆祝她 80 寿辰而举办的音乐会。无线电广播的出现敲响了音乐电话的丧钟，世界上最后一个音乐电话台于 1938 年停用。

从信号的波形上来看，电报和电话是有区别的，见图 1.1.1。

对于一个信号，可以从时间轴上看其是连续还是离散，也可以从幅度轴上来看其是连续还是离散。这样，我们可以将信号划分为四类：

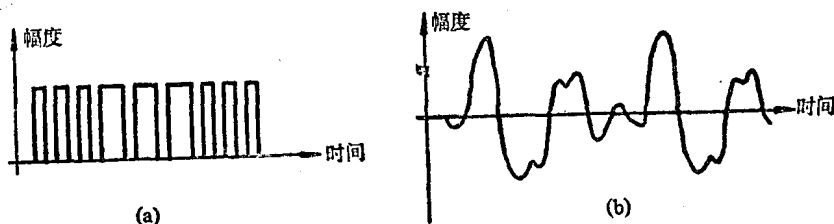


图 1.1.1 电报 (a) 和电话 (b) 信号的波形

- (1) 时间连续、幅度连续信号；
- (2) 时间连续、幅度离散信号；
- (3) 时间离散、幅度连续信号；
- (4) 时间离散、幅度离散信号。

数字信号就是指的最后一种信号，而电话信号是第一种信号，由于它“模拟”了声波压强大小的变化，因此又叫模拟信号。

随着电话（以及交换设备）和大量电子技术的发明，模拟通信得到了迅速的发展。这主要是由于采用了频分多路复用技术（如载波、微波）以及放大、振荡、调制、解调等技术。到了本世纪 70 年代末期，世界上用微波和同轴电缆传输的模拟电话大约有 4 亿 部之多。

二、脉冲编码调制通信

事物的发展往往是“S”形的。尽管本世纪 30 年代模拟通信已经发展到了全盛时期，人们已经深深感受到了模拟通信的好处，然而有人却又开始热衷于数字技术了。A·H·里福斯 (A·H·Reeves) 发明了一种用脉冲的组合来传递信息的新方法——脉冲编码调制 (PCM) 通信。这种方法与电报相比主要有以下不同：首先，它采用二进制数码“1”和“0”来表示信息，对应到信号上，可用“有脉冲”表示“1”，用“无脉冲”表示“0”，而不象莫尔斯电码那样用不同长短的脉冲来区别信号。另外，它可表示一个模拟信号（如语声信号），而莫尔斯电码只能表示各种字符。由于这些区别，用新型的数字通信 (PCM) 方法可以进行语声信号的通信，而老式的电报只能完成电文的传输。

要想用脉冲的组合来完成模拟信号的传输，必须完成三个主要步骤：取样、量化和编码。

1. 取样

模拟信号在时间上是连续的，而数字信号在时间上是离散的。取样的目的是对模拟信号进行时间轴离散化。

对模拟信号进行取样是由取样电路在取样脉冲的控制下周期性地完成（见图 1.1.2）。

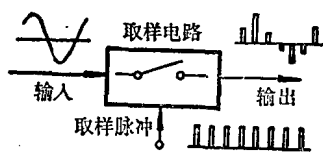


图 1.1.2 取样示意图

相邻两个取样脉冲在时间上的间隔称为取样周期 T_s ，而 $f_s = T_s^{-1}$ 为取样频率。每当取样脉冲到来，开关接通，输出和输入相同。取样脉冲消失后，开关断开，输出为零。为了保证在接收端恢复原模拟信号时不引入过多的失真，对输入信号的频带、取样脉冲的宽度和频率都有一定的要求。取样电路的输出信号称作脉冲幅度调制信号，记为 PAM 信号。将 PAM 信号送入一个低通滤波器即可恢复出原模拟信号。

2. 量化

对模拟信号进行取样后,完成了时间轴的离散化,输出一串幅度随输入信号而变的脉冲串。但这时的信号仍为模拟信号,因为取样电路输出的幅度可为信号动态范围内的任意值,换句话说,PAM信号的概率密度函数仍然和输入端的模拟信号一样,是一条连续曲线。量化电路的功能在于将幅度为连续的信号,利用类似于“四舍五入”的方法将取样电路输出的信号在幅度上分档,见图1.1.3。

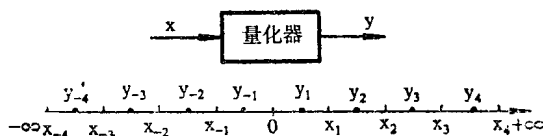


图 1.1.3 量化示意图

当量化器的输入信号幅度落在 $0 \sim x_1$ 之间时,输出值为 y_1 ; 输入信号幅度位于 $x_1 \sim x_2$ 之间时,输出为 y_2 ; 当信号幅度位于 $x_{-1} \sim 0$ 之间时,输出为 y_{-1} ; 以此类推。这样一来,幅度在 $x_{-4} \sim x_4$ 之间连续取值的信号就变得只有 $y_{-4} \sim y_4$ 这8个离散幅度值的信号了。从输出信号的概率分布来看,显然是离散的。由于输入的PAM信号在时间上是离散的,经量化处理后幅度上也成了离散的,因此,量化器输出的信号是时间上和幅度上都离散的信号。这个信号仍叫PAM信号,但它和取样电路输出的PAM信号不同,后者是模拟信号。信号经量化后将产生幅度上的失真,这种失真的大小直接取决于量化器的分层情况。

3. 编码

要想用脉冲的组合来传输信号,亦即用“0”和“1”两种脉码的不同组合来表示信号,必须对量化器输出的各个幅度值分别赋予一定的代码。对于二进制代码来说,一位码可以表示两种不同的信号,两位码可以表示四种, n 位码可以表示 2^n 种。在图1.1.3中,量化器输出的信号共有8种不同的幅度,需要用3位二进制码来表示。如对于 y_{-4} 、 y_{-3} 、 $\dots$ 、 y_3 、 y_4 这8个离散的幅度值,分别用000、001、 $\dots$ 、110、111来代表,这一步骤叫编码,此时得到的信号叫做编码数字信号(简称数字信号)。对模拟信号进行了取样、量化和编码之后,原模拟信号的信息就由编码数字信号所携带,相当于将原模拟信号“调制”到了脉码上,故这种数字通信方法叫做脉冲编码调制(Pulse Code Modulation)通信,简称PCM。在接收端,将代码还原为样值(即还原成PAM信号),这一步骤叫译码。

取样、量化、编码这三个步骤完成的是由模拟信号到编码数字信号的变换,统称为模/数变换(A/D变换)。在接收端要将编码数字信号经过译码、滤波等手段实现由数字信号到模拟信号的变换,叫做数/模变换(D/A变换)。

三、数字信号的多路复用

在PCM通信方式投入实用之前,人们对模拟通信是十分感兴趣的,这主要是因为它可以利用频率搬移的方法实现多路通信(即在一对线路上传送多路电话信号),从而提高了线路的利用率,扩大了通信容量。那么,数字通信能否实现多路通信呢?

实现多路通信的前提之一就是要保证各路的信息不致混淆到一起。模拟信号的信息包含

在其波形中，同时，从频率域的角度来看，信息包含在信号的频谱中。对模拟信号进行多路化传输时，各路信号分别用不同的载频对信号进行调制，实现了对信号频谱的搬移。只要各路信号都是带限的，且各载频之间的频率差足够大，调制后各路信号的频谱就不会重叠。在接收端用锐截止的带通滤波器对多路信号进行分路，然后分别进行解调就可以还原成原始信号。

图 1.1.4 为载波通信的示意图。

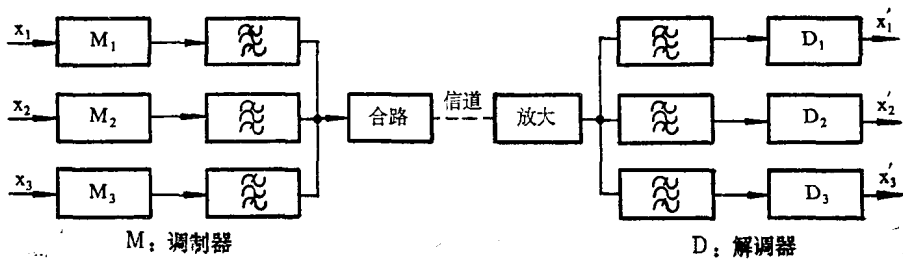


图 1.1.4 载波多路通信原理框图

尽管在整个传输过程中信号的频谱经过多次搬移，并采用了单边带传输技术，但接收端仍然可以恢复出信号的频谱。由傅里叶变换的唯一性可知，频谱相同的信号波形也是一样的，因此，在接收端恢复了信号的波形，从而完成了多路通信。

由于我们用脉冲的“有”和“无”来代表数码“1”和“0”，显然，仅从判断“1”和“0”来看，它与脉冲的形状、高低、宽窄都是无关的。只要在某一时刻能判断出脉冲是“有”还是“无”，就可以得到正确的信息。可见，编码数字信号的信息包含在脉冲的有、无之中。这样，我们可以将编码数字信号的脉冲宽度进行压缩，并将各路信号脉冲依次沿时间轴排开，就能实现数字信号的多路复用传输。

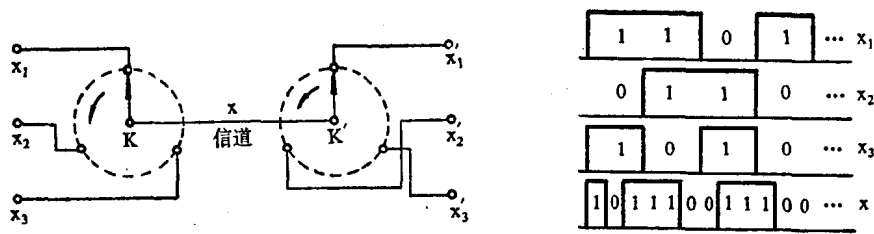


图 1.1.5 数字信号多路复用示意图

图 1.1.5 为数字信号多路传输示意图。发、收两端的开关 K 和 K' 作同步逆时针旋转，旋转周期与支路信号的码元周期相等。例如：在某一段时间内， x_1 、 x_2 、 x_3 的码元分别为 1、0、1，经开关 K 旋转后，该时间内信道 X 上出现的是三个码元：1 0 1，每个码的持续时间为原支路码元持续时间的三分之一。接收端经过开关 K' 的旋转之后，这三个码元又分别送到三个支路， x'_1 、 x'_2 和 x'_3 上分别得到了 1、0、1，但持续时间为发端的三分之一（由于正确地收到了码元，信息并没有丢失）。接收端可将脉冲展宽，经译码、滤波后就可恢复出原模拟信号。如果将开关的触点增多，则复用的路数就可以增加。在实际设备中，K 和 K' 是由电子开关实现的，而发、收端的同步工作是靠各种同步和定时信号完成的。

§ 2 数字通信的特点

一、主要优点

1. 抗干扰能力强

电信号在传输过程中要受到各种噪声的干扰。对模拟信号来说,噪声是迭加在信号波形上的,噪声和信号难以分开。数字通信系统传输的是二进制数字信号,其信息不是包含在脉冲的波形之中而是包含在脉冲的有、无之中。只有当噪声在判决时刻超过某个门限时,才有可能改变信号的值(即造成误判决)。因此,数字信号比模拟信号抗干扰能力强。此外,数字信号可以进行抗干扰编码(纠错编码),从而,进一步提高其可靠性。

2. 可采用再生中继实现远距离传输

模拟信号在远距离传输时,一方面要受到噪声的干扰,另一方面又要受到信道的衰减。传输距离越长衰减越大;噪声干扰越大,信噪比就越低。这样,通信距离就会受到限制。为了增加传输距离,必须每隔一定的距离对已被衰减和附有噪声的信号进行适当处理,即加设增音设备把从线路上收到的信号加以放大后再传往下一站。增音机除了将信号放大外,附加在信号上的噪声也被同等放大。由于噪声是迭加在信号上的,所以无法将信号和噪声分开,如图 1.2.1 所示。随着传输距离的增加,信噪比越来越低。要使通信质量得以改善,就必须采取其他措施,这样会增加设备的制造难度和成本。

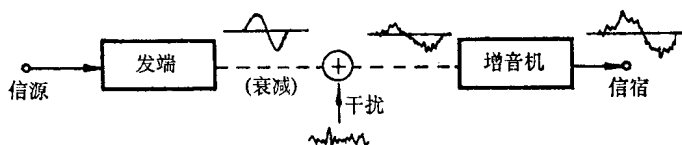


图 1.2.1 信道对模拟信号的干扰

数字通信系统则不然。它传送的是二进制信号,在传输过程中可以采用再生中继的方式,把信号在两个中继站之间传输过程中受到的噪声干扰加以消除,再生出没有噪声干扰的“干净”的脉冲波形,然后再送到下一站去,其原理如图 1.2.2 所示。由于二进制数字信号只有两种状态,即“1”和“0”,尽管它在信道中受到噪声干扰,但当它进入再生中继器里的幅度识别电路进行判决时,只要其幅度超过规定接收电平值的一半,就判决为“1”,否则判决为“0”。这样,从幅度识别电路输出的再生后的脉冲就消除了噪声的干扰。在理想情况下,噪声可被全部消除,因此不会产生噪声的积累。正因为数字信号可以再生,所以在远距离传输时,可以经过多次再生中继,这样就不会因传输距离的增加而降低通信质量。

3. 灵活性强、能适应各种业务要求

在数字通信中,各种消息(电报、电话、图像和数据等)都可以变换为统一的二进制数字信

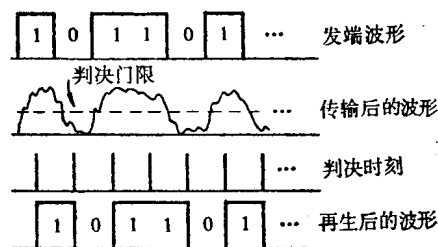


图 1.2.2 波形的再生

号进行传输。数字信号的传输可以与电子时分交换技术结合起来，组成统一的自动化综合业务数字网（ISDN）。综合业务数字网对来自不同信源的信号自动地进行交换、综合、传输、处理、存贮和分离，这会给实际应用带来极大的便利。

4. 便于与计算机联接

由于数字通信中的二进制数字信号与数字电子计算机所采用的数字信号完全一致，所以数字通信线路可以很方便地与计算机接口，实现复杂的远距离大规模自动控制系统和自动数据处理系统，实现以计算机为中心的自动交换通信网。

5. 数字信号易于加密

数字通信易于加密，加密电路采用简单的逻辑运算即可实现。

设 x 为编码数字信号， y 为密码（这里设为周期性的 1 1 0 0 0 0 1 0 1 1 脉冲）。将信码 x 和密码 y 按位进行模二加（即异或运算），输出的信号 z 就是已经加了密的脉冲。设某一段信号 x 为 1 0 1 1 0 1 0 0 1 1，根据异或运算规则（式中“ $\oplus$ ”代表异或运算符号）：

$$1 \oplus 1 = 0, 1 \oplus 0 = 1, 0 \oplus 1 = 1, 0 \oplus 0 = 0$$

传向信道的脉冲信号 z 为

$$\begin{aligned} z &= x \oplus y \\ &= 1 \ 0 \ 1 \ 1 \ 0 \ 1 \ 0 \ 0 \ 1 \ 1 \oplus 1 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 1 \ 0 \ 1 \ 1 \\ &= 0 \ 1 \ 1 \ 1 \ 0 \ 1 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0 \end{aligned}$$

与 x 相比， z 已经变得面目全非了。如果不知道密码 y ，就无法由 z 还原为 x 。但收、发双方事先是知道密码的，在接收端将 z 信号与密码再进行一次异或运算就可以还原为 x ：

$$\begin{aligned} z \oplus y &= (x \oplus y) \oplus y = x \oplus (y \oplus y) \\ &= x \oplus 0 = x \end{aligned}$$

由于密码是通信双方内定的，并且还可以根据需要进行随时更改，所以数字通信方式可为需要进行保密通信的用户提供很方便的服务。

6. 适于集成化

数字电路比模拟电路容易集成化，因此，数字通信设备可以采用中、大规模甚至超大规模集成电路制成体积小、功耗低、成本低、可靠性高的设备。

二、主要缺点

1. 占用频带宽

数字信号抗干扰能力强，具有较高的传输质量，但这一优点是以占用较宽的信道频带换来的。以数字电话为例，取样频率为 8kHz，8 比特编码，一个话路的数码率为

$$\begin{aligned} f_b &= 8\text{kHz} \times 8\text{b} \\ &= 64\text{kb/s (千比特/秒)} \end{aligned}$$

即使在理想情况下利用基带传输技术，根据奈奎斯特准则（见第四章），传送这样数码率的信号所需带宽至少要 32kHz，而一个模拟话路所占带宽仅为 4kHz。可见，同样是传送一路电话，数字信号所需带宽远比模拟信号的宽。但是，随着新的宽带传输媒介（如光纤）和频带压缩编码技术（如 ADPCM）的实用，数字通信占用频带的问题可以逐步得到解决。

2. 对元器件的依赖性较强

数字通信作为一种新型的通信手段，早在本世纪30年代就已经提出来了，但真正进入实用领域，是在50年代末期随着晶体管和集成电路的发明才开始的。现代的数字技术是以集成电路技术为基础的，数字设备要求在具有中、大规模集成电路元件的条件下，才能在设备的体积、功耗、可靠性和经济性等方面与已经发展得十分完善的模拟通信系统竞争。许多新近提出的新型数字通信方案因为暂时没有合用的高速数字信号处理器（DSP）而迟迟不能投入实用。

总而言之，数字通信的优点较多，是通信技术发展的必然方向。但由于历史的原因，模拟通信在技术上已相当成熟，所以目前国内外主要的通信任务仍由模拟通信系统承担。虽然现在已不同程度地向数字通信方式过渡，但可以预见，在相当长的时期内，必然是模拟通信系统和数字通信系统并存，这就提出了一个解决两种通信制式的兼容以便能够相互转换的问题。现在国际上正在普遍开展研制的时分多路/频分多路（TDM/FDM）复用转换设备便是兼容方案中较好的一种，我国也在积极开展这方面的研究。

思考题

1. 何为模拟通信？何为数字通信？两者的主要区别是什么？
2. 实现PCM通信的三大步骤是什么？它们各完成什么功能？
3. 如何判断一个信号在幅度轴上的分布是连续的还是离散的？
4. PAM信号的信息包含在什么地方？为什么人们不直接传输PAM信号而要转换成PCM信号后再进行传输？

第二章 模拟信号的数字化

§ 1 模拟信号的取样

一、取样原理

1. 从放电影说起

对于初学数字通信课程的读者来说, 往往会产生这样的疑问: 一个时间上连续的信号经过取样之后已经变成了一个个的离散样值, 在经过量化、编码、传输、译码后, 接收端还能够还原成原来的时间上连续的模拟信号吗?

先举一个放电影的例子。自然界中大量连续运动的物体经过摄影机的拍摄(相当于取样)后成为一张张“离散”的影片。在放映时, 由于人眼睛的暂留效应对光线的变化具有低通特性(人眼对缓慢变化的光线可以察觉到, 而对迅速变化的光线则无法察觉其变化), 光线的暂时中断被人眼“自动地”连接上了。因此, 银幕上所看到的画面就是一个连续动作的图像。要使“离散”的图像被人眼“平滑”成连续动作的图像, 要求摄影机在单位时间内能拍摄出足够多的画面(即取样频率要足够高)。如果摄影机在单位时间内拍摄的画面数不够, 放映时看到的画面动作就有跳动感而不是连续的动作(早期的电影即是如此), 这时就产生了画面失真。

对模拟信号进行取样和拍摄电影一样, 也有一个取样频率的问题。当取样频率足够高时, 接收端利用一个低通滤波器即可恢复出原信号, 而取样频率不够高时就会产生波形失真。

在图 2.1.1(a) 中, 取样频率很高, 将模拟信号迅速变化部分都采集到了, 得到了一串高、低不等但反映了模拟信号瞬时幅度变化情况的脉冲串(即 PAM 信号), 经过低通滤波器进行平滑并放大后可恢复出原信号。在 (b) 图中, 取样频率不够高, 没有反映出信号的实际变化, 虽经过低通滤波器平滑并放大, 得到的波形仍有较大的失真。

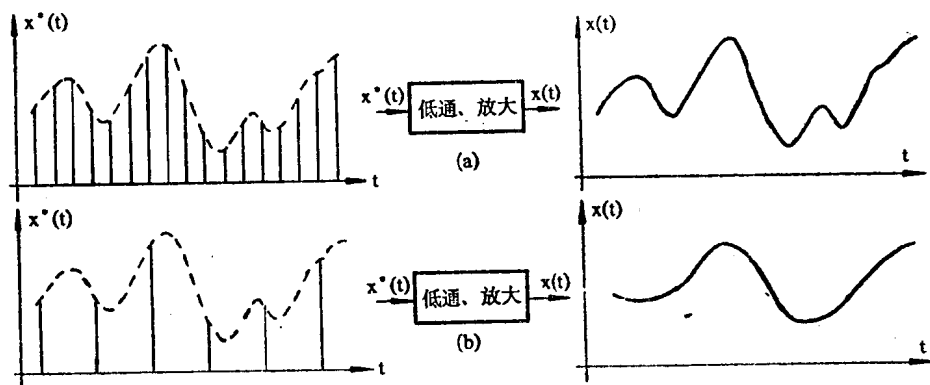


图 2.1.1 取样频率和波形恢复示意图