

无线电通信设备原理 与系统应用

Device Principles and System Applications
of Radio Communications

曹学军 主编



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

本书结合我国短波、超短波电台装备现状和未来无线电通信技术的发展,阐述了无线电通信技术和通信设备的现行体制、设备原理、关键技术、典型电路以及规格、指标、要求等,并突出了数字频率合成器、短波自适应、跳频通信、软件无线电等高新技术与装备,基本上反映了现代短波通信的概况。

本书既可作为高等工科学校电子通信类专业的教材,也可作为通信工程技术人员参考书。

图书在版编目(CIP)数据

无线电通信设备原理与系统应用/曹学军主编. —北京:机械工业出版社, 2006.12

ISBN 7-111-20422-0

I. 无… II. 曹… III. ①无线电通信-通信设备-理论②无线电通信-通信设备-应用 IV. TN92

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2006) 第 141300 号

机械工业出版社 (北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

责任编辑:张俊红 版式设计:张世琴 责任校对:陈延翔

封面设计:刘艳涛 责任印制:李妍

唐山丰电印务有限公司印刷

2007 年 1 月第 1 版第 1 次印刷

184mm × 260mm · 24.25 印张 · 586 千字

0 001—4 000 册

定价:40.00 元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

销售服务热线电话:(010) 68326294

购书热线电话:(010) 88379639 88379641 88379643

编辑热线电话:(010) 88379768

封面无防伪标均为盗版

前 言

本书结合我国短波、超短波电台装备现状和未来无线电通信技术的发展,阐述了无线电通信技术和通信设备的体制、技术以及规格、指标、要求等,设备、技术与系统并重,但稍倾斜于系统,而较少涉及具体的元器件和电路形式。

全书共分为12章。第1章为通信基础知识,介绍了通信、通信系统及其性能指标;第2章为无线电信道与短波通信设备,重点讨论了短波电离层传播的一些主要问题和短波通信设备的一些基础知识;第3~7章详细讨论了无线电通信设备的系统组成、原理框图、关键技术与典型电路以及主要性能指标等;第8章为高频自适应通信,讨论了频率预测与频率自适应技术,对其他类型的自适应技术也作了简单介绍;第9章为跳频通信,着重讨论了跳频通信的基本概念、系统组成与工作原理;第10章简介了无线IC数字通信系统;第11章介绍了软件无线电的概念由来、体系结构、关键技术及发展应用情况;第12章重点讨论了短波信道对数据信号传输的影响以及为克服这种影响在短波通信系统中广泛采用的一些技术,并讨论了其在数据链领域的应用实践。

本书既保留了许多当前比较成熟或长期以来行之有效的传统技术,也介绍了目前发展迅速或者有发展前途的新技术,既可作为高等工科院校电子通信类专业的教材,也可作为通信工程技术人员的参考书。需要指出的是,阅读本书需要一定的数学基础。书中部分公式未做推导,但不影响对其结果的理解和应用。

在编写中,本书既兼顾到基础知识、基本技能学习与训练的延续,又特别突出数字频率合成器、短波自适应、跳频通信、数据链、软件无线电等高新技术与装备,理论联系实际,力求在内容上保持完整性和先进性,在使用中做到实用化和通俗化,基本上反映了现代短波通信的概况。使用时,可根据不同的教学要求灵活讲授。

本书由曹学军副教授统编定稿。

按章节顺序,各章的执笔人为:第1~2、4~5、8~12章及第7章的部分章节为曹学军副教授,第3章为钱宗峰讲师,第6章及第7章的部分章节为滕贺颖讲师。曹学军副教授绘制了书中绝大部分插图,刘艳涛副教授对本书进行了文字修订与整理工作,肖凤亭副教授对本书的编撰给予了帮助指导,任小青讲师负责第12.6节的文字录入工作。

此外,本书的编写得到了总参通信训练基地有关业务部门和领导的大力支持与帮助指导,在此一并表示谢意。

由于编者水平有限,加之时间仓促,书中难免存在错误和不足之处,敬请广大读者批评指正。

作 者

2006年10月

目 录

前言

第 1 章 绪论 1

1.1 通信与通信系统 1

1.1.1 通信的基本概念 2

1.1.2 通信系统的基本模型 13

1.1.3 通信的组织方式、传输技术与线路结构 16

1.2 通信系统的主要性能指标 18

1.2.1 信源与信息测度 18

1.2.2 信道与信道容量 27

1.2.3 通信系统的有效性指标 29

1.2.4 通信系统的可靠性指标 31

第 2 章 无线电信道与无线电通信设备 33

2.1 无线电信道 33

2.1.1 电磁波及其传播 33

2.1.2 无线电波 36

2.1.3 无线电干扰 40

2.1.4 短波电离层传播的基本特性 41

2.2 无线电通信设备 47

2.2.1 无线电通信设备的系统组成 47

2.2.2 无线电电台的分类 47

2.2.3 无线电通信设备的主要技术指标 48

2.2.4 短波与超短波通信系统的特点 54

第 3 章 调制与解调 56

3.1 引言 56

3.1.1 调制 56

3.1.2 解调 58

3.1.3 数字调制解调器的设计目标 59

3.2 模拟调制与解调 59

3.2.1 模拟线性调制 59

3.2.2 模拟角度调制 66

3.2.3 模拟调制的应用 69

3.3 正弦载波数字调制系统 70

3.3.1 引言 70

3.3.2 数字振幅调制 70

3.3.3 数字频率调制 73

3.3.4 数字相位调制 79

3.3.5 正交振幅调制 91

3.4 连续相位路径调制 94

3.4.1 引言 94

3.4.2 线性连续相位调制 95

3.4.3 非线性连续相位调制 100

3.4.4 调制前高斯滤波的 MSK 调制 102

3.5 网格编码调制 106

3.5.1 引言 107

3.5.2 TCM 编码 107

3.5.3 TCM 译码 112

3.5.4 TCM 发展 112

3.6 频分复用与正交频分复用 112

3.6.1 频分复用 112

3.6.2 正交频分复用 113

第 4 章 反馈控制电路 120

4.1 引言 120

4.2 反馈控制电路的原理与分析 121

4.2.1 自动增益控制电路 121

4.2.2 自动频率控制电路 128

4.3 锁相环路 129

4.3.1 工作原理 130

4.3.2 基本部件及其数学模型 131

4.3.3 性能分析 134

4.3.4 典型应用 136

第5章 高频小信号放大器 140

5.1 引言 140

5.1.1 分类 140

5.1.2 性能指标 140

5.2 选频网络 142

5.2.1 单振荡谐振回路 142

5.2.2 耦合回路 143

5.2.3 机械滤波器 144

5.2.4 石英晶体滤波器 145

5.2.5 陶瓷滤波器 147

5.2.6 表面声波滤波器 148

5.2.7 薄膜体声滤波器 150

5.3 晶体管高频小信号等效
电路与参数 150

5.3.1 形式等效电路 150

5.3.2 混合 π 等效电路 152

5.3.3 晶体管的高频参数 152

5.4 高频小信号谐振放大器 153

5.4.1 单级单调谐回路谐振放大器 153

5.4.2 多级单调谐回路谐振放大器 156

5.5 谐振放大器的稳定性与
稳定措施 156

5.5.1 谐振放大器的稳定性 156

5.5.2 单向化 159

5.6 集中选频放大器 161

5.6.1 集中滤波器 161

5.6.2 高频集成电路放大器 161

第6章 高频谐振功率放大器 ... 163

6.1 引言 163

6.2 工作原理与特性 164

6.2.1 设计原则 164

6.2.2 电路组成 165

6.2.3 工作原理 165

6.3 工作状态分析 168

6.3.1 近似折线分析 169

6.3.2 动态特性与负载特性 172

6.4 实际电路组成 175

6.4.1 直流馈电电路 175

6.4.2 输出、输入与级间耦合回路 ... 176

6.5 宽带功率放大与功率合

成技术 179

6.5.1 宽带功率放大技术 179

6.5.2 功率合成技术 182

第7章 频率合成 185

7.1 引言 185

7.1.1 频率合成的概念 186

7.1.2 频率合成方法的分类 186

7.2 频率合成器的主要技
术指标 191

7.2.1 频率范围和频率间隔 191

7.2.2 频率转换时间 191

7.2.3 频率稳定度与准确度 192

7.2.4 频谱纯度 192

7.3 谐波发生器 192

7.3.1 实现方案 192

7.3.2 可被利用的最高谐波次数 194

7.3.3 输出脉冲宽度 195

7.3.4 固定频率网的产生 195

7.4 频率标准 197

7.4.1 石英晶体振荡器 197

7.4.2 三端式振荡器 201

7.5 数字锁相式频率合成器 206

7.5.1 单环与双环数字锁相式频
率合成器 2067.5.2 数字锁相式频率合成器的
典型电路 208

7.5.3 集成单片频率合成器 210

7.6 直接数字式频率合成器 211

7.6.1 DDS的基本原理 211

7.6.2 直接数字式频率合成器的
应用 214**第8章 自适应通信** 216

8.1 引言 216

8.1.1 频率管理与预测 217

8.1.2 频率长期预测的局限性 224

8.2 频率自适应通信原理 225

8.2.1 频率自适应通信的概念和
实现方法 225

8.2.2 短波自适应通信的功能与原理	230	10.2.1 间接调制发射机的结构与原理	299
8.2.3 短波自适应通信的协议与标准	238	10.2.2 直接调制发射机的结构与原理	299
8.2.4 短波自适应通信的特点与发展	246	10.2.3 PLL 调制发射机的结构与原理	300
第 9 章 跳频通信	251	10.3 无线 IC 数字通信接收机	302
9.1 引言	251	10.3.1 超外差接收机的结构与原理	302
9.1.1 扩频通信的基本概念	251	10.3.2 零中频接收机的结构与原理	303
9.1.2 扩频通信的理论基础	252	10.3.3 宽带零中频接收机的结构与原理	304
9.1.3 处理增益和抗干扰容限	252	10.3.4 数字中频接收机的结构与原理	304
9.1.4 扩频通信的种类	253	第 11 章 软件无线电	306
9.1.5 扩频通信的特点	266	11.1 引言	306
9.2 跳频通信的基本概念	268	11.2 软件无线电的基本概念与结构	307
9.2.1 跳频通信	268	11.2.1 软件无线电的基本概念	307
9.2.2 跳频图案与跳频频率表	268	11.2.2 软件无线电的体系结构	308
9.2.3 伪随机编码	270	11.3 软件无线电的关键技术	309
9.3 跳频通信的系统组成与工作原理	272	11.3.1 开放式总线结构	310
9.3.1 跳频通信系统的组成	272	11.3.2 宽带/多频段天线	310
9.3.2 跳频通信的工作原理	273	11.3.3 宽带射频前端和中频处理技术	310
9.3.3 跳频频率合成器	274	11.3.4 高速模数及数模变换部分	311
9.3.4 跳频通信的解跳和解调	277	11.3.5 高速数字信号处理器	313
9.3.5 跳频通信的同步	282	11.4 软件无线电的实际应用	314
9.4 跳频通信系统的性能及抗干扰分析	288	11.4.1 SPEAKeasy 系统	314
9.4.1 跳频通信系统的抗干扰性能分析	288	11.4.2 联合战术无线电系统	315
9.4.2 跳频通信系统的技术指标	291	11.4.3 数字模块式电台	320
9.5 跳频通信的特点	292	11.4.4 德国软件无线电 M3XR 系列电台	322
9.5.1 跳频通信的优点	292	11.4.5 其他国家的软件无线电计划	323
9.5.2 跳频通信的缺点	293	11.5 软件无线电的发展趋势	323
第 10 章 无线 IC 数字通信系统	294	第 12 章 无线数据通信	325
10.1 引言	294	12.1 引言	325
10.1.1 VLSI 的技术特点	294	12.1.1 数据通信的基本概念	325
10.1.2 VLSI 器件的生产过程	295		
10.1.3 VLSI 面临的主要问题	296		
10.1.4 VLSI 的设计方法	297		
10.2 无线 IC 数字通信发射机	298		

12.1.2 无线数据通信系统模型	326	12.3.5 群(帧)同步	355
12.1.3 无线信道特性对数据传输的影响	327	12.4 均衡	363
12.1.4 无线数据通信系统中的主要抗干扰措施	327	12.4.1 均衡的基本概念	364
12.2 差错控制及其编码	328	12.4.2 时域均衡算法的实现	364
12.2.1 差错控制	329	12.5 分集	369
12.2.2 差错控制编码	330	12.5.1 分集概念	369
12.2.3 常见的差错控制编码	331	12.5.2 分集原理	370
12.3 同步	336	12.6 无线数据通信新样式——数据链	372
12.3.1 同步的作用	336	12.6.1 数据链的起源	373
12.3.2 同步系统的分类	336	12.6.2 数据链的定义与特点	374
12.3.3 载波同步	337	12.6.3 数据链的构成与类型	376
12.3.4 位(码元)同步	349	参考文献	379

第1章 绪 论

按照信息交流方式与通信技术的不同,人类通信历史可划分为5个阶段。第1阶段,通过人力、畜力、烽火台等原始通信手段传递声、光信息;第2阶段,发明文字并开始邮政通信;第3阶段,以发明印刷术为标志;第4阶段,电报、电话、广播等相继涌现,电信技术迅猛发展;第5阶段,随着社会对信息传递、储存、处理和应用的的需求愈发高涨,通信与计算机已经而且必将更加有机地结合起来,现代通信系统成为了信息时代的生命线。

事实上,从中国商周时期的“周幽王烽火戏诸侯以博美人笑”到公元968年电话雏形——“竹信”的发明、从“漂流瓶”到人类历史上第一份电报,借助人类智慧和科技力量,通信不仅得到了飞速发展,而且成为了推动人类社会文明进步与发展的强大动力。特别是近150年来,各种电信系统的应用更是呈指数状增加。

1838年,摩尔斯(S.Morse)发明有线电报;1867年,麦克斯韦(J.C.Maxwell)证明电磁辐射方程,奠定了无线电通信的理论基础;1876年,贝尔(A.G.Bell)发明电话;1888年,赫兹(H.R.Hertz)利用感应线圈中的振荡电流产生了电磁波;1896年,马可尼(M.G.Marconi)发明无线电报,开辟了无线电通信的发展道路;1906年,德福雷斯特(Lee De Forest)发明真空三极管,促进了通信设备的飞速发展;1918年,调幅无线电广播、超外差式接收机问世;1936年,调频无线电广播开播;1937年,里夫斯(A.H.Reeves)提出脉冲编码调制(PCM)原理,用脉冲组合传送语音信息;1938年,电视广播开播;1940~1945年,雷达与微波通信系统大量涌现;1948年,发明晶体管;1956年,越洋电缆敷设;1957年,发射人造卫星;1958年,发射通信卫星;1960年,发明激光;1961年,发明集成电路;1962年,发射同步通信卫星,脉冲编码调制进入实用阶段;1960~1970年,彩色电视问世,高速数字电子计算机出现,数字传输理论与技术得到发展;1970~1980年,大规模集成电路、微处理器、程控交换机、光纤通信系统等快速发展。

目前,由于技术进步以及市场需求,无线通信(尤其是移动通信)取得了突出成就,互联网已成为全球信息高速公路事实上的平台,大多数经济发达国家的电信垄断行将消亡,并向着非管制化与开放竞争方向发展,电信从以本地团体与国内服务为主转变成以不确定的和低成本连接为主,电信工业正在将通信、新闻出版、视听娱乐、计算机及其软件等产业融为一体,并进入一个全球范围内的、综合的数字化ICE(Information Communication & Entertainment, 信息通信与娱乐)网络时代。

1.1 通信与通信系统

通信(Communication)是指通过某种方法或手段在不同位置、不同进程之间传递含有信息的过程,而通信所需的一切技术设备、器(构)件的总和就是**通信系统**。

1.1.1 通信的基本概念

1.1.1.1 信息与信息技术

1. 信息

在客观世界中,任何事物都不是孤立存在的,都是与其他事物相互联系的。而事物之间的联系,本质上就是物质、能量和信息的交流,信息是除物质、能量之外存在于客观世界的第三要素。同物质、能量一样,信息是人类社会“取之不尽、用之不竭”的重要战略资源,在人类认识社会和改造世界的过程中发挥着越来越重要的作用。

信息(Information)是指“音信消息”,即“生活主体同外界客观之间有关情况的通报”,是通过一定载体反映出来的、表征客观事物与方式及其相互联系程度和规律的陈述,是关于客观事物运动状态或其存在方式不确定性的、抽象的、本质的描述。

信息具有可量度、可识别、可利用、可共享、可转换、可存储、可压缩、可处理、可传递、可再生等特性,其传递是人类社会各种活动中不可缺少的重要环节。

按照不同的准则和方法,可对信息进行分类,以便对信息进行更加科学的度量和确切的描述。通常,按信息地位的不同,信息可分为客观信息(如客体初始信息、作用效果信息、活动环境信息等)和主观信息(如决策信息、指令信息、控制信息等);按信息应用部门的不同,信息可以分为工业信息、农业信息、政治信息、经济信息、军事信息等;按信息源性质的不同,信息又可分为语音信息、图像信息、文字信息、数据信息等。

但是,信息并不同于知识,信息是知识的原料,而知识是系统化了的信息。

2. 信息技术

信息技术是指人类开发和利用信息的手段,包括信息的产生、交换、存储、传递、处理、显示、识别、控制和利用等技术。

现代信息技术主要指电子信息技术,包括计算机技术、通信技术、遥测技术、人工智能技术和控制技术等。通信技术、计算机技术及人工智能技术是整个信息技术的核心。

1.1.1.2 信号

信号(Signal),是系统物理分布的一种体现,既是消息的运载工具,亦是所传输消息的具体表现形式(例如与之相对应的某种函数或电磁编码数据)。

通常,按照物理属性,信号可分为电信号与非电信号;按照分布性质,信号可分为确定性(规则或确知, Deterministic)信号与非确定性(随机, Random)信号;按照时间范围,信号可分为因果信号、非因果信号与反因果信号;按照功率能量有限与否,信号可分为功率(有限)信号、非功率信号、能量(有限)信号与非能量信号;按照自变量周期,信号可分为周期信号与非周期信号;按照自变量数目,信号可分为一维信号与多维信号;按照自变量取值连续与否,信号可分为连续时间信号、离散时间(抽样)信号、模拟信号和数字信号。

连续时间信号,简称**连续信号**,是指定义域(如时间变量)连续变化而值域(如幅度)可以是连续的信号,也可以是不连续(但应具有有限个间断点)的信号,如图1-1a所示。

离散时间信号,简称**离散信号**,是指定义域(如时间变量)离散的信号,它仅在一些离散时刻有定义而在其余时刻无定义,如图1-1b所示。离散时刻的间隔可以是常数,也

可以是变量。

序列 (Series), 是指只在均匀离散时刻有定义的离散信号。

模拟信号 (Analog Signal), 是指代表消息的信号及其参数 (如幅度、频率或相位等) 随着消息连续变化的信号, 如图 1-1 所示。它在幅度上连续, 但在时间上则可以连续也可以不连续。例如时间连续变化的语音、电视图像信号以及时间不连续变化的脉冲幅度调制 (PAM) 信号、脉冲相位调制 (PPM) 信号、脉冲宽度调制 (PWM) 信号等。

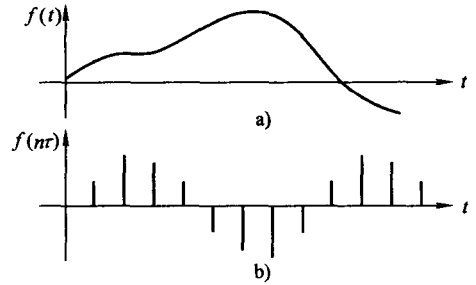


图 1-1 模拟信号示意

a) 连续信号 b) 离散信号

数字信号 (Digital Signal), 是指在定义域 (如时间变量) 和值域 (如幅度) 上均离散的信号, 如图 1-2 所示, 例如电报信号、数字仪表的测量显示结果等。

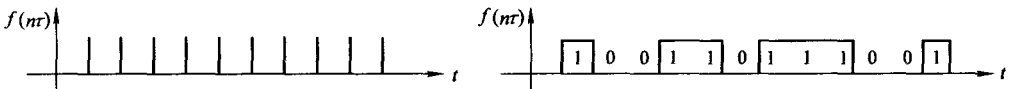


图 1-2 数字信号示意

模拟信号的数字化, 通常需要以下三个步骤:

第一步, 对模拟信号进行“抽样或采样” (Sampling), 在时间上将其离散化, 如图 1-3 所示。也就是说, 对于最高频率为 f_m 的一个连续信号 $F(t)$, 通过与抽样频率为 $f_s (\geq 2f_m)$ 的一个抽样脉冲 $s(t)$ 相乘, 取出其幅值即足够多的瞬时样值 (Sample) 序列以代表 $F(t)$ 。

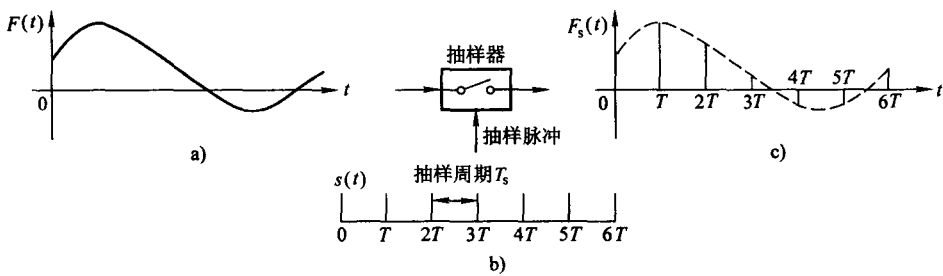


图 1-3 模拟信号被均匀抽样 (Uniform Sampling) 的过程

a) 被抽样的模拟信号 b) 抽样过程 c) 抽样后所形成的脉幅调制 (PAM) 信号

第二步, 对抽样信号进行“量化” (Quantize), 在幅度上将其离散化。即用量化级 (Quantization Interval, 即一个量度单位, 用 Δ 表示) 去度量抽样信号幅度的瞬时样值, 以测定它有多少量化级; 而对于不足一个量化级的样值, 通常取其中间值为 0.5Δ , 由此产生的误差就称作量化误差 (Quantization Error), 且量化误差 $e(t) = \text{量化值} - \text{样值} \leq \pm 0.5\Delta$ 。

如图 1-4 所示, 幅度值为 $-4\Delta \sim +4\Delta$ 的样值分为 8 个单位, 每个单位一个量化级

即 Δ 。可以看出，样值为 3.8，量化后为 3.5；样值为 2.7，量化后为 2.5；……

这里，在样值幅度范围内量化间隔相等的均匀量化会使小信号所对应的量化噪声大于大信号所对应的量化噪声。不过，通过调低小信号量化间隔的“非均匀量化”可改善之。

第三步，对时间和幅度上都均已离散化的信号进行“编码”（Encode），完成脉冲编码调制（Pulse Code Modulation, PCM）的格式化过程。例如，对于图 1-4 所述的 8 个量化级，最简单的数字化表示则只需 3 位二进制码：用 1 位编码表示样值极性、用 2 位编码表示样值幅量化值。完成了编码过程之后，模拟信号就转换成了数字基带信号。

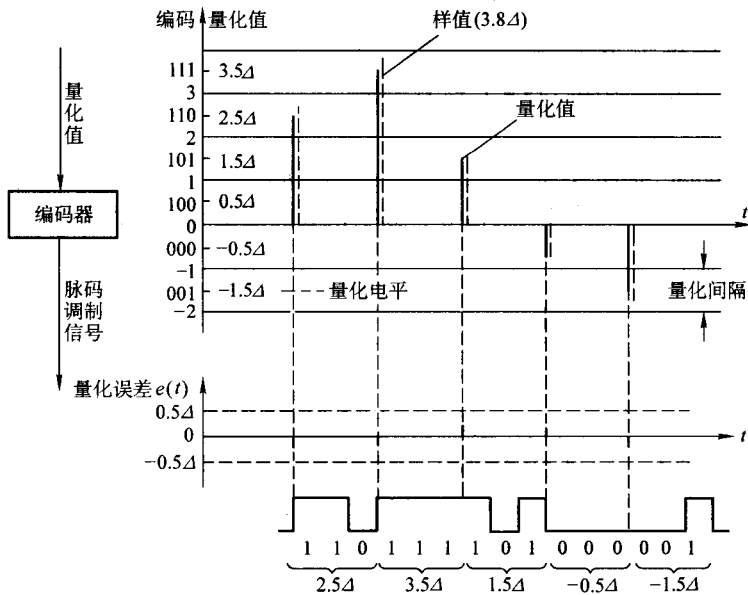


图 1-4 量化后的样值序列及其量化误差和编码

值得指出的是，样值幅度一定时，量化级数愈多，即量化级愈小，量化误差亦愈小。但量化级愈小，对应的编码位数也就愈多，这样既增加了设备的复杂性，又延长了编码的传输时间，故设计时应就量化和编码方案进行折中。

例如，在实时通信系统中，通常是不允许信号延时的。不管其样值由几位编码表示，传输时间均应一样。

于是，为获取高保真度，所需的量化级数愈多，则要求的传输速率就愈高，传输带宽亦会愈宽。

不过，在“伽利略”号宇宙飞船执行木星探测计划的过程中，几秒几分甚至几小时几天的传输信号延时对于其历经 14 年（1989~2003 年）的行程而言，则可忽略不计。此时，增加量化级数和提高保真度的代价就不再是增加带宽，而可以是时间上的延迟。

1.1.1.3 消息、字符、二进制数字与码元

1. 消息

消息 (Message)，是关于信息的具体表现形式，包含语音、文字、符号、数据、图像等多种形式；

文本消息 (Textual Message)，则是指字符序列。在数字传输中，一般是由有限符号集、

字母表中的符号或是一组数字组成的比特流。

消息的出现是随机的、无法预知的，而信息则包含在消息之中。

对收信者而言，消息的传递过程就是一个从不知到知、从不确定到确定的过程；一个预先确知的消息因不会带给接收者任何信息而失去了传递或通信的必要。

2. 字符

字符(Character)，是指某个字母表或符号集中的一个，可将文本映射成二进制数字序列，比特位则表示串行传输的顺序。目前，常用的字符编码有国际5号码、扩展二-十进制交换码、国际电报2号码、莫尔斯(Morse)码、霍尔瑞斯(Hollerith)码和默里(Murray)码等。

(1) 国际5号码(IA5) 这是一种7位二进制码，1963年由美国标准化协会作为美国信息交换用标准代码(American Standard Code for Information Interchange, ASCII)提出，后被国际标准化组织(ISO)及国际电报电话咨询委员会(CCITT)采纳，并成为一种CCITT.50建议(原V.3建议)推荐的国际通用的信息交换用标准代码，如图1-5所示。

(2) 扩展二-十进制交换码(Extended Binary Code Decimal Interchange Code, EBCDIC) 这是一种8位二进制码，有256个编码状态，一般只作为计算机的内部码使用，如图1-6所示。EBCDIC码的第8位 b_8 仅用以扩展功能，不能用作奇偶校验。

(3) 国际电报2号码(ITA2) 又称博多(Baudot)码，是一种5位二进制码，目前仅在某些低速数据通信系统中使用，是现在起止式电传电报通信中的标准电码(参见图1-7)。因其采用“字母(Letter)”与“数字(Figure)”转移控制码分别控制电传机产生“下移”、“上移”动作，从而可代表包括字母、数字、符号和操作控制符在内的58个字符，而不是 $2^5 = 32$ 个。不过，一旦某个转移控制码出错，将导致随后的码字含义改变，直至接收到下一个正确的转移控制码，影响十分严重。

(4) 莫尔斯(Morse)码 这是一种利用“点(短信号)”、“划(长信号)”及其“间隔(无信号)”的不同组合来表示数字、字母、标点和符号等的著名编码(见图1-8)。

1832年，在大西洋中航行的一艘邮船上，美国医生杰克逊(Jackson)关于电磁铁原理的讲述触动了41岁的美国画家莫尔斯(S.Morse)“用断续电流传输电磁信号、瞬息之间把消息传到千里之外”的梦想。1837年，莫尔斯设计出莫尔斯式电码；1844年5月24日，伴随着一连串的“嘀、嗒”声，莫尔斯在华盛顿国会大厦联邦最高法院会议厅里向64.4km外的巴尔的摩发出了人类历史上第一份电报“上帝创造了何等的奇迹!”。

3. 二进制数字与比特流

二进制数字(Binary Digit, 比特)，即字符“0”、“1”，是数字系统的基本信息单元。它采用以2为基数的计数体制，与信号的两种有意义状态相对应，其称呼和特征参数如表1-1所示。

比特流(Bit Stream)，通常称为数字基带信号或**基带信号(Baseband Signal)**，又称作**码型**，是指二进制数字(0和1)流或比特序列，是信息的数字波形(未经调制的脉冲电压或电流)表现形式。

Bits					5	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1
1	2	3	4		6	0	0	1	1	0	0	1	1	0	1
0	0	0	0	NUL	SP	!				@	P	,			p
1	0	0	0	SOH	DC1					A	Q	a			q
0	1	0	0	STX	DC2	"				B	R	b			r
1	1	0	0	ETX	DC3	#				C	S	c			s
0	0	1	0	EOT	DC4	\$				D	T	d			t
1	0	1	0	ENQ	NAK	%				E	U	e			u
0	1	1	0	ACK	SYN	&				F	V	f			v
1	1	1	0	BEL	DTB	,				G	W	g			w
0	0	0	1	BS	CAN	(				H	X	h			x
1	0	0	1	HT	EM	)				I	Y	i			y
0	1	0	1	LF	SUB	*				J	Z	j			z
1	1	0	1	VT	ESC	+				K	[	k			{
0	0	1	1	FF	FS	,				L	\	l			
1	0	1	1	CR	GS	-				M	]	m			}
0	1	1	1	SO	RS	.				N	^	n			~
1	1	1	1	SI	US	/				O	_	o			DEL

设备控制1
设备控制2
设备控制3
设备控制4
否确认
同步空闲
传输结束
取消
媒介结束
代替
取消
文件分隔
组分隔
记录分隔
单元分隔
空格
删除

DC1
DC2
DC3
DC4
NAK
SYN
ETB
CAN
EM
SUB
ESC
FS
GS
RS
US
SP
DEL

空或全
报头开始
文本开始
文本结束
传输结束
加密
确认
铃声或报警
退格
水平制表
换行
垂直制表
走低控制
回车
移出
移入
数据链路取消

NUL
SOH
STX
ETX
EOT
ENQ
ACK
BEL
BS
HT
LF
VT
FF
CR
SO
SI
DLE

图 1-5 用于信息交换的 7 比特 ASCII 码 (共 128 个字符)
注: 有时会修改现有的字符编码以用于特殊场合, 例如 7 比特 ASCII 码增加一位后可检测差错, 压缩一位后则仅提供 64 个字符。

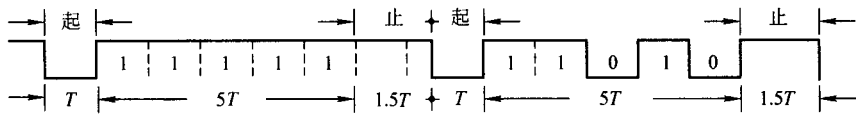


图 1-7 起止式电传电报信号 (图中, T 为二进制码元的宽度)

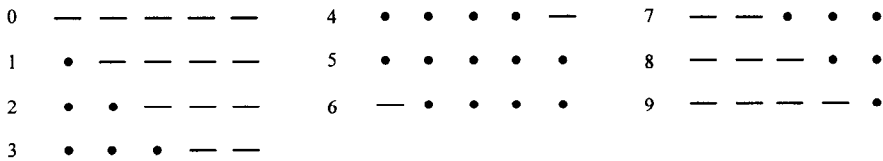


图 1-8 莫尔斯码的代码符号 (0~9)

表 1-1 CCITT 对二进制信号的建议规定

	数字“0”状态 A 空号 (Space)	数字“1”状态 Z 传号 (Mark)
单流传输	无电流	有电流
双流传输	负电流	正电流
穿孔纸带	无孔	有孔
“起”、“止”信号	“起”信号	“止”信号
调幅信号	不发单音	发单音
调频信号	发高频	发低频
有参考相位的调相信号	与参考相位反相	与参考相位同相
差动两相调制	不倒相	倒相

基带信号的种类繁多,一般可分为不归零 (NRZ)、归零 (RZ)、相位编码和多电平二进制等。其中, NRZ 码分为 NRZ-L (L 为电平)、NRZ-M (M 为传号) 和 NRZ-S (S 为空号) 码等。RZ 码分为单极性 RZ、双极性 RZ 和 RZ-AMI 码等,主要用于基带数据传输和磁带记录等。相位编码则包括 $bi-\phi-L$ 码、 $bi-\phi-S$ 码、 $bi-\phi-M$ 码和延迟调制码等,主要用于磁带记录、光通信和卫星遥测等。根据码元幅度取值不同,基带信号又可分为二元码、三元码和多元码等。

(1) 二元码 二元码幅度取值只有 1、0 两个,在电话应用中则称作线路码 (见图 1-9)。

1) 单极性不归零 (NRZ-L) 码,又称作单流波形。它用一个电平 (如高电平) 代表二进制数 1,而另一个电平 (如低电平或零电平) 代表二进制数 0,并在整个码元期间电平保持不变,可应用于数字逻辑电路中。

2) 双极性 NRZ 码,又称作双流波形。它用一个电平 (如正电平) 代表二进制数 1,而另一个电平 (如负电平) 代表二进制数 0,并在整个码元期间电平保持不变,可用于基带信号传输或用作接口信号。

3) 单极性 RZ 码,用半个比特宽度的脉冲代表 1,没有脉冲代表 0。

上述码型不具备检错能力,其频谱中含有丰富的低频乃至直流成分,且当信息中包含连续“1”或“0”时,因信号中不出现跳变而导致接收端无法从中获取定时同步信息。因此,通常只用于机内或距离很近的信息传递。

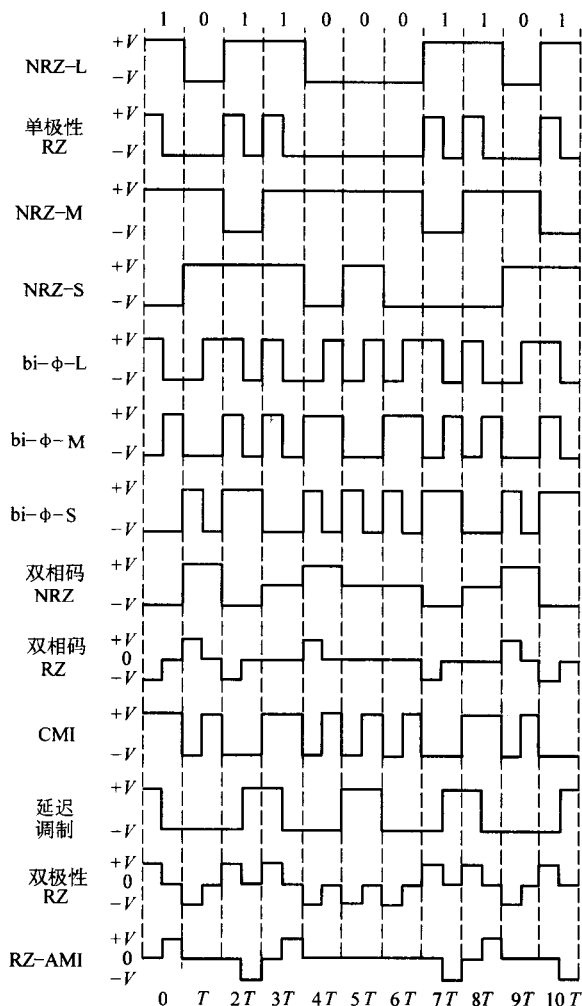


图 1-9 基带信号二进制与三元码的波形

4) 数字双相 (Digital Biphase) 码又称作分相 (Split-phase) 码或曼彻斯特 (Manchester) 码, 可通过 NRZ-L 码与定时信号模二和产生。其中:

bi-φ-L (bi-phase-Level) 码的前半个比特宽度有脉冲, 且后半半个比特宽度无脉冲, 代表二进制数 1; 而前半个比特宽度无脉冲, 且后半半个比特宽度有脉冲, 代表二进制数 0。

bi-φ-M (bi-phase-Mark) 码的每个码元持续时间开始时电平都发生跃变, 如果在半个码元持续时间后电平再次跃变, 则代表 1; 而在整个码元持续时间内电平不发生跃变, 则代表 0。

bi-φ-S (bi-phase-Space) 码的每个码元持续时间开始时电平发生跃变, 如果在整个码元持续时间内电平不发生跃变, 则代表 1; 而在半个码元持续时间后电平再次跃变, 则代表 0。

双相不归零码中, 0→1 或 1→0 数据转换用脉冲极性的改变表示。如果数据保持不变, 则在整个码元持续时间内发送零电平; 双相归零码中, 1→0 或 0→1 转换时, 则生成半个码元持续时间的极性改变。如果数据保持不变, 则发送零电平。

数字双相码频谱中不存在直流分量,且定时同步信息不受信源统计特性的影响,但传输频带增加一倍,故通常适用于数据终端设备在以同轴电缆为介质的短距离传输。

5) 差分编码(Differential Encoding)又称为相对码,是用电平跳变与否来分别表示二进制数1和0。其电平只具有相对意义,而不存在绝对的对对应关系,故可用于解决相位键控同步解调中因接收端本地载波相位倒置时所引起的译码错误(即0、1倒置)。传号差分码(NRZ-M)用电平变化代表1(称为传号),而电平不变化代表0(称为空号),主要应用于磁带记录中;空号差分码(NRZ-S)则用电平不变化代表1,而电平变化代表0。

6) 传号反转(CMI)码^①,是交替地用“00”和“11”两位码组(即确定相位的一个周期方波)来表示二进制数1(或称为传号),而固定地用“01”码组来表示二进制数0。

CMI码频谱中不存在直流分量,其定时同步信息可由波形负跳变直接提取,且易于实现。因其既可检测传输误码,亦可克服数字双相码中存在的相位不确定问题,故被纳入CCITT建议,作为PCM四次群的接口码型,在传输速率低于8448kbit/s的光纤数字传输系统中,则被推荐为线路传输码型。

7) 延迟调制(Delay Modulation, DM)码即米勒(Milly)码,是用码元持续时间中心点出现跃变来表示二进制数1;而对于单个的0,则在码元持续时间内不出现电平跃变,且在相邻码元的边界处也不出现跃变;对于连续多个的0,在两个0码的边界处出现电平跃变。其最大宽度为两个码元周期,而最小宽度为一个码元周期,可检测传输误码或线路故障,常用于气象卫星及磁带记录和低速数据的基带数传机。

实际上,DM码是数字双相码经过一级触发器后得到的波形,是数字双相码的差分形式,可克服数字双相码中存在的相位不确定问题。

(2) 三元码 三元码幅度取值虽有+1、0、-1三个,但因其实实现时并不是将二进制数直接变为三进制数,而是某种特定的取代,故又称为准三元码或伪三元码,现被广泛地用作PCM的线路传输码型,如双极性RZ波形、传号交替反转(Alternate Mark Inversion, AMI)码、 n 阶高密度双极性码(HDB n)和 N 连0取代双极性码(BN $_{ZS}$)等。

1) 双极性RZ码,是用两个极性相反、宽度均为半个比特的脉冲分别代表二进制数1和0。这样,零态就作为第三种符号用以隔离码元,且每个比特时隙中都有脉冲。

2) 传号交替反转(RZ-AMI)码用于电话系统中,用幅度相等、正负交替的归零脉冲代表二进制数1,而用没有脉冲代表二进制数0,且脉冲宽度通常为码元周期的一半。

AMI码具有检错能力,其性能与信源统计特性相关,能量集中在频率为1/2码速处,且频谱中无直流分量,低频分量较小,形状随信息中传号率(即出现“1”的概率)而变化。

AMI码经全波整流变为二元RZ码后,可获取位同步信息。不过当信息中出现连“0”码(≥ 15 个)时,因电平跳变长时间不出现将影响到位定时信息的提取,故CCITT规定使用AMI码的同时加传定时信号,但其使用条件受限。此外,用特定码组即取代节替代固定长度的连“0”码,可得到目前流行的HDB n (连“0”数 $\leq n$)和BN $_{ZS}$ (连“0”数 $< N$)等码型。

① 在数字双相码和CMI码中,原始的二元信息在编码后都是用一组两位的二元码来表示的,因此又称为1B2B码。但在某些文献中,1B2B码则特指CMI码。