

21 世纪电子电气工程师系列

# 数字调制解调 基础

双色

〔日〕关 清三 著

ART 21  
电子电气工程师

5.05

科学出版社

OHM 社

**图字:01-2002-0923 号**

Original Japanese edition

Wakariyasui Digital Henfukuchou no Kiso

By Seizou Seki

Copyright © 2001 by Seizou Seki

Published by Ohmsha, Ltd.

This Chinese language edition is co-published by Ohmsha, Ltd. and Science Press

Copyright © 2002

All rights reserved

本书中文版版权为科学出版社和 OHM 社所共有

わかりやすい

**デジタル変復調の基礎**

関 清三 オーム社 2001

**图书在版编目(CIP)数据**

数字调制解调基础/(日)关 清三著;崔炳哲,张岩译. —北京:科学出版社,2002  
(21世纪电子电气工程师系列)

ISBN 7-03-010265-7

I. 数… II. ①关… ②崔… ③张… III. 调制解调器-基本知识  
IV. TN915.05

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2002)第 015352 号

**北京东方科龙图文有限公司 制作**

<http://www.okbook.com.cn>

**科学出版社 OHM 社 出版**

北京东黄城根北街 16 号 邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

**中国科学院印刷厂 印刷**

科学出版社发行 各地新华书店经销

2002 年 6 月第 一 版 开本: A5(890×1240)

2002 年 6 月第一次印刷 印张: 6 1/2

印数: 1—5 000 字数: 201 000

**定 价: 16.50 元**

(如有印装质量问题,我社负责调换〈新欣〉)

# 前 言

已进入 21 世纪的今天,信息通信给人们的生活带来了极大的方便,而且 IT(information technology)这一词在社会生活舞台上也起到了主角的作用。走在大街小巷,随处可见手里拿着各式各样、各种品牌移动电话的年轻人的身影,移动电话的数量已远远超过了传统的固定电话。它的普及逐步实现着“无论何时、何地,与谁都能通信”的最终目标。移动电话属于无线通信,它能传输话音、图像及数据。现在,移动电话等多媒体通信技术,以惊人的速度向前发展。

各种各样的信息多采用数字信号传输,这已成为了通信的基础。目前,世界各国已在组建综合业务数字网(ISPN:integrated services digital network),这是一种将话音、图像、数据等各种信息规范为数字信号的形式,并进行高速传输的网络。

但是,把信号传输到远方的媒介是电磁波。众所周知,光是电磁波之一,这种传输信号的媒介称为载波。在数字通信过程中,发送端往往把所要传输的信息用载波向远方传输,然后由接收端把有用的信息从载波中分离出来,即恢复原来的数字信息。这就说明,传输数字信号时需要“把信号搭载在载波的技术”和“把信号从载波中分离恢复原状的技术”。我们把前者称为调制技术,而把后者称为解调技术。

作为载波的电磁波中,振幅、相位、频率等成为了调制的对象。追溯历史可见,最初采用的是最简单的振幅调制(调幅)方式,然后相继出现了以频率、相位等作为调制对象的技术。这些技术在一定时期多样化发展,直到出现现在的调制解调技术。调制解调技术之所以能够高速发展,其中以 LSI 为代表的半导体技术的发展起到了重大的作用。

本书将介绍振幅、相位、频率的调制技术,或者由它们组合的各种调制解调技术的基本知识。主要讲解各种调制解调的原理,关于在实际通信系统中必须要考虑的带宽限制或失真等主要因数的影响,只介绍相关的基本知识。如果本书有助于读者了解“什么是数字调制解调技术”,并能理解其

机理,我将感到欣慰。在调制解调技术起到越来越重要作用的 IT 社会中,更深入地理解调制解调技术及其基本原理对那些工作在第一线的工程技术人员来说是非常必要的。如果非专业的技术人员也能通过本书受益,我感到高兴。

最后,在本书将要出版之际,谨向在本课题研究过程中给与指导的宫内洋一博士及 OHM 社出版部的各位,表示衷心的感谢。

关 清三

# 目 录



## 第 1 章 概 述

1.1	载波通信和无线通信的发展 .....	1
1.1.1	通信与电磁波 .....	1
1.1.2	电磁波的发现与无线通信 .....	2
1.1.3	电报信号的多路化 .....	3
1.1.4	无线通信的发展历程 .....	4
1.2	PCM 的基础 .....	6
1.2.1	PCM 信号通信 .....	6
1.2.2	模拟信号的编码 .....	7
1.2.3	噪声与误码 .....	9
1.2.4	频谱与采样原理 .....	11
1.2.5	主要基本信号的傅里叶变换 .....	13
1.2.6	带 宽 .....	19
	练 习 题 .....	20

## 第 2 章 振幅调制方式

2.1	调制原理 .....	21
2.2	信号空间 .....	22
2.2.1	载波信号的表示 .....	22
2.2.2	ASK 方式的信号空间图 .....	24
2.3	谱 宽 .....	24
2.4	调制电路 .....	27
2.5	解调原理 .....	29

2.5.1	包络检波解调	29
2.5.2	同步检波解调	30
2.6	误码率的特性	31
2.6.1	通信质量的概念	31
2.6.2	检波输出的概率密度分布	32
2.6.3	误码率特性	35
	练习题	38

## 第3章 二相调制方式

3.1	调制原理	39
3.2	信号谱宽	41
3.3	调制电路	43
3.3.1	反射式 2-ASK 调制电路和通过式 2-ASK 调制电路	43
3.3.2	环形调制器	44
3.4	解调方法(1)——同步检波方式	46
3.4.1	载波再生方法	48
3.4.2	同步检波解调	52
3.5	解调方式(2)——延迟检波方式	54
3.6	误码率特性	57
3.6.1	同步检波方式	58
3.6.2	延迟检波方式	61
	练习题	64

## 第4章 四相调制方式

4.1	调制原理	65
4.2	信号空间图	68
4.3	谱宽	69
4.4	调制电路	71

4.4.1	级联型	71
4.4.2	并联型	72
4.5	解调方法(1)——同步检波方式	73
4.5.1	级联型	74
4.5.2	并联型	76
4.6	解调方法(2)——延迟检波方式	77
4.6.1	延迟检波方式解调的基本电路构成	78
4.6.2	延迟检波方式解调的原理	78
4.6.3	正确信息信号的解调方法	84
4.7	误码率特性	90
4.7.1	同步检波方式解调中的误码率特性	90
4.7.2	延迟检波方式解调中的误码率特性	96
	练习题	101

## 第5章 频率变化的利用

5.1	FM 和 FSK	103
5.2	调制原理	104
5.3	信号空间与谱宽	105
5.4	解调方法	108
5.4.1	频率检测——频率检波	108
5.4.2	相位差检测——延迟检波	110
5.4.3	相位检测——同步检波	111
5.5	MSK 方式	112
5.6	GMSK 方式	116
5.7	波形窗产生的 MSK 信号	118
5.7.1	QPSK 和 OQPSK	118
5.7.2	频带限制时的 QPSK 和 OQPSK 的同步检波 眼图	120
5.7.3	MSK 信号的频谱	122
	练习题	124

## 第 6 章 多值调制方式

6.1	八相调制方式——8-PSK	125
6.1.1	信号空间图与信号间的距离	125
6.1.2	利用自然二进制的 8-PSK 调制与解调	129
6.1.3	利用格雷编码的 8-PSK 调制电路	134
6.1.4	对格雷编码 8-PSK 方式的解调电路	137
6.1.5	8-PSK 传输时同步检波方式解调中的误码率特性	141
6.2	十六相调制方式——16-PSK	144
6.3	振幅相位调制方式 (APSK/QAM 方式)	147
6.3.1	基本传输信号的产生方法——正交振幅的调制与合成	147
6.3.2	产生 16 值 APSK(16 值 QAM)信号的其他方法——叠加调制方式	149
6.3.3	16 值 APSK(16 值 QAM)方式的传输特性	153
6.3.4	理想的 APSK 信号	153
	练习题	155

## 第 7 章 数字调制解调的实际应用

7.1	传真通信中的传输	157
7.2	数字微波传输方式	158
7.2.1	ISDN 和数字微波	158
7.2.2	在数字电路中产生中频信号的技术	160
7.3	移动通信	162
7.3.1	移动通信的外部条件	162
7.3.2	移动通信中使用的调制解调方式	165
7.3.3	ISDN 的一部分——SS-CDMA	167
7.4	OFDM 调制解调方式	169
7.4.1	多重载波调制的概念	169



7.4.2 OFDM收发信号 .....	170
7.4.3 OFDM传输方式的基本构成 .....	171
7.4.4 传输信号的频谱 .....	172

附 录 .....	175
参考文献 .....	181
练习题解答 .....	183

# 第 1 章 概 述

所谓调制解调,就是同时使用“调制”和“解调”时的简称。要进行调制解调需要载波即电磁波。数字调制解调中的数字,指的是要进行调制的信号或者调制后要传输的信号种类等。本书中提到的数字信号是用“1”或“0”表示的两种状态的信号。

本章首先简单回顾利用电磁波的通信技术的发展史,然后讲解作为数字信号传输基础的 PCM(pulse code modulation)通信原理中的几点重要事项。

要进行数字调制解调必须具备两个条件:其一,要有传输的数字信号;其二,要有能搭载数字信号的电磁波即载波。通过两个条件完成的就是调制及解调,即调制解调。

## 1.1 载波通信和无线通信的发展

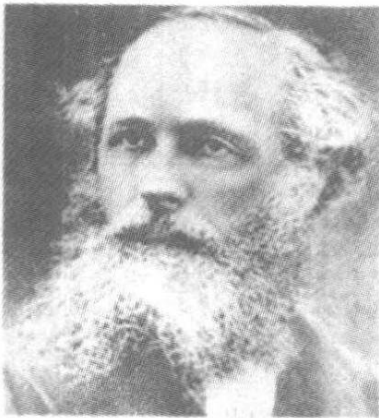
### 1.1.1 通信与电磁波

很久以前人类就有了一个梦想,即把信号传输到很远的地方。已进入高科技时代的当今,除了发展迅猛的移动电话技术、像蜘蛛网似的覆盖全球的微波电路以外,还有电视、广播、业余无线电、航海专用无线电、警察专用无线电、飞机与地面联络用无线电等。另外,最近为了与移动通信卫星、宇宙飞船联络,在地球上或宇宙空间电磁波(electromagnetic wave)纵横交错。电磁波不仅在空间,也能在两根铜线(裸线、双股电缆、四心线绕组电缆等)、同轴电缆或光纤等中传输,其中有的则埋在了地下。

下面,简单回顾一下电磁波被应用于通信领域的原委,并简单介绍一下数字调制解调的意义。

## 1.1.2 电磁波的发现与无线通信

麦克斯韦(J. C. Maxwell, 1831~1879年)于1864年在理论上证明了电磁波的存在,这是世界科学技术史上一次重大的发现。他证明:一种电能在空间通过产生电与磁的相互作用而存在,或者传播。麦克斯韦在这之前认为“电场(E)”与“磁场(H)”是互不相干的概念,但是后来借助时间变化的概念,从电场与磁场相互作用的概念,在理论上证明了电磁波的存在。众所周知,光也属于电磁波。电磁波的存在是由赫兹(H. Hertz, 1857~1894年)通过实验证明的。因为当时实验时的电磁波发生源是火花放电装置,所以谁也没有想到电磁波会被应用于今后的通信领域中。要把电磁波用于通信,不仅需要其发生装置,而且还需要检测装置即**检波器**。最初,为了检测电磁波,法国人布朗利(Edouard Branly, 1844~1940年)制造出了金属检波器。这是一种在带有电极的管上涂敷金属粉末的装置,它是利用当导通高频电流,装置的电阻就会减小的原理制成的。



麦克斯韦(1831~1879年)



赫兹(1857~1894年)



马可尼(1874~1937年)

图 1.1 初期电磁波的开拓者

1895年,马可尼(G. Marconi)最先进行了把电磁波用于通信的实验。虽然当时使用的是电报信号,但是从现在的技术角度来说那就是数字通信实验。1901年,马可尼终于做成功了穿越大西洋的通信实验。按当时的科学技术来说,真可谓是伟大的创举。后来人们又发明了晶体检波器,这使电磁波的检测技术提高了一个台阶;1906年,美国人D. 福雷斯特(de Forest, 1873~1961年)发明了三极管,因此电磁波的产生变得更加容易了。

通信领域中采用电磁波的开初,在相当长的时期内利用的电报信号是数字信号。在马可尼时代所产生的电磁波类似于噪声(以光为例,因为颜色较杂,所以呈白色),因此,在当时以电磁波的有无,即以 ON/OFF 两种状态的形式传输信号。这就相当于下一章将要介绍的**振幅调制(调幅)(ASK: amplitude shift keying)方式**。

自从三极真空管问世之后,因为可以把一定频率的信号自由地且稳定地振荡(以光为例,类似蓝色、绿色等单色光),所以出现了新的信号传输方式,即事先准备好两种不同频率振荡的信号,再把这两种信号对应于数字信号“1”、“0”,以频率变化的信号作为传输信号。这就是在第 5 章中要介绍的**频率调制(调频)(FSK: frequency shift keying)方式**。后来,利用电磁波的通信技术发展迅速,马可尼也以“无线电报的发明者”而闻名于世。

如果说当初无线通信最能发挥其威力,应该是在海上交通。在远古时代,海上的船只与陆地、船与船之间无任何通信手段,无线电报的发明给海上交通带来了极大的方便。岛屿国家的日本,于 1897 年(明治 30 年)在月岛海岸成功地进行了船舶无线电报实验,后来作为船舶通信的主要手段发挥了重要作用。

### 1.1.3 电报信号的多路化

利用高频电波的通信,不仅充分利用了宇宙空间,而且利用了最早期采用的最基本的、用于传输电报信号的铜线方式。20 世纪 20 年代发明的载波传输方式取代了控制直流电流(ON/OFF)传输“1”、“0”信号的传输方式,这种方式是对某种频率波(称为**载波**)进行调制后通过铜线传输。因为此时载波中不含直流成分,所以利用这种方法可以提供电能,或者不受直流成分不稳定而带来的影响。此外,如果巧妙地利用载波频率,一对铜线可同时传输数个信道的电报信号,即可以实现**多路化**[1874 年,爱迪生(Edison)发明了四路电信法]。后来贝尔(A. G. Bell)受到电报信号的多路化的启示发明了电话传输。

在第 3、4 章中将详细介绍相位调制方式,由于载波的相位( $0$ 、 $\pi$  两相或  $0$ 、 $\pi/2$ 、 $\pi$ 、 $3\pi/2$  等四相)变化对应于数字信号“0”、“1”,因此,用一种频率可传输 2 路或 3 路信号。这就相当于**相位调制(调相)(PSK: phase shift keying)方式**。在日本,吉田五郎博士率先进行了四相调制(4-PSK 方式,同时可以传输 2 位数编码的数字信号),八相调制(8-PSK 方式,同时可以传输 3 位数编码的数字信号),十六相调制(16-PSK 方式,同时可以传输 4 位数编码的

数字信号)的实用化研究。他的研究是在战争时期(20世纪40年代)进行的,在当时环境下进行十六相调制电报技术的实用化研究真是不可思议的事情。

图 1.2 所示为吉田五郎博士成功地实现十六相调制实用化时的电路构成。

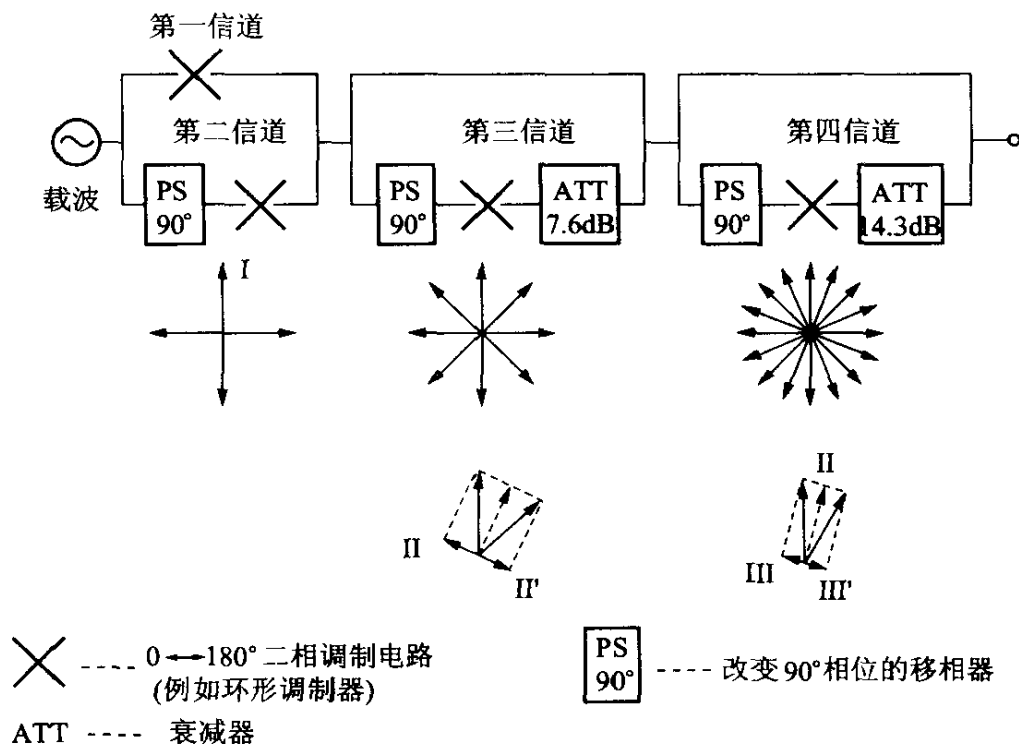


图 1.2 四路电报法中采用的发送电路(十六相调制方式的发送电路,1941年)  
 通过由环形调制器等形成的  $0 \leftrightarrow 180^\circ$  二相调制电路和  $90^\circ$  移相器产生四相调制波(由此波传输第一信道与第二信道的信号)。其次,以此波(I)为基准做出相位差  $90^\circ$ 、振幅低 7.6dB 且由第三信道产生  $0 \leftrightarrow 180^\circ$  相位相反的信号(II, II'), 然后与四相调制波相加得到相位差  $45^\circ$  的信号,即八相调制波。再其次,以八相调制波为基础做出相位差  $90^\circ$ 、振幅低 14.3dB 且由第四信道产生  $0 \leftrightarrow 180^\circ$  相位相反的信号(III, III')后,与八相调制波合成得到相位差  $22.5^\circ$  的信号,即十六相调制波。

## 1.1.4 无线通信的发展历程

在无线传输或者载波传输初期,电报信号的传输就是数字信号传输。因为当时的调制解调设备的性能不够完善,所以如实地传输声音或图像等的模拟信号非常困难。

现在可以称得上进入数字通信时代。这就意味着把声音、图像等模拟信号,可以通过电子、半导体等器件进行数字化,然后再与数据信号一起同时传输。因为可以把声音、图像、数据等不同性质的信号转换成数字信号,所以将丰富多彩的信息通过一种通信网络来处理也成为了可能,即可以提供经济性的服务。这种网络称为综合业务数字网(ISDN:integrated services digital network)。

这样,在无线通信或载波通信时期,由于技术的原因数字信号通信先行,而通信技术高度发达的今天,以经济性、服务多样性为中心又迎来了数字通信全盛时代。这里讲到的数字调制解调是收发信号的基本技术,也是非常重要的技术。

图 1.3 所示为在通信技术从无到有过程中所发生的重要事件。

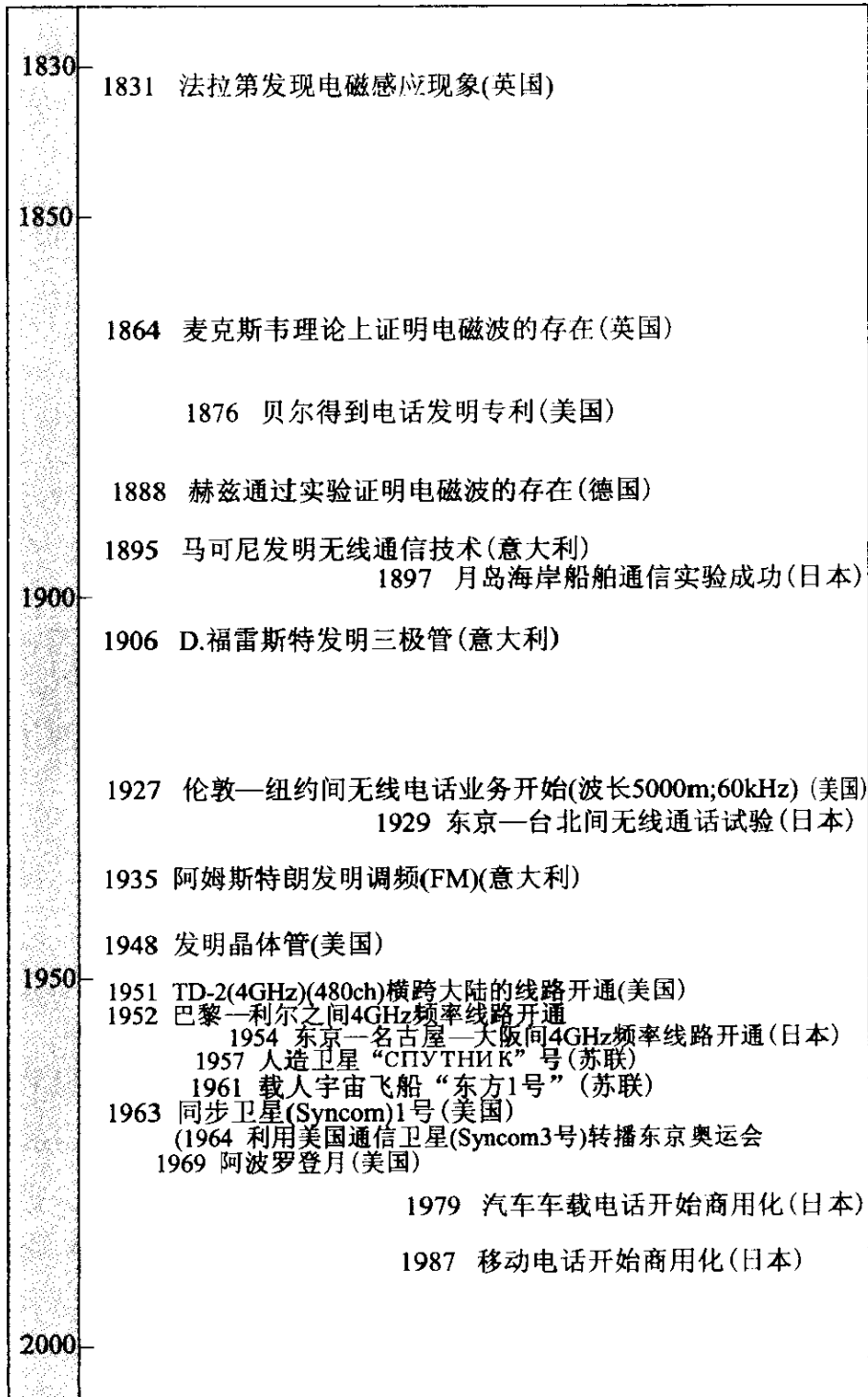


图 1.3 无线通信的发展历程

## 1.2 PCM 的基础

### 1.2.1 PCM 信号通信

PCM 是 pulse code modulation 的缩略语,是把声音、图像等模拟信号转换成“1”、“0”数字信号的脉冲编码调制技术。利用 PCM 信号进行通信是在前一节中讲到的数字通信的基础。在本节介绍 PCM 基础知识,这有助于理解后面要讲解的数字通信。图1.4所示的是PCM信号通信的基本

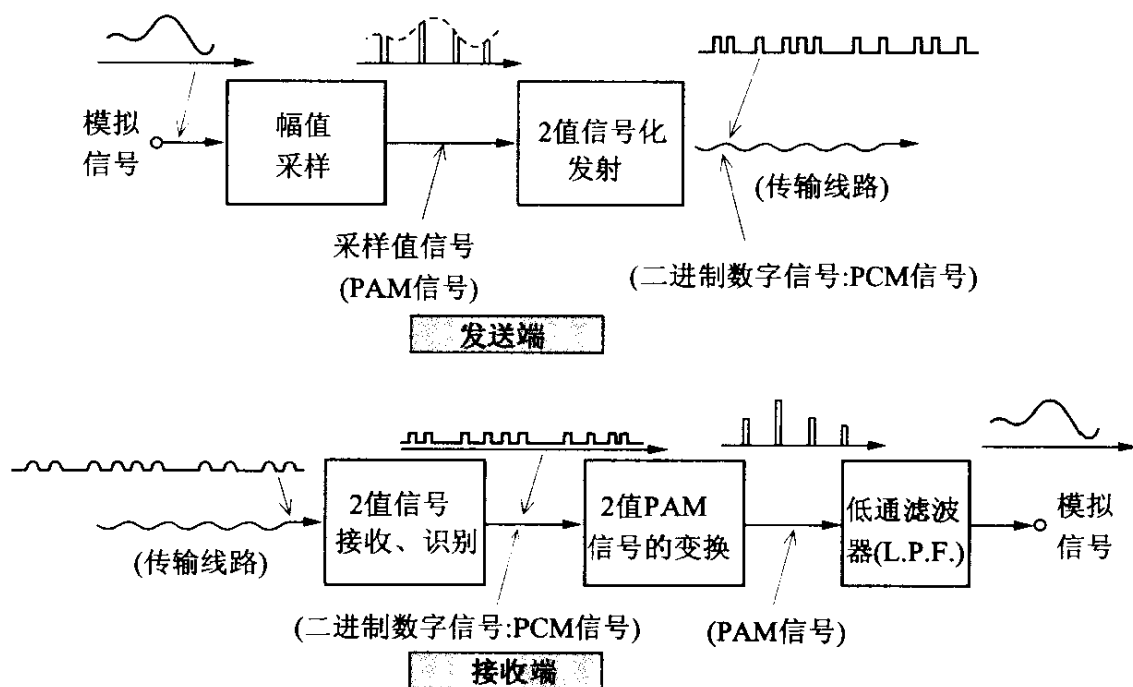


图 1.4 PCM 信号通信的基本构成

构成,对其要点作如下说明。

首先,发送端每一定周期对声音、图像等模拟信号进行采样。结果得到的脉冲幅度调制信号(PAM信号:pulse amplitude modulation signal)成为脉冲幅度大小正比于模拟信号电平高低的脉冲序列。其次,把各个脉冲幅度转换成二进制数,变成“1”、“0”形式的脉冲序列。例如,若脉冲幅度为5,则以“101”形式进行编码;若脉冲幅度为3,则以“011”形式进行编码。就这样,传输线路上传输“1”、“0”编码的脉冲序列。

因为信号在传输过程中受到失真或噪声的干扰,接收端收到的是无规则的波形。于是需要对接收到的信号进行是“1”还是“0”的识别判断。由此

得到与传输时相同的“1”、“0”信号序列,然后以这信号序列为基础形成 PCM 信号。即传输的信号为“101”时,其脉冲幅度为 5;传输信号为“011”时,其脉冲幅度为 3……最后把 PAM 信号通过低通滤波器(L. P. F.)得到与原来模拟信号一模一样的信号。

## 1.2.2 模拟信号的编码

在前一节已介绍了在 PCM 传输过程中,发送端和接收端各自的基本功能。

下面,参照图 1.5 详细说明模拟信号与数字信号之间的关系。以时间间隔  $T$  采样的原模拟信号,如图 1.5(a)所示。图中可以看到  $t_1$  时刻采样的值为 +3[单位是毫伏(mV)或毫安(mA),但在这里单位是没有特殊意义的], $t_2$ 时刻为 +6, $t_3$ 时刻为 +1, $t_4$ 时刻为 -7,……。在发送端对这些采样值进行

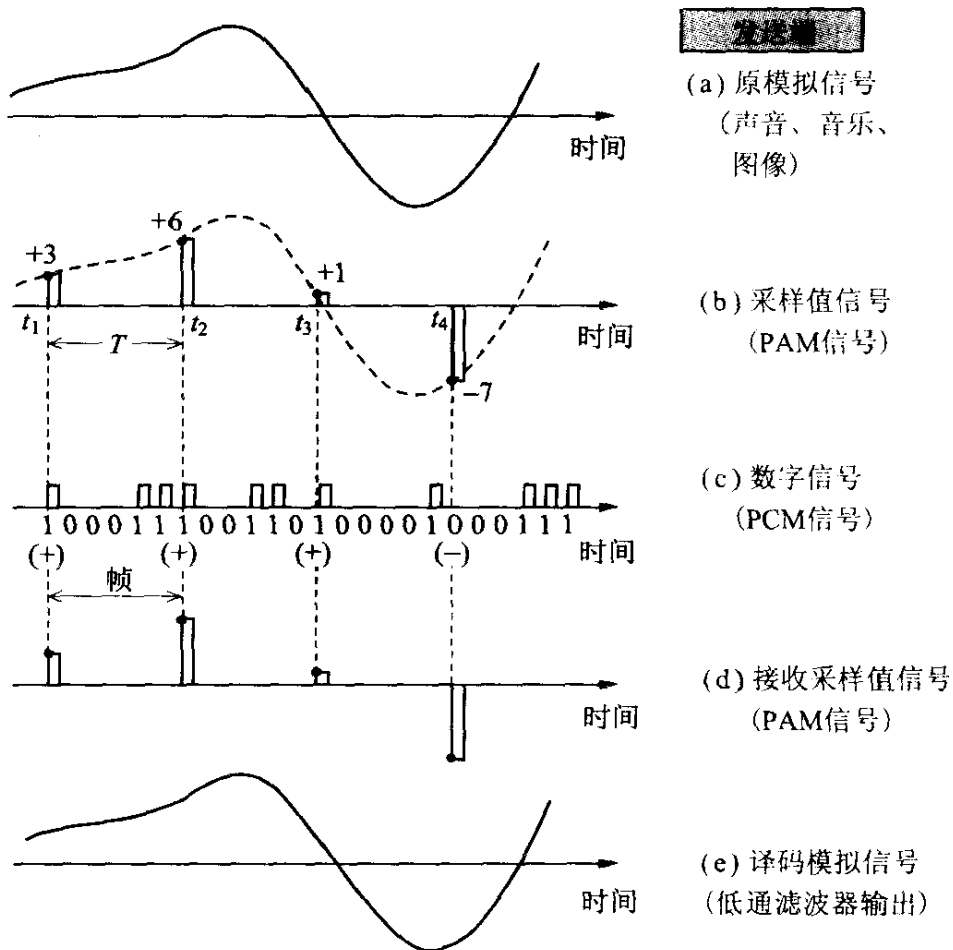


图 1.5 PCM 的基础



二进制编码,即如图 1.5(c)所示,首先在正(+),负(-)处分别设置“1”、“0”,然后对被检出的振幅绝对值进行二进制编码。例如, $t_1$ 时刻采样值为3的二进制数为“00011”,6的二进制数为“00110”,1的二进制数为“00001”,7的二进制数为“00111”,等等。这样最终 $t_1$ 时刻采样值为+3的二进制编码为“100011”, $t_2$ 时刻采样值为+6的二进制编码为“100110”, $t_3$ 时刻采样值为+1的二进制编码为“100001”, $t_4$ 时刻采样值为-7的二进制编码为“000111”,最后在发送端把这些二进制编码在时间轴上排列后传输出去。

假设接收端准确无误地收到了信号序列,那么如图 1.5(c)所示,若每一定时间段的信号序列(帧,frame)的最初值为1,那么设置其为正(+)码,若是0,则设置其为负(-)码,然后根据其余的5位二进制数做出与其值等幅度的脉冲序列,即 PAM 信号(参见图 1.5(d))。如果把把这个 PAM 信号通过低通滤波器,就恢复到原来的模拟信号(参见图 1.5(e))。

以图 1.5 为例,前面讲述了对 PAM 信号以正负码和 5 位二进制数进行编码的情况。此时,把正负码和二进制位合起来的“6 位编码”的形式代替了模拟信号。例如,利用电话等传输声音等模拟信号时,其信号以 8 位二进制编码的形式表现,这是 ISDN 的世界基本编码标准。表 1.1 中列出了对应于声音信号幅度(PAM 信号的脉冲幅度)的 8 位二进制编码。声音信号包括正负值有 256 个编码,但是为简单起见,表中只列出了 PAM 信号的代表值。

表 1.1 PAM 信号与 PCM 信号之间的关系(8 位标准信号)

PAM 信号	PCM 信号							
+127	1	1	1	1	1	1	1	1
+ 64	1	1	0	0	0	0	0	0
+ 32	1	0	1	0	0	0	0	0
+ 16	1	0	0	1	0	0	0	0
+ 8	1	0	0	0	1	0	0	0
+ 4	1	0	0	0	0	1	0	0
+ 2	1	0	0	0	0	0	1	0
+ 1	1	0	0	0	0	0	0	1
+ 0	1	0	0	0	0	0	0	0
- 1	0	0	0	0	0	0	0	1
- 2	0	0	0	0	0	0	1	0
- 4	0	0	0	0	0	1	0	0
- 8	0	0	0	0	1	0	0	0
- 16	0	0	0	1	0	0	0	0
- 32	0	0	1	0	0	0	0	0
- 64	0	1	0	0	0	0	0	0
-127	0	1	1	1	1	1	1	1